



地球物理探測技術於水庫構造物
安全檢查應用之研究

Application of Geophysical methods in
Dam Safety Evaluation



主辦機關：經濟部水利署水利規劃試驗所

執行單位：國立交通大學

中華民國 101 年 12 月

地球物理探測技術於水庫構造物
安全檢查應用之研究

Application of Geophysical methods in
Dam Safety Evaluation

主辦機關：經濟部水利署水利規劃試驗所

執行單位：國立交通大學

編著者：林志平

目錄

目錄	目-1
表目錄	表-1
圖目錄	圖-1
摘要	摘-1
Abstract.....	英-1
結論與建議.....	結-1
第壹章 前言	1-1
一、計畫緣起	1-1
二、計畫目的	1-1
三、工作項目及內容	1-1
四、計畫流程	1-3
第貳章 基本資料收集與分析	2-1
一、臺灣現行水庫構造物安全檢查程序與方法	2-1
(一) 臺灣現行水庫構造物安全檢查相關法規.....	2-1
(二) 水利建造物檢查及安全評估技術規範(蓄水與引水篇)	2-3
二、水庫構造物安全檢查常見問題	2-8
(一) 臺灣地區水庫安全檢查常見問題.....	2-9
(二) 國際水庫安全檢查常見問題	2-12
(三) 安全檢查常見問題綜合整理	2-14
三、地球物理探測技術	2-16
四、國際地球物理方法應用手冊及導引介紹	2-24

(一) 美國聯邦高速公路部門手冊	2-25
(二) 美國 ASTM 標準試驗手冊	2-26
(三) 日本地球探勘物理學家協會(SEGJ)手冊	2-26
第參章 地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查適用性評估與分析	3-1
一、適合應用於水庫構造物安全檢查應用之地球物理探測技術選定	3-1
(一) 常見安全檢查問題之相對應反映物理量	3-2
(二) 常見安全檢查問題適用之地球物理探測技術	3-6
二、地球物理探測技術應用案例蒐集	3-10
三、地球物理探測技術之現地應用問題評析	3-19
(一) 現地應用問題評析要點說明	3-19
(二) 地電阻影像探測法現地應用問題評析	3-21
(三) 自然電位法現地應用問題評析	3-24
(四) 電磁探測法現地應用問題評析	3-26
(五) 透地雷達探測法現地應用問題評析	3-27
(六) 彈性波層析成像法現地應用問題評析	3-30
(七) 多頻道表面波震測法現地應用問題評析	3-34
第肆章 地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用方法建立 ...	4-1
一、地球物理探測技術應用方法概念	4-1
二、地球物理探測技術選用索引表建立	4-2
(一) 地球物理探測技術選用索引表建立概念	4-3
(二) 地球物理探測技術選用分類建立	4-3
(三) 地球物理探測技術參考案例索引建立	4-7
三、地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用導引(手冊)	4-15

四、地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用方法.....	4-17
第五章 地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用現地評估 ...	5-1
一、現地評估之水庫構造物選擇	5-1
(一)現地評估土石壩場址選擇	5-1
(二) 現地評估混凝土壩場址選擇	5-3
二、現地評估之水庫構造物介紹	5-5
(一) 新山水庫背景說明	5-5
(二) 西勢水庫背景說明	5-11
三、現地評估工作規劃與試驗成果	5-15
(一) 新山水庫現勘與現地評估工作規劃.....	5-15
(二) 新山水庫現地施作與試驗成果.....	5-17
(三) 西勢水庫現勘與現地評估工作規劃.....	5-27
(四) 西勢水庫現地施作與試驗成果.....	5-29
第六章 水庫構造物安全檢查教育訓練.....	6-1
參考文獻	參-1
附錄一 報告審查意見回覆.....	A1-1
附錄二 地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用導引手冊(初稿)	A2-1
附錄三 教育訓練問卷調查表.....	A3-1

表目錄

表摘-1 地球物理探測技術選用索引表(例).....	摘-2
表 2-1 國內水庫與大壩安全檢查發現可能潛在問題整理表	2-10
表 2-2 混凝土壩與土石壩常見之潛在破壞模式(修改自林俊宏等, 2008)	2-13
表 2-3 混凝土壩與土石壩常見之安全檢查問題	2-15
表 2-4 地球物理探測技術量測物理量	2-24
表 2-5 不同地球物理技術應用手冊優缺點比較表	2-27
表 3-1 混凝土壩常見安全檢查問題之相對應反映物理量	3-3
表 3-2 土石壩常見安全檢查問題之相對應反映物理量	3-5
表 3-3 混凝土壩常見安全檢查問題之適用地球物理探測技術	3-8
表 3-4 土石壩常見安全檢查問題之適用地球物理探測技術	3-8
表 3-5 地球物理探測技術於大壩安全檢查應用案例整理表	3-18
表 4-1 混凝土壩常見安全檢查問題地球物理探測技術選用索引表 ..	4-9
表 4-2 土石壩常見安全檢查問題地球物理探測技術選用索引表 ...	4-10
表 5-1 混凝土品質優劣及波速速度分類 (Leslie and Cheeseman, 1949)	5-31
表 6-1 地球物理探測技術於大壩常見安全檢查問題應用教育訓練議程 表	6-1

圖目錄

圖摘-1 地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用流程圖	摘-3
圖摘-2 新山水庫電磁波探測法(a)以及地電阻影像探測法(b)探測成果圖	摘-4
圖摘-3 西勢水庫震波層析成像速度剖面柵狀圖	摘-4
圖 1-1 計畫流程圖	1-4
圖 2-1 臺灣現行水庫構造物安全檢查之法規關係圖	2-2
圖 2-2 水庫安全評估程序	2-5
圖 2.3 具大壩安全檢查問題水庫分布圖	2-9
圖 2-4 電阻率影像剖面圖 (新山水庫)	2-17
圖 2-5 自然電位影像平面圖 (Johansson et al., 2005)	2-18
圖 2-6 感應極化法影像剖面圖 (Advanced Geosciences Inc., 2010)	2-19
圖 2-7 透地雷達 3D 影像(大觀電廠溢洪道)	2-19
圖 2-8 電磁探測法平面影像圖(改繪自邱維宣等, 2009)	2-20
圖 2-9 重力探測法平面影像圖(Spicer et al., 2011)	2-21
圖 2-10 壓縮波波速影像剖面圖(石門水庫廊道)	2-22
圖 2-11 剪力波波速影像剖面(新山水庫壩基)	2-23
圖 2-12 反射震測法影像剖面(Sloan et al., 2007)	2-23
圖 3-1 適合應用於水庫構造物安全檢查應用之地球物理探測技術選定方法	3-2
圖 3-2 水社壩標準斷面圖(台灣電力公司, 民國 98 年)	3-12
圖 3-3 水社壩 3D 地電阻探測測線位置圖	3-13
圖 3-4 水社壩 3D 地電阻探測測線相互關係圖	3-14
圖 3-5 SE-H 測線 3D 電阻率影像圖(台灣電力公司, 民國 98 年)	3-15
圖 3-6 SE-L 及 SE-R 測線 3D 電阻率影像圖(修改自台灣電力公司, 民國 98 年)	3-16
圖 3-7 水社壩地電阻探測綜合判釋結果(台灣電力公司, 民國 98 年)	

.....	3-17
圖 3-8 地球物理探測技術之現地應用問題評析內容	3-20
圖 3-9 平板式電極(修改自經濟部水利署，民國 94 年)	3-23
圖 3-10 天線頻率與解析度關係圖(修改自 EKKO UPDAT, 1996).....	3-29
圖 3-12 自由落錘震源系統(修改自經濟部水利署，民國 94 年).....	3-36
圖 3-13 仁義潭殼層表面波震測頻散曲線影像(摘自經濟部水利署，民國 94 年)	3-37
圖 4-1 地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用過程示意圖 ..	4-1
圖 4-2 地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用概念示意圖 ..	4-2
圖 4-3 地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用手冊架構說明圖	4-17
圖 4-4 地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用流程圖	4-18
圖 5-1 臺灣地區土石壩常見安全檢查問題數量統計圖	5-2
圖 5-2 臺灣地區混凝土壩常見安全檢查問題數量統計圖	5-4
圖 5-3 新山水庫大壩標準斷面圖（修改自 Peng et. al, 2008）	5-6
圖 5-4 壩址地質圖（台灣自來水公司，民國 97 年 a）	5-7
圖 5-5 壩體加高後基礎隔幕灌漿平面圖（摘自台灣自來水公司，民國 97 年 a）	5-8
圖 5-6 民國 91 年左山脊隔幕灌漿施工平面圖（摘自台灣自來水公司，民國 97 年 a）	5-9
圖 5-7 新山水庫壩體下游面滲水點位置示意圖（台灣自來水公司，民國 97 年 a）	5-9
圖 5-8 新山水庫殼層及左山脊地電阻影像剖面	5-10
圖 5-9 新山水庫大壩斷面圖與潛在滲漏區域	5-11
圖 5-10 新山水庫滲漏點流量與降雨關係	5-11
圖 5-11 西勢水庫壩體平面圖	5-12
圖 5-12 西勢水庫壩體立面圖	5-13
圖 5-13 新山水庫壩體下游面滲水點位置示意圖(民國 101 年 6 月現勘)	

