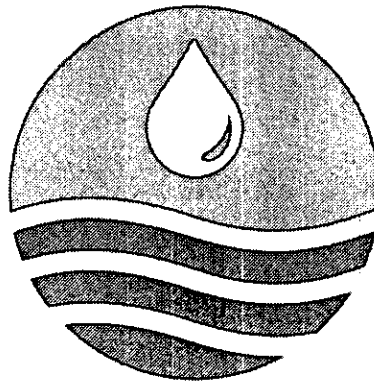




MOEAWRA0940206

水庫安全監測問題評析
與
非破壞性檢測技術應用之研究
Review of Monitoring Problems and Application of
Non-destruction Testing Methods for Evaluation Dam Performance



主辦機關：經濟部水利署

執行單位：國立交通大學

中華民國九十四年十二月



目錄

目錄	I
表目錄	V
圖目錄	VII
摘要	XIII
結論與建議	XV
1. 計畫說明	1-1
1.1. 計畫緣起及目的	1-1
1.2. 工作目標	1-1
1.3. 工作範圍	1-3
2. 水庫潛在破壞模式之分類與案例收集	2-1
2.1. 水庫破壞案例收集	2-3
2.1.1. 水庫破壞案例主要分類	2-3
2.1.2. 收集之知識庫相關主要統計	2-4
2.1.3. 意外分類與發生原因	2-6
2.2. 水庫潛在破壞模式之分類	2-8
2.3. 破壞模式及其對應異常現象	2-9
3. 各項監測儀器適用性之檢討	3-1
3.1. 分類之破壞模式與各監測物理量間之關聯性	3-1
3.2. 水庫安全監測問卷基本資料	3-2
3.3. 台灣地區各類型監測儀器裝置於水庫之數量及運作情形	3-2
3.3.1. 目視檢查	3-3
3.3.2. 水位高程及水壓量測	3-3
3.3.3. 滲流及滲漏	3-5
3.3.4. 位移	3-5
3.3.5. 應力應變	3-7



3.3.6.	溫度.....	3-8
3.3.7.	地震.....	3-8
3.3.8.	後拉式預力地錨載重.....	3-8
3.4.	監測儀器常用感測元件.....	3-9
3.4.1.	電學感測器.....	3-9
3.4.2.	機械式感測器.....	3-12
4.	現有水庫安全監測之問題評析.....	4-1
4.1.	監測系統及監測項目.....	4-2
4.2.	監測頻率之評估.....	4-3
4.3.	監測管理值之評估.....	4-5
4.4.	監測儀器維護程序.....	4-7
4.5.	監測資料分析.....	4-8
5.	各項非破壞性檢測方法適用性之探討.....	5-1
5.1.	適用性基本考量.....	5-1
5.2.	材料物理性質及常見非破壞性檢測方法.....	5-3
5.2.1.	材料物理性質.....	5-3
5.2.2.	常見非破壞性檢測方法.....	5-3
5.3.	適用性評估方法.....	5-5
6.	壩體重要檢測技術初步測試與監測化可行性評估.....	6-1
6.1.	應用檢測技術原理.....	6-1
6.1.1.	表面波震測 (Multi-station Analysis of Surface Wave, MASW)	6-1
6.1.2.	地電阻剖面影像法 (Electrical Resistivity Tomography, ERT) ...	6-3
6.1.3.	透地雷達 (Ground Penetration Radar, GPR)	6-5
6.2.	應用檢測技術新式儀器研發.....	6-7
6.2.1.	表面波震測新式受波器及低頻震源.....	6-7
6.2.2.	地電阻剖面影像法新式電極.....	6-8
6.3.	試驗場址.....	6-9



6.3.1.	石門水庫（土石壩及混凝土水工結構物）	6-9
6.3.2.	新山水庫（土石壩）	6-10
6.3.3.	仁義潭水庫（土石壩）	6-11
6.3.4.	大觀電廠（混凝土壩）	6-11
6.4.	石門水庫大壩測試過程與結果	6-11
6.4.1.	表面波震測	6-12
6.4.2.	地電阻剖面影像測試結果	6-14
6.5.	石門水庫廊道測試過程與結果	6-15
6.5.1.	折射震測測試結果	6-16
6.5.2.	地電阻剖面影像測試結果	6-17
6.6.	新山水庫測試過程與結果	6-18
6.6.1.	表面波震測測試結果	6-18
6.6.2.	地電阻剖面影像測試結果	6-20
6.7.	仁義潭水庫測試過程與結果	6-22
6.7.1.	表面波震測測試結果	6-22
6.7.2.	地電阻剖面影像測試結果	6-24
6.8.	大觀電廠測試過程與結果	6-26
6.8.1.	折射震測測試結果	6-26
6.8.2.	地電阻剖面影像測試結果	6-27
6.8.3.	透地雷達測試結果	6-27
6.9.	檢測方法監測化可行性評估	6-28
6.9.1.	新山水庫地電阻剖面監測作業規劃與測試結果	6-28
6.9.2.	地電阻剖面監測資料分析	6-28
6.9.3.	地電阻剖面監測自動化可行性探討	6-29
6.10.	綜合評析	6-30
7.	研擬監測與檢測改善方案及未來研究規劃	7-1
7.1.	蓄水庫監、檢測技術手冊編訂、案例研究與教育訓練	7-1



7.2. 蓄水庫壩體安全診斷工具與技術研發.....	7-2
8. 參考文獻.....	8-1
附錄一 水庫潛在破壞模式分類及案例	A-1
附錄二 水庫監測作業問卷彙整	B-1
附錄三 水庫安全監測儀器	C-1
附錄四 非破壞性檢測方法	D-1
附錄五 期初審查委員意見回覆	E-1
附錄六 期中審查委員意見回覆	F-1
附錄七 期末審查委員意見回覆	G-1



表目錄

表 2-1 混凝土壩意外分類及破壞原因 (ICOLD, 1984)	2-13
表 2-2 土石壩意外分類及破壞原因 (ICOLD, 1984)	2-15
表 2-3 水壩劣化破壞檢查方向分類 (ICOLD, 1984)	2-18
表 3-1 混凝土壩潛在破壞模式發生時可能異常之監測物理量	3-15
表 3-2 土石壩潛在破壞模式發生時可能異常之監測物理量	3-16
表 3-3 水位高程及水壓量測監測儀器	3-17
表 3-4 滲流及滲漏監測儀器	3-17
表 3-5 應力應變監測儀器	3-18
表 3-6 溫度監測儀器	3-18
表 3-7 位移監測儀器	3-19
表 4-1 既有蓄水庫建議之最少監測項目 (FERC, 2003)	4-13
表 4-2 中到高災害潛勢蓄水庫之典型監測頻率 (FERC, 2003)	4-14
表 5-1 混凝土壩潛在破壞模式發生時可能異常之檢測物理量	5-9
表 5-2 土石壩潛在破壞模式發生時可能異常之檢測物理量	5-10
表 5-3 常用之非破壞性檢測方法	5-11
表 5-4 常用之非破壞性檢測方法其選擇場址考量	5-12
表 5-5 常用之非破壞性檢測方法影響空間解析度與目標辨識能力之因素	5-13
表 6-1 常見之河川物質對 100 MHz 電磁波之電學性質 (Millard, et al, 1998)	6-33
表 6-2 石門水庫大壩測線B (殼層) 之測線參數	6-33
表 6-3 石門水庫大壩測線B (殼層) 施測當天背景參數	6-33
表 6-4 石門水庫大壩測線C (壩基) 之測線參數	6-34
表 6-5 石門水庫大壩測線C (壩基) 施測當天背景參數	6-34
表 6-6 石門水庫廊道折射施測參數	6-35
表 6-7 混凝土品質分類 (以P波為分類依據, Whitehurst (1951))	6-35
表 6-8 石門水庫廊道電探施測參數	6-35



表 6-9 新山水庫測線參數.....	6-36
表 6-10 新山水庫地電阻測線B (殼層) 之施測參數.....	6-36
表 6-11 新山水庫地電阻測線C (壩基) 之施測參數.....	6-36
表 6-12 新山水庫地電阻測線D (左側山脊) 之施測參數.....	6-36
表 6-13 仁義潭水庫表面波震測施測參數.....	6-37
表 6-14 仁義潭水庫地電阻測線A施測參數.....	6-37
表 6-15 仁義潭水庫地電阻測線B施測參數.....	6-38
表 6-16 仁義潭水庫地電阻測線C施測參數.....	6-38
表 6-17 大觀電廠廊道折射及電探測線施測參數.....	6-39
表 6-18 大觀電廠溢洪道B 測線GPR施測參數.....	6-39
表 6-19 新山水庫測線B (殼層) 之測線監測參數.....	6-40
表 6-20 新山水庫監測時的現地背景資料.....	6-40



圖目錄

圖 1-1 本計畫工作執行流程圖	1-5
圖 6-1 表面波震測基本原理.....	6-41
圖 6-2 表面波震測法震源與受波器位置示意圖	6-41
圖 6-3 表面波震測頻散曲線與反算分析.....	6-42
圖 6-4 表面波震測影像法案例-交大嘉義校區規劃調查	6-42
圖 6-5 各種地電阻試驗方式.....	6-43
圖 6-6 地電阻施作方式示意圖.....	6-43
圖 6-7 地電阻量測結果之pseudo-section	6-44
圖 6-8 地電阻有限元素法正算模式示意圖	6-44
圖 6-9 地電阻剖面影像法案例：寶二水庫試驗站地電阻試驗結果（上圖為量測結果，下圖為反算後之地層剖面）	6-45
圖 6-10 GPR探測示意圖（一）(Millard, et al, 1998)	6-46
圖 6-11 GPR探測示意圖（二）(Millard, et al, 1998)	6-46
圖 6-12 RAMAC GPR Control Unit CU II	6-47
圖 6-13 RAMAC GPR全罩式天線組.....	6-47
圖 6-14 新式落錘震源系統（一）.....	6-48
圖 6-15 新式落錘震源系統（二）.....	6-48
圖 6-16 新式受波器底座.....	6-49
圖 6-17 新式受波器	6-49
圖 6-18 新式銅板電極	6-50
圖 6-19 石門水庫大壩溢洪道下方廊道位置示意圖.....	6-50
圖 6-20 石門大壩測線佈設概況平面圖	6-51
圖 6-21 石門大壩測線佈設概況側視圖	6-51
圖 6-22 石門水庫大壩測線A（壩頂）壩體剪力波速剖面.....	6-52
圖 6-23 石門水庫大壩測線A（壩頂）壩體頻散曲線.....	6-52



圖 6-24 石門水庫大壩測線A (壩頂) 震盪歷時	6-53
圖 6-25 石門水庫大壩測線B (殼層) 壩體剪力波速剖面	6-54
圖 6-26 石門水庫大壩測線B (殼層) 壩體頻散曲線	6-54
圖 6-27 石門水庫大壩測線B (殼層) 震盪歷時	6-55
圖 6-28 石門水庫大壩測線C (壩基) 壩體剪力波速剖面	6-56
圖 6-29 石門水庫大壩測線C (壩基) 壩體頻散曲線	6-56
圖 6-30 石門水庫大壩測線C (壩基) 震盪歷時	6-57
圖 6-31 石門水庫大壩測線B地電阻影像剖面Wenner-Schlumberger	6-58
圖 6-32 石門水庫大壩測線B地電阻影像剖面Pole-Dipole	6-58
圖 6-33 石門水庫大壩測線B地電阻影像剖面Pole-Pole	6-58
圖 6-34 石門水庫大壩測線C (壩基) 地電阻影像剖面Wenner-Schlumberger.....	6-59
圖 6-35 石門水庫大壩測線C (壩基) 地電阻影像剖面Pole-Dipole	6-59
圖 6-36 石門水庫大壩測線C (壩基) 地電阻影像剖面Pole-Pole	6-59
圖 6-37 石門水庫溢洪道下方SU-R廊道折射震測測線佈設概況	6-60
圖 6-38 石門水庫溢洪道下方SU-R廊道折射震測採用震源 (左)	6-60
圖 6-39 石門水庫溢洪道下方SU-R廊道折射震測測線布置 (右)	6-60
圖 6-40 折測震測九點法震源佈設位置	6-61
圖 6-41 石門水庫SU-R廊道左側壁P波波速剖面圖	6-61
圖 6-42 石門水庫SU-R廊道右側壁P波波速剖面圖	6-61
圖 6-43 石門水庫SU-R廊道右側壁電探剖面圖-Wenner	6-62
圖 6-44 石門水庫SU-R廊道右側壁電探剖面圖Wenner-Schlumberger	6-62
圖 6-45 石門水庫SU-R廊道左側壁電探剖面圖-Wenner	6-63
圖 6-46 石門水庫SU-R廊道左側壁電探剖面圖Wenner-Schlumberger	6-63
圖 6-47 新山水庫壩體加高斷面圖.....	6-64
圖 6-48 新山水庫壩頂 (測線A) 之二維剪力波速剖面.....	6-64
圖 6-49 新山水庫壩頂 (測線A) 頻散曲線	6-65
圖 6-50 新山水庫壩頂 (測線A) 震盪歷時	6-65



圖 6-51 新山水庫殼層 (測線B) 之二維剪力波速剖面.....	6-66
圖 6-52 新山水庫殼層 (測線B) 頻散曲線	6-66
圖 6-53 新山水庫殼層 (測線B) 震盪歷時	6-67
圖 6-54 新山水庫壩基 (測線C) 之二維剪力波速剖面	6-68
圖 6-55 新山水庫壩基 (測線C) 頻散曲線	6-68
圖 6-56 新山水庫壩基 (測線C) 震盪歷時	6-69
圖 6-57 新山水庫地電阻測線B (殼層) 之佈線位置與滲漏位置	6-70
圖 6-58 新山水庫測線B (殼層) 地電阻影像剖面- Dipole-Dipole	6-70
圖 6-59 新山水庫測線B (殼層) 地電阻影像剖面- Wenner	6-71
圖 6-60 新山水庫測線B (殼層) 地電阻影像剖面- Wenner-Schlumberger.....	6-71
圖 6-61 新山水庫測線C (壩基) 之佈線位置.....	6-72
圖 6-62 新山水庫測線C (壩基) 地電阻影像剖面- Dipole-Dipole	6-72
圖 6-63 新山水庫測線C (壩基) 地電阻影像剖面- Wenner	6-73
圖 6-64 新山水庫測線C (壩基) 地電阻影像剖面-Wenner-Schlumberger	6-73
圖 6-65 新山水庫測線D (左側山脊) 之佈線位置.....	6-74
圖 6-66 新山水庫測線D (左側山脊) 之地電阻施測情形.....	6-74
圖 6-67 新山水庫測線D (左山脊) 地電阻影像剖面- Dipole-Dipole	6-75
圖 6-68 新山水庫測線D (左山脊) 地電阻影像剖面- Wenner	6-75
圖 6-69 新山水庫測線D (左山脊) 地電阻影像剖面-Wenner-Schlumberger.....	6-76
圖 6-70 仁義潭水庫測線平面配置圖	6-77
圖 6-71 仁義潭水庫大壩測線規劃立面圖	6-77
圖 6-72 仁義潭水庫右邊坡沉陷	6-78
圖 6-73 仁義潭水庫坡趾濕潤區	6-78
圖 6-74 仁義潭水庫壩頂自由落錘震源施測	6-79
圖 6-75 仁義潭水庫壩頂(測線A)之二維波速剖面.....	6-79
圖 6-76 仁義潭水庫壩頂(測線A)震盪歷時.....	6-80
圖 6-77 仁義潭水庫壩頂(測線A)頻散曲線.....	6-80



圖 6-78 仁義潭水庫殼層(測線B)之二維波速剖面.....	6-81
圖 6-79 仁義潭水庫殼層(測線B)震盪歷時.....	6-81
圖 6-80 仁義潭水庫殼層(測線B)頻散曲線.....	6-82
圖 6-81 仁義潭水庫壩基(測線C)之二維波速剖面.....	6-82
圖 6-82 仁義潭水庫壩基(測線C)震盪歷時.....	6-83
圖 6-83 仁義潭水庫壩基(測線C)頻散曲線.....	6-83
圖 6-84 仁義潭水庫測線A (壩頂) 電探剖面圖-Dipole – Dipole.....	6-84
圖 6-85 仁義潭水庫測線A (壩頂) 電探剖面圖-Wenner-Schlumberger.....	6-84
圖 6-86 仁義潭水庫測線A (壩頂) 電探剖面圖-Pole-Dipole.....	6-85
圖 6-87 仁義潭水庫測線A (壩頂) 電探剖面圖-Pole- Pole.....	6-85
圖 6-88 仁義潭水庫測線B (殼層) 地電阻影像剖面Dipole – Dipole.....	6-86
圖 6-89 仁義潭水庫測線B (殼層) 地電阻影像剖面Wenner-Schlumberger.....	6-86
圖 6-90 仁義潭水庫測線B (殼層) 地電阻影像剖面Pole-Dipole.....	6-87
圖 6-91 仁義潭水庫測線B (殼層) 地電阻影像剖面Pole-Pole.....	6-87
圖 6-92 仁義潭水庫測線C (壩基) 地電阻影像剖面Dipole – Dipole.....	6-88
圖 6-93 仁義潭水庫測線C (壩基) 地電阻影像剖面Wenner-Schlumberger.....	6-88
圖 6-94 仁義潭水庫測線C (壩基) 地電阻影像剖面Pole-Dipole.....	6-89
圖 6-95 仁義潭水庫測線C (壩基) 地電阻影像剖面Pole-Pole.....	6-89
圖 6-96 大觀電廠廊道折射震測測線佈置示意圖.....	6-90
圖 6-97 大觀電廠溢洪道立面圖.....	6-90
圖 6-98 大觀電廠溢洪道剖面圖.....	6-91
圖 6-99 大觀電廠廊道折射震測P波波速剖面.....	6-91
圖 6-100 大觀電廠廊道側壁電探剖面圖-Dipole-Dipole.....	6-92
圖 6-101 大觀電廠廊道側壁電探剖面圖-Wenner.....	6-92
圖 6-102 大觀電廠廊道側壁電探剖面圖-Wenner-Schlumberger.....	6-92
圖 6-103 大觀電廠溢洪道GPR測線量測原始影像.....	6-93
圖 6-104 大觀電廠溢洪道 V11 測線時間剖面之選取畫面.....	6-93



圖 6-105 大觀電廠溢洪道 GPR量測資料之時間剖面影像	6-94
圖 6-106 大觀電廠溢洪道 GPR量測資料之時間剖面 3D影像.....	6-95
圖 6-107 於新山水庫固定於測線B (殼層) 監測用之電極棒	6-95
圖 6-108 新山水庫測線B (殼層) 7/25 量測結果.....	6-96
圖 6-109 新山水庫測線B (殼層) 9/8 量測結果.....	6-96
圖 6-110 新山水庫測線B (殼層) 7/25 及 9/8 兩次比較之差異百分比	6-96
圖 6-111 新山水庫測線B (殼層) 10/3 量測結果	6-97
圖 6-112 新山水庫測線B (殼層) 7/25 及 10/3 兩次比較之差異百分比	6-97
圖 6-113 新山水庫測線B (殼層) 9/8 及 10/3 兩次比較之差異百分比	6-97
圖 6-114 地電阻自動化監測示意圖.....	6-98





摘要

由於台灣地區許多重要水庫隨著庫齡逐漸增加，監測儀器亦因屆齡損壞致安全監測資料逐漸減少，實有必要進行水庫安全監測之問題評析及提昇非破壞性檢測技術在水庫安全評估之應用，以強化水庫安全評估及平常安全檢查之落實。常見有關水庫安全監測之問題包括儀器損壞比例偏高及監測資料常出現不合理現象，以致監測資料無法真實回饋數值模擬進行綜合評估；在現地檢查方面，一般以目視檢查為主，而數值校核分析所需要之材料參數則必須採用破壞性之補充鑽探，未能有效利用非破壞性監測之技術，以檢查壩體內部之情形並提供數值分析所需之參數。本計畫之目的是依據蓄水庫潛在破壞模式分類，有系統的檢討水庫安全監測之相關問題，收集各種可行之非破壞性檢測方法，針對較重要的技術進行初步測試，並研擬監測與檢測改善方案及未來研究規劃。本計畫主要探討重點包括：

1. 水庫潛在破壞模式之分類與案例收集
2. 各項監測儀器適用性之檢討
3. 現有水庫安全監測之問題評析
4. 各項非破壞性檢測方法適用性之探討
5. 壩體重要檢測技術初步測試與監測化可行性評估
6. 研擬監測與檢測改善方案及未來研究規劃

本計畫工作結果，針對混凝土壩及土石壩，分類列舉潛在破壞模式並收集相關案例，並針對各項破壞模式之可能發生之異常現象進行表列。未來應針對個別蓄水庫進行詳細之潛在破壞模式分析並建立國內水庫管理單位可供比對異常現象之經驗知識庫。

為使各項監測儀器適用性之檢討及現有水庫安全監測之問題評析等兩項工作更切合實際，本計畫於 93 年 9 月對台灣地區（含金門）水庫管理單位監測作業進行概況進行問卷普查。本問卷共有全國各地 20 個水庫管理單位受訪並回收問卷，所轄水庫達 44 座。各項監測儀器適用性則依監測物理量（目視檢查、水位高程及水壓量測、滲流及滲漏、位移、應力應變、溫度、地震及後拉式預力地錨載重等），並基於所分類之潛在破壞模式對應之異常物理量，針對其常見儀器與感測器形式進行檢討。



現有水庫安全監測之問題則以業務性原則分類為方向進行評析，其項目包括監測系統及監測項目、監測頻率、監測管理值、監測儀器維護程序及監測資料分析。配合各作業考量及潛在破壞模式分類檢討需求，針對現有水庫安全監測計畫之規劃邏輯、作業原則及調查結果進行問題檢討並建議改善方案。

本計畫另一工作重點為探討各項非破壞性檢測方法適用性及針對壩體重要檢測技術初步測試與監測化進行可行性評估。非破壞性檢測方法依檢測直接可得或間接推估之材料物理性質，並與分類之潛在破壞模式對應，進行介紹。為確保選定之非破壞性檢測方法擁有最佳適用性，試驗規劃時必需考量檢測需求為何。本計劃據此建立一適用性評估邏輯，以利作為水庫安全評估主辦單位參考之技術文獻並作為後續改良發展及應用之參考。

在壩體重要檢測技術初步測試與監測化可行性評估部分，本計劃於石門水庫（壩體及廊道）、新山水庫（壩體）、仁義潭水庫（壩體）及大觀電廠（溢洪道及廊道）分別進行表面波震測、折射震測、地電阻影像剖面及透地雷達等檢測測試，並針對水壩其獨特環境研發新式配用設備。測試結果良好，可實際反映現地實際情況，應持續進行研究改良。監測化可行性評估部分，本計劃於新山水庫裝置固定式地電阻電極，並於水位變化時進行監測。監測成果良好，但仍應於監測頻率及監測資料分析進一步研究檢討。

綜合以上各項工作結果，本計畫並研擬水庫安全監測與檢測改善建議方案，規劃下一階段案例研究、水庫安全監測與檢測手冊之訂定及未來重要研究方向。



結論與建議

水庫從規劃建造到營運過程中充滿潛在之不確定因素。為降低無法預期的災害造成損失，提供正確資訊使反應時間延長為水庫監測計劃的首要目標。

國內目前水庫監測系統規劃缺乏風險管理系統性概念，導致儀器設置無法針對水庫潛在破壞模式分析作出整體性回饋；由於人員配置不足及先前並未完整針對各項監測儀器適用性進行評估而導致監測儀器損壞或不正常運作之比例偏高；於監測資料收集及分析處理上亦未有標準作業程序，且在監測值管理上尚未能依各時期現地狀況不同重新進行分析檢討。整體而言，國內現有水庫安全評估之監測系統管理與維護並未有一系統性有效管理。

另一可慮現象是國內規模較小蓄水庫因資源短少，監測計劃規劃規模嚴重不足，水庫防災機制無法保障社會大眾生命財產安全。且依據 1995 年國際大壩委員會 (ICOLD) 第 99 號公報指出大部份破壞水壩屬壩高小於 30m 之小壩；而大型水庫安全監測系統其主要設置目的多為整體性長期觀測均勻佈設監測，設置原則仍未能清楚點明其相對應疑慮問題及對其合宜性進行評估。

經由分析釐清水庫潛在破壞模式過程中的各項工作，水庫管理者可以了解最有可能發生潛在破壞模式及最正確的防災措施與時機。且分析成果並著重建立能與潛在破壞模式相互配合之安全監測計畫。

現今國內使用非破壞性檢測部分風氣不盛，且多數管理單位因背景知識缺乏而對檢測結果缺乏信心，導致未能充分利用非破壞性檢測技術。依本計劃進行之問卷結果顯示，使用非破壞性檢測的水庫仍屬少數，使用目的多為結構物完整性檢測而忽略檢測方法提供之某些檢測量能直接具備工程性質則可作為壩體再次分析之準備資料。

針對上述所提問題，規劃未來改善水庫安全監測與檢測之研究如下：

1. 水庫監測作業手冊研擬：監測手冊建立方向應以作業標準化為導向。水庫管理者可依其特定潛在破壞模式，參照監測手冊所擬與該特定破壞模式相關之標準化監測作業，據此規劃建立該水庫安全監測計畫。
2. 水庫檢測作業手冊研擬：檢測手冊建立方向亦以作業標準化及情境推演為導



向。當水庫管理者發現特定潛在破壞模式之某些特定徵兆時，參照檢測手冊即可選定檢驗方法進行檢測以利安全評估。

3. 教育訓練方面：可分為舉辦講習會與研討會及示範計畫，藉由教育訓練以提高管理人員之專業學養，促進國內、外技術交流。

另外，蓄水庫檢測與診斷工作對蓄水庫安全評估具有高度重要性，近年多種非破壞檢測現地試驗技術日新月異、電腦輔助分析技術長遠進步、以及資料分析技術之演進方法，對蓄水庫安全評估皆可扮演相當功能性強大並具客觀性與實用性之價值與角色。規劃之未來研究重點如下：

1. 壩體非破壞性檢測技術之改良：在電探方面，可進行地電阻影像探測在滲漏檢測之模擬與現地測試及監測化再進一步探討；在震測方面，研究改善震測法在壩體應用可能遭遇之困難，改進震測影像探測之資料分析與解析度評估及進一步探討系統識別方法應用於混凝土壩結構安全評估的可行性與執行方案；在透地雷達方面，可進一步研究三維透地雷達施測方法與資料詮釋技術。
2. 先進被動式監測技術之研發：包括研製光纖感測水壓計及傾斜感測器、TDR 錯動變形監測技術改良與量化分析研究、變形-水位-滲漏量多功能自動化 TDR 監測系統及監測資料擷取系統整合。
3. 異常現象辨識系統：水庫庫區龐大且結構複雜，在多種破壞模式交互影響下，即使特徵異常現象發生亦可能發生人為無法判別進行中的各種破壞模式。透過建立可供比對異常現象之經驗知識庫，進而可於未來針對特徵異常現象發生組合進行破壞模式辨識。該研究可先探討壩體內出現問題分類、典型病徵、與監測結果出現特徵，再進行壩體內出現不同問題下壩體行為之數值模擬，最後期能建立土石壩壩體安全診斷之專家系統。



1. 計畫說明

1.1. 計畫緣起及目的

台灣地區雖然雨量豐沛，惟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時之安全評估，其中安全監測為水庫安全評估極重要之一環外，亦為平時安全檢查之重要依據。由於台灣地區許多重要水庫隨著庫齡逐漸增加，監測儀器亦因屆齡損壞致安全監測資料逐漸減少，實有必要進行水庫安全監測之問題評析及提昇非破壞性檢測技術在水庫安全評估之應用，以強化水庫安全評估及平常安全檢查之落實。

常見有關水庫安全監測之問題包括儀器損壞比例偏高及監測資料常出現不合理現象，以致監測資料無法真實回饋數值模擬進行綜合評估；在現地檢查方面，一般以目視檢查為主，而數值校核分析所需要之材料參數則必須採用破壞性之補充鑽探，未能有效利用非破壞性監測之技術，以檢查壩體內部之情形並提供數值分析所需之參數。本計畫之目的是依據蓄水庫潛在破壞模式分類，有系統的檢討水庫安全監測之相關問題，收集各種可行之非破壞性檢測方法，針對較重要的技術進行初步測試，並研擬監測與檢測改善方案及未來研究規劃。

1.2. 工作目標

蓄水庫之安全為一切營運管理之基礎，而水庫安全檢查工作之目的在確保水庫在安全狀況下之營運。水庫如發生安全問題，輕則影響民生用水及經濟發展，重則下游生命安全財產受到威脅。

然而水庫規劃建造過程中卻潛在無法全盤掌握之不確定因素。如規劃設計時之主要載重—洪水與地震皆以有限之資料數據下統計推估而得；建造施工時工程品質管制亦於抽樣檢驗下進行，上述過程皆存在大量不確定性及風險性。因此水庫完工後既不能確保工程品質百分之百符合設計要求，且大自然之變化（降雨、颱風及地震等）亦有超出設計假設之虞。如石門水庫（1963年）接近完工階段時遭遇葛樂禮颱風發生接近設計最大可能洪峰流量（10200cms/10900cms），造成日後增建排洪隧道及修改運用規則；921



地震時，石岡水壩因車籠埔斷層直接通過而造成壩體嚴重受損；這些例子說明水庫安全工作之嚴格挑戰。

蓄水庫工程浩大，建造過程中涵蓋地理、生態、地質、環工、水利、土木及機械等多種學門。管理營運階段中所涉及知識亦橫跨多個領域。因此於水庫安全風險分析評估的過程中，若無廣泛知識背景及資料，則對可能發生災害及其後果之評估研究則可能不夠周全完善。本計畫工作項目之水庫潛在破壞模式之分類與案例收集即可為國內水庫管理單位建立可供比對異常現象之經驗知識庫進而可於未來針對個別蓄水庫進行詳細之潛在破壞模式分析。釐清水庫潛在破壞模式 (Potential Failure Mode) 為水庫整體性風險管理策略之重要一環。經由分析過程中的各項工作，水庫管理者可以了解最有可能發生潛在破壞模式及最正確的防災措施與時機。且分析成果並著重建立能與潛在破壞模式相互配合之安全監測計畫。

為降低這些天然或人為無法預期的風險所造成之損失，一個完善的水庫安全監測計畫既可為使用者提供足夠的反應時間又可為正確防災措施提供有用的工程資訊。由於對水庫風險管理邏輯未能有系統地推動，目前台灣地區各水庫監測系統設備項目與數量不一且對於監測資料取得方法與頻率未能有一標準作業程序。因此造成人力物力資源未能有效利用，監測作業執行及系統資料彙整未能對水庫管理者及使用者作一完整回饋。本計畫工作項目之各項監測儀器適用性之檢討及現有水庫安全監測之問題評析即為對現行水庫安全監測作一通盤性的檢討據以作為後續改良發展之參考並檢討其問題及建議改善方案。

水庫各項結構物最重要當屬大壩。不論其築壩材料為土石或混凝土，基於防水性及安全性考量，應盡量避免於既有壩體上進行破壞性檢測或裝置深入內部的監測儀器；且一般監測儀器僅能提供單點資料，若欲於壩體的巨大體積得到全面性的監測資料進行整體性評估，則所需花費之人力物力及其施工性皆難以估計。因此本計畫另一工作重點為探討各項非破壞性檢測方法適用性及針對壩體重要檢測技術初步測試與監測化進行可行性評估。如此則可提供作為水庫安全評估主辦單位參考之技術文獻並據以作為後續改良發展之參考。

綜合以上各項工作方向，本計畫並將研擬水庫安全監測與檢測改善建議方案，規劃



下一階段案例研究、水庫安全監測與檢測手冊之訂定及未來重要研究方向。

1.3. 工作範圍

本計畫之目的為依據蓄水庫潛在破壞模式分類有系統的檢討水庫安全監測之相關問題，收集各種可行之非破壞性檢測方法，針對較重要的技術進行初步測試並研擬監測與檢測改善方案及未來研究規劃。計畫工作內容及範圍可分為以下數項所述：

1. 水庫潛在破壞模式之分類與案例收集
2. 各項監測儀器適用性之檢討
3. 現有水庫安全監測之問題評析
4. 各項非破壞性檢測方法適用性之探討
5. 壩體重要檢測技術初步測試與監測化可行性評估
6. 研擬監測與檢測改善方案及未來研究規劃

第 2 至 5 項工作內容並選擇台灣地區水庫庫齡 30 年以上之至少 3 座水庫（混凝土壩 1 座及土石壩 2 座）進行實例分析、非破壞性檢測及檢討等。本計畫之完整工作執行流程圖請參照圖 1-1。



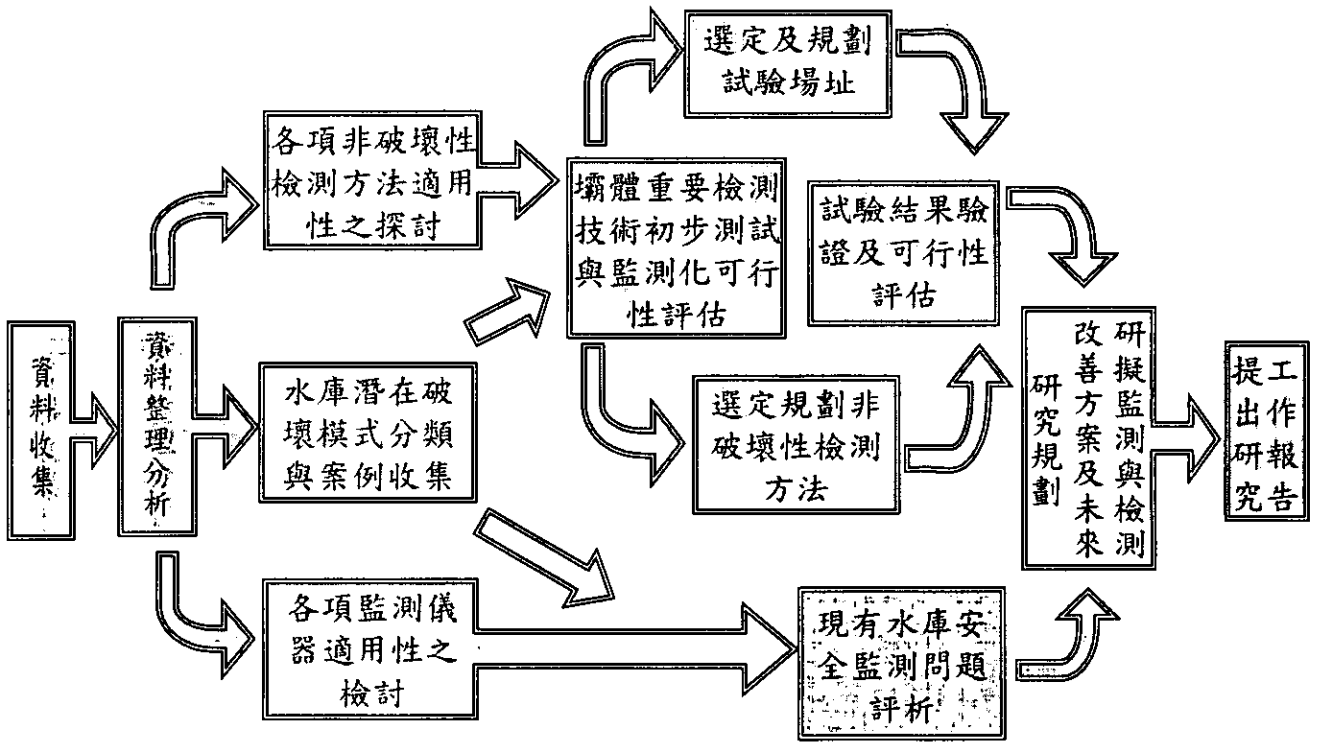


圖 1-1 本計畫工作執行流程圖





2. 水庫潛在破壞模式之分類與案例收集

本項資料收集工作係整個計畫基礎之一，應收集重點資料有下列幾項：

1. 國內外水庫破壞案例。
2. 國內外水庫破壞時異常現象，包含目視檢查結果及監測儀器讀值。
3. 國內外老舊水庫安全監測情形及相對遭遇問題。
4. 在水庫安全評估議題上，非破壞性檢測方法及其可提供監測物理量。

現存之資料種類廣泛，收藏保管之單位相當多，短時間內無法將所有資料作完整之蒐集。針對本計畫之執行，蒐集資料之策略將重點集中於主要相關資料之調查執行單位，國內單位如水利署內相關單位；國外單位如國際大壩委員會（International Commission On Large Dams, ICOLD）、世界水壩委員會（The World Commission On Dams, WCD）、美國聯邦緊急狀況管理局國家水壩安全計畫（National Dams Safety Program, Federal Emergency Management Agency）、美國聯邦能源管理委員會水壩安全性能監測計畫（Dam Safety Performance Monitoring Program (DSPMP), Federal Energy Regulatory Commission）、史丹福大學國家水庫性能計畫（National Performance of Dams Program (NPDP) at Stanford University）及美國水庫安全人員協會（Association of State Dam Safety Officials）等。除上述列舉機構外，有關非破壞性檢測方法部分並收集可能使用方法於類似水壩之檢測環境下適用性與效益評估相關學術論文。茲將所蒐集資料之單位簡介列舉如下。

1. 國際大壩委員會（International Commission On Large Dams, ICOLD）

國際大壩委員會創立於 1928 年，為一非政府性國際組織。創立目的為收集交流有關大壩之規劃、設計、施工、營運及維護等相關資訊並增進工程技術。自 60 年代末起，開始研究大壩安全、安全監測、老舊大壩與溢洪道再次分析、老化效益評估及環境影響衝擊等議題。目前更進行規劃施工階段之費用評估及國際河川治理等研究。

2. 世界水壩委員會（The World Commission On Dams, WCD）

世界水壩委員會由世界銀行（World Bank）創立於 1997 年，其目的為檢視大壩開發經濟效益及研討國際性有關大壩之規範標準等相關議題。



3. 美國聯邦緊急狀況管理局國家水壩安全計畫 (National Dams Safety Program, Federal Emergency Management Agency)

美國自 2002 年起立法通過將境內有關水壩安全及保安等事務交由聯邦緊急狀況管理局管理。其計畫內容包含現地相關業務、資訊交流網路研發維護、人員訓練及安全監測計畫等等項目。

4. 美國聯邦能源管理委員會之水壩安全性能監測計畫 (Dam Safety Performance Monitoring Program (DSPMP), Federal Energy Regulatory Commission)

美國聯邦能源管理委員會對其所轄之水力發電設施設立水壩安全性能監測計畫，用以進行水壩安全及營運監測、人員訓練及潛在破壞模式分析等項目之業務及研究。

5. 史丹福大學國家水壩性能計畫 (National Performance of Dams Program (NPDP) at Standford University)

該計畫目的為建立水壩營運狀況之各項資訊交流平台，其提供資訊包括美國境內水壩資訊資料庫、水壩破壞案例資料庫及參考資訊資料庫。

自 1960 年代起，國際大壩委員會與美國大壩委員會 (USCOLD) 即開始收集國際間及美國各地水壩破壞案例。透過案例收集更新的行動，對破壞案例進行記錄外並針對破壞案例進行災害分類、原因歸納、統計分析、趨勢預估及綜合建議評估。目前收集之經驗知識庫包含：

1. 美國大壩委員會與美國土木工程師協會 (ASCE) 於 1975 年收及彙整之 "Lessons from Dam Incidents, USA"
2. 美國大壩委員會與美國土木工程師協會 (ASCE) 於 1988 年收及彙整之 "Lessons from Dam Incidents, USA-II"
3. 國際大壩委員會於 1984 年收及彙整之 "Deterioration of Dams and Reservoirs"
4. 國際大壩委員會於 1995 年收及彙整之 BULLETIN 99 "Dam Failures -Statistical Analysis"

本章將先對所收集之經驗知識庫其收集方式及相關統計資訊進行介紹，歸納分析收集資料建立潛在破壞模式，並將各知識庫中具代表性案例資料依所提之潛在破壞模式分類收錄於附錄一。最後並提出潛在破壞模式與其可能對應之異常現象供日後執行監測及



檢測作業參考。

2.1. 水庫破壞案例收集

2.1.1. 水庫破壞案例主要分類

依美國大壩委員會(USCOLD)及美國土木工程師協會(ASCE)於1975年及1988年的案例收集報告中將收集案例以損害程度分級歸納為以下幾個類別：

1. 破壞 (failure)

- 第一類破壞：運轉中水壩的重大破壞並導致水壩棄置。
- 第二類破壞：運轉中水壩的重大破壞但經修復後水壩繼續運轉。

2. 意外事故 (包含蓄水庫) (accident)

- 第一類意外事故：運轉中水壩的意外事故經修護後並無重大破壞發生。
- 第二類意外事故：水壩於初次蓄水即發生事故但於正式運轉前加以修護。
- 第三類意外事故：壩體完成後未經任何蓄水前即發生之意外事故，如基礎異常沉陷及壩台滑動等。
- 第四類意外事故：水壩於運轉後於上游面發生意外事故但並未造成任何重大破壞或事故。

3. 建造中損壞 (damage during construction)：建造過程中部分已完成壩體、附屬結構物及假設工程的損壞。

4. 重大修護 (major repair)：水壩運轉過程中因設備或材料退化衰敗而進行重大修護。

1984年國際大壩委員會(ICOLD)針對水壩及水庫劣化及破壞案例進行普查及資料收集分析。收集共1105個劣化(deterioration)案例，其中包含破壞(failure)案例105個。該次資料分析方向朝壩體基本資料(形式、高度及建造時間)、發生機制、發生原因、劣化時間、檢測方法及補救措施進行歸納分析。其中混凝土壩(含基礎)與土石壩(含基礎)劣化及破壞之意外分類及發生原因如表2-1及表2-2所列。105個破壞案例則將其分為四種基本破壞：

1. F_f ：因壩基所造成之破壞。
2. F_m ：因構築材料所造成之破壞。



3. F_b ：因水壩結構行為所造成之破壞。
4. F_a ：因水壩附屬結構物所造成之破壞。

基於此四種基本破壞形式，又歸納出四種複合形式的破壞類型：

1. F_{fb} ：因壩基及水壩結構行為所造成之破壞。
2. F_{ba} ：因水壩結構行為及附屬結構物所造成之破壞。
3. F_{fba} ：因壩基、水壩結構行為及附屬結構物所造成之破壞。
4. F_{fa} ：因壩基及附屬結構物所造成之破壞。

2.1.2. 收集之知識庫相關主要統計

1975 年美國大壩委員會 (USCOLD) 及美國土木工程師協會 (ASCE) 之案例收集報告之 349 個案例中，其相關重要分析數據如下：

1. 以土石壩 209 例 (約為 59.9%) 為最多，其次則為混凝土重力壩 61 例 (約為 17.5%)。
2. 損害程度分級歸納後以第一類意外事故 104 例 (約為 29.8%) 為最多，其次則為重大修護 81 例 (約為 23.2%)，第一類破壞 39 例 (約為 11.2%) 及第二類破壞 35 例 (約為 10.0%)。
3. 損害程度分級為破壞者其主要之意外發生機制為基礎滲漏及管湧、洩洪及壩體滑動。
4. 損害程度分級為意外事故者其主要之意外發生機制為壩體滲漏及管湧、基礎滲漏及管湧、洩洪及壩頂溢流。
5. 損害程度分級為重大修護者其主要之意外發生機制為基礎滲漏及管湧、洩洪、邊坡保護不良及混凝土老化等。

1988 年美國大壩委員會 (USCOLD) 及美國土木工程師協會 (ASCE) 之案例收集報告所統計之 521 個案例中，其相關重要分析數據如下：

1. 以土壩 (earth fill) 391 例 (約為 75.0%) 為最多，其次則為堆石壩 (rock fill) 48 例 (約為 9.2%)。
2. 損害程度分級歸納後以重大修護 217 例 (約為 41.7%) 為最多，其次則為第一類意外事故 104 例 (約為 20.0%)。



3. 意外發生位置及原因為基礎者共 52 例 (約為 10.0%)、壩體結構共 147 例 (約為 28.2%)、溢洪道共 109 例 (約為 20.9%)、壩頂溢流共 74 例 (約為 14.2%)、管湧共 60 例 (約為 11.5%) 及滑動共 39 例 (約為 7.5%)。

1984 年國際大壩委員會 (ICOLD) 之案例收集報告所統計之 1105 個劣化案例中，其相關重要分析數據如下：

1. 以土石壩 664 例 (約為 60.1%) 為最多，其次則為混凝土重力壩 212 例 (約為 19.2%)。
2. 意外發生位置則以壩體為最高 (47.5%)，其次為附屬結構物 (26.9%)、岩石基礎 (11.2%) 及土壤基礎 (9.5%)。
3. 以壩體為破壞位置的案例中以土石壩 62.1% 為最高，混凝土重力壩 14.6% 居次；以岩石基礎為破壞位置的案例中以土石壩 37.9% 為最高，混凝土重力壩 26.8% 居次；以土壤基礎為破壞位置的案例中以土石壩 80.9% 為最高，附屬結構 26.8% 居次
4. 發生破壞之 105 案例中以土石壩 82 例 (約為 77%) 為最多，其次則為混凝土壩 12 例 (約為 11%)。
5. 發生破壞之 105 案例中壩體高度以 15-30 公尺佔 65% 為最多，其次為 30-50 公尺佔 18%。

1995 年國際大壩委員會 (ICOLD) 第 99 號公報 (Bulletin99) 壩破壞統計分析，其主要統計資料如下：

1. 過去 40 年破壞之壩中，1950 年前 5268 座壩註冊，117 座壩破壞，破壞率 2.2%，1951~1986 年有 12138 座壩註冊，59 座壩破壞，破壞率 0.5%；1950 年前破壞之壩，80% 壩齡小於 36 年，50% 壩齡不大於 4 年。(以上統計資料不包含中國大陸)
2. 大部份潰壩屬新壩，70% 破壞壩在完工後十年內，主要集中於完工後第一年。
3. 大部份破壞壩屬小壩 (壩高小於 30m)。
4. 1910 至 1920 年這 10 年間建的壩破壞率最高，其次為 1960 年至 1970 年間。
5. 混凝土壩最常見破壞原因為基礎問題，基礎內部滲漏及剪力強度不足各佔 21%。



6. 土石壩中最常見破壞原因為壩頂溢流（31%為主要原因，18%為次要原因），其次為壩體滲漏（15%為主要原因，13%為次要原因），再其次為基礎滲漏（12%為主要原因，5%為次要原因）。
7. 附屬結構物中最常見破壞原因，以溢洪道容量不足居首（22%為主要原因，39%為次要原因）。

2.1.3. 意外分類與發生原因

依 1984 年國際大壩委員會(ICOLD)之案例收集報告，混凝土壩劣化(deterioration) 案例之發生位置、分類與原因主要可歸納分為下列：

1. 破壞位置為基礎者，分為：

- 第一類為壩基破壞，主要發生原因為基礎變形及地表沉陷、基礎滲流及基礎內部侵蝕。
- 第二類為承受載重大於設計預期條件，主要發生原因為過大上舉力及地震力。
- 第三類為監測系統不良及維護不良，主要發生原因為排水系統未能清理。

2. 破壞位置為材料者，分為：

- 第一類為混凝土材料衰壞，主要發生原因為冰凍與解凍交互作用及混凝土組成材料與環境間之反應。
- 第二類為混凝土材料工程性質不足，主要發生原因為滲漏問題。
- 第三類為建造過程不良，主要發生原因為澆置作業不當及結構接縫與防水作業處理不當。

3. 破壞位置為壩體者，分為：

- 第一類為壩體結構行為異常，主要發生原因為壩體形狀與設置位置不當、拉應力過大及壩面處理不良。
- 第二類為因承受載重大於設計預期條件，主要發生原因為外部溫度變化過大、混凝土水化作用所導致之溫度變化過大、上舉力過大及地震力過大。
- 第三類為監測系統不良及維護不良及未能定期檢查。

混凝土壩破壞 (failure) 案例之分類與發生原因主要可歸納分為下列：



1. 第一類為壩基破壞，主要發生原因為基礎內部侵蝕、工址調查缺失不足及剪力強度不足。
2. 第二類為承受載重大於設計預期條件，主要發生原因為過大上舉力及地震力(破壞位置為基礎者)。
3. 第三類為壩體結構行為異常，主要發生原因為壩體形狀與設置位置不當及拉應力過大。

土石壩劣化 (deterioration) 案例之發生位置、分類與發生原因主要可歸納分為下列：

1. 破壞位置為基礎者，分為：
 - 第一類為壩基破壞，主要發生原因為基礎滲流、基礎內部侵蝕及基礎變形及地表沉陷。
 - 第二類為承受載重大於設計預期條件，主要發生原因為孔隙水壓過大。
 - 第三類為維護不良，主要發生原因為排水系統未能清理。
2. 破壞位置為壩體者，分為：
 - 第一類為填築材料及建造方法不良，主要發生原因為填築材料夯實作業不良、鋪置作業不良及材料含水量不佳。
 - 第二類為承受載重大於設計預期條件，主要發生原因為地震力過大及孔隙水壓過大。
 - 第三類為壩體結構行為異常，主要發生原因為壩體滲流量過大、壩體邊坡保護不良、差異沉陷及位移及壩體內部侵蝕。

土石壩破壞 (failure) 案例之分類與發生原因主要可歸納分為下列：

1. 第一類為壩基破壞，主要發生原因為基礎滲流及基礎內部侵蝕。
2. 第二類為填築材料及建造方法不良，主要發生原因為填築材料夯實作業不良。
3. 第三類為承受載重大於設計預期條件，主要發生原因為地震力過大及孔隙水壓過大。
4. 第四類為壩體結構行為異常，主要發生原因為壩體內部侵蝕、壩體滲流量過大、差異沉陷及位移及與混凝土結構連接不佳。

2.2. 水庫潛在破壞模式之分類

於前節介紹中得知美國大壩委員會及美國土木工程師協會收集之知識庫以水庫意外損壞程度與發生時機進行主要分類；而國際大壩委員會之案例收集報告則以破壞發生位置進行破壞分類。以損壞程度及發生時機進行分類，主要目的應著重於風險管理層面，對於水庫安全中較屬技術相關層面之規劃及執行助益不大；若以發生位置進行分類，雖已能對實際管理提供參考，但該種角度易使作業規劃執行狹隘出現盲點，無法綜觀整體性的問題。

水庫潛在破壞模式之分類係基於壩體或基礎發生破壞之機制來區分，並非以驅動外力型態（譬如並未區分非地震情況與強震下情況，壩體或基礎因外在作用力所造成之類似破壞機制）之類別來區分。若特別針對強震對壩體之影響來討論，壩體或壩基可能因為強烈震動造成內部之應力超越其強度極限因而產生局部或大範圍破壞；也可能因為斷層直接穿過壩體下方，斷層大幅錯動後撕裂壩體；特別針對土石壩還可能因為飽和土壤受反覆受剪孔隙水壓升高造成液化破壞。

依所收集知識庫之統計資料，水壩破壞模式目前主要歸納可分為下列幾種：

對混凝土壩而言：

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。
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。
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。
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。
5. 沿基礎軟弱不連續面之滑動。

對土石壩而言：

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。
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。



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。
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。
5. 因陡坡、滲流壓力及大量降水所造成之壩體滑動。
6. 沿基礎中黏土裂縫或斷層之壩體滑動。
7. 差異沉陷造成之裂縫。
8. 土壤液化。

傳統水庫安全評估邏輯皆基於某些特定“既定標準”考量，意即以預先假設的水文或載重條件下進行設計容量及結構穩定分析。潛在破壞模式分析則更擴大包含由廣泛現地調查及資料收集推估所推測出屬於庫址特定之潛在破壞模式及潛在破壞發生情境 (Potential Failure Scenario)。此種安全評估包含現有設計分析及監測資料檢視、水庫管理人員訪談、現地檢視然後以現有條件再次進行工程分析，結果應能指出潛在破壞模式及其發生原因與可能帶來的損害。一般而言，針對每一特定水庫潛在破壞模式可依可能發生機會分為下列四類：

1. 第一類：顯著之潛在破壞模式
2. 第二類：不顯著但必須考慮之潛在破壞模式
3. 第三類：需要更多資訊及分析方能分類之潛在破壞模式
4. 第四類：可排除之潛在破壞模式

通常安全監測計畫之需求會針對第一類及第二類潛在破壞模式進行規劃，另外亦會考慮一般性水庫安全監測項目以達安全監測最少需求。

2.3. 破壞模式及其對應異常現象

1984 年國際大壩委員會 (ICOLD) 之案例收集報告中針對曾運用於檢測異常現象的檢測方向進行調查，如表 2-3 所示。在多數案例中異常現象並非單一發生，但通常最先被察覺者為呈現於壩體及其他附屬結構表面之異常現象並透過直接目視檢視 (951 次) 得到確認。水壩及蓄水庫體積面積龐大，當監測儀器設置疏漏而無法提供預警時，進行直接目視檢視則為效率最高的安全檢查方法。但除直接目視檢視外，檢測出異常現象之使用頻率第二高之方法為滲流流量量測 (158 次)；再者依使用頻率高低為水平變位量測 (66 次)、垂直變位量測 (64 次)、取樣及試驗室實驗 (44 次) 及孔隙水壓量測



(39次)。

除直接目視可察覺之異常外，對不同材料形式及發生破壞位置的水壩，異常現象則有不同發生頻率。對混凝土壩而言，破壞位置為基礎者，發生頻率次高仍為滲流流量量測異常，但再次者則為上舉力量測異常；破壞位置為材料者，檢測出異常現象之使用頻率次高之方法為取樣及試驗室實驗，再次者為滲流流量量測異常，水質化性分析亦為此項重要檢測方向；因壩體本身行為而破壞者，發生頻率次高則為接縫及裂縫量測異常，再次者為水平變位量測異常。

對土石壩而言，破壞位置為基礎者，發生頻率次高仍為滲流流量量測異常，但再次者則為孔隙水壓量測異常及地下水位量測異常；因壩體本身行為而破壞者，發生頻率次高仍為滲流流量量測異常，但再次者為垂直及水平變位量測異常；破壞為基礎及壩體本身行為交互影響者，發生頻率次高仍為滲流流量量測異常，再次者為垂直變位量測異常。

針對第 2.2 節對混凝土壩之潛在破壞模式分類，結構行為不良所導致之壩體破壞及壩體滲漏或管湧最易被察覺之異常現象即為直接目視檢查混凝土表面之剝落、開裂、裂縫、濕斑及白暈等現象。另外，針對接縫及裂縫異常、垂直及水平變位異常、壩軸定位異常、壩體結構應力應變異常等皆有助管理者判定結構行為不良所導致之壩體破壞正潛在進行中；而壩體滲流流量及水質分析異常則有助於推斷壩體滲漏或管湧是否有劣化趨勢。而混凝土壩之壩趾基礎侵蝕或壩座沖刷掏空、基礎管湧或滲漏及基礎軟弱不連續面之滑動等破壞模式，則目視檢查壩體與基礎及壩座間混凝土是否產生開裂或裂縫、量測基礎或壩座其鄰近區域孔隙水壓及地下水位、垂直及水平變位、滲流流量及水質分析是否異常。

對土石壩之潛在破壞模式分類而言，土石壩體侵蝕及差異沉陷造成之裂縫除造成目視檢查異常外，壩體滲流流量、孔隙水壓及有效應力、垂直及水平變位等亦可能出現異常現象；壩體本身集中式管湧除滲流量異常外，水質分析亦可能出現異常現象。土石壩基礎管湧或滲漏則可能造成孔隙水壓及地下水位、垂直及水平變位、滲流流量及水質分析發生異常現象。

水庫潛在破壞模式與其異常現象可為水庫整體性安全評估之重要基礎。經由分析過程中的各項工作，水庫管理者可以了解最有可能發生潛在破壞模式及最正確的防災措施



與時機。並著重建立能與潛在破壞模式相互配合之安全監測檢測計劃。本報告於附錄一中針對提出之各種潛在破壞模式收集具代表性之破壞案例，藉以了解發生經過之可能徵兆；第三章及附錄三中即將各種潛在破壞模式可能出現之異常現象及其對應之監測儀器表列，並對各項監測物理量常用儀器及傳感器其原理及使用限制進行介紹；第五章及附錄四則將各種異常現象及其對應之檢測物理列舉，並收集可能使用之非破壞性檢測方法原理及使用限制。





表 2-1 混凝土壩意外分類及破壞原因 (ICOLD, 1984)

意外分類	發生破壞原因
壩基破壞	<ol style="list-style-type: none">1. 工址調查缺失不足2. 基礎變形及地表沉陷3. 剪力強度不足4. 基礎滲流5. 基礎內部侵蝕6. 基礎剝蝕或隆起7. 基礎初始應力8. 壩趾拉應力分布9. 基礎表面處理不當10. 基礎補強措施不足11. 帷幕灌漿或防水系統不良12. 排水系統不良13. 基礎調查時開挖之豎井、坑道及鑽孔未確實填封
混凝土材料破壞	<ol style="list-style-type: none">1. 混凝土組成材料間反應 (包含鹼骨材效應)2. 混凝土組成材料與環境間之反應 (包含氫氧化鈣溶解)3. 冰凍與解凍交互作用4. 細菌或微生物侵蝕5. 抗壓強度不足6. 剪力強度不足7. 抗拉強度不足8. 滲透問題9. 澆置作業不當10. 澆置後養護及冷卻作業不當11. 結構接縫及防水作業處理不當12. 鋼筋及地錨配置不當



意外分類	發生破壞原因
因承受載重大於設計預期條件	<ol style="list-style-type: none">1. 靜水壓力過大及沉泥量過多2. 上舉力過大3. 地震4. 外部溫度變化過大5. 混凝土水化作用所導致之溫度變化過大6. 含水量變化
因結構行為（拱壩）	<ol style="list-style-type: none">1. 壩體形狀及設置位置不當2. 拉應力過大3. 因基礎表面導致壩體形狀不連續處之應力集中4. 壩體形狀不連續處或開口處之應力集中5. 人造壩座破壞6. 結構接縫型式及配置不良7. 壩面處理不良
因結構行為（重力壩）	<ol style="list-style-type: none">1. 壩體形狀及設置位置不當2. 拉應力過大3. 因基礎表面導致壩體形狀不連續處之應力集中4. 壩體形狀不連續處或開口處之應力集中5. 結構接縫型式及配置不良6. 壩面處理不良
因監測系統不良	<ol style="list-style-type: none">1. 監測儀器設置不良
因維護不良	<ol style="list-style-type: none">1. 未能定期檢查2. 排水系統未能清理3. 滲流量控制不良4. 滲流水量未能排除5. 儀器設備衰壞



表 2-2 土石壩意外分類及破壞原因 (ICOLD, 1984)

意外分類	發生破壞原因
壩基破壞	<ol style="list-style-type: none">1. 工址調查缺失不足2. 基礎變形及地表沉陷3. 剪力強度不足4. 基礎滲流5. 基礎內部侵蝕6. 基礎剝蝕或隆起7. 基礎初始應力8. 基礎土壤液化9. 基礎凍土層破壞10. 基礎表面處理不當11. 建造期排水不良12. 基礎補強措施不足13. 隔幕灌漿或防水系統不良14. 非滲透性覆蓋層導致排水不良15. 排水系統及濾層不良16. 基礎調查時開挖之豎井、坑道及鑽孔未確實填封
因填築材料及建造方法不良	<ol style="list-style-type: none">1. 填築材料含細顆粒黏土2. 填築材料含有機性黏土3. 填築材料含擴散式黏土4. 填築材料含粉土及均勻級配細砂5. 填築材料含溶解性土壤6. 填築材料含膨脹性土壤7. 填築材料含帶有卵石之殘留土8. 填築材料含已分解之岩石9. 填築材料含已風化之岩石



意外分類	發生破壞原因
	<ol style="list-style-type: none">10. 填築材料粒徑分佈不佳11. 填築材料含水量不佳12. 填築材料鋪置作業不良13. 填築材料夯實作業不良14. 填築材料乾操作業不良15. 臨時邊坡構築不良16. 填築材料受冰凍作用影響
因承受載重大於設計預期條件	<ol style="list-style-type: none">1. 靜水壓力過大及沉泥量過多2. 上舉力過大3. 孔隙水壓過大4. 降雨或降雪量過大5. 蓄水庫內波浪過大6. 冰凍與解凍交互作用7. 地震
因壩體結構行為	<ol style="list-style-type: none">1. 壩體形狀及設置位置不當2. 非滲透性之心層3. 防水設施不良4. Transition zones 破壞5. 壩肩破壞6. 濾層材料及建造方法不佳7. 排水系統材料及建造方法不佳8. 邊坡保護不良9. 與混凝土結構連接不佳10. 差異沉陷及位移11. 壩體滲流量過大



意外分類	發生破壞原因
	<ol style="list-style-type: none">12. 壩體內部侵蝕13. 壩體材料液化14. 逆流滑動15. 順流滑動
因監測系統不良	<ol style="list-style-type: none">1. 監測儀器設置不良
因維護不良	<ol style="list-style-type: none">1. 未能定期檢查2. 排水系統未能清理3. 滲流量控制不良4. 邊坡保護維護不佳5. 因動物因素產生之坑道



表 2-3 水壩劣化破壞檢查方向分類 (ICOLD, 1984)

項次編號	觀測方法	使用次數
D01	直接目視檢視	951
D02	取樣及實驗室試驗	44
D03	流量量測	158
D04	地下水位量測	13
D05	上舉力量測	20
D06	孔隙水壓量測	39
D07	水質濁度量測	7
D08	水質化性分析	14
D09	滲流路徑調查	13
D10	接縫及裂縫量測	15
D11	水平變位量測	66
D12	垂直變位量測	64
D13	角變位量測	5
D14	應變量測	14
D15	應力量測	2
D16	水位量測	9
D17	溫度量測	0
D18	溼度量測	0
D19	雨量量測	11
D20	震度	0
D21	水深量測	19
D22	水壓量測	1
D23	淤泥量測	7
D24	設計審閱	27

3. 各項監測儀器適用性之檢討

由於市面上監測儀器產品眾多，針對某一監測物理量即可能有數種截然不同的監測儀器。以水壓計為例，其常用類型即有氣壓式、水壓式、電阻式及振弦式，因其個別應用原理不同亦導致其使用限制不同：如氣壓式管線易因撓曲或濕氣進入管線而故障，施工時管現易損壞且無法量測負壓力；水壓式管線於冰點以下無法量測，管線內易因青苔阻塞需定期排氣去苔亦無法量測負壓力；電阻式雖反應速率及靈敏度佳，但易受接頭及管線長度影響亦可能受溫度及溼度影響；而振弦式雖穩定性高且適合自動化，但溫度變化對其影響大且須考慮雷擊問題。由以上得知即使針對同一庫區之同一監測量，監測儀器選擇應需整體考量裝置地點之主客觀條件再行選擇儀器種類。

各項監測儀器適用性之檢討有下列重點：

1. 分類之破壞模式與各監測物理量間關聯性
2. 各監測物理量可行之監測儀器。
3. 各種類儀器之基本量測原理、資料擷取方式及資料判釋方式。
4. 各種類儀器之量測精度、運作環境或其他技術限制。
5. 各種類儀器常見損壞原因。
6. 台灣地區各類型監測儀器裝置於水庫之數量及運作情形。

資料收集完成後整理成可供參考之文獻作為現有水庫安全監測之問題評析及後續改良發展之參考。

3.1. 分類之破壞模式與各監測物理量間之關聯性

目前針對水庫安全評估之監測系統規劃缺乏風險管理系統性概念，導致儀器設置無法針對水庫潛在破壞模式分析作出整體性回饋。潛在破壞模式的價值在於經由分析過程中的各項工作，水庫管理者可以了解最有可能發生潛在破壞模式及最正確的防災措施與時機。且分析成果並著重建立能與潛在破壞模式相互配合之安全監測計畫。在正確的規劃邏輯之下才能有有效的防災減災措施及充裕的預警時間。安全監測計畫規劃與執行即以前章所歸納之破壞模式及其對應異常現象為導向，潛在破壞模式與其可能對應異常之監測物理量如表 3-1 及表 3-2 所示。



當水庫管理單位分析釐清其特定水庫潛在破壞模式後，可依表 3-1 及表 3-2 了解與其可能對應異常之監測物理量。以監測物理量為基礎並參照表 3-3 至表 3-7，加上評估現場條件與附錄三所述之各項傳感器使用條件及限制，選擇適當儀器進行監測作業規劃。

每一個監測儀器都應有其存在的目的，監測儀器之安裝與監測資料收集本身並不能提高大壩之安全性，不當的監測計畫製造不需要的資料，造成時間與成本的浪費，且常造成困擾終致監測計畫之中途而廢。

3.2. 水庫安全監測問卷基本資料

本計畫為調查台灣地區各類型監測儀器裝置於水庫之數量及運作情形，於 93 年 9 月對台灣地區（含金門）水庫管理單位監測作業進行概況進行問卷普查。

問卷設計邏輯為水庫安全監測計畫是否能提供足夠資訊，使水庫管理者評估水庫營運狀況並對危及水庫安全之變化提出警訊；另外安全監測業務規畫執行是否基於潛在破壞模式思維進行亦為調查重點之一。問卷設計方向以安全監測計畫業務性原則分類包括：監測系統及監測項目、監測頻率、監測管理值、監測儀器維護程序及監測資料分析。本章將對調查結果各監測項目中各類儀器使用概況進行描述；其餘部份於第四章介紹評析。調查結果以問卷問題中所列選項被選擇次數高低作定性的趨勢探討，問卷回答彙整詳如附錄二所述。

本問卷共有全國各地 20 個水庫管理單位受訪並回收問卷，所轄水庫達 44 座，水庫中包含水壩共 27 座（土石壩 17 座、混凝土壩 10 座）。水庫管理單位中負責監測計畫之人員數量為 3 人（含 3 人）以下者共 13 個，3 人以上者共 7 個。多數人員接觸本業務平均時間達 5 年以上（13 個），背景專長多數為土木及水利工程（13 個）且大多受過水庫安全評估訓練（13 個），但僅少數受過監測儀器操作維護（4 個）及資料歸納分析（1 個）。多數單位（12 個）採自行辦理方式執行監測計畫且年度經費為 100 萬元以下（11 個）。

3.3. 台灣地區各類型監測儀器裝置於水庫之數量及運作情形

一般水壩安全監測可分別針對目視檢查、水位高程及水壓量測（常見儀器如表 3-3 所示）、滲流及滲漏（常見儀器如所表 3-4 示）、位移（常見儀器如表 3-7 所示）、應



力應變（常見儀器如表 3-5 所示）、溫度（常見儀器如表 3-6 所示）、地震及後拉式預力地錨載重等各項監測（徵兆）物理量進行觀測，其觀測目的、使用儀器及其於台灣地區裝置於水庫之數量及運作情形將於後續各小節中簡介。

3.3.1. 目視檢查

在多數案例中異常現象並非單一發生，但通常最先被察覺者為呈現於壩體及其他附屬結構表面之異常現象，且透過直接目視檢視得到確認。水壩及蓄水庫體積面積龐大，當監測儀器設置疏漏而無法提供預警時，進行直接目視檢視則為效率最高的安全檢查方法。

目視檢查於 20 個受訪之水庫管理單位皆為監測計畫之一環。決定目視檢查區域或路線的考量以經目視察覺異常現象後持續追蹤者（15 次）最高，其次為地毯式之目視搜索（11 次）及經其他監測儀器反應異常現象後持續追蹤（8 次）。多數單位於平時執行目視檢查頻為每季或於安全評估施作（7 次），其次為每月 1 次（5 次）。僅少數單位於目視檢查後發現異常現象啟動應變計畫（4 個），且多數單位僅以定性文字描述記錄檢查結果（11 個）。

目視檢查結果顯示於水壩常出現之異常現象為壩面龜裂、滲流水流出、坡面侵蝕及過去維修痕跡等；於壩基座常出現之異常現象為過去維修痕跡及混凝土濕斑等；於壩內廊道隧道常出現之異常現象為混凝土濕斑、混凝土龜裂、排水孔堵塞及接縫不良等；於溢洪道邊坡常出現之異常現象為不適當之淤積、混凝土濕斑及劣化、過去維修痕跡等。

依上述各項結果，執行狀況較為不佳為記錄異常現象僅以定性文字描述。若異常現象需監測，則應以輔助工具丈量並加相片保存記錄以利追蹤；且目視檢查常僅於安全性評估時施作，頻率過低恐無法發揮預警功效。目視檢查為最易執行且有效之監測方式，建議應對每座水壩以其特有之潛在破壞模式為基礎擬訂目視檢查作業之標準作業程序。

3.3.2. 水位高程及水壓量測

水庫安全監測量測之水壓種類包含蓄水庫中之靜水壓力、孔隙水壓及上舉壓力。大壩水壓變化通常由上游水位高程降低至下游水位高程、地下水位高程或大氣壓力，因此壩體中水壓變化為穩定分析中之重要議題。土壤中孔隙水壓變化取決於其滲透性、垂直與水平滲透性之比例及鄰近區域地層之滲透性；岩石中孔隙水壓變化則取決於其層面中



材料之滲透性且與層面之間距、方位、材料耐久性及破裂情形相關。當土壤或岩石中存有不透水層時則鄰近地層即可能產生水壓變化。水壓分佈變化亦常受到降雨、排水、壩座水位、地層改變甚至地下止水帷幕灌漿影響。水庫內蓄水高程及季節性溫度變化導致季節性的水壓分佈變化，混凝土壩及基礎可能因此產生輕微變形。該種情形可能足以改變基礎岩石層面破裂情況而使岩石滲透性產生改變。因此在選擇及配置水壓監測儀器時應對庫區各種現地、季節天氣及蓄水需求情形進行詳細調查了解並納入考量。

水壓量測設置常針對某些特定目的：

1. 記錄區域地下水位變化。
2. 記錄特定區域如壩基、壩趾及壩座之孔隙水壓及可能因施工或蓄水造成之超額孔隙水壓。
3. 評估帷幕灌漿、截水牆、截水溝、不透水填土層及其他滲漏控制措施之有效性。
4. 評估解壓井、趾部排水、直立排水、水平排水及其他排水措施之有效性。

20 個受訪之水庫管理單位中，13 個單位將水位高程及水壓量測納入安全監測作業。主要使用方式有 10 個單位裝設水壩上下游水位尺共 16 支；5 個單位裝設壩體水位觀測井共 68 支，毀損 2 支；3 個單位裝設庫區水位觀測井共 33 支，毀損 1 支；8 個單位裝設壩體水壓計共 170 支，毀損 40 支；3 個單位裝設壩址水壓計共 26 支，毀損 11 支；3 個單位裝設基礎水壓計共 42 支，毀損 2 支；3 個單位裝設庫區邊坡水壓計共 58 支，毀損 4 支。就水壓計裝設位置，毀損數量最多的位置為壩體，但可能原因為壩體所裝設數量最多，但若以毀損比例最高者為裝設於壩址者。此二處環境中是否存有易使水壓計毀損因素應因需進一步探討。

一般觀測常用之水壓計為直管式水壓計、氣壓式水壓計、水壓式水壓計、電阻式水壓計及振弦式水壓計等。所有裝設之水壓計中，氣壓式水壓計 118 支，毀損 46 支；直管式水壓計 75 支，毀損 7 支；水壓式水壓計 42 支，毀損 8 支；電阻式水壓計 3 支，毀損 0 支；振弦式水壓計 62 支，毀損 13 支。以上述結果可知氣壓式水壓計最易毀損。推測毀損原因主要為濾層阻塞及遭受雷擊。監測方式以振弦式及電阻式水壓計使用自動監測最高、其次為水壓式，直管式與氣壓式水壓自動監測比率最低。

當本項監測量發現異常現象最常採取之因應措施為檢查儀器是否故障（12 次），其



次為加強鄰近不同類型監測儀器讀取頻率（7次）及綜合其他異常現象進行整體分析研判（8次）。

3.3.3. 滲流及滲漏

滲流（Seepage）為水沿壩體、壩座及基礎中材料細微紋理縫隙之流動，路徑較不固定；滲漏（Leakage）則是水通過壩體、壩座及基礎中內部較大孔洞或裂紋之流動，其路徑較為固定；管湧（Piping）則為原先水路鄰近材料遭滲流及滲漏不斷侵蝕攜出而形成較大或新的通路中之流動；三者流量大小與材料透水性及水壓大小呈正相關。一般而言，壩體等材料透水性不應有顯著急劇變化，因此滲流滲漏量應隨壩體上下游水位高程差（即水壓差）產生變化。如推測觀測之滲流滲漏量急劇變化與上下游水位高程差無關時，則壩體等相關庫區地質及結構物則須詳細檢視評估。滲流滲漏水質檢測亦可幫助評估基礎岩石溶解、滲流滲漏來源及管湧等具有潛在危害的風險因子。現地對水質可進行酸鹼值、溫度及導電度等檢驗；實驗室水質檢驗則包含溶解物質、懸浮物質及礦物變化等。

20個受訪之水庫管理單位中，14個單位將滲流及滲漏量測納入安全監測作業。主要量測位置為壩體（9次）、壩基（6次）、壩座（4次）及附近岩層（4次）。多數單位（10個）並未針對滲流水質進行檢測，少數單位僅注意滲流濁度（3個），僅翡翠水庫管理單位定期為滲流進行全面性檢測。監測頻率每日一次最多，其次為每月一次及二次。

常見的滲流滲漏量量測方法有量水堰、Parshall 引水槽及標度槽等，目前主要使用工具為量水堰（12次）、率定槽（1次）及觀測井（1次）。

當本項監測量發現異常現象最常採取之因應措施為檢查儀器是否故障（12次），其次為加強鄰近不同類型監測儀器讀取頻率（7次）及綜合其他異常現象進行整體分析研判（11次）。

3.3.4. 位移

壩體結構因承受許多不同載重或材料壓密作用而產生位移，位移量如於容許範圍內並不會造成結構性解壓崩潰。但如果位移發生於非預期方向及數量增加則可能代表某些危險正在潛在發生。壩區的位移量測可分為三個主要分類：表面位移量測、內部位移量測及裂縫位移量測。由於位移產生方向不定，因此安全監測需沿橫向、縱向與垂直向三



維進行量測。

20 個受訪之水庫管理單位中，15 個單位將位移監測納入安全監測作業，主要項目為表面位移量測（11 次），其次內部位移量測（10 次）及裂縫位移量測（7 次）。

表面位移量測可用一般測量方法進行，如水準測量、導線測量及三角測量等。測量動線規劃、沉陷點埋設、水準導線點埋設及三角測量基線設置等為事前規劃重要事項。表面位移量測主要位置為壩體（11 次）、區內邊坡（7 次）、壩座（5 次）及壩基（2 次），進行測量時多數使用傳統水準儀及經緯儀測量。主要執行表面位移監測之目的為為整體性長期觀測均勻佈設監測（14 次），僅少數為設計或分析之危險區域佈設檢核（2 次）。監測頻率一般約在每月一至二次，而控制基點之校準頻率為每年一次或依特定區域或方法有所不同。

當本項監測量發現異常現象最常採取之因應措施為檢查儀器是否故障（12 次），其次為加強鄰近不同類型監測儀器讀取頻率（7 次）及綜合其他異常現象進行整體分析研判（11 次）。

依調查結果，內部位移量測主要監測位置為壩體（13 次）、區內邊坡（5 次）、壩座（3 次）及壩基（2 次）；儀器裝置數量最高位置亦為壩體（104 個），其次為壩座（74 個）。使用工具為傾斜儀（裝置 80 支，毀損 11 支）、沉陷計（裝置 44 支，毀損 15 支）及伸縮儀（裝置 67 支，毀損 3 支）。

傾斜儀主要使用形式含振弦式（裝置 30 支，毀損 3 支）、擺線式（裝置 23 支，毀損 0 支）及加速度計式（裝置 28 支，毀損 4 支）。

沉陷計主要使用形式含電阻式、磁致感應式等。此部分因受訪單位填寫不明，因此無法得知其詳細種類及數量。主要大量使用單位為牡丹水庫（裝置 34 支、毀損 13 支、種類不明）。

伸縮儀主要使用形式含測微計式（裝置 32 支、毀損 1 支）、LVDT 式（裝置 23 支、毀損 2 支）、電阻式（裝置 8 支、毀損 3 支）、電氣式（裝置 23 支、毀損 0 支）及機械式（裝置 10 支、毀損 0 支）。

內部位移量測監測頻率一般約在每週至每月一次，當本項監測量發現異常現象最常採取之因應措施為檢查儀器是否故障（8 次），其次為加強鄰近不同類型監測儀器讀取



頻率(2次)及綜合其他異常現象進行整體分析研判(7次)。

裂縫位移量測則常用裂縫計或標尺進行觀測。主要監測位置為為壩體表面(3次)、其他水工結構物表面(1次)及壩內廊道(2次)。主要使用儀器為裂縫計(裝置72支、毀損0支)及鋼尺(裝置9支、毀損0支)。

裂縫計主要使用形式含測微計式(裝置65支、毀損0支)及主要使用形式含測應變式(裝置7支、毀損0支)。裂縫位移量測監測頻率一般約在每月一次,當本項監測量發現異常現象最常採取之因應措施為檢查儀器是否故障(6次),其次為加強鄰近不同類型監測儀器讀取頻率(5次)及綜合其他異常現象進行整體分析研判(6次)。

3.3.5. 應力應變

土壓量測為量測堆填體內部總應力或土體與混凝土結構等剛性結構物之接觸壓力。量測目的為了解壩體填方之土壓力、主壩作用於附屬結構物之土壓力及其他作用於結構物之土壓力。如與水壓計配合使用則可推估監測區內土壤之有效應力分佈,在土體穩定分析及液化分析上相當重要。

20個受訪之水庫管理單位中,2個單位將土壓力監測納入安全監測作業。主要目的為整體性長期觀測均勻佈設監測。一般觀測土壓力常用之儀器為氣壓式土壓計、油壓式土壓計、電阻式土壓計及振弦式土壓計等。主要裝設區域為壩體,主要使用儀器為氣壓式(裝置19支、毀損14支)及振弦式(裝置18支、毀損0支,全為自動式監測)。監測頻率一般約在每月一次,當本項監測量發現異常現象最常採取之因應措施為檢查儀器是否故障(2次),其次為加強鄰近不同類型監測儀器讀取頻率(2次)及綜合其他異常現象進行整體分析研判(2次)。

機械或電子式應變計則常應用於混凝土壩,通常以每處安裝數個以便進行三維應變狀態分析。混凝土彈性係數、潛變係數及包松比等力學參數則以鑽心試體送至實驗室試驗決定。

20個受訪之水庫管理單位中,3個單位將應變監測納入安全監測作業。主要目的為整體性長期觀測均勻佈設監測及於設計或分析之危險區域佈設檢核。主要裝設區域為壩體及壩內廊道。主要使用型式為電阻式(裝置309支、毀損7支,293支為自動式監測)。監測頻率一般約在每週2次,當本項監測量發現異常現象最常採取之因應措施為檢查儀



器是否故障（3次），其次為加強鄰近不同類型監測儀器讀取頻率（2次）。

3.3.6. 溫度

混凝土壩位移及滲漏量常與其內部溫度有關。而施工建造期間溫度監測常用來評估混凝土配比、澆置速率、施工區塊切割、施工縫施作及熱能載重等。如對滲流滲漏水值進行溫度監測亦有利於滲流滲漏來源探討。

20 個受訪之水庫管理單位中，4 個單位將溫度監測納入安全監測作業。主要量測區域為壩體內部及滲流溫度。主要使用型式為電阻式（裝置 37 支、毀損 0 支，全為人工監測）、熱偶式（裝置 6 支、毀損 0 支，全為人工監測）及應變式（裝置 49 支、毀損 15 支，全為自動監測）。當本項監測量發現異常現象最常採取之因應措施為檢查儀器是否故障（3次），其次為加強鄰近不同類型監測儀器讀取頻率（1次）。

3.3.7. 地震

地震監測目的在於記錄地震來臨時壩基基礎岩盤震度及壩體受震反應，以利了解地震引起壩基及壩體動態行為。如配合自動化量測系統，則可透過地震強度設定即時擷取壩區監測儀器讀值變化用以回饋安定分析。地震監測使用之地震儀記錄之監測資料為加速度及速度。儀器由三個相互垂直的加速度計、記錄裝置及觸發裝置組成。

20 個受訪之水庫管理單位中，13 個單位將地震監測納入安全監測作業。主要使用型式為類比式加速度計（裝置 30 支、毀損 0 支）及數位式加速度計（裝置 20 支、毀損 2 支）。

管理單位啟動應變計畫的地震規模一般設為 15 gals 或 25 gals。可能採取之因應措施為立刻執行目視檢查（11 次）、立刻讀取監測儀器（9 次）及綜合各種讀值及現象進行整體分析研判（7 次）。

3.3.8. 後拉式預力地錨載重

後拉式預力地錨如預力鋼腱或鋼棒於孔內未灌漿固結則可用拉拔試驗及載重儀進行載重監測；如將伸張計或光纖纜線與預力鋼腱一起埋設則可依長度變化量換算得知地錨載重進行載重監測。

20 個受訪之水庫管理單位中，2 個單位將溫度監測納入安全監測作業。主要使用型



式為振弦式載重計（裝置 10 支、毀損 0 支）及電阻式載重計（裝置 18 支、毀損 5 支）。監測方式全為人工量測。監測頻率一般約在每週及每月 1 次，當本項監測量發現異常現象最常採取之因應措施為檢查儀器是否故障（2 次），其次為加強鄰近不同類型監測儀器讀取頻率（2 次）及及綜合其他異常現象進行整體分析研判（1 次）。

3.4. 監測儀器常用感測元件

安全監測儀器設計可分為機械式、電子機械式及電子式。機械式儀器即將欲量測之物理量變化藉由儀器機械作用轉換為可用肉眼判讀之讀數；電子機械式儀器則為將欲量測之物理量變化藉由儀器作用之機械動作轉換為一電子訊號輸出；電子式儀器則是因應欲量測之物理量變化直接產生電子訊號輸出。目前多數使用之監測儀器多為電子機械式及電子式。這些儀器的電子部份多由一感測元件（感測器 sensor 及傳感器 transducer）及一電子迴路組成（訊號調節器 Signal conditioning）。某些感測器，如電阻式，容易受到電子雜訊的干擾及電纜電阻的影響；某些傳感器，如振弦式及光纖式，產生之訊號對電子雜訊干擾並不敏感，因此傳輸纜線長度並不構成儀器設置上限制。儀器讀數可用書寫或照相手動紀錄、或以機械式繪製紀錄、或電子式以資料擷取器（data logger）及電腦進行紀錄。常用之各種感測器及傳感器將於以下各小節進行簡介，詳細原理規格詳如附錄三所述。

3.4.1. 電學感測器

1. 電阻應變計感測器

電阻應變計常用在許多大地工程儀器之中。應變計的壽命取決於安裝、封裝與保護方法。以下將分別簡述基本的電阻應變計：

➤ 黏貼式導線應變計（Bonded Wire Resistance Strain Gage）

主要是以五條黃銅-鎳線或鎳-鉻線來回排列黏貼於薄塑膠片，再固定欲量測材料上。

➤ 非黏貼式導線應變計（unbonded wire strain gage）

其五條導線並非黏貼固定，僅繞著絕緣體來回排列，且其薄塑膠片是分離的。

➤ 黏貼式箔片應變計（Bonded Foil Resistance Strain Gage）

由一個電阻合金的箔片構成，主要黏貼於薄塑性膠片上。再將該膠片固定欲量測的材料上。



➤ 半導體式應變計 (Semiconductor Resistance Strain Gage)

採用半導體矽或鍺結晶塗佈，塗佈必須給定結晶特定感測器因子)與溫度係數，當應變施加在結晶上，結晶產生與應變成比例的改變。

➤ 可鐸式應變計 (Weldable Resistance Strain Gage)

在製造時得事先將電阻元件附加在不鏽鋼底板邊緣，該元件習慣上是黏貼式箔片應變計或裝在細管內的應變絲。由於不鏽鋼完整地被封裝且可加以鐸接，相較於黏貼式更適合現地使用。

➤ Wheatstone Bridge Circuits for Use with Electrical Resistance Strain Gages

電阻應變計輸出值通常是藉由惠思同電橋(Wheatstone bridge circuit)量測。惠思同電橋的電路通常由四組電阻構成，藉由四組電阻不同的電路配置與量測方式可獲得不同形式的惠思同電橋應用。

2. 線性可變差位轉換計 (Linear Variable Differential Transformer, LVDT)

LVDT 通常被用在固定式的孔內伸縮計中與其他量測變形的儀器之中。LVDT 的優點為磁鐵蕊與線圈無接觸，無摩擦力。無磁滯現象使得 LVDT 特別適合動態移動與極小位移之量測。LVDT 具有良好的抗溼氣、抗鏽蝕能力以及長期穩定性，能置於填充油的保護殼內以延長使用壽命。然而，交流電流在延長線傳遞時將引發非預期之長纜線效應，而導致訊號嚴重衰減。

3. 直流差位轉換計 (Direct Current Differential Transformer, DCDT)

DCDT 的用途與 LVDT 相似，通常用在大地工程領域。一般 DCDT 的訊號線僅傳輸直流電壓，以避免 LVDT 交流電流傳輸時的長纜線效應。如同 LVDT，直流差變轉換計同樣具有良好的抗溼氣、抗腐蝕能力以及長期穩定性，亦能置於填充油的保護殼內以延長使用壽命。

4. 電位計 (Potentiometer)

電位計具有讀數簡單，且可藉由高輸出電壓避免長纜線效應或電路雜訊之優點。若確實封裝儀器電刷與電阻片，以避免溼氣侵入，則可成功用於長期量測。然而電位計不適合用來量測快速變化的移動量，且長期完善封裝電位計不易，目前長期量測仍採用



LVDT 與 DCDT 居多。

5. 可變磁阻傳感計 (Variable Reluctance Transducer, VRT)

VRT 大多應用在電子式裂縫計與固定式土堤伸縮計內，以量測線性變形。可變磁阻傳感計的優點在於利用磁通量變化，對溼度的容許程度較大，特別適合如水下安裝，並已經成功地作為裂縫計裝設在混凝土壩上游面。然而，LVDT 或 DCDT 藉由適當的封裝，也能於上述用途提供相同功能。

6. 振弦式傳感器 (Vibrating Wire Transducer)

振弦式傳感器常使用於水壓計、土壓計與液面沉陷計內的壓力感測計，與為數眾多的變位計與壓力計中，並直接作為表面與土堤的應變計。

由於振弦式傳感器的輸出值為頻率，如電阻或電壓量輸出方式常受到的纜線電阻、長纜線效應或接地洩漏等影響則可忽略。現地量測上振弦式傳感器可搭配長纜線，並可安裝於水中，相較於電阻或電壓式儀器的最大優勢。然而振弦式傳感器最大的缺點在於鋼線腐蝕、長期受拉引致的潛變、以及兩預拉端的滑動，導致振動頻率的折減，引致量測零點偏移。

7. 力平衡加速度計 (Force Balance Accelerometer)

力平衡加速度計較常使用於傾斜計、測傾儀與現地式測傾儀內的傾斜感應計。一般可攜式的傾斜儀或測傾儀於實務上之應用，可藉由量測兩相反方向資料，以消除儀器的零點偏移。然而長期埋設量測穩定性則尚待證實。

8. 磁鐵/簧片開關系統 (Magnet/Reed Switch)

磁鐵/簧片開關系統用在筒式伸縮計上。磁鐵/簧片開關系統具有簡易價廉、可靠精確、以及適合長期量測的優點。唯一的潛在缺陷為安裝時磁鐵環相互接觸過久所造成磁力永久衰減。

9. 感應線圈傳感器 (Induction Coil Transducers)

感應線圈傳感器常使用於筒式伸縮計、固定式土體伸縮計、固定式孔內伸縮計與裂縫計中。感應線圈傳感器具有優秀的長期穩定性。長期應用時，所有埋置的鋼製構件皆需保護免於鏽蝕。

10. 磁致伸縮傳感器 (Magnetostrictive Transducer)



磁致伸縮傳感器使用於固定式孔內伸縮計、筒式伸縮計，以及管式收斂計。磁致伸縮傳感器的量測範圍可達數英尺，具有非接觸性、低磁滯性與高穩定性，溫度效應小，若材料選擇正確則可忽略溫度效應。然而長期埋設的量測穩定性尚待證實。

11. 電解液水準儀 (Electrolytic Level)

電解液水準儀用於傾斜計與測傾儀內。感測器構造為內有電解溶液的對稱拱形容器，。

3.4.2. 機械式感測器

1. 液壓量測儀器 (Hydraulic Instruments)

常見於大地液壓量測儀器分別是低音管式壓力計與液壓平衡式壓力計。低音管式壓力計較為普遍，常應用於水力式壓力計、水力式荷重計、孔內壓力計，以及一些氣壓感測器的讀數元件。液壓平衡式壓力計有時用在雙管式水力式壓力計與液面沉陷計之中。

➤ 低音管式壓力計 (Bourdon Tube Pressure Gage)

本儀器精確度通常以整體刻度的百分比表示，故應用上需選擇適當量測範圍，避免過高不必要範圍。長期永久性安裝需選擇高品質且可避免直流電鏽蝕低音管式壓力計。

➤ 液壓平衡式壓力計 (Manometer)

被廣泛使用於土堤孔隙水壓之長期監測，對於量測很小的正孔隙壓力與負孔隙壓力也易於標定。通常液壓平衡式壓力計擁有比低音管式壓力計較長的壽命。

➤ Liquid-Filled Tubes for Hydraulic Instruments

雙管式水力式壓力計通常與液面沉陷計以及裝滿液體之套管，成為壓力量測系統主要的部份。藉由量測或假設液體的密度，則系統中兩相對液面的壓力差可與高程差維持一比例關係。三個可長期損害這種量測方法的誤差主要因素為：液體內不連續，其現象導因於液體內產生氣泡；溫度變化引致的液體密度改變，造成高程差與壓力差的關係改變；以及表面張力影響，使得液壓改變所需的時間延長。上述誤差主要因素可由套管材料、套管直徑、液體等方面的適當選擇改善。

2. 氣動式傳感器 (Pneumatic Transducer)

氣動式傳感器被應用在氣壓壓力計、土壓計、荷重計以及液面沉陷計中。氣動式傳感器主要有兩種基本形式，取決於傳感器受外部壓力時氣動迴路經常性開啟與否。多數



的現代傳感器是經常性關閉式。茲將各種方式敘述如下：

➤ 關閉式傳感器 (Normally Closed Transducers)

經常性關閉式傳感器也稱作閥門式，基於有無氣體流動情況又可分為兩種。

➤ 開啟式傳感器 (Normally Open Transducers)





表 3-1 混凝土壩潛在破壞模式發生時可能異常之監測物理量

潛在破壞模式	可能異常之監測物理量
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。	目視檢查、壩體垂直與水平位移、壩體應力應變、後拉式預力地錨載重
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。	目視檢查、水庫水位高程及滲流滲漏量、水質檢驗、混凝土入滲與強度檢測
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。	設計容量檢討、目視檢查、水位高程、垂直與水平位移
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。	目視檢查、水位高程及水壓量測、垂直與水平位移、基礎滲流滲漏量、水質檢驗
沿基礎軟弱不連續面之滑動。	壩體垂直與水平位移、壩體及基礎應力應變



表 3-2 土石壩潛在破壞模式發生時可能異常之監測物理量

潛在破壞模式	可能異常之監測物理量
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	設計容量檢討、目視檢查、水位高程、沈陷量
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	目視檢查、壩體水位高程及水壓量測、壩體垂直與水平位移、壩體或基礎滲流滲漏量、水質檢驗
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	目視檢查、壩體水位高程及水壓量測、滲流滲漏量、水質檢驗
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	目視檢查、基礎滲流滲漏量、水質檢驗
因陡坡、滲流壓力及大量降水所造成之壩體滑動	目視檢查、壩體垂直與水平位移、壩體水位高程及水壓量測
沿基礎中黏土裂縫或斷層之壩體滑動	目視檢查、壩體垂直與水平位移
差異沉陷造成之裂縫	目視檢查、壩體垂直與水平位移
土壤液化	地震強度、壩區總應力及孔隙水壓



表 3-3 水位高程及水壓量測監測儀器

量測物理量分類	監測儀器名稱	量測物理量	量測技術	感測器/傳感器 (Sensor /Transducer)
水位高程及水壓量測	水壓計 (Piezometer)	孔隙水壓力及上舉壓力	開放式立管水位或水壓量測;或錨定於土體中之壓力計	水位尺、氣壓式、液壓式、振弦式、線性電位計式 (Linear potentiometer)
	總壓力計 (Total pressure cell)	土體中總壓力	感測隔板埋設於土體或混凝土結構表面上進行量測	氣壓式、液壓式、振弦式、應變計式

表 3-4 滲流及滲漏監測儀器

量測物理量分類	監測儀器名稱	量測物理量	量測技術	感測器/傳感器 (Sensor /Transducer)
滲流及滲漏	量水堰及引水槽 (Weirs and Flumes)	滲流量	水位量側	沒入式壓力感測器、超音波水位感測器、浮桶式水位計、水壓計、氣泡式水壓計
	渠道流量計 (Open channel flow meter)	渠道流量改變量	量測量水堰 (Weir) 或引水槽 (Flume) 之水位高	沒入式壓力傳感器 (Submerged pressure transducer)、超音波水位傳感器 (Ultrasonic level transducer)、浮桶式水位計 (Float gauge)
	濁度計 (Turbidity meter)	濁度	光之散射	光學式
	水質計 (Water quality meter)	酸鹼值、導電度、溶解固體	依其特定項目不同	依其特定項目不同



表 3-5 應力應變監測儀器

量測物理量分類	監測儀器名稱	量測物理量	量測技術	感測器/傳感器 (Sensor/Transducer)
應力應變	應力計 (Stress gauge)	岩石或混凝土之應力變化	於鑽孔中設置進行量測	液壓式、振弦式、阻抗應變計
	載重計 (Load cell)	作用於載重計之垂直載重	將載重計設置於土體與結構物間進行量測	液壓式、振弦式、電阻抗應變計 (Resistance strain gauge bridge)
	應變計 (Strain gauge)	混凝土或結構桿件之應變	應變計埋設於混凝土或焊接於鋼構桿件進行量測	振弦式、阻抗應變計

表 3-6 溫度監測儀器

量測物理量分類	監測儀器名稱	量測物理量	量測技術	感測器/傳感器 (Sensor/Transducer)
溫度	溫度計 (Thermometer)	溫度變化	埋設於混凝土或土體中量測	阻抗量測式、振弦式



表 3-7 位移監測儀器

量測物理量分類	監測儀器名稱	量測物理量	量測技術	感測器/傳感器 (Sensor /Transducer)
位移	梁式感測器 (Beam Sensor)	梁兩端之差異 變位	將鋁製梁式感測器 固定於結構桿件兩 端監測	電解液式傾斜感測器 (Electrolytic tilt sensor)
	收斂計 (Convergence Meter)	岩石或混凝土 表面兩點間距 離變化量	以量測點間固定之 刻度計 (Dial gauge) 或數位尺進 行監測	機械式刻度計 (Mechanical dial gauge)、刻度測微尺 (Dial micrometer)
	裂縫計 (Crack meter)	混凝土裂縫寬 度之擴張或收 縮	對裂縫寬度監測	格線尺、測微尺、刻度計、測 微計 (LVDT)、振弦式、頻率 輸出感應式 (Inductive sensor with frequency output)、線性 電位計式 (Linear potentiometer)
	接點計 (Joint meter)	混凝土接縫處 之擴張或收縮	固定於混凝土接縫 處兩側進行量測	測微計 (LVDT)、振弦式、 頻率輸出感應式 (Inductive sensor with frequency output)
	沉陷計 (Settlement gauge)	預測點對應已 知點之沉限量	量測管中水位或水 壓	振弦式、應變計式、壓力計式、 光學式測讀水位
	手動傾斜計 (Inclinometer, manual)	鑽孔之側向位 移	於鑽孔中利用傾斜 計探頭量測不同深 度之傾斜量	重力參考式伺服加速度計 (Gravity - referenced servo - accelerometer)、磁致伸縮式感 測器 (Magnetostrictive sensor)



量測物理量分類	監測儀器名稱	量測物理量	量測技術	感測器/傳感器 (Sensor /Transducer)
	置入式傾斜計 (Inclinometer, In-place)	鑽孔之側向位移	於鑽孔中不同深度裝置多重傾斜計感測器探頭同時量測之不同深度傾斜量	重力參考式伺服加速度計 (Gravity- referenced servo-accelerometer)、磁致伸縮式感測器 (Magnetostrictive sensor)、振弦式、電解液式傾斜感測器 (Electrolytic tilt sensor)
位移	垂線、倒置擺錘 (Plumb line, Inverted pendulum)	壩體對應垂線之側向位移	利用由壩頂懸吊且固定於壩基之垂線進行量測	光學兩極真空管陣列 (Optical diode array)、電容式感測器 (Capacitive sensor)
	探針式伸張儀 (Probe extensometer)	鑽孔內之伸張或收縮變化量	將探針錘入鑽孔中感測埋設於套管外之磁式或感應式標的	磁式、感應式、頻率輸出感應式、磁致伸縮式
	桿式伸張儀 (Rod extensometer)	鑽孔內之伸張或收縮變化量	測桿錨定於鑽孔並將桿底變位傳導至地表固定點	測微尺、刻度計、測微計 (LVDT)、振弦式、線性電位計式 (Linear potentiometer)
	土體伸張儀 (Soil extensometer)	回填或原生土壤之水平伸張收縮變化量	測桿或測纜一端錨定後回填埋設於土體中進行量測	測微尺、刻度計、測微計 (LVDT)、振弦式、線性電位計式



4. 現有水庫安全監測之問題評析

水庫安全監測應能提供足夠資訊使水庫管理者評估水庫是否發揮預期營運功能並對危及水庫安全之變化提出警訊，因此一個完善的水庫安全監測計畫必須詳細計畫並確實執行以達到預先設定的功用。裝置的每一個儀器應皆具其特定目的，長期觀測的儀器除須具有堅固耐用及簡易維修的特性更應能相互核查及標定。就規劃設計、施工建造及營運管理各階段，監測儀器提供之資料應具有下列特性：