.....	5-15
圖 5-14 新山水庫壩體及壩址滲漏問題地球物理探測技術現地施作規劃示意圖.....	5-17
圖 5-15 新山水庫電磁探測法現地施測情形	5-18
圖 5-16 新山水庫電磁探測法探測成果	5-19
圖 5-17 新山水庫地電阻探測法測線規劃(根據電磁探測法成果調整).....	5-19
圖 5-18 新山水庫地電阻探測法現場施測情形	5-20
圖 5-19 E1 測線地電阻影像剖面(wenner 法施作).....	5-23
圖 5-20 E1 測線地電阻影像剖面(pole-pole 法施作).....	5-23
圖 5-21 E2 測線地電阻影像剖面(wenner 法施作).....	5-24
圖 5-22 E2 測線地電阻影像剖面(pole-pole 法施作).....	5-24
圖 5-24 E3 測線地電阻影像剖面(pole-pole 法施作).....	5-25
圖 5-25 地電阻影像剖面綜合判釋	5-26
圖 5-27 西勢水庫壩體混凝土強度不足問題地球物理探測技術現地施作規劃示意圖.....	5-29
圖 5-28 層析成像垂直剖面(L1~L3)震源及接收器佈置示意圖	5-30
圖 5-29 層析成像現場施作情形	5-30
圖 5-30 層析成像橫向剖面(H1~H2)震源及接收器佈置示意圖(虛線位於壩體內部至上游側，虛線區為預定速度剖面資料區).....	5-31
圖 5-31 測線 L1 速度分布剖面圖(▼表接收器；×表震源位置)....	5-33
圖 5-32 測線 L2 速度分布剖面圖(▼表接收器；×表震源位置)....	5-33
圖 5-33 測線 L3 速度分布剖面圖(▼表接收器；×表震源位置)....	5-35
圖 5-35 測線 H2 速度分布剖面圖(▼表接收器；×表震源位置)....	5-37
圖 5-36 西勢水庫震波層析成像速度剖面柵狀圖	5-37
圖 6-1 教育訓練現場情形	6-2
圖 6-2 教育訓練問卷成果	6-3

摘要

一、前言

目前臺灣地區水庫之安全檢查主要大部份尚以目視以及監測資料做為最直接之第一手安全診斷基礎，但其主要為顯露於構造物表面之狀態，無法提供構造物內部之損害情形以及可能損害範圍及其路徑過程，具非破壞性且可快速大面積施作之地球物理探測技術實為一有效之輔助工具。雖然地球物理探測技術具有應用潛力，但因水庫構造物具有其特殊性，因此規劃辦理本計畫，以期建立一地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用之方法，並透過地球物理探測技術提升水庫構造物安全檢查及其維護營運作業之成效。

二、資本資料收集與分析

(一) 根據對臺灣現行水庫構造物安全檢查程序與方法之瞭解，提出地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用之切入點。

(二) 由對水庫構造物安全檢查常見問題之統整與調查，整理出目前國內及國外常見之大壩安全檢查問題，據以提供建立適用地球物理探測技術索引表的基礎。

(三) 在對地球物理探測技術之資料收集中，針對九種常見之地球物理探測技術進行基本原理以及其探測重點之瞭解，作為後續應用方法建立時之技術考量內容。

三、地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查適用性評估與分析

(一) 針對常見大壩之安全檢查問題適用之地球物理探測技術進行檢討，考量地球物理探測技術之適用性與可達到之探測靈敏度，將地電阻影像探測法、自然電位法、電磁探測法、透地雷達探測法、彈性波層析成像法以及多頻道表面波震測法與常見大壩安全檢查進行適用

性評估，而建立地球物理探測技術於大壩常見安全檢查問題應用之選擇表，作為後續應用方法建立索引表(如摘表-1 所示)時之核心資料。

摘表-1 地球物理探測技術選用索引表(例)

壩型	位置	安全檢查問題	適用之地球物理探測技術	選用分類	參考案例檢索
土石壩 (例)	壩體/ 壩頂	裂縫	彈性波層析成像法	B2	中國大陸-南水水壩-壩體-裂縫-透地雷達探測法。
			多頻道表面波震測法	C	
			地電阻影像探測法	B1	
			透地雷達探測法	B3	
			電磁探測法	A	
	壩體	坡面滑動	多頻道表面波震測法	B	臺灣-烏山頭水壩-壩體-坡面滑動-表面波震測法

(二) 在地球物理探測技術應用案例之蒐集上，將由國內外研討會或期刊中所收集之相關案例以案例檢索資料、壩體環境與安全檢查問題說明、地球物理探測技術規劃與現地應用問題、檢測成果說明以及應用成果評析五個主題進行整理，共收集有國內外 18 個案例整理，可作為與所建立之地球物理探測技術於大壩常見安全檢查問題應用之參考使用。

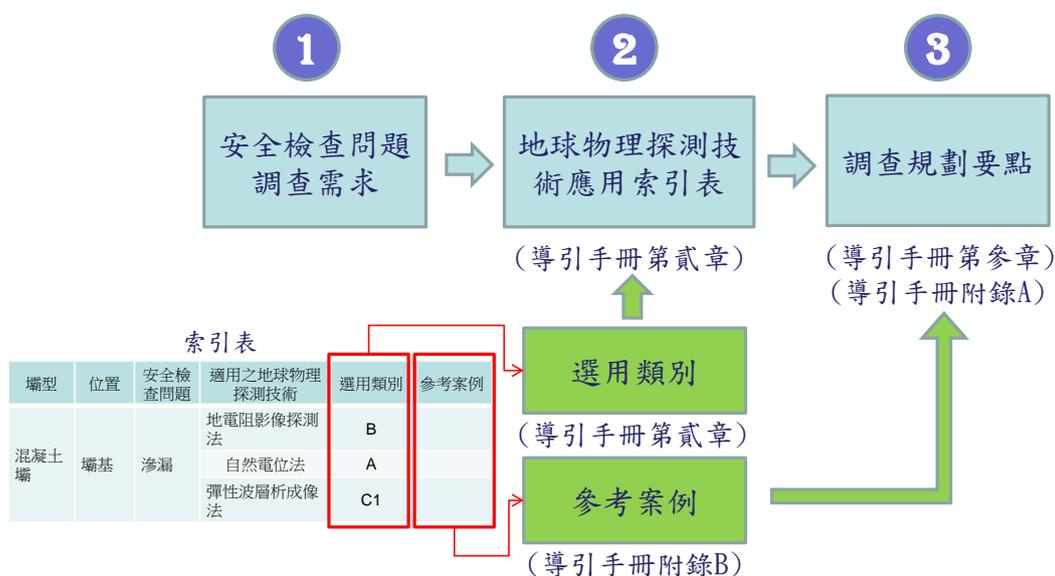
(三) 各地球物理探測技術皆有其應用特性而需針對不同之現地情況進行問題評析，本計畫中針對探測方法之判釋、探測儀器適用性以及水庫構造物背景環境之影響對前述六個地球物理探測技術進行問題評析，以作為現地應用時規劃要點以及因地制宜時之需要。

四、地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用方法建立

(一) 透過前述的工作項目整合進行地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用方法之建立，在方法的建立上，以提供工程管理者規劃使用為主要目的，將地球物理探測技術應用之規劃過程簡化為發現安全檢查問題調查需求、適當地球物理探測技術之選擇以及探測內容之規劃(包含測線或測區、特定之施作方式、施作數量等)三個步驟(如摘圖-1 所示)，據以建立常見安全檢查問題地球物理探測技術選用索引

表(如摘表-1 所示)，表中為可考量對探測問題之資訊量而設有選用類組加以區分不同程度資訊之地球物理探測技術，另有案例參考索引資料作為規劃參考之用。

(二) 根據所建立之方法，將其概念落實至導引手冊的建立上，導引手冊內容架構為兩個部分共三章兩個附錄，將前述簡化之三個步驟所需之資料納入此三章兩附錄內容之中(如摘圖-1 所示)，內容中除會有規劃要點外，亦說明如何恰當訂定招標規格，以便便利管理人員可做為標案撰寫之工具手冊使用。

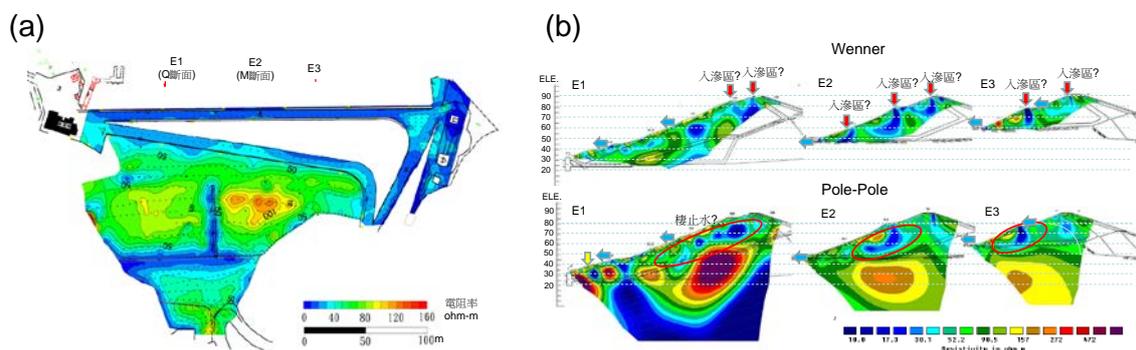


摘圖-1 地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用流程圖

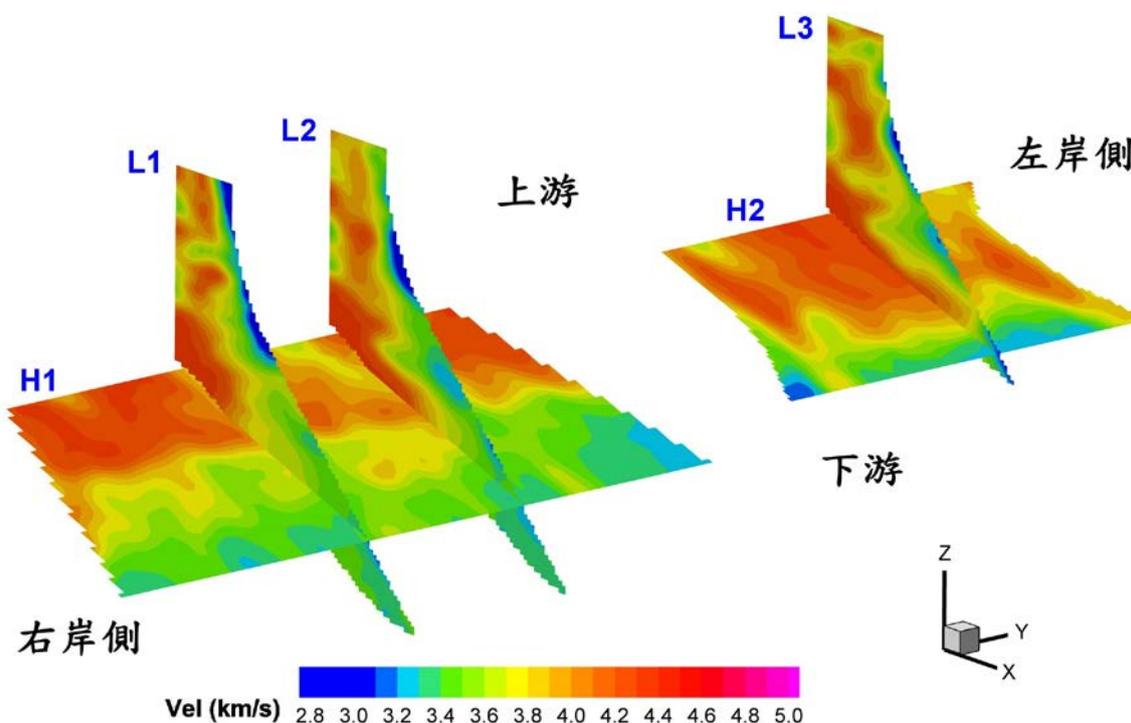
五、地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用現地評估

地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用現地評估之工作，根據多項理由選定新山水庫以及西勢水庫作為現地評估場址，評估內容在新山水庫方面以調查其壩體與壩趾之滲漏為主，根據所建立之選用方法，考量施作效益與經費需求，在新山水庫進行電磁探測法以及地電阻影像探測法等二項地球物理探測技術之現地應用測試(如摘圖

-2 所示)；而在西勢水庫方面，以調查壩體混凝土強度不足為主，根據所建立之選用方法，採用彈性波層析成像法進行調查，共規劃有三組垂直剖面測線以及一組斜剖面測線(如摘圖-3 所示)，測試結果納入作為案例參考，並回饋改善以建立之地球物理探測技術應用方法及水庫管理單位使用。根據應用成果顯示，本研究所建立之應用方法可順利提供水庫管理人員便利選用恰當之地球物理探測技術。



摘圖-2 新山水庫電磁波探測法(a)以及地電阻影像探測法(b)探測成果圖



摘圖-3 西勢水庫震波層析成像速度剖面柵狀圖

六、教育訓練

教育訓練於9月27日假國立交通大學浩然國際會議廳順利舉辦圓滿結束，與會人士共計有39人，其中包括有水利署水資源局、河川局、水利規劃試驗所等政府機關以及台灣電力公司、台灣自來水公司與民間工程顧問人員，會中討論踴躍，可收推廣之效。

Abstract

1. Introduction

Visual inspection and monitoring data of dam are the most fundamental means for the safety analysis of dams in Taiwan. However, the possible internal problematic area or internal safety condition are not available from the visual inspection. In order to collect the safety condition inside dams, geophysical methods are highly desirable due to their non-destructive characteristics. Although geophysical methods may provide useful information, the topography and geometry of zoning in the dam are complicated and quite different from their normal applications in site characterization. This project was aimed to review and look into the reliability and feasibility of applying geophysical methods in dams, and to propose a systematic guide for selecting proper geophysical methods.

2. Literature Review

Geophysical methods based on different theories, such as gravity, seismic, electrical and electromagnetic methods and typical dam safety issues collected from Taiwan and worldwide database were extensively reviewed and clean up for the following evaluation.

3. Evaluation of the feasibility of geophysical methods applied in dam safety evaluation

Geophysical methods, their capability and limitations, case histories, and typical dam safety issues are evaluated to design a problem-oriented index (such as Table A-1) which was designed for using the proposed guide

for selecting proper geophysical methods. In the index, geophysical methods are categorized by the type of information the method can provide and level of effectiveness and a number of case histories were compiled for reference.

Table A-1 Index for selecting geophysical methods (example)

壩型	位置	安全檢查問題	適用之地球物理探測技術	選用分類	參考案例檢索
土石壩 (例)	壩體/ 壩頂	裂縫	彈性波層析成像法	B2	中國大陸-南水水壩-壩體-裂縫-透地雷達探測法。
			多頻道表面波震測法	C	
			地電阻影像探測法	B1	
			透地雷達探測法	B3	
		電磁探測法	A		
	壩體	坡面滑動	多頻道表面波震測法	B	臺灣-烏山頭水壩-壩體-坡面滑動-表面波震測法

4. Establishing systematical guide for selecting proper geophysical methods

In order to establish a systematical guide, the procedure of applying geophysical methods in dam safety evaluation is simplified to three steps(Figure A-1): 1. Identify the location and problem to be investigated; 2. Selecting proper geophysical method(s) based on the location and type of problem; 3. Planning the survey. Guidelines for each of the three steps were proposed.

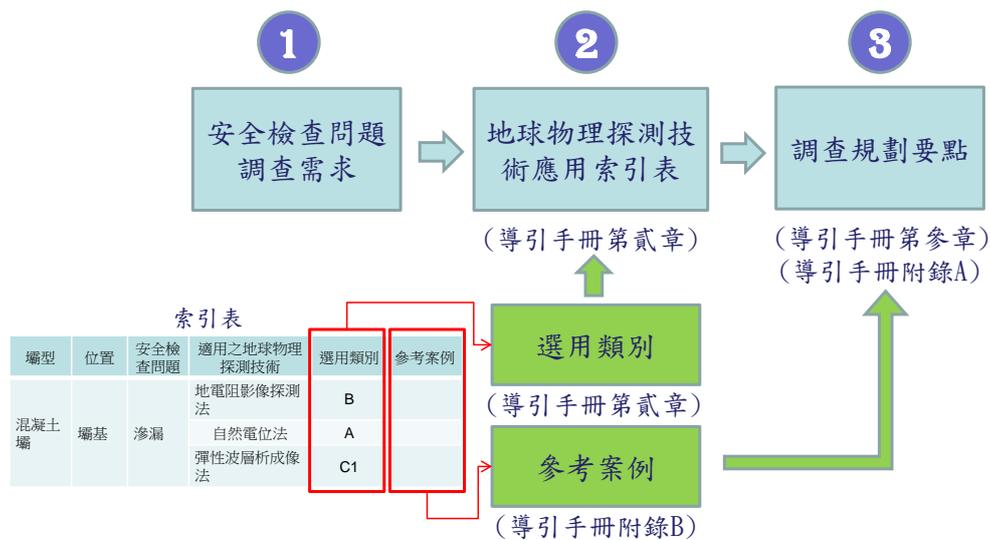


Figure A-1 Simplified procedures of applying geophysical methods in dam safety evaluation

5. Evaluation of the guide with field cases

The use of the guide was demonstrated by two case studies, Hsinshan earth dam and Xishi concrete dam. The main concerns are seepage problem at Hsinshan earth dam and degradation of concrete strength in Xishi dam. Methods were systematically selected following the proposed guide and field surveys were conducted accordingly. Testing results were shown to provide useful information for assessing the problem of concern. The guide will help the dam owners or engineers to systematically select proper geophysical methods to suit specific problems found in dams and provide them guidelines for drafting the basic planning and requirements of geophysical investigation.

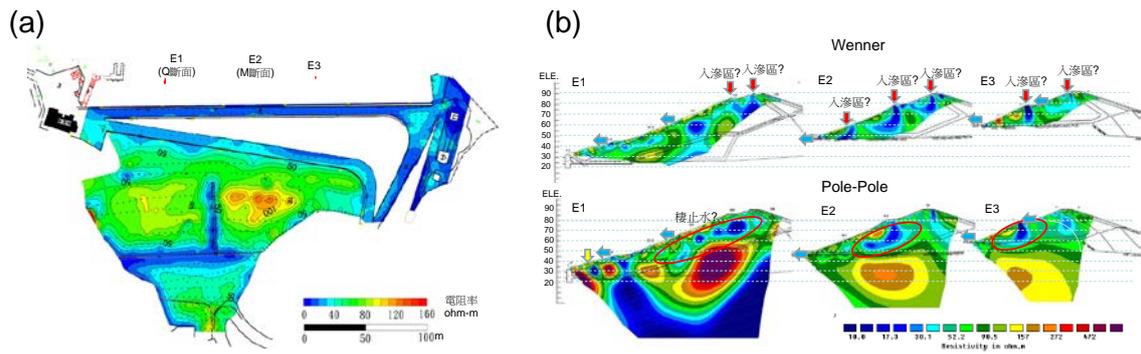


Figure A-2 Resisitivity map of electromagnetic survey(a) and resisitivity profile of electrical resistivity testing(b) in Hsinshan Dam.