1. 能反應施工前工址條件。
2. 能檢核設計分析時之假設。
3. 能評估施工時期、第一次蓄水及營運時期的行為。
4. 能評估水庫對於特定設計需求的能力。
5. 能觀測地質及結構上的異常現象。
6. 能針對庫區特定之潛在破壞模式作出評估。

各監測量資料收集應具有其個別特定之目標並嚴格地檢視，而後經製表繪圖轉換成具有判斷性及時效性的資訊。若無後續的資料處理及分析程序，單憑監測儀器的設置及監測資料的累積並無法真正改善水庫安全保護社會大眾。

每一個監測儀器都應有其存在的目的，監測儀器之安裝與監測資料收集本身並不能提高大壩之安全性，不當的監測計畫製造不需要的資料，造成時間與成本的浪費，且常造成管理者之困擾。安全監測計畫依業務性原則分類項目包括：

1. 監測系統及監測項目
2. 監測頻率
3. 監測管理值
4. 監測儀器維護程序
5. 監測資料分析

今將各項監測作業之系統性考量分述於以下各小節，本研究依各作業考量及潛在破壞模式分類檢討需求，針對現有水庫安全監測計畫之規劃邏輯、作業原則及調查結果進行問題檢討並建議改善方案。



4.1. 監測系統及監測項目

監測系統及監測項目評估應就幾個基本邏輯出發：

1. 監測系統功能及效率之合宜性。
2. 監測儀器之種類、數量及佈置位置是否合宜。
3. 監測項目與監測方法是否合宜。
4. 監測之環境條件是否合宜。
5. 監測之通路狀況是否合宜。
6. 監測儀器之故障狀況與修復或更新可能性。
7. 停止觀測及新增之監測儀器是否合宜。
8. 監測人力及人員之素質是否合宜。

基於蓄水庫之大小與災害潛勢、大壩與基礎之複雜度、已知之工程問題及設計之保守程度針對各項監測儀器種類是否符合各壩(堰)之主要監測項目進行複核評估；儀器佈置位置及數量是否適當；其觀測方法是否依照規定辦理；對於監測之不利環境條件如漏水、濕氣、落石、風等及監測之通路狀況應加以評估並建議改善措施；對於功能有老化或故障現象之監測儀器亦應加以評估並建議改善措施，因損害、故障或其它因素而停止觀測與新增之監測儀器應評估其是否影響安全監測之功能；監測人力及人員之素質是否合宜。

參考FERC蓄水庫安全評估指引，既有蓄水庫建議最少應包括之監測項目如表 4-1 所示。基本系統則採用容易安裝、容易監測、可提供與安全相關資訊的儀器於具代表性位置設置。此外應參考可能潛在破壞模式分析之結果檢討應該增設之儀器。

依表 4-1、表 4-2 及第 2.3 節所述，直接目視檢視為最基本的監測項目且最易察覺呈現於壩體及其他附屬結構異常現象的檢測方法。綜觀問卷調查結果，大部分單位之直接目視檢視執行成果不佳或僅於安全評估實施時施做。目視檢查並未列入常態性安全監測，且結果多以定性文字描述並未加以定量記錄歸納。若異常現象需監測，則應以輔助工具丈量並加相片保存記錄以利追蹤；且目視檢查常僅於安全性評估時施作，頻率過低恐無法發揮預警功效。直接目視檢視施作效率甚高、所需技術簡單且易於訓練人員執行。雖然水壩體積龐大且其中廊道結構複雜，目視檢查為最易執行且有效之監測方式，



建議應對每座水壩以其特有之潛在破壞模式為基礎擬訂目視檢查作業之標準作業程序。

對土石壩而言，依表 4-1 所建議之最少監測項目為目視檢查、水庫水位、尾水位、滲流/滲漏流量、孔隙水壓/上浮力、基礎位移及地震力。問卷調查結果顯示水庫監測儀器配置項目基本上多數符合，但於基礎位移該項並未有特定儀器進行量測，若經評估已排除基礎位移之疑慮，並不需要增設，但最好能夠在檢討監測項目時予以說明。

對混凝土壩而言，依表 4-2 所建議之最少監測項目為目視檢查、水庫水位、尾水位、滲流/滲漏流量、孔隙水壓/上浮力、表面軸線線形 (alignment)、基礎位移及地震力。問卷調查結果顯示配置項目基本上多數符合 (包含本計畫中曾施作非破壞性檢測之石門、新山及仁義潭水庫)，但於表面軸線線形該項並未有特定儀器進行量測。且依第 2.3 節所述，滲流水質化性及接縫與裂縫大小亦為可能出現之異常現象，但於多數水庫監測計畫中亦被忽略。

由調查結果顯示，某些較小的蓄水庫，如金門縣自來水廠所轄之蓄水庫，可能因規模較小經費困窘，其辦理監測業務人員短缺 (僅 1 人) 且監測業務項目僅止於目視檢查。就前述之 1995 年國際大壩委員會 (ICOLD) 第 99 號公報指出大部份破壞水壩屬壩高小於 30m 之小壩。如何在資源不足的狀態下，為規模較小之蓄水庫規劃一經濟實惠的安全監測計畫？從潛在破壞模式分析建立著手進而規劃安全監測作業應是最合乎經濟效益的作法。

目前即使是大型水庫，多數安全監測系統仍依庫區工程設施或地理分區設置。其主要設置目的多為整體性長期觀測均勻佈設監測，僅少數為設計或分析之潛在危險區域佈設檢核。雖然使用者可依分析目的選取分佈於工區中之儀器數據，但整體設置原則仍未能清楚點明其相對應疑慮問題及對其合宜性進行評估。進行評估安全監測系統是否能夠滿足觀測需求時，應先檢討各儀器是否正常運作。將仍正常運作之監測系統儀器繪製其平面及剖面位置，據以檢討其監測功能是否提供潛在破壞模式之觀測資料。

4.2. 監測頻率之評估

水庫安全監測主要目的之一在於能及時發現大壩及附屬設施之異常現象，並得以採取必要措施以避免或減輕損害。因此監測頻率應足夠密集以能滿足即時發現異常現象之需求，然而監測頻率亦不應過於密集而違背經濟性之原則。



監測頻率之評估內容包括：

1. 原規定在不同階段之監測頻率是否合宜。
2. 歷年在不同階段實際採用之監測頻率是否合宜。

對於原規定及實際歷年在不同階段採用監測頻率之複核與評估應考慮下列因素：

1. 壩(堰)之災害對生命財產之危害程度。
2. 壩(堰)之規模(高度、長度)。
3. 蓄水庫之容量。
4. 壩(堰)址地震之危害程度。
5. 壩(堰)齡及狀況。
6. 蓄水庫水位上、下波動之頻率及體積。
7. 過去之問題及不正常之結構行動。
8. 其它特殊狀況等。

經複核與評估後，可依據蓄水庫實際運轉狀況，建議未來各儀器之監測頻率。

根據「蓄水庫構造物管理基準」之規定，監測週期頻率應按不同時機分別訂定之，分為初次蓄水期、漸穩期、穩定期，其定義如下：

1. 初次蓄水期：初次開始蓄水至滿水庫（達計畫蓄水位）所規定時間，或經過之一定期間。
2. 漸穩期：初次蓄水期後至壩及水庫構造物之舉動趨於穩定狀態期間。
3. 穩定期：經過漸穩期，壩及水庫構造物之各項舉動已達規律之正常穩定狀態。一般在蓄水後 1~5 年。

另外根據「蓄水庫安全評估規範（草案）」，水庫遭受地震、洪水、豪雨、山崩超過一定程度實應辦理特別檢查及安全評估，屬於監測之特別期，應提高監測頻率。

參照回收問卷，石門、新山與仁義潭水庫對於監測計畫中各項儀器監測頻率是否曾依不同營運階段進行調整將敘述如下。石門水庫曾於穩定期（蓄水後 1~5 年）調整；新山水庫則於施工期及漸穩期曾經調整；仁義潭水庫曾於穩定期（蓄水後 1~5 年）調整。石門水庫與新山水庫於遭受地震、洪水、豪雨及山崩超過一定程度後調整。新山及仁義潭水庫則無清楚敘述。根據FERC（2003）中到高低災害潛勢蓄水庫之典型監測頻率如



表 4-2，問卷調查結果顯示水庫監測頻率基本上多數符合，但仍於直接目視檢查上未能有固定計畫進行檢視。多數受訪單位皆於不同時期調整監測頻率，僅 4 個單位從未調整。進入穩定期後，多數單位在超過一定程度的天災發生後皆曾調高監測頻率，亦有少數（2 個）會在每年蓄水位高峰及低峰期調整。

4.3. 監測管理值之評估

監測之管理值可分為警戒值與危險值，監測警戒值係各監測儀器之監測值在蓄水庫正常運轉狀態下所設定之上、下界限。當監測值超出警戒值時，經專業人員仔細研判後，除非有特殊原因，否則通常係表示儀器功能或結構行為可能有異常現象。危險值係指構造物容許之最大極限值，當監測值超過危險值時，表示構造物已處於緊急之危險狀態應立即採取緊急應變措施。適當的管理值可提供監測人員對儀器功能及結構行為是否異常作初步而立即之研判與評估並採取必要之改善措施。

各監測項目之理論值通常為在監測管理值尚未建立前供監測之參考，因此應複核及評估是否合宜。

管理值之訂定應先考慮各蓄水庫對於風險之忍受程度，依據各觀測儀器經驗上之主觀研判，抑或根據設計條件做為基準。根據實際分析結果預測破壞點，配合長期觀測逐步調整管理值。

1. 管理值訂定前應考量之因素

管理值之訂定前應考慮之因素包括：

- 蓄水庫大小等級。
- 蓄水庫災害潛勢等級。
- 蓄水庫本身之特性：包括環境特性與施工條件及過程，如地質地形與水文條件、壩址地震之危害程度、壩齡及狀況、蓄水庫水位升降的量與頻率等。
- 選擇適當物理量：如滲水量、位移、水壓等。
- 監測儀器精度。

2. 相關背景資料蒐集

背景資料之收集目的為藉由過去有關該水庫工程之規劃、設計、施工及維護運轉期間等各種資料，以求徹底瞭解整個水庫及大壩之狀況，依據每個水庫之特性，訂定適當



之管理值。

3. 監測資料分析

監測儀器之觀測資料評析方法與觀測成果分析，係以觀測數據以適當比例依時間繪成曲線並將影響該觀測值之因素曲線繪在一起以利比較研判。曲線中可顯示觀測值之長期、短期或異常之突變，再依曲線之變化趨勢，與過去觀測資料、理論分析及自然現象之預期趨勢相比較。根據長期資料統計結果，可透過統計分析法或包絡線法找出相關影響監測值變動之因子與監測值變動之相關性，以作為管理值訂定之重要參考。

大壩相關現象模擬與分析包括結構應力分析、滲流分析、靜力分析與動力分析等工作項目。經由大壩相關現象模擬與分析後可預測大壩行為，此一大壩行為預測將成為監測資料理論值訂定之依據。配合水庫安全評估時提出之校核分析成果，監測資料理論值應隨更嚴謹之分析成果進行修正與調整。

一般而言大壩施工期由於所得之觀測值資料不夠多，因此在訂定管理值多採用理論分析；待水庫運轉後，由於未知因素慢慢增多且觀測資料也累積至一定量。此時，統計分析法常是訂定管理值之主要考量。基於安全性，管理值選擇統計法或理論值較高者。另外，危險值之推估以決定模式分析法較適用；警戒值之推估則以統計模式分析法較適用。

監測之管理值可分為警戒值與危險值，監測警戒值係各監測儀器之監測值在蓄水庫正常運轉狀態下所設定之上、下界限。危險值係指構造物容許之最大極限值，當監測值超過危險值時，表示構造物已處於緊急之危險狀態應立即採取緊急應變措施。各監測項目理論值通常為在監測管理值尚未建立前供監測之參考，因此應複核及評估是否合宜。

問卷調查結果顯示，石門水庫僅部分儀器有設定監測管理值，包括地下水位、請斜儀、擺線儀、山脊滲漏排水等項目。各項儀器監測管理值並未依不同營運階段進行調整，儀器監測管理值曾於重大天災（如 921 地震）後進行檢討全面性檢討。監測計畫中各項儀器使用之監測危險值設定分析乃利用情境推演來進行載重及材料極限狀況分析並參照歷史觀測資料進行統計分析推估，各項儀器超出管理值僅部分儀器已擬定既定流程措施因應且監測管理值於 93 年初訂，目前進入試用階段。

新山水庫僅部分儀器有設定監測管理值，但未描述設定管理值之儀器；各項儀器監



測管理值曾於施工期與漸穩期階段進行調整。各項儀器監測管理值是否曾於重大天災（如 921 地震）後進行檢討，新山水庫則無清楚的描述。該水庫對於監測計畫中各項儀器使用之監測危險值設定分析時如何定義載重或材料極限狀況的流程並不清楚，對於各項儀器超出管理值時也無既定流程措施因應。仁義潭水庫並未訂定監測管理值，相關監測問題亦無所回應。

某些管理單位（4 個）完全未對其管轄監測儀器設定管理值；亦有單位於水庫營運周期從未進行調整管理值（6 個），即使經歷重大天災後（如 921 地震）亦未檢討；多數水庫僅對歷時資料之長期、短期或異常之突變進行討論，並未依曲線之變化趨勢與過去觀測資料、理論分析及自然現象之預期趨勢相比較。

管理值在監測預警系統中扮演非常重要的角色，必須要訂定管理值，方能對於異常觀測資料進行檢查或反應處置之作業，如此才能發揮監測系統設置之目的。雖然警戒值或危險值訂定之準確度不易掌握，但仍應就現有資訊進行最適性的工程推估，再於觀測過程中逐步修訂。

4.4. 監測儀器維護程序

監測儀器維護程序應以原廠維護手冊為基準並配合監測作業頻率進行，對於監測值異常之儀器因能迅速分辨是否為監測儀器故障或監測物理量變化。

一般監測儀器維護設備項目包含：

1. 監測儀器本身或感測器
2. 監測資料擷取器
3. 監測儀器設置之管路或管道
4. 自動化監測資料傳輸設備及線路
5. 現地電力設備
6. 監測資料處理系統及儲存設備

監測儀器維護程序應以原廠維護手冊為基準並配合監測作業頻率進行，對於監測值異常之儀器因能迅速分辨是否為監測儀器故障或監測物理量變化。監測分析報告亦應將維護紀錄建冊存檔以供後續系統整體性規劃更新之用。此外，監測儀器之安裝施工圖說，應確實要求與審查，並確實執行儀器安裝之監工與驗收。



由問卷調查結果得知，石門水庫與新山水庫皆執行監測儀器維護；仁義潭水庫則無清楚回答相關之問題。監測儀器維護之執行方式兩座水庫皆採自行辦理與委外維護。其中，石門水庫亦清楚列出分工的方式：每年簽訂維護契約執行外，若有監測儀器損壞則自行規劃辦理修復作業。監測儀器維護作業執行頻率，石門水庫為每季一次、新山則為每半年一次。對於各項監測儀器之原廠操作手冊，石門及新山水庫皆完整存檔。監測計畫各項儀器維護程序，石門水庫包含監測儀器本身或感測器、監測資料擷取器與自動化監測資料傳輸設備及線路；新山水庫包含監測儀器本身或感測器、監測資料擷取器、監測儀器設置之管路或管道、自動化監測資料傳輸設備及線路、現地電力設備與監測資料處理系統及儲存設備。

所有單位之監測儀器中以水壓計（氣壓式及直管式）毀損率最高；再其次為沉陷計（電阻式）、傾斜儀（加速度式及振弦式）、土壓計（氣壓式）及應變計（電阻式）等；排除儀器或傳感器先天限制，監測儀器維護程序中之人為因素缺失應亦為檢討重點。例如受訪單位中僅少數（2個）將各項監測儀器之原廠操作手冊完整存檔；儀器維護作業頻率過低；維護作業項目不足等，這些現況問題若有效規畫排除人為因素則監測儀器使用壽命應可大幅提高。

一般監測儀器為以自動化方式擷取資料多採電子式感測器。台灣地區氣候潮濕多雷雨，電子式監測儀器常因雷擊損毀。如何於監測現場安裝避雷設施，應就現場特定條件設計。其它地理地形或特殊天候因素預防程序，應於各水庫監測計畫規劃時個別考慮評估。

4.5. 監測資料分析

監測儀器之安裝與資料收集本身並不能提高大壩之安全預警，監測資料必需經過適當的分析。監測資料分析除了資料歷時的檢討，應檢查其空間分佈、理論值、不同物理量之相關性等，對於綜合反應大壩之行為狀態者如壩體及壩基之變形量，變位量、上頂力及漏水量等應於最短時間內加以評析。以便瞭解整體壩體、相關結構及基座之行為與狀態是否正常，及早發現潛在之缺失、及時採取必要之因應對策，確保蓄水庫之安全及正常之功能。監測資料分析與評估時，應善加利用大壩行為分析、模擬與預測之成果進行綜合研判。



根據各項監測值所繪製之歷時曲線，定性分析可配合歷時曲線之穩定性、相關性、合理性、一致性、突變性及對稱性加以研判評估。

1. 穩定性：當監測量過程曲線變化之規律與趨勢呈穩定狀態，則屬正常；如原因量不變而效應量之趨勢隨時間不斷向不利方向增長，則屬不穩定之異常狀態。
2. 相關性：平常監測值中原因量與效應量都會成一定之相關性，如其相關性較以往有所改變則屬異常。
3. 合理性：監測量之變化趨勢符合自然界之物理現象則屬正常，否則屬異常。
4. 一致性：在相同條件下（即原因量相同），效應量之變化型態應為一致或相似；同一位置使用不同儀器所量測之同一物理量亦應符合一致性，則屬正常，否則屬異常。
5. 突變性：監測量之變化過程中如有不符合預期中或不按規律之突變，則屬異常。如為單一之突變，則可能屬人為錯誤；如為重複或連續之突變，則可能屬儀器或系統之故障或結構已有異常現象。
6. 對稱性：如監測儀器埋設於具對稱之位置，則其監測量之變化亦具對稱性，否則應為異常。

定量分析法主要係將監測值與與預期值（包括警戒值或危險值）相比較後，評估大壩或附屬設施屬正常、異常或危險狀態。預期值之訂定一般採用決定模式分析法、統計模式分析法、混合模式分析法或包絡線圖示法等方法，分述如下。

1. 決定模式分析法

依據影響監測量之各項外界因素，以理論分析法如有限元素法等分析之所得之關係式，以推估該監測量之預期值，一般而言，決定模式分析法較適用於推估大壩行為之危險值，因模式所採用各種影響因素及材料參數不易評估，故多採用較高之安全係數。

2. 統計模式分析法

以監測儀器長期之觀測值，利用迴歸分析方式，建立監測量與影響該量之外在因素間之關係，統計模式分析多適用於警戒值的訂定，主要在於統計分析在於求得各物理觀測量之長期行為，若物理量處於穩定狀態，多無潛在之危險。

3. 混合模式分析法



合併決定模式法與統計模式法來推估監測量之預期值。其方法乃將決定模式分析法中較不易精確分析之分量(如溫度)利用統計模式分析法計算，而可較精確分析之分量(如水位)仍利用決定模式分析法。

4. 包絡線圖示法

將各儀器歷年之監測值經校核篩選後，分別點繪於橫軸表示蓄水庫水位或其他影響行為之主要外在因素，縱軸表示儀器監測值之方格紙上，並將其上下之最大及最小值連接成包絡線，此包絡線即為對應各該外在因素之預期警戒範圍。

監測資料分析除了資料歷時的檢討，應檢查其空間分佈、理論值、不同物理量之相關性等，對於綜合反應大壩之行為狀態者如壩體及壩基之變形量，變位量、上頂力及漏水量等應於最短時間內加以評析。監測資料分析與評估時，應善加利用大壩行為分析、模擬與預測之成果進行綜合研判。最常見之不同監測物理量間相關性探討為蓄水位、地下水與孔隙水壓間之關連性及滲漏滲流量與降雨量間之關連性。

以 1984 年國際大壩委員會 (ICOLD) 之案例收集報告中土石壩破壞 (failure) 案例統計資料為例：破壞發生於基礎，發生原因為基礎滲流者通常伴隨基礎內部侵蝕的異常現象。如基礎滲流量發生異常，則再對滲流水質檢測是否異常帶有土壤或岩石礦物即可了解基礎內部侵蝕是否發生；破壞發生於壩體，發生原因為與混凝土結構連接不佳者通常伴隨差異沉陷及位移。如接縫及裂縫監測量發生異常，則應再行比對相關沉陷與位移量用以確認異常現象。

由問卷調查結果得知，石門水庫與新山水庫皆執行監測儀器維護，仁義潭水庫則無清楚回答相關之問題。對於監測資料擷取分析之執行方式，石門水庫採監測資料收集及分析委外進行，監測成果審查及特定問題處置自辦；新山水庫皆採委外辦理。對平時監測資料報告撰寫頻率而言，石門水庫為每月一次；新山水庫則依區域及儀器不同而有所差異。各項監測儀器之監測資料的呈現方式，石門水庫與新山水庫都採單一儀器之歷時呈現、同一類型儀器資料於鄰近空間分佈呈現與相關監測物理量之不同儀器資料於空間分佈或歷時呈現並交叉比對來呈現資料。對於不同種類監測儀器之監測資料交叉比對的原因，石門水庫考量是監測物理量間具有相關性與比對物理量皆與某一破壞模式相關；新山水庫則是考量監測儀器設置位置鄰近的關係。對於石門水庫、新山水庫及仁義潭水



庫三管理單位中，僅石門水庫管理單位清楚了解目前所辦理監測計畫中訂立管理值之資料分析方法

整體而言，目前水庫管理單位辦理監測資料擷取分析多採自行辦理方式執行，少數採委外辦理或兩者並行方式辦理。對於監測資料呈現多採單一儀器之歷時呈現，雖部分亦採同一類型儀器資料於鄰近空間分佈呈現，及相關監測物理量之不同儀器資料於空間分佈或歷時呈現並交叉比對。但多數資料分析邏輯仍基於空間及監測物理量關聯性，僅少數以特定破壞模式為交叉比對目。現形分析方式易使某些重要徵兆於大量監測資料中被忽略而失去防災時機。若能於資料分析時以潛在破壞模式為導向，不但容易發現謬誤且易於對重要破壞徵兆進行控管。





表 4-1 既有蓄水庫建議之最少監測項目(FERC, 2003)

監測項目	低災害 潛勢蓄 水庫	中到高災害潛勢蓄水庫					
		土壩	混凝土 重力壩	拱壩	扶壁壩	獨立溢洪 道/出水工	整體式 電廠
目視檢查	X	X	X	X	X	X	X
水庫水位		X	X	X	X	X	X
尾水位		X	X	X	X	X	X
排流 / 滲 流/滲漏		X	X	X	X	X	X
孔隙水壓 /上浮力		X	X			X	X
表面沈陷							
表面對準			X	X	X	X	X
內部位移							
裂縫位移			X	X	X	X	X
基礎位移		X	X	X	X	X	X
地震力		X	X	X	X	X	X
後拉式地 錨應力			X	X	X	X	X



表 4-2 中到高災害潛勢蓄水庫之典型監測頻率(FERC, 2003)

監測項目	監測頻率				
	施工期間	初次蓄水	蓄水第一年	蓄水第二及第三年	長期運轉期
目視檢查	每日	每日	每週	每月	每月
水庫水位		每日至每週	每半個月	每月	每月至每季
尾水位		每週	每半個月	每月	每月至每季
滲流量/滲漏量	每月	每日至每週	每週至每月	每月	每月至每季
孔隙水壓/上舉(頂)力	每日至每週	每日至每週	每月	每月	每月至每季
表面(壩頂)沉陷		每月	每季	每半年至每年	每半年至每年
表面位移		每日至每週	每季	每半年至每年	每半年至每年
內部位移		每週至每月	每月至每季	每月至每半年	每月至每年
接縫/裂縫變位		每週至每月	每月至每季	每月至每半年	每月至每年
基礎位移	每週	每週至每月	每季	每半年	每半年至每年
溫度	每小時至每日	每週	每半月	每月	通常不需要
後拉式地錨應力	通常不需要	通常不需要	每年	通常不需要	每五年



5. 各項非破壞性檢測方法適用性之探討

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，如利用檢體內部所得之物理性質狀況則可推估檢體內部材料組成結構，例如於大地工程上應用則可推估地層構造。但由於檢測原理、施作方法、待測性質、實驗經費及施測空間等種種主客觀因素影響，針對某一特定工程問題適當選擇檢測方法實須對各種檢測物理性質及實驗方法有一番深入認識。

本計畫收集國內外各種可行之檢測方法，並依據蓄水庫潛在破壞模式分類對每一個方法再針對其基本原理、資料擷取、資料處理、資料判釋、優缺點、技術限制、案例分析等進行探討。收集資料將整理分析成可提供水庫安全評估主辦單位參考之技術文獻並據以作為後續改良發展之參考。

5.1. 適用性基本考量

台灣地處板塊交接地震頻繁之處。大型水利設施如水壩壩高至少十幾公尺長度則常達數百公尺以上。一旦發生大規模坍塌或地震破壞水壩及其附屬結構物，將導致下游土石與洪水等嚴重災害。在設計之初，壩趾選擇需著重於壩墩與壩基水密性、壩墩穩定、壩基承载力、及壩體本身的耐震性因素。因此收集大型水利設施區域與工址的地質資料及壩體本身耐震強度配合水理分析為一非常重要的研究。以土石壩而言，地震對壩體所造成之損害情形，除了地震本身特性影響，往往取決於土壤在反覆載重下的受震反應，而該反應又絕大部分由土壤之力學性質控制。對於許多工程問題而言，特別是由波傳效應控制者，工程材料（如土石壩中回填料或場鑄混凝土）在載重下行為僅處於小變形狀態。而材料於動態載重下之行為反應即稱為材料動態性質，材料動態性質包含其處於動態載重下之勁度、阻尼、包松比及密度。其中以材料勁度及阻尼動態性質為處理大地地震工程時最重要之性質。對於使用中水壩，既使除去安全性考量對壩體進行鑽心取樣，其所取試體於巨大體積下有效代表性及鑽心過程中試體所受擾動程度皆令人對該試體所得之性質參數存疑。



壩體檢測另一重要議題為滲流。壩體滲流可分為基礎滲流及壩體滲流。土石壩通常是不透水層岩盤並作截水處理。壩體心牆則選用滲透係數低之土料填築，但水庫上游蓄水仍藉由重力及毛細管作用向下游滲流。通常設計時於壩體滲流線尾端設置濾層以收集滲流並使之排出壩體。經由壩體滲透之水量與填築壩體填料之土壤組織、顆粒大小、形狀、孔隙率、飽和度及水溫有關。一般依滲流傳輸理論可推得理想狀態下滲流流線網並視之為均勻層流。但由水庫土石壩破壞案例得知，壩體產生管湧所佔比例甚大。因此監測滲流量大小及其水質是否穩定為水庫管理者唯一可掌控滲流情形之資訊，對於壩體內部目前並無一進行有效了解滲流的檢測方法。

另外，由於水壩設計使用年限皆以百年計算且本身體積巨大。以抽樣方式品質管制施工過程並無法百分百確保其整體品質；且水壩時時刻刻承受巨大載重及內部滲流侵蝕，或偶經強烈地震力作用，經過數年甚至數十年後材料老化甚至內部損壞都是可預期的情形。因此如何能對壩體材料整體性作一評估應亦列為水庫安全檢查重要項目之一。

壩體檢測可行方法應有下列幾項重點特性：

1. 實驗方法為非破壞性：由於蓄水庫大壩為重要公共設施，因此進行壩體檢測應避免破壞壩體。
2. 檢測深度具穿透性：大壩高度及厚度皆達數十甚至百公尺，因此可行應用之檢測方法必須具備相當穿透能力方能進行內部檢測。
3. 檢測體積具代表性：大壩體積巨大，單點取樣方法如欲獲得頗具代表性樣本群恐將費時費力。可行應用之檢測方法應能提供多維剖面資料分析演譯以供使用者進行整體性評估。
4. 所測的物理量具應用性：可行應用之檢測方法提供之檢測量如能直接具備工程性質則可作為老舊壩體再次分析之準備資料。
5. 檢測點具可重複性：可行應用之檢測方法於壩體之測點測線應可重複施作實驗以利日後規劃為安全監測之一環。
6. 施作過程具簡易性：試驗施作方法不應太過耗時耗費人力以利規劃為安全監測之一環。



5.2. 材料物理性質及常見非破壞性檢測方法

5.2.1. 材料物理性質

一般而言，非破壞性檢測方法直接可得或間接推估之材料物理性質可分為下列幾項：電學性質 (electrical property)、磁化率 (magnetic susceptibility)、密度 (density)、孔隙 (porosity)、應力波速 (seismic velocity)、地層反射性 (reflectivity) 及工程性質 (mechanic property) 等。

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。水利工程或大地工程材料常因材料之金屬及硫化物成分、孔隙比、黏土礦物成分、滲透性、飽和度及等因素而造成其電學性質差異。施測時之探測深度亦可能造成其檢測所得之電學性質偏差。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。

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。

5.2.2. 常見非破壞性檢測方法

今將常見非破壞性檢測方法之解析度、辨識能力、施測條件與限制簡介於下，其可得之物理性質及於工程應用上模型推估業以表列於表 5-3 中。計畫過程中所收集各項非破壞性檢測方法之量測原理、設置方法、使用條件及優缺點等詳細敘述則參閱附錄二。



以震測方法（折射、反射、跨孔震測掃描及表面波）而言，其解析度及辨識能力取決於震源頻率、待測地層中之應力波速反差、地層厚度與均質性、現地幾何配置、現地背景雜訊及現地地層狀況。其提供之波速/深度剖面可信度頗高，但跨孔震測掃描所提供之解析度及可信度為最高。對於某些厚度較薄之地層或地下障礙物，震測方法可能因現場配置及資料處理演譯時遺漏而降低其辨識能力。折射法及表面波震測施測過程最為迅速便利；反射法因其施測較為繁瑣，故人力需求較高；跨孔震測掃描因其需鑽孔作業，故所需經費較高。

對透地雷達（GPR）之解析度及辨識能力而言，則取決於電磁波源頻寬、待測地層中之介電性質反差、地層厚度與均質性、施測取樣密度、現地背景噪音及現地地層狀況。其施測作業迅速便利且解析度及辨識能力高，故常運用於變化雜訊或地下待測物較小之檢測區，如混凝土結構、路面鋪面、地下管線及孔洞探測等。但若地層中含有導電性之黏土礦物則可能影響量測結果；另外探測深度受儀器發射頻寬影響而有所限制。

電磁探測（EM）之解析度及辨識能力取決於電磁波源頻寬、待測地層中之導電性質反差、地層厚度與均質性、儀器能力及資料分析後續能力。提供之導電度/深度剖面可推估土壤中所含之鹽分及黏土礦物。其施測作業迅速便利且於導電性環境中亦能量測，但於高電阻環境下則效果不佳。對於土壤結構（例如岩石/土壤分界）探測效果不如於電阻探測。

電阻探測（ER）之解析度及辨識能力取決於待測地層中之電阻性質反差、地層厚度與均質性、儀器能力及資料分析後續能力。利於高電阻環境中亦能量測，但於高導電性環境下則效果不佳。提供之電阻/深度剖面亦可推估土壤中所含之鹽分及黏土礦物、地下水滲流狀況。相較於電磁探測，電阻探測須於地表鑽孔設置電極棒因此作業時間較長且花費較高。對於變化變化複雜或地下待測物較小之檢測區，檢測成效不如透地雷達，但探測深度依幾何配置不同可遠大於透地雷達。

感應偏振（IP）之解析度及辨識能力取決於待測地層中之電阻性質反差、地層厚度與均質性、待測物對感應偏振之磁化率（magnetic susceptibility）、現地幾何配置、現地背景雜訊及現地地層狀況。對於電阻抗性環境下，若待測物對感應偏振產生磁化則量測效果甚佳。因此對於黏土礦物或土壤中含有金屬成分之礦物與障礙物具有良好探測效



果，可與電阻探測資料互補比對。但其空間解析及辨識能力較差，不適用探測地層中之孔洞。

自然電位法（SP）之解析度及辨識能力取決於待測地層中之自然電位差、地層厚度與均質性、現地背景噪音及現地地層狀況。其施測作業迅速便利且利於調查地下水滲流狀況。但其空間解析及辨識能力較差，不適用探測地層中之孔洞。

磁場探測（Magnetics）之解析度及辨識能力取決於待測地層中之材料磁化程度及其反差、施測時使用之模型及方法、空間取樣間距、背景雜訊及探測深度等因素。地層中若含有帶磁性物質則探測結果良好。野外施測迅速便利但推估資料通常為定性分析且空間解析度及物體辨識能力不高。並不適用於探測地層中之孔洞。

重力場探測（Gravity）之解析度及辨識能力取決於待測地層中之材料密度及其反差、施測時使用之模型及方法、空間取樣間距、背景雜訊及探測深度等因素。對地層中孔洞探測結果良好，但野外施測及資料分析昂貴又耗時。空間解析度及物體辨識能力不高，受不規則地形地表及地層材料異向性影響頗鉅。

上述這些非破壞性檢測方法，目前仍有許多改良研究持續在進行中，儀器之功能、量測之準確度及空間解析度等都可能持續進步，有利於在水庫安全檢測之應用。

5.3. 適用性評估方法

在面對一個水壩安全檢測問題時，某些物理性質對於評估或計算上扮演相當重要的角色。為確保選定之非破壞性檢測方法擁有最佳適用性，試驗規劃時必需考量檢測需求為何。選定方法之正常邏輯如下：

1. 何種物理現象與參數與潛在破壞模式有關？

若因應特殊分析需求，如地震反應分析時所需之材料動態性質（壩體材料應力波速及工程性質等）或土壩內滲流路徑分析（壩體材料電學性質分佈等），應用適當檢測方法所得之材料性質則可提供直接助益。各項物理現象與參數參照第 5.2 節介紹。

如於非飽和沉積岩中欲檢測自然或人為產生之孔洞分佈，則需考慮岩石與空氣間各項物理性質相對差異。以磁化率而言，非飽和沉積岩約為 0.3 而空氣則約為 0，材料間本項材料參數相對差異性不大；但若以壓力波速比較，非飽和沉積岩約為 4000 m/s 而空氣則約為 350 m/s，材料間相對差異較大。若以檢測區域內應力波速分佈進行孔洞推



估應遠比以磁化率分佈進行適合。又如利用地層反射面性質，或利用電學性質及密度分佈進行檢測，皆有可能獲得不錯的結果。因此選定非破壞性檢測方法時，決定待測物理現象與參數為試驗規劃之最重要基本評估。

若以第 2.2 節分類之潛在破壞模式為考量，混凝土壩結構行為不良所導致之壩體破壞模式即可直接針對混凝土應力波速與工程性質進行檢測；電學性質分佈差異因易受滲透性及飽和度影響，因此適合應用於壩體及基礎滲漏或管湧等破壞模式檢測滲流路徑及地下水位。壩體侵蝕、壩趾基礎侵蝕或壩座沖刷掏空等破壞模式前期徵兆可能有內部孔洞增加增大並造成滲流量增大，因此可利用應力波速及電學性質並行檢測。混凝土壩及土石壩潛在破壞模式發生時可能異常之檢測物理量如表 5-1 及表 5-2 所示。

2. 何種方法可以反映待測之物理性質？

以推估檢測區內材料構造分佈為例，電學性質分佈、應力波速分佈、地層反射面及密度分佈等物理性質及材料構造造成之性質差異皆可能適合利用於推估非飽和之沉積岩中之孔洞分佈。透地雷達、地電阻剖面影像及其他電磁方法利用量測電磁能量歷時及振幅即可得地層中電學性質分佈；表面波震測、折射震測及反射震測探測等則利用量測應力波場歷時及振幅得到地層中應力波速分佈及地層反射面等物理性質分佈；重力場量測則可得到空間中材料密度分佈。因此由選定之待測物理性質則可進一步縮小可利用方法的選擇範圍。常見之非破壞性檢測方法可以反映之物理性質如表 5-3 所示。

3. 何種方法較能提供所需之空間解析度與目標辨識能力？

每種方法在水平或垂直解析度及深度或形狀辨識能力上皆有長短，主要取決於檢測區域（或體積）內各種不同物質間其欲測物理性質之相對差異、欲探測深度、背景雜訊干擾及施測作業技巧等因素。常見之非破壞性檢測方法影響其空間解析度與目標辨識能力之因素如表 5-5 所示。

4. 何種檢測工具能在檢測區域之施測條件發揮功能？

在檢測作業初步規劃中應對各項現地條件及限制加以考量，非破壞性檢測方法的成效完全取決於野外施測條件是否合適。現地施測作業條件評估包含儀器進場是否便利、檢測場地大小、現地地形、地下水高程及成分（通常是鹽度）、土層與岩盤位置、現地植被密度與背景雜訊等。常見之非破壞性檢測方法其選擇場址考量如表 5-4 所示。



5. 何種方法最為經濟？

非破壞性檢測方法的經濟效益評估常在實際作業費用與檢測結果有效性交互影響間取捨。實際作業費用包含試驗規劃、野外施測、資料處理分析及成果推估等作業花費；檢測結果有效性則以解析度與辨識能力是否達到實務需求作為標準。高解析度與辨識能力的檢測結果通常來自於數量龐大且品質優良的現地收錄資料，因而提高野外施測、資料處理分析及成果推估等作業所需之人力、物力與時間。因此於實驗規劃階段即須對檢測成果所需呈現之解析度與辨識能力加以規範，避免造成檢測成果應用性不高或浪費過多資源的情形發生。

6. 何種方法可提供較多資料提供交叉比對及其他應用？

當檢測結果正確性與解析度為優先選擇時，同一試驗場址可能進行兩種以上檢測方法。除因物理性質分布不同所造成之地質構造可加以比對外，若檢測結果間若能相互依物理原理加以推演比對則更可進一步驗證正確性。因此選擇檢測方法時，檢測結果資料間相互補充檢核亦為規劃時一考量重點。以透地雷達及地電阻剖面影像而言，其檢測結果即可相互補充檢核。

7. 施測中必須配合何種破壞性檢測？

非破壞性檢測資料分析架構通常以應用物理模式為基礎加上數學演譯推估檢測區域物理性質分佈情形，且加上野外施測條件不確定性頗高，因此檢測結果通常配合於測區內某些重要斷面或位置進行破壞性檢測加以檢核。大地工程中常以鑽孔方式取得現地資料配合非破壞性檢測方法。檢測進行前若能收集現有破壞性檢測資料輔助，則於現地施測參數選擇及後續資料處理推估皆有助益。





表 5-1 混凝土壩潛在破壞模式發生時可能異常之檢測物理量

潛在破壞模式	可能異常之檢測物理量
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。	應力波速、工程性質
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。	無



表 5-2 土石壩潛在破壞模式發生時可能異常之檢測物理量

潛在破壞模式	可能異常之檢測物理量
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	電學性質、應力波速、孔洞、密度
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	電學性質、應力波速
沿基礎中黏土裂縫或斷層之壩體滑動	無
差異沉陷造成之裂縫	應力波速、電學性質
土壤液化	應力波速



表 5-3 常用之非破壞性檢測方法

名稱	量測資料	所得物理性質	所得物理模型	工程應用
折射震測 (seismic refraction)	壓力波或剪力波之折射 歷時	地層應力波速 (為彈性係數之函數)	應力波速 vs 深度之剖面	地層、材料及結構剖面 彈性係數推估
反射震測 (seismic reflection)	壓力波或剪力波之反射 歷時	地層應力波速 (為彈性係數之函數)	應力波速 vs 深度之剖面	地層、材料及結構剖面 彈性係數推估
跨孔震測 (seismic tomography)	壓力波或剪力波之振幅 及歷時	地層應力波速 (為彈性係數之函數)	應力波速 vs 深度之剖面	地層、材料及結構剖面 彈性係數推估
表面波震測 (surface wave)	表面波波場之歷時振幅	地層應力波速 (為彈性係數之函數)	應力波速 vs 深度之剖面	地層、材料及結構剖面 彈性係數推估
透地雷達 (ground penetrating radar)	電磁波之反射歷時及振幅	地層介電常數、導磁性、導電度及電磁波速	電磁波速 vs 深度之剖面	地層、材料及結構剖面
電磁探測 (electromagnetics, EM)	自然或人造電磁反應	地層導電度及電感	導電度 vs 深度之剖面	地層及水力剖面
電阻探測 (electrical resistivity, ER)	人造電流造成之電位差	地層電阻	電阻 vs 深度之剖面	地層及水力剖面
感應偏振 (induced polarization, IP)	偏振電壓或頻率	地層電容	電容 vs 深度之剖面	黏土或金屬礦物之空間分佈
自然電位法 (self potential, SP)	自然電位差	地層自然電位法	地層自然電位之空間分佈差異	地層水力模型或經水壩與破碎岩層之滲流
磁場探測 (magnetics)	電磁場強度之空間分佈 差異	地層磁化率及殘存磁化程度	地層電磁場強度之空間分佈差異	地質剖面或分佈 (岩層深度或斷層位置)
重力場探測 (gravity)	重力場強度之空間分佈 差異	地層統體密度	地層重力場強度之空間分佈差異	地質剖面或分佈 (岩層深度或斷層位置)



表 5-4 常用之非破壞性檢測方法其選擇場址考量

名稱	適合場址條件	不適合場址條件
折射震測 (seismic refraction)	對飽和土壤及土壤與岩盤介面探測甚佳。且費用較反射震測及跨孔震測低。	厚層中央帶薄層材料不易被探測出來；地下水位及較小孔洞亦不易被探測到。
反射震測 (seismic reflection)	易探測到岩層間之界面；較大型孔洞也可探測。	實驗費時費力；地下水位及較小孔洞亦不易被探測到。
跨孔震測 (seismic tomography)	解析度高且正確性高	需鑽孔而費用高。地下水位及較小孔洞亦不易被探測到。
表面波震測 (surface wave)	可用折射震測資料分析，對飽和土壤及土壤與岩盤介面探測甚佳。	厚層中央帶薄層材料不易被探測出來；地下水位及較小孔洞亦不易被探測到。
透地雷達 (ground penetrating radar)	其施測作業迅速便利且解析度及辨識能力高，故常運用於變化雜訊或地下待測物較小檢測區	若地層中含有導電性之黏土礦物則可能影響量測結果；另外探測深度受儀器發射頻寬影響而有所限制。
電磁探測 (electromagnetics, EM)	其施測作業迅速便利且於導電性環境中亦能量測。	於高電阻環境下則效果不佳。
電阻探測 (electrical resistivity, ER)	利於高電阻環境中亦能量測。	於高導電性環境下則效果不佳。
感應偏振 (induced polarization, IP)	對於黏土礦物或土壤中含有金屬成分之礦物與障礙物具有良好探測效果	電阻探測資料互補比對。但其空間解析及辨識能力較差，不適用探測地層中之孔洞。
自然電位法 (self potential, SP)	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，不適用探測地層中之孔洞。
磁場探測 (magnetics)	地層中若含有帶磁性物質則探測結果良好。	空間解析度及物體辨識能力不高。並不適用於探測地層中之孔洞。
重力場探測 (gravity)	對地層中孔洞探測結果良好。	空間解析度及物體辨識能力不高，受不規則地形地表及地層材料異向性影響頗鉅。



表 5-5 常用之非破壞性檢測方法影響空間解析度與目標辨識能力之因素

名稱	影響空間解析度與目標辨識能力之因素
折射震測 (seismic refraction)	震源頻率、待測地層中之應力波速反差、地層厚度與均質性、現地幾何配置、 現地背景雜訊及現地地層狀況。
反射震測 (seismic reflection)	震源頻率、待測地層中之應力波速反差、地層厚度與均質性、現地幾何配置、 現地背景雜訊及現地地層狀況。
跨孔震測 (seismic tomography)	震源頻率、地層水平均質性及現地背景雜訊。跨孔震測掃描所提供之解析度 及可信度為探測應力波速方法最高。
表面波震測 (surface wave)	震源頻率、待測地層中之應力波速反差、地層厚度與均質性、現地幾何配置、 現地背景雜訊及現地地層狀況。
透地雷達 (ground penetrating radar)	電磁波源頻寬、待測地層中之介電性質反差、地層厚度與均質性、施測取樣 密度、現地背景噪音及現地地層狀況。
電磁探測 (electro- magnetics, EM)	電磁波源頻寬、待測地層中之導電性質反差、地層厚度與均質性、儀器能力 及資料分析後續能力
電阻探測 (electrical resistivity, ER)	電流頻寬、待測地層中之電阻性質反差、地層厚度與均質性、儀器能力及資 料分析後續能力
感應偏振 (induced polarization, IP)	待測地層中之電阻性質反差、地層厚度與均質性、待測物對感應偏振之磁化 率、現地幾何配置、現地背景雜訊及現地地層狀況
自然電位法 (self potential, SP)	待測地層中之自然電位差、地層厚度與均質性、現地背景噪音及現地地層狀 況
磁場探測 (magnetics)	待測地層中之材料磁化程度及其反差、施測時使用之模型及方法、空間取樣 間距、背景雜訊及探測深度
重力場探測 (gravity)	待測地層中之材料密度及其反差、施測時使用之模型及方法、空間取樣間 距、背景雜訊及探測深度





6. 壩體重要檢測技術初步測試與監測化可行性評估

6.1. 應用檢測技術原理

本計畫執行工作時將針對壩體完整性調查與滲流調查等進行具潛力之非破壞性檢測技術之初步測試並評估將這些探測技術監測化之可行性。茲先將可能應用之表面波震測技術、地電阻剖面影像及透地雷達之原理與操作方法簡介如下各小節所述。

6.1.1. 表面波震測 (Multi-station Analysis of Surface Wave, MASW)

1. 表面波震測施測原理

淺部地層之剪力波速在地質調查與地震工程中扮演極重要的角色，包括分析設計地表運動 (Design Ground Motion) 及反應譜 (Response Spectrum) 所需之場址效應 (Local Site Response) 分析、土壤液化潛能 (Liquefaction Potential) 評估、及土壤結構動態互制分析等。傳統現地剪力波速之量測方法需於鑽孔內進行 (如跨孔式、下孔式及 P-S Logging) 或利用貫入之方式量測 (如 Seismic Cone Method)，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，不需鑽孔即可測得地層內部之剪力波速度層層次，其施測容易、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。表面波震測影像法可量測剪力波速之二維分佈，可直接反應地層勁度之變化，亦可間接反應地層剪力強度之變化。

在地表量測之震波以表面波為主，地表附近傳遞之表面波以雷利波為主，其波傳影響之範圍大約侷限於一個波長之深度內，因此，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而變化時造成波傳之速度隨頻率不同而變化之頻散現象。表面波震測之基本原理即藉由量測不同頻率表面波之相位速度，分析其頻散曲線，再進行剪力波速度層構造之反算解析，如圖 6-1 所示。多頻道表面波震測係將一串受波器與震源排列成一行，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，單一測線表面波震測可得到該測線範圍內地層平均剪力波速隨深度之變化，藉由如反射震測之 Roll-along 施測方式移動測線，可得到地層構造之測向變化，進而合成二維剪力波速度影像剖面。



2. 表面波震測儀器

表面波之頻率較低，且最低頻率之震波具有最大之波長，可探測較深之土層，因此必須使用自然頻率較低之受波器。震測系統主要包括震源、受波器、震測儀等，茲分別說明如次：

- 震源：長柄鐵鎚、落錘、振動器、或炸藥，視欲探測深度、地質條件、及環境噪音而定。
- 受波器：視欲探測深度及地質條件而定，一般地層調查使用自然頻率 8 Hz 以下之受波器。
- 震測儀：12 波道以上之數位震測儀，取樣時距小於 2000 μ sec，訊號長度至少 1024 字元，16 bit A/D 以上之解析度，頻率響應 4.5 Hz ~ 4600 Hz，備有低通與限頻前置濾波器。

3. 表面波震測施測作業

單一測線直線展開如圖 6-2 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)；其中近站支距 (X_1) 要大於等於二分之一最大波長，或是大於等於最大探測深度，以避免產生近域影響 (Near Field Effect)；至於接收器間距 (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，應避免產生遠域影響 (Far Field Effect) 且有足夠之訊號雜訊比 (S/N)。

野外施測時，為了要提高訊號雜訊比，同一個炸點可反覆疊加，以使得表面波訊號具有足夠之能量，可以傳到最遠處之接收器。為得到地層之側向變化，必須沿施測方向移動測線展開，每次測線展開移動之距離視側向解析度之需求而定，測線總長度等於第一測線展開到最後一個測線展開之距離。

4. 表面波震測資料處理

表面波震測資料處理主要包括以下幾項：

- 根據野外觀測記錄及測量記錄，建立施測幾何，並給予每一個炸點、受波器、適當的編號。所有表面波訊號進來之前有一段信號為雜訊或初達波，可將此時段的紀錄抹除 (mute)。



- 由震測時域紀錄及其頻譜判別表面波訊號，並據此估計最佳之 Offset 與頻率及相位速度之範圍。視情況可做適度高切濾波，以提高 S/N 比。
- 施作二維波場轉換 (f-k transform 或 p-f transform)，以檢核表面波之頻率與相位速度之範圍。
- 於前一步驟所決定之頻率範圍內，計算每一頻率所對應之相位速度，如此可得到頻散曲線。
- 由前一步驟所得到之頻散曲線進行剪力波速度層構造之反算分析，此速度剖面之理論頻散曲線最接近量測得到之頻散曲線。

表面波之震測資料、頻散分析及反算分析之典型結果如圖 6-3 所示。整合每一測線展開所得到之速度剖面即可得到二維剪力波速度影像剖面。如圖 6-4 之案例所示。

目前，表面波震測法已成熟的應用在大規模的工址調查上，藉由震波資料反算出之剪力波速，可反應出與施測區域相關之工程參數，並由二維剪力波速度影像剖面來觀察施測區域之地層波速變化。雖然表面波震測法成熟的應用在一般的地層調查，而本計畫則將表面波震測法列為檢測壩體完整性的方法，目的在於觀察所量測之剪力波速與二維剪力波速度影像剖面，於評估土石壩壩體材料的動態行為及混凝土壩材料強度之可行性。

6.1.2. 地電阻剖面影像法 (Electrical Resistivity Tomography, ERT)

1. 地電阻量測基本原理

複合材料之電阻率與其孔隙及含水特性息息相關，利用地電阻之探測結果可以評估壩體之滲流情形。地電阻探測主要施測原理在於給予一探測物質外部的電流或是電壓 (如圖 6-5 所示。中 C1 或 C2 端)，利用佈設的電極接收透過探測物質回傳的電勢能差值 (如圖 6-5 中 P1 及 P2)，由量測之電流與電壓可根據靜電學理論計算出受測物體之視電阻率。量測之空間影響範圍視電極之間距而定，電極間距越大，影響深度越大。若改變量測之位置與電極間距，可得到許多不同空間影響範圍之視電阻率，可據以反算地層之真實電阻分佈 (地電阻剖面影像)，藉以瞭解地層構造。從圖 6-5 所示可了解各種不同施測方法的電極排列方式，依電極之佈設方式可分為以下幾類：(1) Dipole-Dipole；(2) Pole-Dipole；(3) Pole-Pole；(4) Wenner；(5) Wenner-Schlumberger。



2. 地電阻量測設備

地電阻量測所需之設備包括電流源 (Current source)、電流計 (Ammeter)、電壓計 (Voltmeter)、電極棒 (Electrodes) 及連接纜線，其中電流源、電流計及電壓計常與一控制器與資料擷取介面整合為一地電阻量測系統 (Resistivity System)，以方便大量的資料量測，先進的地電阻量測系統例如本計畫擬採用之 IRIS INSTRUMENTS 的 SYSCAL PRO 系統。

3. 地電阻剖面影像施測作業

各種施測方法均能以平移及改變電極間距之方式進行地電阻剖面量測，可探測之深度視其電極佈設方式以及現地佈設展距而定。其中以 Pole-Pole 方法在相同展距下可探測深度最深，但空間解析度較差，地電阻剖面影像之施測方法可依照當地地層狀況及施測目標選擇適當之方式。以雙極法排列作電阻率影像剖面 (Pole-Pole) 為例，施測時將四極中之一電流極 C2 及電位極 P2 置於無窮遠處固定 (一般大於測深十倍即可)，稱之為遠電極 (Remote electrodes)。當進行電阻率影像剖面法施測時，在欲探測剖面等間距佈置多支電極 (圖 6-6)。施測開始時，以第 1 支做 C1 電流極，第 2 支、第 3 支...，第 N+1 支逐次切換做 P1 電位極 (N 為設定之目標測深參數)，就可測得第 1 支 C1 電流極，由淺至深地層訊號；接著，以第 2 支做 C1 電流極，第 3 支，第 4 支...，第 N+2 支逐次切換做 P1 電位極 (N 為設定之目標測深參數)，就可測得第 2 支 C1 電流極，由淺至深地層訊號，如此下去，即可獲得由淺至深二維地層剖面資料，由於此法受地形限制較小，品質亦穩定可靠，施測時可將電極棒事先佈好，故十分節省時間。地電阻量測之結果以 pseudo-section 展示，如圖 6-7。

4. 地電阻剖面影像資料處理

地電阻量測之 pseudo-section 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得到地層真正的電阻率分佈。分算分析之方法主要以正算模式為基礎，亦即，若假設一電阻率分佈，量測之視電阻率可依據靜電學理論與有限元素法或有線差分法 (如圖 6-8) 模擬預測，若設法改變電阻率分佈，使得預測值盡量逼近量測值，則可估計出地層之電阻率分佈。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進行，由實際量測資料 (pseudo-section) 反算地層之電阻率分佈。如圖 6-9，



為寶二水庫試驗站地電阻試驗結果案例。

電阻值的變化可有效反應含水特性或水質之改變，除了電探技術的改良，國際上許多研究也開始注意其應用在壩體檢測之可行性，本計畫將評估地電阻於壩體滲漏調查之應用，並研發可適用於混凝土壩之施測方法。

6.1.3. 透地雷達 (Ground Penetration Radar, GPR)

1. 透地雷達原理

透地雷達 (Ground Penetrating Radar, GPR) 為一非破壞性探測技術，主要可提供測線地表下高解析度之二維反射面影像。其檢測原理是利用發射天線發出高頻電磁波 (雷達波，發射頻寬約為 1MHz~10GHz) 用以穿透地層或被探測體。電磁波在兩個不同電性介質的界面(如：地層層面、空洞與岩層等等)產生反射訊號，再由接收天線接收反射訊號進而分析處理。利用高頻電磁波之反射原理探測物體大小時，當被探測體與鄰近物質的介電常數及導電度反差很大則反射訊號增強，被探測體易被探測出來。但如被探測體與鄰近物質的介電常數相當不大時則反射訊號微弱，被探測體不易被探測出來。

GPR 探測在土木工程上已有相當程度應用，依探測天線頻率之高低不同其適用範圍包括結構物品質管制及裂縫之非破壞調查、地下結構物位置與大小之探測與調查、土岩層等深度與層位之探測與調查、考古研究及礦脈之調查等。

GPR 探測如使用天線頻率越高，因其接收波長較短則探測解析度越高，但因傳輸能量較小則探測深度卻越淺。反之天線頻率越低，則探測深度越深，但接收波長較長則解析度卻越差。故透地雷達探測之解析度受其使用天線波長的限制。一般使用於混凝土結構物時天線接收頻寬約為 500MHz~1GHz，而大地工程上所使用之天線頻寬約為 50~300MHz。

如圖 6-10 所示，傳輸天線 (transmitting antenna, TX) 與接收天線 (receiving antenna, Rx) 沿欲探測之測線方向以固定速率移動，以人工移動的天線其移動速率通常小於 1 m/s 而若以固定於車輛上之設備則移動速率可大於 50 km/s。傳輸於探測物中的大部分訊號將於發送面下不斷地傳導直至某一電學性質變化之不連續面，部分訊號因該不連續面反射至發送面而被接受天線接收，部分訊號則通過該不連續面折射至下一層探測物並繼續傳導。多重的反射及折射將使接收到的訊號波形複雜化導致地下剖面推估需



要較繁複的過程。以一簡化之河川或水庫剖面為例，一筆完整收錄的反射訊號歷時資料呈現如圖 6-11 所示，沿測線方向連續收錄之資料則可組合為一二維剖面進而進行判讀。

雷達波於非電磁性材料中傳導速度 v 依其相對介電常數 而定，其關係可由下式：

$$v = \frac{c}{\epsilon_r^{1/2}}$$

其中， c 為光速 (m/s)；曲型之水質與地質材料對 100 MHz 電磁波之相對介電常數 如表 6-1 所示。配合反射訊號歷時資料與推估之雷達波傳遞速度則可推測產生反射訊號之不連續面深度。此外，電磁波於介質中傳導能量衰退 (Attenuation) 性質由導電度控制。曲型水質與地質材料對 100 MHz 電磁波之傳遞能量衰退性質如表 6-1 所示。

2. GPR 之電磁波量測設備

本計畫採用之 GPR 觀測系統為法國 MALA 公司之 RAMAC GPR 系統。本系統包含控制器 Control Unit CU II，如圖 6-12 RAMAC GPR Control Unit CU II 所示，可連接 25MHz 至 1GHz 天線組，以及非單式天線組 (其發射頻率為 25、50、100 及 200MHz)，並可連接多組多工器。而主機與電腦間其操控之界面為 RAMAC GroundVision 軟體。本軟體將可利用人工觸發或利用滾輪記程以啟動紀錄。本試驗採用 500Mhz 天線組可參考圖 6-13。

3. GPR 施測作業

本計畫採用 500MHz 全單式天線進行探測，主要目的在於評估 GPR 於壩體結構物可行性及其量測技術之展示，以作為未來應用與改良之依據。本計畫規劃於水庫溢洪道混泥土鋪面，利用透地雷達檢測一區塊範圍。為建立檢測區域下立體剖面，需確定每次 GPR 測線之施測間距，其測線可沿縱向或橫向施測。施測流程配合 GroundVision 軟體以擷取天線量測資料，其軟體可即時顯示並紀錄測線即時深度影像剖面 (vertical slices)。而軟體之紀錄觸發方式可採取人工、滾輪測距、時間歷時以及 GPR 資料。本研究則採用滾輪記程，將各測線之展距以及天線影響資料一併收集。

4. GPR 時間剖面影像處理

目前國內之 GPR 探測多為 2-D 的探測方法與資料分析，2-D 的反射訊號常無法有效反應異常區域之位置與形狀，使得探測資料常遭受質疑。目前 3-D 探測與資料分析方



法日趨成熟，本計畫利用上述之 GPR 量測系統，搭配 3-D 分析軟體，以提供不同時間剖面及 3D 影像資料展示。其軟體分析原理在於將各 GPR 測線完整深度剖面 (vertical slices)，配合量測之幾何配置，先提供各測線時間原點選取及能量修正功能，將不同測線差異修正。而後，組合縱向或橫線各組測線深度剖面資料，由使用者決定不同時間剖面區間，其區間在經過軟體內插計算後，用以提供時間剖面影像。最後，由各剖面影像而建立 3D 影像模型。

6.2. 應用檢測技術新式儀器研發

透地雷達施測容易，表面波震測及地電阻影像探測相對上較為繁瑣，擷錄之訊號品質易受施測設備的影響。針對壩區施測條件及兼顧良好的訊號品質，本研究對施測方法所使用之震源、受波器及電極棒等儀器設備進行改良研究，以使表面波震測與地電阻探測能普遍應用在水庫安全檢測上。

6.2.1. 表面波震測新式受波器及低頻震源

多頻道表面波震測法現地施測時，選定合適的或不同震源種類可以產生良好的表面波訊號供訊號分析及反算之用。因此了解試驗使用之震源本身所能產生之頻譜及其於不同的地質條件下能量集中之範圍，可定性描述在不同施測條下，適用之震源種類。此外，不良頻率訊號可再藉由不同之施測參數與儀器配置，提升資料品質增加其應用性。

交通大學研究經常所使用之震源種類有：

1. 大鎚：鎚頭重 12lb 之鐵鎚。
2. 彈力加速度器：Gisco 公司出產之震源系統，使用 0.5 英吋寬之橡皮帶提供作用力，重槌落距最大達 18 英吋。

經由現場試驗累積之經驗發現，上述震源於遠炸點施炸有能量不足之處。雖然疊加數次炸測資料可稍微提高訊號雜訊比，但低頻訊號之能量不佳。以壩體動輒數十公尺至百公尺高度，低頻訊號之良莠與測區深層探測結果好壞甚為相關。因此製作一套移動便利且可產生大能量之震源系統將可增進資料品質，增加資料贅餘性，提供更多的參考資料。

參考 SPT 落槌系統的設計，本團隊自行研發製作一套自由落槌系統，該系統包含支撐部份的三腳架，懸吊重槌的手拉式吊臂與聯接懸吊機制與落槌的安全滑扣及落槌本



體。描述如下：

1. 三腳架：連桿接合長度為 3.5 米。腳架在許可範圍下展開，中點重錘垂直落距可達 2.5 米。
2. 懸吊機制：採用日本 VITAL 公司所出產之手拉式吊臂，安全荷重 500 公斤；安全滑扣最大荷重 500 公斤。
3. 重錘：材質為碳鐵，不易脆化。重錘直徑為 30 公分之球體，重量 125 公斤，球體上部有一 U 型扣環與懸吊系統連接。
4. 移動：以立式推車作為移動在距，如圖 6-14 機動性佳。現地組裝完成，如圖 6-15。

傳統之多頻道表面波震測施測是將長柄式速度受波器插在地表上，以獲得與地面良好的束制行為。當測線位置是在壩頂鋪面或壩面上，受波器位置需先以電鑽在接觸面上鑽洞後插入。因此在測線施測之前的前置鑽洞作業與測線展移的程序將耗費相當多的時間。為避免破壞壩面及節省施測時間，研發製作具有移動性與資料可靠度之新式受波器系統將有助於改善施測之效率使試驗程序更加完善。

參考Kansas Geological Survey(USA)與Tyrens(Sweden)所使用之設計，新式受波器使用鋁合金板，該材料具有如下特性：質輕、高強度、高耐蝕性、易加工與環保等優點。加工處理後做為新式受波器之底座，如圖 6-16，上盤尺寸為 $16*10*0.6\text{cm}^3$ ；下盤尺寸為 $12*10*0.6\text{cm}^3$ ，上、下盤分別以 4 組 1/8 英吋螺帽緊扣，總重為 0.6 公斤，並以 5 公分寬之聚酯纖維皮帶連接整組受波器，作為移動該受波器系統之用。鄰近受波器間距可依施測目的做不同間距調整以配合要求。如圖 6-17。

6.2.2. 地電阻剖面影像法新式電極

傳統地電阻儀器量測方式係利用不銹鋼電極貫入地表使電極棒與地表下材料有所接觸，發送電流傳導後量得視電阻率。當施測位置位於土壤地表或是一般鋪面材料時皆可利用不銹鋼電極棒，但若待測材料不允許鑽孔破壞時，如混凝土壩體，則無法利用傳統貫入式電極棒進行施測。新式電極即為克服此項缺點設計製造以利於水庫安全檢測應用。

新式電極底座利用紅銅製成，其底板尺寸長度為 8 公分、寬度為 6 公分、厚度為 1



公分。底板中心突起一高度 5 公分、直徑 1 公分之圓柱體，用以連接銅板與纜線之用。新式電極如圖 6-18 所示。

新式電極施測方式使用皂土加水拌和後，利用皂土其比表面積及吸附水層甚鉅之特性作為銅板電極與施測表面之媒介，可有效增進電流傳導效果改善施測收集資料品質。新式電極的應用範圍相當廣泛，可應用於混凝土材料、水泥鋪面材料及大理石地板，但於瀝青碎石路面施測需要進一步評估。

6.3. 試驗場址

水庫之安全性評估之合理性取決於對於壩體實際施工後之力學性質以及其地質情況。許多老舊水庫已經承受過超過原始設計之載重，雖然如此，材料之逐漸老化仍然是一項值得關心的問題，尤其強烈地震力的作用常會對於壩體與基礎造成傷害。非破壞性的大範圍評估可以輔助監測點的不足或替代儀器損壞之檢查功能，壩體安全較為關心的問題包括壩體與基礎之動態性質、追蹤可能的洩漏現象、追蹤可能的結構損壞、偵測材料退化的區域等。本研究主要的評估技術為新興且具監測化潛力的表面波震測及地電阻影像探測技術，並視情況輔以透地雷達或折射波速影像探測技術等方法。

震測檢測之結果可得到土石壩之動態性質，可作為壩體完整性評估及動態分析輸入參數之參考；地電阻探測之結果則為地層電阻率之分佈，可協助了解壩體內部之滲流特性或濕潤情形，兩種方法搭配使用亦可偵測破碎或孔洞區域。本研究選擇石門水庫、新山水庫、仁義潭水庫與大觀發電廠，作為試驗場址，進行震測、電探及 GPR 應用於水庫安全檢測之評估，試驗場址分述如下。

6.3.1. 石門水庫（土石壩及混凝土水工結構物）

石門水庫位於大漢溪中游，地處桃園縣大溪鎮與龍潭鄉、復興鄉、新竹縣關西鎮之間，因為大漢溪上游陡峻，無法涵蓄水源，延及下游各地區常遭水旱之苦；政府為解決民困、發展農業、興修水利，自民國四十五年七月展開興建石門水庫工作，並於五十三年六月完工，歷時八載，參加員工七千餘人，建設經費約達新台幣三十二億元，水庫總長度為十六．五公里，滿水位面積八平方公里，有效蓄水量約二億四千萬立方公尺，為一多目標水利工程，具有灌溉、發電、給水、防洪、觀光等效益。主要工程可分為大壩、溢洪道、排洪隧道、電廠、後池及後池堰、石門大圳及桃園大圳進水口等結構物，每日



由水庫調蓄之供水量約 80 萬立方公尺，加上下游位控流量以及三峽抽水站者，總供水量最大可達 148 萬立方公尺。自完工營運以來，對北部地區農業生產之改良，工業之發展，人民生活水準提高，以及防止水旱災害等方面均有重大貢獻。

參考財團法人中興工程社於民國 91 年對石門水庫溢洪道廊道所作之現地調查報告之資料。石門水庫廊道總長七公里，溢洪道下方廊道分別為 SG-L 與 SG-R 廊道及 SG-U-2 廊道，如圖 6-19 所示。SG-L 與 SG-R 廊道與溢洪道坡面平行，高程呈 45 度從上游往下游坡降。根據北區水資源局所提供之資料，SG-L 與 SG-R 廊道於溢洪期間多次發生滲漏。SG-L 廊道滲漏位置位於里程 1k+12 處，係對應混凝土分塊 4BL 與 5BL 交接處；SG-R 廊道滲漏位置位於里程 0k+72.5 處，係對應於混凝土分塊 5BR 與 6BR 交接處。

本團隊於 94 年 10 月 11 日進行下層廊道現地檢測作業初步踏勘。目視調查結果發現，廊道 SG-L 混凝土分塊 4BL 與 5BL 交接處，雖經過修補仍有明顯的滲流水流出。交接處裂縫最寬達 3mm，部分混凝土表面有局部破損與剝落的情況；廊道 SG-R 混凝土分塊 5BR 與 6BR 交接處有些許滲流水流出，交接處裂縫最寬約 2mm，廊道部分區域在施工縫位置則有碳酸鈣結晶與水漬；SG-U-2 廊道則無明顯裂縫與壁面溼潤現象。

6.3.2. 新山水庫（土石壩）

新山水庫建於基隆河大武崙溪支流上游，位於基隆市安樂區外寮里附近，距基隆港約三公哩，水庫集水區標高介於 100 公尺至 215 公尺間，水系呈樹枝狀，植生覆被極為良好，新山水庫為單一目標公共給水，供應基隆、汐止地區之用水。新山水庫於民國六十九年完成第一期工程，壩頂標高 EL.75 公尺，蓄水容量 400 萬噸，民國八十七年完成第二期壩體加高填築工程，壩頂標高 EL.90 公尺，蓄水容量增至 1000 萬噸。

新山水庫之管理機關為台灣省自來水股份有限公司，民國 77 年曾辦理第一次安全評估，且水庫加高後未利先行增加部分蓄水，曾於民國 87 年進行『部分蓄水前安全複合報告』；民國 88 年由中華工程顧問公司辦理蓄水前安全複核。該評估報告指出，大壩主要問題在於下游左半坡面之滲流水現象；民國 90 年由和新工程顧問公司辦理第二次安全評估工作，發現水庫右山脊蓄水位以上之坡面有局部地滑之情況。參考歷次安全評估及相關的工作報告指出，新山水庫主要有左側山脊滲流水的問題，右側山脊餘蓄水位上存有局部地滑的情況。



6.3.3.仁義潭水庫（土石壩）

仁義潭水庫位於嘉義縣番路鄉大壩壩址位於八掌溪上游，嘉義市東南方約六公里之內甕、口甕附近，六十九年開始興建，七十六年六月完成開始蓄水，且與蘭潭水庫串聯運用，屬離槽水庫，總容量達 2,782 萬立方公尺，滿水位面積達 2.11 平方公里，有效容量 2,585 萬立方公尺，以解決嘉義市及嘉義縣沿海地區民雄鄉頭橋、後湖及民雄工業區缺水，滿足公共給水及工商用水之需。

台灣地區於民國 88 年 9 月 21 日及 10 月 22 日發生兩次強震，仁義潭水庫於強震後現場檢查結果並無明顯異常現象，惟溢洪道下游及民井受地震影響後滲流量及滲流水濁度皆有異常現象，為避免地震後造成滲流水路徑暢通擴大，於『仁義潭及蘭潭水庫 921 及 1022 大地震後安全檢查與評估報告』執行工作中，進行補充地質鑽探，並規劃設計止水灌漿方式予以止漏。

6.3.4.大觀電廠（混凝土壩）

明潭、明湖水庫位於水里的車埕，係依水里溪地形築壩攔截由日月潭水力發電後沖下來的湖水利用核二廠及核三廠離峰時段的電力回抽到日月潭。利用抽蓄方式發電充分利用剩餘的電力，不僅是本省第一座抽蓄發電廠亦為遠東地區最大的抽蓄水力發電發電廠。明湖水庫內有兩座發電廠，大觀一廠是慣常水力發電廠，民國 23 年 7 月運轉；另大觀二廠是明湖抽蓄水力發電廠（地下式廠房約 5 樓高），民國 74 年 9 月運轉。兩廠合稱為大觀發電廠，發電用水均來自日月潭。

本團隊於 94 年 10 月 18 日經現地勘察壩體溢洪道下方廊道後發現，廊道內極為潮濕，兩側側壁大多出現水漬的痕跡；在部分施工縫位置亦有碳酸鈣沉積，拱頂則有水滴凝結；收集滲漏水之量水堰，水量充足。施測廊道整體雖呈較為溼潤的情形，除混凝土交界之施工縫外，並無明顯裂隙產生。目視檢測 GPR 溢洪道量測區域(10m*20m)，混凝土表面無明顯受外力之損壞，除了量測區域平行溢洪道兩側的邊界與混凝土施工縫有些許雜草外，溢洪到表面情況，大致良好。

6.4.石門水庫大壩測試過程與結果

針對石門水庫大壩，本計畫於壩頂、殼層之通達道路與壩體下游側佈設表面波測

線，如圖 6-20 平面圖之 A、B、C 所示；殼層通達道路(B)與下游壩址(C)則佈設地電阻測線。圖 6-21 顯示水庫之立面圖與測線位置。

6.4.1. 表面波震測

表面波震測作業另受中興工程委託協助第三次水庫安全評估之現地試驗工作，本研究就該次所獲得的資料作進一步的評析。

1. 測線 A (壩頂)

測線 A 之表面波頻散分析可分辨頻率帶寬約在 11Hz~22Hz 之基態頻散曲線，此頻率範圍之表面波速約為 400m/s~550m/s，所對應之探測波長為 18~50m，最大探測深度約為 25m。

表面波震測在壩頂施測所得到之心層剪力波速剖面如圖 6-22 所示。剪力波速剖面深度 0~5m 波速範圍約為 440m/s；深度 5~12m，平均波速遞減，其平均波速約為 360m/s；深度 12~25m，波速值隨深度遞增，波速約從 360m/s 增加至 780m/s。圖 6-22 將石門水庫第一次安全評估，利用下孔震測波速量測所獲得的剪力波速值與由表面波所反算後的剪力波速套疊在一起，發現由表面波震測所反算之剪力波速較高，與前期所施測之下孔波速量測之波速值存在將近一倍的差距，推估其可能原因，一方面受到時間的影響，第一次安全評估至今，時間上已過了相當長的一段時間，隨著土層固結與壓密，材料越緊密，強度變高，波速值亦相對提高，另一方面，下孔震測法乃利用側敲之 SH 波(水平向之剪力波)以完成波速的量測，而表面波震測所反算之剪力波速值，主要反應 SV 波(垂直向剪力波)，滾壓材料垂直向的勁度大於水平向，所以表面波震測所得到之波速值應較孔內量測之值為大。綜合以上分析，表面波之量測結果高於前期下孔震測，應屬合理現象，但其提高之幅度應大於 SH 波速與 SV 波速之差異；總體上來看，心層的材料，隨時間增長，動態性質有所提升，有利於壩體的耐震行為。

測線 A 之表面波頻散分析如圖 6-23 所示，高頻的訊號受到多重模態之影響使得難以反算波速的基態頻散曲線頻率範圍受限於 11Hz~22Hz，可能是震源敲擊面之強度高於下方材料造成的影響，造成高頻訊號非由基態模組控制，在高頻出現多重模態的跳動，因此基態頻散曲線之頻率範圍變窄，使得淺層地層所分析之剪力波速解析度不佳。為改善高頻訊號的品質，未來建議搭配較小型之震源所產生之人工震波，或許能改善高

頻訊號的展現，以提高頻散曲線在淺層之解析能力。

除了頻散曲線外，觀察震波的震盪歷時，可初步判斷訊號之品質以及速度頻散的範圍，增加了解不同施測條件所反應出的現象。圖 6-24，壩頂測線A之震盪歷時，表面波訊號分布在 100ms~400ms區間，400ms以後則有些許訊號擾動的現象。

2. 測線 B (殼層)

測線 B 之表面波頻散分析可分辨頻率帶寬約在 14Hz~28Hz 之基態頻散曲線，此頻率範圍之表面波速約為 420m/s~800m/s，所對應之探測波長為 16~60m，最大探測深度約為 30m。

表面波震測在殼層施測所得之心層剪力波速剖面如圖 6-25 所示。剪力波速隨深度遞增，波速約從 420m/s增加至 1000m/s。與前期第一次水庫安全評估的孔內波速結果比較，本次殼層的速度明顯提升，尤其在GL.15 以下。剪力波速與前期比較，殼層隨時間增加，地層材料越益緊密，加上可能的固結作用，波速有所提升。前期之波速量測採用的是下孔震測法，乃利用地表側敲之SH波(水平向之剪力波)以完成波速的量測，而表面波震測所反算之剪力波速值，主要反應SV波(垂直向剪力波)，滾壓材料垂直向的勁度大於水平向，所以表面波震測所得之波速值應較下孔震測量測之值為大。此外，殼層之測線區域具有高程落差，斜波效應亦會對波速的推估，造成高估的現象，這部分目前反算分析尚無法有效考慮。綜合以上分析，表面波之量測結果高於前期下孔震測，應屬合理現象；但總體上來看，殼層的材料，隨時間增長，動態性質有所提升，有利於壩體的耐震行為。

圖 6-26 為殼層(B)測線之頻散曲線，測線起點至終點高程落差約 2m，高頻訊號受到斜坡效應及周圍抽水管線的影響，導致高頻訊號產生模態跳動，無法得到高頻之基態頻散曲線，淺層資料解析度不佳。圖 6-27 大壩測線B (殼層) 震盪歷時，雖然受到實體波與雜訊干擾較大，但表面波訊號明顯，分布在 300ms~400ms範圍內，400ms後之訊號則受干擾嚴重。為提高表面波量測之準確度與解析度，未來應針對斜坡效應與多重模態問題做進一步的探討。

3. 測線 C (壩基)

測線 C 之表面波頻散分析可分辨頻率帶寬約在 8Hz~30Hz 之基態頻散曲線，此頻



率範圍之表面波速約為 300m/s~700m/s，所對應之探測波長為 10~88m，最大探測深度約為 44m。

表面波震測在壩基施測所得到之心層剪力波速剖面如圖 6-28 所示。剪力波速剖面深度 0~5m 波速範圍約為 440m/s；深度 5~12m，平均波速遞減，其平均波速約為 360m/s；深度 12~25m，波速值隨深度遞增，波速約從 360m/s 增加至 780m/s。剪力波速剖面在深度 0~40m 波速範圍約 300m/s~800m/s，隨著深度逐漸遞增；深度 40m 以下，波速突增至 1100m/s，變化較大。參考大壩斷面資料，壩基下方以卵礫石為主；深度 0~40m，主要為經滾壓之台地卵礫石層與河床卵礫石層，其下方為原有之河床卵礫石層，隨深度增加，圍壓越大，因此，波速值逐漸遞增。

圖 6-29 為測線 C 之頻散曲線，低頻訊號的能量集中，高頻訊號部份，能量分散，影響淺層資料解析度。圖 6-30 所示之震盪歷時，表面波的訊號頗為清晰，受雜訊影響小，但此種訊號在頻散曲線上仍有相當多多重模態的影響。釐清訊號品質受影響的原因並改善高頻訊號多重模態的影響，將有助於增加表面波震測的可行性。

6.4.2. 地電阻剖面影像測試結果

1. 測線 B (殼層)

測線 B 預期能瞭解由拋石料填築的殼層是否有滲漏之餘，測線 B 的起點與終點如圖 6-21 所示，測線約呈西北—東南走向，測線間距為 4 m，測線長度為 188 m，詳細的測線參數如表 6-2 所示。另外，為了對結果有更完善的解釋，並紀錄施測當天的背景參數如表 6-3 所示。

圖 6-31 至圖 6-33 分別為測線 B (殼層) Wenner-Schlumberger、Pole-Dipole、Pole-Pole 殼層之量測結果，結果顯示出共同之趨勢，地表至地表下 15m 處有一低電阻值層，電阻值皆在 100 Ohm 以下，而從地下 15m 至探測深度最底部，電阻值從數百 Ohm 增加至 3000 Ohm 左右。

地表至地表下 15m 處之低電阻值層推測可能量測前 2 天有颱風過境，因此大量降雨造成此層有含水的現象而產生低電阻值；從地表下 5m 至探測深度最底部，電阻值有逐漸增大的現象，因殼層為礫石拋填完成，乾燥的礫石彼此相互接觸，因此呈現高電阻值，推測殼層下方無滲漏之情形發生。

2. 測線 C (壩基)

測線C (壩基) 預期瞭解壩基是否有滲漏之可能，測線之起點與終點如圖 6-21 所示，起點為右側山溝起往左側山脊延伸，測線間距為 3 m，測線總長為 141 m，測線約呈東西走向，測線自壩體右側山溝起，向東延伸至壩體左側山，測線大約涵蓋 2/3 的壩基總長詳細的測線參數如表 6-4 所示。另外，為了對結果有更完善的解釋，並紀錄施測當天的背景參數如表 6-5 所示。

圖 6-34 至圖 6-36 分別為測線 (壩基) Wenner-Schlumberger、Pole-Dipole、Pole-Pole 殼層之量測結果，結果顯示出共同之趨勢，從起點起至測線長度 36m 處左右時，出現高電阻值之區域；在測線長度 48m 處，約在地表下 10m 處有一低電阻值之區域。

綜觀量測結果可以得知，在測線長度 48m 處，約在地表下 10m 處之低電阻值推測為含水量較高之區域，與原壩體設計之排水層或排水道之位置相當，此處殼層之含水現象應尚屬正常。除此之外，壩基之電阻值從數百 Ohm 至 3000 Ohm 左右，推測壩基應無滲漏之可能。

6.5. 石門水庫廊道測試過程與結果

針對石門水庫溢洪道下方混凝土廊道，依據初步踏勘結果，本團隊進行應用非破壞性檢測技術於壩體混凝土廊道之可行性評估。目前混凝土結構物所採用的方法主要有 GPR 與敲擊回音法(Impluse ehco)，混凝土面較不利於 ERT 與 MASW 施測。敲擊回音法主要在決定特定裂縫的深度，沒有提供混凝土波速的分布，混凝土的波速可反映其材料的強度與退化之情形；GPR 能提供當有明顯界面時的反射面位置，較無法了解入滲的情形，因此，本研究特別針對這些限制，提出可於混凝土面施測之震測與電探法，混凝土之 P 波波速分佈採用折射震測影像法，其電阻率的量測則採用電探影像法。

石門水庫溢洪道下方廊道分別有 SG-L、SG-R 與 SG-U-2 三條廊道。考量選定試驗方法首次於廊道內進行，評估試驗結果的合理性與該試驗方法之適用性為首要要求。因此選定 SG-R 廊道混凝土分塊 5BR 與 6BR 交接處，該處混凝土交接處之施工縫呈現輕微滲漏並有碳酸鈣結晶沉積。測線安排以混凝土分塊 5BR 與 6BR 交接處做為測線中點，分別往上游面與下游面各展延 23m，作為資料量測之區域。



兩種方法之施測流程與結果分述如下。

6.5.1. 折射震測測試結果

1. 施測參數

以上游面向下游面之方向為準，折射震測分別在SU-R廊道左側壁與右側壁各佈設一條測線(以下測線A代表左側壁測線，測線B代表右側壁測線)。如圖 6-37 所示以混凝土分塊 5BR與 6BR交接處做為測線中心點，受波器間距 2m，往兩側展延共 46m的長度。以鎚頭 4 磅重之鐵槌作為敲擊之震源，厚度 0.04mm的紅銅片黏著在混凝土壁面作為訊號傳輸線與震源觸發之界面材，如圖 6-38 所示。將新式受波器加以改良後於廊道壁面上施測，並利用皂土將受波器基座黏附在左右側壁上，如圖 6-39 所示，可避免傳統受波器需鑽孔而造成混凝土壁面的損壞。左右側壁測線相關施測參數配置如下表 6-6 所示。本次折射震測施測，震源採九點佈設。兩側線外炸點之距為 5m，線內共 9 個炸點，示意圖如圖 6-40 所示。

2. 測試結果

➤ 測線 A

左側壁施測結果如圖 6-41 所示，測線里程為於 0~46m。此波速剖面採用 tomography反算技巧進行反算。由圖 6-41 中可知，廊道左側壁在施測測線區段內的混凝土 P 波波速大部分在 3500m/s 以上，根據 Whitehurst (1951) 針對混凝土結構物的 P 波波速檢定判斷標準(如表 6-7)，此區段間之混凝土品質為佳。然於此區段間由測線起點起算約 25m、33m 以及 40m 的位置有較低的波速區(橘黃色區域波速約 3000m/s；黃色區域波速約 2800m/s) 存在。33m 處影響深度達三公尺深，其餘兩處皆約影響至 2m。依 Whitehurst (1951) 研究這些較低速區域於混凝土品質上應無疑慮。此三處低速區域中心位置與混凝土塊體澆置界面臨近，極有可能是施工縫所造成之影響。然而其波速降低的橫向影響範圍每一處都有 3 至 5m，因此應再加強檢測是否已有相當孔隙產生，尤以 33m 處為首要區域。若能釐清此區波速降低原因，則可以避免其潛在危險擴大。而 50m 處的低波速區域(綠色區波速約 2000m/s) 因其位於測線末端處，故對其準確性持保留態度。如欲確保其正確性，應另再進行檢測。

➤ 測線 B

右側壁施測結果如圖 6-42 所示，測線位於 0~46m，此波速剖面採用 tomography 反算技巧進行反算，以最小平方差作為誤差估計，本誤差值為 2.02×10^{-7} 。由圖 6-42 中可知，廊道右側壁在施測測線區段內混凝土 P 波波速大部分在 3500m/s 以上，根據 Whitehurst (1951) 針對混凝土結構物的 P 波波速檢定判斷標準（如表 6-7），此區段間之混凝土品質為佳。然而，在此區段間，由測線起點起算約 25m、35m 以及 45m 的位置有較低的波速區（橘黃色區域波速約 3000m/s）存在，除 35m 處的影響深度已達三公尺深外，其餘兩處皆約影響至 2m。以 Whitehurst (1951) 的研究數據顯示，其在混凝土品質上尚無疑慮。這三處低速區域中心位置與混凝土塊體澆置界面臨近，極有可能是施工縫所造成之影響，然而其波速降低的橫向影響範圍每一處都有 3 至 5m，因此建議應當另加注意是否已有相當孔隙產生，加以釐清此區波速降低原因。

6.5.2. 地電阻剖面影像測試結果

1. 施測參數

為適用於廊道試驗採用新開發之銅板電極，如圖 6-18 所示。銅板電極利用皂土直接黏貼於側壁上進行施作，達到非破壞性之原則，並可加快佈線速度以及可方便施作流程。施測方式以 Wenner 及 Wenner-Schlumberger 相互比較結果。

測線之起點為 SG-R 廊道之上游處，由上而下沿側壁且平行廊道佈置測線。測線之第 12 個電極棒與第 13 個電極棒橫跨過施工縫裂隙處，即為測線里程 23m 處。另一處施工縫裂隙在測線第 44 與第 45 根電極棒之間，約為測線里程 39m 處。推估裂隙位置及滲漏情形為預期目標。廊道右側壁之施測參數如表 6-8 所示。

2. 測試結果

以下將對於石門大壩溢洪道廊道佈設之 2 條測線，分就右側壁與左側壁進行解釋。

➤ 右側壁測線

右側壁施測結果如圖 6-43 與圖 6-44 所示，分別為 Wenner、Wenner-Schlumberger 方式施測結果。約於測線 23m 與 39m、表面往下約 1m 處，電阻值高達數千 Ohm。電探結果與前述之施工縫裂隙位置相符；其餘區域電阻值呈現數百 Ohm 且相當一致，顯示出該區域為相當均質之材料特性。另側壁表面至 1m 處有呈現高低電阻值的介面帶，根據過去廊道透遞雷達檢測報告，該介面處可能為空洞含水之情形，進而造

成側壁表面至深度 1m 處有低電阻值。

➤ 左側壁測線

左側壁施測結果與右側壁施測結果一致，如圖 6-45 與圖 6-46 所示，分別為 Wenner、Wenner-Schlumberger 方式施測結果。約在測線 23m 與 39m、從側壁表面往下約 1m 處，電阻值高達數千 Ohm，與前述之施工縫裂隙及右側壁測線推估位置相符，比對結果顯示地電阻於混凝土結構裂縫以及滲漏檢測頗具成效。

6.6. 新山水庫測試過程與結果

本計劃分別於新山水庫之壩頂、殼層與壩基規劃表面波震測測線與地電阻影像探測兩種非破壞性檢測技術，施測參數如表 6-9 所示。圖 6-47 新山水庫壩體加高斷面圖顯示原壩頂高度為 75m 經二次加高後，壩頂高為 90m 與本次試驗所佈設之壩頂測線 A、壩頂測線 B 及壩基測線 C 的概略位置。

6.6.1. 表面波震測測試結果

1. 表面波震測測線 A (壩頂)

參考新山水庫大壩加高平面佈置圖之壩軸里程數，壩頂測線總長 211 公尺，高程為 90 公尺，起點從水庫右側管理中心，里程 STA.0+240 處展延至左側紀念碑里程 STA.0+29 處，如圖 6-48 測線之二維剪力波速剖面所示，GL.0~GL-10 波速分布在 200m/s~350m/s 範圍；GL-10~GL-30 波速分布在 350m/s~520m/s；GL-30~GL-40 波速分布在 500m/s~650m/s。測線里程 STA.0+180~STA.0+160、GL-15~GL-25 有一波速 300m/s~350m/s 之低速帶存在；測線里程 STA.0+90~STA.0+40、GL-12~GL-30 有一波速 250m/s~350m/s 低速帶存在。

圖 6-49 新山水庫壩頂(測線 A) 頻散曲線為新山水庫壩頂測線 A 其中一筆資料之頻散曲線，該比表面波資料以基態訊號為主，並涵蓋良好的高頻及低頻訊號，由圖上觀察，訊號幾乎不受多重模態影響。該筆頻散曲線，其頻率 14Hz~56Hz 之速度頻散範圍 250m/s~230m/s 變化不大，簡易估計其空間探測深度約 16m，尤其頻率 20Hz~56Hz 之速度頻散值幾乎一致(230m/s)，可能代表在該測線下方 12m 以上的壩體材料性質相當的均勻；頻率 8Hz~14Hz 之速度頻散範圍 400m/s~250m/s，空間探測範圍約 16m~50m。因此，在壩頂下方 12m~16m 可能有一明顯的界面存在，由圖 6-47 新山水庫壩體加高

斷面圖所示，舊有壩高為 75m，經填築 15m 後，壩高為 90m，與表面波震測所顯示在壩頂下方 12m~16m 位置，相當接近。

圖 6-50 新山水庫壩頂（測線 A）震盪歷時，顯示出的表面波的訊號震盪相當一致且集中，在收錄的時間內且無受到雜訊干擾。幾乎沒有多重模態的影響，相對上也讓圖 6-49 之頻散曲線以基態訊號為主，而獲得良好的速度剖面。

2. 表面波震測測線 B（殼層）

殼層測線總長 166 公尺，測線起點至終點垂直高程落差約 12 公尺。因此參考測線垂直投影至壩頂測線之里程數，殼層測線起點從里程 STA.0+63 展延至里程 STA.0+229 處，如圖 6-51 所示，GL-0~GL-10 波速分布在 200m/s~300m/s，測線里程 STA.0+74~STA.0+100，GL-10~GL-40，波速約 400m/s 與該層波速 400m/s~600m/s 相比，相對上較低，測線 STA.0+100~STA.0+125，GL-20~-25，波速約 200m/s~300m/s；GL-25~-30，波速突增至 600m/s~700m/s；GL-30~-35，波速又突減至 350m/s~400m/s，存在很大的差異。測線里程 STA.0+172~STA.0+185，GL-10~GL-20，波速分布約 250m/s~350m/s，和該層波速相比，其波速較低。測線里程 STA.0+200~STA.0+217，GL-20 下方，波速分布在 600m/s 以上，與該層波速相比，呈現較高的波速值。

圖 6-52 新山水庫殼層（測線 B）頻散曲線的頻率內涵，可提供波速反算良好的依據，高頻資料多重模態的影響不大，因此足以提供淺層資料解析度。

圖 6-53 新山水庫殼層（測線 B）震盪歷時的特性與壩頂資料類似。本次在新山乃採用自由落錘，因此圖上在主要表面波到達後，後續還有兩個受到震源二次跳動所產生的訊號產生，但對解析資料的影響不大。

3. 表面波震測測線 C（壩基）

壩基測線總長 100 公尺，高程為 50 公尺，測線從大壩左岸延伸至大壩右岸，測線里程為 STA.0+127 展延至 STA.0+227，如圖 6-54 所示，里程 STA.0+138~STA.0+216，GL-0~GL-10，波速分布在 200m/s~300m/s 的範圍。里程 STA.0+138~STA.0+165，GL-20~-35，波速在 600m/s 以上，和該層深度的波速值相較上較高，應是受到左側山脊與岩盤等高速層影響。

圖 6-55 新山水庫壩基（測線 C）頻散曲線可做為剪力波速反算之訊號介於頻率

12Hz~30Hz、速度 450m/s~220m/s間，與壩頂及殼層之頻散曲線有所差異。壩基之頻散曲線應是受到測線範圍下方地層特殊變化所致；壩頂與殼層量測測線下方材料為精選的低塑性粉土(ML)、低塑性黏土(CL)及黏土質細砂(SC)及部分濾層，性質較為類似；壩基量測測線下方則有約 5~10m由壩基及溢洪道開挖出之混雜料堆積，詳細的堆積厚度及滾壓則視當時的棄土方與現場施工要求而定，因此，壩基測線C之高頻訊號可能受到測線C下方堆積之混雜料影響，而造成多重模態的出現。

圖 6-56 新山水庫壩基(測線C)震盪歷時受到地層材料變異，訊號受到實體波的干擾，但表面波之訊號能清晰可見。

4. 綜合評析

觀察於壩頂、殼層的二维剪力波速剖面發現，在大壩左岸的測線之波速剖面存明顯的低速帶，STA.0+160~STA.0+180，GL-10~GL-20，也存著較低的波速值；壩基的測線資料顯示，下方的波速分層相當明顯，在靠近左側山脊的測線，其下方的波速值較高，GL-30 約是該壩基承載層的位置。

本次於新山水庫所施作之表面波震測試驗，擷錄到的震盪歷時，在壩頂與殼層的表面波訊號皆相當清晰且震盪歷時的特性相當一致；壩基受到地層材料的不同，頻散曲線品質因而受到影響。從二维剪力波速剖面則可看到潛在滲漏的區域，該區域土壤之總單位重受到水之影響而提高，其波速明顯偏低以及加高後之新舊壩體填築界面。

6.6.2. 地電阻剖面影像測試結果

1. 地電阻剖面影像測線 B (殼層)

經由現場佈線時觀察殼層之滲漏現象，如圖 6-57 箭頭所示處，預期能夠瞭解測線 B (殼層) 之滲漏情形。測線B (殼層) 之詳細佈線參數如表 6-10 所示。

利用 Dipole-Dipole、Wenner、Wenner-Schlumberger 分別施測結果如圖 6-58 至圖 6-60 所示。圖 6-58 可以看出剖面在地表深度 25m 以上為低電阻值，且在測線 72m 地表深度 20m 處與測線 180 m 地表深度 25m 處有明顯呈現低電阻值之區域(虛線框處)，此兩區域應該極為濕潤。圖 6-59 與圖 6-60 於剖面中間區域電阻值高，研判此區域含水量低，另外，分別在測線左右兩側，為測線 76.5m 地表深度 20m 處與測線 180 m 地表深度 25m 處有呈現低電阻值之區域(虛線框處)，研判此兩區域可能含有豐富水量。



由圖 6-58 至圖 6-60 可以明顯看出兩低電阻值之區塊，且經由現場勘查對應後，發現此兩處之下方與壩基交界處皆有滲水情形發生，如圖 6-57 所示，施測前一陣子皆未降雨，因此研判此兩區塊可能為滲漏區域。

2. 地電阻剖面影像測線 C (壩基)

測線 C 預期瞭解壩基之水文地質之情形，施測測線參數如表 6-11 所示，以 Dipole-Dipole、Wenner、Wenner-Schlumberger 三種方式進行調查。測線之佈置情形如圖 6-61，測線展距約為 100 m。

經由施測後，圖 6-62 至圖 6-64 分別為 Dipole-Dipole、Wenner、Wenner-Schlumberger 之地電阻剖面圖。圖 6-62 顯示約在地表下 5m 處有高低電阻值之差異，且在測線 47m 處與 60m 處有低電阻值之區塊（虛線框）。圖 6-63 與圖 6-64 顯示約在地表下 5m 處有高低電阻值之差異，且在測線 42m 與地表下 14.5m 處有低電阻值之區塊（虛線框）。

從圖 6-62 至圖 6-64 可以明顯看出，地表至地表下 5m 處為高電阻值，地表下 5m 至在地表下 18m 處皆為低電阻值，造成地表下 5m 處高低電阻值差異變化可能原因為壩基地表下 5m 之地層材料為雜項填方，為開挖後棄土僅由推土機或傾倒車滾壓而成，為較為疏鬆之地層。造成地表下 5m 至在地表下 18m 處為低電阻值可能為該處地層以 10 噸震動鋼滾滾壓 8 次，地層較為緊實而造成。

3. 地電阻剖面影像測線 D (左側山脊)

測線 D 無法直接佈設在左側山脊滲漏處之拋石料上，所以測線 D 之測線位置為左側山脊滲漏處水溝之對邊山坡上，預期瞭解滲流面是否有持續的延伸。測線 D 之佈設情形與施測情形如圖 6-65 與圖 6-66 所示，施測測線參數如表 6-12 所示，測線展距為 63 m。

經由施測後，圖 6-67 至圖 6-69 分別為 Dipole-Dipole、Wenner、Wenner-Schlumberger 之地電阻剖面圖。圖 6-67 在測線 14m 與 24m 處有兩低電阻值區塊（虛線框）。圖 6-68 在測線 24m 處有低電阻值區塊（虛線框），且電阻值有往兩旁漸增趨勢。圖 6-69 在測線 14m 與 24m 處有兩低電阻值區塊（虛線框），且電阻值有往兩旁漸增趨勢。

造成測線 24m 處之電阻值較低之原因，可能為該處有混凝土水井之因素，其餘高電阻值之區域可能為較大顆粒之材料排列組成，且含水量較低所造成，而從測線 24m 處電阻值有往兩旁漸增之趨勢。從圖 6-67 至圖 6-69 之結果顯示，左側山脊可能之滲漏區域在測線 14m 處附近，但由於測線展距不長，無法探測較深的深度。

6.7. 仁義潭水庫測試過程與結果

6.7.1. 表面波震測測試結果

表面波震測測線分別配置於壩頂（測線 A）、殼層通達道路（測線 B）及壩基（測線 C）聯絡道上，如圖 6-70 所示。圖 6-71 則為仁義潭水庫之斷面圖及測線概略位置；仁義潭壩軸不透水材料高 39m，地面壩高 28m，地下高 11m。