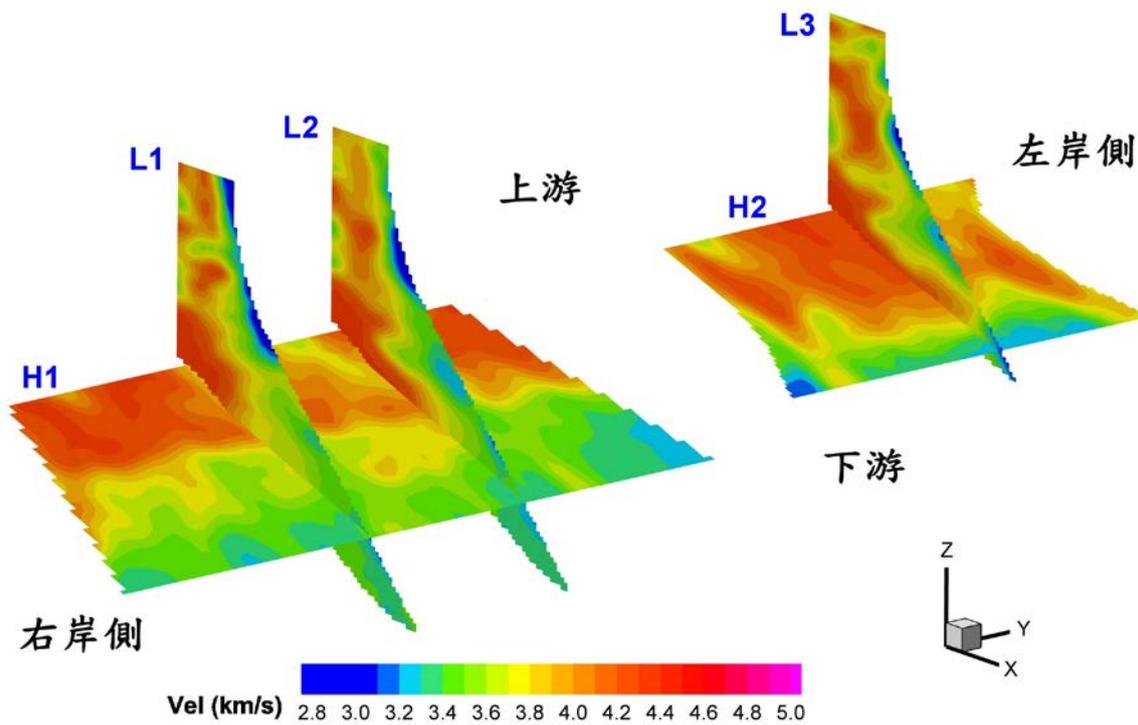


Figure A-3 Tomography of Xishi Dam

6. Short course

One-day-short-course “Application of Geophysical methods in Dam Safety Evaluation” was held in National Chiao University in September 27, 2012. 39 people from offical agency and consulting company were attended the course and had an ardent disscusion.

結論與建議

一、結論

(一) 地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用方法建立

1. 在方法的建立上，由臺灣現行水庫構造物安全檢查程序與方法進行切入，並透過整理出目前國內及國外常見之大壩安全檢查問題，提供做為水庫管理者進行選用規劃使用。

2. 在方法中，將地球物理探測技術應用之規劃過程簡化為三個步驟，據以建立常見安全檢查問題地球物理探測技術選用索引表。

3. 選用索引表中經評析後適用的 6 種地球物理探測技術，針對水庫構造物不同位置以及不同問題進行索引，並搭配選用分類進行施作目的考量，另有 18 個國內外案例可供參考。

4. 根據所建立之方法，將其概念落實至導引手冊的建立上，導引手冊內容架構為兩個部分共三章兩個附錄，考量水庫管理人員之需求提供所需內容，便利管理人員做為委託工作說明撰寫之工具手冊使用。

5. 透過新山水庫以及西勢水庫之安全檢查問題的地球物理探測技術選用，以及針對所收集的 18 個應用案例加以測試，結果顯示，本研究所建立之系統化應用方法對水庫管理人員確實具有實用性。

(二) 地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用現地評估

新山水庫：對新山水庫滲流問題進行下列幾點結論與建議

(1) 壩體內部有棲止水存在，應是壩面滲流之水源來源，而

棲止水之範圍具有局部性。壩體內部棲止水之補充水源推測是為雨水，且其補充點可能主要在於道路系統。

(2) 道路系統可能為棲止水主要補注點，可進一步驗證其可能性。

(3) 在此調查結果中，心層所在位置皆未有出現預期中低電阻之明顯反應，是否因為目前探測深度內之心層位置長期位於水位面以上而有乾燥情形，造成電阻率上升或是其他可能潛在問題，建議可進一步探討。

西勢水庫：以調查壩體混凝土強度不足為主，測試結果顯示

(1) 壩體之震波(P)速度低速區多位於下游壩面表層淺部及壩趾區域，波速呈現沿壩軸方向均勻帶狀分布，無明顯因破裂劣化造成之明顯向內部延伸之弱帶出現。

(2) 整體調查結果與西勢水庫第三次安全評估報告相吻合，在下游壩面之混凝土確實有強度較低之情況，然而利用地球物理探測結果更進一步提供壩體內容之強度狀態，顯示下游壩面表層雖受到風化影響而有強度弱化情形，但壩體內部依舊有足夠強度存在。

(3) 壩體標高 63-70 公尺部分區域以及取水工附近壩體下游測皆有較明顯的低速度區或是延伸性低速區出現，值得列為未來持續觀察檢測之區域。

二、建議

(一) 地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用導引手冊之推廣應用

1. 導引手冊規劃之架構與內容，可充分滿足水庫管理人員進行應用方法選用、委託工作說明撰寫以及獲得基本概念之需求，可推廣應用。

2. 建議可將內容建立成為數位內容，除可更有效便利推廣外，透過數位網站持續與使用者進行意見交流，並長時維護增加應用案例收集，使其成為具有參考價值之數位資料庫。

3. 可將成果精簡後於國內外之研討會進行發表推廣，除可收推廣之效外，亦可透過與相關工作專業人士與學術專家之互動改善不足之處。

(二) 地球物理探測技術作為水庫壩體監測技術之研究

1. 地球物理探測技術具有其實用性，然而其除較被動式地作為發現問題後的檢測工具外，其亦可更積極地作為監測工具，有助於提早發現潛在或正在發生之安全檢查問題。

2. 如同一般監測設施之配置，為可使其發揮確切之成效，具系統性地檢討壩體狀態，並以之規劃重要之地球物理探測技術監測斷面至為重要，建議可進行地球物理探測技術於水庫壩體監測系統化規劃之研究。

3. 若考慮國際上此技術應用於大壩監測尚屬發端，一般性之探討其內容恐過於龐大，可選擇恰當場址進行針對性之監測規劃研究，並以其作為未來推廣之示範基礎。

第壹章 前言

一、計畫緣起

目前臺灣地區水庫之安全檢查主要仰賴定期與非定期之水庫安全檢查與評估工作，而此評估工作大部份尚以目視以及監測資料做為最直接之第一手安全診斷基礎，雖然此些資料可做為水庫構造物之安全警示，但其主要為顯露於構造物表面之狀態，無法提供構造物內部之損害情形以及可能損害範圍及其路徑過程，造成安全危害之機制判定不易，影響後續工程改善之成效。

對於水庫構造物內部之資訊雖可透過鑽探資料獲得，然而，不論管理單位對於在既有壩體上鑽孔之態度保守與否，其僅能獲得構造物特定數點之資訊不易瞭解整體狀態，且易因鑽孔位置之不當而誤判整體實際情形。在此考量下，具非破壞性且可快速大面積施作之地球物理探測技術實為一有效之輔助工具。

雖然地球物理探測技術具有其應用於水庫構造物安全檢查之潛力，但因水庫構造物具有其特殊性，與一般地球物理探測技術所應用之場址有所差異，並且在針對不同問題之選用、可能應用方式以及可能遭遇的問題等尚未有較明確的瞭解，因此規劃辦理本計畫，以期建立一地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用之方法，並透過地球物理探測技術提升水庫構造物安全檢查及其維護營運作業之成效。

二、計畫目的

- (一) 建立地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用之方法。
- (二) 透過地球物理探測技術提升水庫構造物安全檢查及其維護營運成效。

三、工作項目及內容

(一) 基本資料收集與分析

1. 臺灣現行水庫構造物安全檢查程序與方法。
2. 水庫構造物安全檢查常見問題。
3. 地球物理探測技術。

(二) 地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查適用性評估與分析。

1. 適合應用於水庫構造物安全檢查應用之地球物理探測技術。

針對不同水庫構造物之特性以及相對應之常見安全問題進行檢討，選定可應用於水庫構造物安全檢測之地球物理探測方法。

2. 地球物理探測技術應用案例蒐集。

針對所選定之地球物理探測技術及水庫安全相關問題，蒐集國內外應用案例。

3. 地球物理探測技術之現地應用問題評析。

選定後之地球物理探測技術將其應用至各水庫構造物時，因與一般使用於大地調查之場址有所不同，而可能面臨有應用上的問題，針對此些地球物理探測技術加以進行問題之評論分析與改善建議，以做為應用注意事項及後續研究改善方向之基準。

(三) 地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用方法建立。

為便利地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查之應用，針對各類之水庫構造物及其常見之安全問題，根據國內外之應用案

例以及現地評估之工作成果，建立一選擇使用之方法(步驟、流程及注意事項)，並提出水庫構造物安全檢查使用手冊，以提供水庫管理人員參考應用。

(四) 地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用現地評估。

根據建立之地球物理探測技術安全檢查應用方法，以及對各技術之應用問題探討與改善成果，至少選定 2 座以上的水庫(須經甲方同意)，針對其安全問題進行安全檢查之輔助調查，並提供建議及注意事項。

(五) 水庫構造物安全檢查教育訓練

1. 水庫構造物安全檢查之應用。
2. 使用之方法選定(步驟、流程及注意事項)。

(六) 工作簡報及報告編撰

1. 期初、期中、期末及不定期工作會議。
2. 報告書之編撰及修訂。

四、計畫流程

本計畫工作項目包含有基本資料收集與分析、地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查適用性評估、地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用方法建立、地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用現地評估以及水庫構造物安全檢查教育訓練。根據各工作項目之關聯性繪製本年度工作流程圖如圖 1-1 所示，基本資料之收集與分析將首先進行，而後在地球物理探測技術適用性評估與分析中，以所收集之資料，根據常見之安全檢查問題進行適用之地球物理探測技術選擇，並同時進行各國之案例收集，再根據選擇之結果以及案例收集之

成果，以其所需面臨之水庫構造物環境與施作條件分析此些地球物理探測技術之現地應用問題。由前述之成果，建立一套地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用之方法，並撰寫一本適合臺灣水庫管理人員使用之手冊，以供後續應用。而根據所提之方法，於國內水庫進行現地應用評估，並根據現地應用評估成果回饋修正所提出之方法，以便得現地適用之最佳應用方法，最終將本年度所獲得之成果整理進行教育訓練加以推廣。

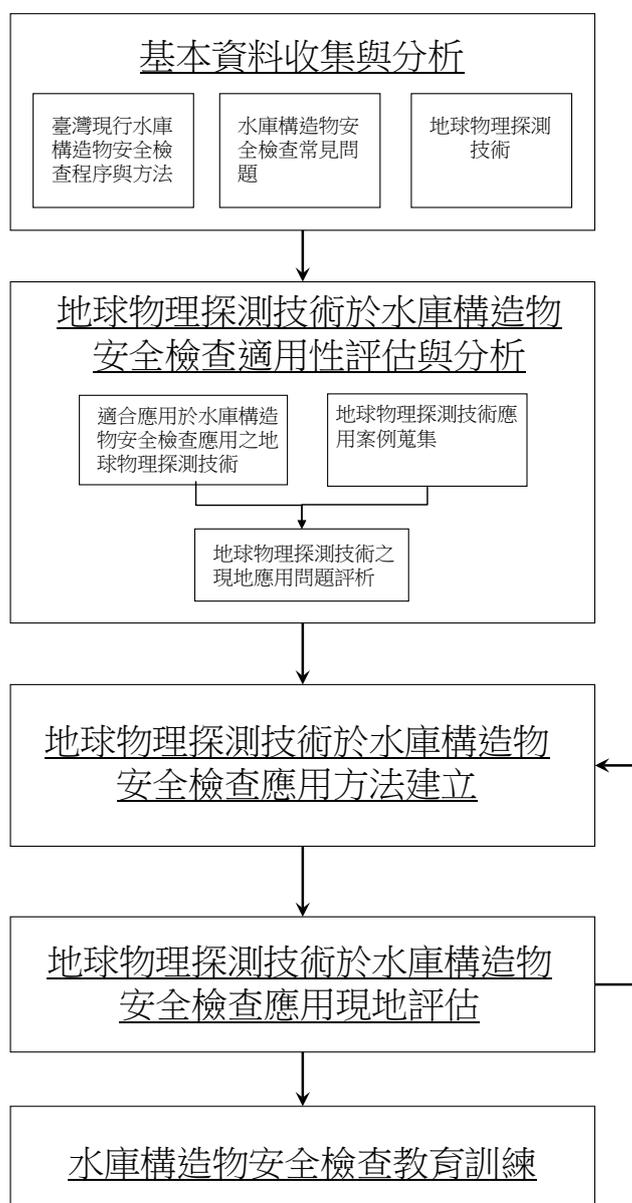


圖 1-1 計畫流程圖

第貳章 基本資料收集與分析

一、臺灣現行水庫構造物安全檢查程序與方法

(一) 臺灣現行水庫構造物安全檢查相關法規

臺灣現行進行水庫構造物之安全檢查是屬於水庫安全評估之一環，其主要是依據民國 97 年公告之水利建造物檢查及安全評估技術規範(蓄水與引水篇)進行，而此一技術規範是根據水利建造物檢查及安全評估辦法第十九條所制定，探其根本法源是來自於水利法第四十九條(如圖 2-1 所示)。

在水利法第四十九條條文中說明，「興辦水利事業人經辦之防水、引水、蓄水、洩水之水利建造物及其附屬建造物應維護管理、歲修養護、定期整理或改造應定期及不定期辦理檢查及安全評估，辦法由中央主管機關會商相關機關訂定」，因此經濟部水利署據以訂定水利建造物檢查及安全評估辦法，此辦法主要是針對防水、引水、蓄水、洩水之水利建造物及其附屬建造物訂定，內容分 6 章，共有 29 條條文，其內容主要說明其法源，明訂適用範圍明訂主管機關及其應辦理事項並規範水利建造物興辦人權責。而針對水利建造物之檢查工作，其列舉水利建造物檢查之主要範圍及細目並將檢查分為定期及不定期檢查兩類，另說明水利建造物應編製安全維護手冊、建立安全資料及潰壩緊急應變計畫，並明確規定安全資料應更新並保留舊資料；此外，在水利構造物之安全評估工作上，明確規定水庫及具有一定規模以上之防水、引水與洩水建造物應定期辦理安全評估，並列舉安全評估之範圍，規定安全評估與其辦理時機是 1.使用前安全複核； 2.初次使用評估； 3.定期評估；4.特別評估，另加以規範安全評估報告包括內容並要求中央主管機關統一訂定相關技術規範，最末再說明執行程序與經費來源。

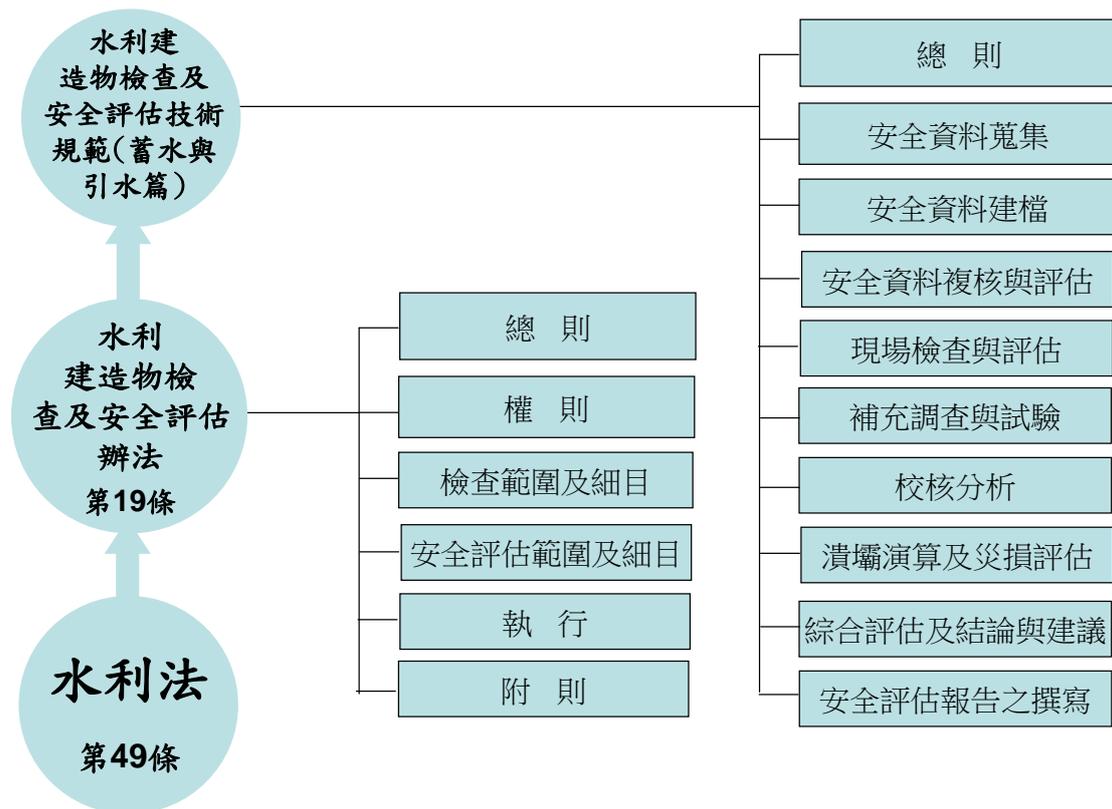


圖 2-1 臺灣現行水庫建造物安全檢查之法規關係圖

而由此水利建造物檢查及安全評估辦法中第十九條的規定，「水利建造物安全評估及潰壩（決）演算相關技術規範由中央主管機關定之」，據此訂有「水利建造物檢查及安全評估技術規範(蓄水與引水篇)」。本技術規範內容分為十章進行規範(如圖 2-1 所示)，在總則中其說明本規範之依據、目的、適用範圍、蓄水建造物之分級以及安全評估之延辦及免辦，而在第二章中說明，為求徹底瞭解整個蓄水、引水建造物之狀況以供後續進行複核與評估、建檔、現地檢查、校核分析及綜合評估與建議等工作之用，安全資料蒐集有其必要性，因而於此規範蒐集過去有關該蓄水、引水建造物工程之規劃、設計、施工及運轉維護期間等與蓄水、引水建造物安全有關之各種資料；而在第三章中，針對蒐集到之安全資料該如何進行建檔作業有所規範；接著在第四章中說明安全資料複核與評估工作，此項工作之目的為使工作人員

在未到達現場進行現地檢查前，藉複核過去有關該蓄水、引水建造物工程之規劃、設計、施工及運轉維護期間等各種資料，以求徹底瞭解整個蓄水、引水建造物之狀況，俾利現地檢查之進行，並將其與現行適當方法或標準比較評估後，從中發現可能影響安全之潛在問題。