仁義潭壩頂總長 1530 米，經現地勘察及整合水庫現場工作人員提供之資訊，得知右壩座存在著較明顯之工程問題，如右側邊坡存在沉陷現象及坡趾之滲漏情況，如圖 6-72 及圖 6-73 所示。故於壩頂、殼層與壩基測線之安排選定大壩右壩座壩頂里程 sta 0k+50（第二根路燈）為起點進行施測，以共 18 條展延總長度 210m 之測線作為量測範圍。仁義潭殼層共有 3 條聯絡道，選定與壩頂測線最接近之聯絡道作為測線量測之範圍；測線起點水平垂直投影至壩頂里程約 sta 0k+177，測線沿下坡方向施測。此外殼層連絡道垂直落差高度約 25m，坡度約在 10 度~15 度範圍。殼層測線因地形因素易造成震波邊界效應產生多重反射以及散射問題，進而影響表面波訊號品質。因此在現地資料擷取須特別注意收錄異常訊號，避免徒增訊號處理上困擾。壩基則無適當配置測線空間，因此將測線移至車行連絡道。測線起點水平垂直投影至壩頂里程約 sta 0k+150 往左壩座方向施測共 21 條總長度 232m 之測線作為量測的範圍。

1. 施測參數

本次試驗於仁義潭壩頂、殼層與壩基連絡道亦使用自由落槌做為震源以產生訊號較強之人工震波以改善訊號品質，如圖 6-74 所示。轉換測線時所移動的展距為 11m，每一測線收錄之表面波訊號經處理後，代表該測線涵蓋區域之中點平均波速值。經由不斷的轉換測線，可增加資料之贅餘性以獲得良好之二維波速剖面。現場相關測線之施測參數配置如表 6-13。

2. 表面波震測測線 A（壩頂）

如圖 6-75 所示之壩頂二維剪力波速剖面圖，參考圖 6-70 測線配置，壩頂測線總長 199m，測線起點從壩頂右壩側邊入口里程Sta 0k+25 處為測線起點，測線里程Sta 0k+50~Sta 0k+150 於GL 0~-20 處下方地層之剪力波速分布範圍在 200m/s~250m/s，為一波速相當低之區域。里程Sta 0k+150~Sta 0k+225 於GL 0~-20 處，該範圍之波速有些許增加但屬偏低範圍，分佈範圍在 250m/s~330m/s。根據現場勘察及水庫管理中心的參考資料資料，測線里程Sta 0k+50~Sta 0k+150 之壩頂道路，有顯沉陷的現象；1022 大地震後，壩頂所設之 105 個表面沉陷計，其平均沉陷量約 4.3cm，其中有 8 個讀數較為奇異，其中一表面沉陷計即位在測線A的量測範圍，此外測線里程Sta 0k+50~Sta 0k+150 投影至壩基上，該區域則有明顯的滲流水從壩體持續流出。因此測線A可能受地震造成壩體填築材料強度減弱及滲流水浸潤填築材料使單位重增加，都可能是造成該區域波速降低的原因。

圖 6-76 壩頂測線A之震盪歷時，呈現出之表面波訊號頗為清晰，似乎無雜訊干擾。但圖 6-77 該測線之頻散曲線較為特殊，在低頻的部分一度波速下降，這種現象表示地層可能夾有厚的弱層，但亦有可能是高次震態的影響，測線A在高頻的部分也受到高次模態的影響。當地層速度剖面非一般隨深度增加而增加時，其表面波頻散特性常出現高次模態控制，目前僅能盡可能挑選基態的部分作為分析，因此空間的解析度受限於有效頻寬。未來應該針對高次震態的影響進一步研究，以提高分析的準確度與解析度。

3. 表面波震測測線 B (殼層)

如圖 6-78 所示之殼層二維剪力波速剖面圖，參考圖 6-70 測線配置，殼層測線總長 199m，起點至終點落差達 25m~30m。參考殼層測線水平垂直投影至壩軸之里程，測線起點由里程Sta 0k+177 處展延至測線里程Sta 0k+377；測線GL-0~GL-15 範圍內平均速度約為 200m/s~300m/s，因為受到高次震態影響，淺層解析度不佳，所以這個深度內的速度變化不加以解釋；而里程Sta 0k+270~Sta 0k+2812 的震波檔案因資料格式損毀而無法判讀，所以將其移除。測線B之二維波速剖面在里程Sta 0k+177~里程Sta 0k+377 於GL-15~GL-35 範圍內之波速分布在 350m/s~450m/s。

圖 6-79 之震盪歷時顯示，雖然有實體波的影響，但表面波訊號能量能相當清楚。圖 6-80 顯示基態頻散曲線受到高次模態的影響，有效頻率範圍減少，以致於淺層之空間資

料無法做可信的解讀。

4. 表面波震測測線 C (壩基聯絡道)

圖 6-81 顯示壩基之二維剪力波速剖面圖，如圖 6-70 所示之測線配置，測線 C 共 21 條，測線總長 232m。參考測線 C 水平垂直投影置壩軸之里程，測線起點里程為 Sta 0k+150。里程 Sta 0k+150~里程 Sta 0k+300 於 GL-0~GL-20 平均速度約為 150m/s，里程 Sta 0k+300~里程 Sta 0k+380 於 GL-0~GL-20 平均速度約為 150m/s~250m/s，同樣因為受到高次震態影響，淺層解析度不佳，所以這個深度內的速度變化不加以解釋；在此界面以下，測線里程 Sta 0k+150~ Sta 0k+300 於 GL-20~ GL-40 處該區域之波速值約分佈在 400m/s~500m/s。其中 Sta 0k+250~ Sta 0k+280 受到現場擷取資料受損，所以將其抹除。觀察圖 6-82 與圖 6-83 的結果，震盪歷時受到實體波的干擾以及地層的影響，表面波的頻散訊號較為紊亂，且受到高次模態的影響。本次於仁義潭的施測結果，再一次顯示高次模態影響空間解析度與基態頻散曲線的準確性，未來實有必要針對此一問題作進一步的研究。

6.7.2. 地電阻剖面影像測試結果

本次施做地電阻調查位置如圖 6-70 所示，分別為測線 A (壩頂)、測線 B (殼層) 與測線 C (壩基)。調查施做方式以 Dipole-Dipole、Wenner-Schlumberger、Pole-Dipole、Pole-Pole 四種排列方式。利用四種施測方式特性交互比對各測線之調查結果。

1. 地電阻測線 A (壩頂)

由測線 A 預期能瞭解壩心材料間及壩基地層是否有滲漏之虞。測線 A 的起點位於壩軸里程 0k+35，測線間距為 5 m，測線長度為 235 m。詳細的測線參數如表 6-14 所示。

量測結果如圖 6-84 至圖 6-87 所示，分別為 Dipole-Dipole、Wenner-Schlumberger、Pole-Dipole、Pole-Pole 四種施測方式。結果顯示壩頂電探剖面圖大致可分為四層：從地表至地表下約 1m 處呈現數百 Ohm 電阻值，推測可能為地表柏油鋪面所造成電阻值較高；地表下 1m 至地表下約 6m 處有一低電阻值層，電阻值約在 25 Ohm 左右，推測應該為地表水滲入造成該地層因高含水量造成電阻值較低。

地表下約 6m 至地表下約 19m，呈現一略高電阻值層，電阻值約從 40 Ohm 至 100 Ohm 左右；壩軸里程 0k+85m 至 0k+155m、地表下深度 19m 至 34m 呈現出低電阻區域；

另於壩軸里程 0k+195m 至 0k+235m、深度約 40m 至 60m 處同樣呈現低電阻區域。此兩低電阻區域深度約略超過壩體高度，推估壩基於此二處之地層具有高含水量，為潛在之滲漏區域。由圖 6-87 顯示，測線其餘區域約在地表下 48m 至 114m 為一高電阻值區域，電阻值大於 250Ohm。

2. 地電阻測線 B (殼層)

測線 B 預期能瞭解由拋石料填築之殼層是否有滲漏之虞。測線起點位於壩軸里程 0k+177，測線間距為 4 m，測線長度為 188 m。詳細測線參數如表 6-15 所示。

量測結果如圖 6-88 至圖 6-91 所示，分別為 Dipole-Dipole、Wenner-Schlumberger、Pole-Dipole、Pole-Pole 四種施測方式。結果顯示殼層電探剖面圖大致可分為二層：最上層由地表至地表下 5m 處電阻值為數百 Ohm，顯示該區域為乾燥地層，推測應為表面拋石料所影響。第二層為地表下 5m 至地表下約 30m 處，電阻值由 40 Ohm 至 80 Ohm。推測該區域為些微濕潤區域，但應無嚴重滲漏情形。

圖 6-90 及圖 6-91 顯示自壩軸里程 0k+217m 至 0k+273m 於地表下 30m 至 50m 處區域，其材料電阻值為 30 Ohm。推測此區域含水量可能略高，接近壩頂測線右下角低電阻區域。由圖 6-91 可以得知從地表下 50m 至 100m 處電阻值逐漸升高，電阻值至數百 Ohm，推測為礫石地層或岩層。

3. 地電阻測線 C (壩基)

壩基測線佈設位置受制於壩體殼層拋石料影響，因此將測線移至車行連絡道。測線起點水平垂直投影至壩頂里程約 sta 0k+150 往左壩座方向施測，測線間距為 6 m，測線長度為 282 m。詳細測線參數如表 6-16 所示。

量測結果如圖 6-92 至圖 6-95 所示，分別為 Dipole-Dipole、Wenner-Schlumberger、Pole-Dipole、Pole-Pole 四種施測方式。結果顯示壩基測線電阻剖面圖呈現急劇之側向變化。自壩頂里程 sta 0k+150 至 246m 於地表至地表下 10m 處之電阻值約在 100Ohm，推測該區域可能為基礎滲流。自該層以下電阻值則高達數百 Ohm 推測應為礫石地層或岩層。

壩頂里程 sta 0k+246m 至測線終點於地表至地表下約 2m 處存在些許低電阻區域，推測應為地表水滲入之影響。地表下約 2m 至 10m 為高電阻值區域，電阻值自 100 Ohm



至數百Ohm。地表下 10m以下為低電阻區域，電阻值自 100Ohm至 400Ohm，推測應為地下水影響而含水量較甚高；圖 6-95 結果在里程sta 0k+245m至sta 0k+290m，深度在地表下 20-80m之間有低電阻區域，疑似為古河道。

6.8. 大觀電廠測試過程與結果

本計劃於該廠蓄水庫溢洪道下方壩體廊道進行折射震測與地電阻影像探測兩種非破壞性檢測技術及於溢洪道表面進行透地雷達施測。

折射震測及地電阻剖面兩者測線點位一致。測線方位北偏東 30 度，如圖 6-96 所示。測線第一個受波器周圍半徑 1m範圍呈較為溼潤狀況；第 13 個受波器則設於混凝土分塊接縫處，該處有碳酸鈣沉積且混凝土表面溼潤。

測線配置之方式與儀器使用與石門水庫進行之廊道檢測類似。折射震測使用九點法，受波器使用皂土黏附於壁面上以利試驗進行；地電阻剖面亦使用銅板電極佈設測線，相關的施測參數如表 6-17 所示。

透地雷達試驗規劃於溢洪道B施測。採用之法國MALA公司RAMAC GPR系統包含控制器Control Unit CU II，如圖 6-12 所示；連接之 500Mhz全罩式天線組以提高其淺層解析度，如圖 6-13 所示。本次試驗主要目的在於評估GPR於壩體結構物可行性及其量測技術之展示，以作為未來應用與改良依據。測試方法將選定溢洪道一區塊，利用上述之GPR量測系統進行 3D掃描，並搭配gprsliceV5 分析軟體以提供不同時間剖面資料展示。檢測區域規劃為一寬 10m、縱深 20m的方塊，於長寬二向規劃一間隔 0.5m之棋盤狀測線進行掃描，如圖 6-97 與圖 6-98 所示。測線施測參數如表 6-18 所示。

6.8.1. 折射震測測試結果

折射震測施測結果如圖 6-99 所示，測線位置在於 0~23m。此波速剖面採用 tomography反算技巧進行反算，以最小平方差作為誤差估計，誤差值為 2.54×10^{-7} 。由圖 6-99 中可知，廊道在施測測線區段內的混凝土 P 波波速大部分在 3000m/s以上，根據Whitehurst (1951) 針對混凝土結構物 P 波波速檢定判斷標準（如表 6-7），此區段間之混凝土品質尚可但仍需計畫週期性檢測其安全性。由測線起點起算約 0m、8m及 19m處存在較低波速區域（波速分別約 1500m/s、1800m/s及 2500m/s），於 19m處之低波速區約自表面向下延伸 1m深，其餘兩處皆約影響至 2m深。若以表 6-7 為判斷標

準則此三處混凝土品質或完整性不佳，尤以 0m 及 8m 兩處 P 波波速降至 1500 m/s ~ 1800m/s 幾乎與水之波速相仿，此兩處極可能已有較大孔隙或裂縫存在並已充滿滲流；於 19m 處之低速區帶（15~23m）則可能有些微孔隙或裂縫產生，應多加注意以免潛在危險擴大；而於 -5m 處之低波速區域（波速約 1200m/s）位於測線外圍處，其準確性較低應另再進行震測量測。

6.8.2. 地電阻剖面影像測試結果

試驗結果如圖 6-100 至圖 6-102 所示，分別為 Dipole-Dipole、Wenner、Wenner-Schlumberger 地電阻剖面圖。圖 6-100 剖面圖顯示約在測線里程 13m 於深度約為 0.75m 處有一高電阻值存在，電阻值約在 600Ω，其餘區域皆呈現低電阻狀態。圖 6-101 與圖 6-102 地電阻剖面圖趨勢相當一致，約於測線里程 12m 處有一高電阻區域，電阻值從 30 Ω 至數百 Ω；測線其他區域則呈低電阻狀態。

三種排列方式所施測結果皆顯示混凝土側壁呈現低電阻值，電阻值從 1 Ω 至 200Ω。約於測線里程 12m-13m 處有呈現一高電阻帶狀區域，應為施工縫造成之影響。

6.8.3. 透地雷達測試結果

本計畫於大觀電廠溢洪道利用透地雷達檢測之範圍縱向為 20m、橫向為 10m。為建立檢測區域下立體剖面，以施測間距為 0.5m，沿縱向施測 20 筆測線（V1~V20）及沿橫向施測 39 筆測線（H1~H39），今以縱向檢測結果做一展示。圖 6-103 為 V1 測線 GPR 量測原始影像，縱向共 20 筆原始影像將統一進入 gprsliceV5 軟體以作分析。

如資料處理章節所述，圖 6-104 為 V11 測線時間剖面選取畫面展示，共列 r1 至 r10 十組時間剖面，各區間各涵蓋上下 1/2 區間用以提供較佳內差影像。圖 6-105 為分析完畢後溢洪道 GPR 量測資料之時間剖面影像。左上角第一張影像研判為儀器與地面接觸之介面，主要為墊片以及空氣材質。以下 9 張影像則為不同探測時間之影像，各張影像之原點位於圖片左下方。由圖中可清楚發現於垂直向約 3m 處有一明顯交界面。根據現場試測作業佐證，此一介面為混凝土塊交界面。r3 及 r4 影像發現於交界面附近有一塊狀區域。該塊狀區性質與其他區域性質差異甚大，詳細狀況尚需其他證據判釋。r9 後之時間剖面可能為混凝土與下方土壤或岩石介面。

圖 6-106 為本次利用 3-D 軟體所分析之 GPR 量測資料之時間剖面 3D 影像，可透



過動畫提供較為便利之視覺判釋。

6.9. 檢測方法監測化可行性評估

6.9.1. 新山水庫地電阻剖面監測作業規劃與測試結果

經由已完成的新山水庫地電阻量測後試驗結果及現場勘查得知，於殼層的垂直剖面左右 2 處皆有出現明顯的低電阻區域，如圖 6-58 所示。滲流為土石壩安全之重要課題之一，有鑑於此本計畫於殼層測線布置電極棒，利用不同時間間隔的量測用以分析水位之高低與降雨量是否對可能滲漏（低電阻）區域有明顯影響。

永久測線佈設於前節所述之殼層檢測測線B，其相關施監測參數如表 6-10 所示。測線利用 Wenner 排列方式，間距採用 4.5 m，總共使用 48 根電極數，總長為 211.5 m。本計畫至目前為止共於測線B施做三次試驗，試驗施做時間如表 6-19 及表 6-20 所示，第一次施測為 7 月 25 日，大約間隔 1 個月在施測一次。圖 6-107 為固定在新山水庫測線B（殼層）之電極棒，其監測結果如圖 6-108 至圖 6-112 所示。

6.9.2. 地電阻剖面監測資料分析

不論利用半自動或是自動化量測方式，所量測的視電阻率（Apparent resistivity）經由 RES2DINV 反算軟體計算後，進而獲得真正的地電阻剖面用來推測地表下地層之概況。地電阻剖面應用於壩體或壩基滲漏監測時，其考量參數包括組成材料之特性、水庫水位、氣候、材料間孔隙等。影響滲漏監測結果變數甚多，但最直接關連應為水庫水位變化與材料組成的變化，若單以一次量測資料僅能推測低電阻區域所在位置，該區域是否因材料特性或因滲漏造成含水量偏高並無法確實判斷。

欲得影響滲漏之變數與量化其關連性，控制監測頻率為首要工作。若水位保持相當穩定，觀察歷時量測之地電阻剖面圖可得知滲漏區域位置，且不斷的滲漏亦會造成細粒料沖蝕而使材料的組成改變；若於水位升降後量測，滲流壓力改變亦可能造成滲流區域形成擴大趨勢。滲漏區域與其控制變因之關連性應可利用地電阻剖面監測釐清，但監測頻率須密集至足夠觀察週遭因素變異，自動化監測架構建立應較能符合需求。

RES2DINV 反算軟體功能之一「Time-lapse resistivity inversion」（時間序列反算模式）可計算比較多筆歷時資料剖面與設定基準值間之差異並將之正規化輸出。以新山水

庫三筆監測資料為例，若以七月份剖面為基準值，其與九月份剖面間之正規化差異比較如圖 6-108~圖 6-110 所示。原先檢測所得之測線兩側低電阻區域呈正差異，差異量達 5%至 12.5%，意即地電阻值增加，該區材料含水量降低。但測線中央處原電阻值較高之區域呈負差異，差異量達-10%至-26%，顯示原本乾燥區域可能含水量增高。

以七月份剖面為基準值，其與十月份剖面間之正規化差異比較如圖 6-111~圖 6-112 所示。原先檢測所得之測線兩側低電阻區域呈正差異，差異量達 1.2%至 20%，意即地電阻值增加，該區材料含水量降低。但測線中央處原電阻值較高之區域呈負差異，差異量達-4%至-10%，顯示原本乾燥區域可能含水量增高。

若再以九月份剖面為基準值，其與十月份剖面間之正規化差異比較如圖 6-113 所示。十月份之水位高度較九月份高度降約 2m，原先檢測所得之測線兩側低電阻區域呈正差異，差異量達 1.2%至 6%，且在剖面其他區域皆呈約 1%之正差異。但測線中央處原電阻值較高之區域呈負差異，差異量約-1.7%至-7%，顯示原本乾燥區域可能含水量增高。

6.9.3. 地電阻剖面監測自動化可行性探討

前一小節以新山水庫三次量測結果為例，顯示不同時間之量測結果可了解電阻值剖面隨時間之變化，目前這三次量測對應的水庫水位變化並不大，若能持續做長期的監測，得到不同水位與降雨條件下之地電阻率分佈，應有助於了解滲漏特性。

目前先進的地電阻儀器皆可擴充自動化監測之功能，例如本計畫所使用之儀器-法國 IRIS 公司的 SYSCAL PRO Switch 48 儀器，已有完整的自動化量測系統如圖 6-114 所示，藉由量測控制電腦，做定時的量測並記錄資料，再利用 RES2DINV 反算軟體功能「Time-lapse resistivity inversion」(時間序列反算模式)，即可得到測線量測結果在時間軸上的變化情形，可以瞭解造成滲流之外在因素為何，更可以準確推估滲流之位置。

地電阻量測常見的施測排列方式有 Dipole-Dipole、Pole-Dipole、Pole-Pole、Wenner、Wenner-Schlumberger，但在需要長期監測的應用之下，每一次的量測需要得到正確的電阻值，如此才能判斷出每次量測電阻值之間的差異性，因此，若施測的排列方式其訊號容易受到雜訊的干擾，最好避免使用，例如利用 Dipole-Dipole、Pole-Dipole 排列方式施做；應用於監測建議使用 Wenner 與 Wenner-Schlumberger



排列方式，此兩種方式預期可以得到較佳的結果。若以 Wenner 與 Wenner-Schlumberger 排列方式量測為例，完成一次量測所需之時間在 1 小時之內即可完成。

6.10. 綜合評析

本計畫針對壩體完整性調查與滲流調查等進行具潛力之非破壞性檢測技術之初步測試與評估，分別在石門水庫、新山水庫、仁義潭水庫與大觀發電廠施作表面波震測、折射震測、地電阻影像探測與透地雷達等四種非破壞性檢測技術。

石門水庫、新山水庫與仁義潭水庫之表面波震測顯示，表面波震測可適用於壩體檢測，以非破壞性的方式探測壩體的剪力波速，結果顯示具有沈陷問題的仁義潭水庫顯示極低的剪力波速。表面波震測甚至可探測剪力波速之二維分佈，例如新山水庫殼層之低速帶與地電阻探測之低電阻區有良好的對應，結合不同的探測方法有助於檢測資料之解釋。在這三座水庫的測試結果亦顯示一重要問題，雖然表面波震測所得到之基態頻散曲線可反算地層剪力波速，但頻散分析常受到高次模態的影響，使得基態頻散曲線的有效頻率範圍減小，缺乏高頻之基態頻散曲線將影響淺層之空間解析度。除了新山水庫，石門水庫與仁義潭皆顯示明顯的高次模態影響，建議未來針對此一問題及地形效應做進一步的研究改良。

地電阻影像探測法在壩體及壩基滲漏調查之應用方面，於三座土石壩和兩個混凝土廊道中進行測試，所得到之地電阻影像剖面與過去檢測資料和現場勘查比對後，皆有良好的的一致性。在土石壩案例中，以新山水庫的殼層測線最為顯著，滲漏之區域與地電阻剖面低電阻區域相符；在混凝土結構物的測試成效亦相當顯著，除可顯示混凝土入滲情形，施工縫存在之區域在地電阻剖面圖上皆有出現明顯高電阻值區域。與滲漏量測一樣，土石壩之電阻率變化受到水位、降雨之影響，本計畫以新山水庫為例，在同一位置進行數次量測，初步探討如何由電阻率的變化了解滲漏情形，建議未來持續觀測，並持續研究地電阻探測之監測化與應用。

目前混凝土結構物所採用的方法主要有 GPR 與敲擊回音法(Impluse ehco)，混凝土面較不利於電探與一般震測施做。敲擊回音法主要在決定特定裂縫的深度，沒有提供混凝土波速的分布，混凝土的波速可反映其材料的強度與退化之情形；GPR 能提供當有



明顯界面時的反射面位置，較無法了解入滲的情形。因此，本研究特別針對這些限制，提出可於混凝土面施測之震測與電探法，研發可適用於混凝土面施測之非侵入式受波器及電極。混凝土之 P 波波速分佈採用折射震測影像法，其電阻率的量測則採用電探影像法，在石門水庫廊道與大觀發電廠廊道之測試成效顯著。所研發的非侵入式電極雜訊較插入式電極大，建議未來針對非侵入式電極及混凝土之表面波震測進一步研究。

透地雷達是目前經常使用的檢測方法，目前國內之透地雷達探測多為 2-D 的探測方法與資料分析，2-D 的反射訊號影像常無法有效反應異常區域之位置與形狀，使得探測資料常遭受質疑。3-D 探測與資料分析方法日趨成熟，本計畫在大觀發電場溢洪道展示 3-D 透地雷達探測，利用 3-D 影像分析軟體，提供不同時間(或深度)剖面及 3D 影像資料展示。相較一般傳統的 2-D 透地雷達探測與分析，3-D 施測與分析大為提高透地雷達探測資料的可辨識性，此方法值得進一步建立資料分析準則並廣為推廣。





表 6-1 常見之河川物質對 100 MHz 電磁波之電學性質 (Millard, et al, 1998)

Material	Relative permittivity, ϵ_r	Conductivity (S/m)	Signal speed ($\times 10^8$ m/s)	Attenuation (dB/m)
Air	1	0	3.0	0
Freshwater	81	10^{-3}	0.33	0.18
Saltwater	81	4.0	0.33	320.0
Saturated sand	15-25	$10^{-4}-10^{-2}$	0.6	2.3
Saturated clay	15-25	$10^{-1}-1$	0.8	20.0
Gravel	22	0.02-0.025	0.64	9.0

表 6-2 石門水庫大壩測線 B (殼層) 之測線參數

測線名稱	測線 B (殼層)	
電極間距, m	4 m	
電極數目	48 支	
測線展距 m	188 m	
施測方式	Wenner-Schlumberger、Pole-Dipole、Pole-Pole	
座 標	測線起點	(274341, 2744932)
	測線終點	(274514, 2744845)
	遠電流	(274317, 2745193)
	遠電位	(274725, 2744847)

表 6-3 石門水庫大壩測線 B (殼層) 施測當天背景參數

施測日期	2005 年 8 月 9 日	
氣 候	晴轉陰	
地表狀態	些微潮濕	
水庫水位	最高水位	243.11 m
	最低水位	240.44 m
	平均水位	242.26 m
備註：施測前 2 天有颱風過境		



表 6-4 石門水庫大壩測線 C (壩基) 之測線參數

測線名稱	測線 C (壩基)	
電極間距,m	3 m	
電極數目	48 支	
測線展距 m	141 m	
施測方式	Wenner-Schlumberger、Pole-Dipole、Pole-Pole	
座 標	測線起點	(274445, 2745022)
	測線終點	(274581, 2745009)
	遠電流	(274736, 2745098)
	遠電位	(274451, 2745212)

表 6-5 石門水庫大壩測線 C (壩基) 施測當天背景參數

施測日期	2005 年 8 月 3 日	
氣 候	晴	
地表狀態	乾燥	
水庫水位	最高水位	239.35 m
	最低水位	239.23 m
	平均水位	239.28 m
備註：		



表 6-6 石門水庫廊道折射施測參數

測線名稱	測線 A	測線 B
	左側壁(溢洪道面)	右側壁(山脊)
震源	槌頭四磅重鐵鎚	槌頭四磅重鐵鎚
受波器/數目	100Hz/24	100Hz/24
受波器間距	2m	2m
測線總長	46m	46m
施測方式	九點法	九點法

表 6-7 混凝土品質分類 (以 P 波為分類依據, Whitehurst (1951))

P 波波速 (m/s)	>4500	3500~4500	3000~3500	2000~3000	>2000
分類	優	佳	可	差	劣

表 6-8 石門水庫廊道電探施測參數

測線名稱	石門水庫廊道-右側壁	石門水庫廊道-左側壁
電極間距 m	2 m	2 m
電極數目	24 支	24 支
測線展距 m	46 m	46 m
施測方式	Wenner、Wenner-Schlumberger	



表 6-9 新山水庫測線參數

表面波震測			
測線	測線總長(m)	起點	終點
壩頂(測線 A)	211	STA.0+29	STA.0+240
殼層(測線 B)	166	STA.0+63	STA.0+229
壩基(測線 C)	100	STA.0+127	STA.0+227

表 6-10 新山水庫地電阻測線 B (殼層) 之施測參數

測線名稱	測線 B (殼層)
電極間距, m	4.5 m
電極數目	48 支
測線展距, m	211.5 m
施測方式	Dipole-Dipole · Wenner · Wenner-Schlumberger

表 6-11 新山水庫地電阻測線 C (壩基) 之施測參數

測線名稱	C (壩基)
電極間距 m	2.1m
電極數目	48 支
測線展距 m	98.7 m
施測方式	Dipole-Dipole · Wenner · Wenner-Schlumberger

表 6-12 新山水庫地電阻測線 D (左側山脊) 之施測參數

測線名稱	測線 D (左側山脊)
電極間距 m	1.5m
電極數目	43 支
測線展距 m	63 m
施測方式	Dipole-Dipole · Wenner · Wenner-Schlumberger



表 6-13 仁義潭水庫表面波震測施測參數

	壩頂	殼層	壩基
震源	自由落錘	自由落錘	自由落錘
受波器間距	1m	1m	1m
受波器數目	24	24	24
測線展距	23m	23m	23m
測線數目	18	18	21
測線總長	199m	199m	232m
近站之距	25m	33m	56m

表 6-14 仁義潭水庫地電阻測線 A 施測參數

測線名稱	測線 A (壩頂)	
電極間距 m	5 m	
電極數目	48 支	
測線展距 m	235 m	
施測方式	Dipole – Dipole、Wenner-Schlumberger、 Pole-Dipole、Pole- Pole	
座 標	測線起點	(199366 , 2595268)
	測線終點	(199600 , 2595257)
	遠電流	(199367 , 2595172)
	遠電位	(199942 , 2595240)



表 6-15 仁義潭水庫地電阻測線 B 施測參數

測線名稱	測線 B (殼層)	
電極間距 m	4 m	
電極數目	48 支	
測線展距 m	188 m	
施測方式	Dipole – Dipole、Wenner-Schlumberger、 Pole-Dipole、Pole-Pole	
座 標	測線起點	(199559, 2595252)
	測線終點	(199737, 2595195)
	遠電流	(200084, 2595162)
	遠電位	(199310, 2595260)

表 6-16 仁義潭水庫地電阻測線 C 施測參數

測線名稱	測線 C (壩基)	
電極間距 m	6 m	
電極數目	48 支	
測線展距 m	282 m	
施測方式	Dipole – Dipole、Wenner-Schlumberger、 Pole-Dipole、Pole-Pole	
座 標	測線起點	(199462, 2595156)
	測線終點	(199743, 2595140)
	遠電流	(199299, 2595254)
	遠電位	(199975, 2595160)



表 6-17 大觀電廠廊道折射及電探測線施測參數

測線名稱	大觀電廠廊道折射測線
震源	槌頭四磅重鐵鎚
受波器/數目	100Hz/24
受波器間距	1m
測線總長	23m
施測方式	九點法
測線名稱	大觀電廠廊道電探測線
電極間距 m	1 m
電極數目	24 支
測線展距 m	23 m
施測方式	Dipole-Dipole 、 Wenner 、 Wenner-Schlumberger

表 6-18 大觀電廠溢洪道 B 測線 GPR 施測參數

測線名稱	GPR 大觀電廠溢洪道 B 測線
測線範圍	寬 10m、長 20m 之矩形區塊
測線間隔	0.5m
測線數目(平行壩面)	H1~H39
測線數目(垂直壩面)	V1~V20



表 6-19 新山水庫測線 B (殼層) 之測線監測參數

測線名稱	測線 B (殼層)
電極間距 m	4.5 m
電極數目	48 支
測線展距 m	211.5 m
施測方式	Wenner
N factor	15
資料點數	360

表 6-20 新山水庫監測時的現地背景資料

施測日期	水位高度 (m)	地表狀況	降雨量 (mm)	備註
2005/7/25	82.32	乾燥	0	7/18 降雨 21.5 mm
2005/9/8	83.26	乾燥	0	無
2005/10/3	81.18	乾燥	0	10/2 降雨 60-70 mm

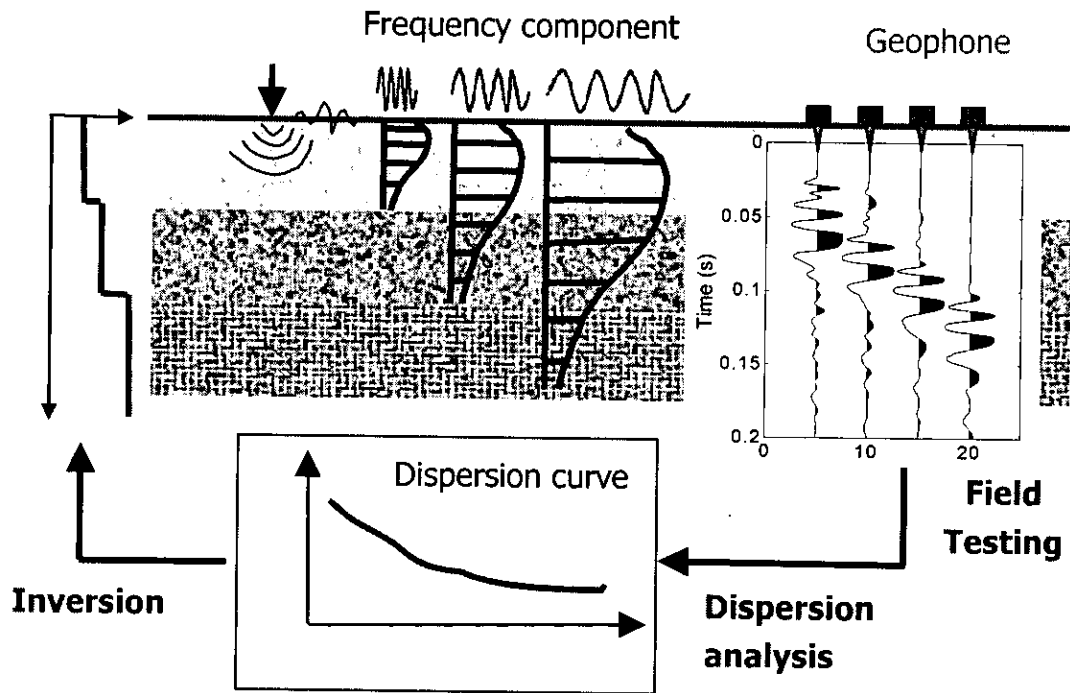


圖 6-1 表面波震測基本原理

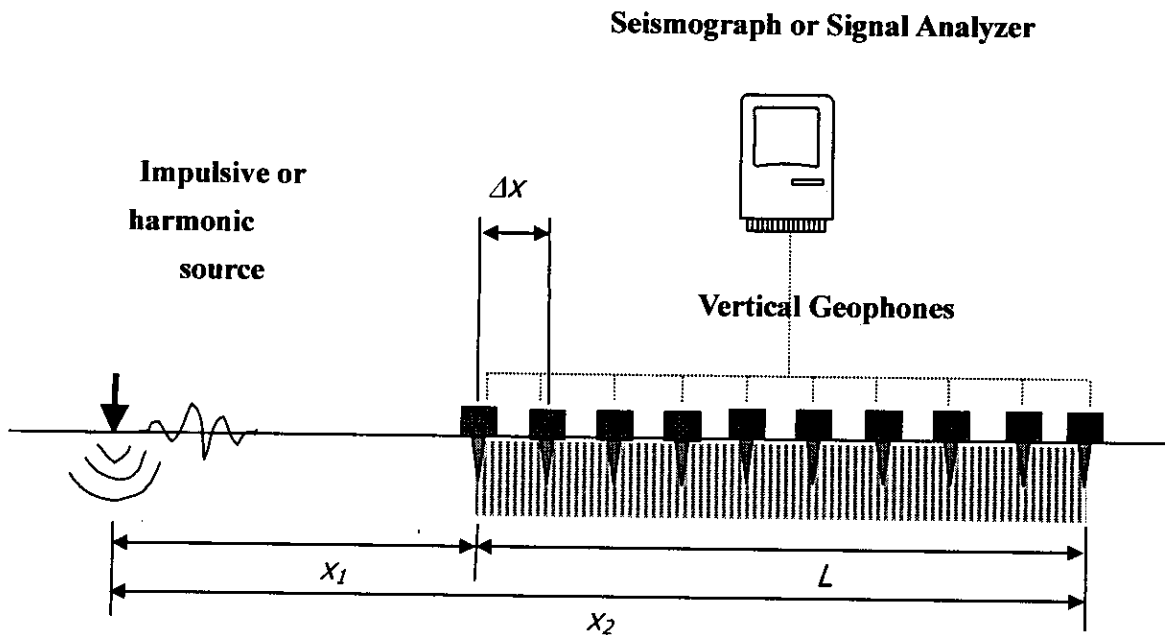


圖 6-2 表面波震測法震源與受波器位置示意圖

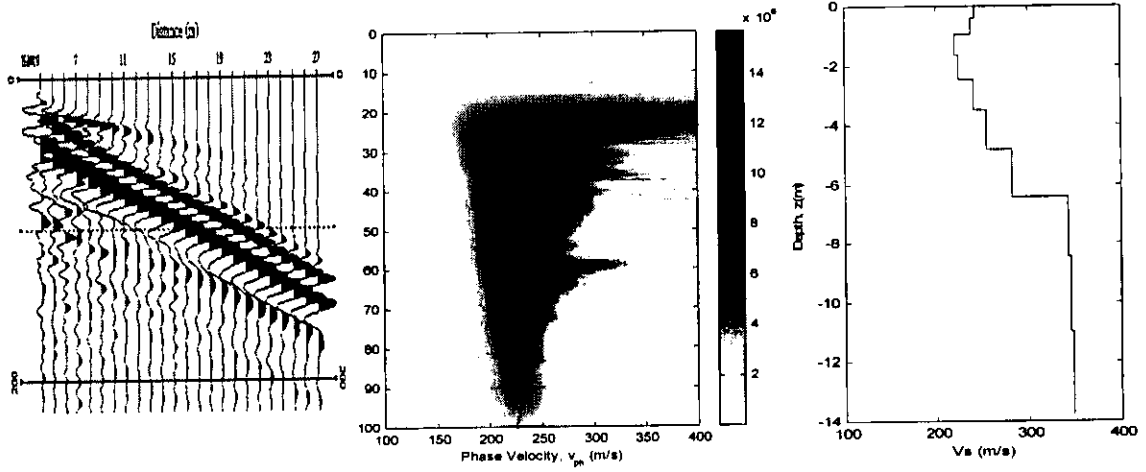


圖 6-3 表面波震測頻散曲線與反算分析

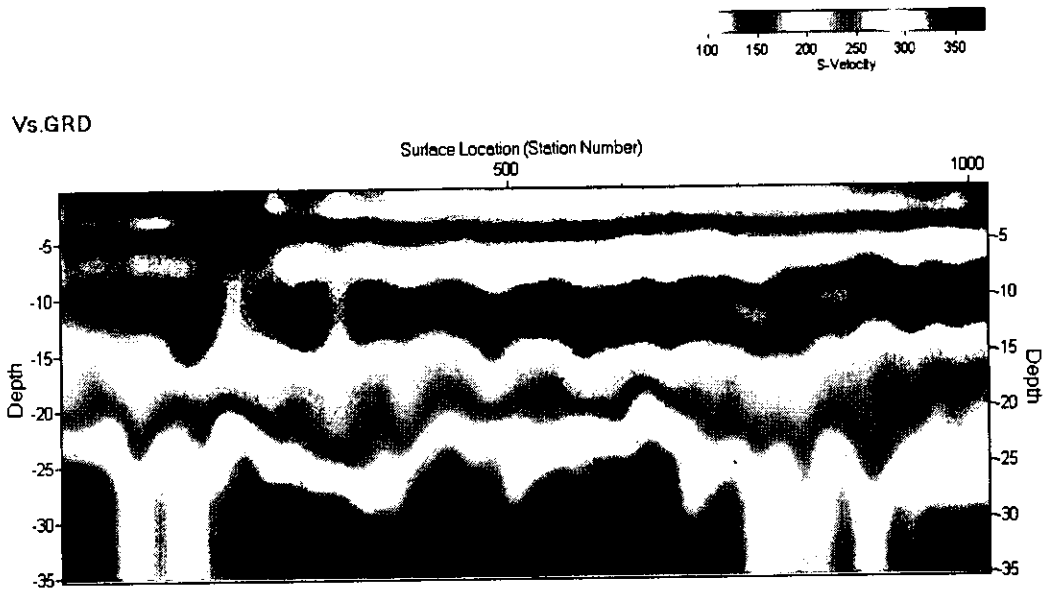


圖 6-4 表面波震測影像法案例-交大嘉義校區規劃調查

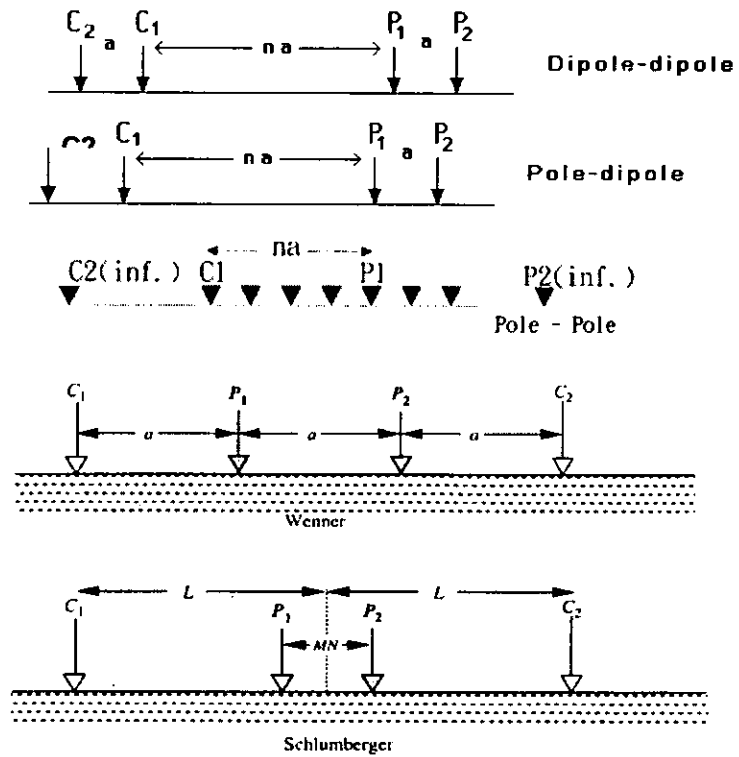


圖 6-5 各種地電阻試驗方式

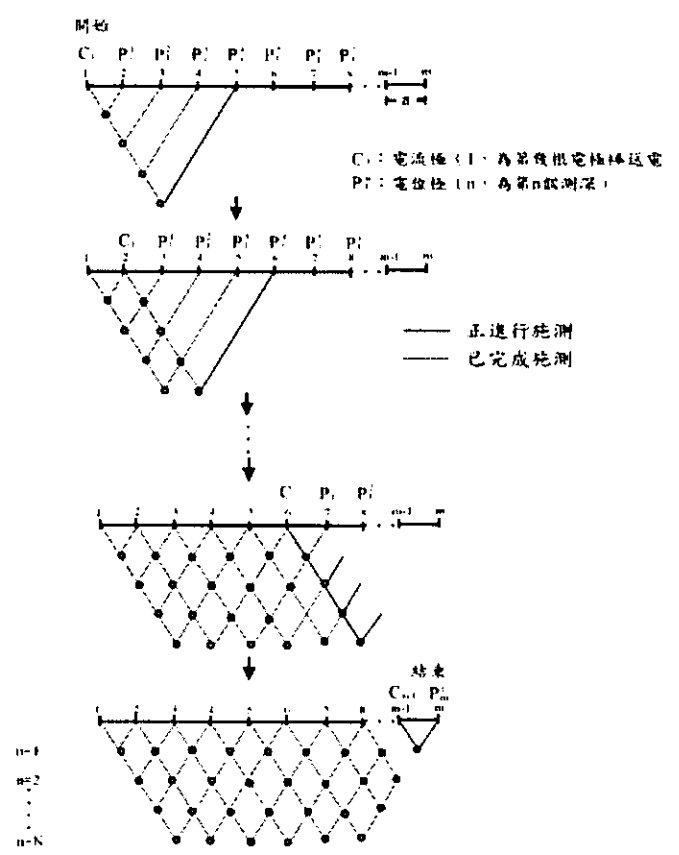


圖 6-6 地電阻施作方式示意圖

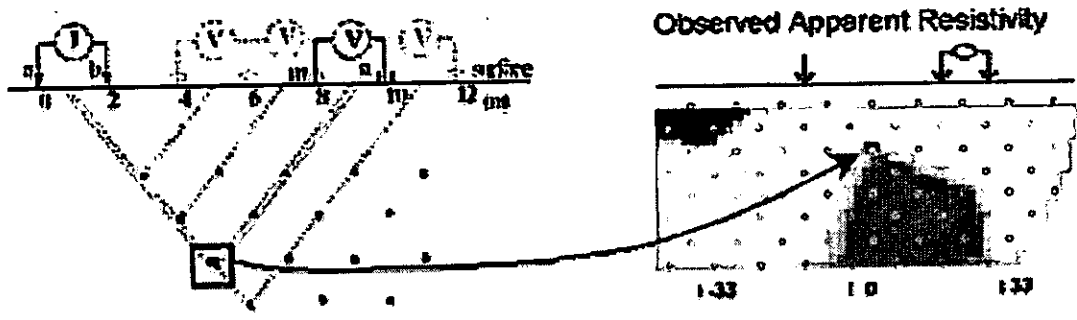


圖 6-7 地電阻量測結果之 pseudo-section

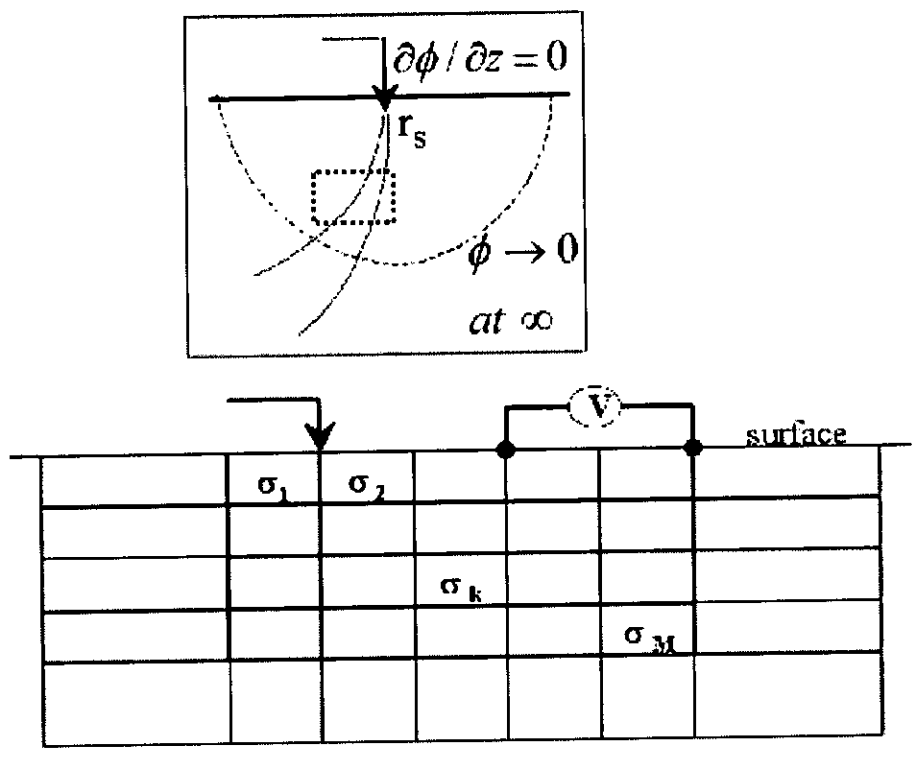


圖 6-8 地電阻有限元素法正算模式示意圖

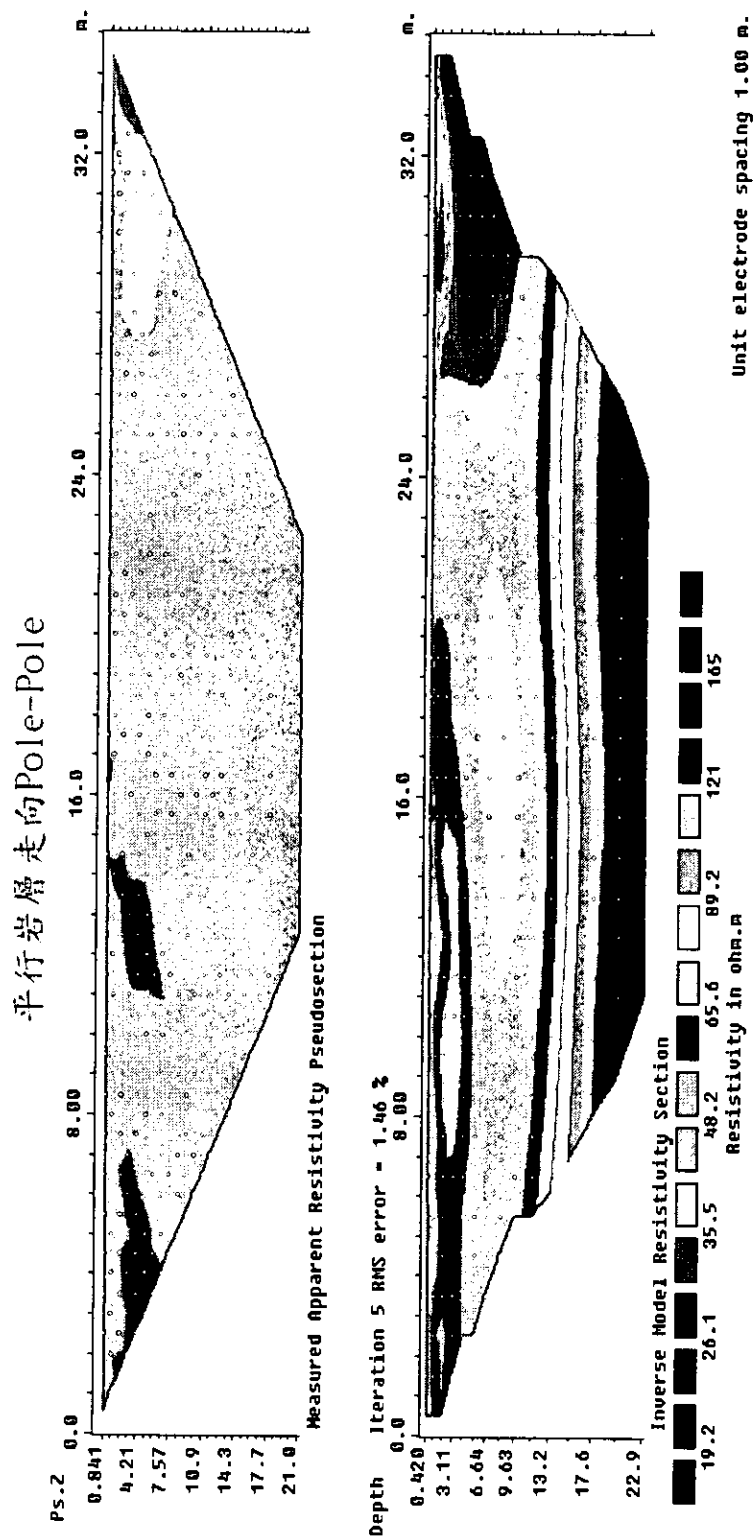


圖 6-9 地電阻剖面影像法案例：寶二水庫試驗站地電阻試驗結果（上圖為量測結果，下圖為反算後之地層剖面）

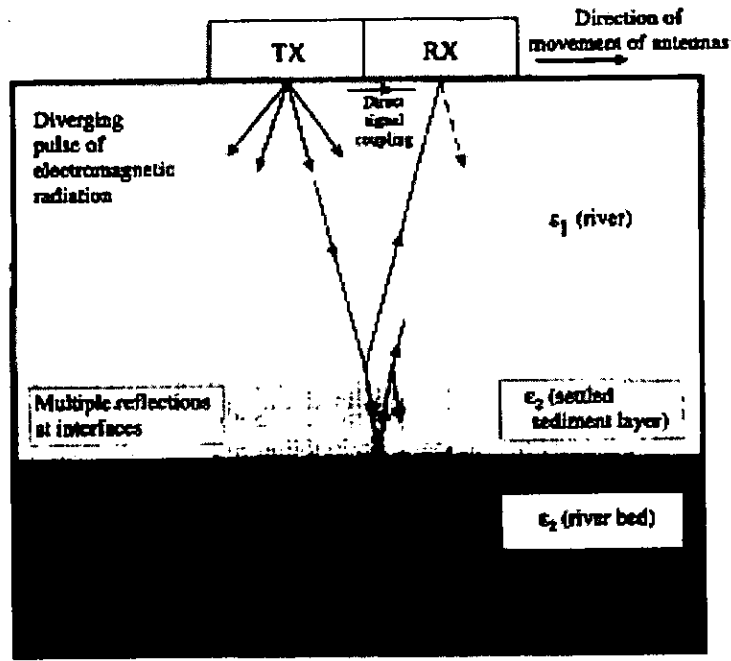


圖 6-10 GPR 探測示意圖 (一) (Millard, et al, 1998)

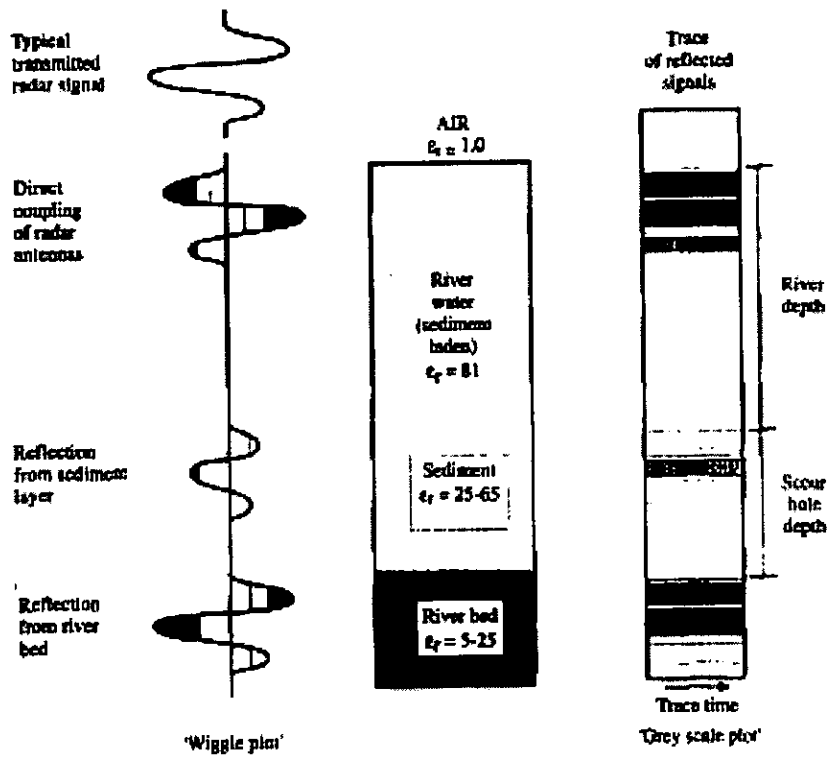


圖 6-11 GPR 探測示意圖 (二) (Millard, et al, 1998)

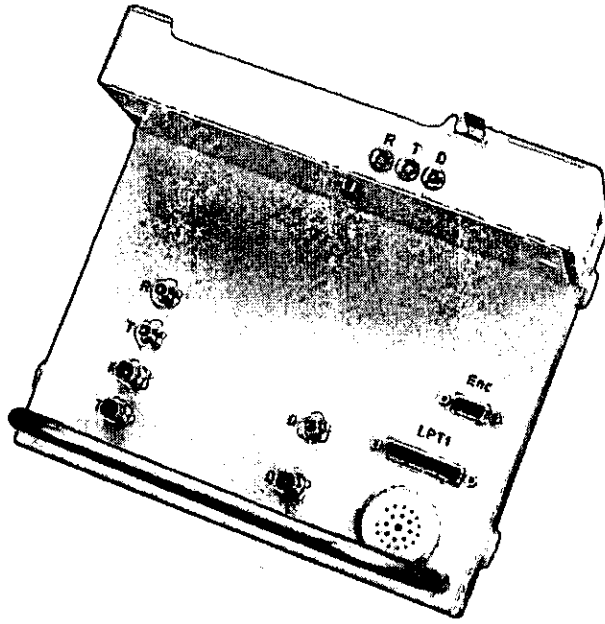


圖 6-12 RAMAC GPR Control Unit CU II

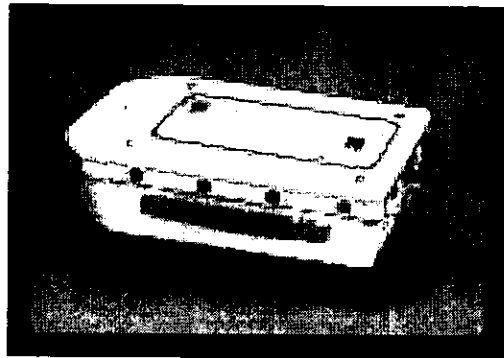


圖 6-13 RAMAC GPR 全罩式天線組

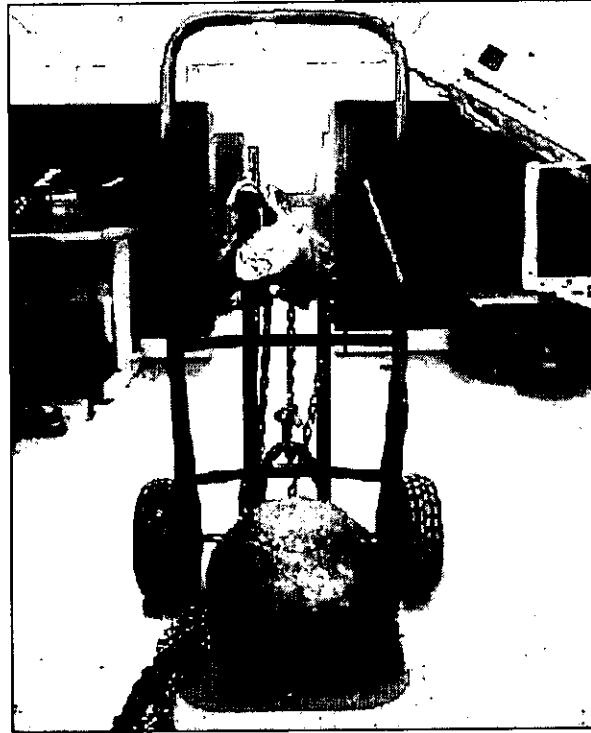


圖 6-14 新式落鏈震源系統 (一)



圖 6-15 新式落鏈震源系統 (二)

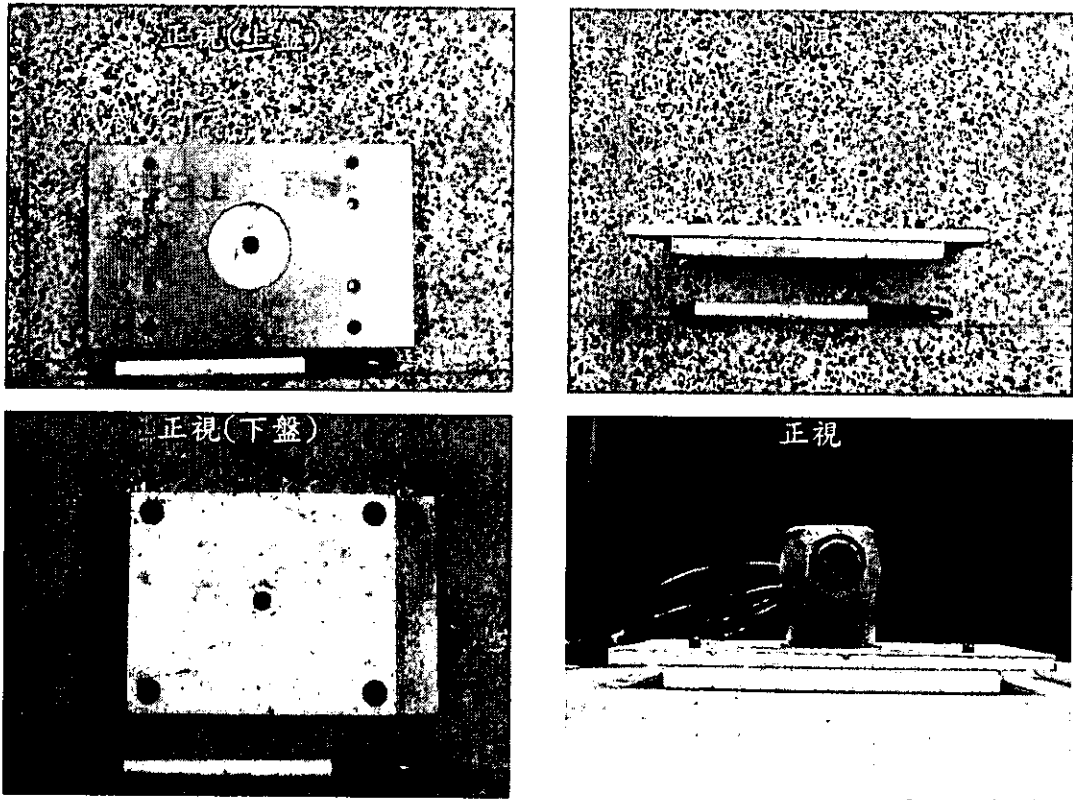


圖 6-16 新式受波器底座



圖 6-17 新式受波器

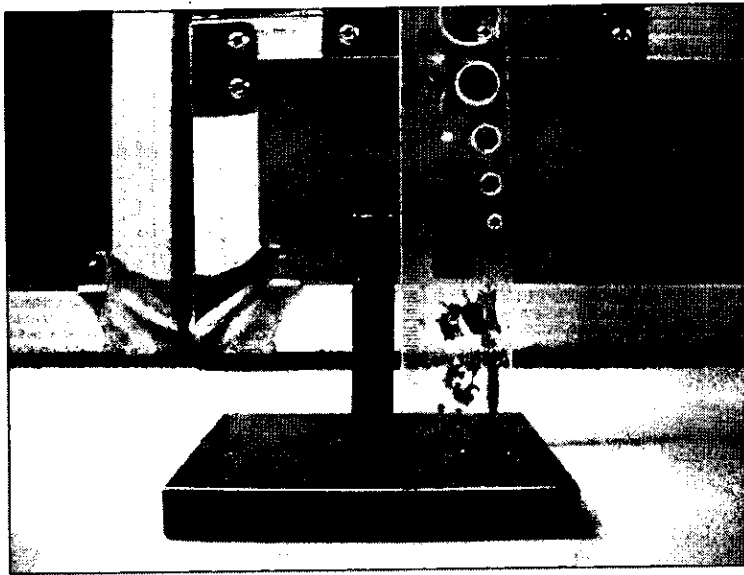


圖 6-18 新式銅板電極

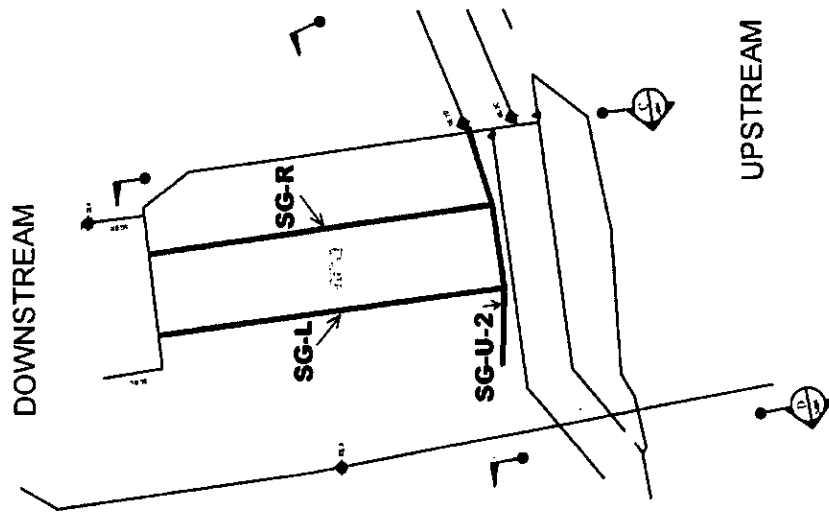


圖 6-19 石門水庫大壩溢洪道下方廊道位置示意圖

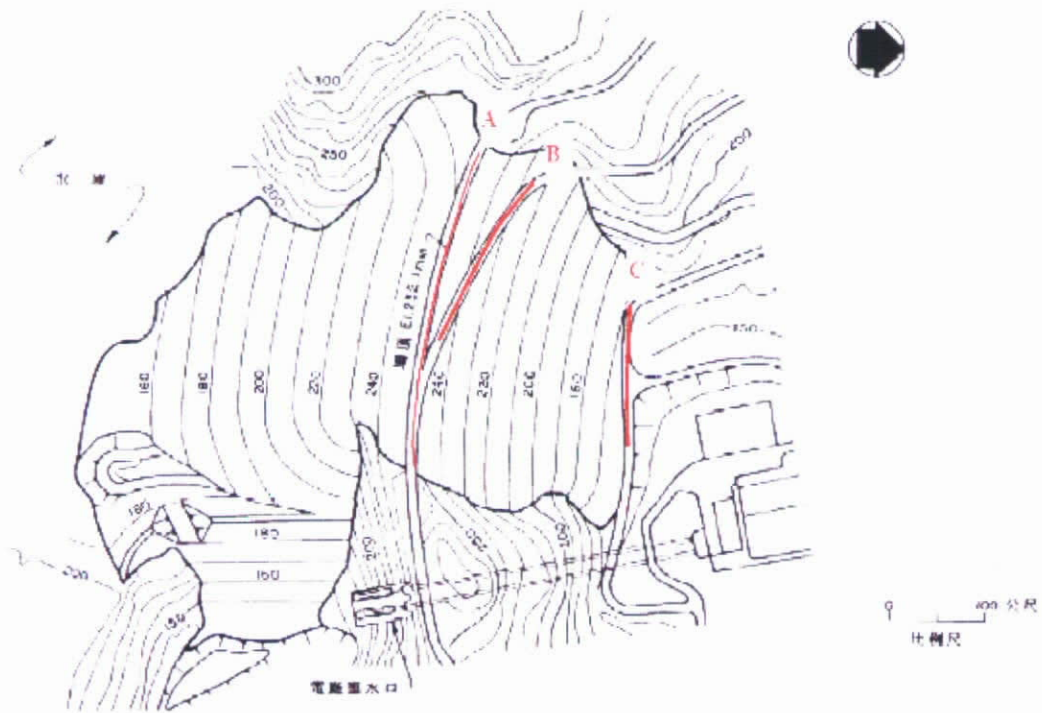


圖 6-20 石門大壩測線佈設概況平面圖

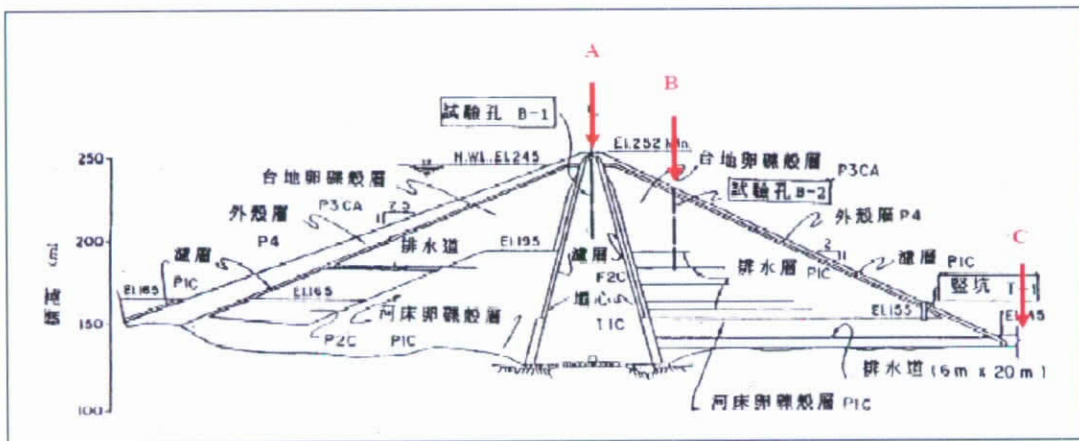


圖 6-21 石門大壩測線佈設概況側視圖

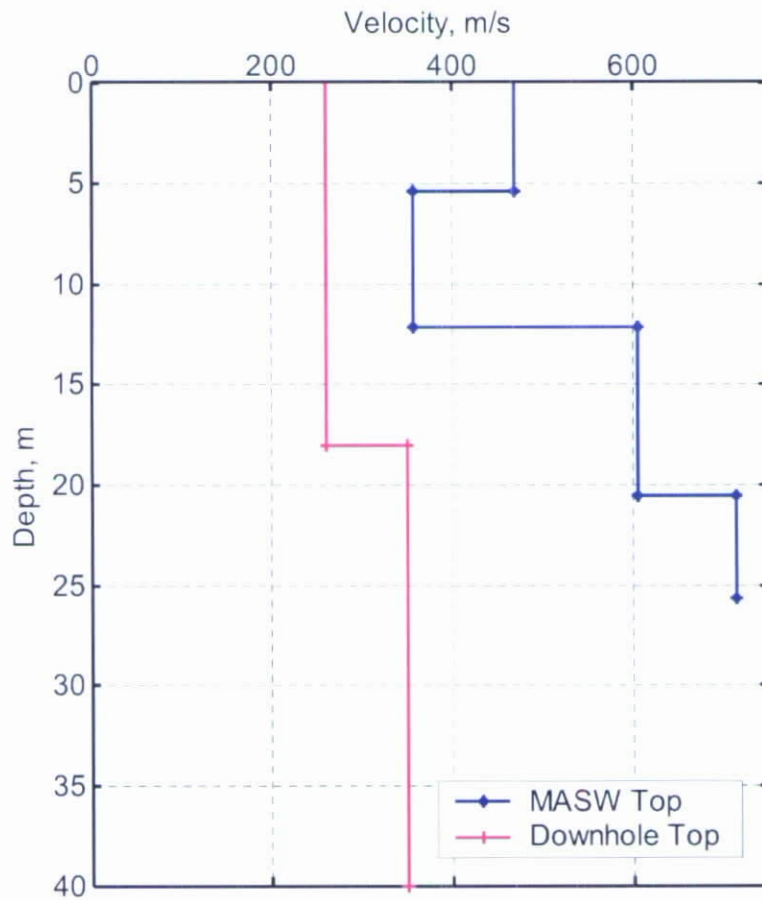


圖 6-22 石門水庫大壩測線 A (壩頂) 壩體剪力波速剖面

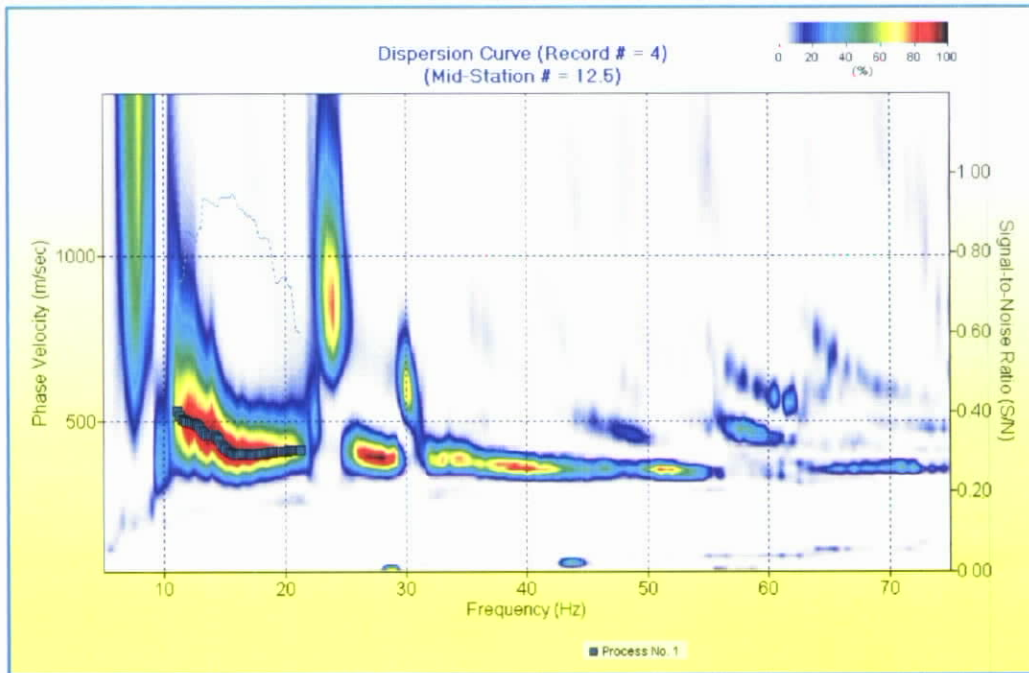


圖 6-23 石門水庫大壩測線 A (壩頂) 壩體頻散曲線

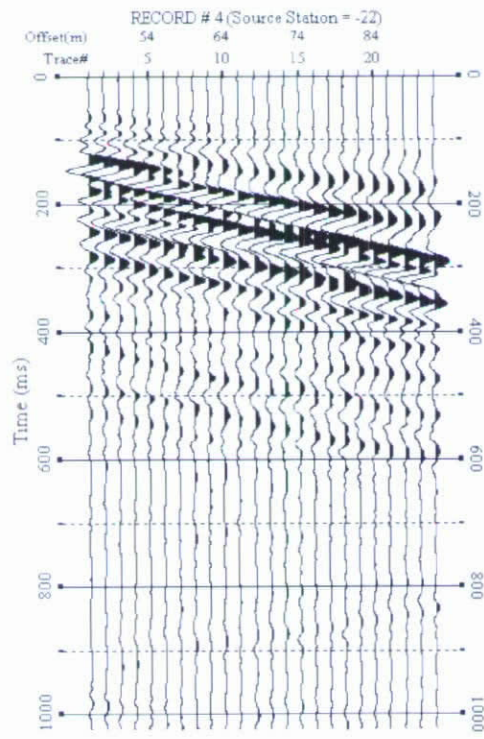


圖 6-24 石門水庫大壩測線 A (壩頂) 震盪歷時

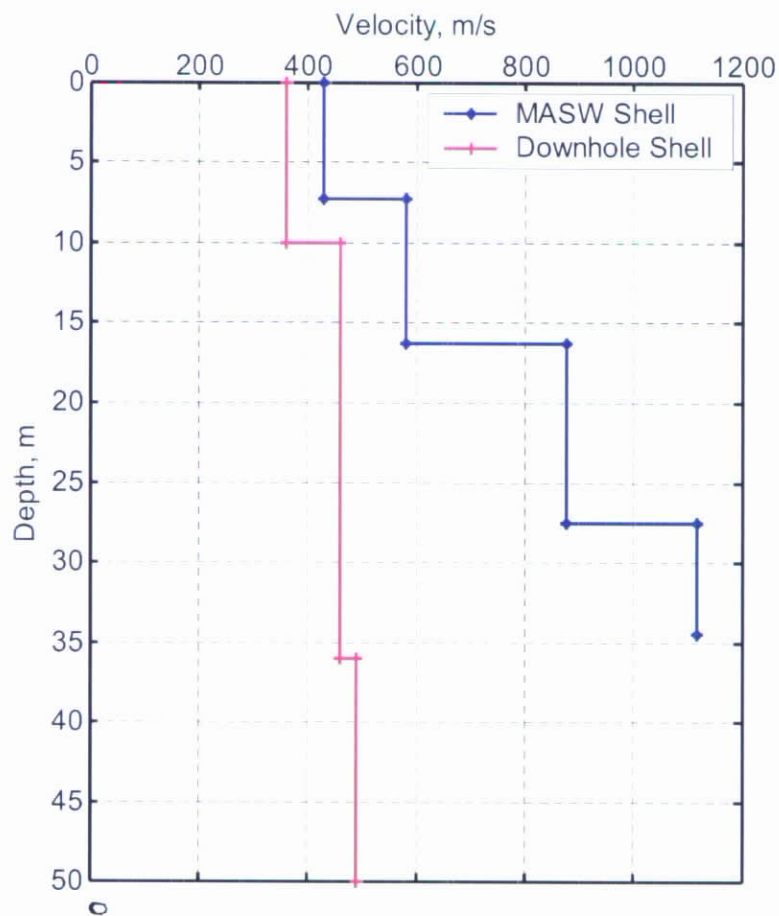


圖 6-25 石門水庫大壩測線 B (殼層) 壩體剪力波速剖面

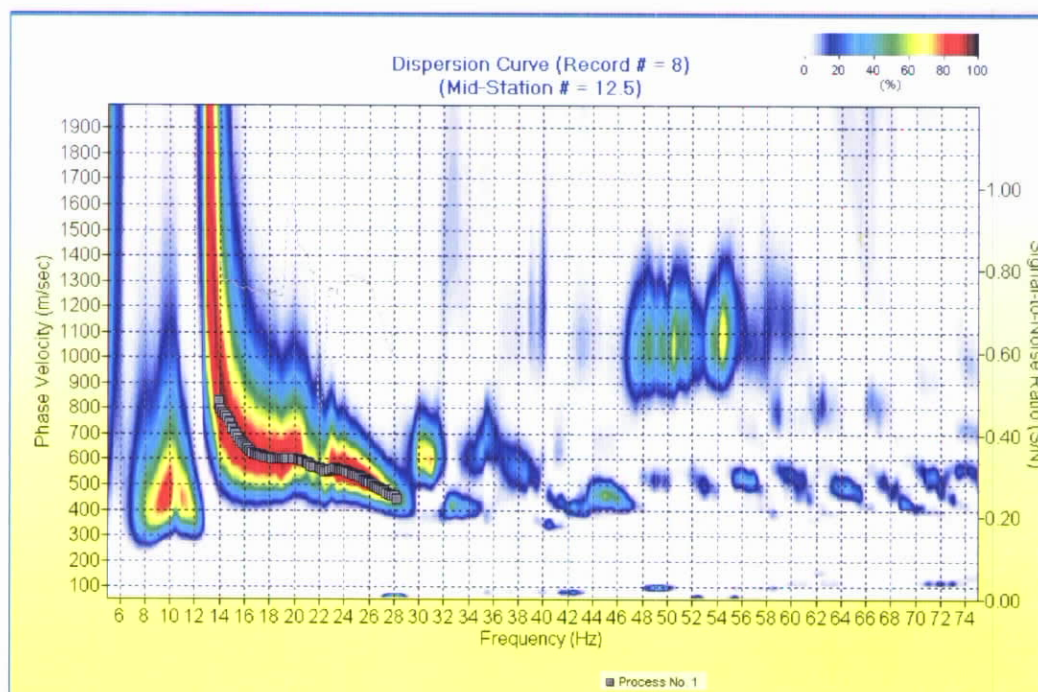


圖 6-26 石門水庫大壩測線 B (殼層) 壩體頻散曲線

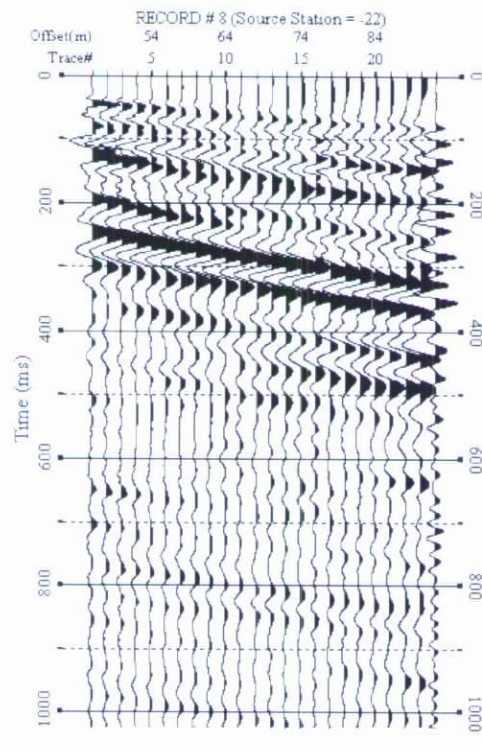


圖 6-27 石門水庫大壩測線 B (殼層) 震盪歷時

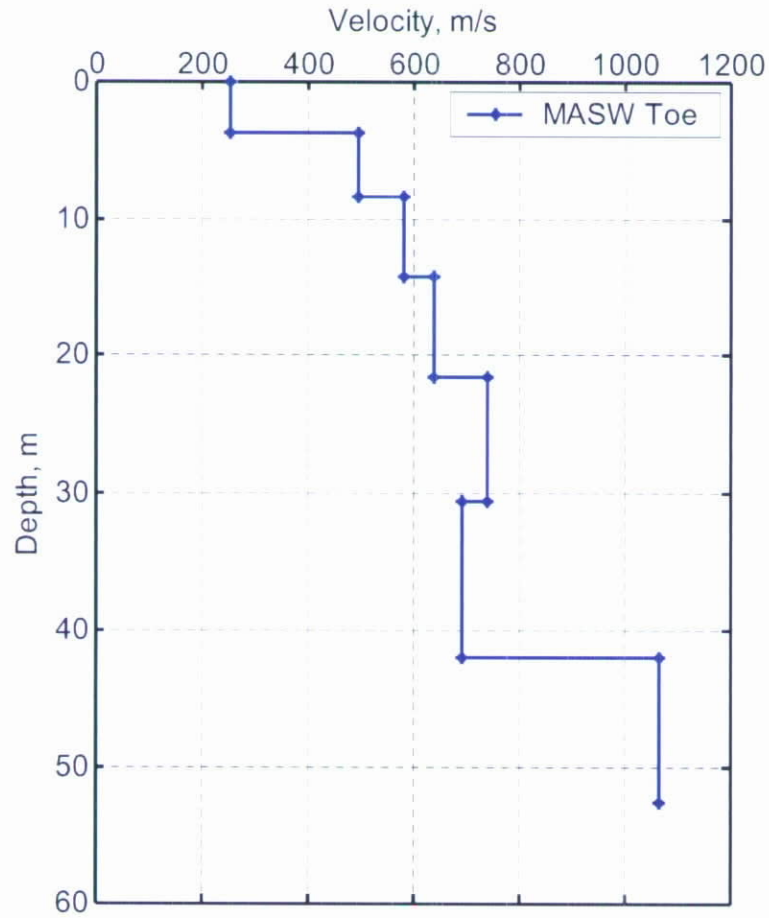


圖 6-28 石門水庫大壩測線 C (壩基) 壩體剪力波速剖面

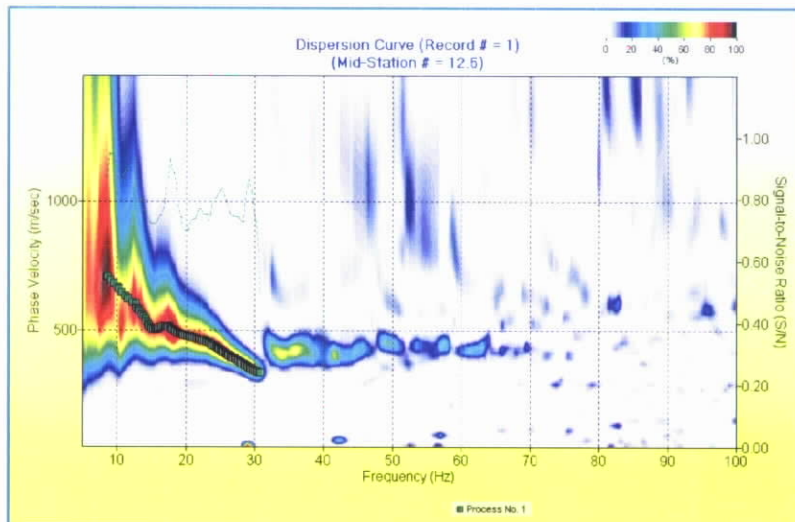


圖 6-29 石門水庫大壩測線 C (壩基) 壩體頻散曲線

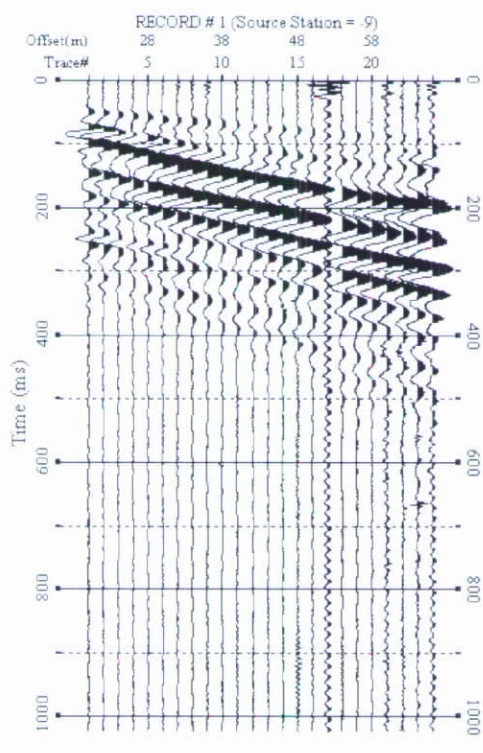


圖 6-30 石門水庫大壩測線 C (壩基) 震盪歷時

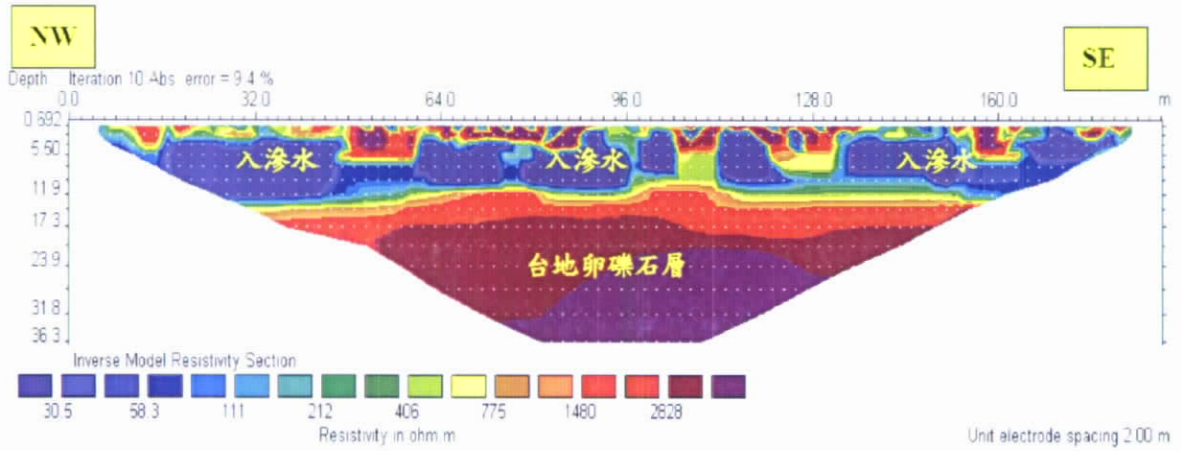


圖 6-31 石門水庫大壩測線 B 地電阻影像剖面 Wenner-Schlumberger

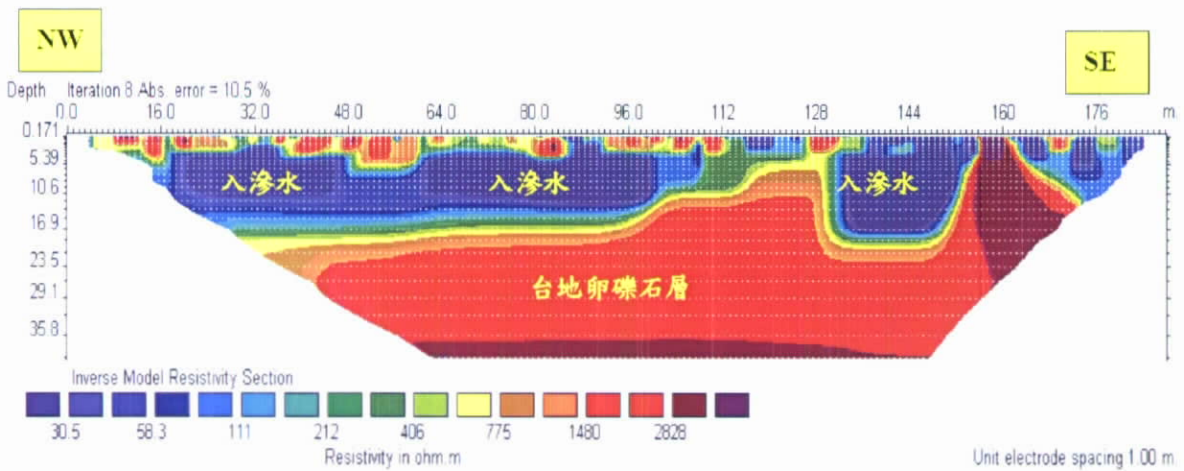


圖 6-32 石門水庫大壩測線 B 地電阻影像剖面 Pole-Dipole

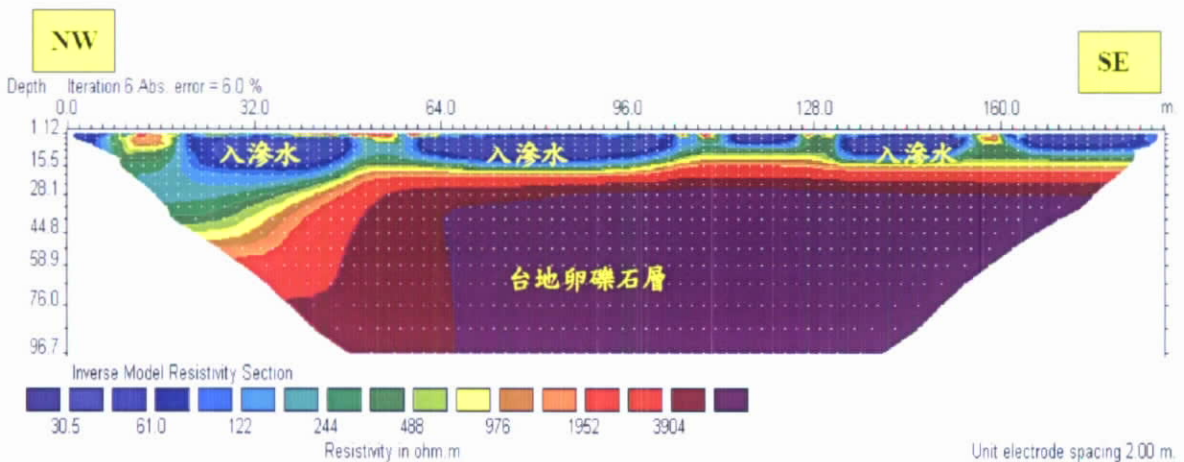


圖 6-33 石門水庫大壩測線 B 地電阻影像剖面 Pole-Pole

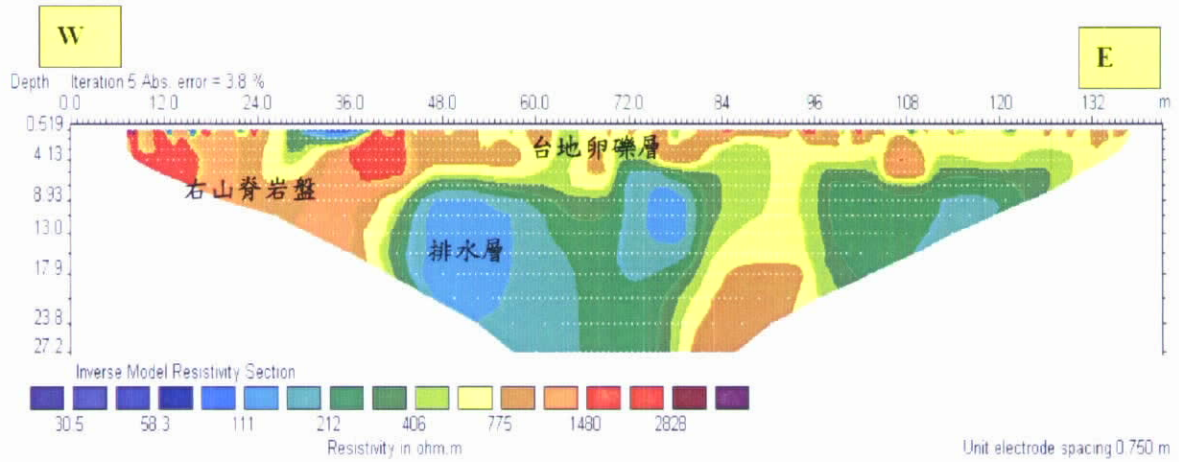


圖 6-34 石門水庫大壩測線 C (壩基) 地電阻影像剖面 Wenner-Schlumberger

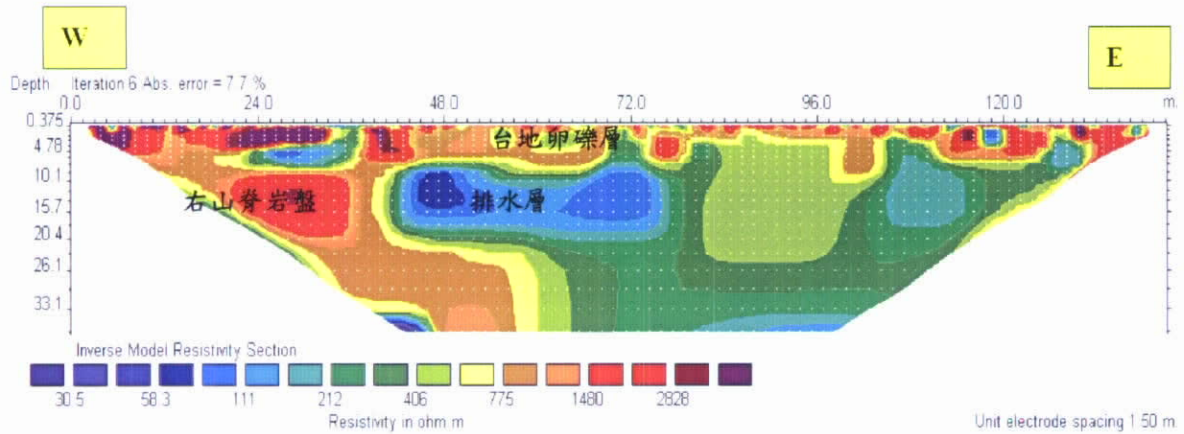


圖 6-35 石門水庫大壩測線 C (壩基) 地電阻影像剖面 Pole-Dipole

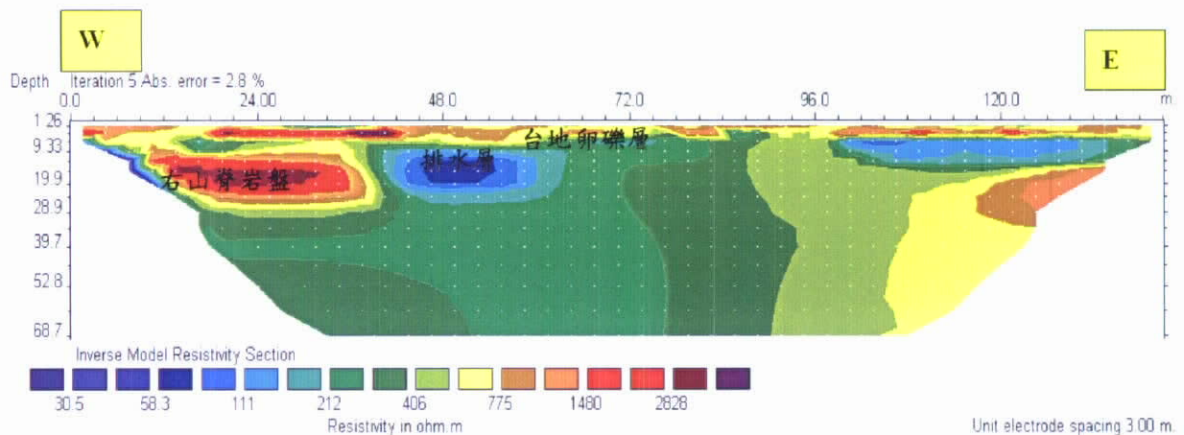


圖 6-36 石門水庫大壩測線 C (壩基) 地電阻影像剖面 Pole-Pole

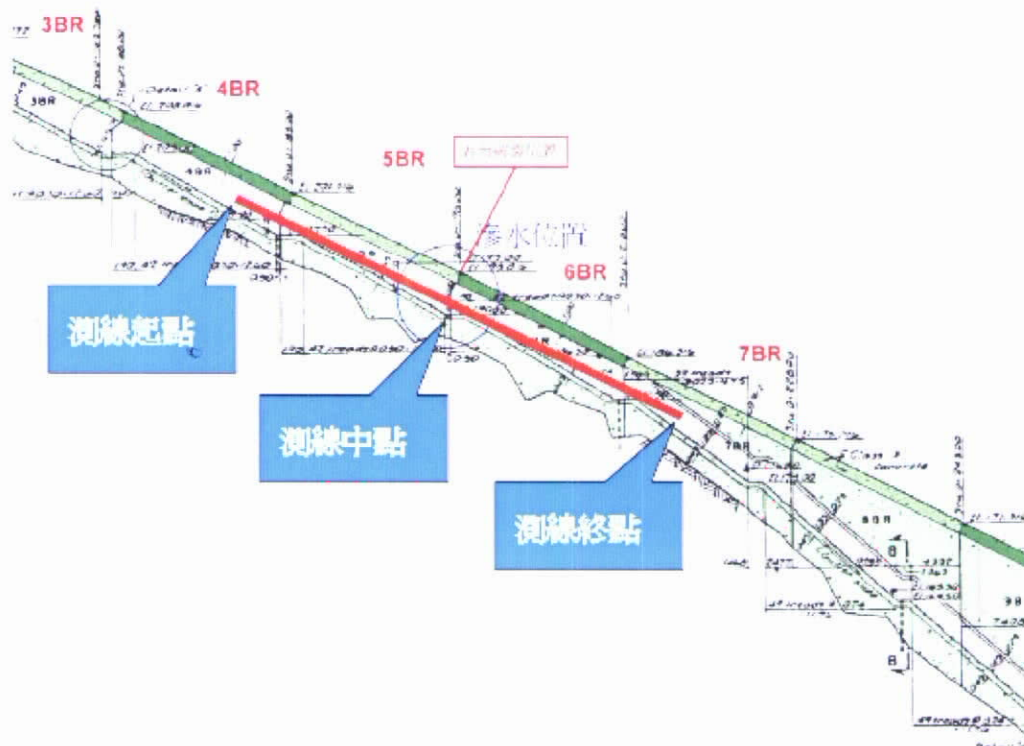


圖 6-37 石門水庫溢洪道下方 SU-R 廊道折射震測測線佈設概況



圖 6-38 石門水庫溢洪道下方 SU-R 廊道折射震測採用震源(左)

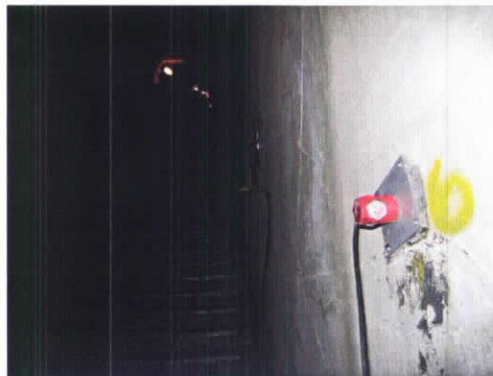


圖 6-39 石門水庫溢洪道下方 SU-R 廊道折射震測測線布置(右)

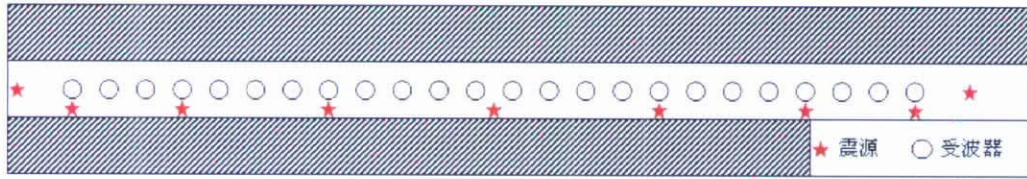


圖 6-40 折測震測九點法震源佈設位置

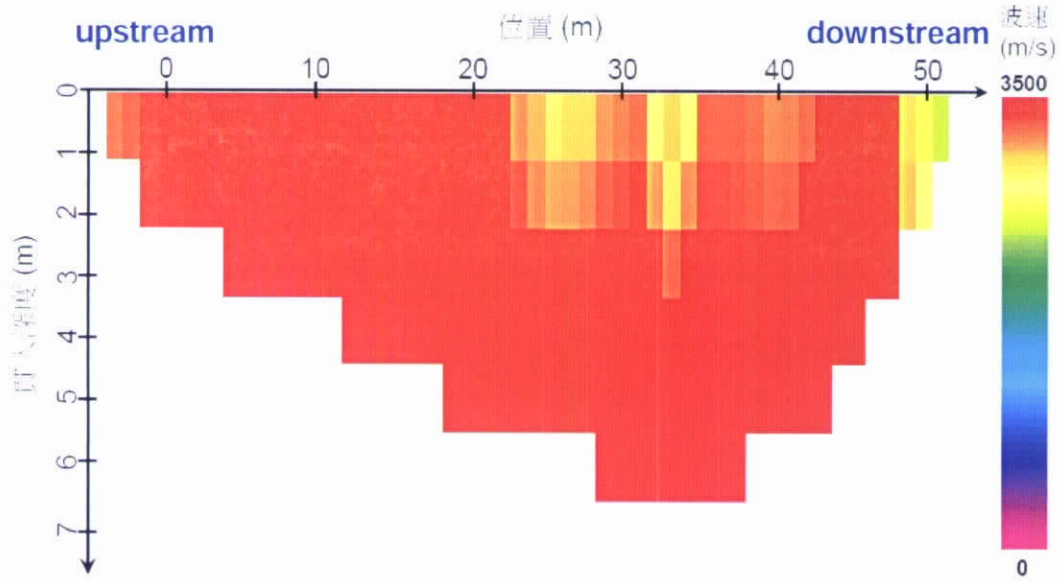


圖 6-41 石門水庫 SU-R 廊道左側壁 P 波波速剖面圖

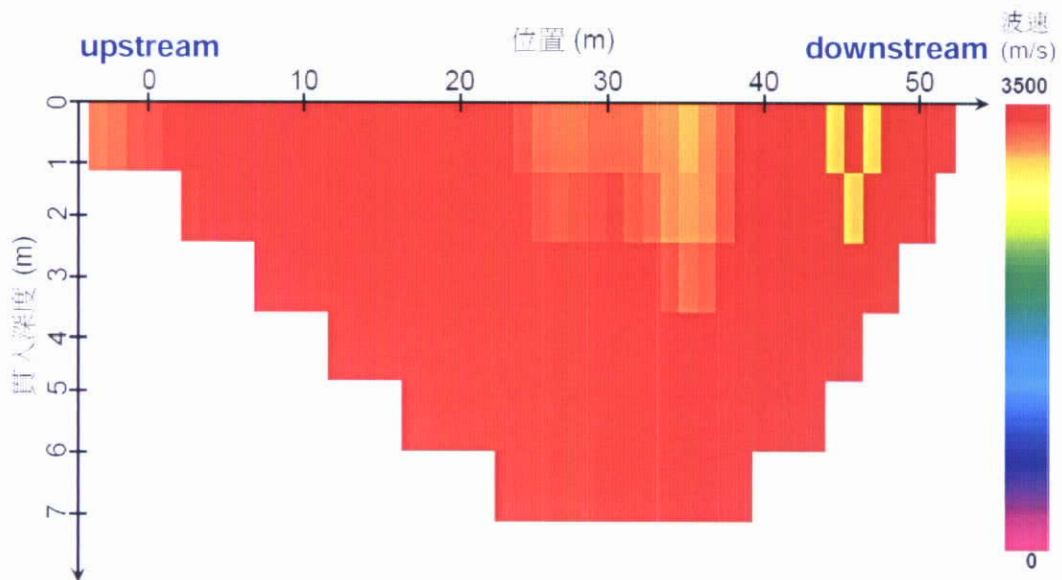


圖 6-42 石門水庫 SU-R 廊道右側壁 P 波波速剖面圖

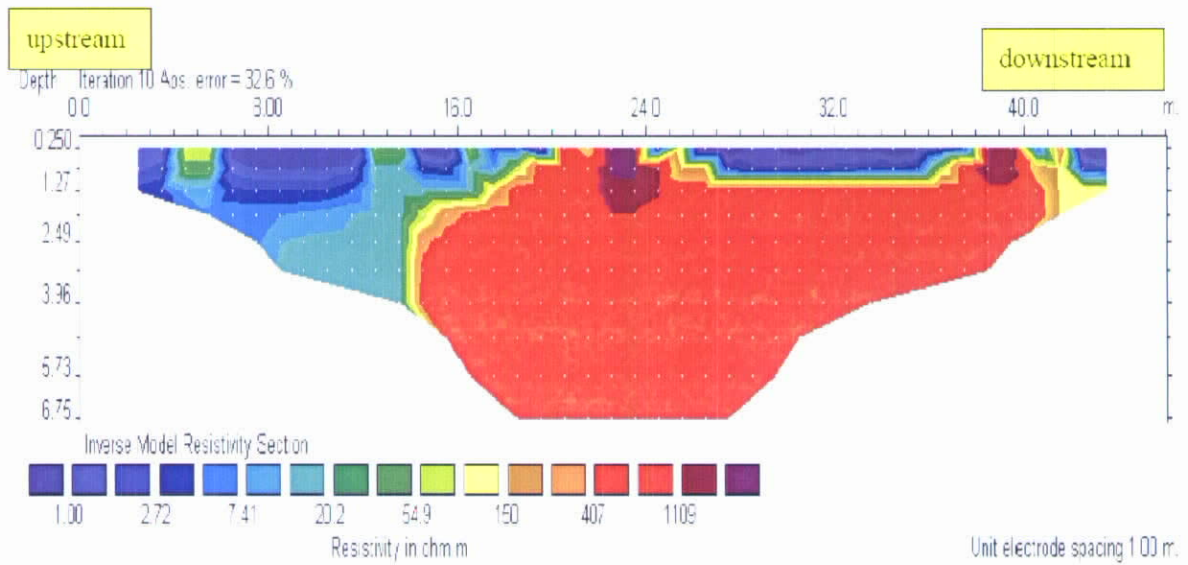


圖 6-43 石門水庫 SU-R 廊道右側壁電探剖面圖-Wenner

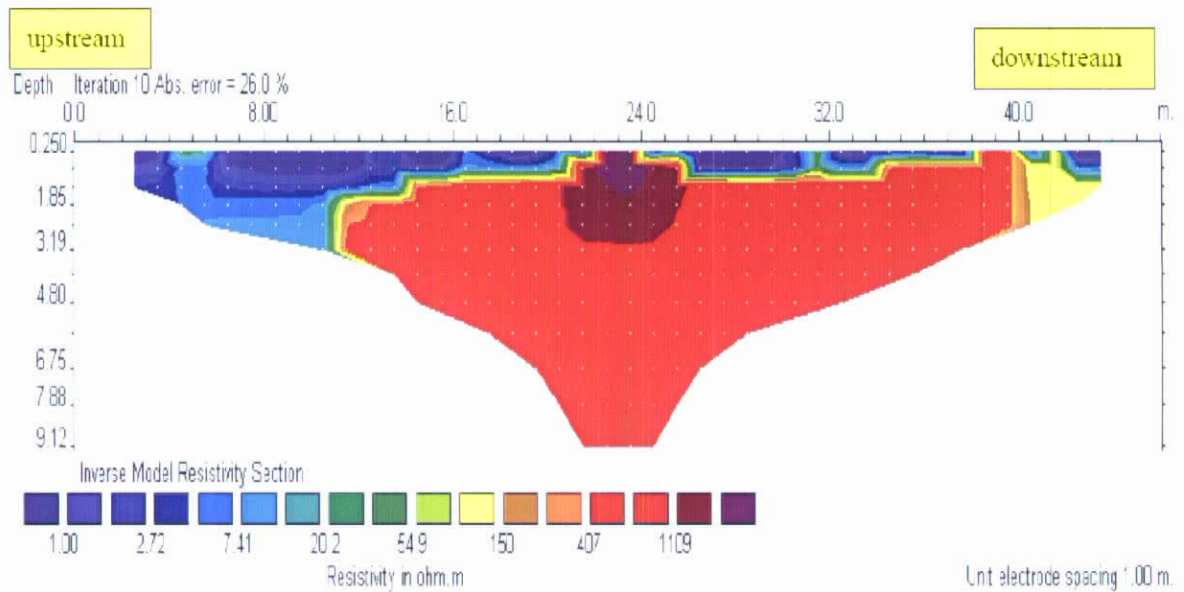


圖 6-44 石門水庫 SU-R 廊道右側壁電探剖面圖 Wenner-Schlumberger

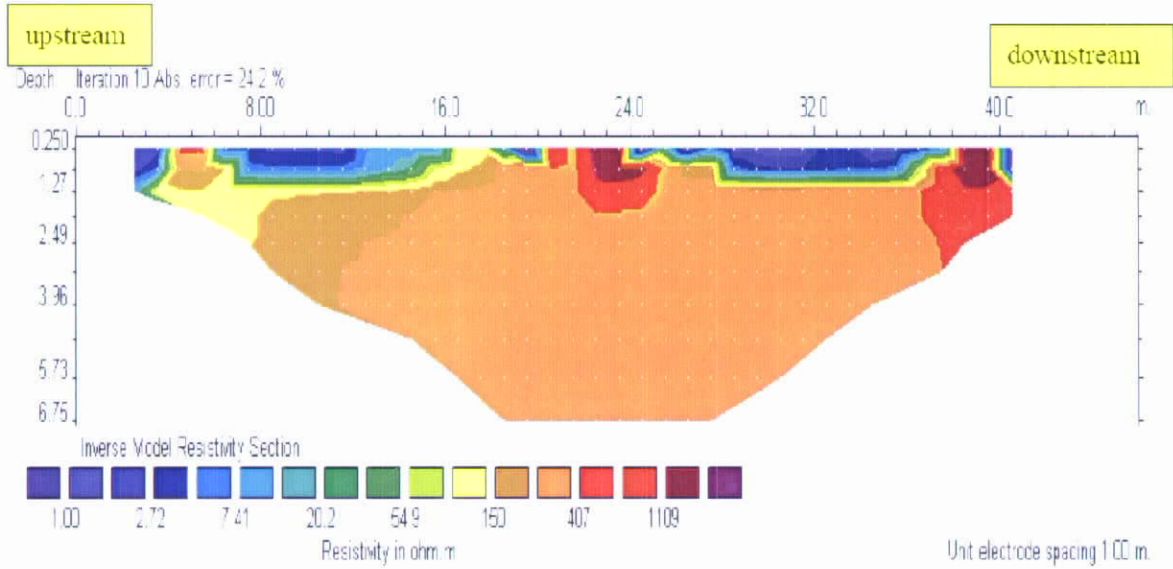


圖 6-45 石門水庫 SU-R 廊道左側壁電探剖面圖-Wenner

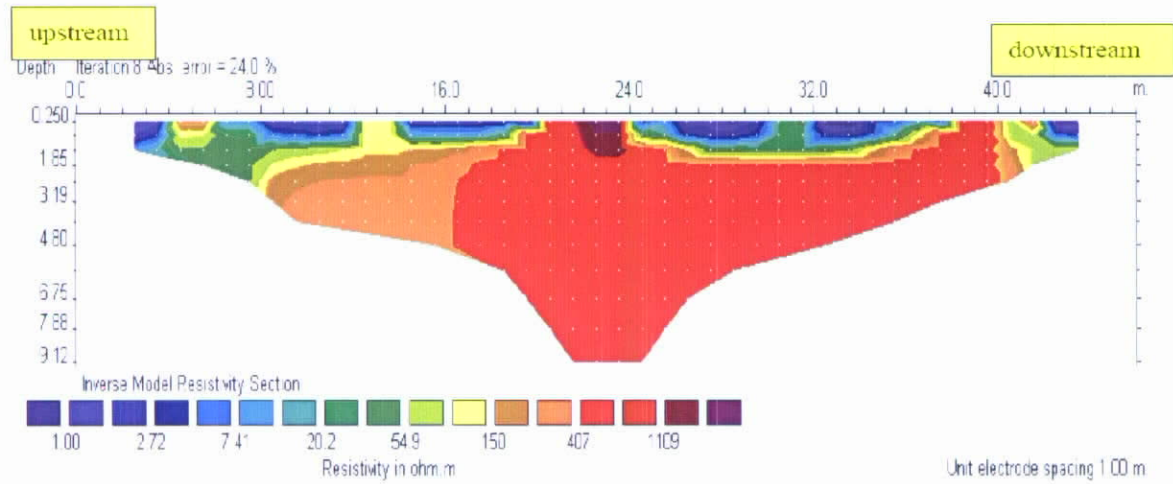


圖 6-46 石門水庫 SU-R 廊道左側壁電探剖面圖 Wenner-Schlumberger

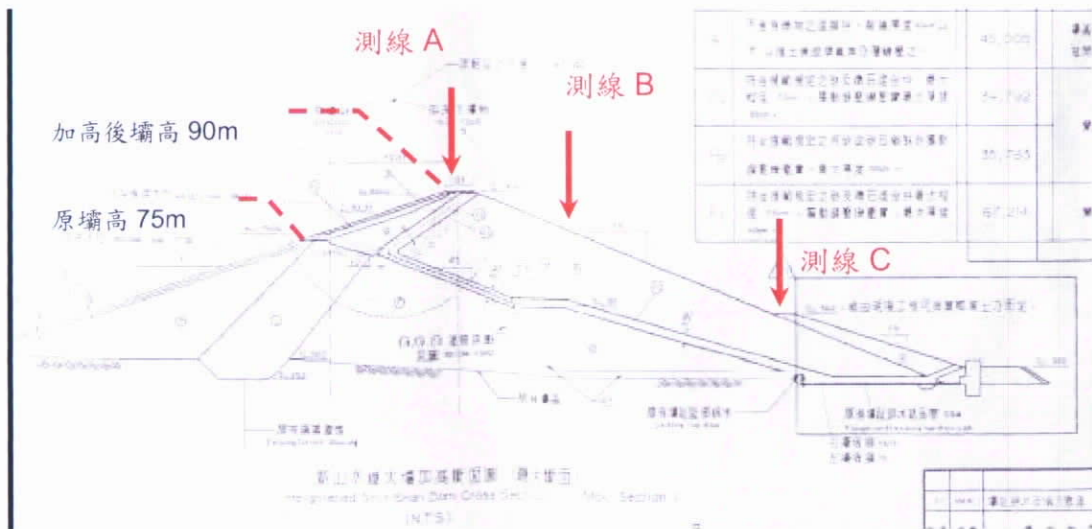


圖 6-47 新山水庫壩體加高斷面圖

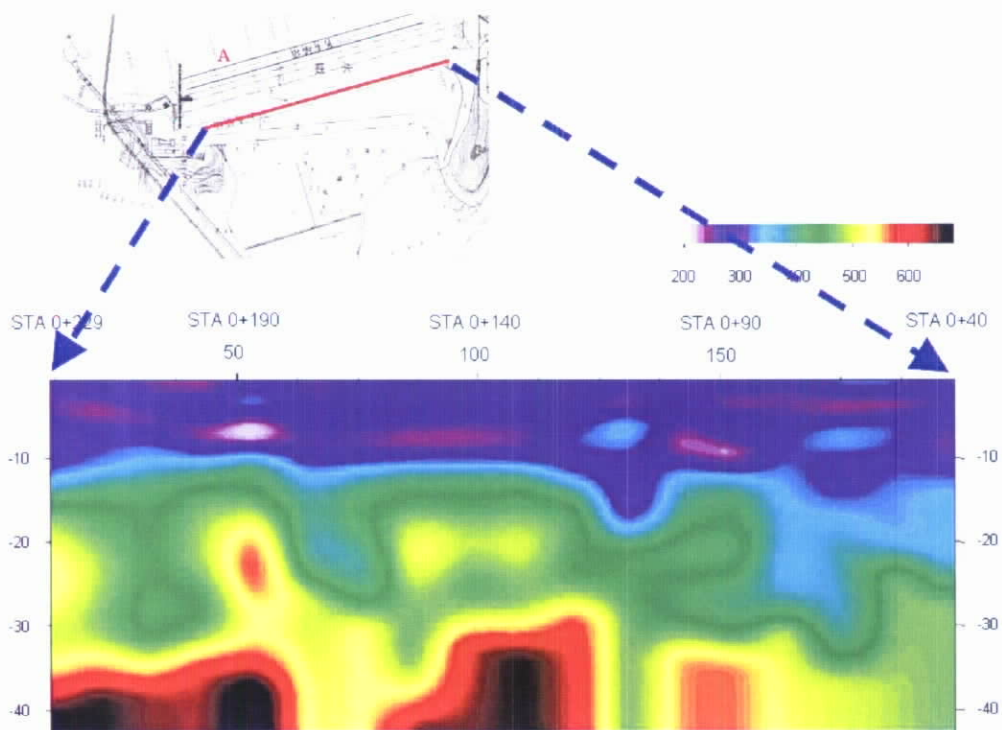


圖 6-48 新山水庫壩頂（測線 A）之二維剪力波速剖面

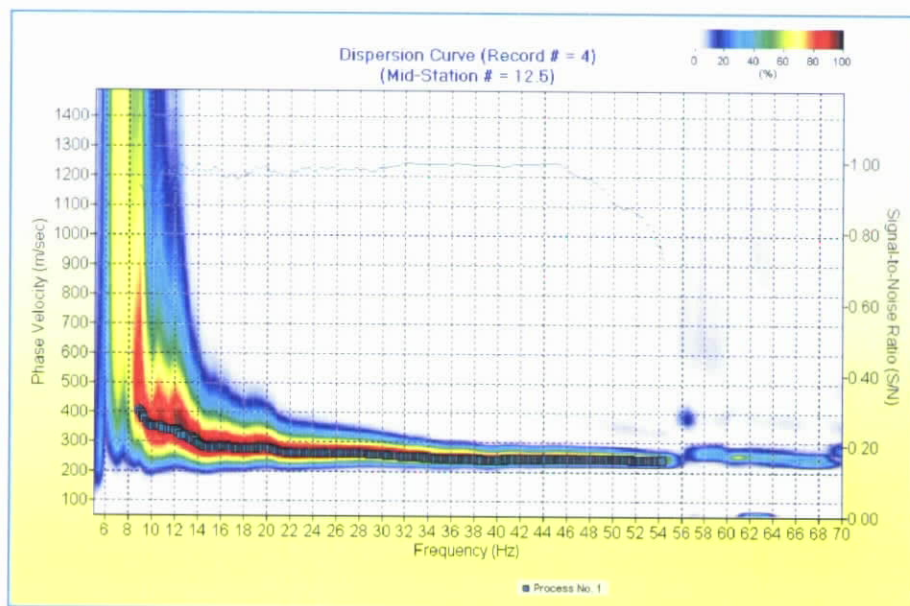


圖 6-49 新山水庫壩頂 (測線 A) 頻散曲線

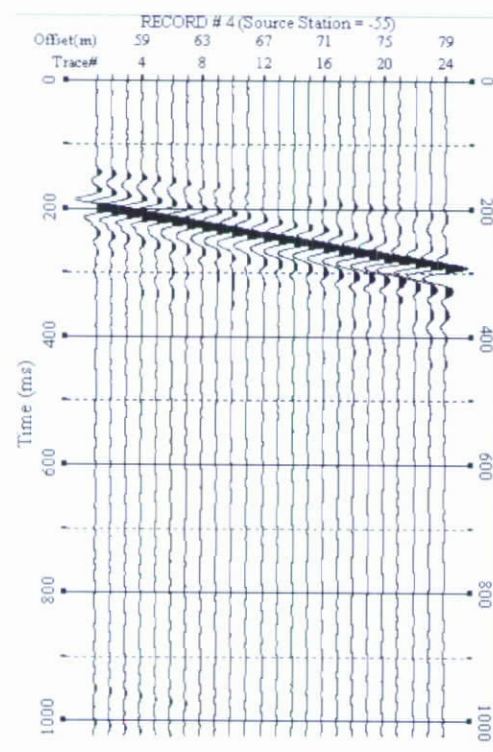


圖 6-50 新山水庫壩頂 (測線 A) 震盪歷時

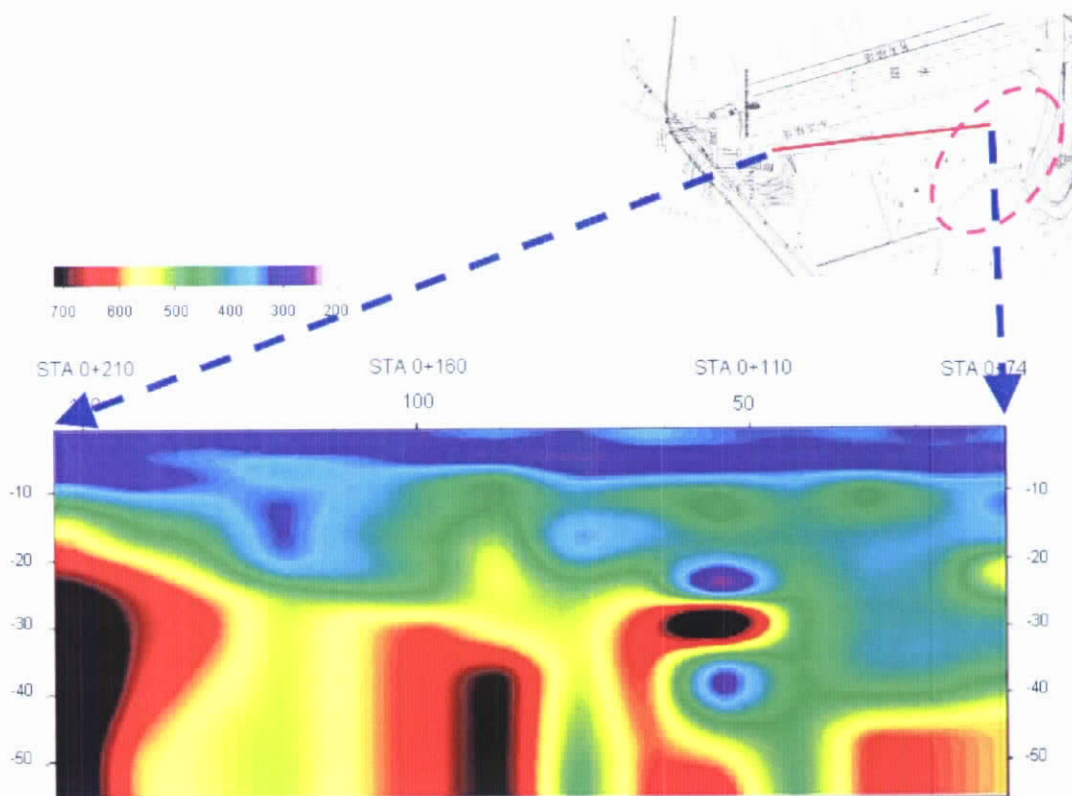


圖 6-51 新山水庫殼層（測線 B）之二維剪力波速剖面

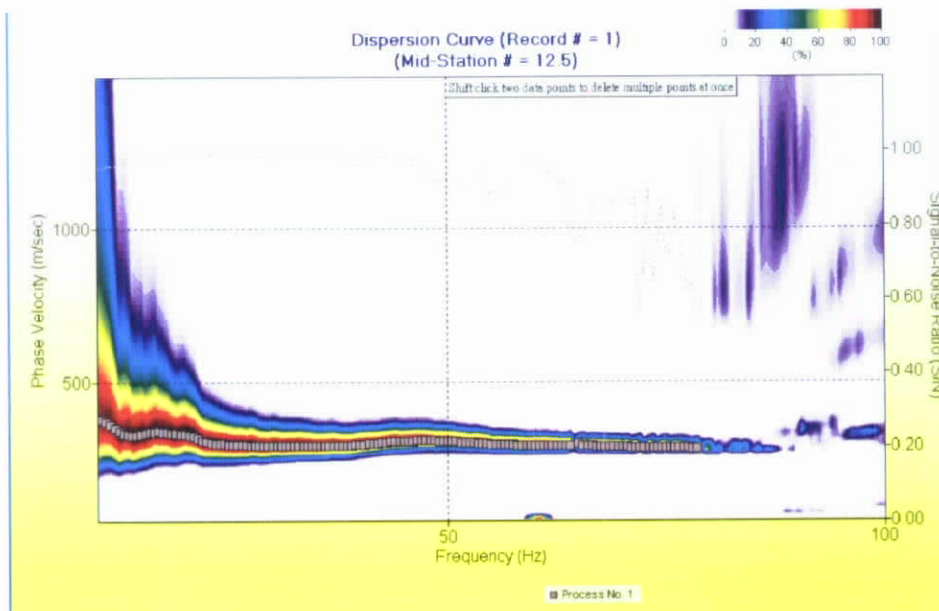


圖 6-52 新山水庫殼層（測線 B）頻散曲線

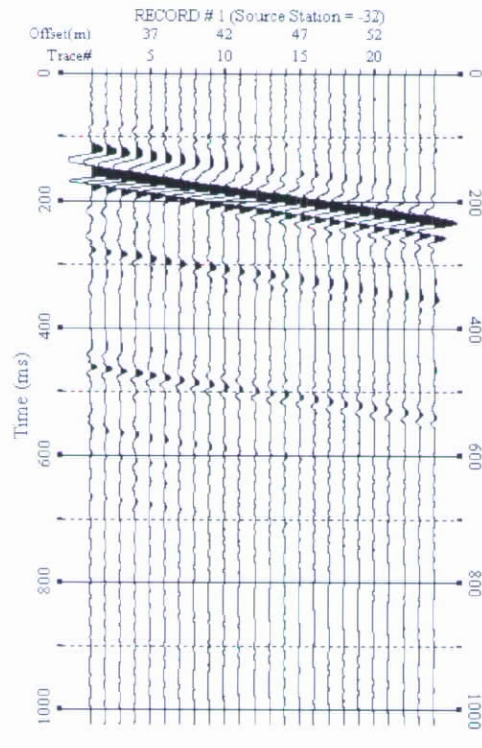


圖 6-53 新山水庫殼層 (測線 B) 震盪歷時

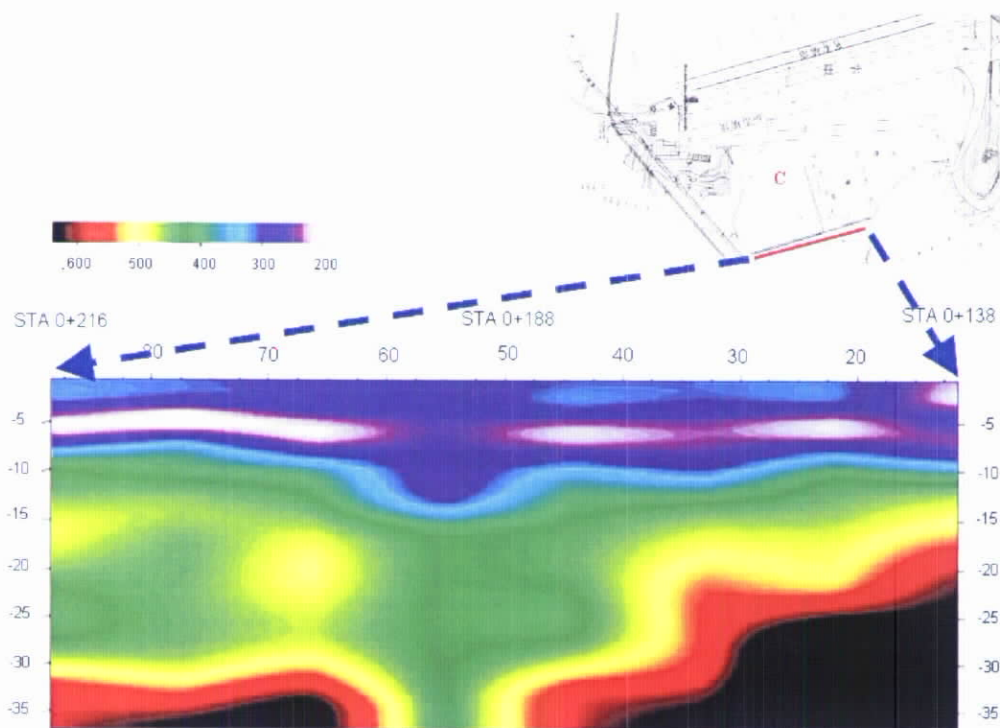


圖 6-54 新山水庫壩基（測線 C）之二維剪力波速剖面

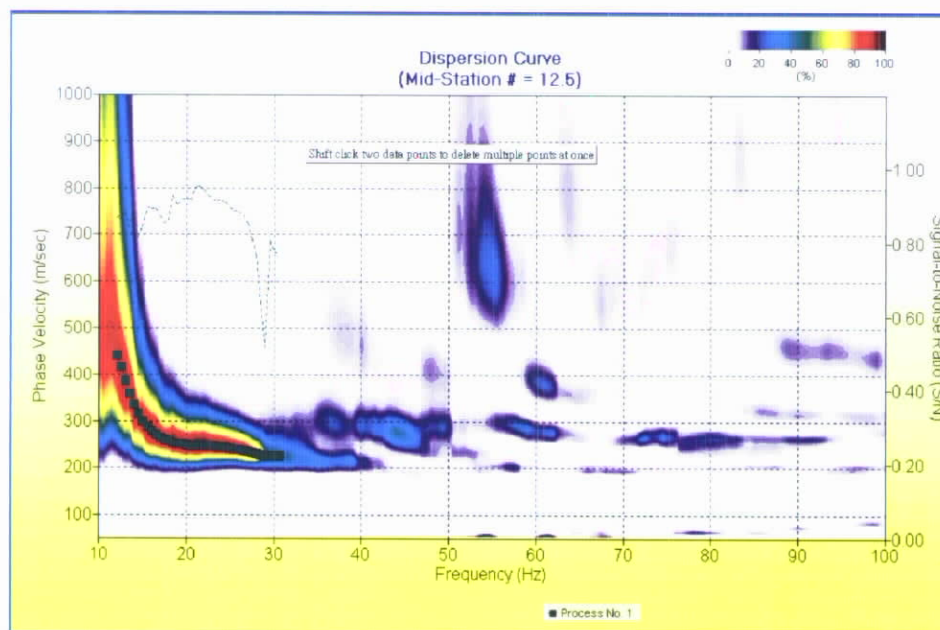


圖 6-55 新山水庫壩基（測線 C）頻散曲線

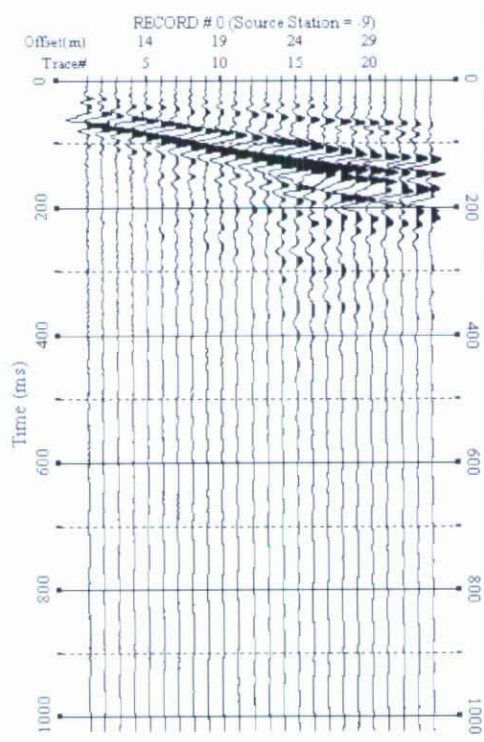


圖 6-56 新山水庫壩基 (測線 C) 震盪歷時

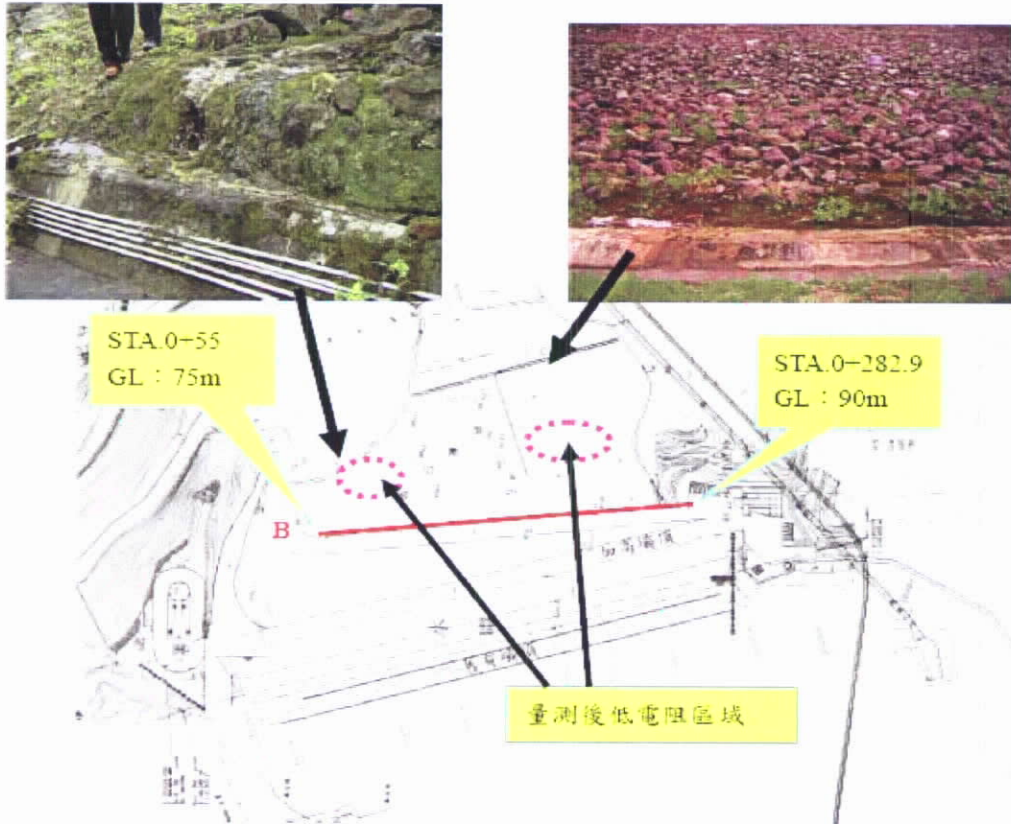


圖 6-57 新山水庫地電阻測線 B (殼層) 之佈線位置與滲漏位置

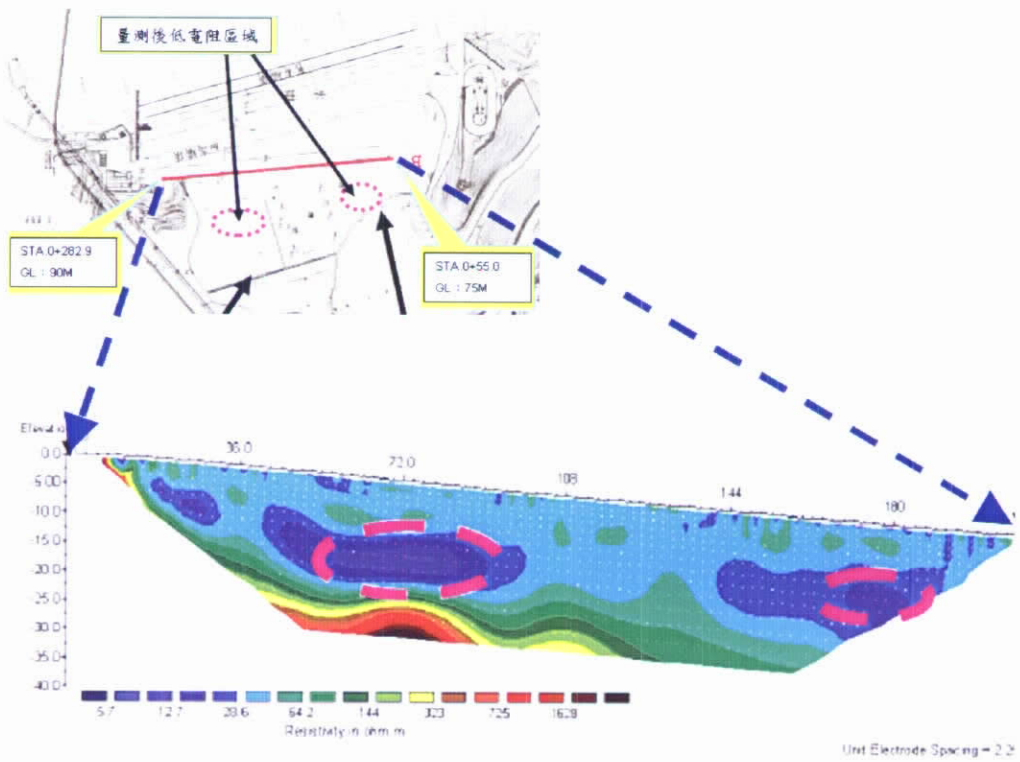


圖 6-58 新山水庫測線 B (殼層) 地電阻影像剖面- Dipole-Dipole

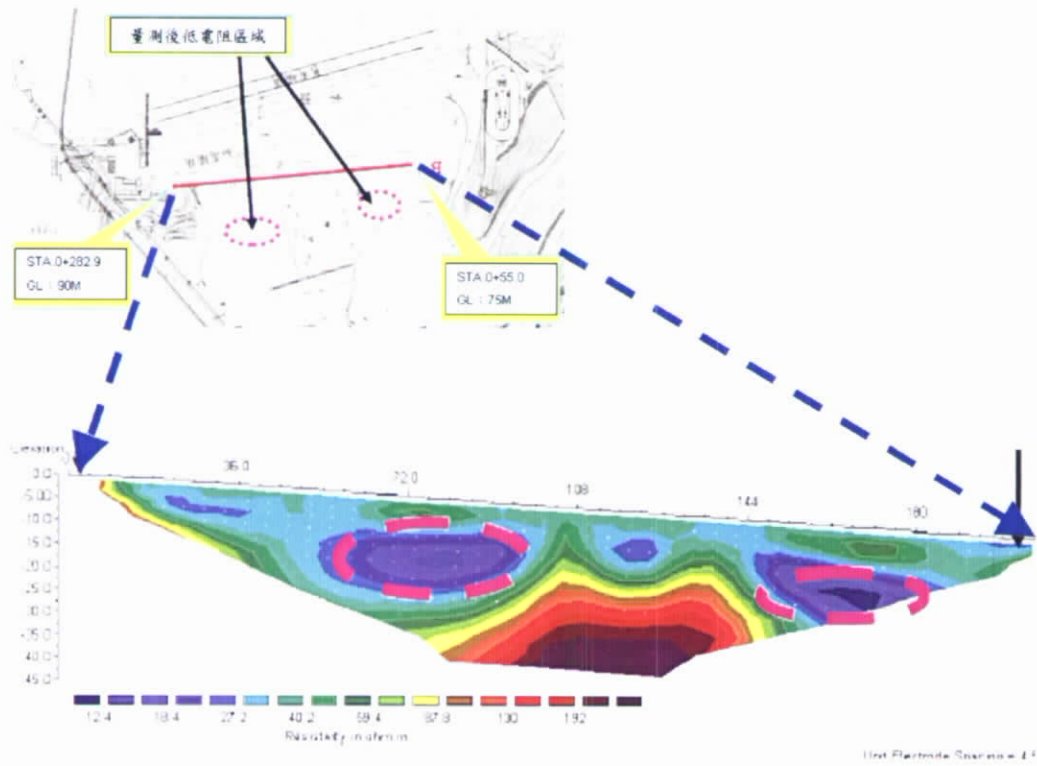


圖 6-59 新山水庫測線 B (殼層) 地電阻影像剖面- Wenner

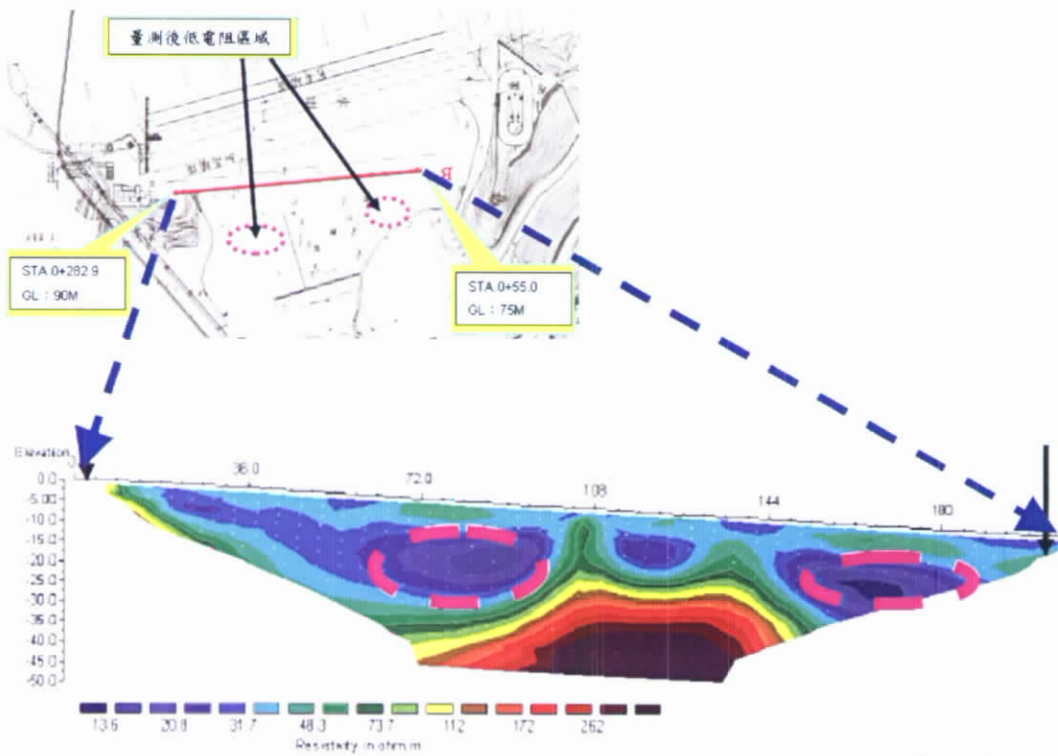


圖 6-60 新山水庫測線 B (殼層) 地電阻影像剖面- Wenner-Schlumberger

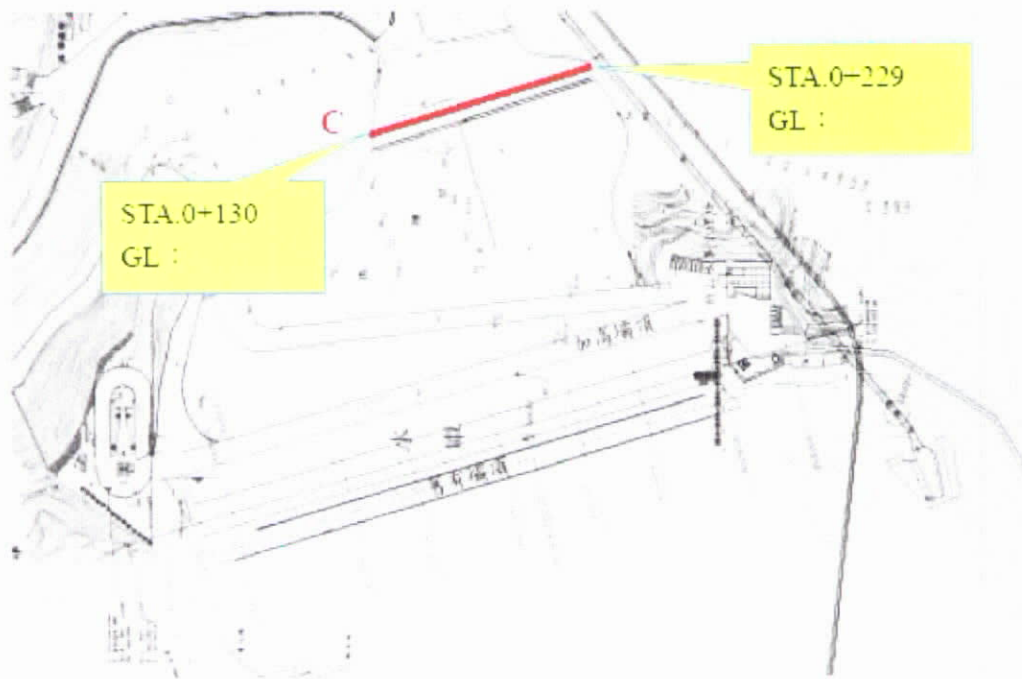


圖 6-61 新山水庫測線 C (壩基) 之佈線位置

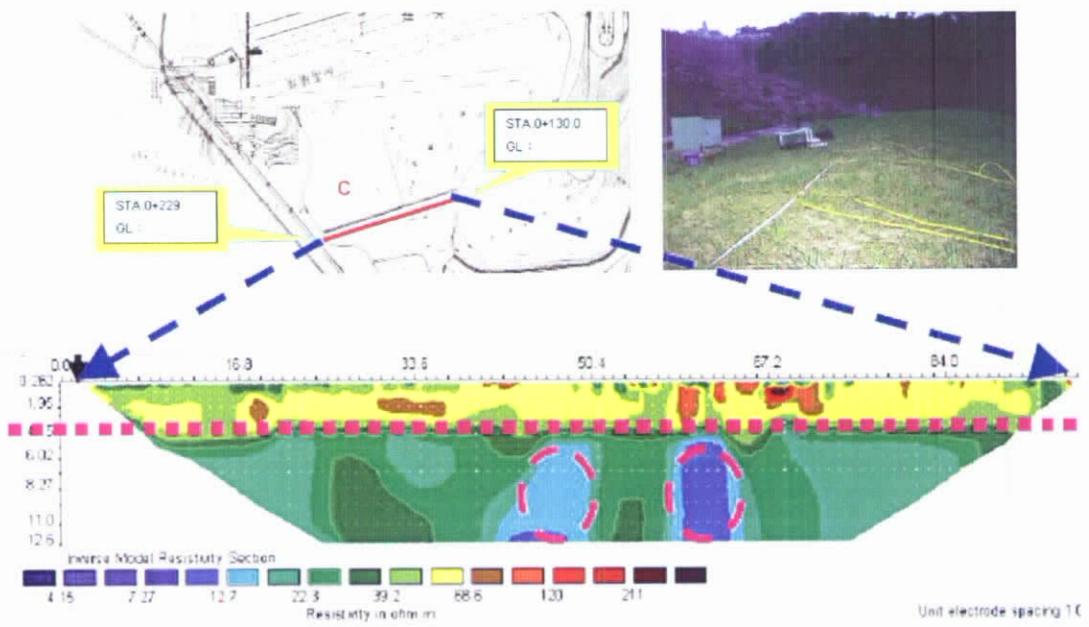


圖 6-62 新山水庫測線 C (壩基) 地電阻影像剖面- Dipole-Dipole

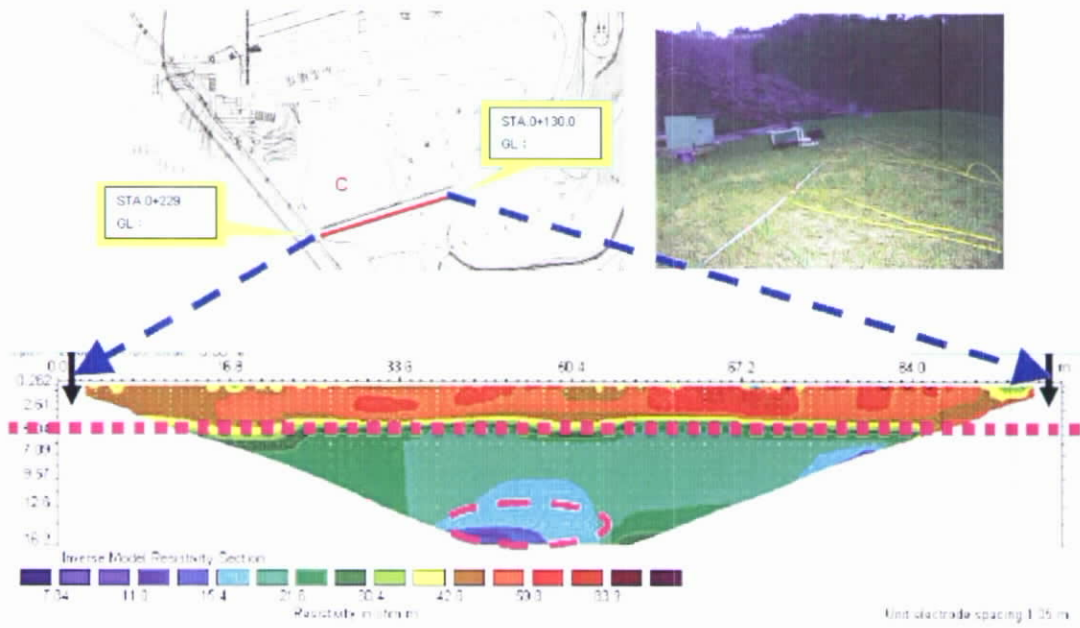


圖 6-63 新山水庫測線 C (壩基) 地電阻影像剖面-Wenner

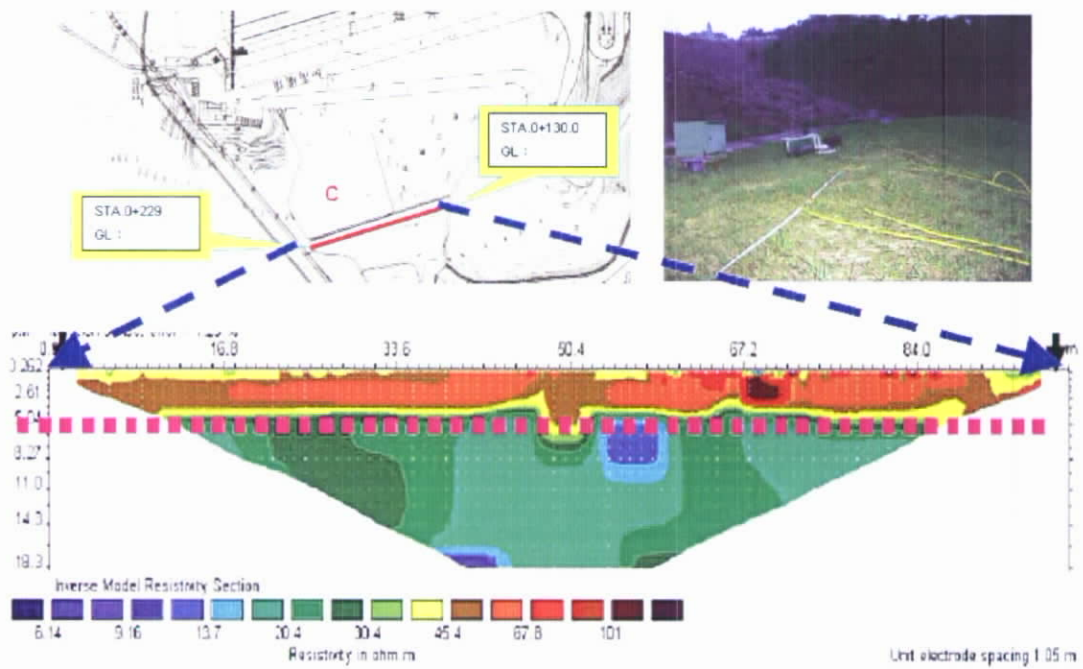


圖 6-64 新山水庫測線 C (壩基) 地電阻影像剖面-Wenner-Schlumberger



圖 6-65 新山水庫測線 D (左側山脊) 之佈線位置



圖 6-66 新山水庫測線 D (左側山脊) 之地電阻施測情形

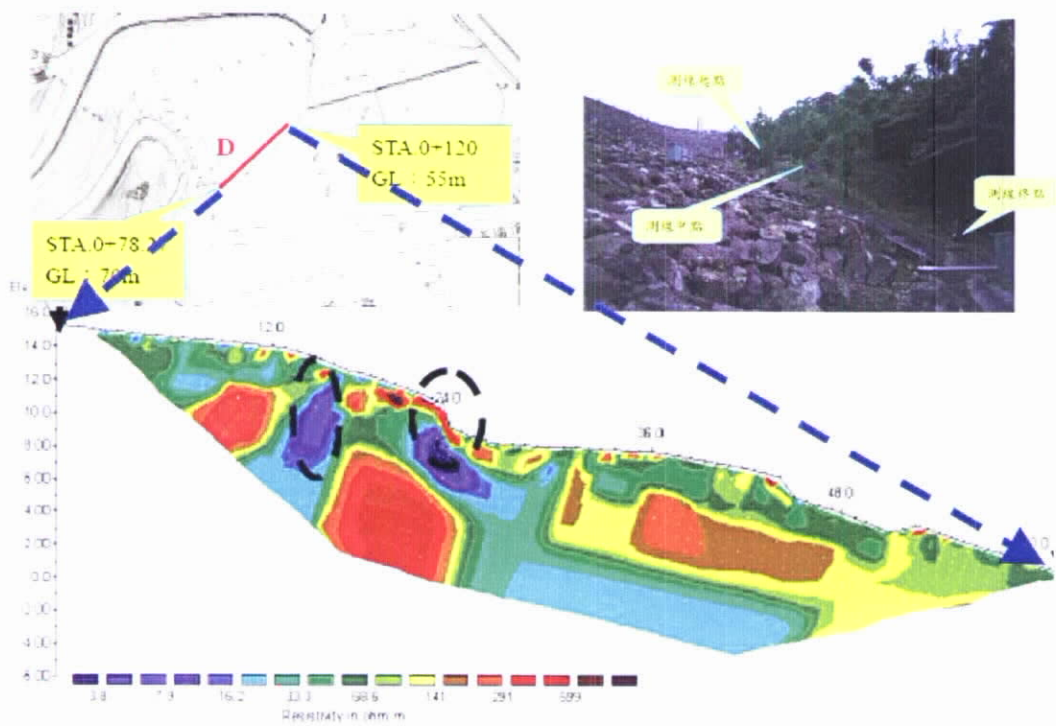


圖 6-67 新山水庫測線 D (左山脊) 地電阻影像剖面- Dipole-Dipole

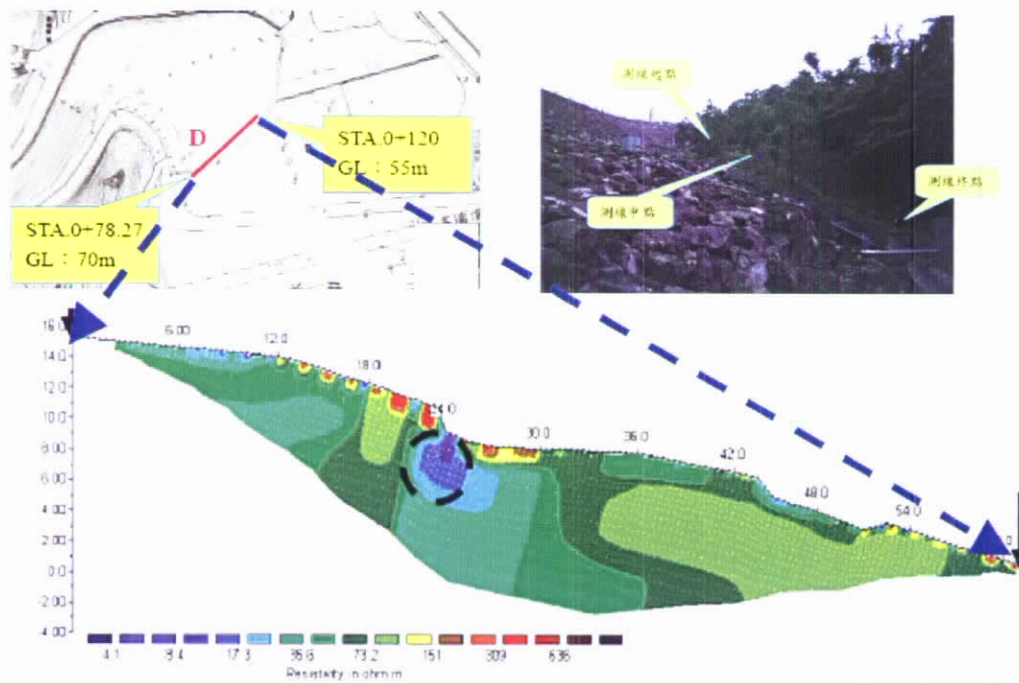


圖 6-68 新山水庫測線 D (左山脊) 地電阻影像剖面- Wenner

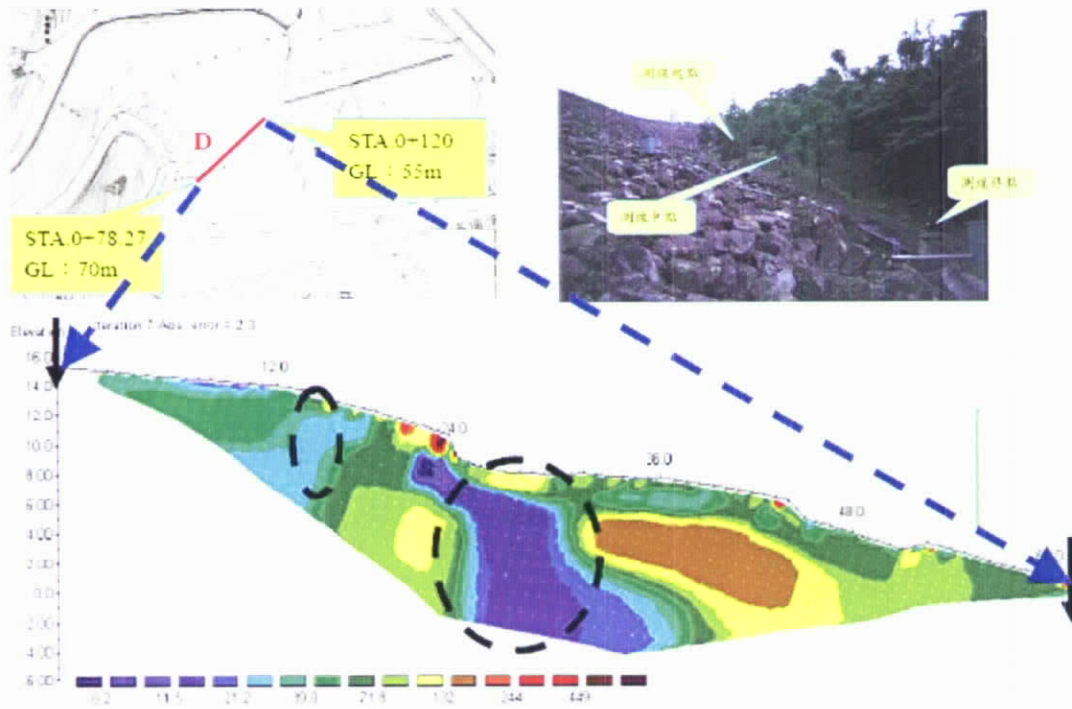


圖 6-69 新山水庫測線 D (左山脊) 地電阻影像剖面-Wenner-Schlumberger

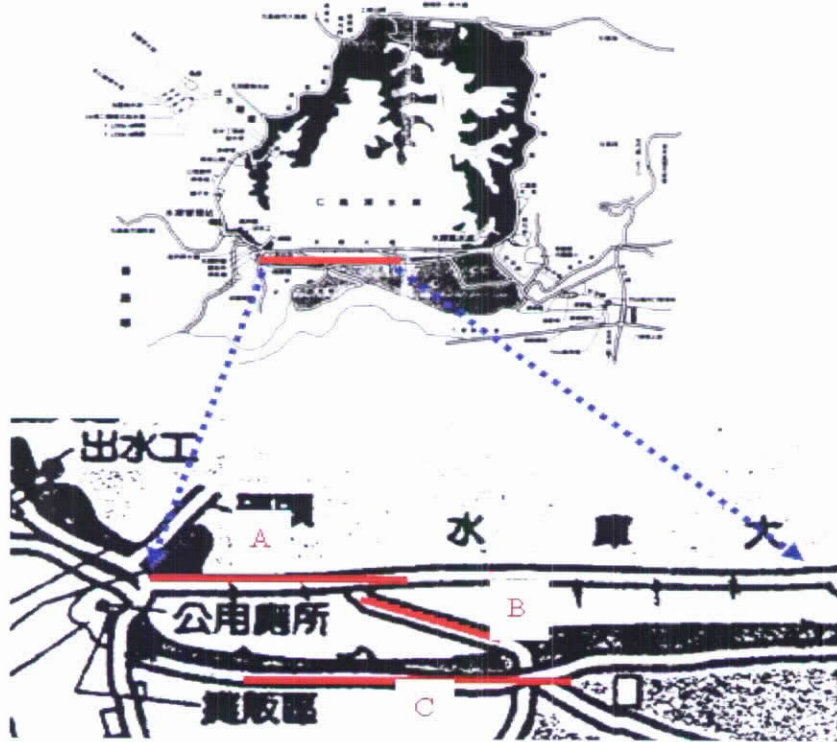


圖 6-70 仁義潭水庫測線平面配置圖

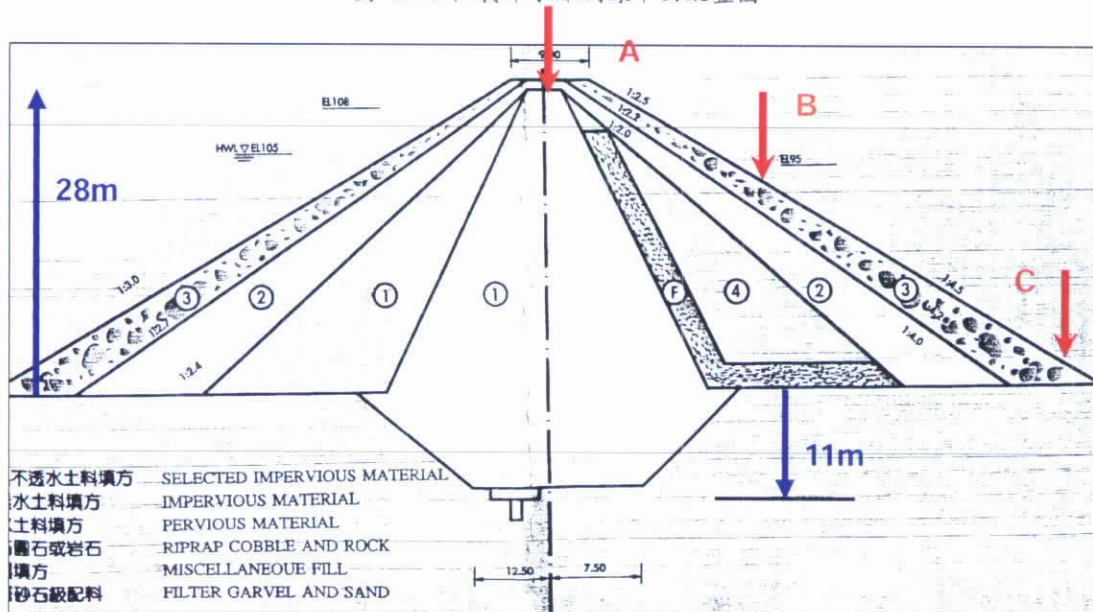


圖 6-71 仁義潭水庫大壩測線規劃立面圖



圖 6-72 仁義潭水庫右邊坡沉陷



圖 6-73 仁義潭水庫坡趾濕潤區



圖 6-74 仁義潭水庫壩頂自由落錘震源施測

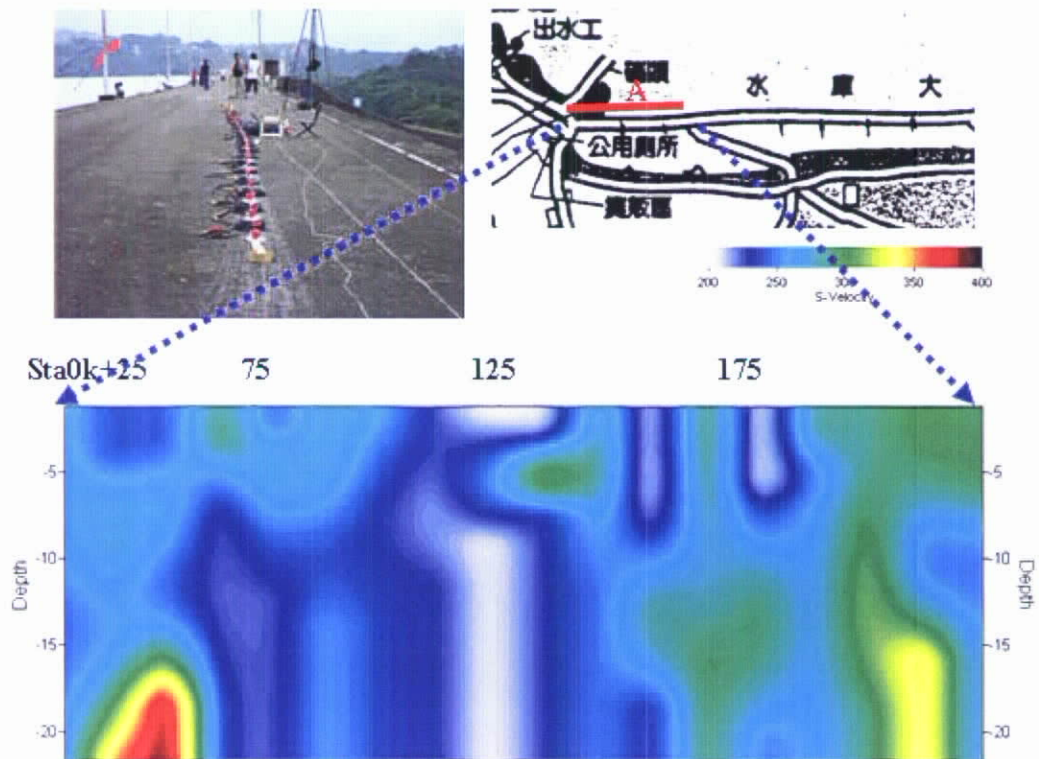


圖 6-75 仁義潭水庫壩頂(測線 A)之二維波速剖面

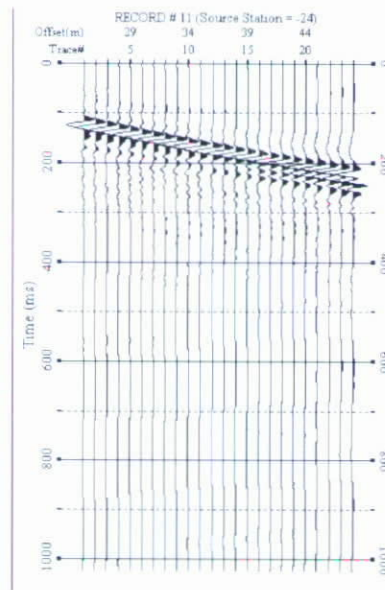


圖 6-76 仁義潭水庫壩頂(測線 A)震盪歷時

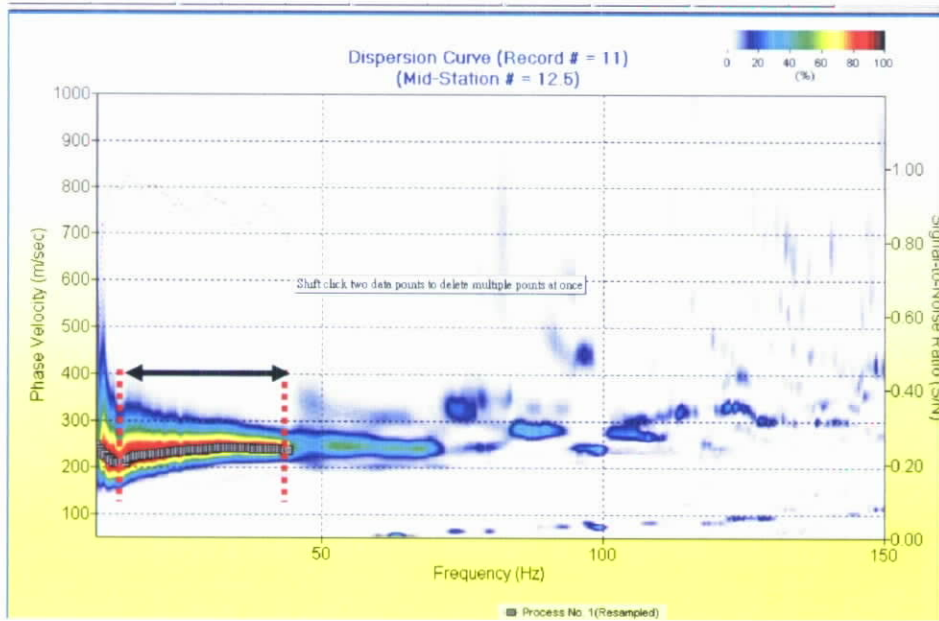


圖 6-77 仁義潭水庫壩頂(測線 A)頻散曲線

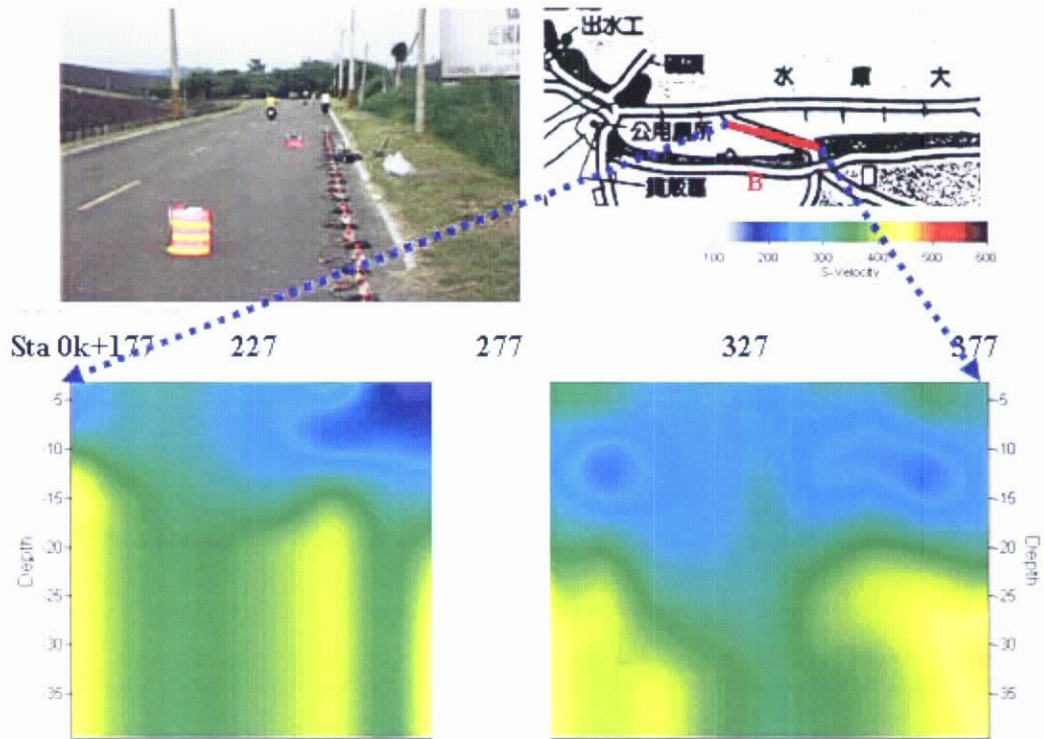


圖 6-78 仁義潭水庫殼層(測線 B)之二維波速剖面

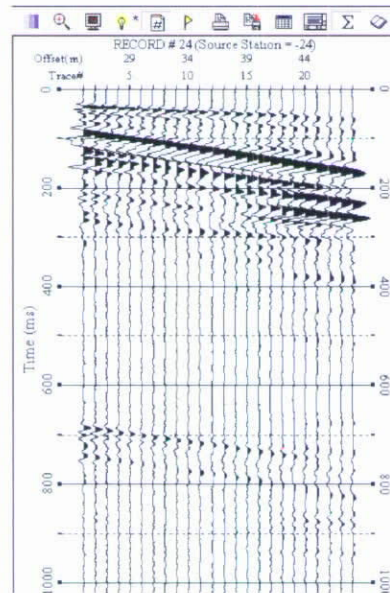


圖 6-79 仁義潭水庫殼層(測線 B)震盪歷時

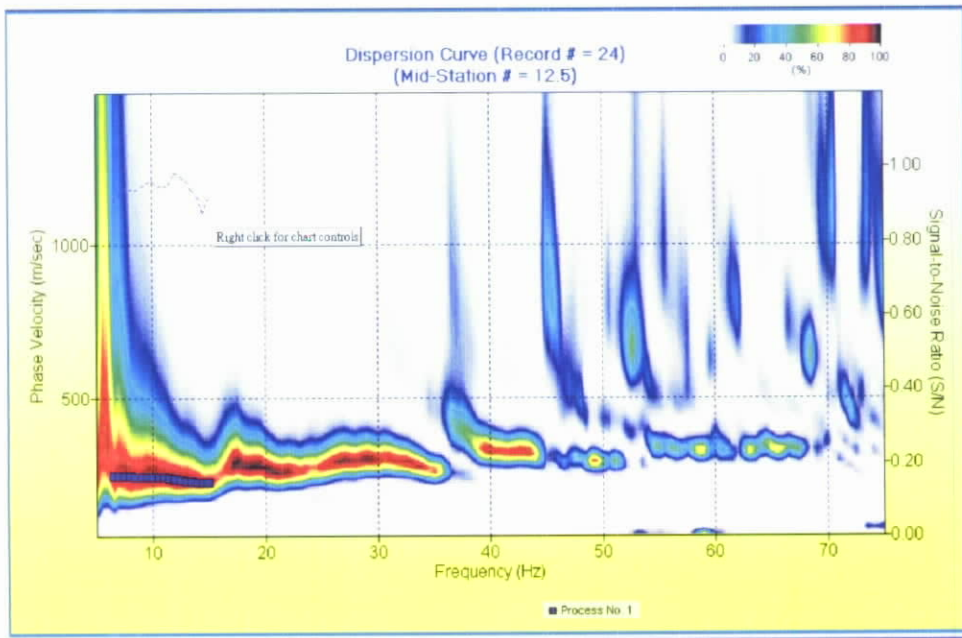


圖 6-80 仁義潭水庫殼層(測線 B)頻散曲線

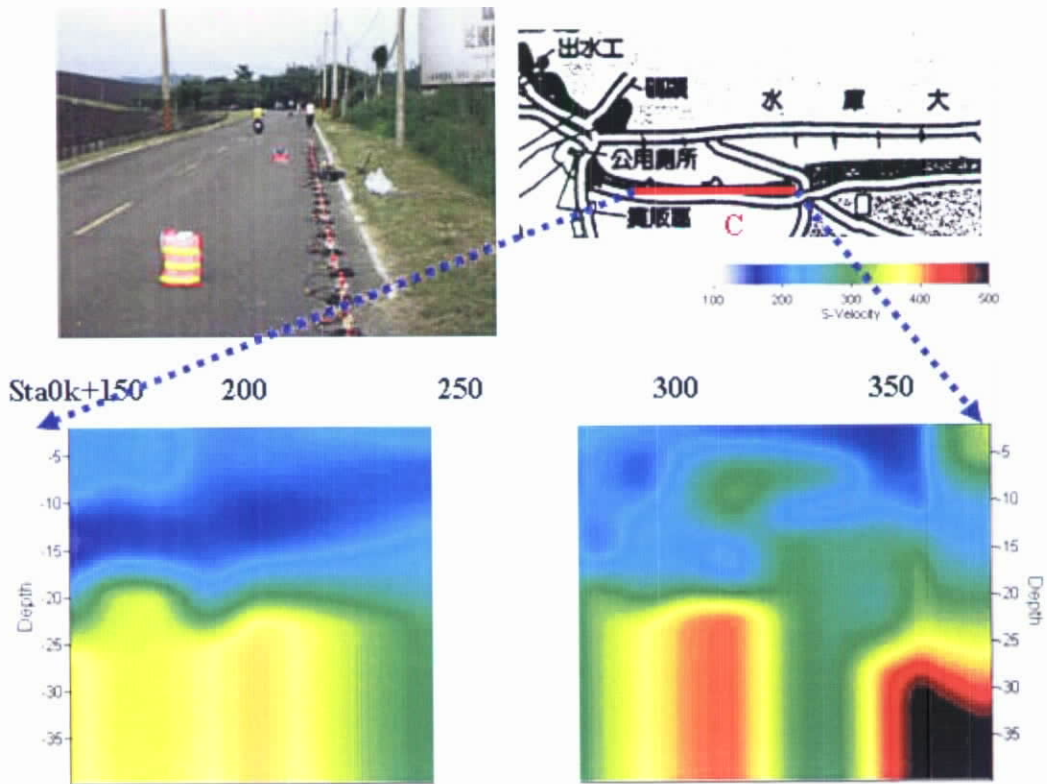


圖 6-81 仁義潭水庫壩基(測線 C)之二維波速剖面

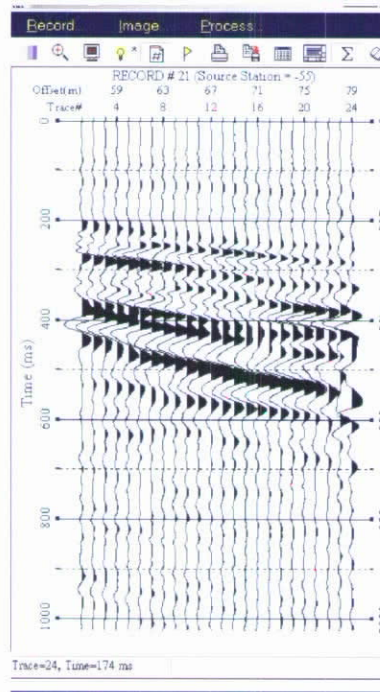


圖 6-82 仁義潭水庫壩基(測線 C)震盪歷時

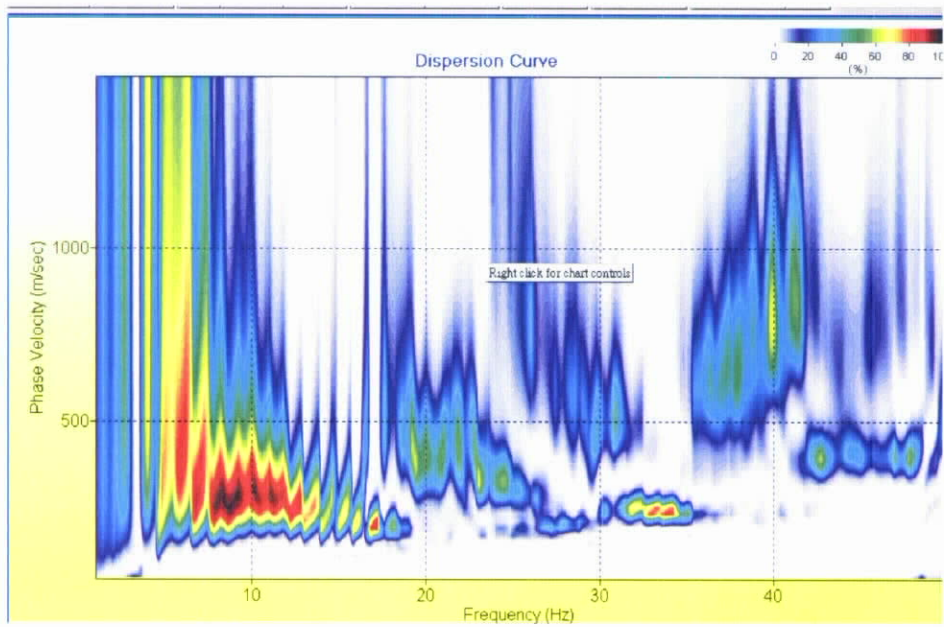


圖 6-83 仁義潭水庫壩基(測線 C)頻散曲線

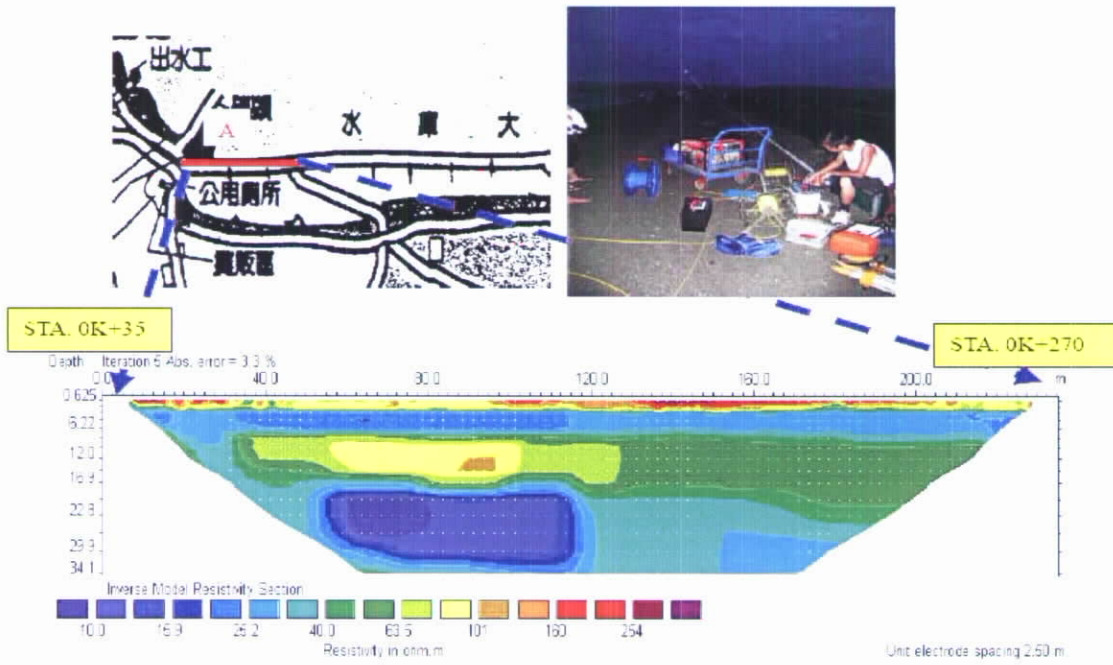


圖 6-84 仁義潭水庫測線 A (壩頂) 電探剖面圖-Dipole – Dipole

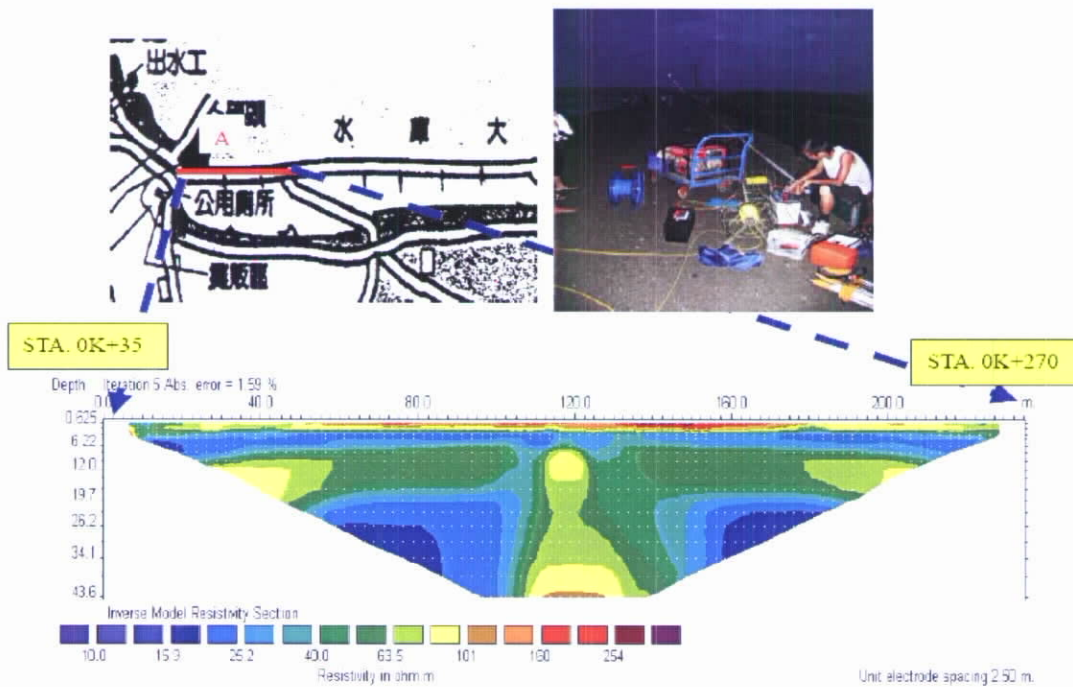


圖 6-85 仁義潭水庫測線 A (壩頂) 電探剖面圖-Wenner-Schlumberger

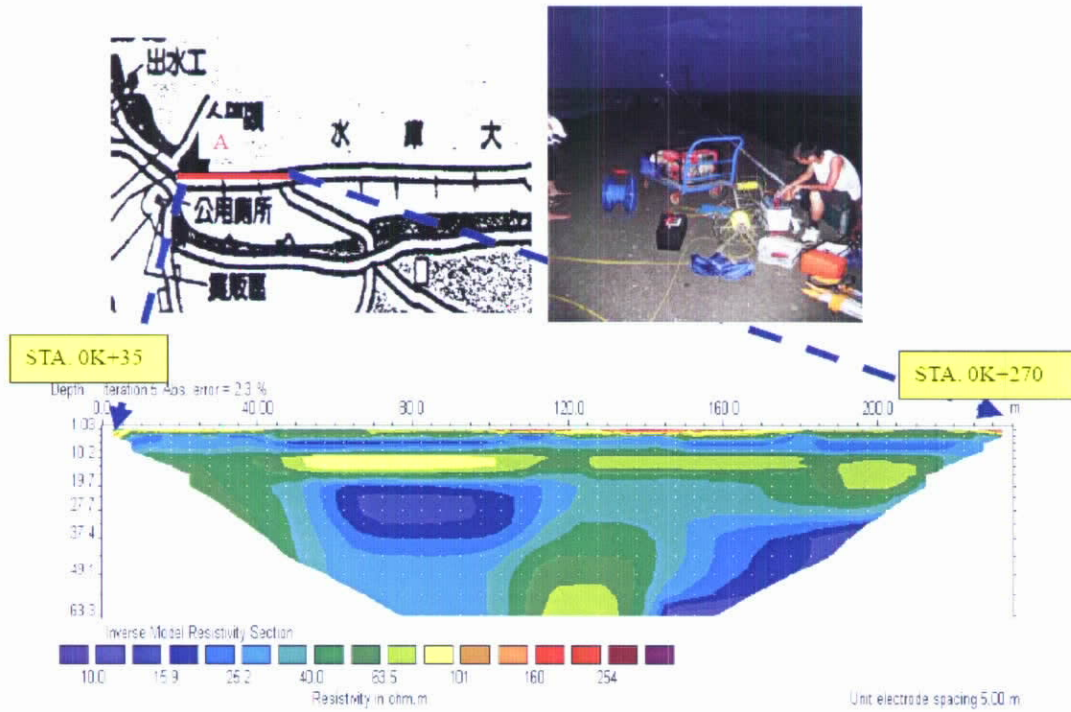


圖 6-86 仁義潭水庫測線 A (壩頂) 電探剖面圖-Pole-Dipole

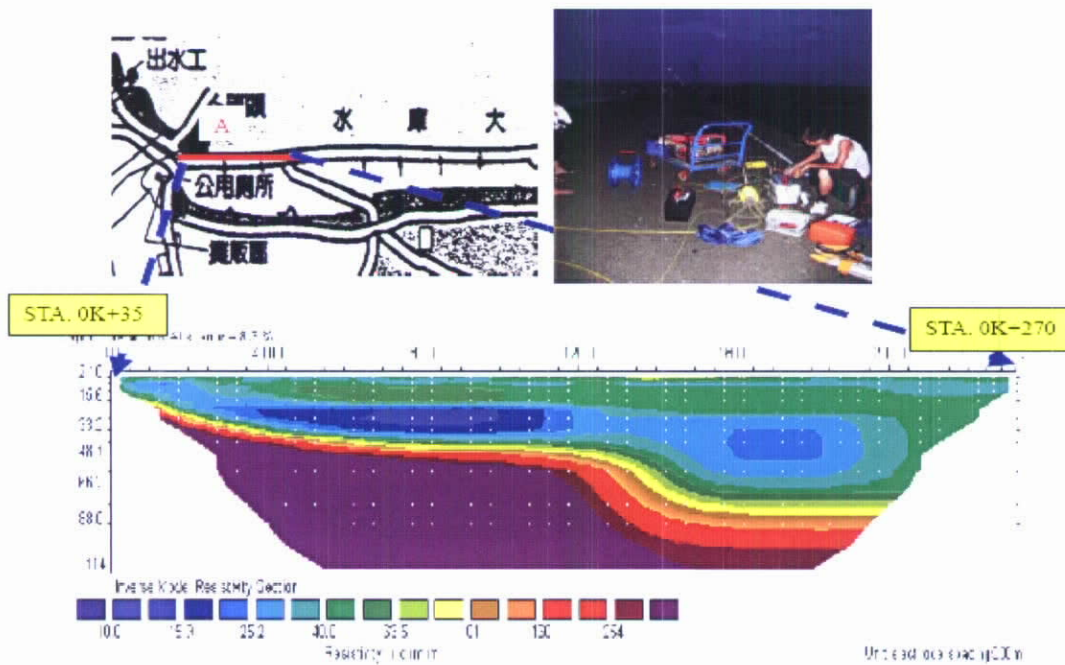


圖 6-87 仁義潭水庫測線 A (壩頂) 電探剖面圖-Pole-Pole

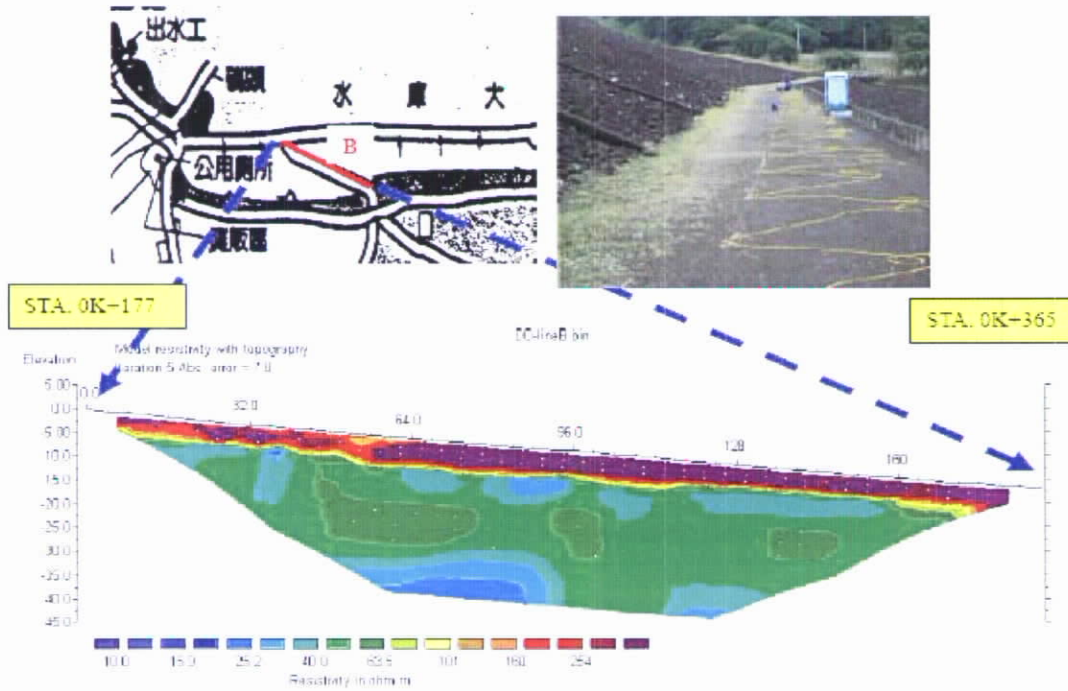


圖 6-88 仁義潭水庫測線 B (殼層) 地電阻影像剖面 Dipole - Dipole

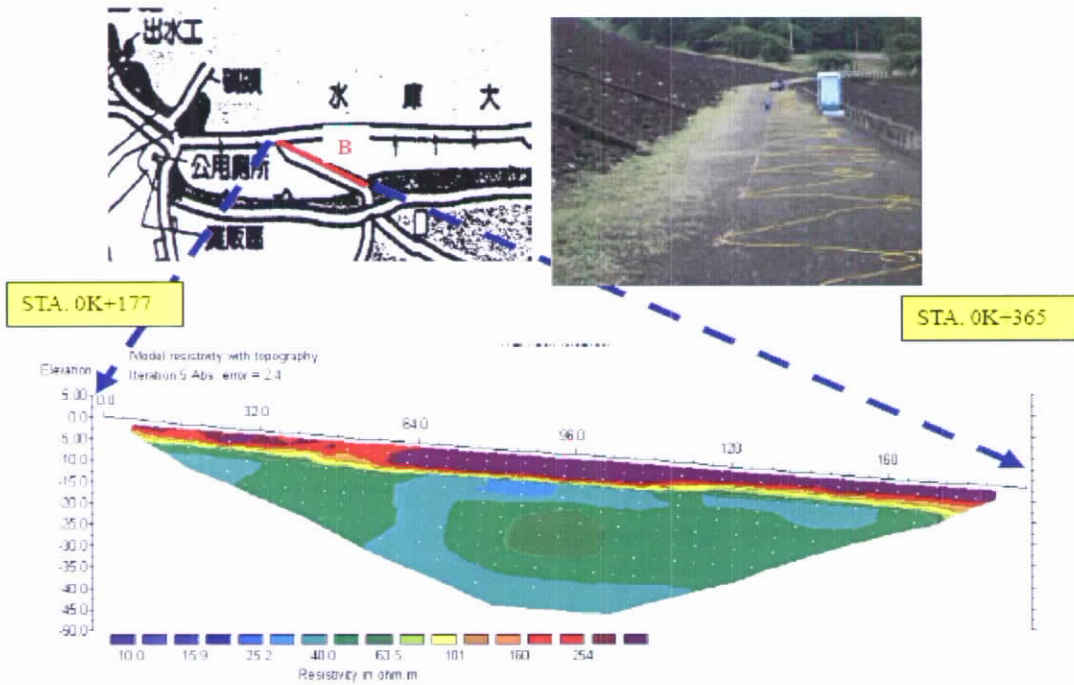


圖 6-89 仁義潭水庫測線 B (殼層) 地電阻影像剖面 Wenner-Schlumberger

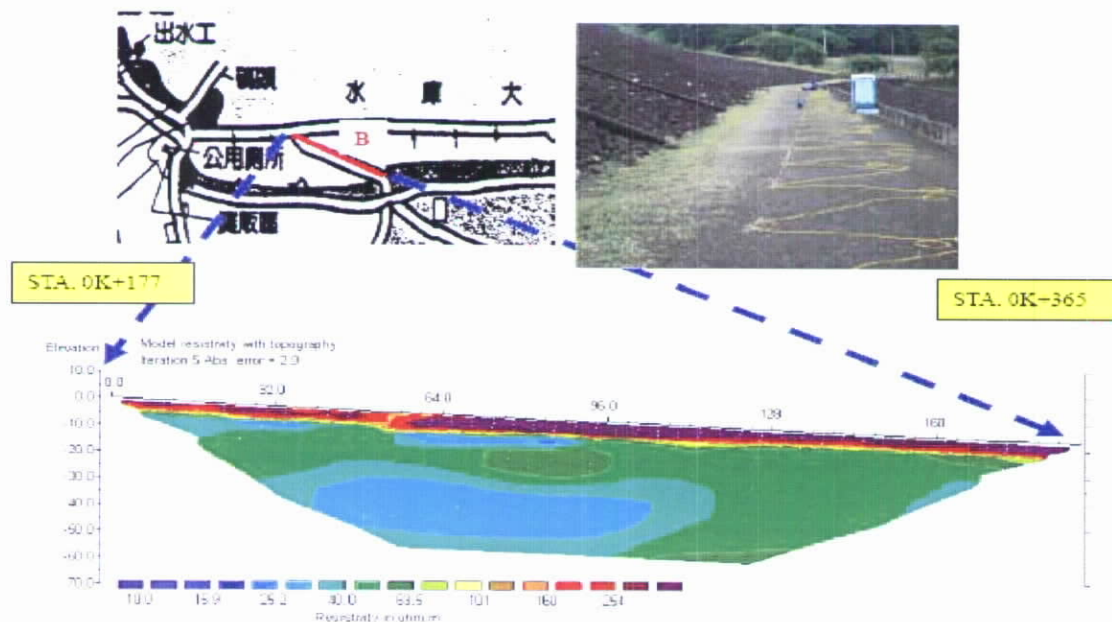


圖 6-90 仁義潭水庫測線 B (殼層) 地電阻影像剖面 Pole-Dipole

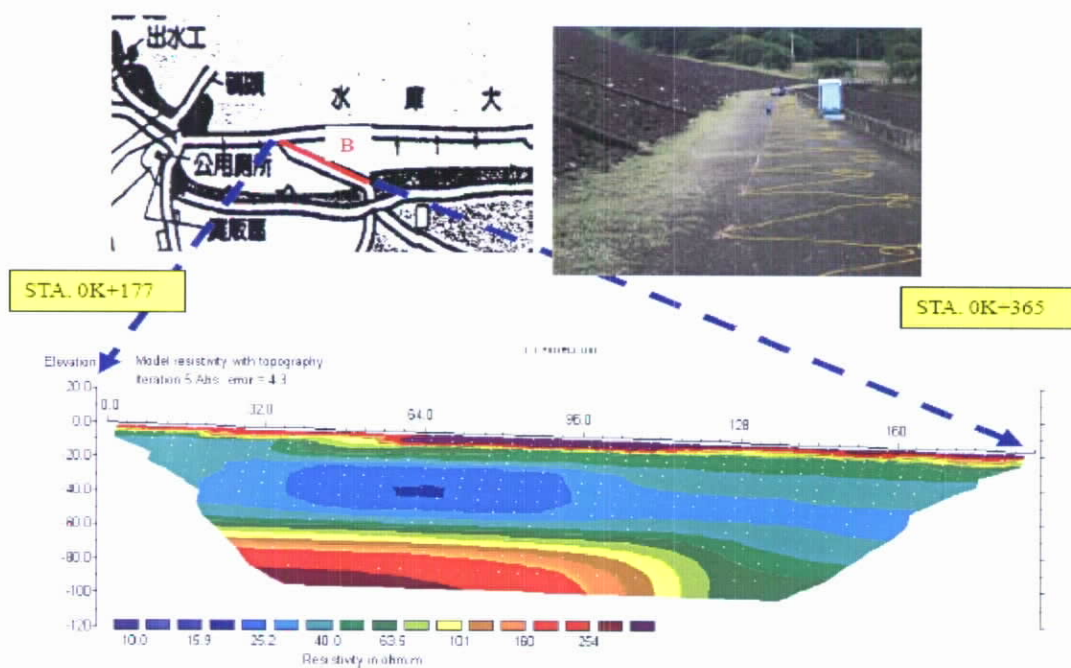


圖 6-91 仁義潭水庫測線 B (殼層) 地電阻影像剖面 Pole-Pole

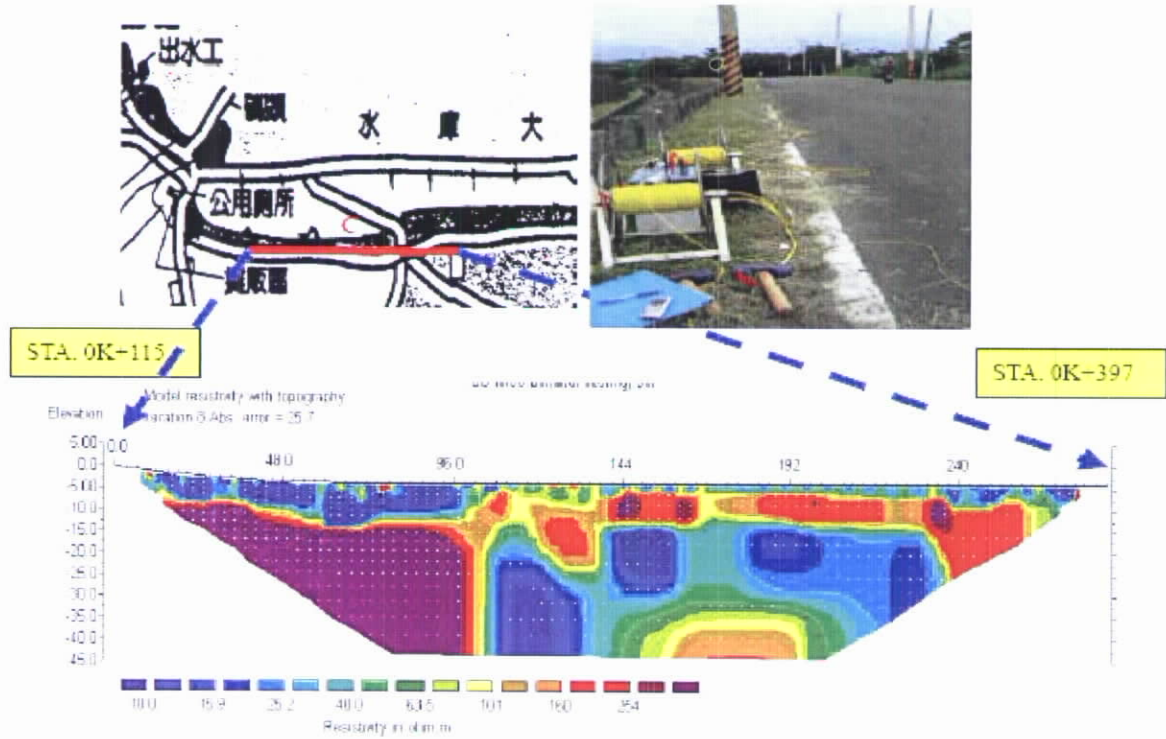


圖 6-92 仁義潭水庫測線 C (壩基) 地電阻影像剖面 Dipole - Dipole

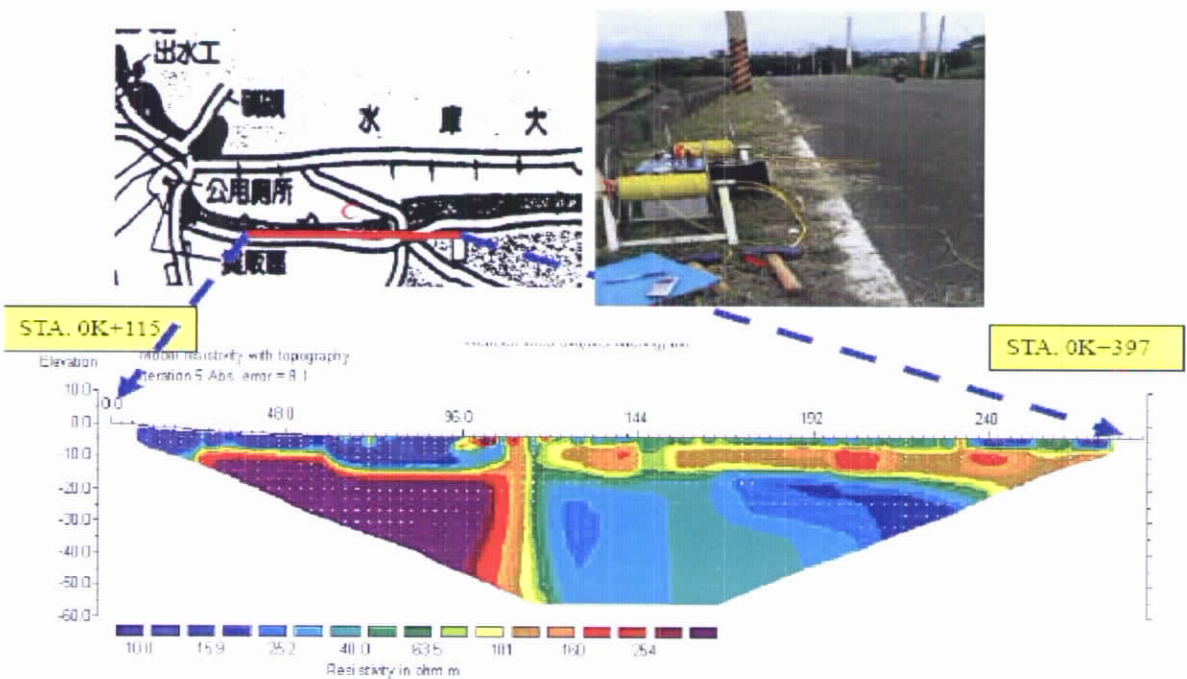


圖 6-93 仁義潭水庫測線 C (壩基) 地電阻影像剖面 Wenner-Schlumberger

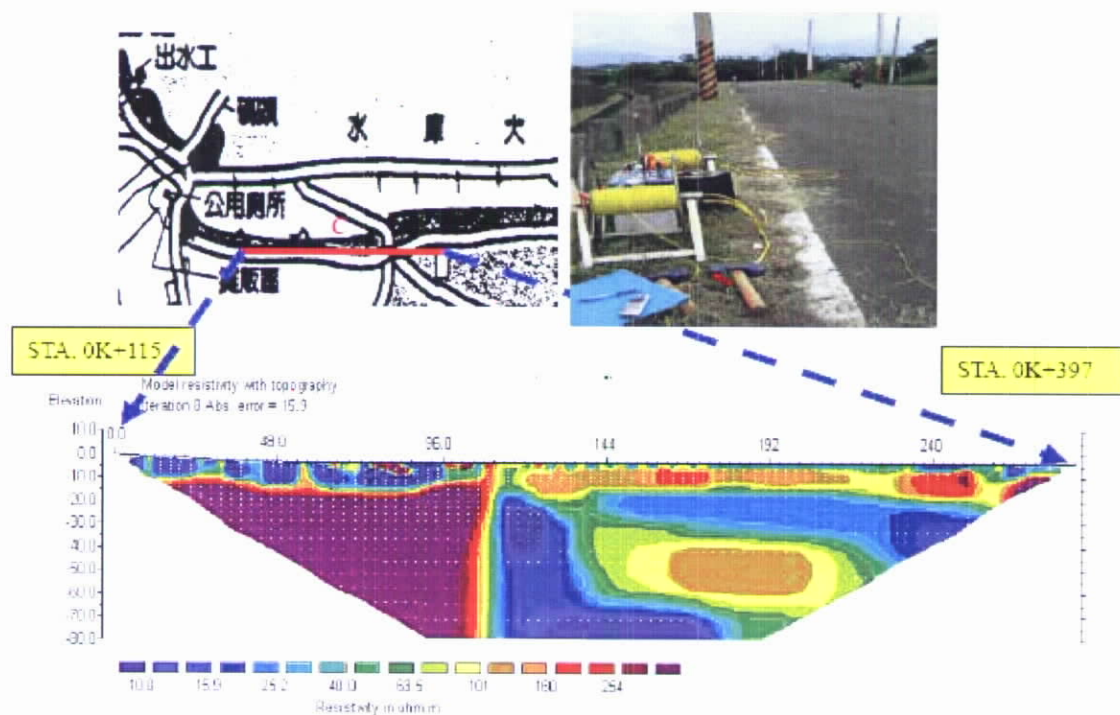


圖 6-94 仁義潭水庫測線 C (壩基) 地電阻影像剖面 Pole-Dipole

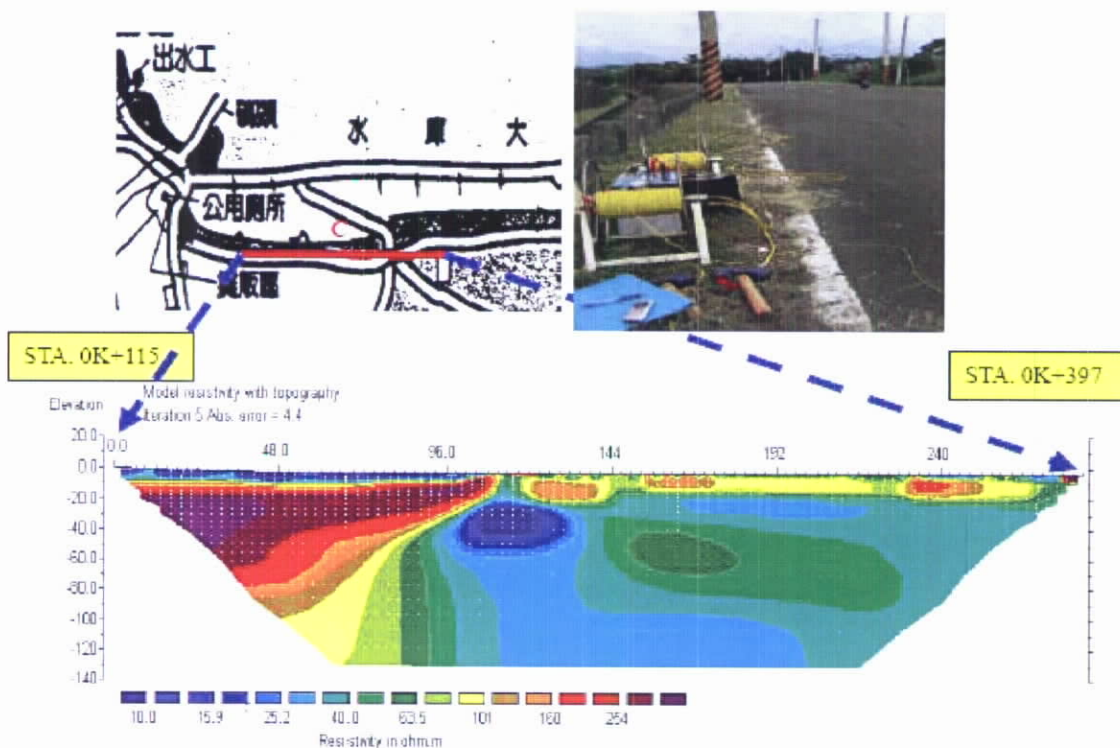


圖 6-95 仁義潭水庫測線 C (壩基) 地電阻影像剖面 Pole-Pole

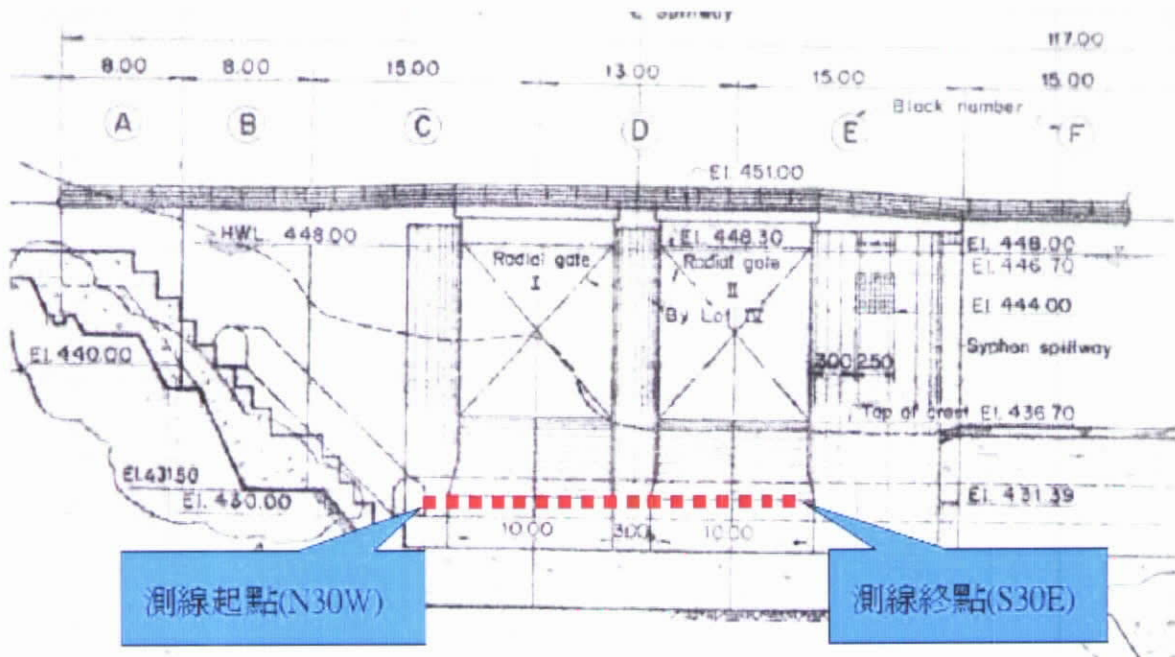


圖 6-96 大觀電廠廊道折射震測測線佈置示意圖

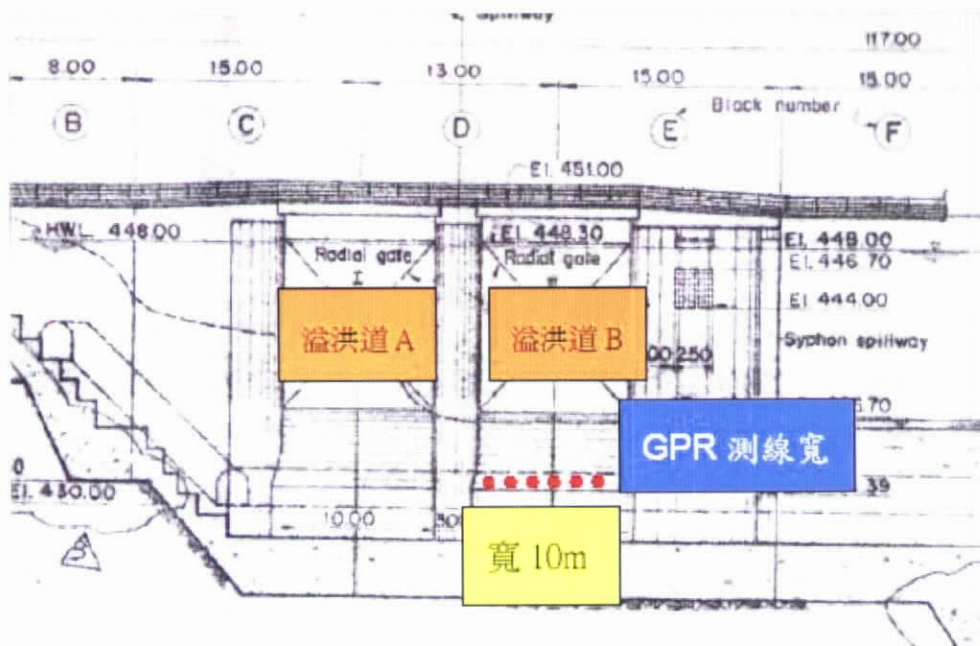


圖 6-97 大觀電廠溢洪道立面圖

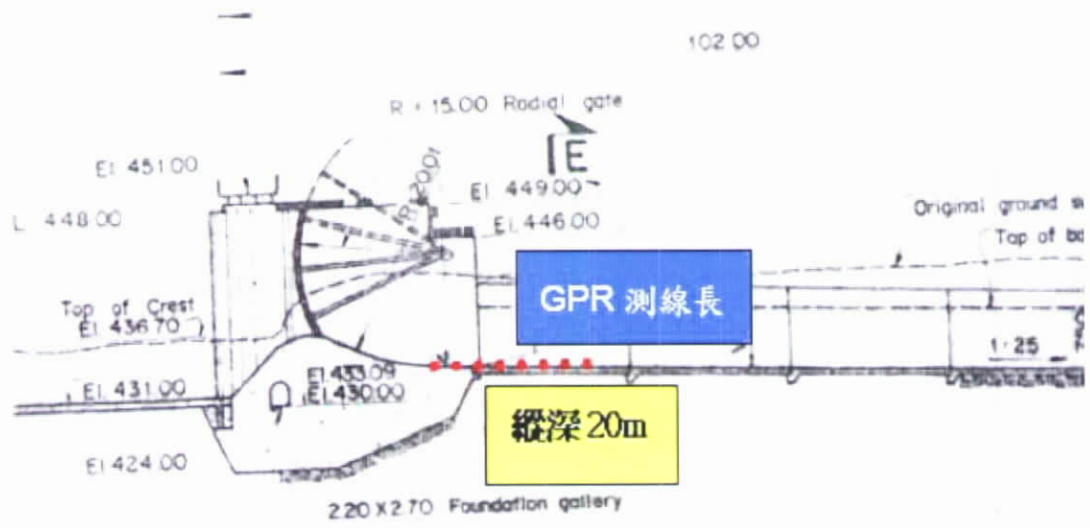


圖 6-98 大觀電廠溢洪道剖面圖

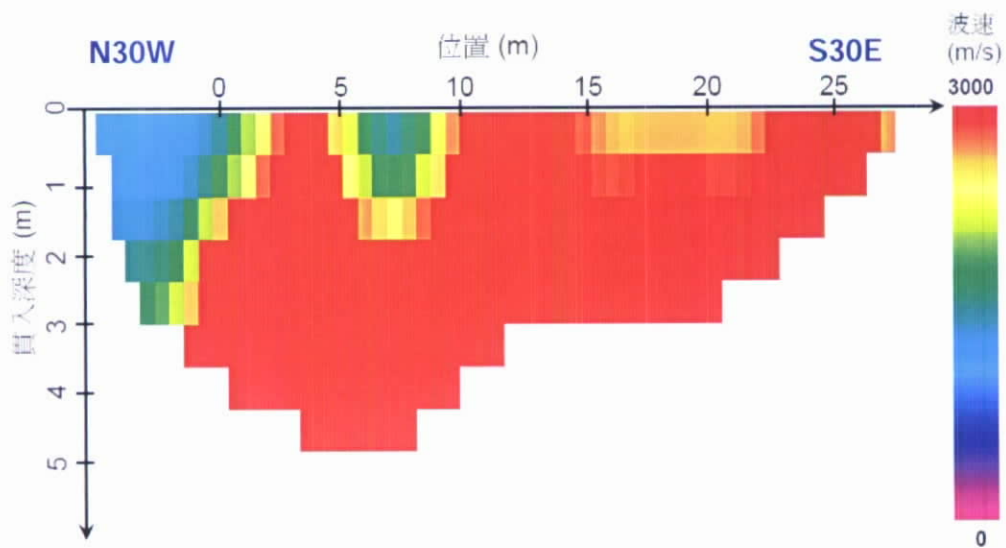


圖 6-99 大觀電廠廊道折射震測 P 波波速剖面

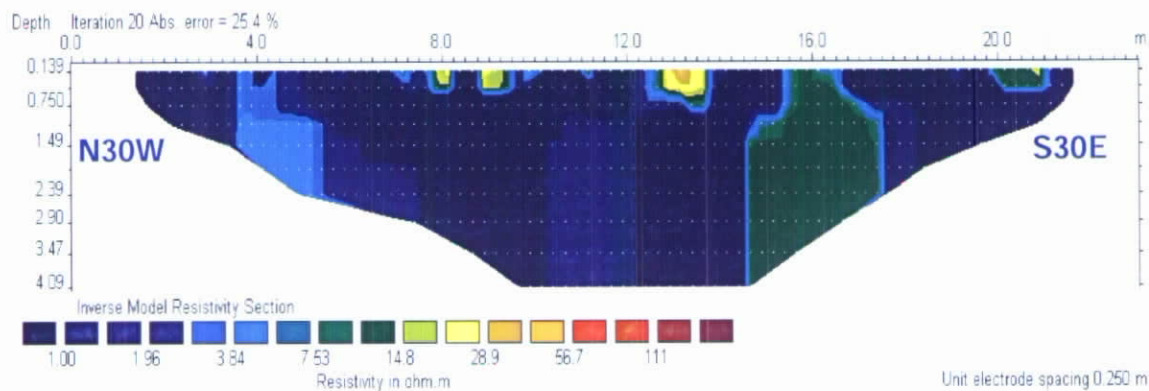


圖 6-100 大觀電廠廊道側壁電探剖面圖-Dipole-Dipole

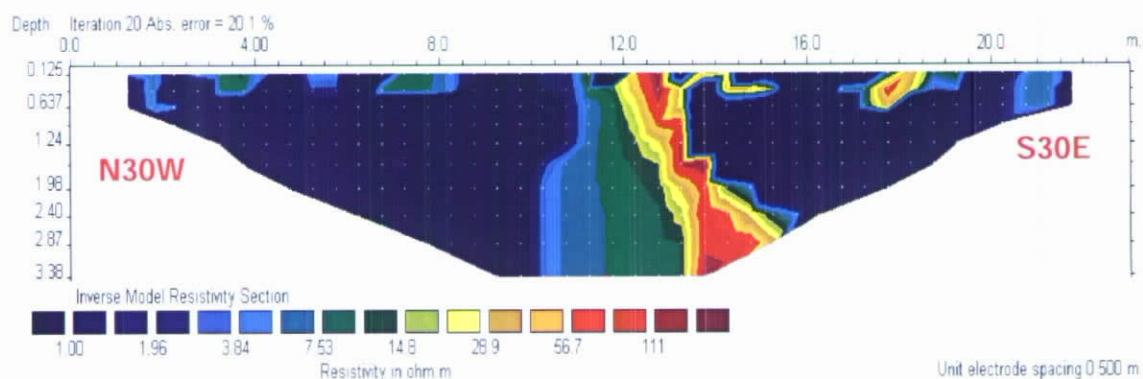


圖 6-101 大觀電廠廊道側壁電探剖面圖-Wenner

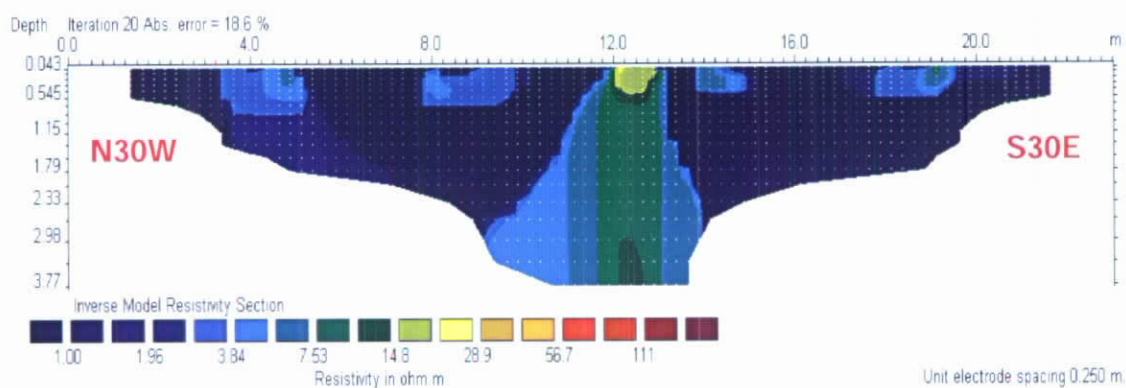


圖 6-102 大觀電廠廊道側壁電探剖面圖-Wenner-Schlumberger

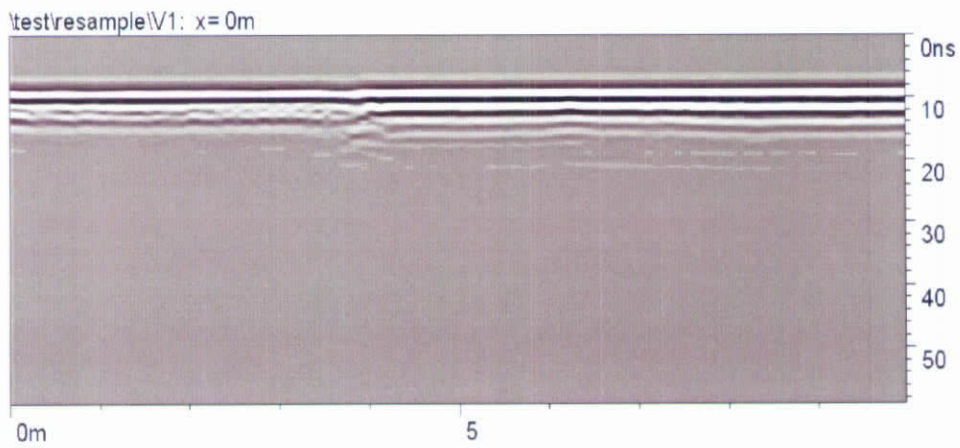


圖 6-103 大觀電廠溢洪道 GPR 測線量測原始影像

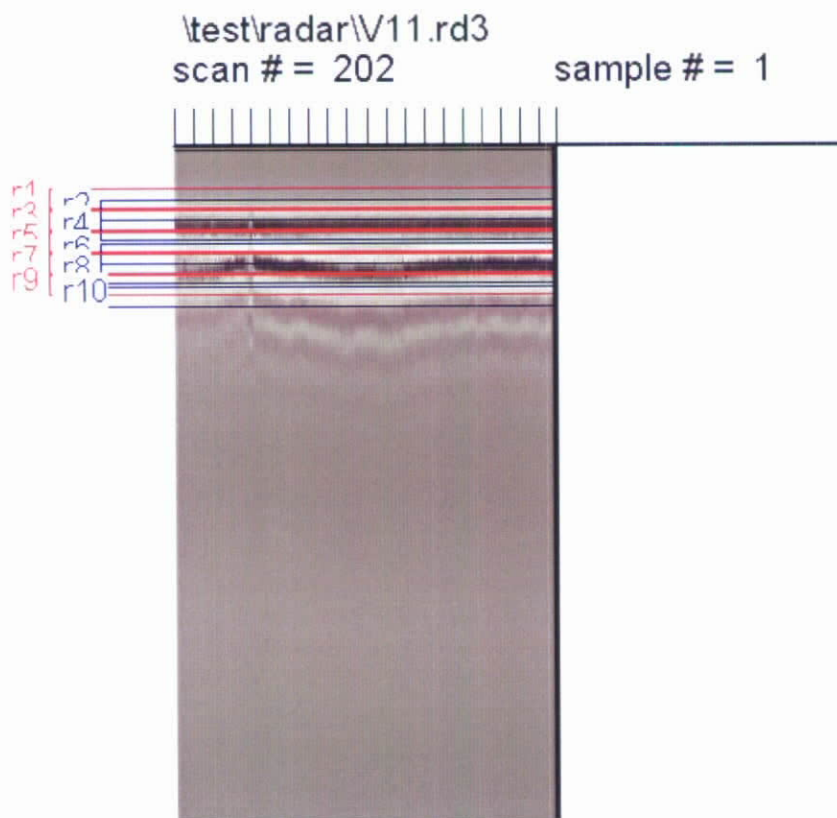


圖 6-104 大觀電廠溢洪道 V11 測線時間剖面之選取畫面



Daikuang_powerstation

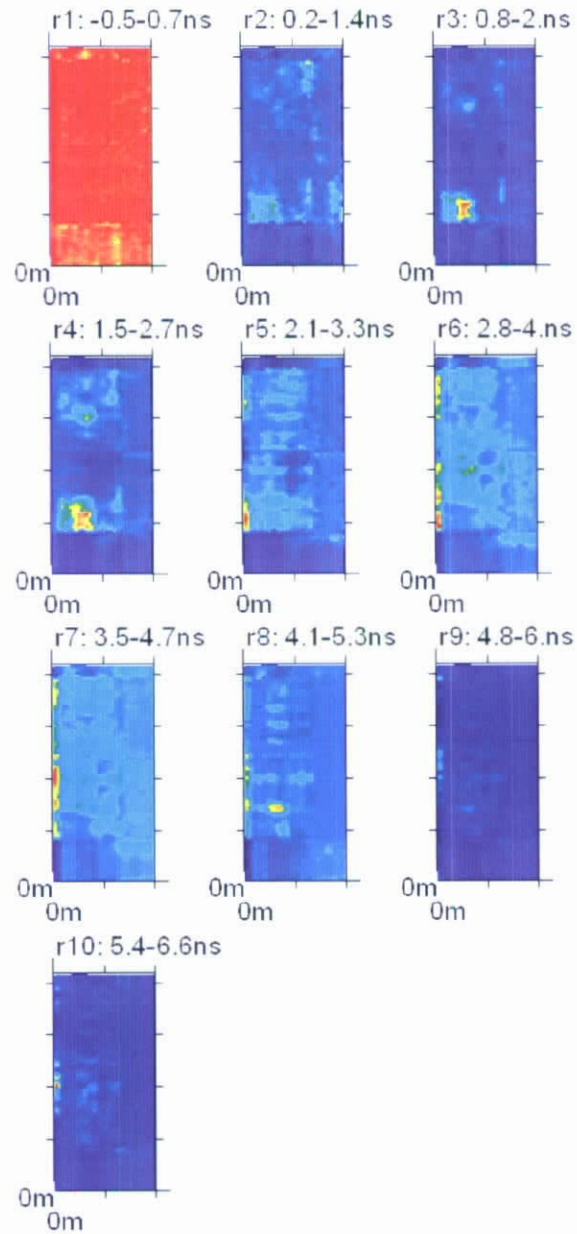


圖 6-105 大觀電廠溢洪道 GPR 量測資料之時間剖面影像



Time Slice Demo

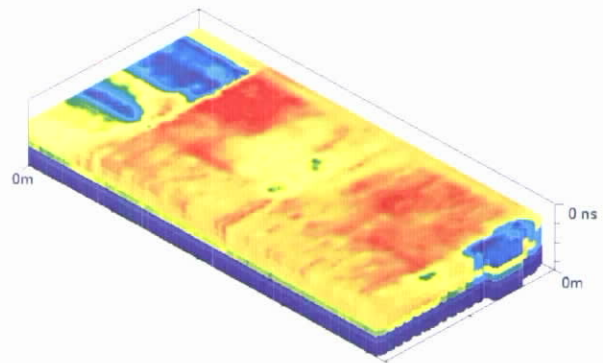


圖 6-106 大觀電廠溢洪道 GPR 量測資料之時間剖面 3D 影像



圖 6-107 於新山水庫固定於測線 B (殼層) 監測用之電極棒

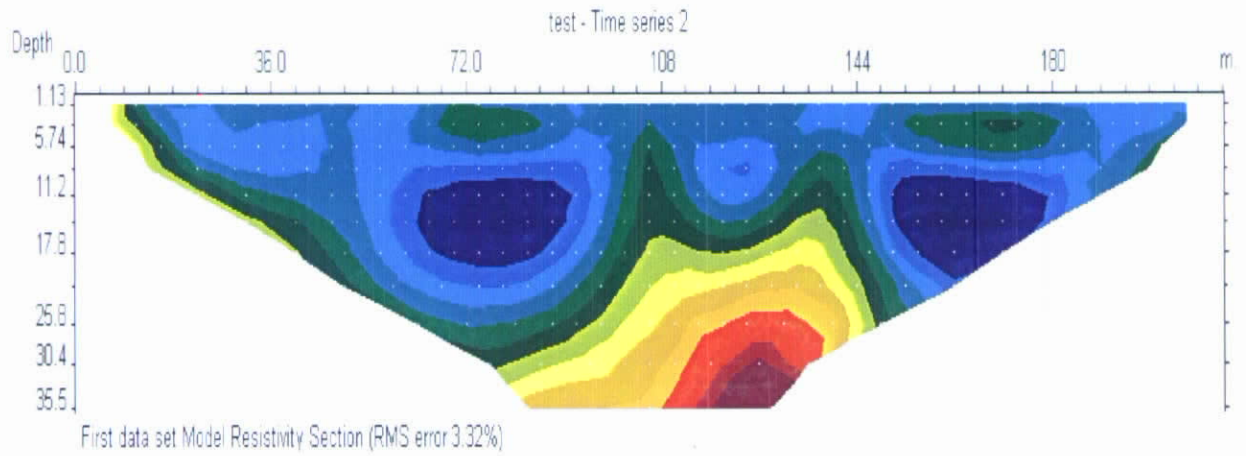


圖 6-108 新山水庫測線 B (殼層) 7/25 量測結果

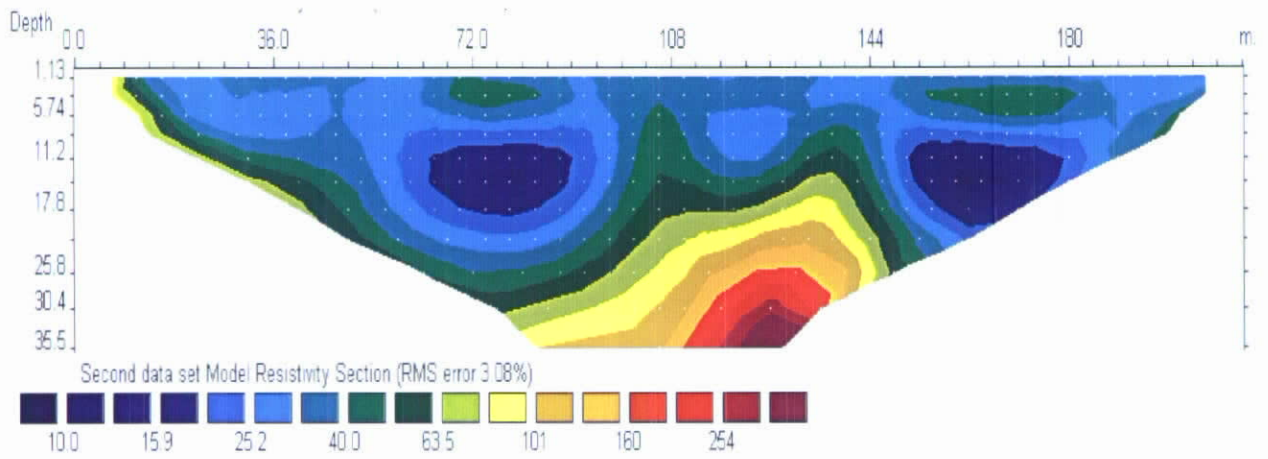


圖 6-109 新山水庫測線 B (殼層) 9/8 量測結果

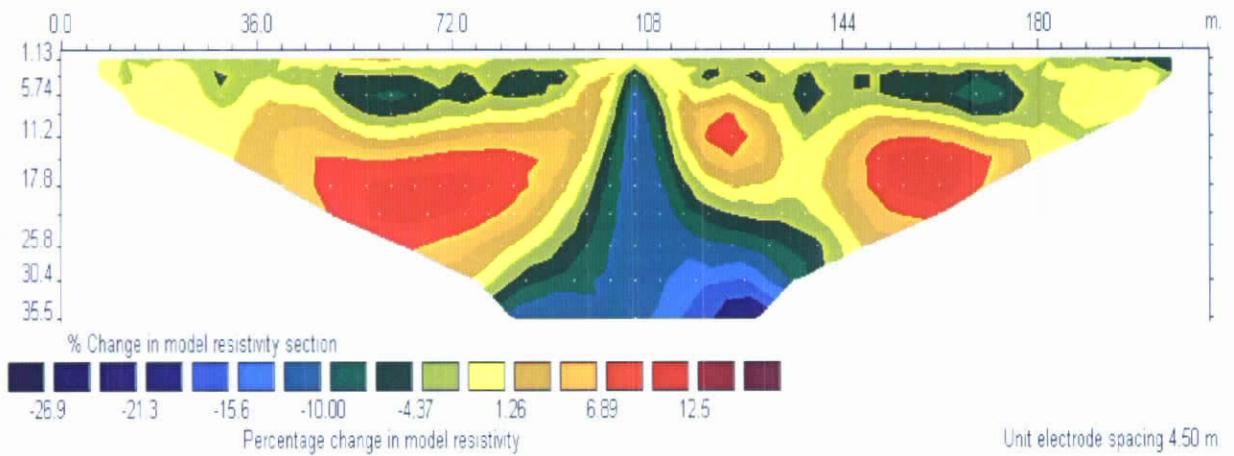


圖 6-110 新山水庫測線 B (殼層) 7/25 及 9/8 兩次比較之差異百分比

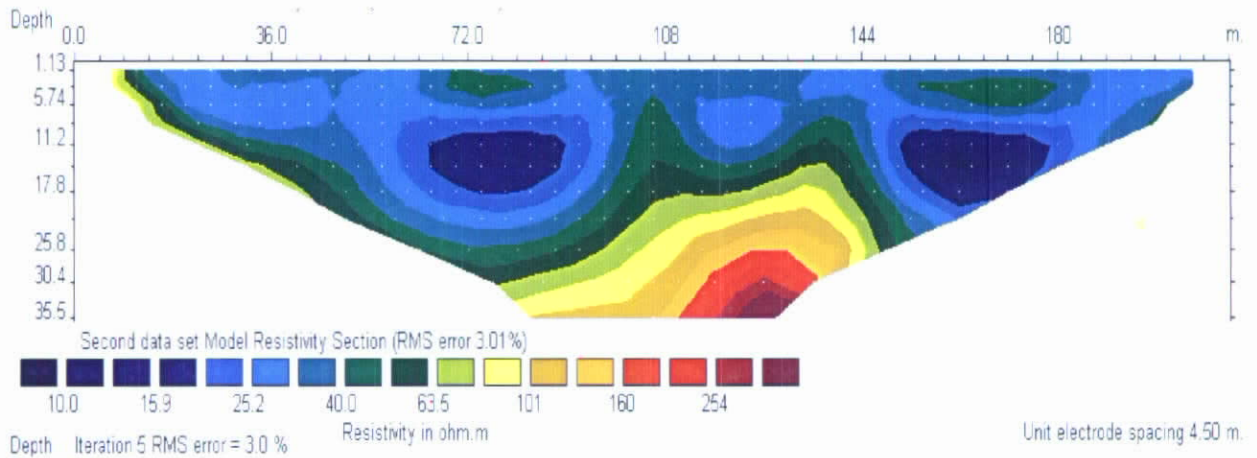


圖 6-111 新山水庫測線 B (殼層) 10/3 量測結果

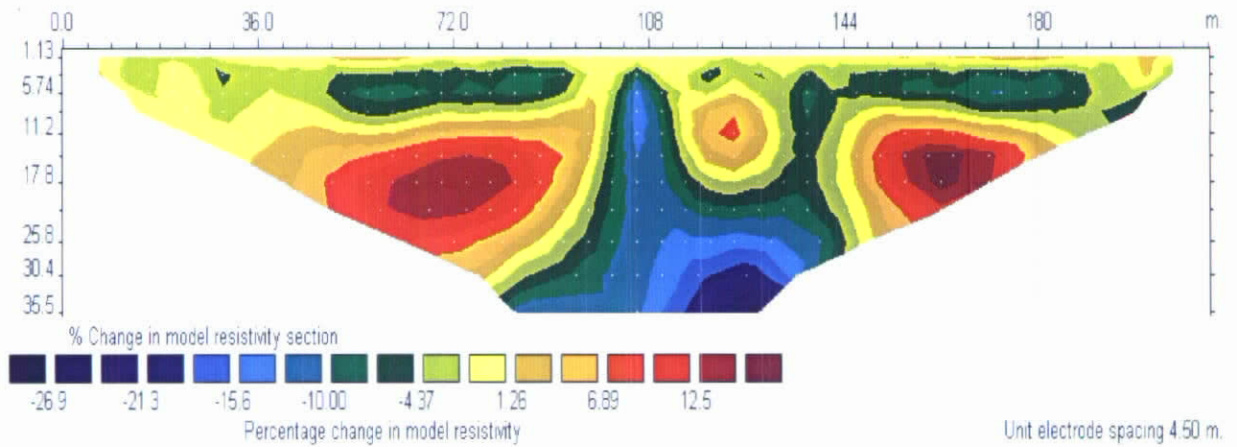


圖 6-112 新山水庫測線 B (殼層) 7/25 及 10/3 兩次比較之差異百分比

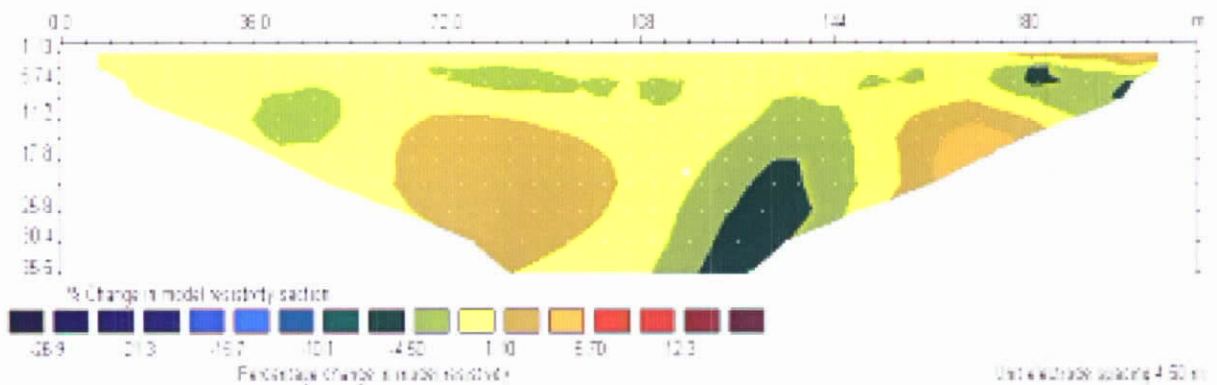


圖 6-113 新山水庫測線 B (殼層) 9/8 及 10/3 兩次比較之差異百分比

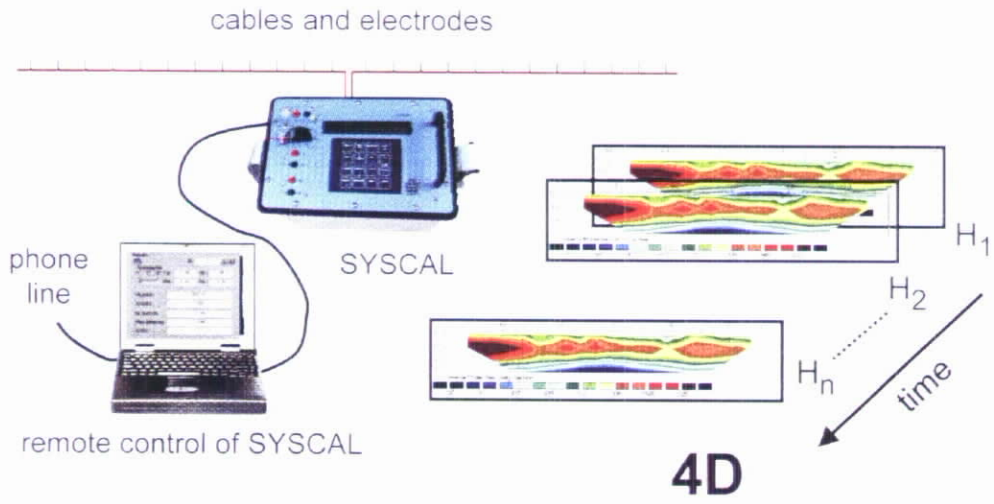


圖 6-114 地電阻自動化監測示意圖



7. 研擬監測與檢測改善方案及未來研究規劃

水庫從規劃建造到營運過程中充滿潛在之不確定因素。為降低無法預期的災害造成損失，提供正確資訊使反應時間延長為水庫監測計劃的首要目標。

國內目前水庫監測系統規劃缺乏風險管理系統性概念，導致儀器設置無法針對水庫潛在破壞模式分析作出整體性回饋；由於人員配置不足及先前並未完整針對各項監測儀器適用性進行評估而導致監測儀器損壞或不正常運作之比例偏高；於監測資料收集及分析處理上亦未有標準作業程序，且在監測值管理上尚未能依各時期現地狀況不同重新進行分析檢討。整體而言，國內現有水庫安全評估之監測系統管理與維護並未有一系統性有效管理。

另一可慮現象是國內規模較小蓄水庫因資源短少，監測計劃規劃規模嚴重不足，水庫防災機制無法保障社會大眾生命財產安全。且依據 1995 年國際大壩委員會 (ICOLD) 第 99 號公報指出大部份破壞水壩屬壩高小於 30m 之小壩；而大型水庫安全監測系統其主要設置目的多為整體性長期觀測均勻佈設監測，設置原則仍未能清楚點明其相對應疑慮問題及對其合宜性進行評估。

經由分析釐清水庫潛在破壞模式過程中的各項工作，水庫管理者可以了解最有可能發生潛在破壞模式及最正確的防災措施與時機。且分析成果並著重建立能與潛在破壞模式相互配合之安全監測計畫。

現今國內使用非破壞性檢測部分風氣不盛，且多數管理單位因背景知識缺乏而對檢測結果缺乏信心，導致未能充分利用非破壞性檢測技術。依本計劃進行之問卷結果顯示，使用非破壞性檢測的水庫仍屬少數，使用目的多為結構物完整性檢測而忽略檢測方法提供之某些檢測量能直接具備工程性質則可作為壩體再次分析之準備資料。

針對上述所提問題，規劃未來改善水庫安全監測與檢測之相關研究計畫如下：

7.1. 蓄水庫監、檢測技術手冊編訂、案例研究與教育訓練

研究重點之一為水庫監測作業手冊研擬。監測手冊建立方向應以作業標準化為導向。水庫管理者可依其特定潛在破壞模式，參照監測手冊所擬與該特定破壞模式相關之



標準化監測作業，據此規劃建立該水庫安全監測計畫。故因應各種潛在破壞模式及其相對可能異常之監測物理量，水庫監測作業手冊提出對應使用之監測儀器種類、現場佈設原則、監測頻率及管理值訂定原則、監測作業品質保證程序及監測資料分析原則。此外，亦須對各種監測環境適用之感測器提出建議。

研究重點之二為水庫檢測作業手冊研擬。檢測手冊建立方向亦以作業標準化及情境推演為導向。當水庫管理者發現特定潛在破壞模式之某些特定徵兆時，參照檢測手冊即可選定檢驗方法進行檢測以利安全評估。故檢測手冊之研擬訂定應因應各種潛在破壞模式及其異常現象之各種情境推演，並提出適用方法、施測方法、施測區域及檢測量應用等相關建議。

在教育訓練方面可分為舉辦講習會與研討會及示範計畫，藉由教育訓練以提高管理人員之專業學養，促進國內、外技術交流。講習會主要在宣導蓄水庫監、檢測手冊，並提供相關專業訓練；示範計畫可由水庫管理單位提出需求，成立監測改善或非破壞性檢測示範計畫，透過實際案例一方面進行改善作業，另一方面可提高教育訓練之成效。

7.2. 蓄水庫壩體安全診斷工具與技術研發

蓄水庫檢測與診斷工作對蓄水庫安全評估具有高度重要性，近年多種非破壞檢測現地試驗技術日新月異、電腦輔助分析技術長遠進步、以及資料分析技術之演進方法，對蓄水庫安全評估皆可扮演相當功能性強大並具客觀性與實用性之價值與角色。如何善用這些新技術以提昇未來國內蓄水庫安全評估之技術水準，實為十分有必要推動之科研任務。本計畫在水庫安全監測與非破壞性檢測之探討業已獲得相當之成果與經驗，宜進一步推動發展蓄水庫壩體安全診斷工具與技術，以期對蓄水庫安全評估能有實質貢獻。

研究重點之一為壩體非破壞性檢測技術之改良。在電探方面，可進行地電阻影像探測在滲漏檢測之模擬與現地測試，持續混凝土表面電極之研發與電探在混凝土壩之應用研究；另外針對本計劃之監測化初步探討，下一階段應進一步研究測線佈設原則、監測頻率、資料分析方法及其與庫區影響因素間互制關係。在震測方面，研究改善震測法在壩體應用可能遭遇之困難，改進震測影像探測之資料分析與解析度評估；另一方面探討系統識別方法應用於混凝土壩結構安全評估的可行性與執行方案，先由強震紀錄之頻譜



分析探討混凝土壩結構振動訊號的頻率內涵分佈、建立混凝土壩結構之系統識別理論分析模型，再藉數值分析探討混凝土壩結構之振動頻率及其振動模態特徵，分析混凝土壩結構於地震前後頻率變化以推測壩體損傷可能與程度。在透地雷達方面，可進一步研究三維透地雷達施測方法與資料詮釋技術。

研究重點之二為先進被動式監測技術之研發。有鑑於自動化電子儀器容易損壞，前期曾辦理「光纖監測系統在水工結構物中之應用」，本研究認為有必要持續推動光纖及電磁波 TDR 被動式監測技術，包括研製光纖感測水壓計及傾斜感測器、TDR 錯動變形監測技術改良與量化分析研究、變形-水位-滲漏量多功能自動化 TDR 監測系統及監測資料擷取系統整合。

研究重點之三為異常現象辨識系統。水庫庫區龐大且結構複雜，在多種破壞模式交互影響下，即使特徵異常現象發生亦可能發生人為無法判別進行中的各種破壞模式。透過建立可供比對異常現象之經驗知識庫，進而可於未來針對特徵異常現象發生組合進行破壞模式辨識。該研究可先探討壩體內出現問題分類、典型病徵、與監測結果出現特徵，再進行壩體內出現不同問題下壩體行為之數值模擬，最後期能建立土石壩壩體安全診斷之專家系統。





8. 參考文獻

1. Alexandros S. Savvaïdis . Gregory N. Tsokas . George Vargemezis and George Dimopoulos. Geophysical prospecting in the Akropotamos dam (N. Greece) by GPR and VLF. Journal of the Balkan Geophysical Society. Vol 2 . No4.November 1999.p 120~127
2. Anderson, N., Ismail, A., "A Generalized Protocol for Selecting Appropriate Geophysical Techniques", Interactive Forum on Geophysical Technologies for Detecting Underground Coal Mine Voids, Kentucky, USA, July 2003
3. ASCE (American Society of Civil Engineers), "Lessons from Dam Incidents, USA," 1975.
4. ASCE, "Lessons from Dam Incidents, USA-II," 1988.
5. ASCE (2000), Guidelines for Instrumentation and Measurements for Monitoring Dam Performance, ASCE Task Committee on Instrumentation and Monitoring Dam Performance, ASCE.
6. Athanasiou E., Tsourlos P., Tsokas G., Papazachos C., and Vargemezis G., 2005,"Nondestructive DC Resistivity Surveying Using Flat Base Electrodes", Near Surface 2005-Palermo, Italy, PP.1-4.
7. Athanasiou E., Tsourlos P., Tsokas G., Papazachos C., and Vargemezis G., 2005,"Nondestructive DC Resistivity Surveying Using Flat Base Electrodes", Near Surface 2005-Palermo, Italy, PP.1-4.
8. Dunicliff, J. and Green, G.E. (1993), Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. John Wiley & Sons.
9. Federal Emergency Management Agency (2003), FEMA 93 "Federal Guidelines for Dam Safety"
10. Federal Energy Regulatory Committee (2003), "Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects"



11. ICOLD, "Deterioration of Dams and Reservoirs", 1984
12. ICOLD BULLETIN 87 "Improvement of Existing Dam Monitoring Recommendations and Case Histories", 1992
13. ICOLD BULLETIN 99 "Dam Failures -Statistical Analysis", 1995
14. Jansen, R. B., "Dams and Public Safety," Water Power and Resources Service (now U.S. Bureau of Reclamation), 1980 (Revised Reprint, 1983).
15. Johansson S., 1997," Seepage monitoring in embankment dam", doctoral thesis.
16. Johansson S., 1997," Seepage monitoring in embankment dam", doctoral thesis.
17. Kramer, S. L. "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice Hall, NJ, USA, 1996.
18. Karastathis V.K., Karmis P.N., Drakatos G., and Stavrakakis G., 2002,"Geophysical method contributing to the testing of concrete dams.Application at the Marathon Dam", Journal of Applied Geophysics, PP.247-260.
19. Karastathis V.K., Karmis P.N., Drakatos G., and Stavrakakis G., 2002,"Geophysical method contributing to the testing of concrete dams.Application at the Marathon Dam", Journal of Applied Geophysics, PP.247-260.
20. Lin, C.-P., Chang, T.-S. (2004), "Multi-station analysis of surface wave dispersion, " Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 24/11, pp. 877-886. (SCI,EI).
21. Lin, C.-P., Chang, C.-C., and Chang, T.-S., "The Use of MSASW Method in the Assessment of Soil Liquefaction Potential," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 24/9-10, pp 689-698.
22. Loke M.H., 2000, "Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies- A practical guide to 2-D and 3-D surveys".
23. Loke M.H., 2000, "Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies- A practical guide to 2-D and 3-D surveys".



24. Loke, M.H. (2003), Tutorial 2D and 3D electrical imaging surveys.
25. Loke M.H., 2003, "RES2DINV ver.3.52", Geotomo Software, Malaysia.
26. Loke M.H., 2003, "RES2DINV ver.3.52", Geotomo Software, Malaysia.
27. Oh Y.C., Jeong H.S., Lee Y.k., Shon H. Safety evaluation of rock-fill dam by seismic (MSAW) and resistivity method.PP.1377-1386.
28. Oh Y.C., Jeong H.S., Lee Y.k., Shon H. Safety evaluation of rock-fill dam by seismic (MSAW) and resistivity method.PP.1377-1386.
29. SEGJ (2004), Application of Geophysical Methods to Engineering and Environmental Problems, The Advisory Committee on the Standardization, The Society of Exploration Geophysicists of Japan.
30. Song S.H., Song Y., Kwon B.D.2005. Application of hydrogeological and geophysical methods to delineate leakage pathways in an earth fill dam., Exploration Geophysics, vol36, pp92–96.
31. Song S.H., Song Y., Kwon B.D.2005. Application of hydrogeological and geophysical methods to delineate leakage pathways in an earth fill dam., Exploration Geophysics, vol36, pp92–96.
32. Stoke II, K. H., Joh, S-H, Woods, R. D., "Some contributions of in situ geophysical measurements to solving geotechnical engineering problems", ISC-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characteristics, 2004.
33. USCOLD/ASCE, "Lessons from Dam Incidents, USA", 1975
34. USCOLD, "Lessons from Dam Incidents, USA-II", 1988
35. V.K. Kaeastathisa*,P.N. Karmisb,G. Drakatos,a,G. Stavrakakisa.Geophysical methods contribution to the testing of concrete dams.Application at the Marathon Dam. Journal of Applied Geophysics 50(2002) p247-260
36. Vassilios K. Karastathisa*, Petios N. Karmisb. George Drakatos,a, George Stavrakakisa`. Assessment of the dynamic properties of highly saturates concrete using one-sided acoustic tomography. Application in the Marathon Dam.



Construction and Building Materials 16 (2002) p261-269

37. Wightman, W., Jalinoos, F., Sirles, P., and Hanna, K. (2003), "Application of Geophysical Methods to Highway Related Problems," U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.
38. Young-chul Oh, Hae-sang Jeong, Young-kyu Lee, Howoong Shon. Safety Evaluation Of Rock-Fill Dam By Seismic (MASW) And Resistivity Methods
39. 經濟部水利署，"新山水庫加高工程計畫-蓄水前安全複合報告"，民國 88 年 10 月
40. 台灣省自來水股份有限公司，"仁義潭及蘭潭水庫九二一及一零二二大地震後安全檢查與評估報告"，民國 89 年 6 月
41. 台灣省自來水股份有限公司，"新山水庫第二次安全評估計畫"，民國 90 年 12 月
42. 經濟部水資源局，"水庫安全監測講習會講義"，民國 90 年 10 月
43. 劉芳志，"水庫安全監測與滲流量安全管理及緊急應變計畫之研擬"，國立交通大學碩士論文，民國 92 年 11 月
44. 經濟部水利署，"水庫安全監測資料建檔與分析手冊之研訂"，民國 92 年 1 月
45. 經濟部水利署，"牡丹水庫第一次安全評估報告"，民國 92 年 5 月
46. 經濟部水利署，"新山水庫加高工程計畫竣工報告"，民國 93 年 4 月
47. 經濟部水利署，"曾文水庫第三次安全評估計畫"，民國 93 年 8 月
48. 經濟部水利署，"明潭發電廠水里壩整體安全評估"，民國 93 年 12 月
49. 經濟部水利署，"石門水庫暨榮華壩安全監測分析 93 年度監測分析總報告書"，民國 94 年 1 月
50. 經濟部水利署，"石門水庫第二次安全評估報告"，94 年 7 月
51. 財團法人中興工程顧問社，"石門水庫溢洪道廊道非破壞檢測成果報告"，94 年 7 月
52. 經濟部水利署，"蓄水庫安全評估規範(草案)"。
53. 陳利明，'水壩監測及安全評估工作實務(上)'，中興工程，第三十一期。



54. 陳利明，‘水壩監測及安全評估工作實務（下）’，中興工程，第三十二期。





附錄一 水庫潛在破壞模式分類與案例



附錄一 水庫潛在破壞模式分類及案例

混凝土壩破壞模式分類			
項次	破壞模式分類	數量	水庫
C1	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。	3	Lake Hodges Dam (U.S.A)、Los Verjels Dam (U.S.A) 、Groendal Dam (Aouth Africa)
C2	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。	5	Avon Dam (Australia)、Odiaxere Dam (Portugal)、Morrow Point Dam (U.S.A)、Burrinjuck Dam (Australia)、Victoria Dam (Australia)
C3	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。	2	Glen Canyon Dam (Arizona,U.S.A)、武界調整池(南投信義鄉)
C4	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。	3	Nakaiwa Dam (Japan)、Sebakwe Dam (Rhodesia)、Agger Dam (Germany)
C5	沿基礎軟弱不連續面之滑動。	1	Dom Marco(Brasil)



➤ 破壞模式一

壩名	Lake Hodges Dam
建造年份	1918
事故年份	
破壞模式	C1
壩體描述	Lake Hodges 為一複合型拱壩，壩高為 131 ft，壩頂長度為 929 ft，壩體積為 18,128 yds ³ ，蓄水容量為 33,550 AF。
事故描述	其拱壁上有一斜向的張力裂縫，不適合側向穩定條件。其裂縫可由目視觀察出，及由應變計橫跨過裂縫。放置斜向鋼筋混凝土支撐物及一剪力平版於拱壁之間。目前為安全狀態



壩名	Los Verjels Dam
建造年份	1915
事故年份	
破壞模式	C1
壩體描述	Los Verjels 為複合型拱壩，壩高為 56 ft，壩頂長度為 310 ft，壩體積為 1364 yds ³ ，蓄水容量為 1830 AF。
事故描述	其拱壁上有一斜向的張力裂縫，不適合側向穩定條件。其裂縫可由目視觀察出。在拱壩的穹隆使用側壁岩栓，並由斜向支撐與替換的拱壁支撐來驗證側向穩定與否。目前為安全狀態。



壩名	Groendal Dam
建造年份	1934
事故年份	1971
破壞模式	C-1
壩體描述	壩體由一主拱壩，壩高 46 公尺，及一小拱壩，壩高 11 公尺，以土石築成的橋基連結組成；溢洪道是由主拱壩壩頂的一部分以及小拱壩壩頂全部組成，水由壩頂自由落下至其下蓄水池裡；壩體及水池並無免於落水衝擊的保護設計
事故描述	1971 年發生超過一百年回歸週期洪水，大量溢流導致壩下蓄水池由 4m 深劇至 11m 深，主要壩機亦因此損壞；由於連接兩拱壩的壩座產生變形使得壩體有裂縫產生；由於裂縫周圍的混凝土受到流出的酸性水侵蝕，使得滲出的水有逐漸增多的現象。管理當局修復時，重新評估最大洪水設計，並以有限元素法評估壩體穩定度，且對下方岩石進行鑽孔等地質調查；於 1977 年及 1978 年建造足夠符合最大洪峰壘的混凝土表面溢洪道以及靜水池；於此同時並另增加 600 個岩栓固定連接兩拱壩的壩座，且在其內新鑽排水孔；加高壩頂 3m，新增的混凝土塊以 200 個 T 型錨定固定



➤ 破壞模式二

壩名	Avon Dam
建造年份	1927
事故年份	
破壞模式	C-2
壩體描述	混凝土重力壩；壩頂長 222m；壩基高程位於水平面上 72m；壩積為 336.000 立方米，共有容積 214400.000 立方米；壩體於 1970 年以岩造扶壁補強
事故描述	因基礎處洩漏量及上浮力的增加，混凝土受到滲流而造成強度衰減的情形；檢視原設計發現其岩造扶壁（rock fill buttressing）需要補強。修復時，化學試驗檢視水樣確定會造成混凝土強度衰減；重新進行穩定性分析；以新造基礎方式進行水流隔斷及建造基礎排水系統以降低洩漏情形及減小上浮力；藉由加大溢洪道方式建造填岩扶壁；目前狀態穩定。



壩名	Odiaxere Dam
建造年份	1958
事故年份	1967
破壞模式	C-2
壩體描述	拱壩:壩頂高 41m, 長 150m, 容積 26.8 立方米; 其基礎中存在有頁岩及硬砂岩
事故描述	1967 年發現右側壩座混凝土變形, 左側壩座翼牆嚴重滲漏; 修復時, 進行低壓灌漿, 用以阻斷洩漏並防止基礎繼續沉陷; 現況良好



壩名	Morrow Point Dam
建造年份	1968
事故年份	1968
破壞模式	C-2
壩體描述	雙弧度薄拱混凝土壩；壩頂高 468ft，長 741ft，壩積為 365,000 立方碼，容積為 117,000 acre-feet
事故描述	左側壩座設置之阻水牆於蓄水期間甚露疊增加，以向外延伸施做阻水牆方式改善，並於水流中灌入膠質瀝青以阻塞流路，有效降低滲漏



壩名	Burrinjuck Dam
建造年份	1927
事故年份	1956
破壞模式	C-2
壩體描述	混凝土重力壩；壩頂高 78m，長 233m(不包含兩側溢洪道)，壩積為 382,000 立方米，容積為 1,032,400,000 立方米，溢洪道可容許流量為每秒 9,700 立方米；
事故描述	因壩體完整性不佳而滲漏量極大造成水泥剝落，修復時，於上游設置阻水牆並於下游組水牆導水，加上於岩石基礎建造集水隧道，有效減少壩體滲流。



壩名	Victoria Dam
建造年份	1891
事故年份	
破壞模式	C-2
壩體描述	混凝土拱壩及重力壩；壩頂高 16.5m，長 222m(不包含兩側溢洪道)，容積為 850,000 立方米；
事故描述	壩體下游面觀察到顯著滲流，分析水質後發現混凝土中石灰質材料開始流失，修復時，在舊有混凝土與新的鋼筋混凝土版接觸面上安裝有排水系統；鑽孔進入基礎內部用以進行阻水牆工程以及當做排水用



破壞模式三

壩名	Glen Canyon Dam
建造年份	1964
事故年份	1983/6/2~7/23
破壞模式	C3
壩體描述	Glen Canyon Dam 是一座高 700 英尺 (216.4 公尺) 長為 1560 英尺 (475 公尺) 的混凝土建築，壩頂的厚度約為 25 英尺 (7.6 公尺)，底部最厚的部分為 300 英尺 (91 公尺)，整做壩共使用了 4900000yd^3 (3750000m^3) 的混凝土組成。每一座壩座橋墩都有一溢洪道，每一座溢洪道包含 40×52.5 英尺 (11.2×16 公尺) 寬的閘門，閘門成放射形狀，且都有一混凝土廊道，每一座混凝土廊道的最小直徑為 41 英尺 (12.5 公尺)。位於壩的左側有 4 個出水管，出水管每一個直徑 96 英吋 (2.4 公尺)，每一做出水管由環狀的 96 英吋 (2.4 公尺) 的閘門來控制，而出水量約為 $15000\text{ft}^3/\text{s}$ ($425\text{m}^3/\text{s}$)。壩基腳處有 8 座 118750 千瓦的發電機，由 8 個 14 英尺 (4.3 公尺) 的渠道來輸送，發電廠的流量約 $26000\text{ft}^3/\text{s}$ ($736\text{m}^3/\text{s}$)