在此規範中第二章至第四章內容主要是水庫安全評估中進行積極式的評估與檢查，希冀在問題未發生前便可透過完善的資料檢核動作防患未然，當進行完這些初步的資料複核工作後，再進一步需要進行現場檢查工作，由第五章開始規範現場檢查與評估作業，現場檢查係由檢查人員以目視或必要機具巡視並檢查所有與建造物安全有關之結構物、設施、基礎、邊坡與周圍環境等，以便及早發現已存在或潛在之缺失或危險因素並及早改善，以維護蓄水建造物之安全；而若在完成安全資料複核及現場檢查工作後，經認定非經補充調查與試驗，無法進一步分析評估時，則應進行補充調查與試驗，相關之調查與試驗方法規範於第六章中；除進行補充調查與試驗提供評估資訊外，當完成建造物相關安全資料複核及現場檢查工作後，或當建造物所處環境或荷重條件已發生變化而與原設計考量不同，認為某些問題必須進一步分析方能加以評估時，應進行第七章中所規範的校核分析工作；而第八章是對於潰壩(決)演算及災損評估方法及要點的說明；第九章及第十章為規範水庫安全評估報告之內容及撰寫方法。對於水庫構造物之安全檢查主要規範在第五章與第六章中，地球物理探測技術之應用也將由此切入，下節中將對此規範之第五、六章的檢查方法做更詳細的介紹，也將對地球物理探測技術如何應用於此中做更進一步的說明。

(二) 水利建造物檢查及安全評估技術規範(蓄水與引水篇)

由上節中可知，目前臺灣水庫構造物安全檢查的進行主要是依據「水利建造物檢查及安全評估技術規範(蓄水與引水篇)」進行，因此

在本節中，將根據此規範進行說明。如圖 2-2 所示，水庫安全評估的進行應先行進行安全資料蒐集並將其建檔，而後由此些安全資料進行複核與評估，當進行完複核與評估對水庫整體狀況有足夠掌握後，開始進行現場檢查工作，在現場檢查完成並進行評估後，若認為有要進一步進行補充調查以便進行問題釐清或分析之處則再進行補充調查與試驗，除進行補充調查與試驗提供評估資訊外，當完成建造物相關安全資料複核及現場檢查工作後，或當建造物所處環境或荷重條件已發生變化而與原設計考量不同，認為某些問題必須進一步分析方能加以評估時，應進行校核分析工作，而對於某些有重要保存對象之水庫，需另進行潰壩(決)演算及災損評估，最後再進行水庫安全評估報告之撰寫。

由此程序可知，水庫構造物之安全檢查主要是在現場檢查工作以及補充調查與試驗工作中進行。所謂現場檢查工作是由檢查人員以目視或必要機具巡視並檢查所有與水庫構造物安全有關的結構物、設施、基礎、邊坡與周圍環境，根據「水利建造物檢查及安全評估技術規範(蓄水與引水篇)」之說明，其現場檢查內容有(如圖 2-2 所示)：

地質：區域地質、基座地質、周邊地質以及集水區地質。

壩及堰：應就壩頂、壩體上游面、壩體下游面、壩之上下游地區及壩體內部等範圍，針對壩或堰體表面之問題與缺失、壩或堰體材料之劣化情況、壩或堰體結構之穩定情形、滲水及漏水以及維護上之問題進行檢查。

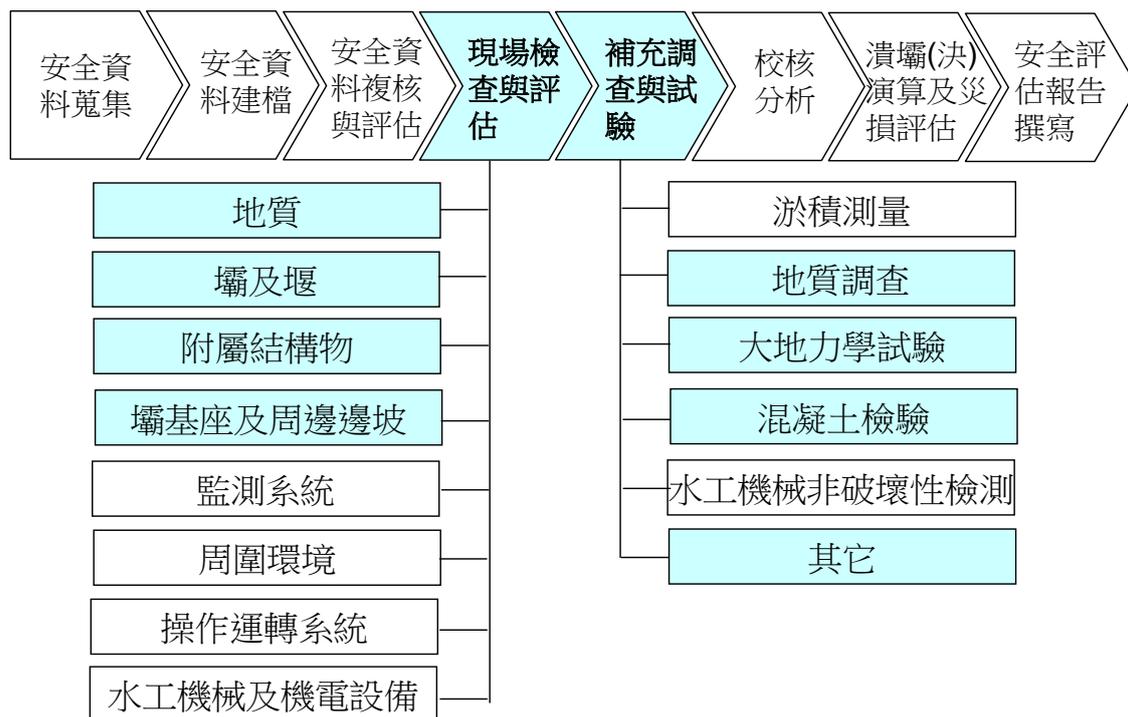


圖 2-2 水庫安全評估程序

附屬結構物：結構佈置、水理狀況、混凝土狀況、構件與鋼襯之狀況、接縫狀況、回填及基礎之缺失、堵塞情形以及過去之維修狀況。

壩基座及周邊邊坡：壩基座廊道結構、壩體與壩基交界處、壩座表面、壩體上下游及靜水池邊坡坡面、壩座及邊坡保護措施等進行檢查，以瞭解壩基座及邊坡之穩定情形。

監測系統：儀器設置地點、儀器周圍環境、儀器表面狀況、內部功能與運作、訊號傳輸及記錄設備、量測精度與量測方法正確性等。

周圍環境：對外交通狀況、集水區人為開發及水土保持情形、下游河川排洪功能、污染狀況等。

操作運轉系統：主要電腦及周邊設備、水文氣象測報系統、通訊網路、傳輸系統、閘門操作監控系統、備用電腦、警報系統、其他設備。

水工機械及其機電設備：攔污柵及閘門(板)、鋼管及鋼襯、放流閘及閘門、吊門機、驅動機及吊車(含耙污機)、電氣及控制設備以及緊急發電機。

而補充調查與試驗之內容有：

淤積測量：需辦理水庫安全評估之水庫，其淤積測量至少每 5 年辦理一次，而最近一次淤積測量至今超過 3 年者，且該期間年數乘以前次安全評估推算平均年淤積量之乘積大於水庫呆庫容之 10% 者，或者前次淤積測量之後，曾有洪峰量超過 1/2 設計洪峰量之洪水侵襲，又或者其他經評估有實際需求者應進行淤積測量，而其工作項目應包含有平面控制測量、高程控制測量、地形測量以及橫斷面測量。

地質調查：經基本資料蒐集複核結果，認為有地質資料明顯不足或欠缺時，或者經現場檢查結果，認為有不明地質因素，可能影響水庫安全時，或者對於上一次安全評估結果建議辦理之項目，經檢討認為確需辦理者，又或者其他經評估有實際需求者應進行地質調查，其工作項目包含有堆填壩體材料、壩體與壩基座接合情形、壩基座地層材料、附屬結構物基礎材料以及周邊崩坍地地層特性等。

大地力學試驗：進行大地力學試驗之目的主要是為瞭解特定區域之地層構造與材料特性，並且決定地層之材料參數，提供混凝土及土工結構安全校核與分析之用。其進行時機是在經現場檢查結果，認為建造物基礎地層及邊坡材料有劣化或其他潛在問題，可能影響建造物之安全時，或者須進行校核分析之對象或區域，其地層或邊坡材料參數缺乏、不足或既有材料參數經評估已不適用且無法合理假設時，又或者其他經評估有實際需求者。其工作項目包含有標準貫入試驗、土壤試驗、岩石試驗及其它試驗。

混凝土檢驗：混凝土檢驗之主要目的是為瞭解混凝土材料老化、劣化或組成構造之情形，並瞭解混凝土強度是否符合原設計之要求，另一方面是欲瞭解混凝土本身裂縫、空洞或混凝土與土壤或岩盤界面分離或淘空之情形。當經現場檢查結果，混凝土材料有老化或劣化之虞，或混凝土強度疑似不足等情況，或者經現場檢查結果，混凝土表面出現不正常裂縫、滲水或與土壤或岩盤界面疑似有分離或淘空等情況，又或者其他經評估有實際需求者。其施作項目有施密特錘擊試驗、物理性試驗、中性化試驗、其他試驗以及非破壞性檢測。

水工機械非破壞性檢測：此檢測之主要目的在於瞭解水工機械及其吊門機(含驅動機及吊車)等設備之構件與銲道瑕疵、構件厚度、實際受力與振動情形，通常在依據現場檢查結果，當發現構件有缺陷，或設備現場環境惡劣而疑有損傷顧慮，且缺乏足夠現況資料可供評估時，或者閘門、閘、鋼管於運轉過程有振動情形或構件強度有不足之疑慮時，又或者其他經評估有實際需求者會進行此項檢測。其工作項目有銲道及構件探傷、構件厚度檢測、應力檢測以及振動檢測。

由此一規範之內容可知其基本精神是以安全資料複核進行積極的安全檢查動作，希冀在問題未發生前便可防患於未然，透過現場檢查工作，以詳細的檢查在問題剛發生或未擴大以前獲得控制，以降低安全問題的發生率，而若有些規模較大或其發生機制較不明確的異常現象發生時，則透過補充調查與試驗對異常之問題進行深入的瞭解，以便後續進行校核分析時，可充份掌握安全問題分析所需之參數，以獲得最貼近現狀之評估結果，得以進行後續的改善整治或應變措施。