事故描述	在 1983 年的春夏雨季節，因快速的融雪與大量的降雨，造成上游的 Colorado River 流域產生洪水氾濫。為控制升高的蓄水量和避免產生壩頂溢流，從 6 月 2 日至 7 月 23 日所有的排水管、發電廠水管線與溢洪道皆用以洩洪，左溢洪道運作 3 天後發現內襯已有滲水，因此緊急關閉檢視，但右側溢洪道仍繼續運作。經由調查發現在隧道底部混凝土受到侵蝕及穴蝕破壞，形成約 50yd^3 (38m^3) 的襯砌剝落，在這段時間，洪水不斷補入水庫，右側溢洪道持續兩個月已最大排洪量 $32000\text{ft}^3/\text{s}$ ($906\text{m}^3/\text{s}$) 排水。在洪水退去之後，關閉閘門並在隧道排水，發現在左側溢洪道下游段坡斗處受到水沖蝕，形成 35 英尺深 (10.7 公尺)、長 134 英尺 (41 公尺) 以及寬 50 英尺 (15 公尺)，並且侵入砂岩層的孔洞。上游隧道襯砌受到穴蝕孔洞的影響，使得廊道周遭 3/4 的襯砌遭移除，並且在廊道下游到陳跡大量沖蝕後的材料。右側溢洪道的破壞比左側來的輕微，為一個長 175 英尺 (53 公尺)、深度 12 英尺 (3.6 公尺)



壩名	武界壩
建造年份	民國 23 年
事故年份	93 年 7 月
破壞模式	C3
壩體描述	武界壩位於濁水溪之萬大河流域，壩頂標高 755.39 公尺，壩頂長度 86.52 公尺，壩頂寬度 6.06 公尺，水庫主要功能為調整濁水溪上游水位，並利用該水庫之引水隧道引水以維持日月潭水位，以維持下游電廠運轉。
事故描述	民國 93 年 7 月連日豪雨使水庫蓄水量大增，因此水庫排洪隧道持續排洪數日，待洪水消退後發現，排洪隧道高程段轉水平段之隧道斷面基礎材料，遭洪水淘刷出深 15~20 米之巨大坑洞



➤ 破壞模式四

壩名	Nakaiwa Dam
建造年份	1924
事故年份	
破壞模式	C-4
壩體描述	混凝土拱壩及重力壩；壩頂高 26m，長 108m(不包含兩側溢洪道)，壩積為 11,500 立方米；
事故描述	壩體及基礎滲流量太大。對壩體及基礎進行灌漿；成效良好。



壩名	Sebakwe Dam
建造年份	1957
事故年份	
破壞模式	C-4
壩體描述	扶壁壩；溢洪道位於中央，其下游面全部有面板包覆；建於上為粗粒玄武岩下為花崗岩的岩盤上；壩頂高 40m，長 253m；溢洪道寬度為 82m；扶壁處溢洪道表面底板厚度為 0.45m；
事故描述	左側壩基及壩座下方有岩石破碎帶導致滲漏量高達 30Liter/sec。修復時，對基礎及左側壩基下方進行最小深度為 10m 最大深度至 20m 的灌漿；以水泥砂漿為灌漿材料；成效良好。



壩名	Agger Dam
建造年份	1929
事故年份	
破壞模式	C-4
壩體描述	混凝土重力壩；壩頂高 45m，長 225m；座落在海相沉積與粘土膠結成的石灰岩層上
事故描述	由於縫隙以及斷層對於岩盤破壞與侵蝕使得岩盤滲透性增加。



➤ 破壞模式伍

壩名	Dom Marco
建造年份	1971
事故年份	
破壞模式	C-5
壩體描述	混凝土壩；壩頂高 13.25m，長 220m，寬有 8m；排水廊道高 2m，寬 1.5m；用以確保 Jacui 河在旱季時的船運正常
事故描述	因上游面與下游面之水平變位差異，發現基礎滑動面；於滑動面及保護底板下方發現有明顯強度減弱的風化侵蝕發生



土壩、土石壩破壞模式分類			
項次	破壞模式分類	數量	水庫
E1	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	2	Kelly Barnes Dam (Georgia,USA) 、 South Fork (West Virginia)
E2	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。	5	Black Creek Dam (Mississippi,U.S.A) 、 Fontenelle Dam (Wyoming,U.S.A) 、 East Fork Dam(North Carolina,U.S.A) 、 FP&L (Florida,U.S.A) 、 Roxboro Municipal Lake Dam (North Carolina, USA) 。
E3	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。	4	Dix Dam (Kentucky,U.S.A) 、 Black Creek (Mississippi,U.S.A) 、 Adobe Creek Dam (Colorado) 、 Navajo Dam (New Mexico,U.S.A)
E4	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。	4	Red Bluff Dam (texas,U.S.A) 、 Mill Creek Lake Dam (Washington,U.S.A)
E5	因陡坡、滲流壓力及大量降水所造成之壩體滑動	4	Alum Creek Dam (Ohio,U.S.A) ,Lake Livingston Dam (Texas,U.S.A) 、 Lake Shelbyville Dam (Illinois,U.S.A) 、 San Luis Dam (California,U.S.A)
E6	沿基礎中黏土裂縫或斷層之壩體滑動。	1	Lewisville Dam (texas,U.S.A)
E7	差異沉陷造成之裂縫	2	Lynchburg Reservoir Levee (Texas,U.S.A) 、 Storrie Lake Dam (New mexico,U.S.A)
E8	土壤液化	2	Addicks Dam (Texas,U.S.A) 、 Bass Haven Dam (Texas,U.S.A)



➤ 破壞模式一

壩名	Kelly Barnes Dam
建造年份	1899
事故年份	1997
破壞模式	E1
壩體描述	<p>Kelly Barnes Dam 壩頂長度約為 4,000ft(122m)寬約為 20ft(6.1m)。為向上凹的形式，且填築在 Toccoa 河較窄的峽谷處。壩左側有一已開挖的土石溢洪道。此溢洪道壩區蓄水的主要出口。壩右側邊緣為第二溢洪道，坡度為 1:1，過大坡度導致下游邊坡有一部分滑動且尚未修復。經過部段的填築，最後壩高為 13m，最初功能為發電，目前僅餘休閒功能。</p>
事故描述	<p>1997 年 1 月因連續降雨，突然破壞並造成下游區域損失慘重，破壞原因可能為：</p> <ol style="list-style-type: none">1. 連續降雨造成急流沖蝕壩體壁面。2. 壩下游面因溢洪道造成局部滑動，導致其他的管湧或傾倒和急流沖蝕。3. 舊開門邊管湧導致開門倒塌。 <p>大部份相似的破壞模式是在陡峭的壩下游面產生滑動，且大部份伴隨著管湧及在頂部產生局部衝擊，並隨著漸進式侵蝕、下游堤岸飽和及後來倒塌的結構物。部分結構會在數小時後導致整個倒塌。</p>



壩名	South Fork
建造年份	1975
事故年份	1973
破壞模式	E1
壩體描述	壩體為一阻隔溝渠區域之填築夯實土石壩，其主要溢洪道是由流入一 42in(1070mm)直徑的管中。壩頂長度為 919ft(280m)。壩高為 103.5ft(31.5m)及其主要功用能為防洪。
事故描述	1973 年冬末，能在建造中的水壩，因大量降雨於雪線分水嶺上方導致流量過大而產生滲流。



➤ 破壞模式二

壩名	Black Creek Dam
建造年份	1964·土石壩(Earthfill)
事故年份	1983/5
破壞模式	E2
壩體描述	Black Creek Dam 的功能在於調配水量，壩高 43ft(13.1m)、壩頂長度 1100ft(338m)。該壩為均勻夯實的土壩，其溢洪道為管徑 42inch(1070mm)之排水管及天然放流口。
事故描述	1983 年該地區降下超過 100 年報與頻率之暴雨導致滲流大於水壩最大設計流量，放流口周遭材料因沖刷而部斷流失，導致溢洪道受到障礙致使壩基結構也形成嚴重破壞。



壩名	Fontenelle Dam
建造年份	1965
事故年份	1965。1982
破壞模式	E2
壩體描述	<p>Fontenelle Dam 是一座由(夯土)rolled earth 及礫石所填滿之水庫，完工於1965年。壩體總長將近一英里，壩頂總長 5450ft(1661m)；壩高 139ft(42.4m)；蓄水量達 5,300,000yd³(4,052,000m³)。堤岸之壩心由低塑性材料構成(主要為粉土質細砂及砂性粉土)，兩側並由優良級配礫石填築作為殼層。土堤下方的承載層材料約被刮除一呎的厚度，殘留的材料則被堆置在土堤之殼層上，並且開鑿一底部寬 80ft(24m)的槽溝用以延伸壩心穿過承載層以穩固基礎的岩石。超過 3000ft(900m)土堤下方承載層的岩塊是過於破碎的，因此第二次開鑿之槽溝約深入破碎之岩石 5~7ft(1.5m~2.1m)，並利用隔漿灌漿的方法將開鑿之槽溝填滿。</p>
事故描述	<p>事件一:1965年本水庫第一次蓄水時，左側溢洪道回填區出現滲流與泥水的現象，因此沿溢洪道裝設排水管以排除滲流水但泥水的現象持續出現。1965年九月，當水庫水位高過溢洪道頂部約 2ft(0.6m)時，右側壩墩約壩高一半的位置，滲流出水量快速增加，並沖蝕約 10500yd³(8000m³)的堤岸，因此立刻將庫區之水位降低，以減緩滲流造成之破壞持續擴大。該次沖蝕的事件，水庫管理單位認為是由於壩址區域岩石材料性質不佳及處理方法不夠確實所造成。左壩墩發現有一約 6 inches(150mm)的岩石受到應力解壓的現象，節理破碎，雖然事後有經灌漿處理，但庫區管理單位無法實際的預測灌漿對破碎帶所帶來的改善，因此相信灌漿並無法有效改善該區域地質材料的情形。也相信右壩墩灌漿的壓力會使既有的岩層節理開裂。此外，該水庫於堤岸與壩墩交接處所做的處理，除了灌漿外，其他的作業相當具有效益。</p> <p>事件二:1966年水庫之滲水問題修復完成後，水庫恢復正常運轉。1982年，在左壩墩底端以及大壩中心區域觀察到少數先前未發現的滲流區域。之後，解析水庫堤岸設計與建構的過程中，發現對基礎的處理不適當，因此，在1983年將水庫正常蓄水位降低 10ft(3m)。在1983年對左側堤岸所做的調查，發現接近堤岸與基礎接觸面附近有不少的軟弱區域，進而將水庫正常蓄水位降低 25ft(7.6m)，並進行修繕。1985年則發現位在1982年大壩中心區域曾發生滲流區域之水壓計在水庫水位沒有變化的情況下，增加了 10ft，並持續增加。經過證實後，將水庫正常蓄水位降低 63ft(19.2m)。</p>



壩名	East Fork Dam
建造年份	1955
事故年份	1979/5/26
破壞模式	E2
壩體描述	EAST FORK DAM 由岩塊堆積而成，表面覆土。壩高 135ft(41.1m)，壩頂長 385ft(117m)。庫區蓄水主要用以水力發電。
事故描述	庫區之溢洪道乃開炸原生花崗岩而成。在設計、建造階段，並未對花崗岩壩墩做任何處理，多年後，開炸與反覆冰凍的過程使得裂隙逐漸擴大，因此庫區管理中心開始注意當庫區顛峰流量時，壩墩上半部的穩定性。



壩名	FP&L Martin Co. Powerplant Cooling Water Reservoir Dike
建造年份	1977
事故年份	1979/10/31
破壞模式	E2
壩體描述	該壩壩高 31ft(9.5m)·壩頂長 92ft(28.04m)·該壩由均質細砂組構成·壩體中心有一 3ft 的調查廊道·沒有滲流水管理及蒐集等設計·基礎並未做任何處理與刮除的工作·壩頂有作沖蝕管理·
事故描述	管湧的現象將基礎與壩體材料沖蝕而出·造成大壩壩體開裂·在此事故發生前·壩基已有明顯的滲流產生·但管理單位認為該現象為正常·不會對壩體造成危險·



壩名	Roxboro Municipal Lake Dam
建造年份	1955
事故年份	1984/3/6
破壞模式	E2
壩體描述	壩高 23ft(7m)·壩頂長 1000ft(305m)。溢洪道為寬 130ft(40m)雙曲線流道。
事故描述	溢洪道下方發生大規模的管湧現象。溢洪道混凝土下方並未做排水設施。當管湧逐漸加大，壩頂道路發生下陷情況，上游瞬間產生一 20ft(6.1m)的漩渦。溢洪道曲線段崩塌，溢洪道表面嚴重受損。



破壞模式三

壩名	Dix Dam
建造年份	1925
事故年份	1974
破壞模式	E3
壩體描述	<p>Dix Dam 為一高 285ft(86.9m)之石壩壩及壩頂長度為 1,020ft(311m)。壩主初始壩可能和水一般由鬆散的岩石築起，在上邊坡側由填築大且好的完整岩石，底部大約 20ft(6m)厚且逐漸減少至頂部厚為 5ft(1.5m)。岩壁是由種數噸的大石頭所組成，每顆石頭均是緊靠的並且儘可能以較小顆岩石填滿空隙及少數的空間。在上游邊坡的完整岩石是一混凝土平版面以提供一水密性的設施。在壩趾處，其混凝土版是靠大量的鋼筋混凝土延伸到混凝土填築溝槽，以使與基礎作一結合。面版分割為由水平向量起膨脹接縫間距為 48ft(15m)，垂直高程量起為 50ft(15m)，且其從斜面量起約為 75ft(23m)。每個水平及垂直隔梁膨脹接縫處，皆灌以混凝土填入溝槽裡，以留下完整的岩石面。水平膨脹接縫的細節應和垂直接縫一樣好，且也不論如何建造版均將無法避免接縫的產生。不常發生在已經完成每個版之膨脹接縫，但應在連續灌注下出現。U 型鋼製接縫，為避免從兩板間之膨脹接縫有滲漏產生。在高程 670，鋪版使用形式為被允許留下空間並且由 3 乘 10in(75 乘 250mm)之突出及表面有溝槽的材料，當做保護及對抗滲漏。溝槽開挖為了鞏固每個壩壩，並會填充混凝土到岩盤之中。</p>
事故描述	<p>滲漏在幾年後被發現。檢查其垂直面，並且發現考慮的滲漏是沿著垂直膨脹接縫。滲漏流量速率大於 $100\text{ft}^3/\text{s}(2.8\text{m}^3/\text{s})$。</p>



壩名	Black Creek
建造年份	1964
事故年份	3/1973
破壞模式	E3
壩體描述	該壩為一滯洪結構物，壩高 48.5ft(14.8m)，壩頂長 1492ft(455m)。由散佈均勻的黏土夯實而成。該壩的主要溢洪道為鋼筋混凝土管，並具有一天然緊急溢洪道。
事故描述	1973 年 3 月水庫遭遇大雨，評估其強度達到 100 年暴雨頻率。在此期間，壩體發生管湧。管湧路徑可能因壩體材料風化造成，並由蓄水導致初期路徑形成。此事件可藉由在壩體殼層填滿分散性的黏土以取代低分散性的材料來避免。



壩名	Adobe Creek Dam
建造年份	1902
事故年份	1973
破壞模式	E3
壩體描述	Adobe Creek Dam 為一土石壩，其最大結構高為 38ft(11.6m)、壩頂長度為 7,375ft(2,248m)。壩初始建於 1902 年，重建於 1970 年。蓄水庫主要為灌溉使用。
事故描述	於水庫重建期間，為將滲流水排除，在壩的下方，管理當局於 1983 年在壩趾處安裝一排水設施。排水設施由一 pvc 管置於 8-inch(200mm)多孔鋼管內，外部環繞礫石及大卵石。向上滲流的末端將不會超過管的末端。4 月 18 日時檢查注意到有一渾濁 100-gal/min(6.3-L/s)排出得流量，管理者隨後令工程師調查渾濁流量。蓄水庫持續進水，且在 5 月 30 日時，裂縫在排水處被發現。接下來數天時間，排水坑持續發展擴大。



壩名	Navajo Dam
建造年份	1963
事故年份	1963-1985
破壞模式	E3
壩體描述	壩高 402ft(122.5m)；壩頂長 3648ft(1112m)，庫區寬 2566ft(782m)；壩頂寬 30ft(9.1m)，總蓄水量 26.840,000yd ³ (20,520,700m ³)。壩體分為三個區域，三個區域各由不同的材料組成。區域一：壩心由低塑性的黏土與粉土構成。區域二：壩心由粗砂、礫石與卵石構成。區域三：由黏土、粉土與砂土混雜及不適用在區域一與區域二的礫石組構而成。在高程 5986ft(1824m)壩頂有一層 3ft(0.9m)的殺層保護邊坡減少水波拍打造成之損壞。
事故描述	1963/6/5 首次發現滲漏的情況前一年，水庫出水閘門為初次蓄水即關閉。滲流出水量在蓄水期間逐漸增加，兩側壩基所觀測之平均滲流量達 1800gal/min(6.8m ³ /min)。研判應為沿壩體和基礎交接處發生滲流並可能侵蝕壩心材料以致於產生無法處理的裂隙。此種侵蝕現象最終造成壩體結構嚴重破壞。當侵蝕或管湧發生時，會有以下幾種狀況：(1)壩心材料可能遭受侵蝕(2)水流流經界面之流速必足以造成侵蝕(3)裂隙及節理必會存在壩體與壩基接觸的附近(4)壩心材料可能未經過濾即被掏刷空。室內試驗結果指出 NAVAJO DAM 的壩心材料主要依賴低塑性砂性黏土與粉土。然而此種材料都具有高被侵蝕性。由於左側壩基地形過於陡峭，因此壩體材料無法有效夯實以滿足所需之密度及與壩體接觸界面之完整性，因而增加受到差異沉降造成裂隙之可能性；應力的拱效應則造成不連續處強度更低。左壩基裂隙問題以灌漿解決，但灌漿方式亦增加壩體與壩接觸面發生裂隙的可能性。由於左壩基陡峭的地形，該區域的岩石有很嚴重的開裂與節理的情形。



➤ 破壞模式四

壩名	Mill Creek Lake Dam
建造年份	1942
事故年份	1941
破壞模式	E4
壩體描述	Mill Creek Lake Dam 是一座攔截河水用來控制河水氾濫之蓄水庫，也是排水、灌蓋之用，也是提供從 Mill Creek Lake Dam 到 Walla Walla 的河道，由於高低不平的農田造成壩的高程不一，使蓄水區域成不規則狀，蓄水壩是由土石均質材料堆積成，高 145 英尺 (44 公尺) 高，壩長 3200 英尺 (975 公尺) 常基座的寬度為 800 英尺 (244 公尺)，最頂部的寬度 20 英尺 (6.1 公尺)
事故描述	從壩最初 1941 年填築完成後便開始有了滲流問題產生，在當時，標高 1220 蓄水高的水量，75% 的存水在 60 天內滲流出。滲流的區域在下游基腳處，下降的水位可以證明是由大量滲漏造成。在洩光蓄水可的水後，將沉陷的孔洞和裂縫以粉土補實。第 2 次的滲漏試驗在 1942 年，在高程 1200 處，滲漏的位置沒有改變。壩基角址處的排水系統利用 7 個排水井構成，為了能夠舒緩上游的水壓力。在 1945 年，在蓄水區高程達 1233 時，預期到一樣的滲流問題產生，但當時新的壩基角址處的排水系統已經設計完成，結果粉土細砂由內部的排水系統管湧而出，估計有 $750\text{yd}^3(575\text{m}^3)$ 的材料流失。但是真正的來源不無法詳細得知，因為土壩和壩基的材料組成皆是相同的材料，為了避免更嚴重的管湧發生，內部的排水系統以水泥固結。另外有 3 次的試驗，一次為 1950 年，一次是在 1964-65 年由於冬季犯洪的造成，最後一次是在 1979 年只是做改善儀器工作，這三次的試驗皆顯示蓄水庫的滲漏約在 $33\Omega^3/\text{s}(0.9\text{m}^3/\text{s})$ ，和之前試驗所發現的相去不遠。造成滲流的原因可，早期的調查報告卻指出可滲透性高的礫石基礎造成，也有認為是材料的垂直滲透所造成的。



壩名	Red Bluff Dam
建造年份	1936
事故年份	1936
破壞模式	E4
壩體描述	RED BLUFF DAM 高 111 英尺 (33.8 公尺), 10500 英尺 (3200 公尺) 長, 主要功能為提供灌溉與發電
事故描述	高水位時, 壩下游產生相當大的滲漏, 導致上游上層區域遭到侵蝕形成凹洞。



➤ 破壞模式伍

壩名	Alum Creek Dam
建造年份	1974
事故年份	1976
破壞模式	E5
壩體描述	Alum Creek 湖為一多功能的蓄水庫。係為一土壩，壩高為 93ft(28.3m)，壩頂長度為 10,000ft(3,050m)。混凝土溢洪道閘門高為 118ft(36m)，且三各閘門為 34ft 寬×25ft 高(10.4×7.6m)，支撐靠 8ft(2.4m)的墩柱。溢洪道設計的洪水尖峰流量為 $61,500\text{ft}^3/\text{s}$ ($1.74\text{m}^3/\text{s}$)。
事故描述	<p>這個事件可以清楚的知道由於基礎的水平接縫較差，而使得溢洪道結構產生潛在的不穩定。這個結果緊跟著再重新考慮一連續潛能及有接縫較差之處，卻是在設計及建設階段沒有注意。為避免未來在基礎評估設計時有相同的情形，則需依賴在指定的時間有適合的資金。這將避免延遲最後對案例結構面的評估，且輪到專家對基礎條件樂觀的看法以及導致較少對基礎最佳的處理的壓力。</p> <p>由於基礎水平接縫強度不足導致溢洪道結構產生潛在不穩定。</p>



壩名	Lake Shelbyville Dam
建造年份	1970
事故年份	1968
破壞模式	E5
壩體描述	LAKE SHELBYVILLE DAM 是一座包含土壩與重力式混凝土壩的結構物，壩的剖面材料是均質，不透水性，且有內部排水特性，壩頂最高處高寬 30 英尺 (9.1 公尺)，最底部高為 850 英尺 (259 公尺)，壩長 2292 英尺 (1034 公尺) 而壩高 134.5 英尺 (41 公尺)
事故描述	<p>第一種破壞可能:在 1968 年春天時，在第 2 層圍堰左壩交界處有天然材料滑落，這區域是當初興建部門時用來傾倒開挖材料的地方，這些過度堆積的材料在合約不斷的要求下移除。為了要準備移除材料，承包商建築了一條從壩腳指到邊坡的道路，使其能夠移動施工機具，這條路在 1967 年秋天完成。從 1967 年冬天到 1968 年冬天，承包商從較高的部分，沿邊坡推除材料至較低的部分，並堆積在這條道路上。道路與邊坡滑落堆積的材料堵塞了較低處的自然排水路徑，最終在 1968 年春天，因排水路徑被堵塞引發較超額孔隙水壓造成較低邊坡破壞。</p> <p>第二種破壞可能:主壩約在 1970 年 8 月完成，同年八月，相關單位並檢驗了壩堤與溢洪道在壩頂，壩頂上某些區域有些微的沉陷量而被注意，在壩頂上小型的凹地傾向於不良的回填土與凍熔作用造成的，這些問題並沒有被重視，直到後續的現地檢驗後才開始監測。調查的行程從 2 月到 7 月，並沒有位移產生。問題在 1971 年秋天被證實。較高處的水被發現普遍穿過受影響的區域，持續性的調查計畫開始。後續這問題存在逐漸被證實，滑動面位於上游面的壩堤約一半高處，滑動面高度從 20-40 英尺 (6.1-12.2 公尺) 高，並平行壩中心線上游邊緣約 600 英尺 (183 公尺) 的位置，明顯的裂縫已經被證實沿著上游面壩堤從里程 29+00 沉陷伴隨著裂縫產生，沉陷量約 8-17 英寸 (200-430 公釐)。此時，高孔隙水壓開始被量測。</p>



壩名	Lake Livingston Dam
建造年份	1969
事故年份	1979
破壞模式	E5
壩體描述	LAKE LIVINGSTON DAM 是一座利用當地的土石材料填築而成的，壩長 13480 英尺 (4110 公尺)，壩高 98 英尺 (29.9 公尺)。
事故描述	多天的乾旱後，水庫連續下了 4 天的雨，使地表的黏土飽和，雨水也滲入原本乾旱造成地表乾裂的區域，因雨水與地表黏土入侵原本的裂縫，引而使土壤含水飽和失去剪力強度而滑動。下邊坡較上層的表土因而產生位移，這些區域較高的位置，在有些區域甚至更低。最大的滑動發生在 4 月 21 日。



壩名	San Luis Dam
建造年份	1967
事故年份	1981
破壞模式	E5
壩體描述	此土壩是由多變化之河堤所構成，其中最大的兩個溝渠，斷面約為 100 英尺(30 米)深。壩體主要由粘土(壩心)及岩石(殼層)所構成。沿斜坡所修建的狹道坡度，往上游方向為 8:1(H:V)，下游方向為 6:1，是由大小不一的樣材料所填。整個流域及水平排水匯集於下游斷面。
事故描述	1981 年 9 月 4 日，在壩軸里程 138+00 附近產生一弧形破壞坡面，距壩頂約 30 英尺。此破壞達兩個月之久，破壞面長達 1500 英尺(460 米)，破壞面範圍從壩軸里程 139+00 至 124+00 處，高差 60 英尺(18 米)觸及壩體。由於水庫的水位變化所造成的反覆載重及破壞面流失之高塑性粘土等現象，使得土壤強度降低。



➤ 破壞模式六

壩名	Lewisville Dam
建造年份	1954
事故年份	1966
破壞模式	E6
壩體描述	Lewisville Dam 是一座土壩，利用溢洪道開挖之黏土頁岩，並從外地運黏土與砂。最初的土堤設計上游面邊坡垂直與水平比為 1:2.5，下游面邊坡垂直與水平比為 1:2.5 和一個較低的邊坡垂直與水平比為 1:3，當然設計還包括 560 英尺 (171 公尺) 寬的溢洪道，和排水系統
事故描述	乾季時，黏土頁岩會產生大量的裂縫，雨季時，這些裂隙將會飽和引起地表滑動。這些黏土頁岩呈現低液性限度與高的塑性限度，經由不斷的乾濕循環，土壤內的剪力強度漸漸被降低，最後的結果即是產生滑動，經過幾年的循環，在上游與下游表面都有產生滑動。



▷ 破壞模式七

壩名	Lynchburg Reservoir Levee
建造年份	1971
事故年份	1971
破壞模式	E7
壩體描述	此壩為土石壩堤防，壩高為 9.8m，壩頂長度 4.816m。集水區用以調整航道水的傳輸及影響航道之工業。
事故描述	於建造期間，堤防的兩個分離區域出現高達 6.1m 的垂直差異沉陷，此兩區域坐落於非常高塑性指數的黏土層上，而此黏土層可隨夯實填土輕易側向展開。在從土壤專家得到有效解決措施之前，沉陷地區的堤防材料安置為間斷進行的。經專家的建議，減少堤防頂部的截面積，在此區域製造一個 'Piggy-back' 形式的碼頭，而碼頭底部的斜坡部分則是由 3:1(H:V) 變為 9:1 將其平坦化，以平衡因壩頂斷面重量減少而產生的力。



壩名	Storrie Lake Dam
建造年份	1921
事故年份	1970~1972
破壞模式	E7
壩體描述	<p>壩心主要以風化頁岩所填充，原始為壩高 77 英尺(23 米)，壩頂寬 32 英尺(9.8 米)；上游坡度為 3:1，下游為 2:1。為考慮州際公路之建造，於 1964 年壩高增加 4 英尺(1.2 米)，寬增加 42 英尺(13 米)。於壩頂往下 15 英尺(4.6 米)段，坡度變為 1:1。壩頂長 1480 英尺(451 米)。此水庫主要功能為灌溉用。</p>
事故描述	<p>於 1970 至 1972 年間，於壩頂發現兩道縱向裂縫，分別往上游及下游開裂，裂痕長 1000 英尺(300 米)，主要裂痕寬 0.25 到 8 英寸(6 到 200 毫米)，深至少 25 英尺(7.6 米)。往下游側的欄杆位移約 12 英寸(300 毫米)。裂痕及位移的原因為陡岸的沉陷及坡度過陡所增加的載重所致，使得上邊坡近乎破壞。</p> <p>於壩之上部約 20 英尺(6.1 米)範圍內，開挖並且重新夯實。重新修建後上游及下游之坡度變為 2.5:1 及 2:1。</p>



破壞模式八

壩名	Bass Haven Dam
建造年份	
事故年份	1984
破壞模式	E8
壩體描述	Bass Haven Dam 為土石壩，壩高 9.2m，壩頂長度 163m。集水區主要用於灌溉用途與遊憩。
事故描述	1984 年 8 月 14 日，水庫管理單位挖掉部分水壩破碎帶來降低湖面，以進行出口的修復。但由於砂土堤防的侵蝕，使得破碎帶快速增大，直到整座壩完全破碎。而由於集水區水位的快速下降，使得上游堤防斜坡液化，當時站在壩頂上的三人陷入斜坡內，造成一人死亡。此湖排水達 1.15 小時，最終破碎寬度達 29m。



壩名	Addicks Dam
建造年份	1948
事故年份	1977 Type1 Cause - Exposure of seepage path through the embankment and foundation
破壞模式	E8
壩體描述	Addicks Dam 壩高 14.9m，壩頂長度 18.643m，為一個均質土石壩，其建造材料來自上游區域，斜坡傾度為 3:1(H:V)。蓄水區僅用於洪水控制，而由於住宅區域的發展侵入下游洪水平原，使得防洪池的蓄水量超過原來設計目標。
事故描述	一排水廊道鄰近下游右下方遭挖空，此挖空致使原暴露於上游區域的構築基礎砂土暴露於外。部分砂土發生砂湧且於日後在排水廊道造成快速沖蝕，曾採取緊急措施以防止基礎土壤的管湧發生。構築一皂土漿溝渠穿越堤防與具滲透力之基礎，並於灌漿溝渠完成後以壓力觀測其滲透是否遭抑制。此灌漿溝渠完成於 1978 年 6 月。



附錄二 水庫監測作業問卷彙整



附錄二 水庫監測作業問卷彙整

本問卷共有 20 個管理單位 (44 座水庫) 作答，其管轄之水庫如表 1 所示

表 1. 各管理單位所管轄之水庫

管理單位	管轄水庫
1. 台北翡翠水庫管理局	翡翠水庫
2. 經濟部水利署北區水資源局	石門水庫、榮華壩
3. 自來水公司第五區管理處	仁義潭水庫、蘭潭水庫
4. 自來水公司第一區管理處	新山水庫
5. 嘉南農田水利會白河水庫管理所	白河水庫
6. 嘉南農田水利會烏山頭管理處	烏山頭水庫
7. 經濟部水利署中區資源局	鯉魚潭水庫
8. 台北自來水事業處	直潭壩、青潭堰
9. 金門縣自來水廠	太湖水庫、擎天水庫、田埔水庫、榮湖水庫、金沙水庫、陽明水庫、連湖水庫、西湖水庫、蘭湖水庫、瓊林水庫、菱湖水庫
10. 南區水資源局牡丹水庫管理中心	牡丹水庫
11. 南投農田水利會	頭社水庫
12. 南區水資源局	曾文水庫
13. 台電大甲溪發電廠	德基水庫、青山水庫、谷關水庫、天輪水庫、馬鞍山水庫
14. 台電大觀溪發電廠	日月潭水庫、武界水庫、明湖下池水庫
15. 台電卓蘭發電廠	士林水庫
16. 台電明潭發電廠	明潭水里壩、鉅工統櫃壩
17. 台電桂山發電廠	桂山壩、羅好壩、阿玉壩、粗坑壩
18. 台電東部發電廠	溪畔壩、龍溪壩
19. 台電萬大電廠	霧社水庫
20. 屏東農田水利會	龍巒潭水庫



水庫安全監測執行相關問題
問卷目錄

1. 基本資料.....	B-3
2. 監測系統及監測項目.....	B-7
2.1. 目視檢查.....	B-7
2.2. 水位高程及水壓量測.....	B-9
2.3. 滲流及滲漏.....	B-13
2.4. 位移.....	B-15
2.5. 應力應變.....	B-27
2.6. 溫度.....	B-31
2.7. 地震.....	B-32
2.8. 後拉式預力地錨載重.....	B-34
3. 監測頻率.....	B-36
4. 監測管理值.....	B-36
5. 監測儀器維護程序.....	B-38
6. 監測資料擷取分析.....	B-39
7. 非破壞性檢測方法.....	B-40

若於回答過程中有任何疑義，請電洽國立交通大學防災中心鄒和翰先生。

TEL : 03-5712121-55014

M.P. : 0930-858-954



1. 基本資料

1. 貴單位之名稱？
2. 貴單位管理之蓄水庫名稱？
3. 貴單位管理之蓄水庫內所屬主要水壩之數量及其型式？

➢ 數量(單選)：

選項	1 座	2 座	3 座	3 座以上
選擇次數	11	5	1	3

➢ 型式(可複選)：

選項	土石壩	重力式混凝土壩	混凝土壩	混凝土拱壩	其他
選擇次數	10	6	4	5	2

【註】其他為：白河水庫為滾壓式土壩、粗坑壩為開墩式

4. 貴單位管理之蓄水庫內所屬主要水壩開始蓄水管運期間？

➢ (可複選)：

選項	民國 40~50 年間	民國 50~60 年間	民國 60~70 年間
選擇次數	7	4	6
選項	民國 70~80 年間	民國 80~90 年間	民國 90 年後
選擇次數	4	6	2

5. 貴單位管理之蓄水庫內所屬主要水壩壩高？

➢ (可複選)：

選項	25m 以下	25m~50m	50m~75m	75m~100m
選擇次數	6	6	3	4
選項	100m~125m	125m~150m	150m 以上	
選擇次數	2	2	1 (德基水庫壩高 180m)	

6. 請問您(填表者)的職務及主要負責工作？

管理單位	職務	主要負責工作
1.台北翡翠水庫管理局	正工程司	大壩監測及維護
2.經濟部水利署北區水資源局	工程司	水庫設施維護及安全監測業務
3.自來水公司第五區管理處		
4.自來水公司第一區管理處	技術士	水庫監測及維修工程
5.嘉南農田水利會白河水庫管理所	管理員	水庫管理、機電設備管理
6.嘉南農田水利會烏山頭管理處	副工程師	水庫管理業務
7.經濟部水利署中區資源局	工程員	水庫安全監測、電腦維修、緊急應變
8.台北自來水事業處	工程員	機械設備維護



9.金門縣自來水廠	技士	生產供水
10.南區水資源局牡丹水庫管理中心	正工程司	大壩安全評估與維護
11.南投農田水利會	助理管理師	水庫水權等管理
12.南區水資源局	副工程司	大壩安全調查
13.台電大甲溪發電廠	觀測股長	本廠各水庫監測儀器之觀測工作
14.台電大觀溪發電廠	土木工程師	土木結構物維修
15.台電卓蘭發電廠	土木課長	土木工程監督
16.台電明潭發電廠	土木工程師	主辦觀測業務
17.台電桂山發電廠	主辦機械員、土木工程人員	機械主辦、土木主辦
18.台電東部發電廠	土木課長	土木工程監督
19.台電萬大電廠	土木股長	發電廠、水庫、水路等土木設施維護
20.屏東農田水利會	助工師	水庫巡防操作管理

7. 請問貴單位目前負責監測計畫之人員數量？

➤ (單選)：

選項	1人	2人	3人	3人以上
選擇次數	5	7	1	7

8. 請問貴單位目前負責監測計畫之人員接觸本業務平均時間？

➤ (單選)：

選項	1年以內	1~3年	3~5年	5年以上
選擇次數	0	3	3	13

9. 請問貴單位目前負責監測計畫之人員背景專長？

➤ 人員背景專長(複選)：

選項	水利工程	土木工程	結構工程
選擇次數	2	13	0
選項	大地工程	水土保持工程	其他
選擇次數	1	1	10

【註】其他為石門水庫-機電工程、新山水庫-管線機電工程、白河水庫-電機工程
鯉魚潭水庫-普考農藝升等考、直潭壩與青潭堰-機電工程、金門水廠-電子工程
明潭發電廠-森林科與建築工程科與農藝科、台電桂山電廠-水工機械
台電萬大電廠-土木測量、龍巒潭水庫-機械工程

10. 請問貴單位目前負責監測計畫之人員曾接受之相關訓練？

➤ (複選)：

選項	水庫安全評估	監測計畫規劃	監測儀器操作維護	監測資料歸納分析	其他
選擇次數	13	0	4	1	2



11. 請問貴單位目前負責監測計畫之人員最想接受之相關訓練？

管理單位	最想接受之相關訓練
1.台北翡翠水庫管理局	水庫安全評估、監測計畫規劃、地震評析
2.經濟部水利署北區水資源局	監測資料歸納分析
3.自來水公司第五區管理處	
4.自來水公司第一區管理處	
5.嘉南農田水利會白河水庫管理所	
6.嘉南農田水利會烏山頭管理處	監測儀器操作訓練
7.經濟部水利署中區資源局	監測資料歸納分析、資料庫處理、遠端資料的擷取
8.台北自來水事業處	相關監測計畫規劃及儀器操作維護
9.金門縣自來水廠	
10.南區水資源局牡丹水庫管理中心	監測資料歸納分析
11.南投農田水利會	
12.南區水資源局	
13.台電大甲溪發電廠	監測資料歸納分析
14.台電大觀溪發電廠	監測資料歸納分析與研判
15.台電卓蘭發電廠	水庫安全評估
16.台電明潭發電廠	監測計畫規劃、監測資料歸納分析等訓練
17.台電桂山發電廠	水庫安全評估及監測計畫規劃
18.台電東部發電廠	水庫安全評估
19.台電萬大電廠	監測計畫規劃、監測儀器操作維護、監測資料歸納分析
20.屏東農田水利會	

12. 請問貴單位管理之蓄水庫目前所辦理監測計畫之執行方式？

> (單選)：

選項	自行辦理	委外辦理	兩者並行
選擇次數	12	2	5

13. 貴單位管理之蓄水庫目前所辦理監測計畫之平均年度經費？(含維修費用，自行辦理者則僅需估計維修費用)

> (單選)：

選項	100萬 以下	100萬~200萬	200萬~300萬
選擇次數	11	2	2
選項	300萬~400萬	400萬 以上	
選擇次數	1	3	



14. 貴單位管理之蓄水庫目前所辦理監測計畫之執行監測項目(物理量)有哪幾項?
(複選):

選項	目測檢視	水位高程	水壓量測	滲流及滲漏	<u>位移</u>
選擇次數	19	16	10	14	14
選項	應力應變	溫度	地震	後拉式預力 地錨載重	其他
選擇次數	8	3	14	2	2

【註】其他為石門水庫-山脊傾斜孔、地下水位、滲漏排水量、擺線儀
仁義潭及蘭潭水庫-層別沉陷、傾斜變位、表面沉陷



2. 監測系統及監測項目

2.1 目視檢查

15. 請問貴單位目前所辦理監測計畫中是否執行目視檢查項目？

> (單選)：

選項	是	否
選擇次數	20	0

16. 請問貴單位執行目視檢查曾經出現之異常現象為何？

> (可複選)：

> 主壩

選項	龜裂	位移	沉陷	獸穴
選擇次數	6	1	1	1
選項	坡面侵蝕	坡面不穩定	有滲流水流出	不適當之堆積
選擇次數	5	0	6	3
選項	混凝土劣化情況	混凝土濕斑	接縫不良	不適當植生
選擇次數	2	2	1	4
選項	過去維修痕跡	其他		
選擇次數	5	4		

【註】其他為翡翠水庫-混凝土表面有部分爆出現象，惟經評估後不影響結構安全

石門水庫-溢洪道出口面有雜草(已清除)

新山水庫-下游坡面堆石風化

牡丹水庫-壩頂人行道地磚崩裂

> 壩基座

選項	龜裂	位移	沉陷	過去維修痕跡
選擇次數	0	0	0	4
選項	混凝土劣化情況	混凝土濕斑	接縫不良	其他
選擇次數	1	2	1	3

【註】其他為翡翠水庫-無

茶華壩-右壩座山脊排水孔有濕滲銹痕跡(觀測中，無含砂)

鯉魚潭水庫-邊緣於風災後土石滑落

> 壩內廊道隧道

選項	混凝土龜裂	混凝土劣化情況	表面缺失	位移
選擇次數	2	1	1	0
選項	接縫不良	無照明	無通風	無洩排水孔
選擇次數	2	1	0	0
選項	排水孔堵塞	混凝土濕斑	其他	
選擇次數	2	3	4	

【註】其他為翡翠水庫-混凝土表面有部分爆出現象，惟經評估後不影響結構安全



榮華壩-廊道有施般白華現象
鯉魚潭水庫-混凝土有裂縫
台電大觀電廠-碳酸鈣結晶

➤ 壩區產業道路與護牆

選項	混凝土劣化情況	混凝土濕斑	接縫不良	不適當植生
選擇次數	1	0	1	1
選項	有滲流水流出	不適當之淤積	沖蝕	差異沉陷或錯動
選擇次數	0	1	2	1
選項	過去維修痕跡	其他		
選擇次數	4	1		

【註】其他為翡翠水庫-無

➤ 溢洪道邊坡

選項	混凝土劣化情況	混凝土濕斑	接縫不良	不適當植生
選擇次數	1	1	0	1
選項	有滲流水流出	不適當之淤積	沖蝕	差異沉陷或錯動
選擇次數	2	4	1	1
選項	過去維修痕跡	其他		
選擇次數	2	1		

【註】其他為石門水庫-依山閣前廣場、溢洪道表面，前者出現 AC 路面裂縫，經查為原設計伸縮縫不會造成大壩安全疑慮；後者為混凝土表面剝損，研判係混凝土老化，現已修補完成。

17. 請問貴單位執行目視檢查區域或路線如何決定？

➤ (可複選)：

選項	地毯式之目視搜索異常現象	經計算分析後可能出現異常現象之區域	經其他監測儀器反應異常現象後持續追蹤者	經目視察覺異常現象後持續追蹤者
選擇次數	11	1	8	15

18. 請問貴單位執行目視檢查之頻率為何？

➤ 平時 (單選)：

選項	每日 2 次	每日 1 次	每週 2 次	每週 1 次	每月 2 次
選擇次數	2	0	3	3	0
選項	每月 1 次	每季或於安全評估施作		依特定區域有所不同	
選擇次數	5	7		0	

➤ 警戒 (單選)：

選項	每日 2 次	每日 1 次	每週 2 次	每週 1 次	每月 2 次
選擇次數	3	6	1	1	2
選項	每月 1 次	每季或於安全評估施作		依特定區域有所不同	
選擇次數	0	3		2	



【註】其他為翡翠水庫-颱風事件前後或地震發生 3 級 (15 gal) 以上
石門水庫-颱風前後及豪雨後加強

19. 請問貴單位是否曾因目視檢查發現異常現象後啟動之應變計畫?