在此一系統化之安全檢查措施中，現場檢查工作極為重要，其是將已發生或發生中的安全問題進行控制的重要關鍵，然而，雖然在規範中說明其檢查是以目視或必要機具為主進行檢查，但大多數還是以

目視為最主要作業方式。採用目視的最主要問題在於其僅能觀察到位於表面的異常狀態，對於內部的情形無法獲得瞭解，此外，許多安全問題的發生並不一定發始於表面，如滲流或掏刷等現象常是由內部開始發生，等到可由表面觀察到時，其可能已發展到一定程度之影響，而無法達到防微杜漸之目標，因此，在現場檢查工作中，地球物理探測技術可採用非破壞性的方法協助瞭解水庫構造物內部之情況，而可更有助於對安全問題的先期瞭解與控制，更明確一點的說明，在現場檢查之工作項目中，地球物理探測技術可有效用於協助地質、壩與堰、附屬結構物以及壩基座及周邊邊坡之應用上(如圖 2-2 所示)。此為第一項地球物理探測技術可應用於水庫構造物安全檢查之處，是為較積極的主動調查部份。

另一項地球物理探測技術可加以應用之處在於補充調查與試驗中。由前述可知，此處的補充調查與試驗主要是在經過現場檢查後認為水庫構造物之材料性質或環境條件有所變動時，又或是對於所檢查到之問題不經過補充調查與試驗無法進一步分析評估時進行，在此地球物理探測技術可做為較被動的針對已發現之問題點進行深入的調查，以瞭解異常現象於整個水庫結構物之影響範圍與情形，甚或加以釐清異常現象之發生機制作為改善規劃支用，此外，透過適當的地球物理探測技術選用，以此調查所得結果尚可獲得後續校核分析所需之材料參數(如楊氏模數或剪力模數)，以規範中所列之補充調查與試驗項目，可透過地球物理探測技術進行應用者有地質調查、大地力學試驗以及混凝土試驗(如圖 2-2 所示)，本計畫將針對此部分進行系統化之方法建構。

二、水庫構造物安全檢查常見問題

為可較為系統化地將地球物理探測技術應用於水庫構造物安全檢

查上，首先應當先行瞭解常見之水庫構造物安全檢查問題為何，為此，本計畫將臺灣地區以及世界其他國家之安全檢查問題進行整理歸納於下兩節中所說明。

(一) 臺灣地區水庫安全檢查常見問題

根據民國 95-100 年間曾進行過安全評估或安全複查之水庫進行大壩安全檢查問題之整理(除溢洪道外，未將水工機械及附屬結構物之安全檢查問題納入)，國內具有安全檢查問題之水庫壩體資料表列如表 2.1 所示，其分布情況如圖 2.3 所示由圖表中可見，水庫大壩檢查發現潛在問題之水庫共有 27 座，其中 18 座為土石壩，9 座為混凝土壩，台灣本島西部在北中南皆有具安全檢查問題之土石壩，而混凝土壩主要分布在北部與中部，另在澎湖亦有一座水庫具大壩安全檢查問題；而由其安全檢查之問題來看，在土石壩主要是壩體滲漏以及溢洪道滲漏或混凝土損壞之問題，而在混凝土壩中則主要是混凝土劣化之疑慮。



圖 2.3 具大壩安全檢查問題水庫分布圖

表 2.1 國內水庫與大壩安全檢查發現可能潛在問題整理表

序號	壩型	壩長 (m)	壩寬 (m)	壩高 (m)	安全檢查問題
1	碾壓式土壩	262	10	66	1. 壩體滲漏； 2. 溢洪道表面剝落、裂縫與滲漏 3. 壩趾區濕潤
2	土石壩	360	11.2	133.1	1. 溢洪道混凝土開裂及側牆濕滲； 2. 排水廊道滲水； 3. 右山脊排水廊道裂縫；
3	土堰壩	260	10	34.5	1. 壩體下游趾部滲漏 2. 壩體下游右側坡面局部下陷，有淘空之虞。
4	滾壓式土壩	340	12	62.5	1. 溢洪道滲漏
5	土壩	187	10	35.5	1. 大壩下游趾部滲漏； 2. 溢洪道左側平台滲水
6	滾壓土石壩	235	10	96	1. 右山脊滲水量偏多 2. 大壩右廊道滲水量較大
7	土壩	64	8	12	1. 溢流堰頂混凝土剝落及滲水；
8	滾壓式土壩	546	8	31	1. 壩體滲漏； 2. 左山脊滲漏； 3. 溢洪道混凝土版底部疑似積水
9	土石壩	1535	9	28	1. 西山脊近溢洪道下游坡趾滲漏； 2. 培厚區拋石坡坡趾滲漏； 3. 溢洪道混凝土版底部疑似孔洞或積水
10	土壩	255.6	6	30	1. 溢洪道混凝土強度不足 2. 壩體具液化之疑慮
11	滾壓式土壩	420	6	8.5	1. 溢洪道混凝土強度不足
12	土壩	470	5.5	15.3	1. 甲仙地震造成之嚴重張力裂縫； 2. 溢洪道混凝土強度不足； 3. 壩體下游坡面滲漏
13	滾壓式土壩	2380	8	31	1. 下游壩趾滲漏
14	滾壓式土壩	325	9	39.5	1. 左山脊滲漏 2. 壩頂沉陷量過大
15	土石壩	445.6	10	65	1. 溢流堰有地下水滲出
16	土石壩	172	3	26	1. 壩體下游趾部滲漏
17	土石壩	245	6	16	1. 壩體滲流； 2. 左壩墩面版龜裂； 3. 壩體有滔空之虞
18	土壩	363.6	7.6	30.3	1. 水社壩坡面滲漏
19	滾壓式土壩	345	10	61	1. 溢洪道滲水；

序號	壩型	壩長 (m)	壩寬 (m)	壩高 (m)	安全檢查問題
					2. 陡槽左側培厚區滲水
20	混凝土重力壩	102.4	3.4	29.6	1. 壩體混凝土有劣化之虞； 2. 壩體具裂縫 3. 溢洪道裂縫、滲水
21	混凝土拱壩	510	7	122.5	1. 廊道混凝土爆出
22	混凝土拱壩	290	4.5	180	1. 壩面局部混凝土強度不足(且具白華現象)
23	混凝土重力壩	205	7	114	1. 壩面局部滲漏； 2. 左壩座滲水； 3. 大壩下游右岸滲水； 4. 溢洪道左側滲漏
24	混凝土堰	117	5	12.5	1. 壩體具裂縫
25	混凝土拱壩	57.2	2	27.3	1. 左右壩座滲水； 2. 混凝土有劣化之虞
26	混凝土重力壩	83	5.5	29.5	1. 混凝土有劣化之虞
27	混凝土箱型	114	5	33.2	1. 混凝土老舊強度具疑慮

(二) 國際水庫安全檢查常見問題

除於上節對臺灣地區之大壩安全檢查問題進行整理外，本節中將考量之範圍擴大至國際以期更加完備對常見安全檢查問題之收集，詳細說明如下：

林俊宏等(2008)根據國際大壩委員(ICOLD, 1984)會、美國大壩委員會(USCOLD, 1975)以及美國土木工程師協會(ASCE, 1988)所收集到全世界 626 座曾發生破壞之案例中，以混凝土壩以及土石壩的差異歸納水庫構造物常見的潛在破壞模式共有 13 項，如表 2-所示，其中發生於混凝土壩者有 5 項：1. 因結構接縫型式不良、應力集中或壩體形狀及設計位置不當等因素造成混凝土結構行為不良所導致之壩體破壞。2. 因混凝土材料衰減、工程性質不足、澆置作業不當及結構結構接縫與防水作業處理不當造成之壩體本身滲漏或管湧。3. 因溢洪道上障礙或設計容量不當所導致之溢流造成壩趾基礎侵蝕或壩座沖刷掏空。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。

土石壩主要之潛在破壞模式有八種：1. 因溢洪道上障礙、設計容量不當或沉陷所導致之溢流造成土石壩體侵蝕。2. 因溢洪道破壞、輸水管線破壞變形造成之管湧或滲漏及基礎破壞造成之土石壩侵蝕。3. 沿出水導管、壩座界面、混凝土接觸面滲露或管湧；壩體本身集中式管湧。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。

由此潛在破壞模式之整理，排除其可在安全資料複核與分析中發

現之問題(如因結構行為不良或溢洪道設計不當等設計原因)，可將其簡化為 11 項常見之安全檢查問題：在混凝土壩中分別有壩體之變形或裂縫、壩體之滲漏或管湧、壩址基礎或壩座之侵蝕掏空、壩基的滲漏或管湧以及壩基滑動，而在土石壩中有壩體侵蝕、壩座或介面之滲漏或管湧、基礎滲漏或管湧、壩體滑動、壩基滑動以及結構體之裂縫。

表 2-2 混凝土壩與土石壩常見之潛在破壞模式(修改自林俊宏等，2008)

	潛在破壞模式	安全檢查問題	成因	案例
混凝土壩	因結構接縫型式配置不良、應力集中或壩體形狀及設置位置不當等因素造成混凝土結構行為不良所導致之壩體破壞。	壩體之變形或裂縫	設計不良或設計外力因子變化	南非 Groendal Dam
	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。	壩體之滲漏或管湧	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	澳洲 Burrinjuck Dam
	因溢洪道上障礙或設計容量不當所導致之溢流造成之壩址基礎侵蝕或壩座沖刷掏空。	壩址基礎或壩座之侵蝕掏空	因溢洪道上障礙或設計容量不當所導致之溢流	美國 Glen Canyon Dam
	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。	壩基的滲漏或管湧	因透水層、可溶性夾層或岩層不連續面的存在	日本 Nakaiwa Dam
	沿基礎軟弱不連續面之滑動。	壩基之滑動	壩基軟弱不連續面的存在	巴西 Dom Marco Dam
土石壩	因溢洪道上障礙、設計容量不當或沉陷所導致之溢流造成之土石壩體侵蝕。	壩體侵蝕	溢洪道上障礙、設計容量不當或沉陷的發生所導	美國 Kelly Barnes Dam