> (單選):

選項	是	否
選擇次數	4	16

20. 請問貴單位目視檢查異常現象紀錄彙整及追蹤頻率?

> (可複選):

選項	每週 1 次	每月 2 次	每月 1 次
選擇次數	0	1	6
選項	每季或於安全評估施作	依特定區域有所不同	
選擇次數	8	4	

【註】其他為翡翠水庫-依異常狀況需要適時辦理

仁義潭及蘭潭-每日 1 次(1022 大地震後滲流水現象)

21. 請問貴單位執行目視檢查紀錄如何存檔?

> (可複選):

選項	定性文字描述	以輔助工具丈量並加相片	兩者皆有	其他
選擇次數	11	2	8	1

【註】其他為仁義潭及蘭潭-於水庫巡查記錄簿登寫

2.2 水位高程及水壓量測

22. 請問貴單位目前所辦理監測計畫中是否執行水位高程及水壓量測監測項目?

> (單選):

選項	是	否
選擇次數	13	7

23. 請問貴單位於執行水位高程及水壓量測監測可能目的為何?

> (可複選):

選項	記錄區域地下水位變化	記錄特定區域之超額孔隙水壓	記錄浸潤線高程
選擇次數	11	7	3
選項	評估帷幕灌漿、截水牆、截水溝、不透水填土層及其他滲漏控制措施之有效性	評估解壓井、趾部排水、直立排水、水平排水及其他排水措施之有效性	其他
選擇次數	7	6	1

【註】其他為仁義潭及蘭潭-滲流參考

24. 請問貴單位執行水位高程及水壓量測監測使用工具及目前使用情形為何?



選項	水壩上下游水位尺	裝設數量	毀損數量
選擇次數	翡翠水庫	1	0
	石門水庫	1	0
	蘭潭、仁義潭	1	0
	新山水庫	1	0
	鯉魚潭	1	0
	牡丹水庫	2	0
	台電大甲溪發電廠	5	0
	台電明潭發電廠	1	0
	台電萬大電廠	2	0
選項	壩體水位觀測井	裝設數量	毀損數量
選擇次數	蘭潭、仁義潭	46	2
	新山水庫	11	0
	鯉魚潭	3	2
	直潭壩與清潭堰	3	0
	台電明潭發電廠	5	0
選項	庫區水位觀測井	裝設數量	毀損數量
選擇次數	翡翠水庫	14	1
	鯉魚潭	19	1
選項	壩體水壓計	裝設數量	毀損數量
選擇次數	石門水庫	30	16
	蘭潭、仁義潭	24	15
	新山水庫	17	0
	白河水庫	3	0
	鯉魚潭	43	7
	牡丹水庫	18	1
	台電明潭發電廠	5	0
	台電萬大電廠	30	1
選項	壩趾水壓計	裝設數量	毀損數量
選擇次數	蘭潭、仁義潭	18	11
	台電明潭發電廠	8	0
選項	基礎水壓計	裝設數量	毀損數量
選擇次數	翡翠水庫	12	2
	鯉魚潭	13	0
	牡丹水庫	17	2
選項	庫區邊坡水壓計	裝設數量	毀損數量
選擇次數	石門水庫	53	1
	台電萬大電廠	5	3



選項	其他	裝設數量	毀損數量
選擇次數	烏山頭水庫	6	0

【註】其他為烏山頭水庫-地下滲流線觀測井

25. 請問貴單位曾裝設(含已毀損)之水壓計種類有哪幾種？

註：同一種類如有分批裝設，請於空白處註明分批數量及裝設時間。

➤ (可複選)：

選項	直管式水壓計	裝設數量	裝設時間	毀損數量	毀損時間
選擇次數	石門水庫	53	民國 52	1	民國 91
	鯉魚潭	9		6	
	台電明潭發電廠	13	民國 82		
選項	氣壓式水壓計	裝設數量	裝設時間	毀損數量	毀損時間
選擇次數	石門水庫	30	民國 52	16	民國 53
	蘭潭、仁義潭	32	民國 75	16	民國 76
	鯉魚潭	56		14	
選項	水壓式水壓計	裝設數量	裝設時間	毀損數量	毀損時間
選擇次數	翡翠水庫	12	民國 76	0	
	台電萬大電廠	30	民國 78	8	民國 88
選項	電阻式水壓計	裝設數量	裝設時間	毀損數量	毀損時間
選擇次數	白河水庫	3	民國 92	0	
選項	振弦式水壓計	裝設數量	裝設時間	毀損數量	毀損時間
選擇次數	蘭潭、仁義潭	10	民國 75	10	民國 88
	新山水庫	17	民國 93	0	
	牡丹水庫	35	民國 84	3	
選項	其他	裝設數量	裝設時間	毀損數量	毀損時間
選擇次數	台電萬大電廠	5	民國 88	3	民國 91

26. 請問貴單位曾裝設(含已毀損)之水壓計之監測方式情形？(自動或人工監測)

➤ (可複選)：

選項	直管式水壓計	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	石門水庫	53	5
	鯉魚潭水庫	3	0
	台電明潭發電廠	13	0
選項	氣壓式水壓計	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	石門水庫	30	0
	蘭潭、仁義潭水庫	16	0
	鯉魚潭水庫	42	0
選項	水壓式水壓計	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	翡翠水庫	0	12
	台電萬大電廠	0	35



選項	電阻式水壓計	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	蘭潭、仁義潭水庫	0	10
選項	振弦式水壓計	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	新山水庫	0	17
	牡丹水庫	35	27
選項	其他	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	0	0	0

27. 請問貴單位毀損之水壓計可能原因為何？

> (可複選)：

選項	濾層堵塞	排氣不良	管材腐蝕
選擇次數	4	1	2
選項	遭受雷擊	其他	
選擇次數	4	2	

【註】其他為石門水庫-地下水位井因豪雨土石坍方覆蓋
鯉魚潭水庫-漏氣;填壩時出現
台電萬大電廠-落石擊中電纜

28. 請問貴單位執行水位高程監測頻率為何？

> 平時 (單選)：

選項	每日 2 次	每日 1 次	每週 2 次	每週 1 次	每月 2 次
選擇次數	3	5	2	0	0
選項	每月 1 次	每季或於安全評估施作		依特定區域有所不同	
選擇次數	2	0		0	

【註】每日 1 次為石門水庫-水庫水位觀測

> 警戒 (單選)：

選項	每日 2 次	每日 1 次	每週 2 次	每週 1 次	每月 2 次
選擇次數	4	5	0	0	0
選項	每月 1 次	每季或於安全評估施作		依特定區域有所不同	
選擇次數	0	0		2	

【註】依特定區域有所不同為翡翠水庫-依颱風或地震事件提高觀測頻率

29. 請問貴單位執行水壓量測監測頻率為何？

> 平時 (單選)：

選項	每日 2 次	每日 1 次	每週 2 次	每週 1 次	每月 2 次
選擇次數	1	2	0	1	2
選項	每月 1 次	每季或於安全評估施作		依特定區域有所不同	
選擇次數	3	0		0	

【註】每月 1 次為石門水庫-地下水位井



> 警戒 (單選):

選項	每日 2 次	每日 1 次	每週 2 次	每週 1 次	每月 2 次
選擇次數	2	0	1	2	0
選項	每月 1 次	每季或於安全評估施作		依特定區域有所不同	
選擇次數	1	0		2	

【註】依特定區域有所不同為翡翠水庫-依颱風或地震事件提高觀測頻率

30. 請問貴單位執行本監測業務發現異常現象後可能採取之因應措施為何？

(可複選):

選項	檢查儀器是否故障	加強鄰近不同類型監測儀器讀取頻率，最常互相校核之監測儀器種類為	綜合其他異常現象進行整體分析研判	其他
選擇次數	12	7	8	1

【註】其他為仁義潭及蘭潭水庫-壩體巡查

鯉魚潭水庫-量測滲漏量之豎管式水位計

2.3 滲流及滲漏

31. 請問貴單位目前所辦理監測計畫中是否執行滲流及滲漏量監測項目？

> (單選):

選項	是	否
選擇次數	14	6

32. 請問貴單位執行滲流及滲漏量監測區域為何？

> (可複選):

選項	壩體	壩基	壩座	水壩附近之岩層	其他
選擇次數	9	6	4	4	2

【註】其他為榮華壩

新山水庫-人工每日量

白河水庫-壩趾

鯉魚潭水庫-壩址地下水

牡丹水庫-蓄水隧道、排水廊道

33. 請問貴單位於執行滲流及滲漏量監測工具為何？

> (可複選):

選項	量水堰	Parshall 引水槽	標度槽	其他
選擇次數	12	0	0	3

【註】其他為翡翠水庫-量水杯

鯉魚潭水庫-水槽率定

龍巒潭水庫-滲流觀測井

34. 請問貴單位於執行滲流及滲漏量是否對水質進行檢測？



➤ (可複選)：

選項	無	酸鹼值	溫度	導電度
選擇次數	10	1	1	1
選項	溶解物質	懸浮物質	礦物變化	其他
選擇次數	1	1	1	4

【註】其他為石門水庫-合以人工目視方式確認水質(是否含砂及沉積物)

仁義潭及蘭潭水庫-注意濁度

新山水庫-氫。93年94年委外辦理水質檢測

鯉魚潭水庫-濁度(看是否有濁水滲出)

35. 請問貴單位執行滲流及滲漏量監測頻率為何？

➤ 平時 (單選)：

選項	每日2次	每日1次	每週2次	每週1次	每月2次
選擇次數	1	6	1	1	3
選項	每月1次	每季或於安全評估施作		依特定區域有所不同	
選擇次數	3	0		1	

【註】依特定區域有所不同為翡翠水庫-自動量測每日1次、人工量測每月2次

➤ 警戒 (單選)：

選項	每日2次	每日1次	每週2次	每週1次	每月2次
選擇次數	3	6	0	1	0
選項	每月1次	每季或於安全評估施作		依特定區域有所不同	
選擇次數	1	0		2	

依特定區域有所不同為翡翠水庫-依颱風或地震事件提高觀測頻率

36. 請問貴單位滲流及滲漏量水質監測頻率為何？請輸入平時監測頻率

選項	無
選擇次數	6

➤ 平時 (單選)：

選項	每日2次	每日1次	每週2次	每週1次	每月2次
選擇次數	0	3	1	1	1
選項	每月1次	每季或於安全評估施作		依特定區域有所不同	
選擇次數	1	0		0	

➤ 警戒 (單選)：

選項	每日2次	每日1次	每週2次	每週1次	每月2次
選擇次數	2	2	0	1	0
選項	每月1次	每季或於安全評估施作		依特定區域有所不同	
選擇次數	0	0		1	

37. 請問貴單位執行本監測業務發現異常現象後可能採取之因應措施為何？

➤ (可複選)：

選項	檢查儀器是否故障	加強鄰近不同類型監測儀器讀取頻率，最常互相校核之	綜合其他異常現象進行整體分析	其他
----	----------	--------------------------	----------------	----



		監測儀器種類為	研判	
選擇次數	12	7	11	1

【註】其他為仁義潭及蘭潭水庫-壩體巡查
鯉魚潭水庫-孔隙水壓

2.4 位移

38. 請問貴單位目前所辦理監測計畫中是否執行位移監測項目？

➢ (單選)：

選項	是	否
選擇次數	15	5

39. 請問貴單位執行執行位移監測項目包含哪些？

➢ (可複選)：

選項	表面位移量測	內部位移量測	裂縫位移量測	其他
選擇次數	11	10	7	2

【註】其他為台電大甲溪電廠-側傾管量測
台電大觀溪電廠-側傾管量測

2.4.1 表面位移量測

40. 請問貴單位執行表面位移量測監測區域為何？

➢ (可複選)：

選項	壩體	壩基	壩座	壩區內邊坡	其他
選擇次數	11	2	5	7	0

41. 請問貴單位於執行表面位移量測監測使用工具為何？

➢ (可複選)：

選項	傳統水準儀及經緯儀測量	光波測距經緯儀	全球定位系統(GPS)	其他
選擇次數	12	6	0	1

【註】其他為牡丹水庫-連通管式

42. 請問貴單位施作表面位移或沉陷監測目的為何？

➢ (可複選)：

選項	為整體性長期觀測均勻佈設監測	於設計或分析之危險區域佈設檢核	於異常現象發生之區域增設檢核	其他
選擇次數	14	2	0	0

43. 請問貴單位表面沉陷監測頻率為何？

➢ 平時 (單選)：

選項	每日 2 次	每日 1 次	每週 2 次	每週 1 次	每月 2 次
選擇次數	0	0	0	1	3
選項	每月 1 次	每季或於安全評估施作		依特定區域有所不同	
選擇次數	5	1		2	



【註】依特定區域有所不同台電東部電廠-每年至少一次
台電萬大電廠-壩體上層表面每半年一次

> 警戒 (單選):

選項	每日 2 次	每日 1 次	每週 2 次	每週 1 次	每月 2 次
選擇次數	2	0	0	3	1
選項	每月 1 次	每季或於安全評估施作		依特定區域有所不同	
選擇次數	3	0		3	

【註】依特定區域有所不同翡翠水庫-依狀況增加觀測頻率
牡丹水庫-每年一次

台電東部電廠-颱風或四級地震後

44. 請問貴單位表面位移監測頻率為何?

選項	無
選擇次數	0

> 平時 (單選):

選項	每日 2 次	每日 1 次	每週 2 次	每週 1 次	每月 2 次
選擇次數	1	0	0	0	3
選項	每月 1 次	每季或於安全評估施作		依特定區域有所不同	
選擇次數	6	1		3	

【註】榮華壩每月 1 次壩頂照準系統

牡丹水庫-每年一次

台電東部電廠-每年一次

台電萬大電廠-壩體上層表面每半年一次

> 警戒 (單選):

選項	每日 2 次	每日 1 次	每週 2 次	每週 1 次	每月 2 次
選擇次數	2	0	0	3	1
選項	每月 1 次	每季或於安全評估施作		依特定區域有所不同	
選擇次數	2	0		3	

【註】翡翠水庫依特定區域有所不同-依狀況增加觀測頻率

台電卓蘭電廠-颱風或四級地震後

45. 請問貴單位表面位移或沉陷基準點校核頻率為何?

> (複選):

選項	每月 1 次	每季 1 次	每半年 1 次	每年 1 次	依特定區域或方法有所不同
選擇次數	3	1	0	3	4

【註】鯉魚潭水庫依特定區域有所不同-基準點設在壩座，假設不動

台電明潭電廠-視實際需求較核基準點

46. 請問貴單位執行本監測業務發現異常現象後可能採取之因應措施為何?

> (可複選):

選項	檢查儀器是否故障	加強鄰近不同類型監測儀	綜合其他異常現象進行整	其他
----	----------	-------------	-------------	----



		器讀取頻率，最常互相校核 之監測儀器種類為	體分析研判	
選擇 次數	12	6	11	0

【註】鯉魚潭水庫-傾斜管

2.4.2 內部位移量測

47. 請問貴單位執行內部位移量測監測區域為何？

➤ (可複選)：

選項	壩體	裝設數量	毀損數量
選擇次數	翡翠水庫	28	0
	石門水庫	4	0
	蘭潭、仁義潭水庫	7	0
	新山水庫	22	6
	白河水庫	3	0
	烏山頭水庫	4	0
	鯉魚潭	3	0
	直潭壩與清潭堰	21	
	牡丹水庫	2	0
	台電大觀溪發電廠	3	0
	台電明潭發電廠	5	0
	台電萬大電廠	2	0
選項	壩基	裝設數量	毀損數量
選擇次數	台電大觀溪發電廠	1	0
選項	壩座	裝設數量	毀損數量
選擇次數	翡翠水庫	61	1
	台電大甲溪發電廠	4	0
	台電明潭發電廠	9	0
選項	壩區內邊坡	裝設數量	毀損數量
選擇次數	石門水庫	3	1
	鯉魚潭	2	0
	直潭壩與清潭堰	10	0
	牡丹水庫	8	1
	台電大甲溪發電廠	7	0
選項	其他	裝設數量	毀損數量
選擇次數	0	0	0

【註】壩體-榮華壩擺線儀



48. 請問貴單位於執行內部位移量測監測儀器為何？

> (可複選)：

選項	傾斜儀	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	翡翠水庫	8	民國 76	0	
	石門水庫	3	民國 79	0	
	仁義潭及蘭潭水庫	7	民國 75	7	
	新山水庫	11	民國 93	0	
	白河水庫	2	民國 92	0	
	烏山頭水庫	1	民國 83	0	
	鯉魚潭水庫	19		0	
	直潭壩與清潭堰	10	民國 86	0	
	牡丹水庫	11	民國 84	1	
	台電明潭發電廠	9	民國 82	3	民國 82
選項	沉陷計	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	蘭潭、仁義潭水庫	7	民國 75	2	
	白河水庫	1	民國 94	0	
	鯉魚潭水庫	2		0	
	牡丹水庫	34	民國 84	13	
選項	伸縮儀	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	翡翠水庫	55	民國 75	1	民國 89
	鯉魚潭水庫	9		2	
	直潭壩與清潭堰	1	民國 10	0	民國 86
	新山水庫	2	民國 93	0	
選項	收斂計	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	0	0	0	0	
選項	其他	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	翡翠水庫	7	民國 73	0	
	石門水庫	4	民國 72	0	

【註】翡翠水庫其他為擺線儀
石門水庫其他為榮華壩擺線儀



49. 請問貴單位曾裝設(含已毀損)之傾斜儀使用情形為何?

註：同一種類如有分批裝設，請於空白處註明分批數量及裝設時間。

➤ (可複選)：

選項	振弦式傾斜儀	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	蘭潭、仁義潭	7	民國 75	0	
	新山水庫	11	民國 93	0	
	台電大甲溪發電廠	12	民國 63	3	民國 76
選項	電阻式傾斜儀	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	0	0	0	0	
選項	電解液式傾斜儀	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	白河水庫	2	民國 92	0	
選項	擺線式傾斜儀	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	石門水庫	3	民國 79	0	
	直潭壩與清潭堰	10	民國 86	0	
	台電大觀溪發電廠	1	民國 72	0	
	台電萬大電廠	2		0	
選項	加速度器式傾斜儀	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	翡翠水庫	8	民國 76	0	
	牡丹水庫	11	民國 84	1	
	台電明潭發電廠	9	民國 82	3	民國 82
選項	其他	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	烏山頭水庫	1	民國 86	0	
	鯉魚潭水庫	1		0	

【註】烏山頭水庫其他為傾斜儀
鯉魚潭水庫其他為傾斜儀



50. 請問貴單位曾裝設(含已毀損)之傾斜儀之監測方式情形?(自動或人工監測)

> (可複選):

選項	振弦式傾斜儀	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	蘭潭、仁義潭	4	3
	新山水庫	0	11
	台電大甲溪發電廠	12	0
選項	電阻式傾斜儀	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	0	0	0
選項	電解液式傾斜儀	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	白河水庫	0	2
選項	擺線式傾斜儀	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	石門水庫	3	0
	直潭壩與清潭堰	10	0
	台電大觀溪發電廠	1	0
	台電萬大電廠	0	1
選項	加速度器式傾斜儀	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	翡翠水庫	8	0
	鯉魚潭	19	0
	牡丹水庫	10	0
	台電明潭發電廠	9	0
選項	其他	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	烏山頭水庫	1	0

【註】其他為烏山頭水庫人工監測

51. 單位曾裝設(含已毀損)之沉陷計使用情形為何?

> (可複選):

選項	電阻式沉陷計	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	新山水庫	2	民國 86	2	民國 86
選項	振弦式沉陷計	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	0	0	0	0	0
選項	應變式沉陷計	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	0	0	0	0	0
選項	壓力式沉陷計	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	0	0	0	0	0
選項	其他	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	白河水庫	1		0	
	鯉魚潭水庫	1		0	
	牡丹水庫	34	民國 84	13	

【註】其他為白河水庫感應式沉陷計，自動監測數量；魚潭水庫 PVC 磁性版



52. 請問貴單位曾裝設(含已毀損)之沉陷計之監測方式情形?(自動或人工監測)

> (可複選):

選項	電阻式沉陷計	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	0	0	0
選項	振弦式沉陷計	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	0	0	0
選項	應變式沉陷計	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	0	0	0
選項	壓力式沉陷計	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	0	0	0
選項	其他	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	白河水庫	0	1
	鯉魚潭水庫	1	0

【註】其他為白河水庫感應式沉陷計，自動監測數量

鯉魚潭水庫 PVC 磁性版

53. 請問貴單位曾裝設(含已毀損)之伸縮儀使用情形為何?

註：同一種類如有分批裝設，請於空白處註明分批數量及裝設時間。

> (可複選):

選項	磁力式伸縮儀	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	0	0	0	0	0
選項	感應式伸縮儀	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	0	0	0	0	0
選項	頻率式伸縮儀	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	0	0	0	0	0
選項	測微計式伸縮儀	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	翡翠水庫	32	民國 76	1	民國 89
選項	測應變式伸縮儀	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	0	0	0	0	0
選項	電位計式伸縮儀	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	0	0	0	0	0
選項	正弦式伸縮儀	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	0	0	0	0	0
選項	LVDT 式伸縮儀	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	牡丹水庫	23	民國 84	2	
選項	其他	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	翡翠水庫	23	民國 75	0	



	台電明潭發電廠	8	3	民國 87
--	---------	---	---	-------

【註】其他為翡翠水庫-電氣式伸縮儀
直潭壩與清潭堰-機械式伸縮儀
台電明潭發電廠-電阻式

54. 請問貴單位曾裝設(含已毀損)之沉陷計之監測方式情形?(自動或人工監測)

> (可複選):

選項	磁力式伸縮儀	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	蘭潭、仁義潭	4	0
選項	感應式伸縮儀	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	0	0	0
選項	頻率式伸縮儀	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	0	0	0
選項	測微計式伸縮儀	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	翡翠水庫	32	0
選項	測應變式伸縮儀	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	0	0	0
選項	電位計式伸縮儀	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	0	0	0
選項	正弦式伸縮儀	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	0	0	0
選項	LVDT 式伸縮儀	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	牡丹水庫	23	23
選項	其他	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	翡翠水庫	0	23
	鯉魚潭	1	0
	直潭壩與清潭堰	10	86

【註】其他翡翠水庫-電氣式伸縮儀自動監測數量 23 組

鯉魚潭-磁力式伸縮版
直潭壩與清潭堰-機械式伸縮儀

55. 請問貴單位曾裝設(含已毀損)之收斂計使用情形為何?

註：同一種類如有分批裝設，請於空白處註明分批數量及裝設時間。

> (可複選):

選項	機械式收斂計	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	0	0	0
選項	測微計式收斂計	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	0	0	0
選項	其他	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	台電明潭發電廠	1	0

【註】其他為台電明潭發電廠-電阻式



56. 請問貴單位曾裝設(含已毀損)之沉陷計之監測方式情形? (自動或人工監測)

> (可複選):

選項	機械式收斂計	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	0	0	0
選項	測微計式收斂計	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	台電明潭發電廠	5	82
選項	其他	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	0	0	0

57. 請問貴單位內部沉陷監測頻率為何?

> 平時 (單選):

選項	每日 2 次	每日 1 次	每週 2 次	每週 1 次	每月 2 次
選擇次數	0	0	0	1	1
選項	每月 1 次	每季或於安全評估施作		依特定區域有所不同	
選擇次數	2	0		0	

> 警戒 (單選):

選項	每日 2 次	每日 1 次	每週 2 次	每週 1 次	每月 2 次
選擇次數	1	0	0	1	0
選項	每月 1 次	每季或於安全評估施作		依特定區域有所不同	
選擇次數	1	0		0	

58. 請問貴單位執行本監測業務發現異常現象後可能採取之因應措施為何?

> (可複選):

選項	檢查儀器是否故障	加強鄰近不同類型監測儀器讀取頻率, 最常互相校核之監測儀器種類為	綜合其他異常現象進行整體分析研判	其他
選擇次數	8	2	7	1



2.4.3 裂縫位移量測

59. 請問貴單位執行裂縫位移量測監測區域為何？

> (可複選)：

選項	壩體表面	裝設數量	毀損數量
選擇次數	鯉魚潭	8	0
	台電大甲溪發電廠	22	0
	台電萬大電廠	18	
選項	溢洪道表面	裝設數量	毀損數量
選擇次數	0	0	0
選項	其他水工結構物表面	裝設數量	毀損數量
選擇次數	鯉魚潭	8	0
	選項	壩內廊道	裝設數量
選擇次數	翡翠水庫	7	0
	台電明潭發電廠	7	0
選項	其他	裝設數量	毀損數量
選擇次數	石門水庫	0	0

【註】其他為石門水庫-溢洪道內廊道

60. 請問貴單位於執行裂縫位移量測監測儀器為何？

> (可複選)：

選項	裂縫計	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	翡翠水庫	7	民國 88	0	
	石門水庫	2	民國 85	0	
	鯉魚潭水庫	16	民國 90	0	
	台電大甲溪發電廠	22	民國 81	0	
	台電明潭發電廠	7	民國 87	0	
	台電萬大電廠	18	民國 94	0	
選項	裂縫標尺	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	0	0	0	0	0
選項	其他	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	台電萬大電廠	9	民國 88	0	

【註】其他為台電萬大電廠-鋼尺量測，94年改為裂縫計



61. 請問貴單位曾裝設(含已毀損)之裂縫計使用情形為何?

註：同一種類如有分批裝設，請於空白處註明分批數量及裝設時間。

➤ (可複選)：

選項	測微計式裂縫計	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	石門水庫	2	民國 85	0	
	鯉魚潭水庫	16	民國 86	0	
	台電大甲溪發電廠	22	民國 81	0	
	台電明潭發電廠	7	民國 87	0	
選項	測應變式裂縫計	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	翡翠水庫	7	民國 88	0	
選項	LVDT 裂縫計	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	0	0	0	0	0
選項	其他	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	0	0	0	0	0



62. 請問貴單位曾裝設(含已毀損)之裂縫計之監測方式情形?(自動或人工監測)

> (可複選):

選項	測微計式裂縫計	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	石門水庫	2	0
	鯉魚潭水庫	16	0
	台電明潭發電廠	7	
選項	測應變式裂縫計	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	翡翠水庫	0	7
	台電大甲溪發電廠	2	20
選項	LVDT 裂縫計	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	0	0	0
選項	其他	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	0	0	0

63. 請問貴單位裂縫沉陷監測頻率為何?

> 平時 (單選):

選項	每日 2 次	每日 1 次	每週 2 次	每週 1 次	每月 2 次
選擇次數	0	1	0	0	1
選項	每月 1 次	每季或於安全評估施作		依特定區域有所不同	
選擇次數	3	1		0	

> 警戒 (單選):

選項	每日 2 次	每日 1 次	每週 2 次	每週 1 次	每月 2 次
選擇次數	0	1	0	1	2
選項	每月 1 次	每季或於安全評估施作		依特定區域有所不同	
選擇次數	0	0		2	

【註】翡翠水庫依特定區域有所不同-依颱風或地震事件提高觀測頻率

64. 請問貴單位執行本監測業務發現異常現象後可能採取之因應措施為何?

> (可複選):

選項	檢查儀器是否故障	加強鄰近不同類型監測儀器讀取頻率,最常互相校核之監測儀器種類為	綜合其他異常現象進行整體分析研判	其他
選擇次數	6	5	6	0



2.5 應力應變

2.5.1 土應力

65. 請問貴單位目前所辦理監測計畫中是否執行土壓力監測項目？

➤ (單選)：

選項	是	否
選擇次數	2	18

66. 請問貴單位施作土壓力監測目的為何？

➤ (可複選)：

選項	為整體性長期觀測均勻佈設監測	於設計或分析之危險區域佈設檢核	於異常現象發生之區域增設檢核	其他
選擇次數	2	0	0	0

67. 請問貴單位執行土應力量測監測區域為何？

➤ (可複選)：

選項	壩體	裝設數量	毀損數量
選擇次數	鯉魚潭水庫		
	牡丹水庫	18	0
選項	壩基	裝設數量	毀損數量
選擇次數	0	0	0
選項	壩座	裝設數量	毀損數量
選擇次數	0	0	0
選項	壩區內邊坡	裝設數量	毀損數量
選擇次數	0	0	0
選項	其他	裝設數量	毀損數量
選擇次數	0	0	0

68. 請問貴單位曾裝設(含已毀損)之土壓計種類有哪幾種？

註：同一種類如有分批裝設，請於空白處註明分批數量及裝設時間。

➤ (可複選)：

選項	氣壓式土壓計	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	鯉魚潭水庫	19		14	
選項	油壓式土壓計	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	0	0	0	0	0
選項	電阻式土壓計	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	0	0	0	0	0
選項	振弦式土壓計	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	牡丹水庫	18	民國 84	0	



選項	其他	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	0	0	0	0	0

69. 請問貴單位曾裝設(含已毀損)之土壓計之監測方式情形?(自動或人工監測)

> (可複選):

選項	氣壓式土壓計	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	鯉魚潭水庫	14	0
選項	油壓式土壓計	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	0	0	0
選項	電阻式土壓計	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	0	0	0
選項	振弦式土壓計	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	牡丹水庫	18	18
選項	其他	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	0	0	0

70. 請問貴單位毀損之土壓計可能原因為何?

> (可複選):

選項	承載過大	材料強度不足	長徑比過大
選擇次數	0	0	0
選項	溫度效應過大	防水性不佳	其他
選擇次數	0	0	1

【註】其他為鯉魚潭水庫-因周圍都是土，推測可能有拱效應，或管子折斷無法平均受力

71. 請問貴單位土壓力監測頻率為何?

> 平時 (單選):

選項	每日 2 次	每日 1 次	每週 2 次	每週 1 次	每月 2 次
選擇次數	0	0	0	0	2
選項	每月 1 次	每季或於安全評估施作	依特定區域有所不同		
選擇次數	0	0	0		

> 警戒 (單選):

選項	每日 2 次	每日 1 次	每週 2 次	每週 1 次	每月 2 次
選擇次數	0	0	0	1	0
選項	每月 1 次	每季或於安全評估施作	依特定區域有所不同		
選擇次數	0	0	0		

72. 請問貴單位執行本監測業務發現異常現象後可能採取之因應措施為何?

> (可複選):

選項	檢查儀器是否故障	加強鄰近不同類型監測儀器讀取頻率，最常互相校核之監測儀器種類為	綜合其他異常現象進行整體分析研判	其他
選擇	2	2	2	0



次數			
----	--	--	--

【註】加強鄰近不同類型監測儀器讀取頻率，最常互相校核之監測儀器種類為-鯉魚潭鄰近的水壓計

2.5.2 應變

73. 請問貴單位目前所辦理監測計畫中是否執行應變監測項目？

> (單選)：

選項	是	否
選擇次數	3	17

74. 請問貴單位施作應變監測目的為何？

> (可複選)：

選項	為整體性長期觀測均勻佈設監測	於設計或分析之危險區域佈設檢核	於異常現象發生之區域增設檢核	其他
選擇次數	3	2	0	0

75. 請問貴單位執行應變量測監測區域為何？

> (可複選)：

選項	壩體表面	裝設數量	毀損數量
選擇次數	0	0	0
選項	溢洪道表面	裝設數量	毀損數量
選擇次數		0	0
選項	其他水工結構物表面	裝設數量	毀損數量
選擇次數	0	0	0
選項	裝設數量	裝設數量	毀損數量
選擇次數	0	0	0
選項	壩內廊道	裝設數量	毀損數量
選擇次數	翡翠水庫	70	7
	石門水庫	16	0
選項	其他	裝設數量	毀損數量
選擇次數	台電大甲溪發電廠		

【註】其他為台電大甲溪發電廠-壩體內部

76. 請問貴單位曾裝設(含已毀損)之應變計種類有哪幾種？

註：同一種類如有分批裝設，請於空白處註明分批數量及裝設時間。

> (可複選)：

選項	振弦式應變計	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	0	0	0	0	0
選項	電阻式應變計	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	翡翠水庫	70	民國 75	7	民國 84



	石門水庫	16	民國 72	0	
	台電大甲溪發電廠	223	民國 63		
選項	其他	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	0	0	0	0	0

77. 請問貴單位曾裝設(含已毀損)之應變計之監測方式情形?(自動或人工監測)

> (可複選):

選項	振弦式應變計	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	0	0	0
選項	電阻式應變計	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	翡翠水庫	0	70
	石門水庫	16	0
	台電大甲溪發電廠	0	233
選項	其他	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	0	0	0

78. 請問貴單位應變監測頻率為何?

> 平時 (單選):

選項	每日 2 次	每日 1 次	每週 2 次	每週 1 次	每月 2 次
選擇次數	0	1	1	0	1
選項	每月 1 次	每季或於安全評估施作		依特定區域有所不同	
選擇次數	0	0		0	

> 警戒 (單選):

選項	每日 2 次	每日 1 次	每週 2 次	每週 1 次	每月 2 次
選擇次數	0	1	0	0	0
選項	每月 1 次	每季或於安全評估施作		依特定區域有所不同	
選擇次數	0	0		2	

【註】翡翠水庫依特定區域有所不同

79. 請問貴單位執行本監測業務發現異常現象後可能採取之因應措施為何?

> (可複選):

選項	檢查儀器是否故障	加強鄰近不同類型監測儀器讀取頻率,最常互相校核之監測儀器種類為	綜合其他異常現象進行整體分析研判	其他
選擇次數	3	2	0	2



2.6 溫度

80. 請問貴單位目前所辦理監測計畫中是否執行溫度監測項目？

> (單選)：

選項	是	否
選擇次數	4	16

81. 請問貴單位執行溫度量測監測區域為何？

> (可複選)：

選項	壩體內部	裝設數量	毀損數量
選擇次數	翡翠水庫	49	15
	頭社水庫	1	0
	台電大甲溪發電廠	36	
	台電大觀溪發電廠	1	
	台電明潭發電廠	5	0
選項	滲流水溫度	裝設數量	毀損數量
選擇次數	頭社水庫	1	0
選項	其他	裝設數量	毀損數量
選擇次數	0	0	0

82. 請問貴單位曾裝設(含已毀損)之溫度計種類有哪幾種？

註：同一種類如有分批裝設，請於空白處註明分批數量及裝設時間。

> (可複選)：

選項	振弦式溫度計	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	0	0	0	0	0
選項	電阻式溫度計	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	頭社水庫	1	民國 69	0	
	台電大甲溪發電廠	36	民國 63	0	
選項	熱偶式溫度計	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	台電大觀溪發電廠	1	民國 72	0	
	台電明潭發電廠	5	民國 82	0	
選項	其他	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	翡翠水庫	49	民國 75	15	84

【註】翡翠水庫-strain gage

>

83. 請問貴單位曾裝設(含已毀損)之溫度計之監測方式情形？(自動或人工監測)

> (可複選)：

選項	振弦式溫度計	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	0	0	0



選項	電阻式溫度計	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	台電大甲溪發電廠	1	0
選項	熱偶式溫度計	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	台電大觀溪發電廠	1	0
	台電明潭發電廠	5	0
選項	其他	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	翡翠水庫	0	49

【註】翡翠水庫-strain gage 自動量測 49 組

84. 請問貴單位溫度監測頻率為何？

> 平時 (單選) :

選項	每日 2 次	每日 1 次	每週 2 次	每週 1 次	每月 2 次
選擇次數	0	2	1	0	0
選項	每月 1 次	每季或於安全評估施作		依特定區域有所不同	
選擇次數	2	0		0	

> 警戒 (單選) :

選項	每日 2 次	每日 1 次	每週 2 次	每週 1 次	每月 2 次
選擇次數	0	1	0	1	1
選項	每月 1 次	每季或於安全評估施作		依特定區域有所不同	
選擇次數	0	0		1	

【註】翡翠水庫依特定區域有所不同

85. 請問貴單位執行本監測業務發現異常現象後可能採取之因應措施為何？

> (可複選) :

選項	檢查儀器是否故障	加強鄰近不同類型監測儀器讀取頻率，最常互相校核之監測儀器種類為	綜合其他異常現象進行整體分析研判	其他
選擇次數	3	1	0	3

2.7 地震

86. 請問貴單位目前所辦理監測計畫中是否執行地震監測項目？

> (單選) :

選項	是	否
選擇次數	13	7



87. 請問貴單位曾裝設(含已毀損)之地震儀種類有哪幾種?

註：同一種類如有分批裝設，請於空白處註明分批數量及裝設時間。

➤ (可複選)：

選項	類比式加速度計地震儀	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	翡翠水庫	20	民國 75	0	0
	白河水庫	2	民國 92	0	
	烏山頭水庫	2	民國 86	0	
	台電大甲溪發電廠	3	民國 63	0	
	台電明潭發電廠	1	民國 82	0	
	台電東部發電廠	2	民國 80	0	
選項	數位式加速度計地震儀	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	石門水庫	3	民國 52	0	
	新山水庫	2	民國 93	0	
	鯉魚潭	1	民國 11	0	
	牡丹水庫	2;2	民國 84; 民國 72	0	
	台電大甲溪發電廠	8	民國 73	0	
	台電萬大電廠	2		2	90
選項	其他	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	石門水庫	2	民國 72	0	
	台電萬大電廠	3	民國 90	0	

【註】其他為台電萬大電廠-數位式加速度計地震儀

88. 請問當地震超過何種程度時貴單位將啟動應變計畫？可能採取之因應措施為何？

➤ 啟動應變計畫時地震震度(Magnitude)： 3 (請註明)

翡翠水庫	3 級 (大於 15 gal)
石門水庫	4 級 25gals
蘭潭、仁義潭	4 級 25gals
新山水庫	3 級以上
白河水庫	3 級以上
烏山頭水庫	1 級以上
鯉魚潭	4 級 25gals
牡丹水庫	4 級 25gals
台電大甲溪發電廠	4 級 25gals
台電大觀溪發電廠	1 級以上
台電明潭發電廠	4 級 25gals
台電萬大電廠	4 級 25gals



因應措施(可複選)：

選項	立刻執行目視檢查	立刻讀取監測儀器	綜合各種讀值及現象 進行整體分析研判	其他
選擇次數	11	9	7	2

【註】翡翠水庫-擺線儀、電氣式伸縮儀、應變計、應力計、無應力應變計、溫度計、上舉壓力計、滲水量測定堰、大壩水位、裂縫計、接縫計

蘭潭、仁義潭水庫-壩體巡查

鯉魚潭水庫-手提電腦接收讀取資料

牡丹水庫-壩體水壓、水平變位、滲漏量、壩基水壓

台電大甲溪發電廠-壩體應變計、應力計、擺線儀

台電明潭發電廠-水里壩自動量測(伸縮儀、地下水位、量水堰)

台電萬大電廠-上揚壓力計、裂縫計、漏水量計、水位計、擺線儀

2.8 後拉式預力地錨載重

89. 請問貴單位目前所辦理監測計畫中是否執行後拉式預力地錨載重監測項目？

> (單選)：

選項	是	否
選擇次數	2	18



90. 請問貴單位曾裝設(含已毀損)之地錨載重儀器種類有哪幾種?

註：同一種類如有分批裝設，請於空白處註明分批數量及裝設時間。

➤ (可複選)：

選項	振弦式載重計	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	0	0	0	0	0
選項	應變計式載重計	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	台電大甲溪發電廠	10	民國 81	0	
選項	液壓式載重計	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	0	0	0	0	0
選項	電阻式載重計	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	台電萬大電廠	18	民國 75~89	5	民國 84
選項	其他	裝設數量	裝設年份	毀損數量	毀損年份
選擇次數	0	0	0	0	0

91. 請問貴單位曾裝設(含已毀損)之地錨載重儀器之監測方式情形?(自動或人工監測)

➤ (可複選)：

選項	振弦式載重計	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	0	0	0
選項	應變計式載重計	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	台電大甲溪發電廠	8	0
選項	液壓式載重計	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	0	0	0
選項	電阻式載重計	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	台電萬大電廠	13	0
選項	其他	人工監測數量	自動監測數量
選擇次數	0	0	0

92. 請問貴單位地錨載重監測頻率為何?

➤ 平時 (單選)：

選項	每日 2 次	每日 1 次	每週 2 次	每週 1 次	每月 2 次
選擇次數	0	0	0	1	0
選項	每月 1 次	每季或於安全評估施作		依特定區域有所不同	
選擇次數	1	0		0	

➤ 警戒 (單選)：

選項	每日 2 次	每日 1 次	每週 2 次	每週 1 次	每月 2 次
選擇次數	0	1	0	0	0
選項	每月 1 次	每季或於安全評估施作		依特定區域有所不同	
選擇次數	0	0		1	

93. 請問貴單位執行本監測業務發現異常現象後可能採取之因應措施為何?

➤ (可複選)：



選項	檢查儀器是否故障	加強鄰近不同類型監測儀器讀取頻率，最常互相校核之監測儀器種類為	綜合其他異常現象進行整體分析研判	其他
選擇次數	2	2	1	1

【註】台電萬大電廠-測傾儀、伸縮計、鋼筋計、邊坡位移觀測

3. 監測頻率

94. 請問貴單位目前所辦理監測計畫中各項儀器監測頻率是否曾依不同營運階段進行調整？

> (可複選)：

選項	否	是，曾於施工期間調整	是，曾於初次蓄水期(初次滿水)調整
選擇次數	4	5	6
選項	是，曾於漸穩期調整	是，曾於穩定期(蓄水後 1~5 年)調整	
選擇次數	5	7	

95. 請問貴單位目前所辦理監測計畫中各項儀器監測頻率是否會依歷年不同階段或遭遇不同特殊事件後進行調整？

> (可複選)：

選項	否	是，於每年蓄水位高峰及低峰期調整	是，於遭受地震、洪水、豪雨及山崩超過一定程度後調整	是，其他
選擇次數	4	2	11	0

4. 監測管理值

96. 請問貴單位目前所辦理監測計畫中各項儀器是否設定監測管理值？

> (可複選)：

選項	否	是，全部皆有	是，但僅部分儀器有
選擇次數	5	7	4

【註】翡翠水庫-擺線儀、電氣式伸縮儀、應力計、無應力應變計、溫度計、上舉壓力計、滲水量測定堰、大壩水位、裂縫計、接縫計

97. 請問貴單位目前所辦理監測計畫中各項儀器監測管理值是否曾依不同營運階段進行調整？

> (可複選)：

選項	否	是，曾於施工期間調整	是，曾於初次蓄水期(初次滿水)調整
選擇次數	6	3	4
選項	是，曾於漸穩期調整	是，曾於穩定期(蓄水後 1~5 年)調整	
選擇次數	5	5	



數		
---	--	--

98. 請問貴單位目前所辦理監測計畫中各項儀器監測管理值是否曾於重大天災(如 921 地震)後進行檢討?是否為全部系統檢討?

➤ (單選):

選項	是, 全部系統檢討	否, 全部未檢討	否, 僅針對部分區域或構造物檢討
選擇次數	3	6	4
選項	否, 僅針對部分破壞模式檢討	否, 僅針對部分類型監測儀器檢討	
選擇次數	0	1	

【註】鯉魚潭水庫-增設溢洪道邊之擋土牆安裝裂縫計-僅針對部分區域或構造物檢討

台電大甲溪發電廠-921 地震全部系統檢討

台電萬大電廠-921 地震全部系統檢討

99. 請問貴單位目前所辦理監測計畫中最常超過監測警戒值之監測儀器為哪些?

➤ (單選):

選項	水庫	不清楚	儀器名稱
選擇次數	翡翠水庫		無
	石門水庫	山脊滲漏排水	
	新山水庫		地震儀
	鯉魚潭		心層水壓計、滲漏量水槽
	牡丹水庫		水壓計
	頭社水庫		
	台電卓蘭發電廠		壩頂位移觀測
	台電明潭發電廠	水里壩右側山脊沉陷、變位量糧測	
	台電東部發電廠		
	台電萬大電廠		荷重計
屏東龍巒潭水庫			

100. 請問貴單位目前所辦理監測計畫中各項儀器使用之監測危險值設定分析時如何定義載重或材料極限狀況?

➤ (可複選):

選項	不清楚	將所有可能載重放到最大
選擇次數	7	4
選項	將所有材料強度以某一折減係數降低	利用情境推演進行載重及材料極限狀況分析
選擇次數	5	5

101. 請問貴單位目前所辦理監測計畫中各項儀器超出管理值時是否皆有既定流程措施因應?



> (單選):

選項	是，全部皆有	否，全部皆無	否，僅部分儀器已擬定
選擇次數	6	4	2

【註】石門水庫-監測管理值於 93 年初訂，目前進入試用階段

鯉魚潭-立即通知委託廠商調查分析，並檢查儀器是否故障失效及維修補植之可行性

5. 監測儀器維護程序

102. 請問貴單位目前所辦理監測計畫中是否執行監測儀器維護？

> (單選):

選項	否	是
選擇次數	1	19

103. 貴單位管理之蓄水庫目前所辦理監測儀器維護之執行方式？

> (單選):

選項	自行辦理	委外辦理	兩者並行
選擇次數	5	2	7

【註】石門水庫-監測資料收集及分析委外進行，監測成果審查及特定問題處置自辦

鯉魚潭-測獨儀器委外辦理及校正，現場設施毀損自辦

台電大甲溪發電廠-平時自行檢查監測儀器，如有問題再送檢修

台電大觀溪發電廠-每次施測時自行檢查監測儀器，若有問題再送修或訂正

台電明潭發電廠-監測儀器校正、維護委外辦理；水壓計校正自行辦理

台電萬大電廠-涉及電子儀器軟體及硬體部分委外辦理

104. 請問貴單位監測儀器維護作業執行頻率為何？

> (複選):

選項	每季 1 次	每半年 1 次	每年 1 次
選擇次數	2	3	5
選項	每 2 年 1 次	其他或依特定區域及儀器有所不同	
選擇次數	0	4	

【註】翡翠水庫-每 2 個月 1 次

白河水庫-遇損壞即請專業廠商維護

鯉魚潭-校正一年一次，其餘則平時自行檢查

台電明潭發電廠-是儀器使用頻率與穩定度而定

105. 請問貴單位目前所辦理監測計畫中各項監測儀器之原廠操作手冊是否完整存檔？

> (單選):

選項	是	否
選擇次數	2	18



106. 請問貴單位目前所辦理監測計畫中各項儀器維護程序包含？

➤ (可複選)：

選項	監測儀器本身或感測器	監測資料擷取器	監測儀器設置之管路或管道	自動化監測資料傳輸設備及線路
選擇次數	14	11	7	10
選項	現地電力設備	監測資料處理系統及儲存設備	其他	
選擇次數	5	10	0	

6. 監測資料擷取分析

107. 貴單位管理之蓄水庫目前所辦理監測資料擷取分析之執行方式？

➤ (單選)：

選項	自行辦理	委外辦理	兩者並行
選擇次數	10	2	4

【註】石門水庫-監測資料收集及分析委外進行，監測成果審查及特定問題處置自辦
鯉魚潭-部分自行擷取資料，再提供顧問公司分析

台電大甲溪發電廠-平時自行擷取分析，如有問題在委託顧問公司

台電大觀溪發電廠-水社、頭社、武界壩沉陷量測及測傾管量測自行辦理，其餘均委外

108. 請問貴單位平時監測資料報告撰寫頻率為何？

➤ (複選)：

選項	每週 1 次	每月 1 次	每季 1 次
選擇次數	0	10	3
選項	每半年 1 次	每年 1 次	其他或依特定區域及儀器有所不同
選擇次數	0	2	3

109. 請問貴單位目前所辦理監測計畫中各項監測儀器之監測資料如何呈現？

➤ (複選)：

選項	單一儀器之歷時呈現	同一類型儀器資料於鄰近空間分佈呈現	相關監測物理量之不同儀器資料於空間分佈或歷時呈現並交叉比對	其他或依特定區域及儀器有所不同
選擇次數	13	6	7	0

110. 請問貴單位目前所辦理監測計畫中不同種類監測儀器之監測資料為何交叉比對？

➤ (複選)：

選項	不清楚	無，不交叉比對	設置位置鄰近
選擇次數	3	1	6



數			
選項	監測物理量間具有相關性	比對物理量皆與某一破壞模式相關	其他
選擇次數	4	2	1

【註】台電卓蘭發電廠-僅一項監測，無交叉比對

111. 請問貴單位目前所辦理監測計畫中訂立管理值時常用何種資料分析方法？

> (複選)：

選項	不清楚	以理論分析之所得之關係式，以推估該監測量之預期值	以監測儀器長期之觀測值，利用迴歸分析方式，建立監測量與影響該量之外在因素間之關係
選擇次數	4	4	7
選項	合併理論分析與統計模式來推估監測量之預期值	將各儀器歷年之監測值經校核篩選後將其上下之最大及最小值連接成包絡線，此包絡線即為對應各該外在因素之預期警戒範圍	其他
選擇次數	6	6	0

7. 非破壞性檢測方法

112. 請問貴單位管理之蓄水庫是否曾使用非破壞性檢測方法進行功能性或安全性評估？

> (單選)：

選項	是	否
選擇次數	6	14

113. 請問貴單位管理之蓄水庫曾使用之非破壞性檢測方法為何？

> (複選)：

選項	折射震測	反射震測	跨孔震測掃描	表面波震測
選擇次數	0	11	0	1
選項	透地雷達	電磁探測	電阻探測	感應偏振
選擇次數	5	0	0	0
選項	自然電位法	磁場探測	重力場探測	其他
選擇次數	0	0	0	2

【註】其他為翡翠水庫-水工機械超音波測厚
石門水庫-敲擊回音法

114. 請問貴單位管理之蓄水庫使用非破壞性檢測方法頻率為何？

> (單選)：

選項	不一定	每週1次	每月1次	每季1次
選擇次數	3	0	0	0



選項	每半年 1 次	每年 1 次	僅於安全評估時施作	其他或依特定區域及儀器有所不同
選擇次數	0	0	4	1

【註】其他為翡翠水庫-水工機械維修時

115. 請問貴單位管理之蓄水庫使用非破壞性檢測方法位置為何？

➤ (可複選)：

選項	壩體表面	庫區邊坡	溢洪道表面
選擇次數	3	1	4
選項	其他水工結構物表面	壩內廊道	其他
選擇次數	0	0	3

【註】壩體表面白河水庫-透地雷達

烏山頭水庫-透地雷達

台電大甲溪發電廠-透地雷達

庫區邊坡白河水庫-透地雷達

溢洪道表面白河水庫-透地雷達

烏山頭水庫-透地雷達

牡丹水庫-透地雷達

庫區邊坡為石門水庫-透地雷達、敲擊回音法

其他為翡翠水庫-水工機械

石門水庫-石門溢洪道內廊道曾實施透地雷達、敲擊回音法

白河水庫-減壓隧道、堰頂

116. 請問貴單位管理之蓄水庫使用非破壞性檢測方法成效為何？

➤ (複選)：

選項	不清楚	很好，極具參考價值	好，具參考價值
選擇次數	1	2	2
選項	普通，可以參考一下	不好，參考用途不大	其他
選擇次數	1	0	0





附錄三 水庫安全監測儀器



附錄三 水庫安全監測儀器

1. 分類之破壞模式與各監測物理量間之關聯性

混凝土壩及土石壩所分類之破壞模式與各監測物理量間之關聯性如下列二表所示：

表 21 混凝土壩潛在破壞模式發生時可能異常之監測物理量

潛在破壞模式	可能異常之監測物理量
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。	目視檢查、壩體垂直與水平位移、壩體應力應變、後拉式預力地錨載重
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。	目視檢查、水庫水位高程及滲流滲漏量、水質檢驗、混凝土入滲與強度檢測
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。	設計容量檢討、目視檢查、水位高程、垂直與水平位移
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。	目視檢查、水位高程及水壓量測、垂直與水平位移、基礎滲流滲漏量、水質檢驗
沿基礎軟弱不連續面之滑動。	壩體垂直與水平位移、壩體及基礎應力應變



表 22 土石壩潛在破壞模式發生時可能異常之監測物理量

潛在破壞模式	可能異常之監測物理量
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	設計容量檢討、目視檢查、水位高程、沈陷量
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	目視檢查、壩體水位高程及水壓量測、壩體垂直與水平位移、壩體或基礎滲流滲漏量、水質檢驗
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	目視檢查、壩體水位高程及水壓量測、滲流滲漏量、水質檢驗
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	目視檢查、基礎滲流滲漏量、水質檢驗
因陡坡、滲流壓力及大量降水所造成之壩體滑動	目視檢查、壩體垂直與水平位移、壩體水位高程及水壓量測
沿基礎中黏土裂縫或斷層之壩體滑動	目視檢查、壩體垂直與水平位移
差異沉陷造成之裂縫	目視檢查、壩體垂直與水平位移
土壤液化	地震強度、壩區總應力及孔隙水壓

2. 土壩監測設備種類

土壩監測設備種類依據量測之物理量可分為壓力、位移、滲流及振動監測四類，如表 23 土壩監測設備量測物理量分類所示。常見之土壩監測設備種類為水壓計、水位觀測井、土壓計、水平變位計、測傾儀、層別沉陷計、表面沉陷點、量水堰及地震儀等，依其設計方式可分為機械及電子兩類，分類一覽請參見表 5~表 8。

➤

➤ 2.1 土壩壓力監測

土壩壓力監測分為水壓監測及土壓監測，水壓量測常見監測設備為水壓計及水位觀測井，土壓量測則為土壓計，對應之量測項目如下：



➤ 水壓監測項目

1. 區域之地下水位。
2. 特殊地質如壩基、壩座及壩址地區中之孔隙水壓力。
3. 壩體或壩基中由於施工或水庫蓄水所引起超額孔隙水壓。
4. 隔幕灌漿、截水牆、截水溝、不透水填土層及其他滲漏控制措施有效性判釋。
5. 解壓井、趾部排水、直立排水、水平排水及其他排水措施有效性判釋。

➤ 土壓監測項目

1. 壩體填方料內土壓力。
2. 主壩作用在溢洪道、取水工或其他附屬結構物上土壓力。
3. 作用於其他擋土結構物土壓力。

➤ 2.2 土壩位移監測

土壩位移監測常見監測設備計有水平變位計、測傾儀、層別沉陷計及表面沉陷點等，對應量測項目如下：

1. 壩基沉陷。
2. 壩體受壓及變形。
3. 壩體、壩座及水庫邊緣潛在性地滑。
4. 附屬結構物位移。

➤ 2.3 土壩滲流監測

滲流量測常見之監測設備為量水堰，滲流可能在趾部排水處、解壓井、水平排水層或其他非預定地方，這些地方可能在壩座、大壩下游區、大壩下游坡面或其他地方。肉眼可觀察之滲漏都應量測該處滲流出口是否存在材料流失，並且檢核懸浮質或溶解質。滲流監測有時也用以推估地表下滲流之型態。

土壩振動監測

振動監測主要量測地震引致壩體及壩基之振動，如加速度、速度及振幅等，振動量測設備為地震儀。此外，為了瞭解水庫興建前後振動特性之變化，亦有在築壩前即進行土壩振動監測，作為蓄水前後振動特性比較。



3. 壓力監測設備

土壩壓力量測常見監測設備為水壓計、水位觀測井及土壓計，各類壓力監測設備構造及原理說明如後。

水壓計

孔隙水壓計設置之目的係測定大壩施工期間及蓄水初期壩基，或壩體土壤中孔隙水壓。填築時期可據此測得孔隙水壓，進而判斷與控制填方速度，當孔隙水壓力超過設計值時，甚至可暫停填築，以免壩體因有效應力減少而發生滑動。此外亦可藉水壓計評估帷幕灌漿之阻水功能。大壩完工蓄水後，藉由孔隙水壓可瞭解壩體滲流變化情況，作為評估壩體安全參考。

根據壓力量測原理，水壓計型式一般可概分為氣壓式、水壓式、電阻式、振弦式及閉口直管式。水壓式水壓計量測砂性土層孔隙水壓具有經濟性及簡易性，然而對於粘性土層則因透水性低，無法即時反應粘土層孔隙水壓狀況。氣壓式及電子式（含電阻式及振弦式）水壓計靈敏度相當高，能迅速反應土層內孔隙水壓變化，不論粘土性或砂土性土層皆適用，尤其電子式水壓計更可達到自動化量測目的。

氣壓式水壓計在構造上以兩條塑膠管線構成壓力通路，因此土壩填築過程中應避免撓曲管線，造成氣體壓力阻塞無法量測，接頭部份也需確實鎖好避免漏氣，由於管線為塑膠材質，應注意長期日曬所造成材質老化。電子式水壓計則應特別注意電纜線接頭防水及焊接，以及系統接地與避雷處理。

➤ 氣壓式水壓計

氣壓式水壓計為裝設並密封於鑽孔內或插入軟土中之透水頭，以兩條塑膠空氣導管連接至測讀器。水壓計頭部感應器由一個以柔性隔膜分成兩區（感應區及量測區）剛性框架所構成，水壓計外部孔隙水壓透過濾石作用至隔膜上。隔膜另一側緊貼在含有兩個小孔（進氣及回氣孔）之平坦防水壁上，構成儀器氣壓區（量測區），並以兩氣導管分別連接進氣孔及回氣孔至測讀器。

氣壓式水壓計測讀採用氣壓式測讀器，測讀時高壓氣體經由進氣管送至儀器量測室並作用於隔膜上，當供氣壓力足夠平衡作用在隔膜上液壓時，隔膜即產生彎曲變形使進氣管



與回氣管形成通路，多餘氣體因此經由回氣管通往測讀器內回氣偵測器，該平衡壓力即可由測讀器壓力錶或數位顯示器測得。

水壓式水壓計

水壓式水壓計構造及原理與氣壓式水壓計類似，僅氣壓式水壓計量測時採用高壓氣體，而水壓式水壓計採用高壓液體。

➤ 振弦式水壓計

振弦式水壓計頭部為一剛性框架，內部以柔性薄膜分隔成感應區及量測區。感應區主要由透水性濾石所構成，外部水壓即透過濾石傳遞至薄膜上；薄膜另一側為量測區，主要由連接至薄膜上鋼弦及磁性線圈所構成，兩者由電纜線連接至測讀箱。當薄膜受水壓作用產生變形，將改變鋼弦張力，導致鋼弦振動頻率改變，量測鋼弦振動頻率變化後，依據出廠時標定振動頻率與壓力關係即可推算外部水壓力大小。

➤ 電阻式水壓計

電阻式及振弦式水壓計一般可合稱為電子式水壓計，電阻式水壓計原理為感應器內部電阻受到外力展開或收縮，利用偵測電阻變化，轉換為土層孔隙水壓力。

閉口式水壓計

閉口式水壓計構造及原理與水位觀測井相同，乃係利用人工於孔口放入管中，量測壩體地下水位，或於管中埋設多組電子式水壓計，利用電子式量測器自動量取地下水位。

➤ 3.2 水位觀測井

水位觀測井安裝目的在於監測壩體及邊坡地下水位變化，進而瞭解滲流情況，作為安全評估參考。水位觀測井原理為地下水從豎管進水孔進入豎管後，水位將會因為水壓平衡作用升降，趨於穩定後再由豎管內量測該處地下水位。

水位觀測井可分為機械式及電子式兩種，機械式為閉口式觀測井，由不織布濾材（或外覆數層尼龍網）包住切槽型管（或鑽洞型管）作為地下水路徑，藉由量測管口至自由水面距離變化計算水位昇降，一般可利用簡單附尺式電子感應器或利用導線連接電流計或伏特計來直接量測井內水之深。而電子式水位觀測井則是安裝（埋設）一組或多組電子



式水壓計至不同深度，讀取地下水位。

➤ 3.3 土壓計

土壓計又稱總壓力計，設計目的為量測壩體內總壓力分佈，或壩體與混凝土或其他剛性結構物接觸壓力大小。設置上一般將數個土壓計於水平方向排成一列，測定堆填體內部拱效應大小，或將數個土壓計以不同角度埋設在同一處，測定該處應力狀態。土壓計之安裝目的在於量測大壩填方施工時以及蓄水後應力狀況，作為評估壩體安全參考。

依壓力量測方法不同，一般土壓計可分為氣壓式、油壓式、電阻式及振弦式，其量測原理與水壓計類似，主要由受壓面板、管線、接頭所組成，受壓面板填充比重較大之液體，如水銀。各種土壓計之差異在於物理量量測設計方式，當土壓計受壓時，所產生訊號藉由連接之電纜線或壓力管等設計傳送至量測器，再將土壓計產生之訊號轉換成數值顯示。氣壓式及油壓式土壓計埋設時應注意管線撓曲情形及接頭部份是否有漏氣現象，而電阻式及振弦式土壓計應注意接頭防水及系統接地避雷處理。

➤ 氣壓式土壓計

氣壓式土壓計係由兩片圓形薄鋼板組成，圓周以氬電弧焊接，並以銅管與氣壓式感應器連接，壓力計本體內部充填液壓油。感應器採低體積變化設計，由橡皮隔膜及閥門所組成，藉由一條採聚乙烯被覆之尼隆二氣導管連接至測讀器。氣壓式土壓計之操作原理如同氣壓式水壓計，利用外加氣壓來平衡壓力計內部之液壓後量得對應之土壓值。

➤ 油壓式土壓計

油壓式土壓計其構造及原理與氣壓式土壓計類似，僅氣壓式土壓計量測時填充物為高壓氣體，而油壓式土壓計填充物為重油。

➤ 振弦式壓計土

振弦式土壓計本體為兩片不同厚度的圓形銅板，以氬電弧焊接形成之承壓板，並在圓周設置一道凹槽以減少土壓計本體慣量，承壓板內則充填液壓油，以管路連接至振弦式感應器。感應器為剛性框架，內部以柔性薄膜分隔成感應區及量測區，土體壓力透過填充液壓油傳遞至薄膜上。薄膜另一側為量測區，主要由連接至薄膜上之鋼弦及磁性線圈所構成，並以電纜線連接至測讀箱。當薄膜受壓產生變形時，將改變鋼弦張力，因而導致



鋼弦振動頻率改變，量測鋼弦振動頻率變化後，依據出廠時標定之振動頻率與壓力關係即可推算出外部壓力大小。

➤ 電阻式土壓計

基本上電阻式土壓計外觀與振弦式土壓計幾乎相同，但內部基本構造存在有些許差異，主要在於電阻式土壓計工作原理乃採用惠斯敦電橋方式運作，利用相互搭接之電阻受外力擠壓而使內部電阻值改變，由電阻值變化推算對應於之實際承壓力大小。

4. 位移監測設備

土壩位移常見監測設備為水平變位計、測傾儀、層別沉陷計及表面沉陷點，茲將各類位移監測設備構造及原理說明如後。

水平變位計

水平變位計用來量測土壩壩體內部兩點間相對變位，可單獨裝設或數組串連裝設以量測得壩體內應變分佈。水平變位計安裝目的在於量測壩橫斷面或沿壩軸方向水平位移量，橫斷面位移量有助於了解壩體邊坡滑動大小，壩軸方向量測則有助於偵測裂縫存在，兩者可作為評估壩體安全參考。依變位量測方法不同，水平變位計可概分為電阻式、電位計式、及振弦式三種。三者基本構件為錨定板（錨定頭）、延伸桿及保護套管等。

➤ 電阻式水平變位計

安裝電阻式電位計於填滿油之密封體內，組成電阻式水平變位計，此電阻式電位計與操作桿（活塞）連結，操作桿（活塞）位置可藉由標定過的攜帶型數位式測讀器直接量測其位移量。

➤ 電位計式水平變位計

電位計式水平變位計本體主要由一組線性可變測微變壓器組成，藉由鋼製延伸桿獲得所需量測長度，延伸桿外部利用 PVC 套管保護，消除延伸與周圍材料間摩擦力，變位計兩端則分別固定在錨定板，貫入並固定於周圍土體內。電位計式水平變位原理為當感應偵測器內部電位計由於受外力而滑動時，會產生電位變化，由此電位變化轉換為壩體水平變位量。



➤ 振弦式水平變位計

振弦式水平變位計基本外觀與其他型式水平變位計相同，但工作原理為利用應變前後弦振動頻率變化轉換為量測應變。

➤ 4.2 測傾儀

測傾儀被設計於量測埋設於地底測傾管傾斜角度，而量測得土壩壩體或邊坡等水平變位，進而瞭解壩體內部或不同性質地層間相對位移。測傾儀安裝目的在於量測壩體內部側向變位情形，以評估有無潛在滑動面發生。

依量測原理，測傾儀可分為振弦式、擺垂式（電阻式）及伺服加速計等，其中振弦式測傾儀原理與前述各類振弦式監測儀器工作原理類似。擺垂式（電阻式）測傾儀係利用銅擺滑動，進而摩擦電阻板達到電阻值改變之目的，由其電阻值變化推算出角度值。伺服加速計測傾儀則在內部裝有兩組正交伺服加速計，可同時量兩垂直向上測點間傾斜角度或相對變位，檢測器本體由不鏽鋼防蝕材料構成，內設重力偵測感應器於固定量測方向，檢測器裝有兩組導輪，導輪側附加張力彈簧，使導輪於量測時能緊貼導槽沿固定方向前進，確保量測精度。

無論何種型式測傾儀，埋設於地底的測傾管基本上皆由雙向固定軌道觀測管、觀測管接頭及保護蓋所組成。鋁、塑膠或 ABS 製測傾管管壁內含兩組正交軌道凹槽；測傾管接頭功能為銜接兩支固定軌道觀測管，有固定式接頭及活動式接頭兩種類型，前者僅作銜接功用，後者除具有銜接功能外尚具伸縮功能，可兼以量測土層壓縮量；保護蓋則來封閉觀測管底部及蓋住觀測管頂部。

➤ 4.3 層別沉陷計

層別沉陷計藉由一系列套裝於導管或測傾管的測沉鈹量測高程變位，用以瞭解壩體內部垂直變位量大小及分佈。層別沉陷計為電磁感應式，其量測原理係將一支連接在特製測尺的探測器放入導管（或測傾管內），感應測沉鈹位置，當探測器移動至測沉鈹所在位置時因受到磁環磁場感應，產生信號傳回測尺軸內部簧片闖關而發出信號，直接由當時測尺標記量得測沉鈹至管口距離。利用各測沉鈹至管口距離算出相鄰兩片測沉鈹間相對距離，比較各次之量測結果即可瞭解兩片測沉鈹間土應變相對位移量（或沉陷量），以



及各測沉鈹相對於最深處測沉鈹的累積沉陷量。

➤ 4.4 表面沉陷點

表面沉陷點設置目的為量測壩面或結構物表面沉陷及位移量。表面沉陷點可採人工或自動方式量測，人工量測為區由監測人員攜帶經緯儀與水準儀測讀已埋設的表面沉陷點（基樁）其沉陷及位移量，自動量測則由設置之 ATS 系統、及稜鏡以紅外線遙測方式量測。

5. 滲流及振動監測設備

土壩滲流量測常見監測設備為量水堰，振動量測則為地震儀，量水堰及地震儀構造及原理說明如後。

➤ 5.1 量水土壓

滲流量測係用以量測壩座岩盤、大壩基礎岩盤及壩體滲漏情形。滲漏水經匯集後，藉集水設施輸送至量水堰排除，記錄量水堰之水位高度便可換算該區滲流量大小。同時於監測時需查看滲漏水色是否有混濁現象，以作為壩體安全評估研判。量水堰依其閉口可分為矩形堰及 V 型堰兩種，可採人工或自動方式量測，人工量測係利用不銹鋼尺直接測讀量水堰閉口上方水位高度，然後以堰流公式計算其滲流量；而自動量測則利用安裝於量水堰中的精密型電子式水壓計，依水深自動換算滲流量，惟自動量測時人員必須至量水堰測站查看滲漏水色。

➤ 5.2 地震儀

地震儀的設置目的在於記錄地震來臨時壩基岩盤震度及壩體受震反應，以瞭解地震引起壩體及壩基振動行為，如加速度、速度及振幅，並可透過地震強度設定、驅動自動化量測設備，擷取壩體及壩基監測儀器讀值變化，作為安定分析研判。一般地震儀主要由感應器（受波器）及記錄系統兩個部份所組成，其中感應器係感應地震大小及變化，而記錄系統則記錄受波器感應振動大小及變化。地震儀設計基本原理為慣性定律，如早期水平向鐘擺式地震儀即利用鐘擺慣性作用，直接於滾筒上記錄地震過程。新式電磁式地震儀除利用慣性定律外，並配合電磁感應原理，利用掛於彈簧及阻尼器上磁鐵作為慣性擺，配合線圈之設置，當地震作用時，因磁鐵與線圈相互作用將產生感應電壓，記錄此



感應電壓大小及變化，即可換算地震大小及歷程。另外，地震儀亦可加裝衛星定位系統於觀測房，使儀器記錄地震時間正確性更為提高。

6. 土壩監測設備設置之考慮事項

一座土壩所需最基本的監測設備，應以能及時偵測到可能導致潰壩或嚴重後果之任何異常徵兆為目標。一些有關潰壩或其意外事故研究報告顯示，施作滲流監測、壩體及其附屬結構物位移沉陷點固定頻率監測，可以有效而經濟地監視土壩突發事件演變，而水壓計亦可提供很有價值的監測資訊。

目前並無任何簡單法則，來決定各壩址所必須設置監測設備種類及數量，故決定土壩監測設備種類、數量及所裝設位置，仍然依賴工程師其經驗判斷。本手冊將說明土壩一般監測項目、監測設備選擇上的基本要求、各階段設置監測設備種類、設置考量因素及各類監測設備特性比較，供水庫規劃設計及管理單位參考。

► 6.1 一般監測項目

根據民國 80 年 6 月經濟部所訂「蓄水庫構造物管理基準」，依土壩構造不同，一般監測項目如下：

1. 表面帷幕型：滲水量、變位。
2. 分區型：滲水量、變位。
3. 均質型：滲水量、變位、浸潤線。
4. 壩高超過 30 公尺：地震。

上述所列為土壩監測一般性準則，該項設施多為施工管理目的所設置，完工後繼續作為安全管理之用，其主要項目多由工程師依土壩規模及特性研擬設計選定，配合施工設置。依工程設計或天然環境需要，高度超過 100 公尺土壩應詳細檢討施設所必需其他監測設備，適時辦理監測。監測位置應選在檢討土壩安全性所必要且適當位置，充份檢討監測地點狀況及監測頻率，採用可得到必要精確度且容易觀測的設備及方法辦理，據以裝設自動監測設備。依該管理基準，各項物理量監測方法摘述如後。

1. 滲水量：宜將壩體滲水量與左右岸墩部及壩基下河床等部份分離監測。
2. 變位：壩體表面監測以代表性斷面辦理，依土壩規模及基礎岩盤形狀，增選土壩兩側各斷面一個以上予以計測。



3. 上頂力（滲水壓）：監測土壩孔隙水壓時，宜計測代表性斷面中壓力分佈。
4. 浸潤線：應選土壩代表性斷面一處以上，各斷面由壩軸向下游選擇三點以上計測，藉以掌握上下游方向浸潤線變化。
5. 地震監測：原則上由基礎地盤及壩頂所設置地震儀計測。

➤ 6.2 監測設備選擇之基本要求

一般在水庫監測設備之選擇上，不外乎下列幾點基本要求：

1. 監測設備性能長期穩定。
2. 必須具有滿足實際需要之觀測精度。通過監測設備取得的觀測數據應不受長距離測量及環境溫度變化影響，如果因為這些影響存在而導致觀測誤差，這些誤差應該易於消除。
3. 儀器防潮密封性能良好，在潮濕、環境下甚至在一定水壓力作用下能夠正常工作。
4. 在溫度變化幅度相當大環境中能夠正常工作。
5. 儀器結構牢固，能夠耐受傳輸時振動以及在工地現場條件下埋設安裝時可能遭受碰撞。
6. 良好避雷性。
7. 資料即時性（時效性）。
8. 儀器量測範圍應能符合計畫需求。
9. 其他特殊目的或功能需求。

➤ 6.3 各階段設置之監測設備種類

新建土壩及既有土壩增設監測設備因兩者條件不同，考慮設置監測設備種類亦不一樣，須依壩址特性及計畫需求選擇適宜監測設備種類。

1. 新建土壩較既有土壩有較多監測需求，包括施工階段、第一次蓄水及初期階段等，據以評估土壩安全性。
2. 對新建土壩而言，施工階段可考慮監測設備種類較多，如水壓計、土壓計、水平變位計及層別沉陷計等，而前述埋設於壩體內之監測設備對既有土壩在增設條件上較不適宜。
3. 若發生超過設計階段預估以外邊坡不穩定、滲流或沉陷等意外狀況，應視需要增設



監測設備觀察其後續變化。

4. 與今日科技相比，一些老舊土壩係在較為落後之設計、施工技術及服務功能標準下完成，故其增設監測設備時應依其特性妥適選擇。

➤ 6.4 自動化監測系統概述

由於目前電子設備科技進步，國內新近水庫已逐漸朝向設置自動化監測系統，除可降低人為因素誤差，尚可提昇資料精密度、準確性，有效減少人力浪費，因此自動化監測系統在未來水庫監測作業上將佔有極大實用性。目前常見儀器設備大都可產生電子訊號，所以傳統型式儀器（如豎管式水壓計、傾斜管...等）可利用外加設備達成自動化功能。自動化監測系統最主要設備為訊號擷取裝置，其功能在於將監測設備所輸出訊號（電壓、電流、頻率、電阻等）接入擷取裝置內，並依擷取裝置所設計序列接口排序，經由RS485/232 或數據機、無線資料傳輸器，將訊號傳送至控制室電腦設備中處理儲存。

➤ 6.5 土壩監測設備設置之考慮、事項

土壩監測設備設置應考慮事項將如下所述，供水庫規劃設計及管理單位參考。

1. 每座壩址均具有其獨特性，工程師應依據計畫需求評估、訂定各種監測形式，進而考慮採用何種形式、製造廠商及儀器埋設詳細方法。考慮因素包括因故障無法得到監測資料的風險、安裝成本、精度需求、監測期程、環境條件、資料分析等。成本不僅包括儀器本身，亦應考慮埋設成本、日後依計畫執行監測、資料處理及校對等人事成本。監測設備系統準確性及靈敏度則應依監測計畫相關之結構及地工準則加以設定。
2. 土壩監測設備選擇應依其活動性、防水性、抗塞性、長期安定性及輸出訊號適當性等重要細節加以決定，在系統設計時期應詳細考慮設備服務能力、施工共存性、電纜路線配置、閃電保護及機械保護等重要因素。
3. 為了瞭解壩體行為，監測設備通常依照土壩橫斷面、平面、壩軸平行垂直面規劃佈置。一個土壩的橫斷面可假設應變為接近平面應變，二維變形分析結果可用來與此橫斷面所得監測資料相互比較，二維滲漏分析亦可用來與橫斷面水壓計等壓線監測結果比較。壩面等變位線可由表面沉陷點監測資料繪得，與初始平面相互對照，沿壩軸線表面沉陷曲線則可反應土壩基礎沉陷情形。



4. 監測設備設置除應考慮壩高及壩長之外，更重要的是應依照壩址特性（如地質條件）、壩體設計、是否位於地震頻繁區及其他需求詳細分析評估後購置裝設。

➤ 6.6 各類型監測設備特性比較

依土壩監測設備構造及原理，將常用各類型監測設備特性整理於表至表；常用各類型感測器特性整理如表，供水庫規劃設計及管理單位選擇土壩監測設備時參考。



表 23 土壩監測設備量測物理量分類

監測物理量	監測設備種類
壓力	水壓計、水位觀測井、土壓計
位移	水平變位計、測傾儀、層別沉陷計、表面沉陷點
滲流	量水堰(水壓計、水位觀測井)
振動	地震儀

表 24 土壩監測設備種類一覽表

監測設備型式		水壓計	水位觀測井	土壓計	水平變位計	測傾儀	層別沉陷計
機械類	氣壓式	○		○			
	液壓式	○		○			
	機械式		○				
電子類	電阻式	○		○	○		
	振弦式	○		○	○	○	
	閉口直管式	○					
	電位計式				○		
	擺垂式(電阻式)					○	
	伺服加速度計					○	
	電磁感應式						○
	電子式		○				

註：1.表面沉陷點以人工或ATS系統自動量測。

2.量水堰以人工或精密型自動水位計量測溢流水深，以堪流公式計算滲流。



表 5 常用水庫安全監測儀器表(一)

安全監測儀器名稱	量測物理量	量測技術	感測器/傳感器 (Sensor /Transducer)
梁式感測器 (Beam Sensor)	梁兩端之差異變 位	將鋁製梁式感測器固定於結 構桿件兩端監測	電解液式傾斜感測器 (Electrolytic tilt sensor)
收斂計 (Convergence Meter)	岩石或混凝土表 面兩點間距離變 化量	以量測點間固定之刻度計 (Dial gauge) 或數位尺進行 監測	機械式刻度計 (Mechanical dial gauge)、 刻度測微尺 (Dial micrometer)
裂縫計 (Crack meter)	混凝土裂縫寬度 之擴張或收縮	對裂縫寬度監測	格線尺、測微尺、刻度計、測微計 (LVDT)、振弦式、 頻率輸出感應式 (Inductive sensor with frequency output)、 線性電位計式 (Linear potentiometer)
手動傾斜計 (Inclinator, manual)	鑽孔之側向位移	於鑽孔中利用傾斜計探頭量 測不同深度之傾斜量	重力參考式伺服加速度計 (Gravity-referenced servo-accelerometer)、 磁致伸縮式感測器 (Magnetostrictive sensor)
置入式傾斜計 (Inclinator, In-place)	鑽孔之側向位移	於鑽孔中不同深度裝置多重 傾斜計感測器探頭同時量測 之不同深度傾斜量	重力參考式伺服加速度計 (Gravity-referenced servo-accelerometer)、 磁致伸縮式感測器 (Magnetostrictive sensor)、振弦式、 電解液式傾斜感測器 (Electrolytic tilt sensor)



表 6 常用水庫安全監測儀器表(二)

安全監測儀器名稱	量測物理量	量測技術	感測器/傳感器 (Sensor /Transducer)
接點計 (Joint meter)	混凝土接縫處之 擴張或收縮	固定於混凝土接縫處兩側進 行量測	測微計 (LVDT)、振弦式、 頻率輸出感應式 (Inductive sensor with frequency output)
載重計 (Load cell)	作用於載重計之 垂直載重	將載重計設置於土體與結構 物間進行量測	液壓式、振弦式、 阻抗變計 (Resistance strain gauge bridge)
渠道流量計 (Open channel flow meter)	渠道流量改變量	量測量堰 (Weir) 或引水槽 (Flume) 之水位高	沒入式壓力傳感器 (Submerged pressure transducer)、 超音波水位傳感器 (Ultrasonic level transducer)、流動計 (Float gauge)
水壓計 (Piezometer)	孔隙水壓力及上 舉壓力	開放式立管水位或水壓量 測；或錨定於土體中之壓力計	水位尺、氣壓式、液壓式、振弦式、線性電位計式 (Linear potentiometer)
垂線、倒置擺錘 (Plumb line, Inverted pendulum)	壩體對應垂線之 側向位移	利用由壩頂懸吊且固定於壩 基之垂線進行量測	光學兩極真空管陣列 (Optical diode array)、 電容式感測器 (Capacitive sensor)



表 7 常用水庫安全監測儀器表(三)

安全監測儀器名稱	量測物理量	量測技術	感測器/傳感器 (Sensor /Transducer)
探針式伸張儀 (Probe extensometer)	鑽孔內之伸張或 收縮變化量	將探針錘入鑽孔中感測埋設 於套管外之磁式或感應式標 的	磁式、感應式、頻率輸出感應式、磁致伸縮式
桿式伸張儀 (Rod extensometer)	鑽孔內之伸張或 收縮變化量	測桿錨定於鑽孔並將桿底變 位傳導至地表固定點	測微尺、刻度計、測微計 (LVDT)、振弦式、 線性電位計式 (Linear potentiometer)
沉陷計 (Settlement gauge)	預測點對應已知 點之沉限量	量測管中水位或水壓	振弦式、應變計式、壓力計式、光學式測讀水位
土體伸張儀 (Soil extensometer)	回填或原生土壤 之水平伸張收縮 變化量	測桿或測纜一端錨定後回填 埋設於土體中進行量測	測微尺、刻度計、測微計 (LVDT)、振弦式、線性電位計式
應變計 (Strain gauge)	混凝土或結構桿 件之應變	應變計埋設於混凝土或焊接 於鋼構桿件進行量測	振弦式、阻抗應變計



表 8 常用水庫安全監測儀器表(四)

安全監測儀器名稱	量測物理量	量測技術	感測器/傳感器 (Sensor /Transducer)
應力計 (Stress gauge)	岩石或混凝土之 應力變化	於鑽孔中設置進行量測	液壓式、振弦式、阻抗應變計
溫度計 (Thermometer)	溫度變化	埋設於混凝土或土體中量測	阻抗量測式、低電壓量測、振弦式
量水堰及引水槽 (Weirs and Flumes)	滲流量	水位量側	沒入式壓力感測器、超音波水位感測器、流動計、水壓計、氣泡式水壓計
傾斜儀 (Tiltmeter)	傾斜變位置	感測器埋設於牆體或固定於 結構桿件上進行量測	力平衡加速度計 (Force balance accelerometer)、振弦式、磁致伸縮式、 電解液式傾斜感測器
總壓力計 (Total pressure cell)	土體中總壓力	感測器隔板埋設於土體或混凝 土結構表面上進行量測	氣壓式、液壓式、振弦式、應變計式
濁度計 (Turbidity meter)	濁度	光之散射	光學式
水質計 (Water quality meter)	酸鹼值、導電度、 溶解固體	依其特定項目不同	依其特定項目不同



表 9 常用感測器特性表

	氣壓式	水壓式	振弦式	電阻式	電位計式
精度(靈敏度)	尚可	尚可	佳	佳	佳
氣候因素(溫/濕度)	無	冰點以下無法量測	溫度因素影響最大	受溫/濕度影響	尚可
傳輸距離	尚可	尚可	佳	長距離可加裝放大器	長距離可加裝放大器
反應速率	尚可	尚可	佳	最佳	最佳
自動化	可	可	可	可	可
雷擊影響	無	無	有影響	有影響	有影響
其他說明	<p>氣壓式管線易因撓曲以及溼氣進入而阻塞故障。施工過程管線易被損壞。無法量測負壓力。</p>	<p>管線有冰點問題。易生青苔阻塞故障，須定期排氣及去青苔，作業費時且無法量測負壓力。</p>	<p>穩定性高，適合自動化。溫度影響可設參數消除誤差。對雷擊保護尤須注意。</p>	<p>反應速率與靈敏度特佳。須注意管線電阻值過大(接線優劣、距離等)。對於雷擊保護也須注意。</p>	<p>反應速率與精度佳。纜線傳訊距離過長時須加裝放大器。須注意雷擊與接地問題。</p>

7. 常見感測器形式

➤ 7.1 電學式感測器

Electrical Resistance Strain Gage

電阻應變計(Electrical resistance strain gage)常用在許多大地工程儀器(geotechnical instrument)之中。電阻應變計基本是導體(conductor)，其電阻與長度呈比例關係(proportional relationship)的。電阻改變量(ΔR)及長度改變量(ΔL)的關係與感測計因子(gage factor, GF)相關：

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} \times GF$$

黏貼式箔片(bonded foil)與黏貼式導線(bonded wire)的感測計因子通常接近 2，而半導體式(semiconductor)則有更大的感測計因子，介於 50 至 200 之間。應變計的壽命取決於安裝、封裝與保護方法。以下將分別簡述基本的電阻應變計：

1. Bonded Wire Resistance Strain Gage

黏貼式導線應變計(Bonded wire strain gage)主要是以五條黃銅-鎳線或鎳-鉻線來回排列黏貼於薄塑膠片(圖 1)，再固定欲量測的材料上。

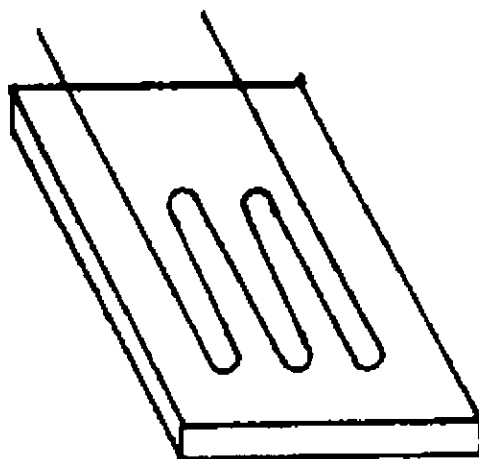


圖 1 黏貼式導線應變計

2. Unbonded Wire Resistance Strain Gage

如圖 2 所示，非黏貼式導線應變計(unbonded wire strain gage)其五條導線並非黏貼固定，僅繞著絕緣體(insulated post)來回排列，且其薄塑膠片是分離的。因為非黏貼式應變計是早期黏貼技術不佳而產生的替代方案，所以此種應變計比起黏貼式應變計較不牢靠，隨著黏膠(cement)改善，非黏貼式應變計已不十分常見。

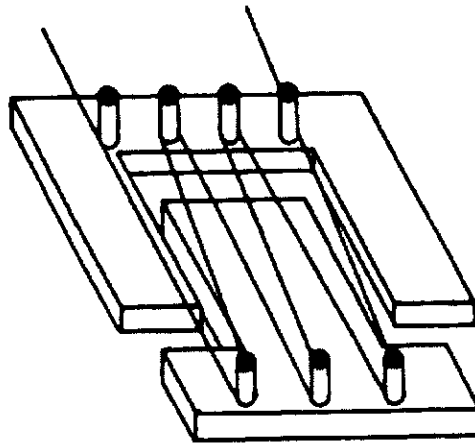


圖 2 非黏貼式導線應變計

3. Bonded Foil Resistance Strain Gage

黏貼式箔片應變計(Bonded foil strain gage)由一個電阻合金的箔片構成，主要黏貼於薄塑性膠片上(圖 3)。再將該膠片固定欲量測的材料上。藉由相配量測材料與箔片的溫度特性可進行溫度補償(temperature compensation)。大部份的電阻範圍由 120 歐姆至 350 歐姆，高的電阻值允許較高的電壓輸入(higher voltage input)，減低外部電阻改變所造成的影響。

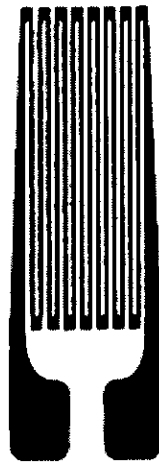


圖 3 黏貼式箔片應變計

4. Semiconductor Resistance Strain Gage

半導體式應變計(Semiconductor gage)採用半導體矽或鍺結晶塗佈，塗佈必須給定結晶特定感測器因子(GF)與溫度係數，當應變施加在結晶上，結晶產生與應變成比例的改變。範圍 50 到 200 的感測器因子使得此種感測器相較於其他類型感測器來得靈敏。然而溫度改變引致誤差，需事先加以校正。雖可藉由選擇正確之感測器種類與使用溫度匹配，但在現地的應用仍不適合大梯度溫度變化的環境。而且半導體式應變計的輸出值非線性(nonlinear)，使得監測應變量受限在 100 微應變(microstrain)以下。

5. Weldable Resistance Strain Gage

可鐸式應變計(Weldable strain gage)在製造時得事先將電阻元件(resistance element)附加在不鏽鋼底板邊緣，該元件習慣上是黏貼式箔片應變計(bonded foil gage)(圖 4)或裝在細管內的應變絲(strain filament)。由於不鏽鋼完整地被封裝且可加以鐸接，相較於黏貼式更適合現地使用。

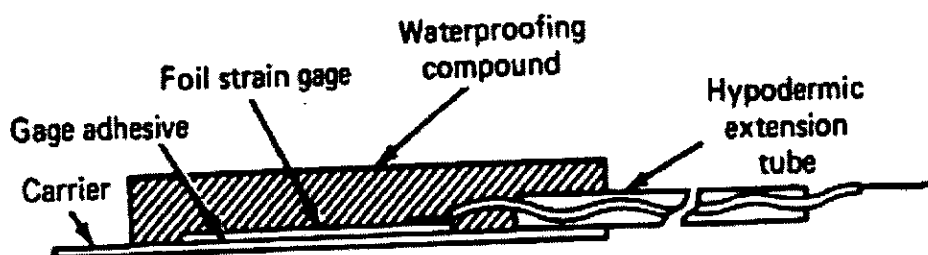


圖 4 可鐸式應變計

6. Wheatstone Bridge Circuits for Use with Electrical Resistance Strain Gages

電阻應變計(Electrical resistance strain gage)輸出值通常是藉由如圖 5 的惠思同電橋(Wheatstone bridge circuit)量測。惠思同電橋的電路通常由四組電阻構成，藉由四組電阻不同的電路配置與量測方式可獲得不同形式的惠思同電橋應用。

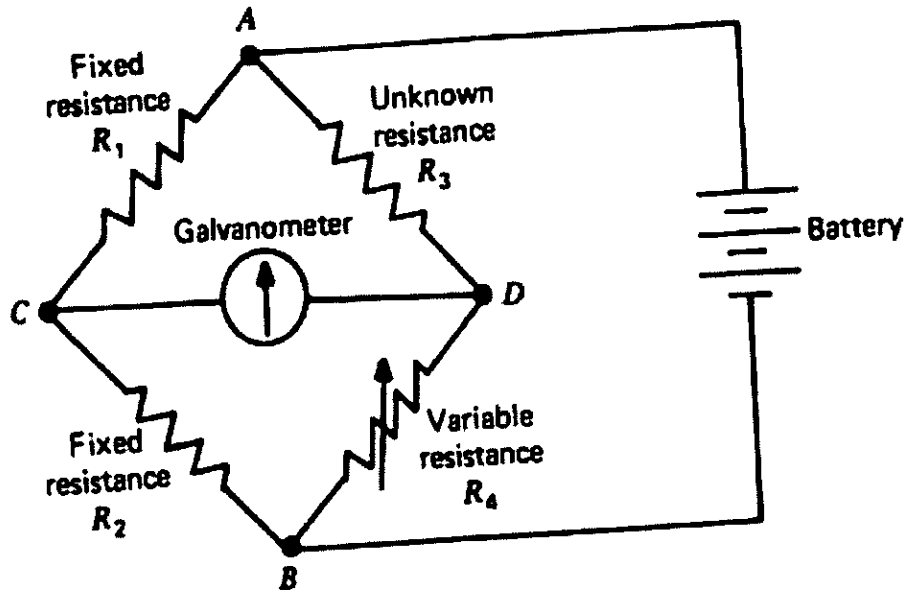


圖 5 惠思同電橋

➤ Linear Variable Differential Transformer (LVDT)

線性可變差位轉換計(linear variable differential transformer, LVDT)通常被用在固定式的孔內伸縮計(borehole extensometer)中與其他量測變形的儀器之中。線性可變差位轉換計(LVDT)包含通過一個主要線圈(primary coil)與兩個次要線圈(secondary coil)的可移動的磁鐵蕊(magnetic core)(圖 6)。提供激發電壓的交流電壓(AC voltage)於主要線圈中，於兩個次要線圈激發感應電壓(inductance voltage)，其感應電壓值隨磁鐵蕊與次要線圈之距離相關。輸出靜電壓(net output voltage)為兩次要線圈的差異值。當磁鐵蕊偏移，輸出靜電壓極性隨位移方向改變，大小則隨磁鐵蕊位移量線性增加。

LVDT 的優點為磁鐵蕊與線圈無接觸，無摩擦力。無磁滯現象(hysteresis)使得 LVDT 特別適合動態移動(dynamic motion)與極小位移(very small displacement)之量測。LVDT 具有良好的抗溼氣、抗鏽蝕能力以及長期穩定性(long-term stability)，能置於填充油的保護殼(oil-filled housing)內以延長使用壽命。然而，交流電流在延長線(lead cable)傳遞時將引發非預期之長纜線效應(cable effect)，而導致訊號嚴重衰減。

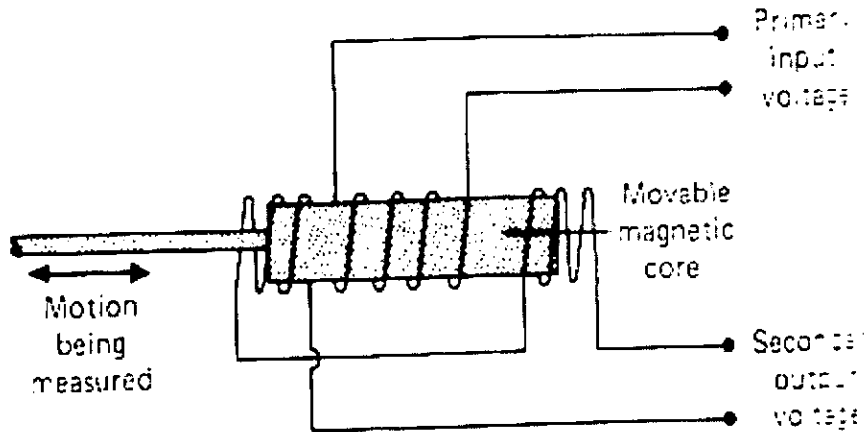


圖 6 線性可變差位轉換計

➤ Direct Current Differential Transformer (DCDT)

直流差位轉換計(Direct Current Differential transformer, DCDT)的用途與LVDT相似，通常用在大地工程領域。其原理乃藉由縮小電路線圈以激發LVDT主要線圈與修正次要線圈。若輸出電壓的元件位於感應器保護殼(housing)內(如圖7所示)，又稱作交流電DC LVDT。

一般 DCDT 的訊號線僅傳輸直流電壓(DC voltage)，以避免 LVDT 交流電流傳輸(transmission)時的長纜線效應。如同 LVDT，直流差變轉換計同樣具有良好的抗溼氣、抗腐蝕(corrison)能力以及長期穩定性，亦能置於填充油的保護殼內以延長使用壽命。

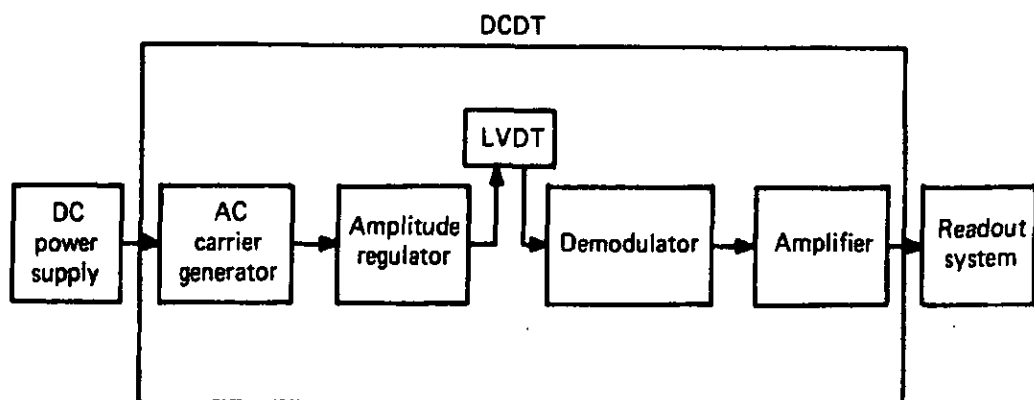


圖 7 直流差位轉換計

➤ Potentiometer

線性形式的電位計(linear potentiometer)是種 LVDT 與 DCDT 的遠端量測(remote measurement)線性變形(linear deformation)的替代方案。旋轉形式的潛勢計則用於量測旋轉位移以及能立即轉換成旋轉位移的線性變形(rotary potentiometer)。

潛勢計結構具有一個電刷(wiper)，該電刷與一固定式電阻片(resistance strip)接觸(圖 8)。潛勢計需由外部提供固定 DC 電壓於電阻片兩端，量測 BC 兩點間電壓作為輸出訊號(output signal)。當電刷由 A 點移向 B 點，造成 A 點與 B 點間的電壓改變。若儀器用來量測線性變形且電刷位置與輸出訊號呈比例關係(proportional relationship)，稱為線性形式的潛勢計。

潛勢計具有讀數簡單，且可藉由高輸出電壓避免長纜線效應或電路雜訊(electrical noise)之優點。若確實封裝(sealed)儀器電刷與電阻片，以避免溼氣侵入，則可成功用於長期量測。然而潛勢計不適合用來量測快速變化的移動量，且長期(long-term)完善封裝潛勢計不易，目前長期量測仍採用 LVDT 與 DCDT 居多。

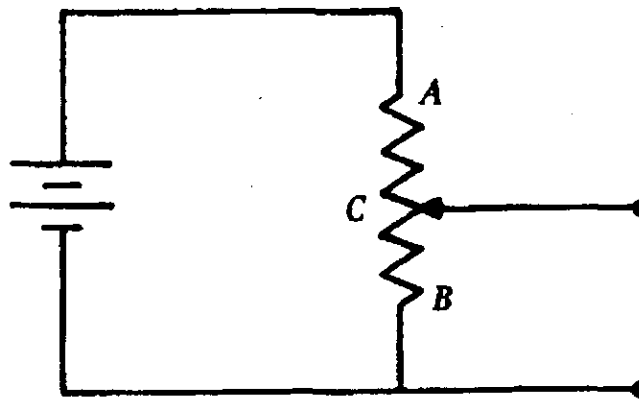


圖 8 線性形式潛勢計

➤ Variable Reluctance Transducer (VRT)

可變磁阻傳感計(variable reluctance transducer, VRT)大多應用在電子式裂縫計(electrical crack gage)與固定式土堤伸縮計(embankment extensometer)內，以量測線性變形。

可變磁阻傳感計結構包含圍繞一可移動(movable)且具導磁性電環之線圈(如圖 9 所示)，該線圈於中間拉出一分接頭(center-tapped)，其量測原理在於交流激發電壓施加於

線圈兩端，使感應DC電壓於分接頭上輸出，若導磁性電環離開中點，則導致兩邊的線圈磁通密度失衡(magnetic flux density imbalance)，使得電壓一邊增加一邊減少，藉以瞭解位移所造成之電壓變化。

可變磁阻傳感計的優點在於利用磁通量變化，對溼度(humidity)的容許程度(tolerance)較大，特別適合如水下安裝(installation below water)，並已經成功地作為裂縫計裝設在混凝土壩上游面(upstream of concrete dam)。然而，LVDT 或 DCDT 藉由適當的封裝，也能於上述用途提供相同功能。

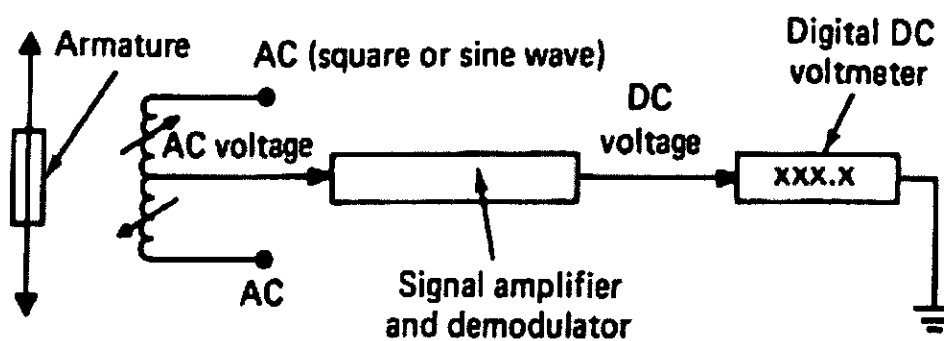


圖 9 可變磁阻傳感計

➤ Vibrating Wire Transducer

振弦式傳感器(vibrating wire transducer)常使用於水壓計(piezometer)、土壓計(earth pressure cell)與液面沉陷計(liquid level settlement gage)內的壓力感測計，與為數眾多的變位計與壓力計中，並直接作為表面(surface)與土堤的應變計。

振弦式傳感器基本構造為兩端預拉箱緊(crimped)的鋼線(steel wire)，該鋼線的振盪頻率(vibration frequency)隨著所受拉力(tension)變化，而拉力大小則是隨兩端相對小位移量(relative small displacement)變化。圖 10 即為表面應變量量測的實施例，利用磁性線圈吸引鋼線使之振動，量測振動頻率可換算得應變量。

由於振弦式傳感器的輸出值為頻率，如電阻或電壓量輸出方式常受到的纜線電阻、長纜線效應或接地洩漏(leakage to ground)等影響則可忽略。現地量測上振弦式傳感器可搭配長纜線，並可安裝於水中，相較於電阻或電壓式儀器的最大優勢。

然而振弦式傳感器最大的缺點在於鋼線腐蝕、長期受拉引致的潛變、以及兩預拉端的滑

動，導致振動頻率的折減(loss)，引致量測零點偏移(zero shift)。

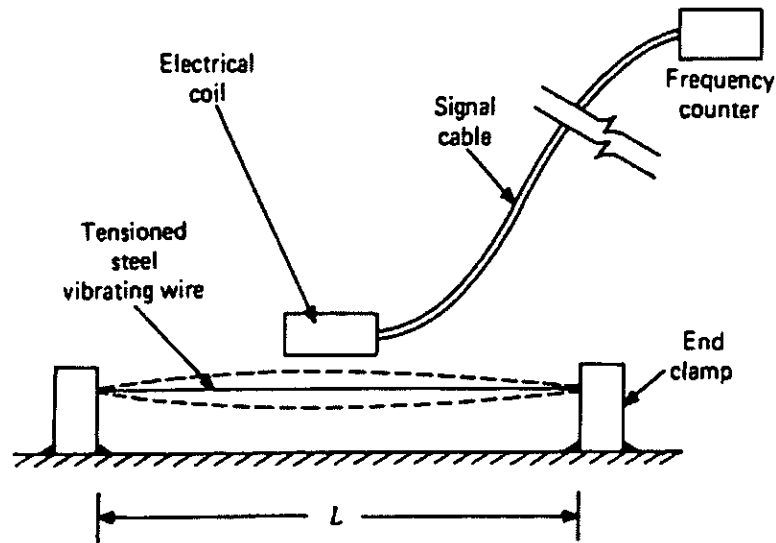


圖 10 振弦式傳感器

➤ Force Balance Accelerometer

力平衡加速度計(force balance accelerometer)較常使用於傾斜計(tiltmeter)、測傾儀(inclinometer, IP)與現地式測傾儀(in-place inclinometer, IPI)內的傾斜感應計。

力平衡加速度計裝置包含一個懸空在位置檢知器(position detector)磁場中的重錘(mass)(圖 11)，當該重錘受沿感應軸重力(gravity)牽引而試圖移動時，該移動將引致位置檢測器內電流改變，使儀器內線圈產生一等量但反向的電磁力(electromagnetic force)，使其重錘保持平衡不移動，該反向電磁力與線圈電壓呈比例關係。

一般可攜式(portable)的傾斜儀或測傾儀於實務上之應用，可藉由量測兩相反方向資料，以消除儀器的零點偏移。然而長期埋設量測穩定性則尚待證實。

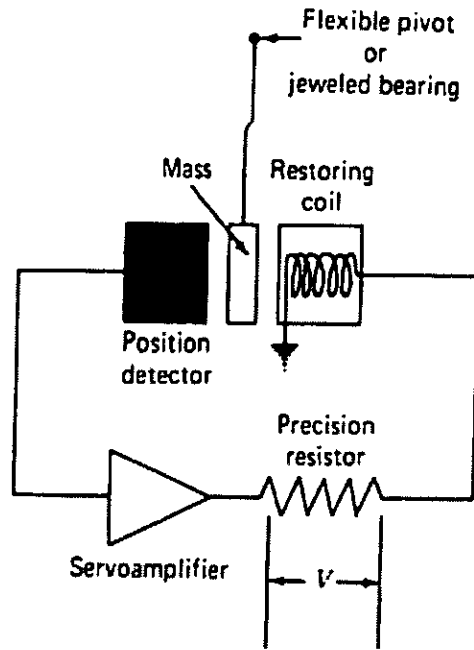


圖 11 力平衡加速度計

➤ Magnet/Reed Switch

磁鐵/簧片開關系統(Magnet/reed switch system)用在筒式伸縮計(probe extensometer)上。磁鐵/簧片開關系統系統為開關式位置檢知器(on/off position detector)，平時簧片開關為斷路，當進入圖 12 中磁鐵環構成的磁場，一旦磁場強度(intensity)足夠，簧片開關形成通路在資料讀取器發出蜂鳴聲(buzzer)或發光(light)。簧片開關形成通路的機制其重複性取決於本身在磁鐵環中心距及簧片方位。

磁鐵/簧片開關系統具有簡易價廉、可靠精確、以及適合長期量測的優點。唯一的潛在缺陷為安裝時磁鐵環相互接觸過久所造成磁力永久衰減(permanent loss)。

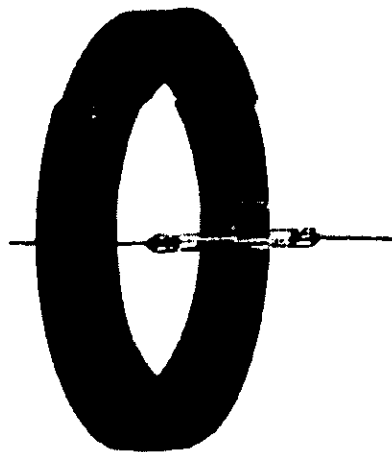


圖 12 磁鐵/簧片開關系統



➤ Induction Coil Transducers

感應線圈傳感器(Induction coil transducer)常使用於筒式伸縮計、固定式土體伸縮計、固定式孔內伸縮計與裂縫計(crack gage)中。如果外加一交流電源，將在其線圈週遭產生磁場，產生磁場的線圈稱為主要線圈。如果有另一線圈受該磁場影響產生感應電壓，則稱作次要線圈，此原理稱作感應耦合(inductive couple)。以感應耦合原理應用在大地工程的傳感器有三種，三者的差異在於輸出方式與構造(configuration)。

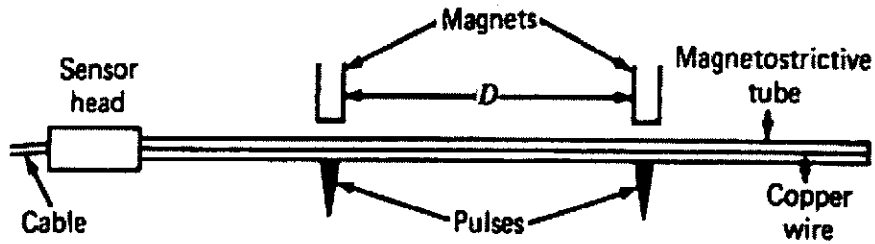
感應線圈傳感器具有優秀的長期穩定性。長期應用時，所有埋置的鋼製構件皆需保護免於鏽蝕。

➤ Magnetostrictive Transducer

磁致伸縮傳感器(Magnetostrictive transducer)使用於固定式孔內伸縮計、筒式伸縮計，以及管式收斂計(tube convergence gage)。

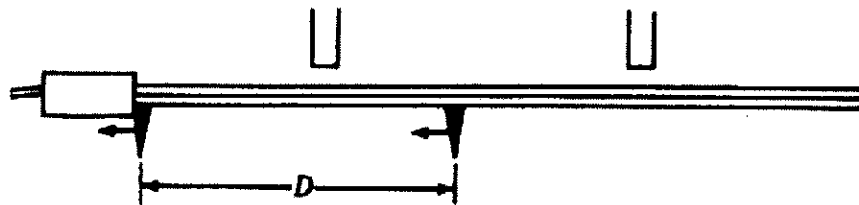
本傳感器也被稱為聲音探頭(sonic probe)，包含至少兩個固定在欲量測距離點上的永久磁鐵(permanent magnet)，下方設置內有黃銅線(copper wire)穿過的鎳鐵合金管(nickel-iron alloy)(如圖 13 所示)。鎳鐵合金在受磁後會產生物理性擾動(physical distortion)，亦即磁致伸縮(magnetostrictive)原理。將瞬間的電磁脈衝(electromagnetic pulse)加諸於合金管內銅線產生瞬時磁場(instantaneous magnetic field)，與量測距離兩點上的永久磁鐵磁場交互作用，引起鎳鐵合金管在該處產生應變脈衝(strain pulse)並以音速傳回，兩點先後傳回時間的差值可換算兩點間距。

磁致伸縮傳感器的量測範圍可達數英尺，具有非接觸性、低磁滯性與高穩定性，溫度效應小，若材料選擇正確則可忽略溫度效應。然而長期埋設的量測穩定性尚待證實。



Instantaneous electric pulse in copper wire generates pulse in magnetostrictive tube at each magnet location.

(a)



Pulses travel along tube at the speed of sound (V).
First pulse arrives at sensor and starts clock.

(b)



Second pulse arrives at sensor and stops clock after time T ; distance $D = VT$.

(c)

圖 13 磁致伸縮傳感器

➤ Electrolytic Level

電解液水準儀(Electrolytic level)用於傾斜計與測傾儀內。感測器構造為內有電解溶液(electrolytic liquid)的對稱拱形容器(如圖 14 所示)，容器內兩對稱AC端與下方B點設有電極，當感測器處於水平，則AB與BC的電阻相同，當感測器傾斜，AB與BC的電阻將存在差異。

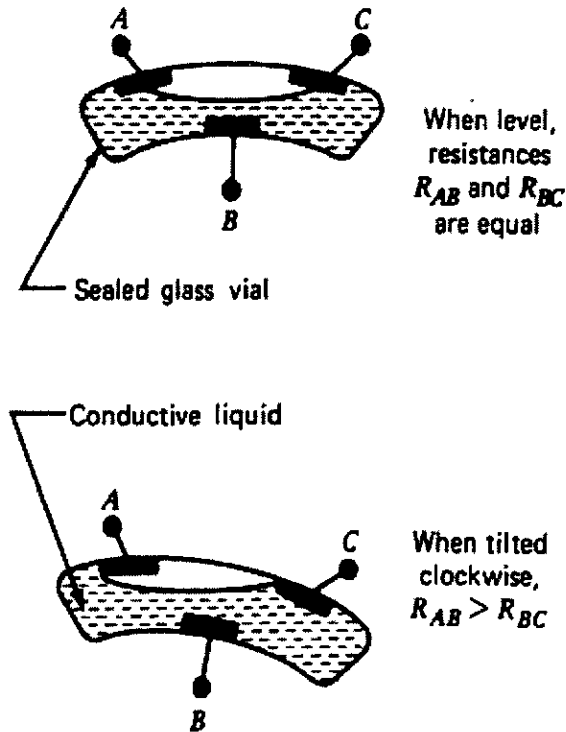


圖 14 電解液水準儀

➤ 7.2 機械式感測器

➤ Hydraulic Instruments

常見於大地液壓量測儀器分別是低音管式壓力計(bourdon tube pressure gage)與液壓平衡式壓力計(manometer)。低音管式壓力計較為普遍，常應用於水力式壓力計(hydraulic piezometer)、水力式荷重計(hydraulic load cell)、孔內壓力計(borehole pressure cell)，以及一些氣壓感測器(pneumatic)的讀數元件(readout unit)。液壓平衡式壓力計有時用在雙管式水力式壓力計(twin-tube hydraulic piezometer)與液面沉陷計(liquid level settlement gage)之中。

➤ Bourdon Tube Pressure Gage

低音管式壓力計是將平坦金屬直管繞成C型構造(如圖 15 所示)，當內部施加壓力使截面(cross section)膨脹，造成金屬管伸長並以機械式連接到一指針，指向圓型表面上的刻度(如圖 15 所示)。低音管式壓力計的精確度通常以整體刻度的百分比(full-scale percentage)表示，故應用上需選擇適當的量測範圍，避免過高的不必要範圍。長期永久性安裝(long-term permanent installation)需選擇高品質且可避免直流電鏽蝕

(galvanic corrosion)的低音管式壓力計。

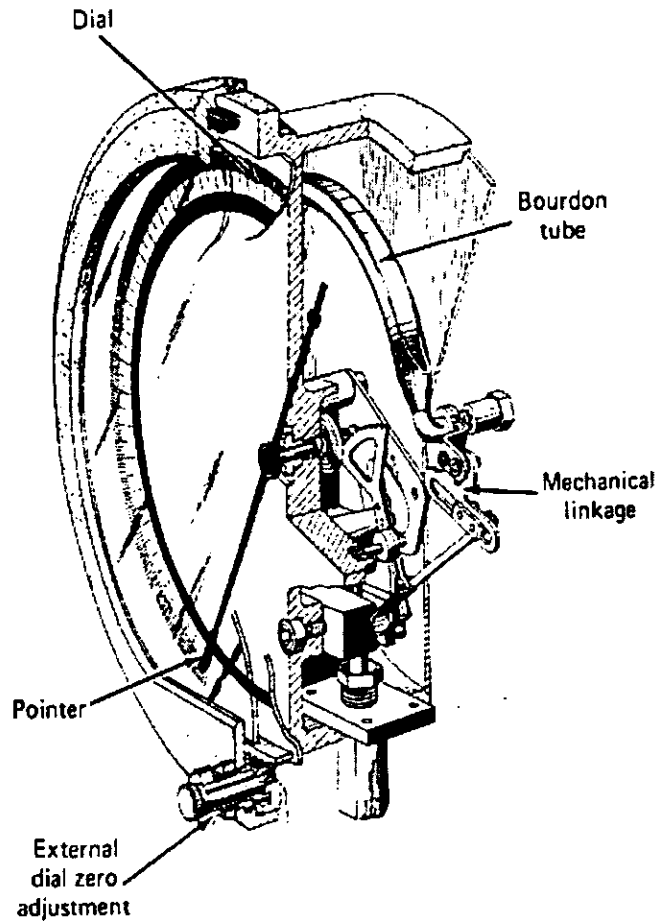


圖 15 低音管式壓力計

➤ Manometer

液壓平衡式壓力計(manometer)由充滿液體的U型管構成，U型管一側的壓力與另一側平衡。圖 16 顯示一利用開口管、低音管式壓力計，與水銀液壓平衡式壓力計構成的壓力讀取系統。液壓平衡式壓力計被廣泛使用於土堤(embankment)的孔隙水壓(pore water pressure)長期監測，對於量測很小的正孔隙壓力與負孔隙壓力也易於標定。通常液壓平衡式壓力計擁有比低音管式壓力計較長的壽命。

HYDRAULIC INSTRUMENTS

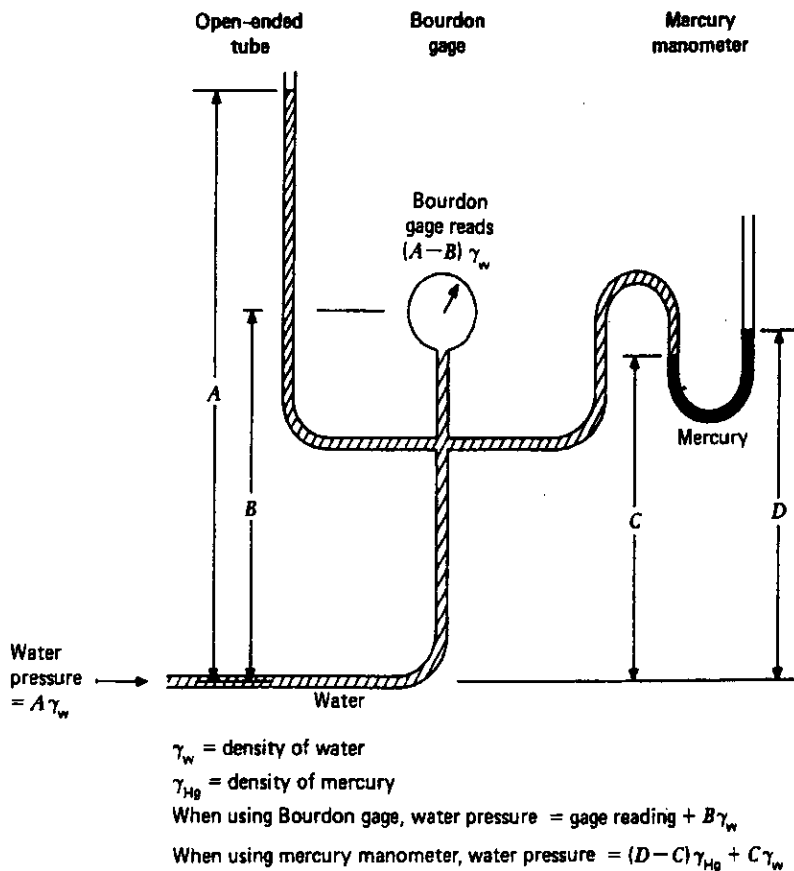


圖 16 液壓平衡式壓力計

➤ Liquid-Filled Tubes for Hydraulic Instruments

雙管式水力式壓力計(twin-tube hydraulic piezometer)通常與與液面沉陷計(liquid level settlement gage)以及裝滿液體之套管(liquid-filled tube)，成為壓力量測系統(pressure measuring system)主要的部份。藉由量測或假設液體的密度(liquid density)，則系統中兩相對液面的壓力差(pressure difference)可與高程差(elevation difference)維持一比例關係。

三個可長期損害這種量測方法的誤差主要因素為：液體內不連續(discontinuity in the liquid)，其現象導因於液體內產生氣泡；溫度變化(temperature variation)引致的液體密度改變，造成高程差與壓力差的關係改變；以及表面張力影響(surface tension effect)，使得液壓改變所需的時間延長。上述誤差主要因素可由套管材料(tubing material)、套管直徑(tubing diameter)、液體等方面的適當選擇改善。茲將各種改善方法敘述如下：



套管材料(tubing material)

某些塑膠對液體具有穿透性但對氣體則無，某些則相反。例如聚乙烯(polyethylene，又稱 polythene)對空氣具穿透性而尼龍(nylon)可吸收水，然後可由蒸發使得水量逸失。當去空氣液體(de-aired liquid)與壓力之套管，或套管曝露在大氣壓或非飽和土壤空氣下，則套管對於液體或空氣的穿透性最小化。

帶有聚乙烯護套(sheath)的未塑化尼龍 11(unplasticized nylon 11)則可應用於長期土堤壩(embankment dam)量測用的雙管式水力式壓力計(twin-tube hydraulic piezometer)。帶有聚氨酯(polyurethane)護套的未塑化尼龍也是良好的選擇。

帶有聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)護套的聚乙烯雖可兼顧最小化液體與空氣的穿透性，但聚乙烯受壓後具有潛變現象。最後，尼龍在本身飽和前有吸收水與濾掉空氣的傾向，所以在使用前需以水充分沖洗(flush)。

套管直徑(tubing diameter)

所有管子直徑皆是指截面的內徑(inside diameter)，因為內徑才是影響管內液體行為的因素。內徑的選擇取決於實際應用之限制。

當使用水與水相溶液(aqueous solution)，6mm 的內徑似乎是可使氣泡(gas bubble)被快速地沖洗掉的最大內徑。最小內徑則要考慮液體所需的平衡時間，2.5mm 內徑所需的平衡時間約為半小時，若採用 6mm 內徑則可大幅減少至一分鐘。

對於使用水相溶液液體液面沉陷計(liquid level settlement gage)採用 6mm 的內徑似乎是良好的選擇，更小的 4.3mm 也合適。若是採用水銀(mercury)，則 2-5mm 內徑可滿足需求，然而使用水銀需注意，因為在有些國家，水銀是有害物質。

液體之選擇

沒有單一液體可以合適所有的量測目的。對於雙管水力式水壓計，防凍(antifreeze)的溶液不應該使用，因為防凍溶液會堵住水壓計過濾器與產生滲透的壓力(osmotic pressure)，因此雙管水力式水壓計之安裝與維護需注意其工作溫度得維持在冰點之



上。自來水或井水可能造成管子汙染，也不應使用。較好的選擇是以蒸氣蒸餾的過濾水，並且須經過去氣泡(de-aired)以減少溶解的氣體。對於長期觀測，須加入加濕劑(wetting agent)與抗菌劑(bacterial inhibitor)減少有機物增生。四氫鹽基化合物(quaternary ammonium compound, QAC)同時具有加濕劑與抗菌劑功用，但需控制其濃度，以避免釋出的氯離子鏽蝕黃銅與紅銅管子。硫酸銅(copper sulfate)被當成抗菌劑而氣溶膠(aerosol OT)被當成加濕劑使用。

對於沒有處於冰點溫度的液面沉陷計，藉由使用去氣泡蒸餾水(de-aired distilled water)可減少熱學誤差(thermal error)。如果於短期(short-term)應用中，須添加加濕劑，用於長期應用則須添加四氫鹽基化合物(QAC)。

➤ Pneumatic Transducer

氣動式傳感器(pneumatic transducer)被應用在氣壓壓力計(pneumatic piezometer)、土壓計(earth pressure cell)、荷重計(load cell)、以及液面沉陷計(liquid level settlement gage)中。氣動式傳感器主要有兩種基本形式，取決於傳感器受外部壓力時氣動迴路(pneumatic circuit)經常性(normally)開啟與否。多數的現代傳感器是經常性關閉式(normally closed)。茲將各種方式敘述如下：

Normally Closed Transducers

經常性關閉式傳感器也稱作閘門式(venting type)，基於有無氣體流動情況(gas flowing)又可分為兩種。

1. Normally Closed Transducers, Read Under a Condition of No Gas Flow

顯示基本配置如圖 17 所示，當壓力小於 P 時，施加氣壓力於進氣管(inlet tube)；當施加氣壓力大於 P ，壓力隔膜偏移(diaphragm deflect)，使得施加壓力流出壓力隔膜進入排氣管(outlet tube)，利用氣體流動檢測器(gas flow detector)識別該流動後，關閉進氣管的氣體供應，使管內壓力宣洩殆盡，壓力隔膜在進氣管壓力等於 P 時回復到原始位置，此時的壓力利用低音管式壓力計或電子式壓力計讀數。

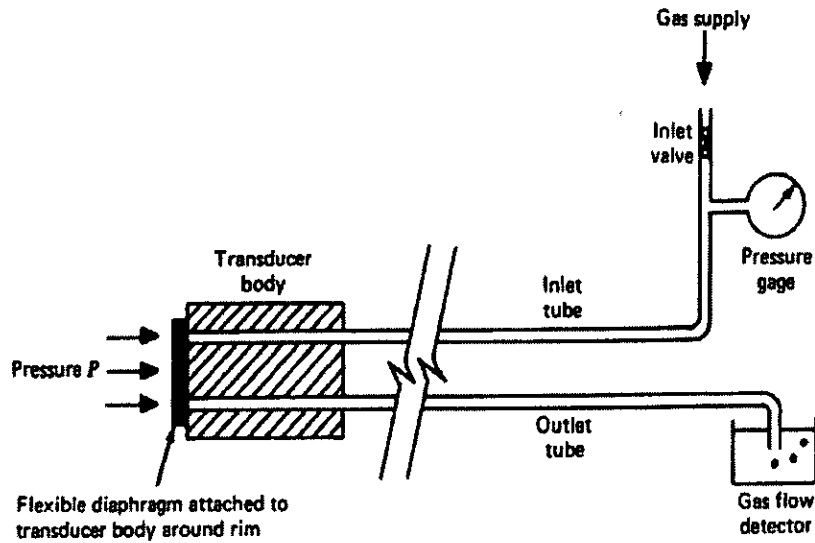


圖 17 Normally Closed Transducers Read Under a Condition of No Gas Flow

2. Normally Closed Transducers, Read as Gas is Flowing

基本配置仍如圖 17 所示，但伴隨氣體流動控制器(gas flow controller)，有時在進氣管有氣體流動儀(gas flow meter)，而排氣管直接排往大氣，配置的示意圖如圖 18 所示。通常以非常小的氣流持續增加氣體壓力，造成壓力計讀數增加。當壓力超過 P ，壓力隔膜朝外移動使施加壓力經排氣管排出，而最大壓力讀數等於 P 。任何形式氣動式傳感器的讀數皆受到氣體流動速率(rate of gas flow)影響。

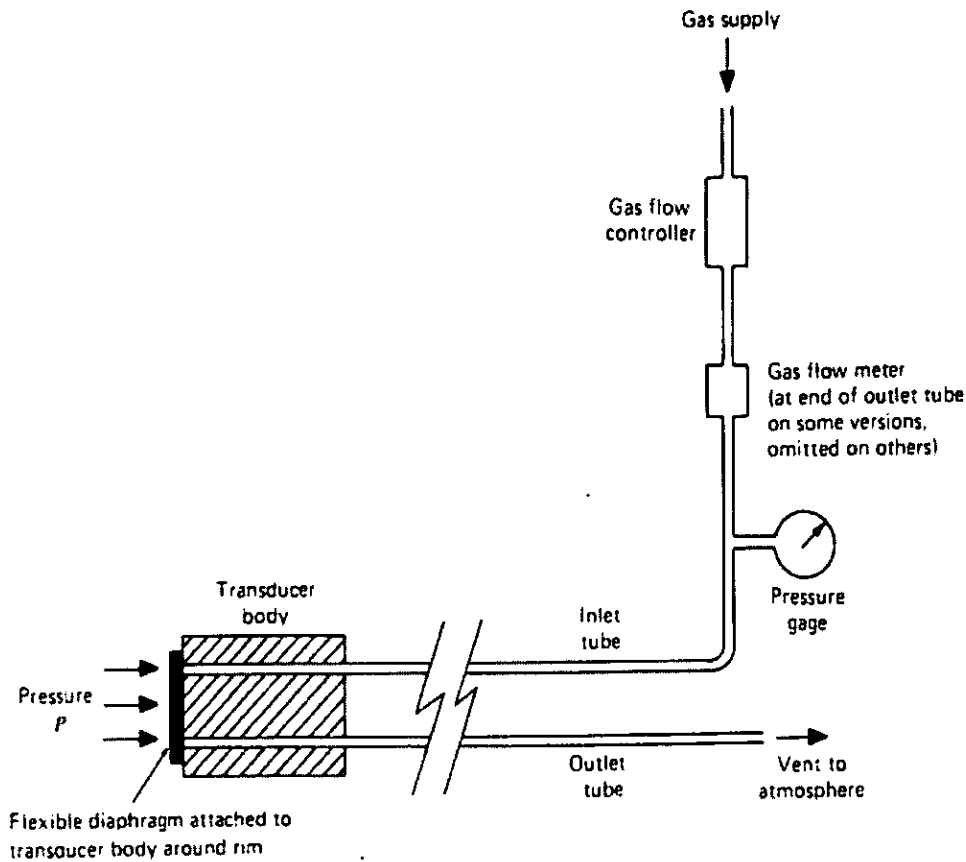


圖 18 Normally Closed Transducers, Read as Gas is Flowing

Normally Open Transducers

經常性開啟式傳感器又稱為檢查閥型式(check valve type)。圖 19 顯示一具有鋼球(steel ball)/圈狀彈簧(coil spring)/墊圈(O-ring)配置成的檢查閥，其中壓力隔膜為合成橡膠(synthetic rubber)或鐵製風箱(steel bellow)。檢查閥在施加壓力超過 P 之前維持開啟，當壓力隔膜向外移動，檢查閥關閉，而受壓的空氣(pressurized gas)則被鎖(lock)在排氣管中，以透過壓力計推測壓力 P ，然而讀數受到氣體流動速率影響。藉在進氣管加裝氣體流動控制器與氣體流動儀，使氣體以緩慢速率且均勻的壓力通過進氣管與排氣管，使過快流動速度引致的讀數誤差減至最低。

這些傳感器的潛在問題在於水意外地進入管中，藉由接上真空幫浦(vacuum pump)有時可以將之抽出，但先決條件是侵入管中的水頭小於 8 公尺。

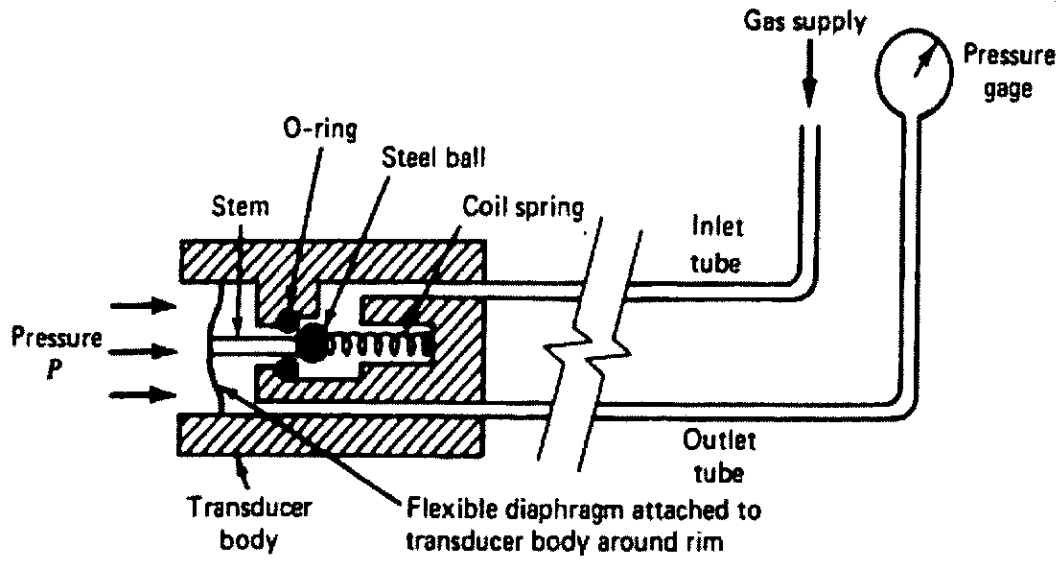


圖 19 經常性開啟式傳感器



附錄四 非破壞性檢測方法



附錄四 非破壞性檢測方法

1. 水庫潛在破壞模式發生時可能異常之檢測物理量

混凝土壩潛在破壞模式發生時可能異常之檢測物理量

潛在破壞模式	可能異常之檢測物理量
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。	應力波速、工程性質
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。	無



土石壩潛在破壞模式發生時可能異常之檢測物理量

潛在破壞模式	可能異常之檢測物理量
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	電學性質、應力波速、孔洞、密度
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	電學性質、應力波速
沿基礎中黏土裂縫或斷層之壩體滑動	電學性質
差異沉陷造成之裂縫	應力波速
土壤液化	應力波速



2. 常見非破壞性檢測方法之物理性質及工程應用

名稱	量測資料	所得物理性質	所得物理模型	工程應用
折射震測 (seismic refraction)	壓力波或剪力波之折射 歷時	地層應力波速 (為彈性 係數之函數)	應力波速 vs 深度之剖 面	地層、材料及結構剖面 彈性係數推估
反射震測 (seismic reflection)	壓力波或剪力波之反射 歷時	地層應力波速 (為彈性 係數之函數)	應力波速 vs 深度之剖 面	地層、材料及結構剖面 彈性係數推估
跨孔震測 (seismic tomography)	壓力波或剪力波之振幅 及歷時	地層應力波速 (為彈性 係數之函數)	應力波速 vs 深度之剖 面	地層、材料及結構剖面 彈性係數推估
表面波震測 (surface wave)	表面波波場之歷時振幅	地層應力波速 (為彈性 係數之函數)	應力波速 vs 深度之剖 面	地層、材料及結構剖面 彈性係數推估
透地雷達 (ground penetrating radar)	電磁波之反射歷時及振 幅	地層介電常數、導磁性、導 電度及電磁波速	電磁波速 vs 深度之剖 面	地層、材料及結構剖面
電磁探測 (EM)	自然或人造電磁反應	地層導電度及電感	導電度 vs 深度剖面	地層及水力剖面
電阻探測 (electrical resistivity, ER)	人造電流造成之電位差	地層電阻	電阻 vs 深度之剖面	地層及水力剖面
感應偏振 (induced polarization, IP)	偏振電壓或頻率	地層電容	電容 vs 深度之剖面	黏土或金屬礦物之空間 分佈
自然電位法 (self potential, SP)	自然電位差	地層自然電位法	地層自然電位之空間分 佈差異	地層水力模型或經水壩 與破碎岩層之滲流
磁場探測 (magnetics)	電磁場強度之空間分佈 差異	地層磁化率及殘存磁化 程度	地層電磁場強度之空間 分佈差異	地質剖面或分佈 (岩層 深度或斷層位置)
重力場探測 (gravity)	重力場強度之空間分佈 差異	地層統體密度	地層重力場強度之空間 分佈差異	地質剖面或分佈 (岩層 深度或斷層位置)

3. 透地雷達，Ground Penetration Radar, GPR(基礎探測)

基本原理

透地雷達主要可量測路基面，但施測之路基需有一出露面。透地雷達之天線則設置在此面以得到施測物內部影像。透地雷達天線包含一記錄器以及收發天線。不同之天線可發射不同頻段訊號。低頻訊號可提供較深之穿透深度，但其解析度較低，圖 1 圖示兩種由混泥土底部何內部缺陷造成之GRP反射訊號。

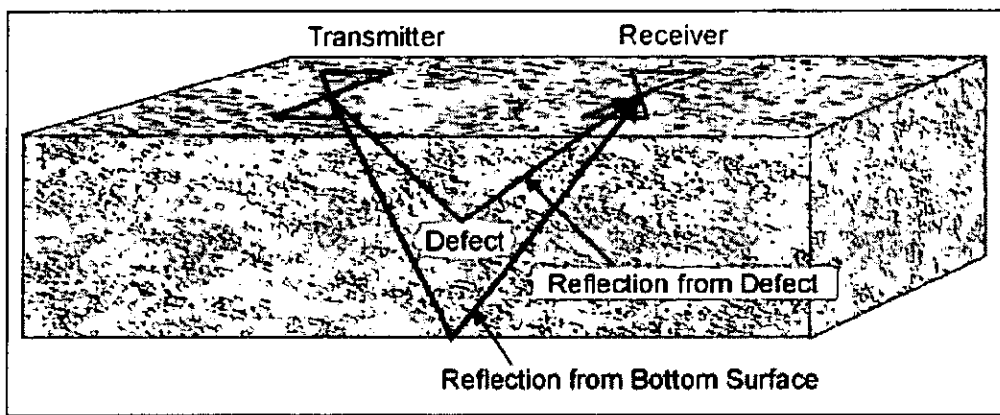


圖 1 透地雷達施測示意圖

資料擷取

透地雷達藉由移動表面之設置天線以做搜尋，而記錄器可將記錄資料以照片圖像顯示於視窗螢幕上。如同其他表面探測法，透地雷達之訊源與接受器需精確的佈置於施測點。

資料處理

透地雷達資料處理方式類似於單頻道反射震測資料。但由於透地雷達現場施做資料品質較好，而非需進一步之後端處理。

資料判釋

一般採用視覺圖像判釋透地雷達資料及其特徵，圖 2 顯示澆置完混泥土後不同時間之 post-tension tendon 資料。於此一試驗，透地雷達之訊號探測深度為 20 公分。

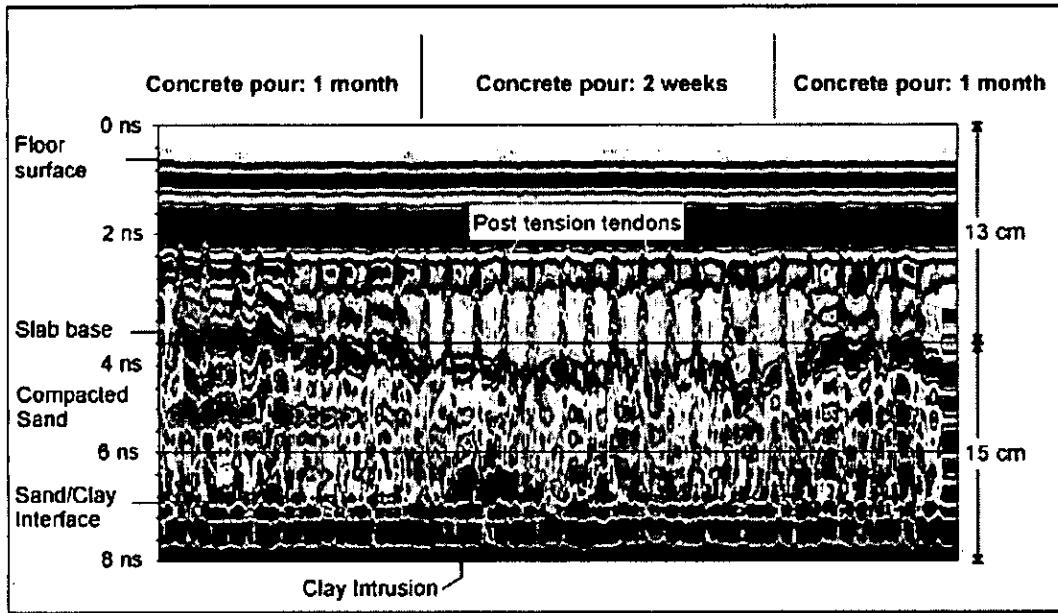


圖 2 透過 post-tension tendon 後之透地雷達分析圖像

優缺點

此試驗方法於結構體狀態評估及內部高解析應像上，具有快速且經濟之優點。而施作過程可由單面施作。

技術限制

探測深度與透地雷達訊號頻率以及待測體之阻抗有關。高頻訊號可提供較高解析度，因此盡量以提高解析度並達到施測深度目標為實作考量。

混泥土之阻抗主要決定於本身濕度以及水分所含鹽度多寡。一含有高鹽度水分之混泥土，其 GRP 訊號探測深度將遠小於一般乾燥混泥土所施作之探測深度。

4. 透地雷達(地下探測)

基本概念

透地雷達預期能使用在較淺的岩盤上，和不飽和及不含黏土或粉土的表土。如果存在這些狀況，那麼探測的深度也許只有幾米。透地雷達儀器包含記錄器和傳送及接收天線。不同的天線提供不同的頻率。低頻的天線提供較深的探測深度但解析度較低。圖 3 說明透地雷達系統。傳送天線提供透過地面及能從物體和邊界反射回來的一高頻率電磁式訊號，由表土提供一個不同的界電常數存在。反射波由接受器接收並儲存在記憶體裡。錯



誤! 找不到參照來源。展示包括顯示和控制設備的典型GPR儀器。圖 4 顯示了當探測進行時，拉 100 MHz的天線橫跨地面的情形。這是一個頻率相當低的天線，其可能提供的探測深度約 20m。

資料擷取

GPR 勘察由拉天線以正常走的步調橫跨地表面，如圖 4 所顯示。記錄器儲存資料，並且將紀錄資料的圖片顯示在螢幕上。

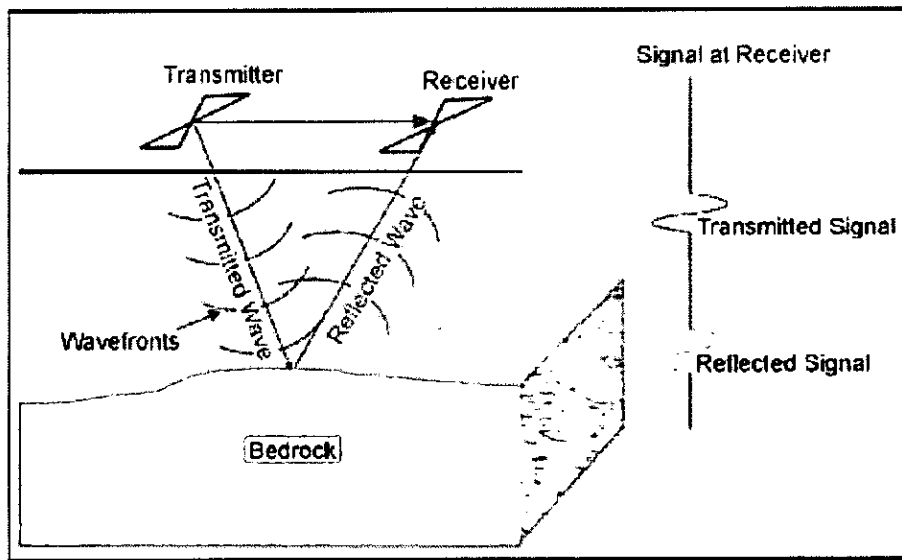


圖 3 透地雷達探測示意圖

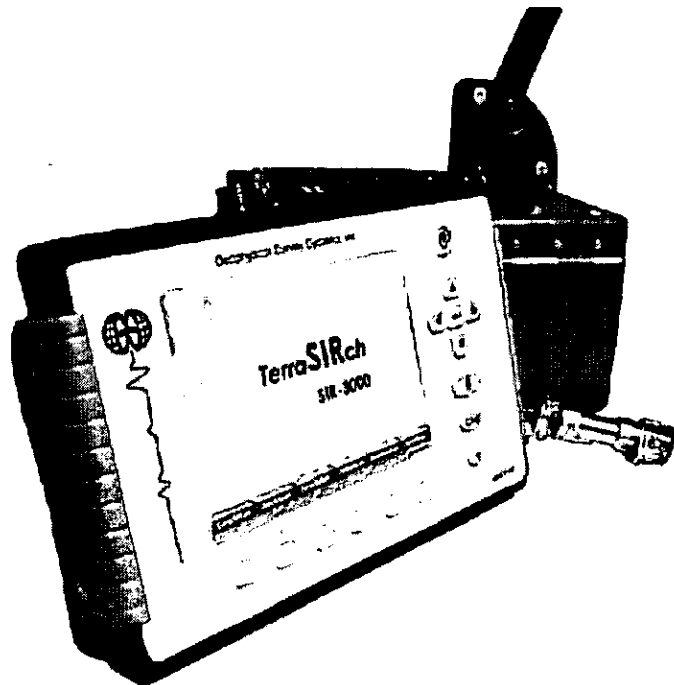




圖 4 透地雷達施測儀器(Geophysical Survey Systems, Inc.)

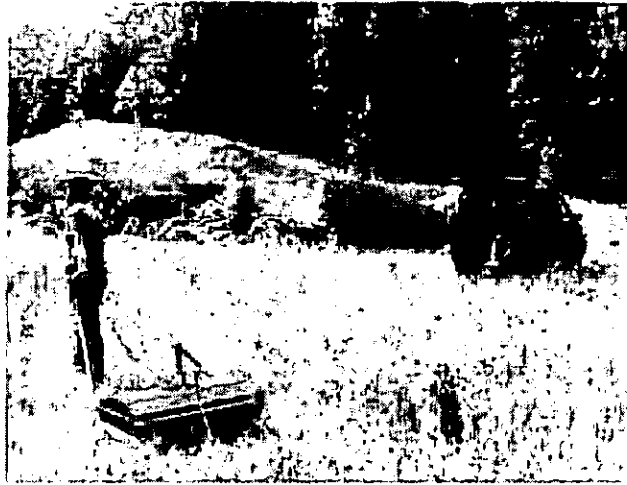


圖 4 透地雷達 (100 MHz) 現地施作 (MALA GeoScience USA, Inc.)

資料處理

資料處理方面很像處理過的單頻道反射震測資料。處理的過程如距離正規化，水平疊加，垂直和水平的過濾，速度修正，和移動所有可能完成的。但是，它是依靠資料的品質，不可以是處理而必須需要觀察岩盤的資料，因為現地記錄的資料可能是所有的。

資料判釋

為了計算岩盤的深度，透地雷達訊號在每個場址土壤的速度都需要知道。這可從圖顯示的速度估計為典型土壤或者它可能由在現地傳導一個小障礙橫過一個深度已知的埋沒地點來獲得。

優缺點

透地雷達因為勘測的進步，是一個相當快速且可以提出結果的方法。當解析度或透地深度不足時，不同的天線也可以很容易連接和測試。

限制

大概大部分透地雷達調查的限制因素是他們的結果恰好為現地的特性，並且必需取決於有對比目標的電介質與主要的表土比較。清楚且要有足夠的探測深度到達目標則是必需的。探測深度取決於天線的頻率、表土的傳導性，和表土裡是否有黏土的存在。所以，如果使用低頻的天線，那麼目標的解析度會比高頻的天線來的低。另外，低頻的天線，



通常不會被遮蔽，透地雷達的能量會四面八方的散射。因此，會從局部的物體或在地表面或地面上反射，如輸電線和大樓。而為了探測橋底下，橋樑版則有可能會提供反射。它可能是分散由橋梁版從岩盤反射的訊號，因而提供了兩種時間是顯著不同的時間。

5. 電阻率(Resistivity)

基本概念

地電阻法用於尋找岩盤深度的條件在於覆土層的電阻率與岩盤電阻率不相同。垂直探測(Soundings)與側向探測(Traverses)是兩種常用的方法。圖B 5 表示垂直探測方法，側向探測用於電阻率有橫向變化之地層，通常不用來找岩盤深度。

資料量取

圖B 5a.表示量測地電阻之系統。電流經由電流極A和B通入地底，從電位極M和N量測由此電流產生的電位場之電壓差。由通入地底電流量、量測電壓差值與電極排列幾何參數，計算地電阻率值。接著展開電極間距讓電流通入更深的地層，另一組讀數被紀錄下來。電極以不同大小間距展開，重複上述步驟量測，提供不同間距下對應的電阻率值，劃成如圖B 5b，顯示電極在小間距時量測代表為覆土層之電阻率值 ρ_1 ，電極大間距之下量測，電阻率值接近岩盤電阻率。電阻率曲線以反算軟體計算接近符合現地試驗結果，包含深度與電阻率值之模型。

優點

震測中的折射法，地層速度需隨深度增加而變快才適用；而地電阻法不同於折射震測在於隨深度增加，電阻率值不論是增加或降低，都能適用；施測程序簡單且在一小時之內，以垂直探測可以量測到五十公尺深。

限制

因為電極需插入地面，所以在堅硬的混凝土或柏油路地表不好施作。此外，若地表過於乾燥，需加水於地表與電極之接觸部分，減少電阻，以增加電流傳遞到地層下。一般來說，電流極間距為三倍的最大探測深度。因此若岩盤在十五公尺深，電流極間距需要達到四十五公尺。電阻率值有側向變化會影響到解釋深度的正確性；接近探測場址內的金屬物也會影響量測資料。

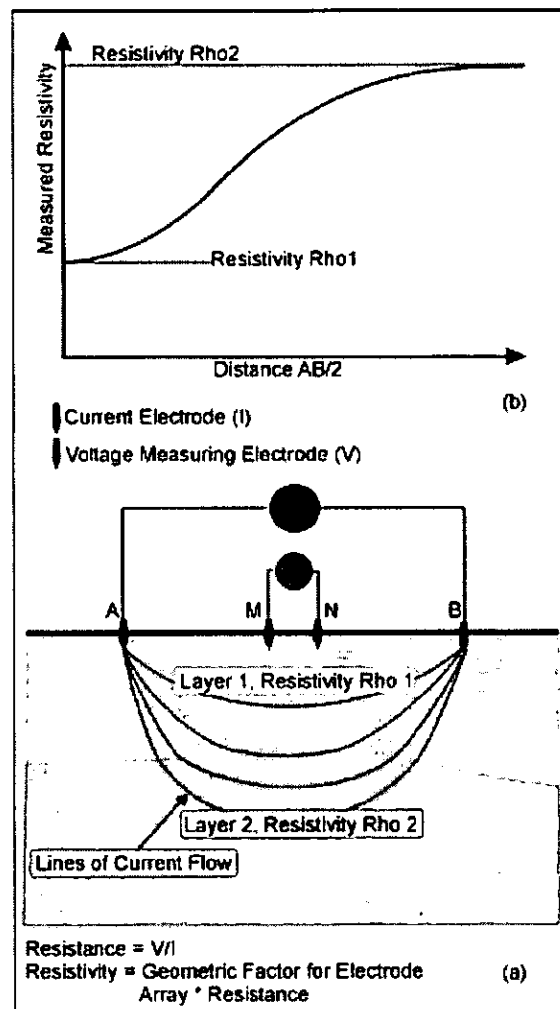


圖 B 5 地電阻探測(a)量測地電阻之系統(b)剖面電阻率值

6. 敲擊回音法，Impact Echo (IE)

IE 可用於鋪面、車道、坑道以及水壩之結構完整度之檢核，其中包含了平板及 RC 結構之空洞、蜂巢、裂隙及澆置介面問題。厚度之檢核試驗可參考 ASTM C1383-98a。

基本原理

敲擊回音法方法主要接收由結構底部或裂縫所反射之壓力波，而壓力波主要由鐵槌或震波器所製造後，再由接收器接收其反覆反射之訊號。典型接受器置於敲擊點約 5 到 7.5 公分。而鐵槌使用之大小由待測物體之厚度所決定。

資料擷取

一般敲擊回音法施作流程(如圖 6 所示)，先由鐵槌或震波器製造低頻率的震波(約 80kHz)，此一震波便會由待測物之底部或裂隙反射。置於敲擊點附近之接收器，則量測系統反應。一般壓力波之波長為 50mm 至 2000mm，大于混泥土中骨材或氣泡之尺寸，因此可視混泥土為一均質彈性材料。

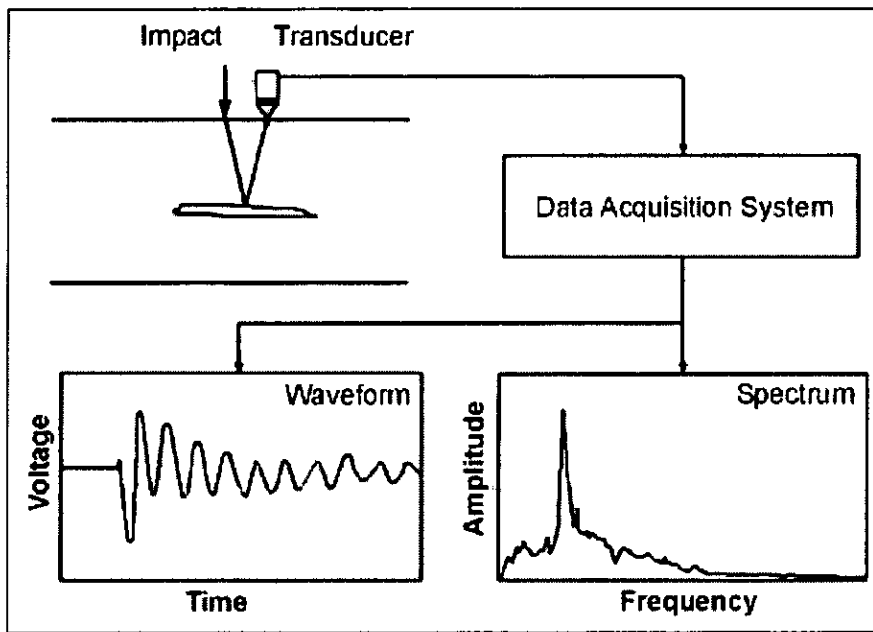


圖 6 敲擊回音法流程

資料處理

時間域的走時資料先轉換至頻率域資料，而頻率域中明顯之波峰主要代表反射訊號，此一波峰頻率可稱為測物厚度或裂隙的共振頻率。

1. 資料判釋

透過以下公式，可由接收資料之頻譜決定反射源之深度：

$$D = \frac{V_p}{(2 \times f_r)} \quad (D-1)$$

其中 D 為反射源深度， f_r 為主要波峰頻率， V_p 為壓力波速。壓力波速可透過兩個固定距離之電能變換器(transducers)，量測壓力波之走時，或是標定一已知厚度之平版，以得到其壓力波速。



最大頻率尖峰振幅主要為施測體厚度控制，若有其他明顯之迴響尖峰，可能代表混泥土其他缺陷或是澆置層面。

優缺點

類似透地雷達(GPR, ground penetration radar)，可由單邊施作。

施做限制

若需精確計算施測體厚度或裂隙深度，得先獲取精確之壓力波速。

7. 音波迴響/脈衝響應 **Sonic Echo/Impulse Response (SE/IR)**

音波迴響/脈衝響應法主要用於深基礎長度之探測。此方法能監測地下結構物、柱頭、樁之膨脹現象以及其長度。音波迴響/脈衝響應法試驗可應用於 drilled shafts and driven piles 或是 auger-cast piles。此方法也可應用於 shallow wall structures，如橋基、wall pier of a bridge。

基本原理

音波迴響法為一震波走時之量測方法(時間域)，而脈衝響應法則採用頻率域之頻譜分析。兩者有時合稱為 Pile Integrity Testing methods (PIT)。音波迴響法也被稱為 Echo, Seismic, Sonic, Impulse Echo and Pulse Echo 方法。脈衝響應法 包含了 Sonic Mobility, Transient Dynamic Response, Impulse Response Spectrum, Impedance, Shock, Transient Response, Transient Dynamic Response, and Sonic.

兩者試驗主要量測由測試結構物之底部，或土層之不連續面所反射之壓力波(P wave)。波源則利用鐵槌製造震波後，傳入地下直到遇到波速阻抗(acoustic impedance)後反射，再透過接收器接收其反射訊號。

資料擷取

對於drilled shafts或是基樁之測試，若drilled shafts或是基樁頂部露出，則震槌或接收器可以直接施做於頂部，以得到最佳結果，如圖 7a所示。若基礎頂部未能出露，則可採用側邊施作，但其露出段需 30 至 60 公分，如圖 7b所示。對於牆型結構物，橋墩或基樁頂部需出露，如圖 7c所示。在此一狀態試驗之資料會因多重反射邊界影響而難以分

析，且須二至多個接收器以接收反射波。

在音波迴響/脈衝響應試驗中，數位訊號分析儀(digital signal analyzer)負責記錄敲擊之輸入訊號以及接收器訊號。音波迴響試驗利用不同頻段之濾波器，對於從基礎底部反射訊號進行最佳化(optimize)，以減少表面波或是淺層不連續面所造成之高頻訊號。脈衝響應試驗中，數位訊號分析儀自動將紀錄之時域資料轉換為頻率域資料。

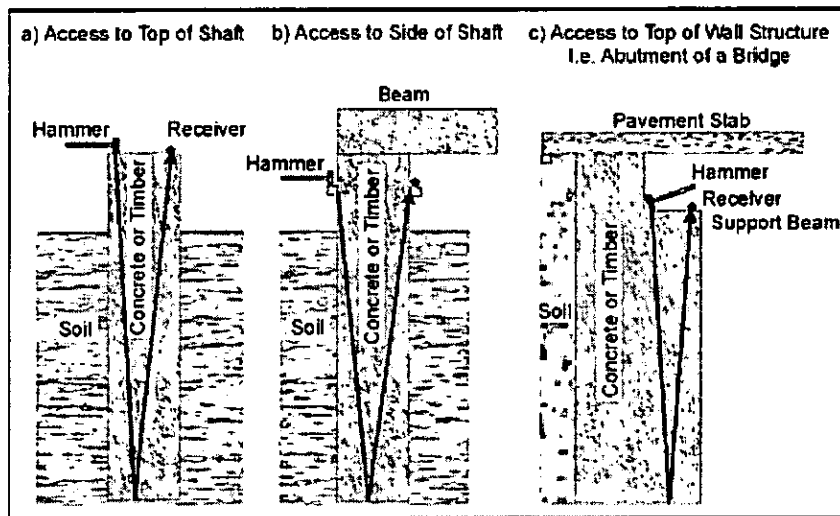


圖 7 音波迴響/脈衝響應法於三種狀況下，震源與接收器之位置

資料處理

在音波迴響/脈衝響應所紀錄之加速度值，可利用積分方式得到速度值，並針對因阻尼效應造成之微弱訊號加以放大。對於難以判讀之資料，通常採用 Cepstrum 分析方法。在此項技術，採用自相關函數(autocorrelation function)決定兩回響(echoes)之時間分段(time separation)。在簡單案例中，音波迴響利用阻抗圖像(impedance imaging)分析試驗資料得到基礎之影像。

為了得到較好結果，先得得到基礎之壓力波速(P wave velocity)，一般不建議採用基驗法則推估混凝土之壓力波速。混凝土之波速會因骨材、結構年齡、風化狀態以及其他因素而改變。透過兩端點之波速量測方法，分析壓力波之初達時間，可簡單的決定基礎波速。

資料判釋



採用音波迴響(Sonic echo)以決定基礎深度之原理，乃分析初達訊號何首次反射訊號之時間區隔，或是透過兩個連續反射事件(ΔT)，其分析公式為：

$$D = V * \frac{\Delta T}{2} \quad (D-2)$$

其中D為反射源深度，V為壓力波速。反射源可為基礎底部或是其中不連續面。另外，音波迴響(Sonic echo)資料也可決定量測物之頸縮或膨脹現象，或是其底部狀況。圖 8 顯示利用音波迴響(Sonic echo)資料之第二及第三反射點以計算深度。波形中由反射源回傳造成之多重迴響，其時間間格應為一致。任一對迴響波形都可以決定震源與反射源之時間走時，進而由公式(D-3)推估深度，如圖 9 所示。

Impulse Response 資料可透過以下公式計算反射源深度：

$$D = \frac{V}{(2 \times \Delta f)} \quad (D-3)$$

其中 Δf = 速度/(力量 V.S. 頻率)圖中兩尖峰值之距離，若是在軟弱底端狀況下，則為零頻率以及第一個尖峰之距離。

由底部或是不連續面造成之多重迴響，增加了迴響在頻率域之能量，並使頻譜有尖峰現象。在此一狀況下，表示基礎含堅硬材質，而第二諧波 (second harmonic) 也提供其證明。主要乃利用零迴響與主要回想之頻率差，或是第一與第二諧波之頻差。另外，脈衝響應法也可提供基礎動態勁度之資訊，而此一資訊可預測受載重之行為，或根據相關試驗而能更正確預估其基礎沉陷。

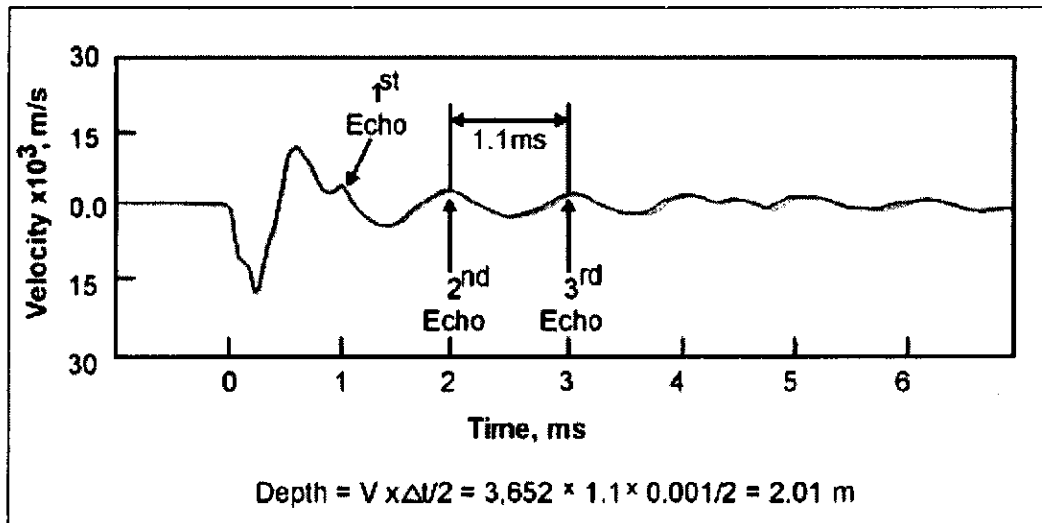


圖 8 音波迴響法之試驗資料

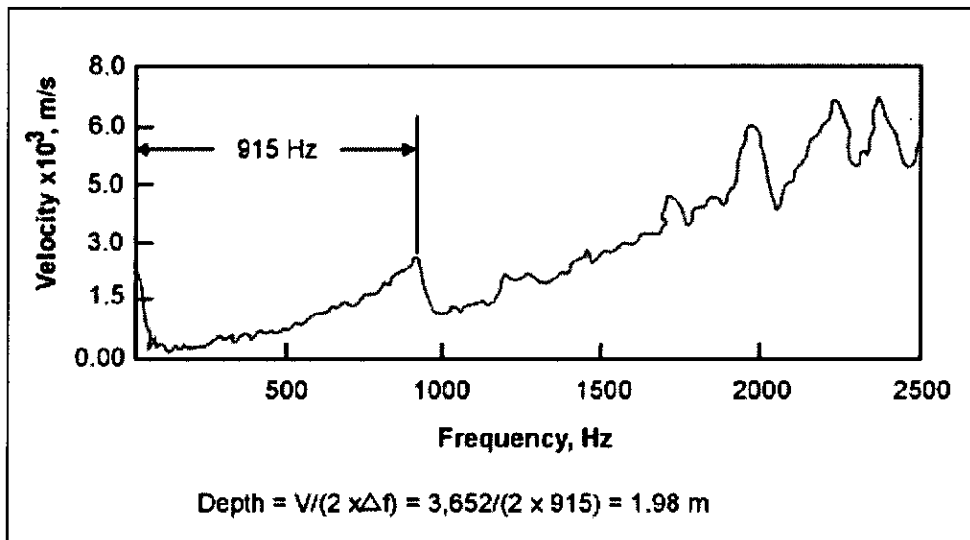


圖 9 應用脈衝響應法之資料計算深度

優缺點

此試驗方法具有快速且經濟之優點，但會造成微許工程進度延宕。

限制

音波迴響/脈衝響應方法主要應用於單自由點之基礎樁(free-standing columnar-shaped foundations)。音波迴響/脈衝響應方法之試驗樁之長徑比最高為 20:1。高長徑比(30:1)可試驗於軟弱土層。此試驗方法僅能探測大於測物截面積 5%之缺陷。



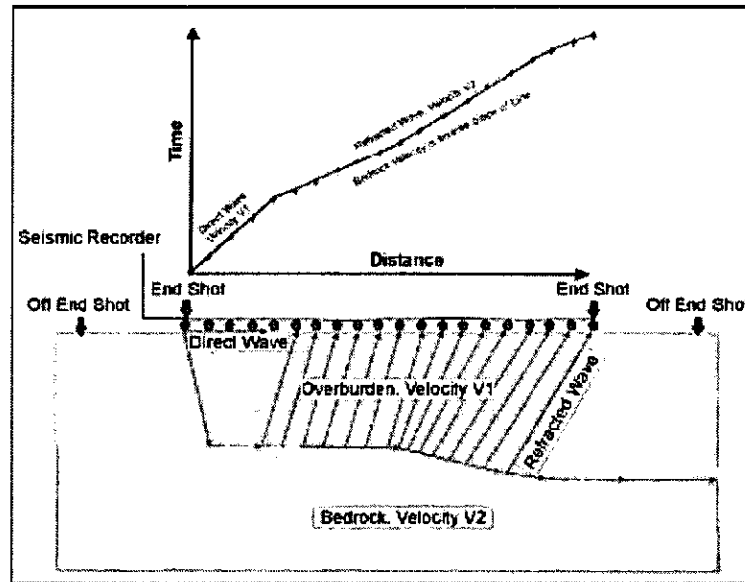
8. 折射震測法

基本概念

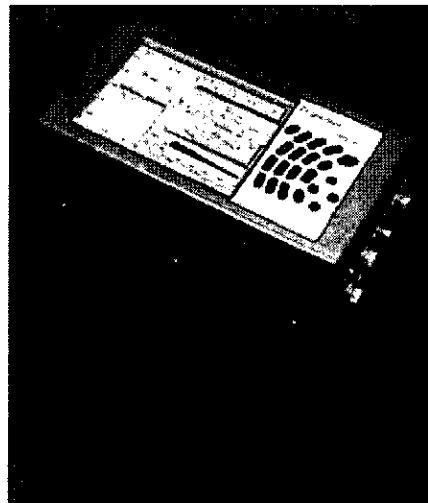
折射法是用以探測岩盤深度的方法之一，尤其當岩盤深度少於 30 米的地層。該法需要一震源，包含：鐵鎚是用在岩盤深度少於 15 米的區域，重錘或是炸藥使用在深度達 30 米之區域。震源產生的震波穿透承載層並沿著岩盤界面前進，並持續地散射振波回傳至地表面由受波器收錄訊號。折射法分別利用實體波之壓縮(P-wave)和剪力波(S-wave)作為施測的依據，其中以壓縮波折射法最常被採用。圖 10(a)呈現折射波主要之傳遞行為和其相關的走時曲線，圖 10(b)呈現一收錄之震測儀。折射法最多可決定 4 層的地下結構分層，但其先決條件是下層的波速需高於上層的波速。

資料擷取

執行折射震測調查須對預測之波速度與岩盤深度有詳細的了解，根據這些資訊，波速可用於指定特徵及模組的發展並有助於決定設合折射震側線參數設定。施測參數包括：測線展據、受波器間距及預測每一受波器的初達時間和測線頭尾兩端炸點的最佳位置。熟悉預測的初達時間，在現地是相當有幫助的，當現地的初達時間和預測之初達時間相當一置，有助於確定現場的測線布置是否恰當，除此外，也可測繪目標層之影像。



(a) Instrument layout, refracted waves, and time-distance plot.



(b) Seismograph data recorder. (Geometrics Inc.)

圖 10 折射法之現場備置與其記錄器

資料處理

處理折射震測資料第一步是挑選波傳訊號到達的時間、稱為初達波的選取，再將挑選出初達波時間和其相對應之受波器和距離繪製在同一張圖表上，稱為走時曲線 (time-distance curve)，圖 10(a)，呈現 2 層地層分層的模型(承載層與折射層面)。紅色布部份的歷時曲線顯示波直接由炸點到達受波器，該波較折射波早到達，綠色的歷時曲線顯示該波傳時間比直達波更早到達，乃因該波已沿著高速的折射體(岩盤)走了足夠長的距離並追趕上了直達波到達的歷時。



資料判釋

解釋折射震測的方法有許多種，其中GRM(Generalized Reciprocal Method)最為廣泛使用，該方法在地球物理方法的第二部份，針對其理論與討論有詳細的描述。以下將對GRM作簡短的描述。圖 11 呈現GRM在解釋時常用之基本射線路徑。圖 12 的目的是判定在D點受波器位置下之岩盤深度。藉由簡單的計算，將炸點A和炸點G走到受波器D點之歷時疊加在一起： $T_1=T(AD)+T(GD)$ ， T_1 減掉由炸點A到炸點G所經歷之歷時 $[T(AG)]$ ，圖 12 呈現上述運算所保留之歷時 $[T_g]$ ，表示波由C點到D點疊加E點走到D點之歷時減掉C點走到E點之歷時，經計算，該歷時的總和近似於岩盤上H點到受波器D點所花費之歷時。因此承載層的波速可遊走時曲線評估出，進而求取岩盤之深度。圖呈現一組折射震測調查的結果：上圖為走時曲線，圖示震波由震源傳至每一個受波器的時間、第二張圖呈現解釋後之震波波速，下圖為分析後之岩層斷面。

為能夠提高速度模式之解析度與正確性，可利用走時震測影像法 (Traveltime Tomography) 由走時曲線反算二維之速度剖面，如圖 15 所示，將地質構造類似有限元素法非為許多元素，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 16 之案例所示。

優缺點

折射震測可有效的判定岩盤深度，因為岩盤之波速遠高於承載層之波速度，除此之外，折射震測也可有效評估垂直向(深度)的側向變化，因每一受波器下之深度皆可判定出。

限制

折射震測最大的限制在於深層的波速須大於淺層之地層，上下層間要有明顯的速度差。然而，若要決定岩盤深度，該限制就不具有明顯之差異，因為岩盤之波速遠高於承載層之波速。若承載層之水位面接近岩盤，可能會因飽和土壤較未飽和土壤具有較高波速會產生判讀岩盤深度上的產生錯誤。區域性的噪音，例如：交通產生之隨機震動，會混淆岩盤所產生的折射波，可藉由較大的衝擊式震源或在同依點上重覆施測增加訊號強度，若雜訊依舊存在，則需要更大之震源。除此之外，某些波，如空氣波是隨機的，覆蓋在受

波器上之材料也有助於抑制收錄時產生的雜訊。

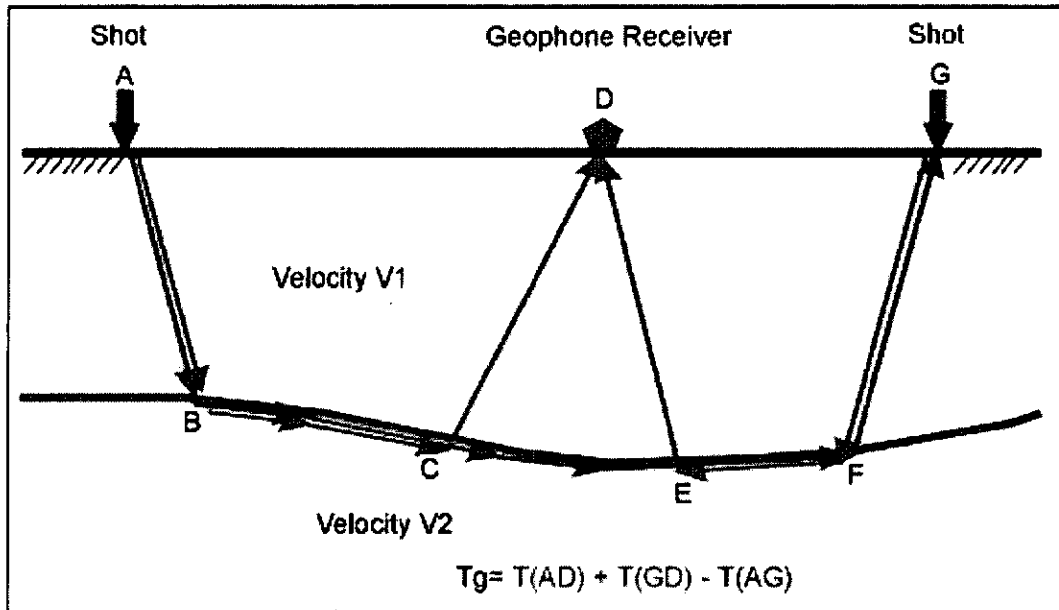


圖 11 基本 Generalized Reciprocal Method 判釋

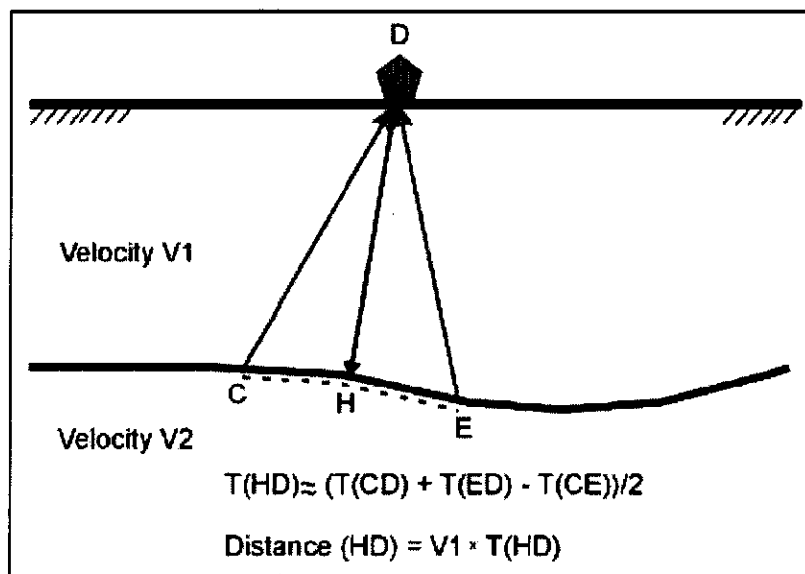


圖 12 Generalized Reciprocal Method 判釋

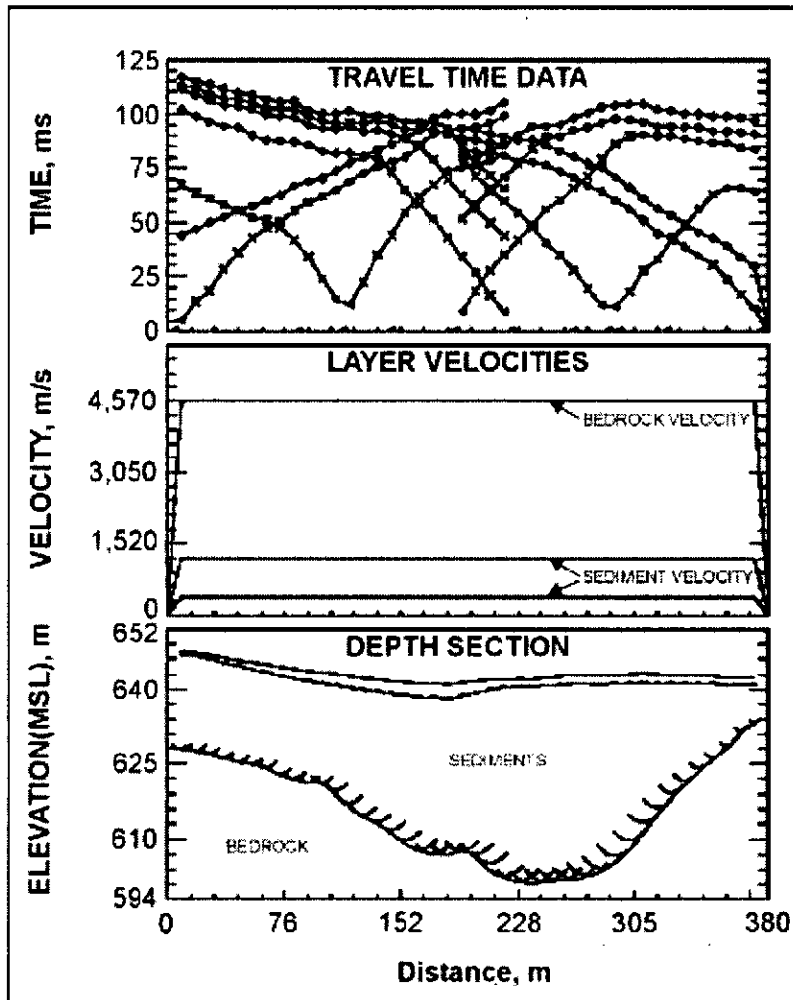


圖 14 折射法結果判釋

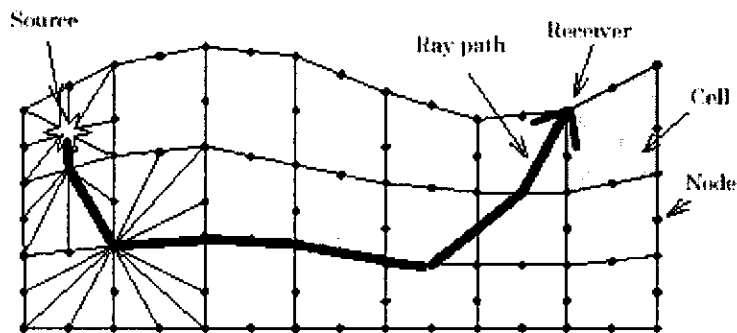


圖 15 折射震測走時震測影像分析原理

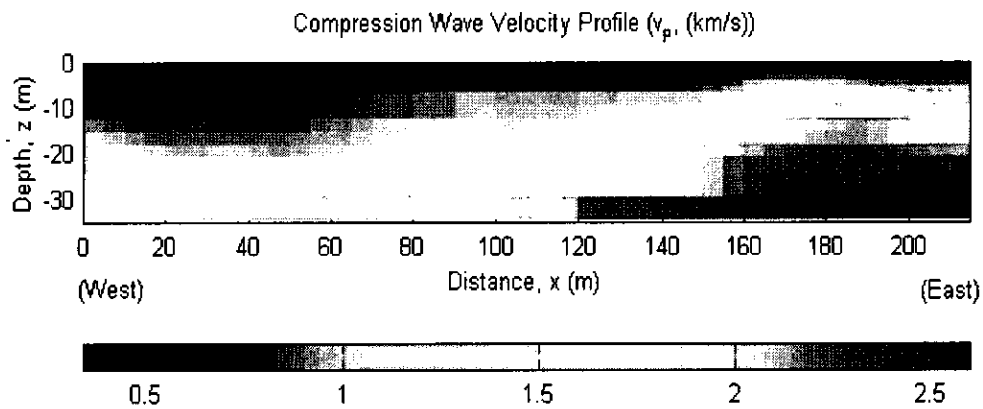


圖 16 折射震測影像法案例：桐樹湖斷層調查-湖本橋附近測線

9. 震波反射法

基本概念

震波反射法是利用於地表激發的震源產生地震波，使震波進入地層傳遞。傳遞出的地震波在具有阻抗變化（地層波速或是密度改變）的介面處，一部分會反射折回地表，而另一部份會繼續通過介面向下傳遞。繼續向下傳遞的震波在遭遇下一個阻抗變化的介面時便會反射向上，而後回到地表。此時，位於地表的受波器便將這些反射訊號記錄下。圖 137 中表示震波反射法的概念。

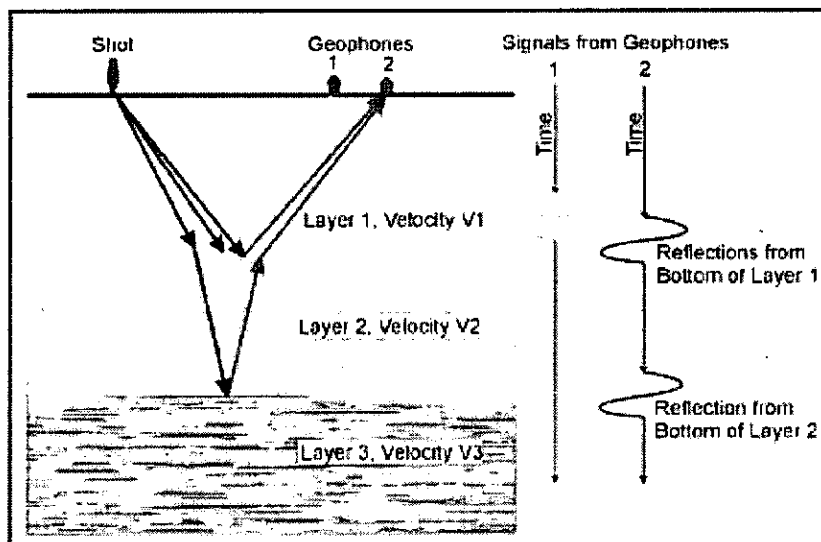


圖 137 震波反射法



將受波器以線型排列插入地表後，沿著受波器展開的測線，依著預設位置激發震源（鐵鎚或是炸藥），而後此震源所產生的反射訊號將被受波器所接收，並記錄於震測紀錄器中。震波反射法的施作中，需因應不同的標的問題而有不同震源及受波器間距的配置。受波器的數量以能達到目標的探測深度為要，而受波器間的間距則以能將反射介面非平整處表現出為主要考量。

訊號處理

有許多的技術用於處理反射震測資料，包括了訊號濾波（filtering）、地下地層波速影響校正（correction for subsurface velocity effects）以及反射面同深點（common depth point, CDP）的訊號疊加。這些採用的技術其主要目的是為了能提供一串（group）同受波器的處理訊號，使其在疊印後能有最為清晰的反射位置出現。經由對一整條測線上的受波器訊號處理結果，便可獲得具有反射面的震測剖面。所得的震測剖面可以以 CDP 及波傳時間（record time）為橫、縱軸呈現，或在各地層波速已知的情況下，直接以 CDP 及深度為座標軸呈現。

資料判釋

對於使用反射震測法作為岩盤深度測定時，將震測剖面以 CDP 及深度為座標軸的呈現方式是為最佳。以此呈現震測剖面可最快得到岩盤深度的可視圖。

優缺點

採用反射震測法時，對於相同的探測深度其所使用的震源能量較折射震測法為小且其對於較深地層的探測結果亦較為好。

限制

反射震測法通常需要較多的施作人員，並較其他震測法為昂貴。除此之外，當岩盤深度較淺時，震波折射法會是較為合適的震測方式。通常，當岩盤深度大於 30 公尺時，震波反射法會有較佳的表現。

10 表面波頻譜分析與表面波之超音波分析方法

利用 SASW 與 USW 來測定鋪面材料的厚薄濃密程度，並且測定求得鋪面材料層面的線

彈性模數，藉由調整 USW、SASW 和 MASW 的感應器間距與儀器上頻率範圍技術，可以量測得到基礎材料的模數量測。若是材料沒有被壓密，速度與模數將會較低，因此需要套用較低的頻率之震源於調查研究。

基本概念

表面波的方法包括了-表面波頻譜分析(SASW)、多頻道表面波頻譜分析(MASW)與超音波表面波 (USW) 方法等，皆可以用來測定鋪面材料層面的線彈性模數，而這些方法的操作方式是藉由產生一衝擊的震源 (例如鐵槌或 electrically activated solenoid)並量測表面震波。只要欲探討層面的波長小於該層面厚度，則經由計算得到之模數即具有代表該層面的特性。USW 與 SASW 利用上述方式使用 2 個受波器來量測欲研究之層面特性，量測僅需要短暫的時間而且量測儀器攜帶輕鬆簡便。而 MASW 使用更多的受波器來得到整個鋪面材料系統中層面的訊息。

資料擷取

所有的系統中量測速度與測定模數的多種方式，利用在已知的展距上佈上 2 個或是多個加速度計，而展距通常與震源同軸，當震源產生一短週期的脈衝進而帶動震波穿透鋪面材料主體並沿著表面傳遞，見圖 148。

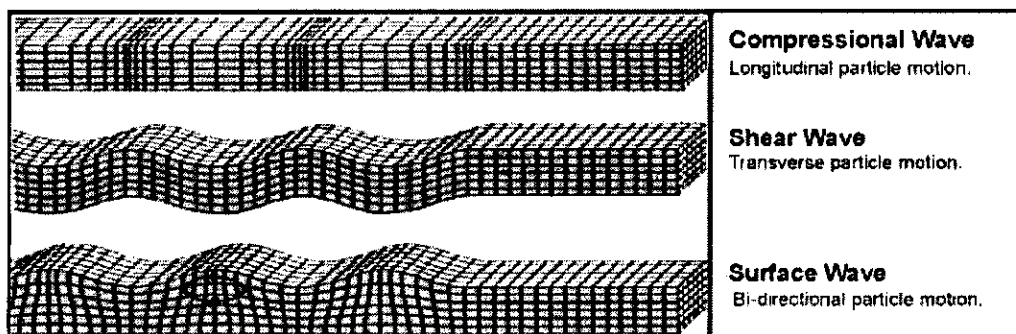


圖 148 震波示意圖

資料處理

在大多數的系統中，壓縮波最快到達，緊接著是剪力波與表面波，然而，超過 50% 的能量集中在表面波中，因此，使的表面波更容易被研究。圖 159 來說明波的傳遞與近遠的受波器之關係，圖 20 展現出如何利用 2 個或更多的受波器來量測波的傳遞時間。

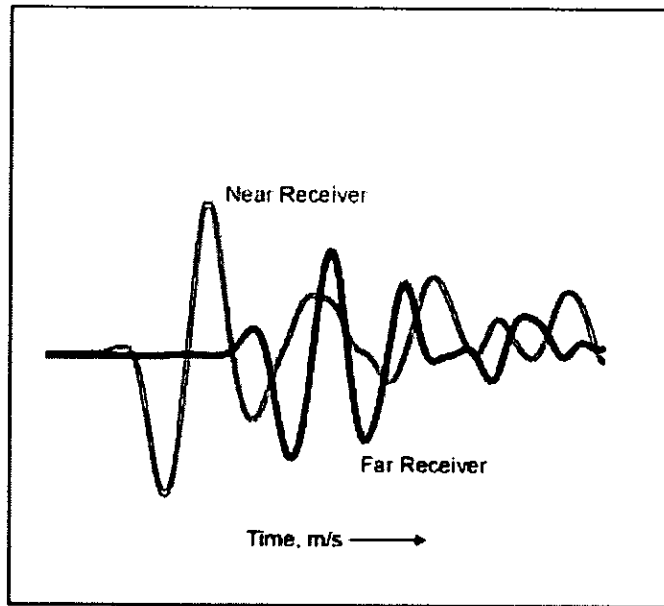


圖 159 紀錄之震波波型

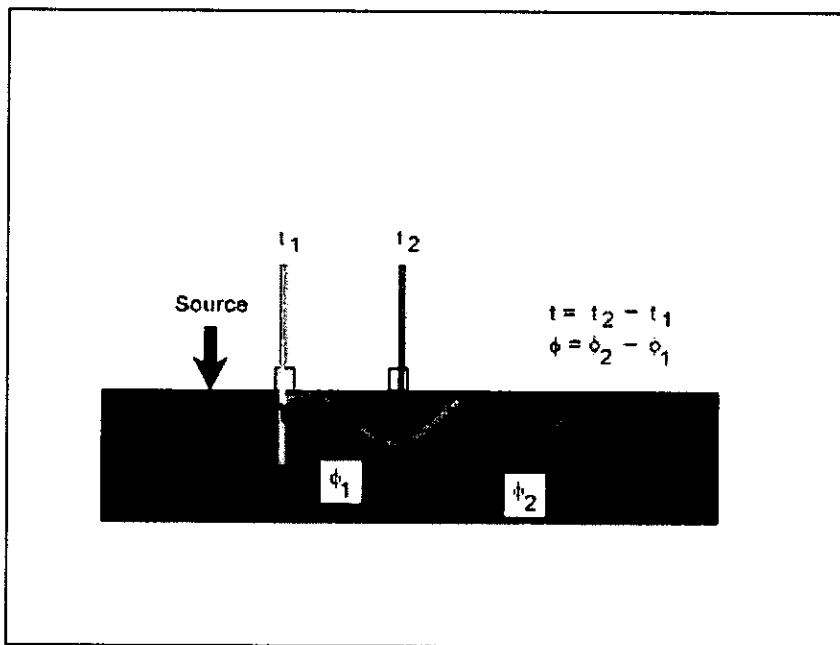


圖 20 波速計算

資料判釋

量測表面波波速是較容易完成，但是楊氏模數要藉由剪力波波速的計算，換算的公式如下所示：

由雷利波 (Raleigh) (或稱表面波) 波速(V_R)來計算剪力波波速(V_s)



$$V_s = V_R(1.13 - 0.16 \nu) \quad (D-4)$$

緊接著剪力波波速的計算，楊氏模數的公式如下所示：

計算楊氏模數 (E)

$$E = 2(\rho) V_s^2 (1 + \nu) \quad (D-5)$$

ν = 波易森比(Poisson's Ratio)

ρ = Mass Density

將上述的計算結果通常利用傅立葉分析的方法轉換作成多種頻率資料列，對於某些鋪面材料層面而言，這些計算值可以被平均成多種適當的頻率而獲得多種模數。鋪面材料的模數可以利用由德州交通部門所發展的技術來區分。AASHTO 和其他的組織對於模數的標準已經有設立一套標準。

優點

這是一種嘗試的方法可以取代試驗室的鑽探取樣，而且試驗在幾小時內即可完成。

限制

這些表面波的試驗方法必須佔據特定的區域當試驗進行量測中，而量測時間的長短和所設置的接收器多寡成比例。因此，在量測時需要封閉道路與橋樑。

11. 超音波震波(SASW)與敲擊-回音 (Impact-Echo) 結合

表面波頻譜分析(SASW)與衝擊-回音方法，將這2種方法同時應用在完整的儀器上時，如同可攜式震波特性和分析儀(PSPA)，具有高頻率、聲學的地球物理方法。藉由完整的超音波方法來評估混凝土狀態，在最近已經被應用於許多工程上的問題，包含新的與老化中的混凝土結構物。近期的工作在評估混凝土是否完善，特別是對於銹蝕所導致的分成架構，這些完整的方法已經被證實具有相當的發展前途和潛力。



在交通運輸部門，這些整合性的調查可以作為查核新結構物的質量保證（quality assurance）（例如厚度的測定和混凝土灌注的均質性甚至是骨材縫隙或是孔隙）

超音波的方法提供了多樣的形式，在完整的超音波震測儀器上，如同可攜式震波特性分析儀（PSPA），成功地提供了混凝土鋪面材料結構物的評估，不但可以單獨的使用也可以搭配其他的地球物理探測或是現地取樣。不過仍然建議使用多種方法處理。

有 3 種有趣的超音波技術：超音波實體波（UBW）、超音波表面波（USW）和衝擊回音（IE）地球物理的方法，彼此可以獨立施做也可以合併應用。前面 2 種方法是對於混凝土定性描述，而 IE 的方法主要用在震波的傳遞波速在混凝土結構物已經完成時，IE 方法最主要的好處是區別分層的區域在不同的惡化階段時。

利用有限元素法可以模擬 2 套不同的分解發展，並還可以使用 IE 來監測一段時間的混凝土鋪面材料結構物，來說明預期惡化的過程。使用 IE 的方法來評估與分層區別時，3 維的視覺技術成為重要的一部份。結果包含了清楚的 3-D 視覺混凝土鋪面結構物斷面，水平斷面穿透過所有特殊的區域，垂直斷面沿著測線。視覺效果的技術使得 PSPA 成為 1 種鋪面材料結構的聲納儀器。

結合超音波震測技術，可是仍然需要比透地雷達（GPR）和 half-cell corrosion potential 方法等更精密的分析。而這方法不建議在品質保證（QA）若是在預期準確性在 0.64 cm 和需要高度的重複性。在某一些品質保證（QA）應用中，使用聲學技術是很簡潔易懂，就像測定全新且幾乎均勻的混凝土結構上。使用一簡單的衝擊回音儀器來量精確地測混凝土厚度，達到品質控制的目的。

12. 多頻道表面波分析方法(MASW)

多頻道表面波分析方法是一種非破壞性的方法，可以用來評估鋪面材料的厚度和測定線彈性模數，MASW 為某種表面波震測的形式，其為從炸點沿著水平方向增加受波器並直接在表面量測。不但可獲得 1 維或是 2 維的剪力波速（勁度）剖面，而且該施測方式是有效節省成本（cost-effective）與時間（time-effective）。MASW 方法主要好處在於施策的同時，完整的紀錄自然界中的震波干擾雜訊，例如較高組態的表面波、實體波、車

輻傳動震動波等，這些干擾波在記錄的數據中或許會產生很明顯的部分，若沒有正確的計算它，將會對所擷取的數據產生疑惑。MASW 的基本架構於收錄多頻道的資料和分析在震波探勘調查，利用技術可以區分出有用的訊號偶合其他形式的雜訊。

基本概念

連接數個受波器（通常為 24 個或是更多），並沿著測線佈置且連接至多頻道的紀錄儀器，每一個頻道對應一個受波器記錄震動。而數據的紀錄是由每一個受波器在連續時間上記錄而得。

資料擷取

不同於其他形式的震測方法，對於MASW的取得參數有相當廣泛的界線，這是因為多頻道的處理架構利用了波場的轉換，而能夠自動的處理其他有害的影響，像是近場、遠場效應、間距所產生的映頻干擾。不過仍然有 2 種參數被認為是最重要的：震源移動量(x_1)和受波器的間距(dx) (圖 21)。震源的移動量與探測的坐大深度成比例關係，因此必須要移動，經驗法則是 $x_1 \approx z_{max}$ ，而受波器的間距(dx)大約是 $dx \approx 1\text{ m}$ 。表D.1 整理了全部數據取得參數最理想的範圍。

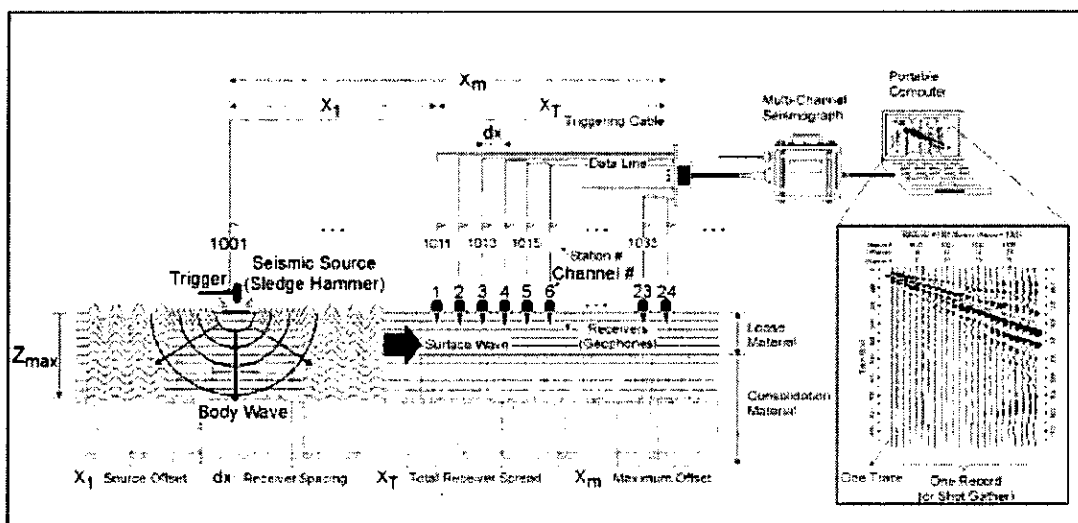


圖 21 多頻道表面波試驗設置示意圖(Kansas Geological Survey)

表 D.1 最佳試驗參數

Material Type* (V_s in m/sec)	X_T (m)	dX (m)	X_M (m)	Optimum Geophone (Hz)	Optimum Source* (Kg)	Recording Time (ms)	Sampling Interval (ms)
Very Soft ($V_s < 100$)	1 - 5	0.25 - 0.5	≤ 20	4.5	≥ 5.0	1000	1.0
Soft ($100 < V_s < 300$)	5 - 10	0.5 - 1.0	≤ 30	4.5	≥ 5.0	1000	1.0
Hard ($200 < V_s < 500$)	10 - 20	1.0 - 2.0	≤ 50	4.5 - 10.0	≥ 5.0	500	0.5
Very Hard ($500 < V_s$)	20 - 40	2.0 - 5.0	≤ 100	4.5 - 40.0	≥ 5.0	500	0.5

* Average properties within about 30-m depth range
 * Weight of sledge hammer

資料處理

數據處理的架構包含了 3 步驟 (圖 162)：(1) 先初步的檢視表面波 (2) 繪製散佈圖並且歸納出訊號散佈取線 (3) 反算剪力波速隨著深度的變化，每一個步驟都可以完全的自動化。

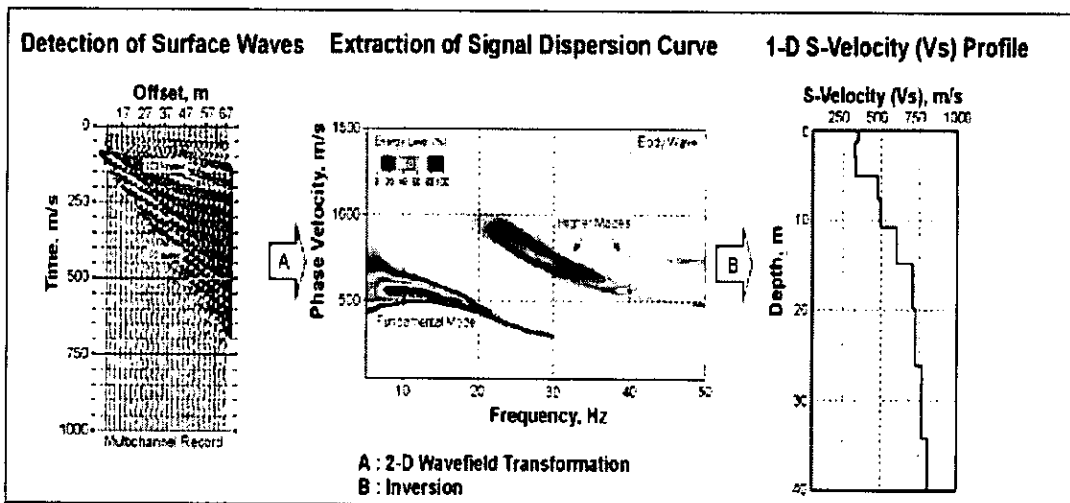


圖 162 多頻道表面波施作流程

資料判釋

由固定震源與受波器的配置，到固定增加距離(dC)的配置方式所取得的數據 (圖 173)，



製作成 2-D 的圖形。一震源與受波器的配置當在量測時包含給予震源移動量(x_l)、受波器間距(dx)與所使用的總頻道數目等步驟，而變化量(dC)是藉由不同程度的剪力波速在水平震動的變化沿著整條測線，若是希望有很高的程度的水平震動的變化，則需要一微小的間距變化量。在大都數的案例中，間距增加的量大約是總展距的一半 ($dC \approx 0.5 x_T$)，此時的水平震動的變化將會被忽略，因此，必須先定義最佳了展距 x_T 才能定義出最佳的增加量 dC 。理論上，較短的 x_T 將保證對於控制中的水平震動有較高的準確性，然而，卻會降低了估計散佈取線之準確性，因此，這需要作一些調整。在大都數的土層研究中，最適的展距 x_T 的範圍大約是 10-30m，而最適的增加量為 5-15m。

一旦利用多個紀錄器去紀錄規則移動的量測結果，從每一個紀錄器即可得到 1-D 的剪力波速剖面圖，每一個剪力波速剖面圖有最適當水平的座標去呈現出垂直的剪力波速震動，利用受波器展距的中心點來完成量測的目的，Multiple Vs profiles obtained are then used for a 2-D (x and z) interpolation to create the final map. The kriging method is usually used for the interpolation.

優缺點

MASW 是最好的震測技術來量測基礎材料或地層材料模數。由於多頻道的紀錄和處理系統的使用，探測的結果 (VS) 有高度的可性度，甚至是在呈現高組態的表面波和各種人為的雜訊干擾下。所有的量測過程都可以完全地自動化，因此，這方法是非常簡單且快速的施作。

限制

由於表面波的內部特性，結果的解析被限制在不規則的尺寸，由經驗法則得知最小尺寸在 $1/10$ 的深度之下可以被解析。

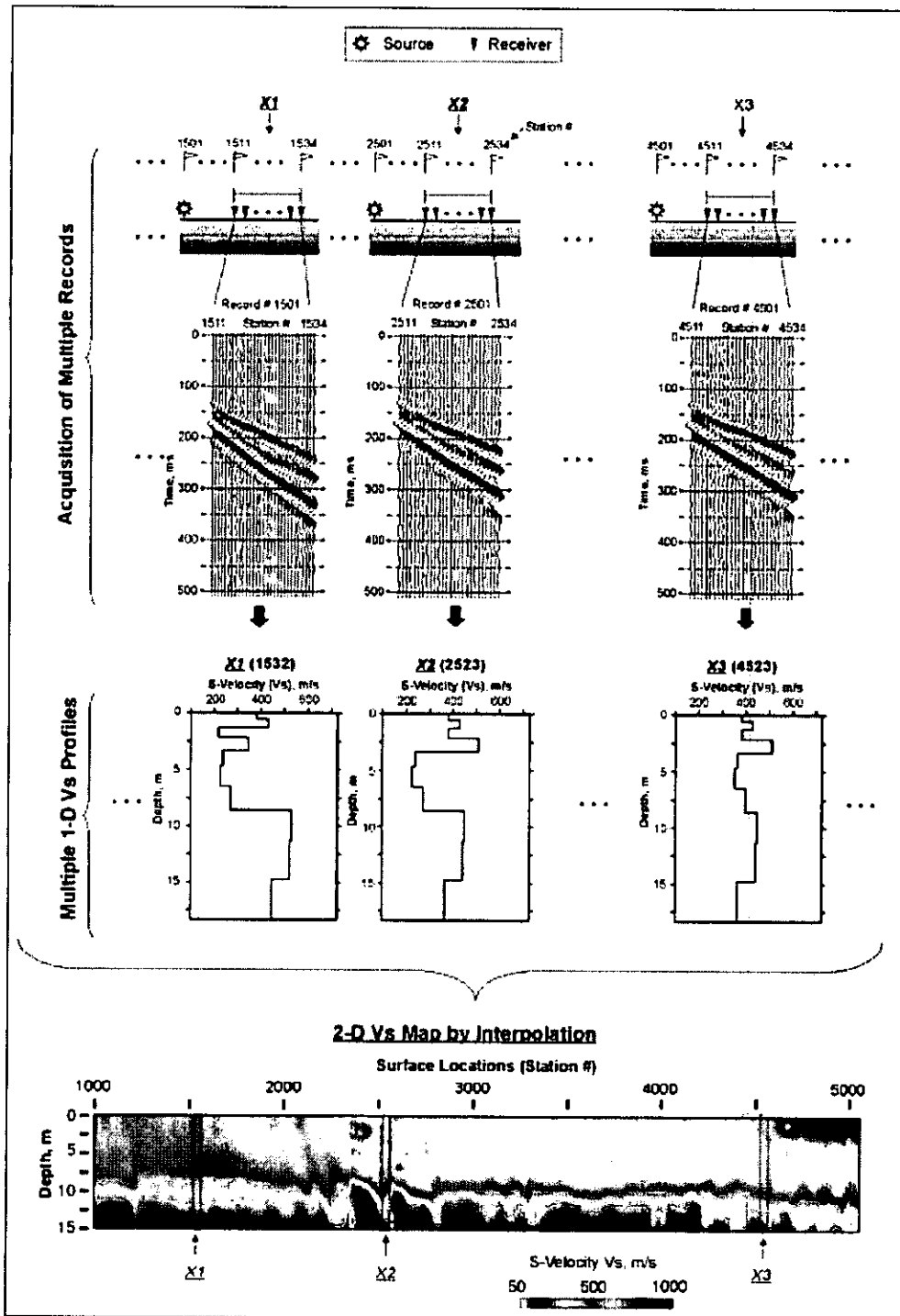


圖 173 多頻道表面波資料判釋流程與 2D 速度剖面(Kansas Geological Survey)

13. 重力式(Gravity)

基本概念



重力法量測在地球重力牽引下(gravitational pull of Earth)的微小的空間差異(spatial difference)。如果岩盤(bedrock)與覆土(overburden)具有不同密度(density)，則重力牽引將在岩盤的地形特徵(topographic feature)下有所改變。

在圖 184 中，假設岩盤具有 3.0 g/cc 的密度，而覆土具有 2.0 g/cc 的密度。因為岩盤密度大於覆土密度，岩盤較靠近地表(ground surface)之處的重力牽引將較高。

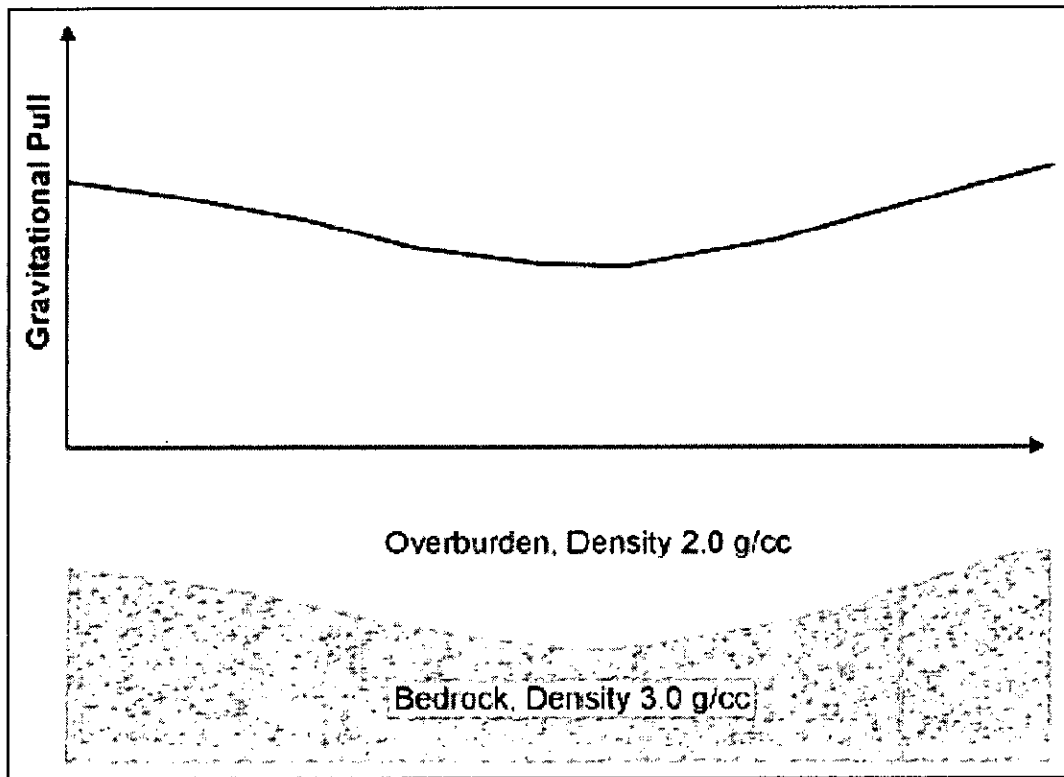


圖 184 岩盤凹陷(depression)下的重力牽引

用於量測重力牽引的儀器稱作重力計(gravimeter)。該儀器並不紀錄重力牽引的絕對數值(absolute value)，而是量測重力牽引下的相對空間量測。

岩盤構造(structure，凹陷或凸起(depression or mound))下的不規則重力場(anomalous gravitational field)取決於凹陷程度的大小(amplitude of the depression)、寬度與深度、以及覆土與岩盤之間的密度對比(density contrast)。伴隨顯著巨大密度對比的(significant)岩盤地形將產生巨大的重力不規則。相反地，深度中的小型構造，即使伴隨巨大密度對比，或許僅能產生微小的不規則。可清楚地發現重力不規則的大小取決於構造的參數。因此，能夠儘可能越精確地量測重力場是重要的。LaCoste & Romberg 公司



的Model D1a具有精度 10 毫伽爾(macrogal)的重力計 (地球重力場為 980,000,000 微伽爾)，而岩盤內地形改變下的重力不規則的變化量範圍由不可檢測(undetactable)到數百微伽爾。圖 195 為LaCoste & Romberg公司的Model D1a重力計。

該儀器為量測小重力不規則變化的良好儀器之一種。如果預期有更小的重力不規則，可採用 LaCoste & Romberg 公司的 Model EG，此儀器之重複性(repeatability)約為 3 微伽爾。



圖 195 重力計 (Model D1a, LaCoste & Romberg)

資料擷取

其施測方式通常沿著感興趣的區域佈線施測(conduct survey)。岩盤特徵(bedrock feature)預期的尺寸將決定每次讀數的距離(亦即測站間距，station spacing)。相較於較大的岩盤特徵，空間上小的岩盤特徵將需要較小的測站間距。施作野外工作(fieldwork)前，得預估場址數學上地不規則性，據此並配合預期儀器精度(expected instrument accuracy)可估算得不規則尺度與需求的測站間距。

測站間距的重力讀數是沿著跨過預期岩盤地形位置的橫切線(traverse)施測。然而，為了考量儀器的預期漂移(expected drift of the instrument)，一個測站(通常是第一個)必須每半小時(取決於儀器漂移特性)重新讀數以獲得儀器漂移的野外圖像(field graph)。因為重



力離地心距離減小，須量測每個測站的高程至 3 公分左右的精度。

資料處理

野外重力讀數需先採取修正(correction)。每個讀數需修正高程(elevation)、潮差影響(influence of tide)、緯度(latitude)、以及存在顯著的局部地物(significant local topography)時的地形修正(topographic correction)。近代的儀器如 LaCoste & Romberg 公司的 Model D1a 能做潮差與偏移修正。

資料判釋

使用軟體於判釋重力資料時，需假設地質特徵(geologic feature)的重力場。程式(program)會改變岩盤地形參數(形狀、深度)直到假設的重力場吻合(match)觀測重力場。這種處理稱作反算(inversion)，且此方法普遍地用在地球物理判釋(geophysical interpretation)。若已有擷取數條測線資料，可產生重力場圖(gravity field map)。

優點

重力測繪(gravity survey)僅需使用少量儀器安裝(重力計與高程控制用儀器)。重力測繪不引人注目(unobtrusive)且能在環境敏感區域(environmentally sensitive area)施測。

限制

重力測繪為需要儀器觀測者顯著的勞力密集手續(labor-intensive procedure)。即使有些儀器能自行定平(self-leveling)，如 LaCoste & Romberg EG，仍然需要小心為之。一旦取得讀數，需箝緊其重力感應機制使可能更動讀數的過度振動(excessive vibration)停止。儀器須放置於實心地面(solid ground)或特別設計的平板上，使之取得讀數之際儀器不會移動。如前文所述，所有的測站必須量測高程。

岩盤地形衍生的重力不規則隨深度急速地變小，因此可檢測程度(detectability)亦隨著深度急速減低。對於建立預期的不規則尺度與定義重力測繪是否可行，預先測繪模式化(pre-survey modeling)是重要的。

如果地面與岩盤之間出現其他地層(layer)且橫向地(laterally)改變厚度或密度，將引起阻礙判釋岩盤地形的重力不規則。此外，破裂區(fracture zone)與孔隙(void)亦會引起阻礙判釋岩盤地形的重力不規則。

14. 裂縫勘測方法(Methods to Map Fracture)

如同使用任何地球物理方法，裂縫(fracture)必然顯現某種可以從地面被檢測到的物理特性(physical property)。一般來說，地球物理方法並不會檢測到獨立的裂縫，除非裂縫足夠大到可以檢測到裂縫帶(fracture zone)。通常岩盤中的裂縫會比無裂隙的母岩岩盤(host unfractured bedrock)含有較多水分，因此電學上會比較導電(conductive)，也可能會成為較低之地震波速(seismic velocity)區域。在某些案例，因為裂縫帶受到較多侵蝕(erosion)，裂縫帶或許會比周遭無裂縫岩盤較為凹陷(depression)。圖 206 表示裂縫與其潛在有用特性(potential attribute)示意圖。

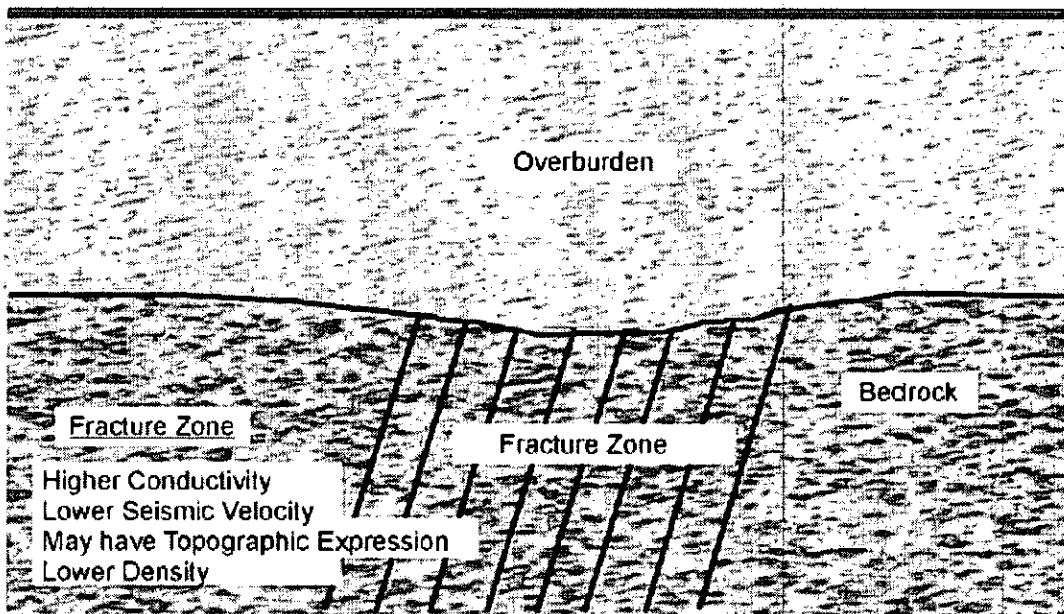


圖 206 岩盤裂縫與潛在有用特性

數種地球物理方法可用在勘測岩盤裂縫。最普遍常用的方法表列如下：

1. 導電度量測(Conductivity Measurement)
2. 透地雷達(Ground Penetrating Radar)



3. 以同支距陣列(Common Offset Array)紀錄之雷利波(Rayleigh wave)，又稱同支距表面波(Common Offset Surface Waves)
4. 震波折射法(Seismic Refraction)
5. 剪力波震波反射法(Shear Wave Seismic Reflection)
6. 電阻量測(Resistivity Measurement)

然而，上面列出的方法應用於定位裂隙(locating fracture)存在一些差異性。

15. 磁力式(Magnetic)

基本觀念

磁力法可用來估計含有磁鐵礦(magnetite)的岩石構成物(rock formation)磁化率(magnetic susceptibility)。這種勘測(mapping)礦物含量(mineral content)的程度可以當作是勘測與岩石學相關的參數(parameter)。

磁力資料可利用地面或空中傳播測繪(airborne survey)方式記錄。如果需覆蓋廣大的區域，空中傳播測繪方式將比較恰當。在做出採用地表或空中方法的決定前首先需考量測繪區大小。其他考量包含資料密度(density of data)需求、相對花費、與標的(target)預期深度。本章節僅討論地面測繪，因為兩種測繪形式的方法與判釋相似。

岩石地層通常含有少量磁鐵礦。磁鐵礦可產生疊加(superimposed on)與擾動(distort)地球磁場(magnetic field)的次要磁場。地面上磁場強度(strength)量測可以用來定義含有磁鐵礦地層的深度與估算其磁化率。磁化率僅能近似地估算磁鐵礦含量，然而，磁化率橫向或垂直向的改變則能用來估定(assess)相對磁鐵礦含量變化。磁力法對於判釋數個相繼較深地層磁鐵礦含量並不十分合適，因為最淺層的磁性不規則(magnetic anomaly)支配(dominate)量測的磁場。

數種可用來記錄磁力資料的儀器常裝配可允許全時紀錄位置的地理資訊系統(GPS)。

資料擷取

藉由沿著橫向跨越感興趣區域，以施測磁力法測繪，資料正常上是紀錄在時間域(time domain)，通常一秒內有數筆讀數。而磁力計(magnetometer)定位常藉由 GPS 系統定



位(positioning)，如果不使用 GPS，則需要其他方法用以定位資料。

因為地球磁場強度在時間上連續地改變，通常會設置基測站(base station)記錄這些改變。因為這些變化通常具有每日週期，因此稱作日間影響(diurnal effect)。此基測站需與紀錄空間資料的磁力計進行時間同步(time synchronized)。這種磁力變化影響可以在處理階段從野外資料(field data)中移除使得此變化不會太嚴重。然而，如果日間磁力改變過於顯著，須停止測繪。

資料處理

磁力資料需要移除日間偏移(diurnal drift)，並且必須給定(assign)資料的空間上的座標。藉由獲得每條測線終點位置與利用內插方法給定其他資料點座標。然而，附有 GPS 的磁力計允許記錄資料時即給定座標於資料內。多樣的濾波程序(filtering routine)可用來移除噪音尖銳(noise spike)，如果有需要的，也可以用來平滑化(smoothing)資料。

資料判釋

富含磁鐵礦區域(magnetite-rich zone)上的磁性不規則型式展示說明於圖 217。因為地球磁場方向並非垂直(除非處於磁極(magnetic pole)上)，該磁性具有不規則正負成分，且若於磁鐵礦源為非對稱(not symmetrical)，將難以判釋磁性不規則來源。為了使判釋簡單，藉處理野外強度資料(field strength data)以產生一個橫越來源上方尖峰的函數，稱為解析訊號(Analytic Signal)，此尖峰函數為所有磁場強度資料空間梯度總和(sum of spatial gradients)。訊號一半振幅的寬度與磁性來源深度有關(related)，而解析訊號振幅大小則與磁性來源的磁化率有關。

使用解析訊號資料(或野外磁場強度資料)可估計與岩石內磁鐵礦含量相關的磁性來源磁化率，亦可計算磁性來源深度，也能使用本方法勘測岩石學上變化(lithological change)的磁化率變化。

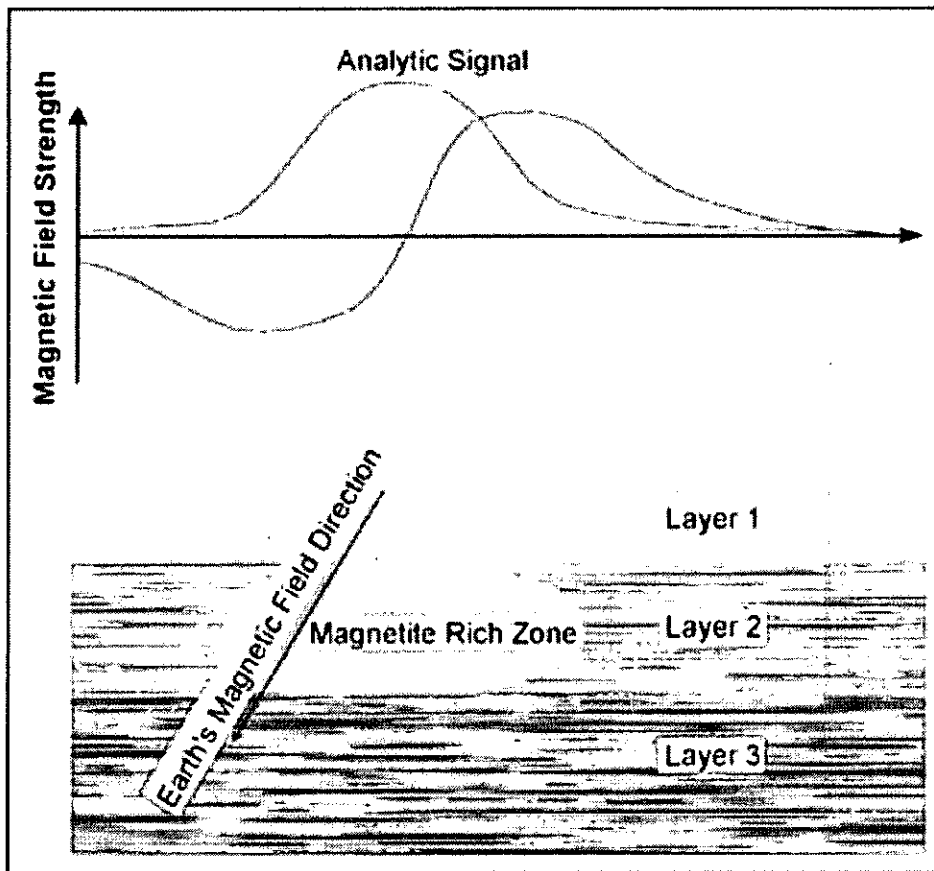


圖 217 富含磁鐵礦區上的磁性不規則

優點

磁性資料相對簡單且野外紀錄相對有效率(efficient)

限制

由於計算是基於適當定義來源形狀所致，當磁性不規則來源為區域邊緣可能未被適當定義的磁鐵礦區，關於該區深度的深度計算可能有顯著誤差，。

16. 感應極化式(Induced Polarization)

基本概念

感應極化(IP)普遍地用在礦業(mining industry)中含金屬的硫化物(metallic sulfide)，如黃鐵礦(pyrite)、黃銅礦(chalcopyrite)、與其他含金屬礦物的定位(locate)。此方法如同磁力法，提供磁性礦物分布(distribution)資料並可被視作岩石學(lithology)的變動。感應極



化不規則現象被發現存在含金屬硫化物、石墨地帶(graphite zone)、以及某些黏土中。感應極化為一種量測地表電阻隨頻率變化的電學方法，許多電極棒陣列(electrode array)用作量測感應極化資料。在本文將利用偶極-偶極陣列(dipole-dipole array)展示相關波形。該陣列可能是最普及的感應極化量測陣列。

感應極化資料分為時間域與頻率域。在時間域中，使用四個電極棒中的兩個將恆定電流(constant current)導入地面然後快速地關閉，在這電流關閉的時間內，另外兩支電極量測電流引致的電壓(resulting voltage)。假使感應極化效應存在，當電流關閉時跨越電極間的電壓不會突然變回零值，而是在一段時間週期(time period)內，通常是幾秒鐘，逐漸減低至零值。簡單感應極化量測通常是隨特定(specific)時間週期對感應極化反應(response)積分(integrate)，換言之即是時間 T_1 與 T_2 間提供一個量測感應極化反應的簡單數字。然而，如果需要更細節的分析，則紀錄全電壓與電流波形。用來量測感應極化效應的單位稱為可充電性(chargeability)，mV/V。利用傅立葉轉換(Fourier transform)轉換資料到頻率域(frequency domain)，資料則可變換(convert)為隨頻率變化的感應極化反應，稱作感應極化頻譜(SIP)。頻譜中感應極化是對不同電流波形頻率進行量測，若使用兩個以上的頻率，則讀數感應極化頻譜資料。

感應極化測繪需要電極棒、資料讀取器(data recorder)、電流發送器(transmitter)、供給發送器的電源。感應極化資料讀取器的範例如 圖 228 所示。圖中的儀器可以同時(simultaneously)紀錄 10 個頻道(channel)的資料。亦可搭配自動資料讀數儀，使得資料紀錄更有效率。

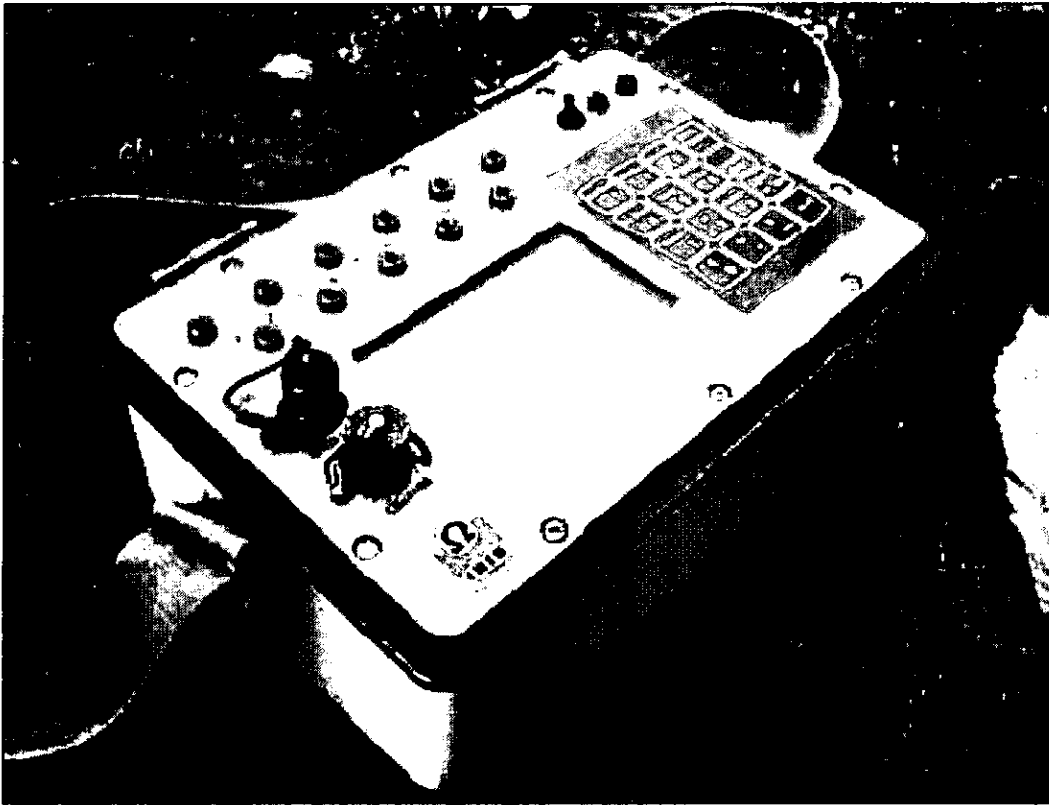


圖 228 感應極化儀器 (IRIS 儀器)

資料擷取

感應極化測繪施作必須如同電阻測繪(resistivity survey)，讀數由橫跨感應趨區域測線上的離散(discrete)測站獲得。在頻率域中，則獲得隨頻率變動的感應極化反應。在時間域中，如果電流與電壓波形已經數位化地(digitally)記錄，並且予以頻譜分析，可由隨頻率變動的電阻產生感應極化頻譜資料。感應極化頻譜資料提供比簡易感應極化量測較多可供判釋的資訊，然而此方法尚屬研究範疇且在商業產品化方法中較少被使用。感應極化頻譜資料能區別(distinguish)不同礦物(產生感應極化不規則的含金屬硫化物、石墨、與某些黏土)，然而若測繪目標僅是簡單地勘測金屬礦物存在與否，則不太需要用到感應極化頻譜法。

資料處理

紀錄感應極化資料時，同時也記錄了電阻資料。兩者通常繪製為剖面形式，稱作虛擬剖面(pseudosection)。據此呈現方式，較小電極棒分隔(separation)的資料繪製在靠近虛



擬剖面頂端(top)，較大電極棒分隔的資料則繪製在虛擬剖面底部(bottom)，進而模擬(simulate)沿橫切線(traverse)各深度的電阻與感應極化值圖像。典型的可充電性虛擬剖面如圖 9 所示。水平因次(dimension)為距離，垂直因次(n-value)則與用來量測的電極棒間距(spacing)有關。雖然這些資料是使用小的電極棒間距所得的相當淺層測繪，仍可用以說明此方法、資料呈現技巧，以及判釋方法。使用較大電極棒間距則可測繪更大深度。相關的電阻虛擬剖面呈現於圖 30。

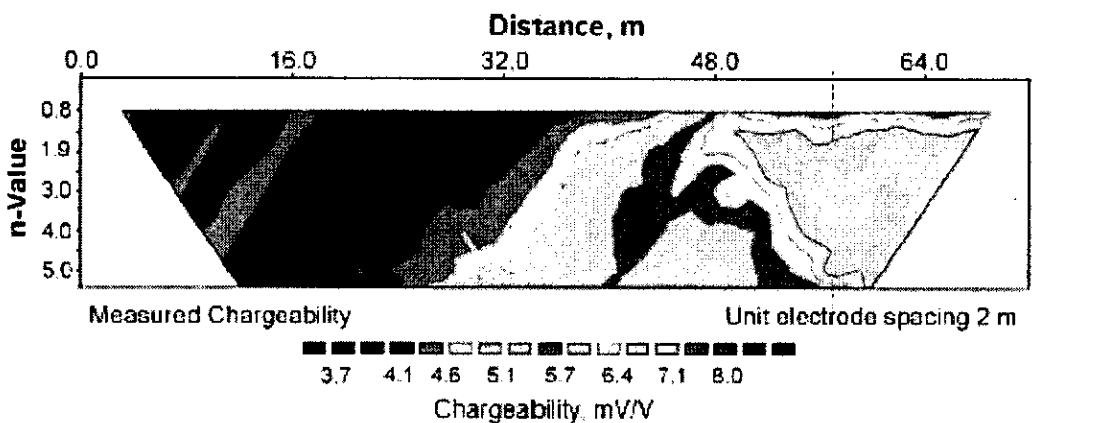


圖 29 充電性虛擬剖面 (Terraplus, Inc.)

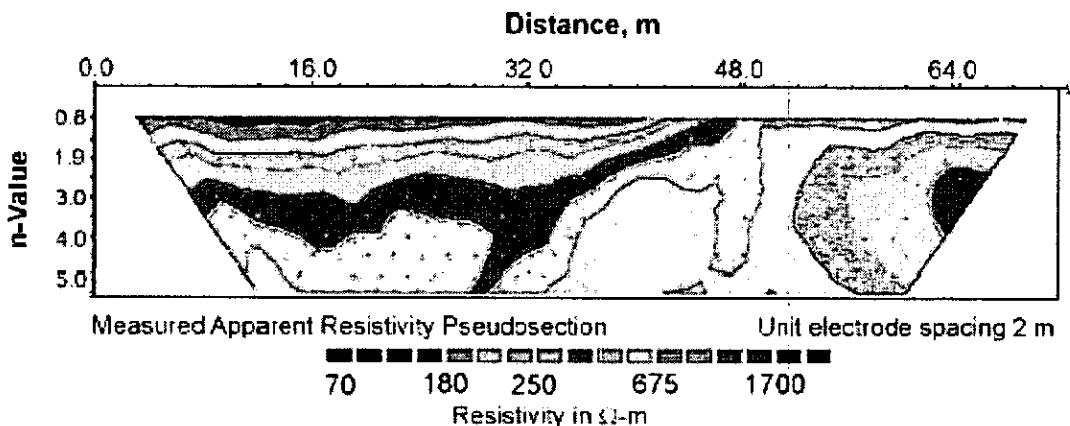


圖 30 量測的(視覺的 apparent)電阻虛擬剖面 (Terraplus, Inc.)

資料判釋

虛擬剖面資料通常藉由反算技術(inversion technology)判釋，輸入初始模型於程式內，然後由該模型計算虛擬剖面。藉由定義計算的虛擬剖面與野外資料的逼近程度(degree

of fit), 逐步修正模型以計算新的虛擬剖面, 重覆此程序直到模型提供一個良好逼近野外資料的虛擬剖面。

圖 31 顯示圖 29 的資料判釋, 在此縱斷面(profile), 地表高程亦被合併於判釋中。因為感應極化現象(phenomena)也發生在地表下黏土出現的地方, 此方法能夠用在估計黏土含量。測繪技術、處理與判釋方法類似先前所述的金屬礦物檢測。

雖然反應極化常常發現在黏土上, 並且普遍有利用於發現黏土的報告書, 但是顯示極化反應大小與黏土量之間的相关性(correlation)的關係並未被找到。

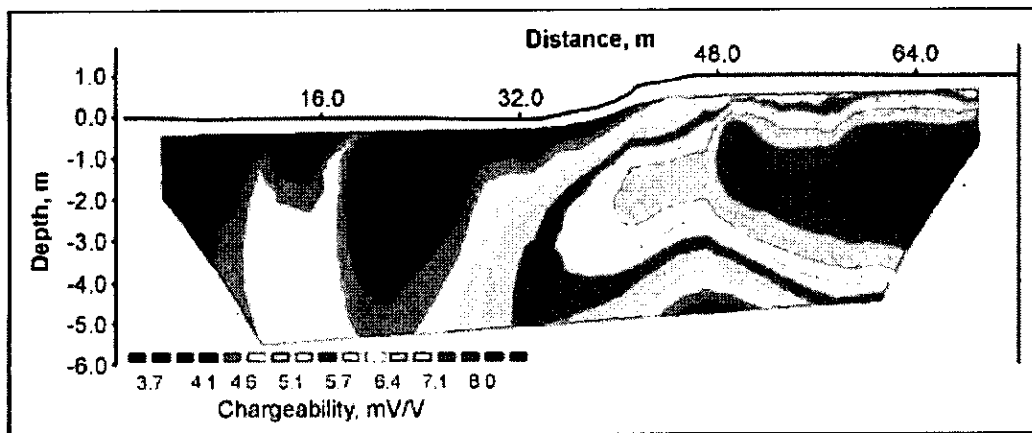


圖 31 經判釋的圖 29 感應極化資料 (Terraplus, Inc.)

優點

感應極化量測隨著電阻頻率的變動, 以提供獨一無二之含金屬硫化物、石墨、與某些黏土能呈現極化的材料(polarizable material)判釋。

限制

如同電阻法, 感應極化法需要將電極棒插入地面, 然而極化信號可能相當小, 儘可能地輸入較多電流至地面以增加量測信號對以感應極化法是重要的。如果地表堅硬且乾燥, 不僅難以插入電極棒至地面, 且輸入電流至地面亦具有難度。解決之道通常是澆水在電極棒上, 增進電極棒與週遭土壤之間的電學接觸性。

17. 自然電位法(Self Potential)

基本觀念

唯一用來檢測(detect)地下水流(ground flow)的地球物理方法為自然電位(SP)法。此方法量測一些由地下水流引致的地表面自然發生電位(electrical potential)。

自然電位電壓有許多起因(cause)，大電位可能由能發生數百毫伏特(millivolt)的負自然電位不規格性(negative SP anomaly)的礦化作用(mineralization)引致。因為地表面電流(telluric current)，也能發生自然電學電位(natural electrical potential)，這些是由地球大氣(atmosphere)內與外的電學活動(electrical activity)引致的流動在地球內巨大電流。

圖 232 與 圖 243 顯示水流出流入裂隙帶(fracture zone)時的自然電位。當水流入裂隙(圖 232)，可在水流上方觀察到負的自然電位不規則，相反地，當水流出裂隙(圖 243)，則是正的自然電位不規則。

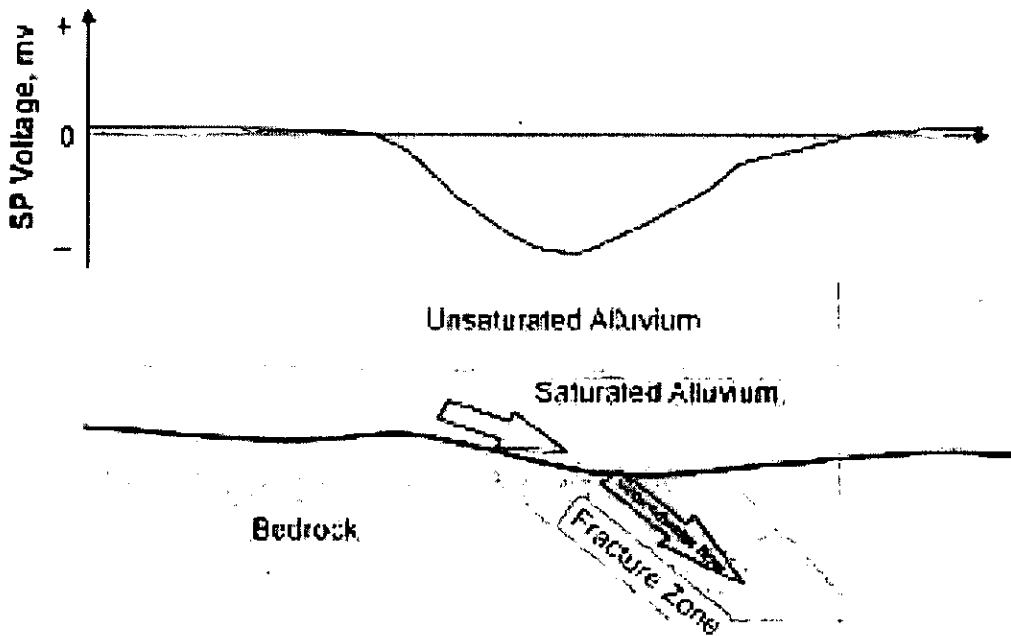


圖 232 在水流入裂隙帶上的預期自然電位不規則

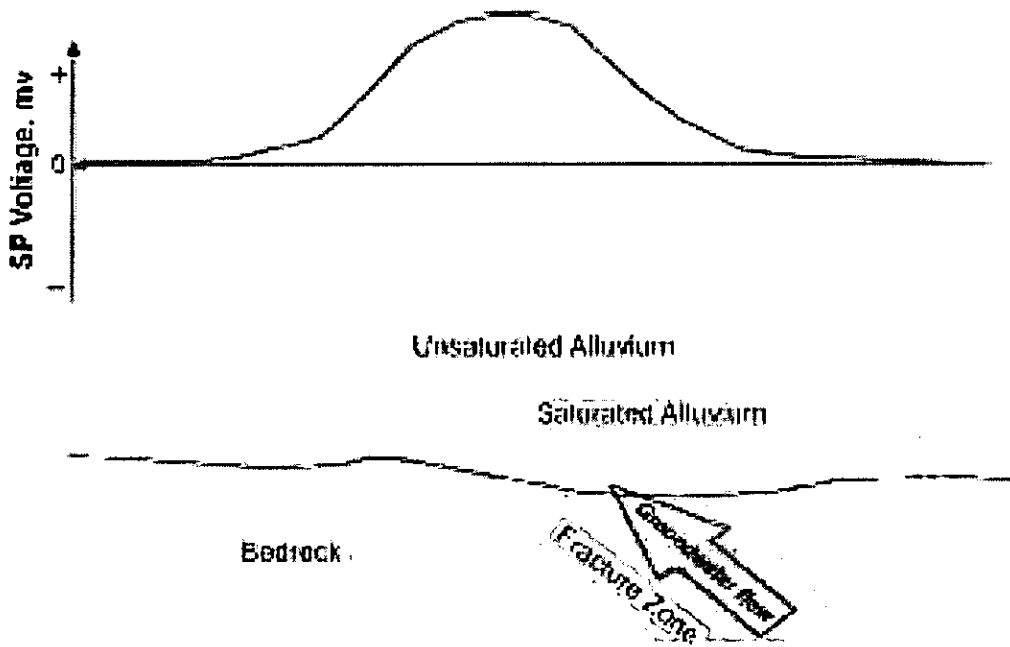


圖 243 在水流出裂隙帶上的預期自然電位不規則

資料擷取

圖 254 顯示兩種用於紀錄自然電位的技術，其中一種需要一個電極棒(為一個能滲透的罐子(porous pot)或不鏽鋼釘(stainless steel spike))在一永久的參考點上(permanent reference point)，稱作遠距電極棒(remote electrode)，再以長的電線連接第二電極棒至遠距電極棒。然後每當讀取兩電極棒之間電壓時，沿著預定橫切線移動第二電極棒。此系統稱為遠距電極棒系統，提供以參考電極棒准之參考自然電位電壓。第二種技術用在野外更為簡單，具有兩固定距離的電極棒，而該電極棒系統僅需沿橫切線等間距移動，稱作偶極系統(dipole system)。

資料處理

通常測得的電壓僅需少許處理。

資料判釋

通常將測得的電壓隨深度做出縱斷面即可完成判釋，再如同圖 232 與圖 24 搜尋其中的自然電位不規則。對於定量的判釋(quantitative interpretation)，得需透過相關模型輔助。

優點



自然電位法用在野外是非常簡單且使用不昂貴的裝備。

限制

數個其他因素可引致自然電位不規則，其中有些引致電位不規則比水流引致的大。然而，此方法仍是簡易且易於應用。本方法在鄰近接地(grounded)結構物或接地金屬物，如籬笆，會無法作用，因為上述物件的鏽蝕(corrosion)可能產生電位。此外，鄰近電線接地處(electrical grounding)之測繪可能沒有效率。

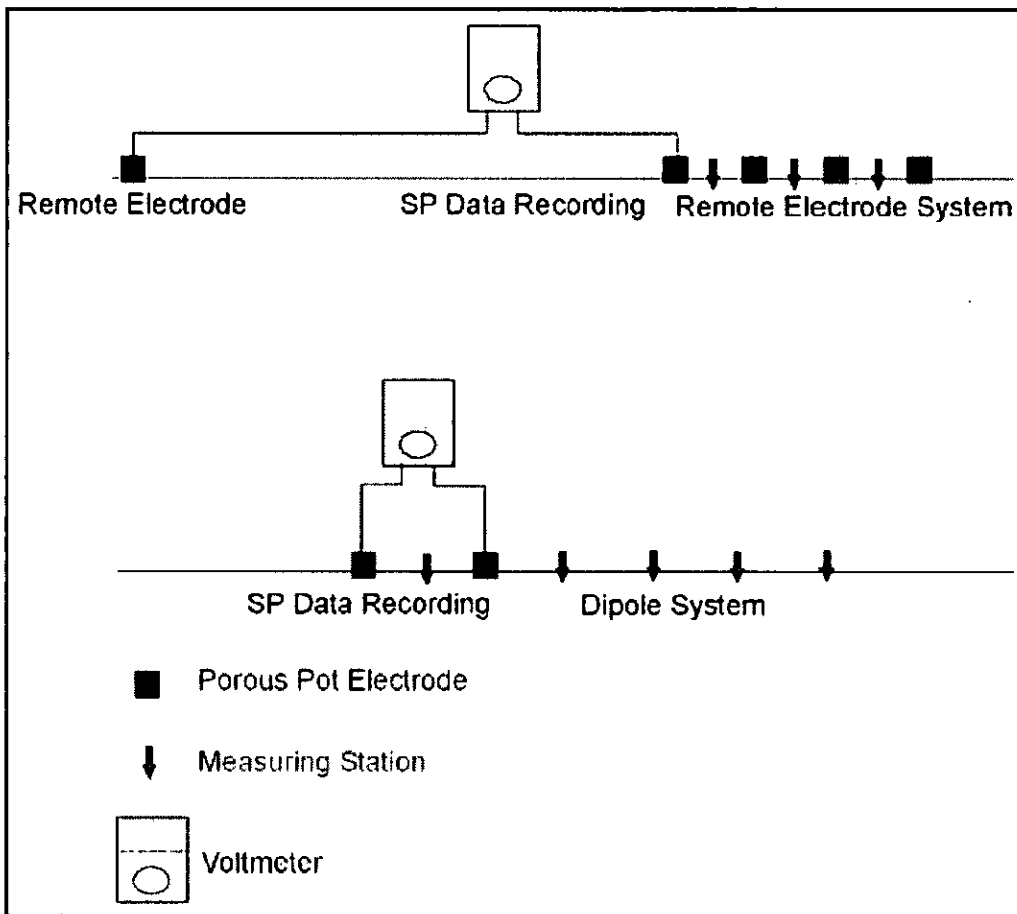


圖 254 紀錄自然電位資料方法





國立交通大學

防災工程研究中心

附錄五 期初委員審查意見回覆



附錄五 期初審查委員意見回覆

『水庫安全監測問題評析與非破壞性檢測技術應用之研究』期初簡報委員意見回覆

委員意見	意見回覆及辦理情形
<p>陳委員茂生：</p> <p>一、經本計劃之執行協助水庫管理單位確實執行依水利法及相關法規之定期與不定期之安全檢查，如與現行之檢查規格化之表格對應並做精確之數字量測紀錄。</p> <p>二、工作目標(P2-1)2004 年鯉魚潭水庫備用閘門事件影響大台中地區用水，請加強如何執行檢測技術。</p> <p>三、震測、地電阻影響探測等具實際量測資料之比對反算所需資料之建立與實用之研判，如何移轉給水庫管理人員？</p> <p>四、研究成果請以規劃調查、設計施工與管理營運時期不同階層之適用，其水庫安全監測技術之提升研擬建議。</p>	<p>一、本研究將專注於監測問題評析與非破壞性監測技術可適性探討，研究成果有助於未來建立水庫安全監測與檢測手冊。</p> <p>二、閘門等水工機械檢測不在本研究範疇內，該舉例將在未來報告中刪除。</p> <p>三、非破壞性地物探測屬於專業檢測技術，本研究重點在於探討幾項前瞻性技術應用在水庫檢測及監測化之可適性，將提出這些方法的適用範圍、限制與改良方法。研究成果可作為管理人員規劃辦理檢測之參考，若技術成熟，未來可視需要進行適當的教育訓練與技術移轉。</p> <p>四、本研究之定位主要在營運時期的監測與檢測技術，其問題的探討與技術評估有助於未來訂定具體的監測與檢測手冊。</p>
<p>費委員立沅：</p> <p>一、對於潛在破壞模式之分類，建議加入活動斷層因素。另外，請考慮針對水庫不同部分（壩體、壩基、壩座等）、發生機會、發生原因、可能帶來的損害等項目合併探</p>	<p>一、破壞模式之分類主要以發生破壞之機制來區分，因此活動斷層將歸類在破壞的原因裡。其他遵照辦理，已於期中報告中補充。</p>



委員意見	意見回覆及辦理情形
<p>討。</p> <p>二、監測儀器之探討，請依水庫不同階段、重要關鍵位置、數據分析之最適合人員等方向考慮。</p> <p>三、非破壞性檢測部分，請對於地電阻影像剖面法能加入各材料之地電阻值量測，各施測方法優缺點比較等，會更具實用性。如果非破壞性檢測無法達成預定目的時，是否有替代方案。</p>	<p>二、謝謝指教，已參酌辦理。</p> <p>三、地電阻探測在水庫檢測之應用不在於量測地層電阻值的絕對值，而是追蹤滲漏、濕潤區域或偵測破碎帶。可適性研究會探討不同施測方法的優缺點。非破壞性方法是壩體檢查的方法之一，實務上，目視、非破壞性方法、監測儀器、或破壞性取樣等視情況搭配應用。</p>
<p>許委員少華：</p> <p>一、期初報中所使用的地球物理技術是否已涵蓋工作構想中所引舉的所有水庫潛在破壞模式（如：管湧、滲漏、夾層滑動、土壤液化等等）的監測？建議將所監測的成果，如二維圖像等等，轉化成為某個潛在破壞方式的警戒值。</p> <p>二、請在研究成果中，將非壞檢檢測所得的值與現場埋設儀器的值相互比較，方有價值。若要做到這個成果，則應在颱風豪雨中施做，方能得到有破壞可能情況的臨界值，否則比較的皆是較無需考慮的參數數</p>	<p>一、各項潛在破壞模式的評估有不同的方法，其中監測與非破壞性檢測是重要的輔助工具，本研究之評估工作將以不同破壞模式分類為基礎探討適用之監測與非破壞性檢測技術。非破壞性檢測所得到之物理量與監測不同，較缺乏與與預警之直接關連性，必須透過分析評估或偵測到異常區域之直接檢測結果詳細評估，非破壞性檢測結果之預警值值得在該技術監測化後進一步研究。</p> <p>二、事實上，大範圍的非破壞性檢測與某些點的某些物理量的直接量測不同。非破壞性檢測所得到之結果常為震波、電流或電磁波之控制物理參數，監測物理量常為工程參數。由於地電阻率與含水情</p>



委員意見	意見回覆及辦理情形
<p>值範圍。</p> <p>三、大陸有許多土壩破壞的案例，請加以蒐集。</p> <p>四、是否可將中部的鯉魚潭水庫也列入本年度的研究標的？因較新，且壩體仍埋有有效的監測儀器。</p> <p>五、工作構想中所提的表面波震測的震波來源是否足夠大？使探測的深度能夠夠深。</p> <p>六、地電阻的量測，需 injection 與 pumping 水源嗎？主持人在口頭報告中不斷重覆此兩個詞。</p> <p>七、對地球物理方法測出的數值所代表的物理意義，請明確列表簡要說明，然後再對其所可能代表地某些地質與力學的特性再列表說明，請在期中報告中製作（如透水性…）。</p>	<p>形有關，因此可與水壓觀測與滲漏目視檢查之結果比較。震測之結果可以過去取樣量測或孔內波速量測之結果比較。</p> <p>三、不排除中國大陸之案例，若有 well-documented 的破壞案例將納入資料蒐集。</p> <p>四、研究標的主要是老舊水庫或有異常徵兆的水庫，因此鯉魚潭暫不納入考慮。</p> <p>五、此問題正是本研究評估工作項目之一，計畫執行結果應能回答此問題或提出因應方法。</p> <p>六、並不需要，只是以水力傳導係數試驗的概念來類比導電係數（地電阻的倒數）試驗，以利了解地電阻探測之原理。</p> <p>七、在非破壞性檢測技術評估章節中將討論各種方法所能得到之物理量與可能之應用，但地物量測之物理量與工程力學性質並不一定存在一定的關係。表面波震測可直接得到動態力學性質，但地電阻探測所得到之電阻率主要利用其空間分佈追蹤與偵測潛在問題。</p>
<p>許委員澤善：</p> <p>一、國外 30 年以上庫齡之水庫安全監測現況及採用非破壞檢測方法及效益評估為預</p>	<p>一、此工作項目主要在於了解監測與非破壞性檢測在國外老舊水庫的應用經驗。</p>



委員意見	意見回覆及辦理情形
<p>期成果之一，當中「效益評估」與「水庫安全」間之關係如何建立？</p> <p>二、如何在各種監測現況問題彙整後訂定「水庫安全監測與監測手冊」？</p> <p>三、基於未來應用層面考量，建議安全監測與檢測儀器或方法之研擬，以簡易方便為原則，以適用眾多的水庫之需求。</p> <p>四、潛在破壞模式資料中，國內外壩體設計背景說明是否能加以考慮？</p>	<p>二、本研究階段主要在監測問題評析與非破壞性檢測技術可適性與監測化評估，研究成果有助於未來訂定監測與檢測手冊。</p> <p>三、遵照辦理。</p> <p>四、遵照辦理。</p>
<p>水源經營組陳科長在中：</p> <p>一、本計劃簡報內容基本上方向符合，在未來工作期待在監測問題評析上要做探討並建立評析的SOP俾供水庫管理單位有所遵循。</p> <p>二、在潛在破壞模式分析報告，請依水例建造物檢查及安全評估辦法第18條第8項提出報告綱要與構想，經研究成果具體可行後，再依第18條第11項提出建議改善工作內容，若做到預擬或預判潰壩虛擬情境時為理想，本署會依第19條納入潰壩相關技術規範來要求各管理單位配合辦理。</p> <p>三、對水庫現埋設儀器使用狀況要有檢討，對現新進儀器雖有適用性初判，然仍須對壩體環境的破壞及更新埋設的必要性</p>	<p>一、遵照辦理。</p> <p>二、遵照辦理。</p> <p>三、本研究主要目的之一是現有監測問題之評析，所選擇探討案例之水庫將整理問題評析結果供管理單位參考。至於更具體之建議，需視是否有潛在破壞模式分</p>



委員意見	意見回覆及辦理情形
<p>提出檢討，要著重壩體資料收集的正確性，然後才可提供研判或預測水庫安全，故請依此考量做一整理後提出建議供管理單位參考。</p> <p>四、試驗場址選取未符合規定，基本上不反對增加新山水庫一座（雖未滿 30 年），然仍需補列混凝土壩一座。</p> <p>五、非破壞性檢測應由其安全需求來界定其安全監測的定位及可達到對不同時期水庫的預警功能，其對精密儀器或傳統儀器亦要做好其區隔避免競合，請研討後明確交代，期做到相輔相成的功效。</p>	<p>析之結果以作為建議之基礎。</p> <p>四、遵照辦理。</p> <p>五、大範圍的非破壞性檢測與某些點的某些物理量的直接量測不同。可偵測目視檢查及監測系統無法觀察到之異常情形，達到相輔相成的功效。</p>
<p>北水局郭工程司耀程：</p> <p>在契約可行之範圍內，提供以下建議供參考：</p> <p>一、工作執行計畫所提非破壞性檢測技術主要應用在大壩本體，建議將溢洪道，水工機械及閘門系統檢測納入考量。</p> <p>二、建議應將所提之非破壞性檢測技術限制條件（如適用對象、量測深度、現地條件等）於未來成果報告內述明，以利各管理單位參納使用。</p> <p>三、在進行大壩安定性分析時，因缺乏最新地質資料，通常有較多假設條件，致造成分析結果不確定性，建議提出地質資料取得技術（非破壞性），俾提昇大壩安定評析成效。</p>	<p>一、本研究之範圍主要在壩體結構（含溢洪道）及基礎與邊坡等土木工程，水工機械之檢測方法不在本研究範圍內。</p> <p>二、謝謝指教，所提建議與研究構想相同，將朝此方向整理各項非破壞性檢測方法之可行性。</p> <p>三、本研究所提之表面波震測法即在利用非破壞性方法取得地層動態性質。</p> <p>四、謝謝配合。</p>



委員意見	意見回覆及辦理情形
<p>四、有關選擇石門水庫作為本計劃之檢測對象，本局願全力配合辦理。</p>	
<p>中水局林工程司賢義：</p> <p>一、建議將各水資源局現有所轄重要水庫之監測儀器及檢測之現況納入研究分析，俾利改善。</p> <p>二、監測儀器之埋設技術研究，監測儀器之更新、改善技術之研究及監測儀器更新後，新舊觀測數據資料之整合分析方法。</p> <p>三、安全監測及檢測如發現有安全上之警訊，亦即有潰壩潛勢時，應如何處置，建議依不同狀況彙集成相關處理技術手冊。</p> <p>四、壩體之破壞，除「非人為破壞因素外，尚有人為破壞因素」。近年來國際恐怖活動相當嚴重，而水庫大壩廊道若被潛入於多點引爆定時炸彈，則有立即潰壩之可能，或炸毀取出水工相關閘門機電設施，造成水庫無法蓄供水之危機。建議對於水庫大壩廊道如何加強防護措施及安全監測，提出相關方案。</p>	<p>一、本研究將透過一些水庫案例進行監測問題評析，並據以提出監測系統評估之流程，可作為未來建立監測手冊之依據。</p> <p>二、謝謝指教，但本計劃著重在監測問題評析與非破壞性檢測技術之應用。</p> <p>三、謝謝指教，但應變處理應不在本研究範圍內。</p> <p>四、謝謝指教，但人為破壞屬於安全維護之問題，應不在本研究範圍內。</p>



附錄六 期中委員審查意見回覆



附錄六 期中審查委員意見回覆

『水庫安全監測問題評析與非破壞性檢測技術應用之研究』期中簡報委員意見回覆

委員意見	意見回覆及辦理情形
<p>陳委員茂生：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 經本計劃之執行收集相當完整之資料可供本研究之用，惟經驗知識庫偏重 ASCE 及 ICOLD 之文獻資料，請加強收集地理地質水文與人文環境與台灣地區相似之可供實際參考之資料建立經驗知識庫。 2. ICOLD 調查破壞案例，均為嚴重災害甚至潰壩為主要對象，似非實用之資料，請以未發生災害之異常事故，常遇應辦理緊急應變之情況，彙整為經驗資料庫可供水庫安全管理之實際應用。(潰壩為異常事故之最嚴重一項，不宜為惟一研究)。 3. 水庫安全監測自計劃之調查規劃階段開始，於工程設計、施工管理品質檢驗至該工程之安全複核及營運各階段之監測任務，該評析相關之監測問題及建議可能之補救措施。(報告似偏教科書之編撰，宜加強實務之檢討。) 4. 非破壞性檢測之應用可協助既有監測設施之不足或異常現象之探討，惟其設備及檢測判釋技術與安全評核可否普遍應用於水庫管理階層人員？如需較高層次之技術要求或較多之經費支應時，請建議以專案監測或專案委辦研辦。 5. 請檢討過去興建水庫應用之監測技術之回顧，建議將來興建水庫之監測計劃與設備之優選分析技術，或於定期辦理安全評估之應用，彙整可供水庫管理階層人員簡易應用之手冊。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 對於國內外之大壩破壞案例蒐集上，由於 ICOLD 與 ASCE 之資料較為完整，因此文獻資料以這兩個學會所發表的資料為主。不同壩有其特有的區域條件、水文、地質條件，就是有其不同的差異，才會具有不同的破壞模式，藉由不同環境之大壩所存在之破壞模式再加以彙整，可以完成潛在破壞模式分類，作為經驗知識庫之基礎。水庫潛在破壞模式分類與案例收集詳報告 2.2 節及附錄一。 2. ICOLD 所蒐集之資料不僅包含潰壩之部分，亦包含重大破壞與惡化之案例，本研究所彙整的潛在破壞模式與案例皆含蓋在內。 3. 監測計畫有不同之層面與階段，本計劃的工作範疇不在於各階段之監測問題。本研究主要針對既有水庫營運之安全評估相關之監測問題，著重於問題評析，為加強實務之檢討，本計畫補充研擬一監測作業問卷(附錄二)，以了解各水庫之監測實務情況，再據以評析監測問題，請參考報告第三章及第四章。 4. 由於水庫管理單位之專業人力有限，因此許多水庫管理相關工作皆須委外辦理。本研究在非破壞性檢測之應用主要在於評估幾項重要新技術的可行性，並於現地測試，研究成果可作為後續辦理非破壞檢測之參考。至於是否由水庫管理單位自行購買儀器與操作，需視經費、人力、檢測技術難易度、檢測技術的應用頻率而定。



委員意見	意見回覆及辦理情形
	<p>5. 本研究有針對監測技術進行相關感測器之比較與整理，可作為選用儀器之參考。除儀器之選擇外，監測計畫之成效尚牽涉到佈設規劃、資料分析、監測頻率、管理值訂定等項目，本計畫針對這些項目進行本土問題評析，提供未來訂定監測手冊之主要依據。</p>
<p>費委員立沅：</p> <ol style="list-style-type: none"> 目前資料對於潛在破壞模式之分類，主要係參考國外資料，請從監測物理量之角度為基礎，歸納出發生機制與發生原因的類別，且應能包含國內外各類案例。 非破壞性檢測請於分析數據時，考慮地層與壩體材料之差異性分布，且於評析檢測方法之適用性時，考慮現場佈置、地形效應，施測時之注意事項等。 報告中請對於部分定義不明確之名詞再予以界定，例如滲流、滲漏、管湧等。 安全監測計畫之分類項目 (p2-9)，建議加入更新汰換部分。 	<ol style="list-style-type: none"> 本計畫強調監測與非破壞性檢測之規劃應以潛在破壞模式為基礎，乘此原則才以潛在破壞模式作為分類基礎，再分別探討各潛在破壞模式會影響哪些監測物理量及出現何種異常現象。以監測物理量為導向，不失為探討潛在問題的方法，但本研究之邏輯系採取風險管理的手法，以問題為導向。 感謝提醒，檢測資料之分析當然必須考慮現地材料之分佈；在評估非破壞性檢測之適用性，將考慮現場施測條件等問題，詳參考報告第 5.3 節。 遵照辦理，如報告第 3.3.3 節。 感謝提醒，安全監測計畫之更新汰換部分當然可以獨立討論，但綜合考量監測系統項目及儀器維護程序後即可決定更新汰換。
<p>許委員澤善：</p> <ol style="list-style-type: none"> p2-1 所述國內外水庫「破壞」時異常現象中，是否包含國內？(文中並無國內破壞資料) 第 2.5 節及 3.5 節提到「壩體重要檢測技術...」中，「重要檢測技術」並未定義，是否僅及於目前計畫執行單位所提到的檢測技術？ 4.1 節中「水庫破壞模式之分類與案例收集」中，是否以個案陳述？亦或僅以統計數字說明？ 各項監測管理值之訂定如何與壩體破壞產生關連？如何取信於民？當管理值顯示危及壩體安全時，應變措施必然嚴重影響鄰近居民之安寧與長期影響飲用水之供應。 	<ol style="list-style-type: none"> 收集國內水庫破壞之異常現象，納入報告中，例如武界壩之問題 (附錄一)。 並非每一種檢測技術皆適用於水庫安全評估，本研究所謂「壩體重要檢測技術」系指一些極具應用潛力的新技術，報告加入定義說明，改以「重要新興檢測技術」稱之，如第六章。 於期末報告完成破壞模式分類與案例收集後，除了統計介紹外，將案例彙整於附錄一。 本計畫有關監測之部分，主要在於監測相關之問題評析。其中監測管理值的訂定方面，本研究發現許多水庫監測系統皆未訂定。雖然警戒值或危險值之訂定不容易，且有許多不確定性因素，但仍須訂定管理值與相對應之行動，方



委員意見	意見回覆及辦理情形
<p>5. 新山水庫下游坡面不正常滲水（或稱輕微管湧）源於局部濕潤；一般土石壩下游側殼層材料透水性較好，為何會產生濕潤現象？是否能藉由檢測結果推論可靠的原因？</p> <p>6. p2-6 中滲流 (seepage)、滲漏 (leakage) 及管湧 (piping) 請明確定義，並加以區別。</p>	<p>能發揮監測儀器之功能，至於如何訂定則需視水庫設計、施工及過去監測資料等因素而定，可委由專業顧問公司處理，其合理性可藉由持續的監測與行動加以改進。於第 4.3 及 4.5 節補充說明。</p> <p>5. 本研究以新山水庫為例，探討幾項非破壞性檢測技術是否能發掘潛在問題。新山水庫異常滲水之原因屬較深入之案例分析，非在本研究之範疇內，但相關之結果將會提供管理單位參考。</p> <p>6. 遵照辦理，如報告第 3.3.3 節。</p>
<p>水源經營組陳科長在中：</p> <p>1. 本計畫目的由工作項目是有其順序與架構，期能有系統的檢討水庫安全監測的相關問題，並透過有系統的研究來建立一般規範與作業方法和流程。</p> <p>2. 在潛在破壞模式要有 event tree 與各種可能發生事故，基此架構再依各水庫屬性、結構，各種環境與現況條件來探討破壞機制與風險，得到其可能最大破壞事件，如滲流、基礎位移... 等，以便水庫管理單位參考。</p> <p>3. 對現有水庫安全監測問題與分析，請儘量進行收集監測儀器現有問題，將可能發生狀況與需求要制定問卷，收集剖析了解各水庫的問題，再針對問題來回應及研提具體建議始有宏效。</p> <p>4. 對管理者之疑慮，宜針對各壩體屬性與監測儀器的特性建立一簡單評量表，依此分析表可選取出最適當的方法或儀器來更新或改善壩體監測現況需求。</p> <p>5. 對混凝土壩或結構如何來掌握其破壞機制與監測需求，亦要有一研析與交代。</p>	<p>1. 謝謝指教，本研究當本各工作項目有系統檢討水庫安全監測的相關問題，作為外來相關規範與手冊訂定之參考。</p> <p>2. 感謝指教。所提建議屬於水庫安全評估工作的重要流程，亦即潛在破壞模式分析的方法與流程。本計畫主要在探討監測問題與重要新興檢測技術之可行性，為強調監測與檢測工作需以潛在破壞模式為基礎，本計畫建立水庫潛在破壞模式分類與相關知識庫，作為各水庫潛在破壞模式分析及監測規劃之參考。至於潛在破壞模式分析，不在本工作範圍內。</p> <p>3. 感謝建議，本計畫遵照建議，研擬水庫安全監測問卷（詳報告附錄二），並由回收問卷探討相關問題，詳報告第三及四章。</p> <p>4. 水庫安全評估是一項循環不息的工作，首先由現有資料進行潛在破壞模式分析，再由潛在破壞模式分析之結果建議監測與檢測方案；監測與檢測之結果再提供進一步評估潛在破壞模式發生之可能性，如此循環追蹤水庫潛在問題。本計畫針對各潛在破壞模式提出相對應監測與非破壞性檢測可能適用之方法，再依據監測感測器特性、水庫施測條件等評估較適用之方法。上述研究多以表格呈現，如第 3.1 節與第 5.1 節之表格，但非單一評量表可以簡單呈現。未來訂定檢測與檢測手冊時可再改良簡化。</p>



委員意見	意見回覆及辦理情形
	5. 遵照辦理。
<p>中水局林工程司賢義：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 有關水庫大壩安全監測之管理值、警戒值及危險值如何訂定，有無一定標準或訂定準則可供遵循，建請提供資料。 2. 鯉魚潭水庫尚屬年輕水庫，目前尚未利用非破壞性檢測技術作大壩安全監測，本技術應用之研究成果之成熟度是否已可利用於大壩安全監測，其可行性有多大，需要多少經費方可建立檢測系統，是否可協助評估。 3. 本項技術應用之研究成果，建議辦理較完整課程之教育訓練，俾水庫管理機關之管理人員能獲得充分有效之訓練。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 如何訂定水庫安全監測管理值需視水庫設計、施工及過去監測資料等因素而定，有模式分析與統計分析等方法，但如何訂定安全監測管理值並非本計畫之研究範圍。 2. 本計畫研究測試結果顯示，幾項新興的非破壞性檢測技術在壩體安全檢測上適用性很高，本計畫亦提出許多在施測上或分析上之改良，一些方法雖然仍有改進空間，但實務上已可提供非常有用的資訊。震測可提供土壩動態性質，作為動態分析之參考，亦可了解混凝土之強度退化情形。電探對於壩體滲漏調查極有幫助，透地雷達較適合混凝土結構之檢測，這些方法亦可搭配使用。不同方法所需之檢測設備不同，所需之經費亦不同，各項檢測設備一般在兩百萬以內可以建立完成。若檢測頻率不高，建議非破壞性檢測可委外辦理。本研究建議未來針對震測結合系統識別及電探進行監測化研究，應可將此兩項檢測技術進化為監測系統。 3. 教育訓練未含在本計劃之範疇內，建議未來分別針對監測與檢測訂定相關手冊，並舉辦教育訓練。
<p>水公司黃工程師鎮豐：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 由新山水庫初步測試成果，有顯示大壩左岸測線之波速剖面存明顯之低速帶，及地電阻檢測顯示有含水量較高等所造成電阻值差異結果，建請交大團隊就新山水庫大壩下游剖面濕潤現象其滲漏路徑之探討，是否可運用該等檢測方法進一步探討評估。 2. 新山水庫大壩現有各項監測設備有提供施工階段監測管理及日後蓄水營運管理用，目前之監測設備及其監測顯示結果在營運管理上是否符合需求，建請交大建議相關意見。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究顯示非破壞性檢測技術確實可以發掘問題，進一步之個案問題探討不在本研究範圍。針對新山水庫，本計畫進一步以 Time-lapse 電探，探討不同時間或水位之現象，有助於確認滲漏現象，至於滲漏路徑之進一步探討，可能需要增加測線或其他調查方法，如 Tracer 或洩降試驗。 2. 現有監測內容是否符合需求，需視該水庫潛在破壞模式之種類與發生機率而定，本研究並未針對個案進行潛在破壞模式分析。建議未來水庫安全評估確實評估潛在破壞模式，並參考本



委員意見	意見回覆及辦理情形
	計畫成果評估與改善監測計畫。交大團隊可協助審查或提供意見。





附錄七 期末委員審查意見回覆



附錄七 期末審查委員意見回覆

『水庫安全監測問題評析與非破壞性檢測技術應用之研究』期末簡報委員意見回覆

委員意見	意見回覆及辦理情形
<p>陳委員茂生：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 本計畫之執行對水庫安全監測成果之評析，並以非破壞性檢測技術作案例之應用，對將來之水庫安全管理甚具參考價值。 2. 配合委辦計畫之題目，如補充整體對水庫各建造物（含閘門、機電）之非破壞性監測之現今發展各項敘述。可供管理單位供工作之參考。 3. 安全監測問題評析中提監測管理值、儀器維護等問題，亦請檢討儀器佈設對安全監測之得失作非破壞性監測作補救之選擇建議。 4. 檢測技術之測試與改良研提表面波震測、地電阻影響探測、折射震測影響探測、透地雷達探測等，請研提現行監測值如何可疑時之選擇非破壞性檢測之應用要領，以解決安全問題。 5. 茲以石門、仁義潭、新山及大觀等作案例之非破壞性檢測，其發現潛在震測、地電阻、透地雷達等之資料如何與管理單位反映及供安全管理之互動，如有後續計劃請作實務之應用參考。並加強非破壞性檢測資料之評核。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝指教。 2. 本計劃著重於潛在破壞模式分類及非破壞性檢測技術於壩體的可行性評估。受限於工作時間與合約執行重點等因素並未將水工結構物列於其中，水庫之機電與閘門相關設施亦非本計劃工作項目範圍。對於水庫之其他建造物的異常現象，選用非破壞性檢測技術邏輯則亦可依報告第 5 章之參考方向規劃。 3. 儀器佈設應以各水庫特定潛在破壞模式為基礎，如經評析有感不足，增設儀器或採用非破壞性檢測亦應以檢核特定破壞模式為考量。選擇合適的檢測技術可依報告第 5 章之參考方向規劃。 4. 關於監測與非破壞性檢測間之連結，應以潛在破壞模式為基礎，由儀器監測值的異常推測造成異常現象的原因。最後可依報告第 5 章之參考方向規劃以選擇合適的檢測技術。 5. 謝謝指教，未來若有機會將嘗試使用案例檢測來落實實務應用，並與管理單位互動加強技術評核。
<p>費委員立沅：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 依據表 2-1 與 2-2 分別以「意外分類」及「發生破壞原因」，將國際上對於大壩破壞之案例內容整理條列，與本報告對於水庫破壞模式之分類有同有異，尤其是『壩基破壞』與『混凝土材料破壞』兩部分。是否能夠將兩者整合得更為完備。 2. 目前對於水庫破壞模式之分類(p.2-8~2-9)較接近於 ICOLD 之分類，但是兩者間最大的差異，在於前者並未包含「承受載重大於設計預期條件」(P.2-6 與 2-7)部分。基本上， 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本計劃對潛在破壞模式分類研究係參考國內外文獻列舉出較常發生之模式，日後研究應對各個水庫其特定破壞模式加以將適當補充調整使其更為完備。 2. 如前述，本計劃對潛在破壞模式分類研究係參考國內外文獻列舉出較常發生之模式，額外載重及水文條件之影響應依各水庫之特定條件進行詳細之潛在破壞模式評析後將加以修改補充。 3. 謝謝指教，不同之水庫規模當然需要相對應之



委員意見	意見回覆及辦理情形
<p>分類應是以實用及在地化為原則，而且對於水庫管理者而言，構想是經由了解水庫之潛在破壞模式，用以選擇最正確的防災措施與時機(P.3-1)，因此這部分非常的重要。如果以台灣地區已經或是可能出現問題的水庫為例來探討，本報告之分類方式是否已經能夠充分包括所有的情況。</p> <p>3. 有關監測儀器部分，建議宜考慮針對不同之水庫規模，提出相對應之監測儀器規劃。監測儀器除正常使用外，也會有使用年限的問題，也應列入評估。請說明基礎位移所希望監測之標的及可能採用的方式為何？</p> <p>4. 非破壞性檢測所推估之材料物理性質，係屬很多環境因素綜合影響下表現的間接數據，有其應用上的限制，建議在報告中應強調多方併用、交叉比對、保守面對等原則。</p> <p>5. 以石門水庫大壩為例所進行之非破壞性檢測，在表面波震測部分：1.此次檢測與第一次安全評估相距的時間是否足以造成壓密程度與抗剪強度的大幅增加，還是因為有其他人為因素的影響。2.表面波速與下孔震測波速成倍數之差異，是否與垂向勁度之差異成正比例關係。3.測線 B 下方之材料包括排水層、濾層、壩心(?)，而測線 A 大致上為壩心，但是兩者波速之差異，並不能完全顯示材料具有不同的物理性質。4.斜坡效應是否可經由規劃部分重疊測線的方式加以修正。</p> <p>6. 本計畫執行的成果非常豐碩，但是在相關的討論中仍提出許多的問題未解，建議能執行後續的計畫，繼續蒐集與分析相關的數據，並選擇具代表性的水庫做出實際的規劃成果。</p>	<p>監測儀器規劃。如報告第 4.1 節所述，在資源不足情況下，以潛在破壞模式為基礎規劃監測計畫應最為經濟有效；有關監測儀器使用年限，如報告第 4.1 節及 4.4 節，規劃監測計畫之系統項目及維護程序中應將其包含在內；對於基礎位移監測部份，其監測標的應依其相對應之破壞模式認定，監測方法及儀器於報告第 3.3.3 節及附錄(二)、(三)皆有其相關簡介。</p> <p>4. 謝謝指教，委員所提之各項原則於報告第 5.3 節之非破壞性檢測試用性評估方法中亦有敘述。</p> <p>5. 表面波震測量測為 SV 波下孔震測量測為 SH 波，以夯實土壤而言，垂直向勁度大於水平向，故資料之合理性甚高。第一次安全評估下孔震測時間並未詳細確定，但以早期下孔儀器與現行檢測儀器比較，現行之非破壞性檢測技術所呈現資料可信度應大於早期結果。斜坡效應對電探，透地雷達與折射震測的資料影響，可考慮並呈現到所量測的結果上。只有表面波震測沒將其斜坡效應的影響考慮進去，當然，利用測線疊合是可改善斜坡效應的影響，但受到材料的差異與測線可佈設範圍的限制，改善的效果有限。</p> <p>6. 謝謝指教，本計畫中研究之潛在破壞模式觀念及非破壞檢測技術應用於國內水庫管理尚屬萌芽階段。礙於工作時間及經費限制，相關的討論中的確提出許多問題尚待解決。未來若有機會，定依委員建議規劃執行以使研究成果更為豐碩周延。</p>
<p>許委員澤善：</p> <p>1. 本研究計畫之期末報告已趨於完整，期中報告個人所提意見也有明確回應，僅在此對交大工作團隊所做的努力表示肯定。</p> <p>2. 水庫包含集水區、庫區、庫水及壩體，壩</p>	<p>1. 謝謝指教。</p> <p>2. 謝謝指教，將於報告中前後文較為模糊處加以斟酌修訂。</p> <p>3. 謝謝指教。</p>



委員意見	意見回覆及辦理情形
<p>體依構造型式及構築材料之不同又區分為拱壩、重力壩、土石壩、混凝土壩等；之中多處使用「水壩」字眼，請適當修正或說明其專業名詞之意義。</p> <p>3. 對於各壩體而言檢測與監測項目已趨於完整，倒是監測結果的快速判讀及判讀結果之應用於決策，以防止水庫在有檢測與監測結果的情況下發生破壞，應該是此類研究未來應加強的重點。</p> <p>4. 目前多項檢測結果均為定性結果，如何定量以應用這些結果於安全評估之分析，應是未來研發重點。</p> <p>5. 台灣地區水庫數目龐大，目前發展的檢測技術均高度仰賴貴重儀器及複雜的圖資之檢測結果，如何營造技術轉移，使水庫保管單位人員進行例行性之檢測，應是未來發展重點。</p>	<p>4. 謝謝指教。本計畫中所使用的檢測技術，大多為第一次應用在壩體檢測上，未來有機會將藉由更完整的檢測，定量應用定為進一步研究方向。</p> <p>5. 謝謝指教，未來將嘗試使用案例的檢測來落實人員的教育訓練與技術轉移。</p>
<p>許委員少華：</p> <p>1. 針對水庫壩體破壞的案例，報告中所羅列的多是國外的案例，是否未來能針對中國大陸的諸多土壩破壞傳聞，稍加蒐集。即使其原因可能來自建壩前未妥善規劃，施工過程又不夠嚴密所致，但是參考價值仍是有的。若找不到 well-documented 的大陸案例，則於報告中提一下。</p> <p>2. 本報告內容非常的專業，而且是結合不同領域間的學術界面整合工作，誠屬不易，值得嘉許。</p> <p>3. 報告中若干圖示，若不以彩色印刷，則實在是看不出其結果。</p> <p>4. 本研究主要是以非破壞性檢測技術來施測，所測出之值多屬相對大小之值，故應與案例水庫之現有埋設感應器（ex 滲流水、孔隙水壓計、土壓計、形變計、…）之測設值相互比對後，才能較確定非破壞檢測出的數據之大小意義。</p> <p>5. 個人曾針對鯉魚潭水庫之滲流異常提出一些數據分析，發表於台灣水利（最近這兩</p>	<p>1. 謝謝指教。主要是大陸案例的透明度不高，詳細的文字資料描述不全，收集上有一定的困難。再則大陸的大壩，遭受破壞的大壩的設計準則與現代之規範有相當大的落差，若參考該種破壞的大壩，作為案列分析資料與台灣的壩體相比則有相當大的差距。</p> <p>2. 謝謝指教。</p> <p>3. 謝謝指教。資料以彩色印刷呈現，將會於定稿加以修正。</p> <p>4. 非破壞性檢測技術所量測之物理量與監測儀器所觀測到的數據，意義上有所不同，因此才會以分類之潛在破壞模式所對應之監測及檢測物理量，加以配合分析。</p> <p>5. 謝謝。未來將斟酌參考。</p>



委員意見	意見回覆及辦理情形
<p>年)或許可提供未來對此一水庫檢測的參考。</p>	
<p>陳委員俊宗：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 目前台灣地區水庫規劃興建時均有設施完整監測系統，惟完工後約有 5-10%損壞，5 年後約有 10-15%損壞，10 年後則約有 15-20%損壞，營運階段後亦常有損壞情況，請交大就台灣地區地理條件及天候條件歸類出何者為較合適之監測儀器，以為日後興建設施參考。 2. 有關監測儀器之警戒值及管理值部分，目前台灣地區監測自動化較為缺乏，請交大針對未來水庫安全監測自動化、警戒值、自動傳輸系統及警報系統等提供相關概念性建議。 3. 有關未來安全監測及檢測之相關人員訓練方向、教材如何編撰等，請交大提供相關建議。 4. 本報告如同各委員所提屬研究階段，未來如何實用化，請交大針對後續工作推動方向提出具體建議。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 一般監測儀器為以自動化方式擷取資料多採電子式感測器。台灣地區氣候潮濕多雷雨，電子式監測儀器常因雷擊損毀。如何於監測現場安裝避雷設施，應就現場特定條件設計，不應以通則考慮。已於報告第 4.4 節補充。 2. 本研究著重在問題評析與技術應用方面，未對警戒值的訂定與探討並未做進一步研究，未來若有做監測等相關技術手冊，或許可做更具體的說明。 3. 未來將嘗試使用案例的檢測來落實人員的教育訓練與技術轉移。教材編撰於期中簡報時已有決議，非歸屬於本計劃執行工作項目。 4. 本計畫分別於數座水庫施做多種非破壞性檢測方法，並評估方法應用之可行性。當技術成熟後，後續計畫研究應朝向實用化與應用化的階段並訂定標準化的施作規範。相關未來研究規劃煩請參考報告第 7 章。
<p>台電黃工程司昱達：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. p6-27 透地雷達測試結果，r3 及 r4 影像發現於交界面附近有一塊狀區域。該塊狀性質與其他區域性質差異甚大，詳細狀況尚需其他證據判釋，建請後續作進一步評估能評析其差異原因，並提供資料給管理單位作為參考依據。 2. 建請大署日後可針對不同性質、區域、大小之壩體做更精細評估，例如日月潭水社壩為一土壩，壩頂為公路，車輛行駛頻繁，可否列入下階段監測評估之標的。 3. p6-27 折射震測結果，由測線起點起算約 0m、8m、19m 處存在較低波速區域（波速分別約 1500m/s、1800m/s、2500m/s）於 19m 處之低波速區約自表面向下延伸 1m 深，其餘兩處約影響至 2m 深，判斷標準此三處混凝土品質或完整性不佳，尤以 0m、 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本計劃對相關檢測方法進行一般性測試，檢測結果異常如需再次詳細檢核判別則可由變換施測參數及施作方法進行。但針對個別水庫之工程問題進行檢核非屬本計劃執行範圍所屬。水庫管理單位如須本計劃執行檢測所得資料成果，交大非常樂於提供。 2. 謝謝建議。 3. 針對個別水庫之工程問題進行檢核非屬本計劃執行範圍所屬。水庫管理單位如須本計劃執行檢測所得資料成果，交大非常樂於提供。



委員意見	意見回覆及辦理情形
<p>8m 兩處極可能已有較大孔隙或裂縫存在並已充滿滲流，建請後續可否作進一步評估確認其問題點。</p>	
<p>北水局郭工程師耀程：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 石門水庫 SG-L 及 SG-R 廊道於洩洪時有滲漏點出現，本局初步研判係溢洪道混凝土版工作縫填料老舊退化造成，目前除已持續監視變化狀況外，並已規劃辦理改善，本計畫檢測結果可供修復作業規劃參考。 2. 有關各水庫管理單位監測預警值之建立，目前主要係針對個別監測項目訂定，惟因一個結構體之破壞事件發生，其可預先由多個鄰近監測項目測值反應出來，係屬系流性監測結果顯示，建議未來水利署若有相關研究規劃，可納入系統性預警值建立。 3. 第 12 頁述及配合石門水庫安全評估辦理相關非破壞性檢測，請修正為”第三次”整體安全評估。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝。相關成果很樂意提供給水庫單位作為參考。 2. 謝謝指教。 3. 謝謝指教。已於報告第 6-12 頁內加以修改。
<p>中水局林工程司賢義：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 各水庫管理機關對於本計畫之研究成果及非破壞性檢測技術之實際應用均寄予厚望，故建議續辦後續計畫，以各型水庫之適用性為主要導向，俾供各水庫安全評估之參考。 2. 鯉魚潭水庫於 93 年剛蓄滿水位，為中部地區極重要之水庫，建議未來後續計畫能納入研究範圍之內，俾建立完整之非破壞性檢測資料。 3. 前二次建議事項大致不在本計畫研究範圍，建議若辦理後續計畫能參酌各水庫管理機關實際需求，納入研究範圍內。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝指教。 2. 謝謝指教。 3. 謝謝指教。
<p>水公司黃工程師鎮豐：</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. 報告 P6-10 新山水庫（土石壩）第 7 行，建請修正為一自水庫加高後，目前未完全利用加高部分增加蓄水；及大壩主要問題在於壩體左岸下游坡面之滲流水現象；及有關新山水庫目前實際營運安全狀況，請再與水庫管 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝指教，將持續與水庫單位保持聯繫並已修正相關部分，請參考報告第六章。 2. 本研究著重在問題評析與技術應用方面，因此許多技術在國內都是第一次使用，因此關於監測管理值的趨勢管理方面，未來若有相關計劃



委員意見	意見回覆及辦理情形
<p>理單位商洽補充修正。</p> <p>5. 建請交大團隊在本計畫有關監測管理值其曲線之變化趨勢之可能種類及其狀況之說明納入計畫內容，可提供水庫管理單位並與過去所觀測資料，理論分析及相關現象之曲線變化趨勢，加以比較檢核壩體之安全。</p>	<p>延續，或可加入探討，但目前受於時間及其他因素，並未載本研究報告內加以敘述。</p>
<p>水源組簡工程司振源：</p> <p>1. 報告請增列摘要及結論與建議。</p> <p>2. 實例測試之水庫，尚須辦理第 2-5 項工作 (P1-3) 內容，包括監測儀器適用探討、監測問題評析、非破壞監測方法是用探討、監測化可行性評估等等，許多仍未見於報告中，應予補充。</p> <p>3. 有關各項監測儀器適用性與年度應籌措經費之經濟性評核，建請依原工作執行計畫書要求整理成可提供水庫安全評估主辦單位參考之技術文獻。</p>	<p>1. 謝謝指教。已於報告內加以增列。</p> <p>2. 謝謝指教。已於報告第 3 章及第 4 章加以補充。</p> <p>3. 如報告 4.1 節所述，監測計畫規模規劃最經濟的作法應依各水庫之潛在破壞模式分析設置。且監測計畫建立及營運費用費用，除相關儀器之軟硬體設備費外，儀器安裝亦佔頗大一部份比例。因此年度應籌措經費之經濟性評核應就個別水庫之潛在破壞模式分析及現地情形評估，以通則方式討論並不適當。各項監測儀器與潛在破壞模式之適用性已整理於附錄(二)中。</p>
<p>結論：</p> <p>1. 本計畫期末簡報原則認可。</p> <p>2. 期末報告修正稿請交大於 10 日內送水利署。</p> <p>3. 本計畫明年度是否繼續成立後續實用性推廣計畫，請水源經營組檢討辦理。</p> <p>4. 本計畫期末簡報審查會議委員及出席單位意見請交通大學參採辦理。</p>	

國家圖書館出版品預行編目資料

水庫安全監測問題評析與非破壞檢測技術應用之
研究 = Review of monitoring problems and
application of non-destruction testing
methods for evaluation dam performance /
國立交通大學編著. -- 初版. -- [臺北市]:
經濟部水利署, 2005[民94]

面 ; 公分

參考書目:面

ISBN 986-00-3298-X(平裝)

1. 水庫 - 管理

443.64

94023603

水庫安全監測問題評析與非破壞性檢測技術應用之研究

出版機關：經濟部水利署

地 址：台中市黎明路二段 501 號

電 話：(04) 2250-1250

編著者：國立交通大學

地 址：300 新竹市大學路 1001 號

電 話：(035)727293

傳 真：(035)716257

初 版：2005 年 12 月

GPN：1009403878

ISBN：986-00-3298-X

版權所有 翻印必究