潛在破壞模式	安全檢查問題	成因	案例
		致之溢流	
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。	壩體侵蝕	因溢洪道破壞、輸水管線破壞變形造成之管湧或滲漏	美國 East Fork Dam
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。	壩座或介面之滲漏或管湧	沿出水導管、壩座界面、混凝土接觸面滲漏或管湧	美國 Dix Dam
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。	基礎滲漏或管湧	因透水層、可溶性夾層或岩層不連續面的存在	美國 Red Bluff Dam
因陡坡、滲流壓力及大量降水所造成之壩體滑動。	壩體滑動	因存在陡坡或滲流壓力增加及大量降水的發生	美國 Alum Creek Dam
沿基礎中黏土裂縫或斷層之壩體滑動。	壩基滑動	基礎中黏土裂縫或斷層的存在	美國 San Luis Dam
差異沉陷造成之裂縫。	結構體之裂縫	壩基地層材料的不均勻性	美國 Storrie Lake Dam
土壤液化。	地表沉陷	壩體或壩基材料之強度不足	美國 Addicks Dam

(三) 安全檢查常見問題綜合整理

比較前兩節所整理出之安全檢查問題可知，除與基礎材料或壩體材料有關之問題外，國內大壩常見之安全檢查問題大多囊括在世界破壞案例之問題中，這亦顯示不應輕忽目前正常營運中之大壩安全檢查問題，此些問題皆有發展成足以造成壩體破壞之可能。整合上兩節之結果，根據混凝土壩以及土石壩之不同分別以常見安全檢查問題發生

之位置及問題進行整合，整合結果如表 2-3 所示。

在混凝土壩中之安全檢查問題主要發生在壩體、壩趾、壩基、壩座以及溢洪道五處，在壩體常見之安全檢查問題有裂縫、滲漏以及混凝土強度不足；在壩趾處有淘空之安全檢查問題；在壩基有滲漏以及滑動的問題；在壩座有淘空以及滲漏之問題；而在溢洪道處有滲漏以及裂縫之安全檢查問題。在土石壩中之常見安全檢查問題主要發生在壩體/壩頂、壩趾、壩基、壩座、溢洪道、排水廊道以及培厚區七處，在壩體或壩頂者有裂縫、差異沉陷、坡面滑動、土壤液化、滲漏以及淘空；在壩趾處有滲漏之問題；在壩基處有滑動以及土壤液化之問題；在壩座有滲漏之問題；在溢洪道有底版下淘空或積水、滲漏、裂縫或混凝土強度不足之問題；在排水廊道有滲漏以及裂縫之問題；在培厚區有滲漏之問題。

表 2-3 混凝土壩與土石壩常見之安全檢查問題

壩型	位置	安全檢查問題
混凝土壩	壩體	裂縫
		滲漏
		混凝土強度不足
	壩趾	淘空
	壩基	滲漏
		滑動
	壩座	淘空
		滲漏
	溢洪道	滲漏
裂縫		
土石壩	壩體/壩頂	裂縫
		差異沉陷
	壩體	坡面滑動
		土壤液化
		滲漏
		淘空

	壩趾	滲漏
	壩基	滑動
		土壤液化
	壩座	滲漏
	溢洪道	底版下積水/淘空
		滲漏
		裂縫
		混凝土強度不足
	排水廊道	滲漏
		裂縫
	培厚區	滲漏
* 本表主要以大壩之安全檢查問題進行整理，未將水工機械及附屬結構物之安全檢查問題納入。		

三、地球物理探測技術

地球物理探測技術是一種非破壞性的檢測技術，其可快速且大量地在檢測物體表面上或孔內進行施作，因此近來年已漸漸廣泛應用至土木、地工、環境與水利工程等領域，在應用上，地球物理探測技術主要於施測後獲得檢測物體之不同物理量，而後由不同問題所反應之物理量變化間接推估工程問題之解答。

目前地球物理探測技術可測得之物理量大致有電阻率、介電度、電容、磁化率、重力、彈性波速以及地層反射性等，由此些不同之物理量以及不同之分析理論，已成熟可應用之地球物理探測技術有地電阻影像探測法(Electrical Resistivity Method)、自然電位法(Self-potential method)、感應極化法(Induced Polarization Method)、透地雷達探測法(Ground Penetrating Method)、電磁探測法(Electromagnetic Method)、重力探測法(Gravity Method)、彈性波層析成像法(Elastic Waves Tomography Method)、表面波震測法(Seismic Surface-wave Method)以

及反射震測法(Seismic Reflection Method)等九種，這些方法主要有於表面上進行施測的非破壞性方法，亦可應用於孔內施測，本節將就此九種方法以表面施測方法為主進行介紹與說明。

地電阻影像探測法：地電阻探測法是在地表上利用兩根電極棒將直流電灌入地下，而後在地表上量測另兩根電極棒間的電壓差，此法是量測大範圍的電阻值，此電阻與土層的組成、飽和度以及土層孔隙中流體的導電度有關，透過反算技巧可獲得電阻之深度 2D(如圖 2-4 所示)或 3D 剖面，藉著所得之剖面可應用於地層、壩體含水特性之變化調查。此法於高電阻環境中亦能有效量測，可探測較大孔洞，但於高導電性環境下效果不佳(尤其是表面高導電)。此外，量測需確保電極與地表有良好耦合以免獲得錯誤數據，亦要注意反算所得之結果於深層有較差解析度。

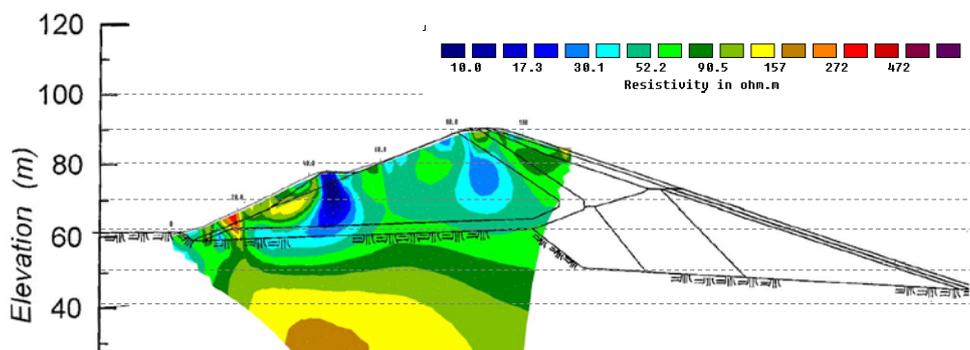


圖 2-4 電阻率影像剖面圖 (新山水庫)

自然電位法：自然電位法是量測存在於地表的自然電位，通常在量測上是以兩個電極與地面接處，以其中一個電極做為參考點，而後移動另一個電極，量測此兩點間的電壓差。此電壓差的產生與地層所含有之化學成份、金屬礦物或是電耦(dipole)之運動有關。在水庫壩體之應用上，主要是欲獲得因水流動（電耦運動）而產生的電壓差，對於所測得之結果最後以電壓差之平面空間分佈表示(如圖 2-5 所示)，由此一平面差異圖可應用於水庫或破碎岩層之滲流路徑偵測。以此種檢

測方式可迅速便利完成施測，並且有利於調察地下水滲流狀況，惟其空間解析及辨識能力較差，不適用探測空氣孔洞。

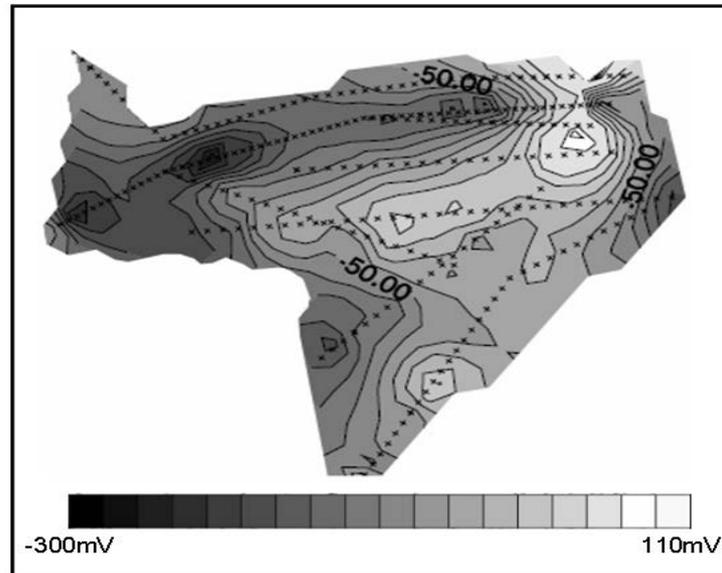


圖 2-5 自然電位影像平面圖 (Johansson et al., 2005)

感應極化法：感應極化資料是使用四個電極棒中的兩個將一電流導入地面，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，此時間週期與地層材料之電容性有關，用來量測此效應的單位稱為可充電性(chargeability)，其單位可採用 mV/V 或 msec，將所量測得之資料進行反算分析可獲得地層的可充電性性質影像剖面(如圖 2-6 所示)。此方法普遍地用在礦業中探查含金屬的硫化物，如黃鐵礦(pyrite)、黃銅礦(chalcopyrite)與其他含金屬礦物的定位，另一方面也可用於污染物調查與黏土層調查上，只是在反算分析上需同時配合地電阻探測法之資料進行，無法單讀反算判釋。

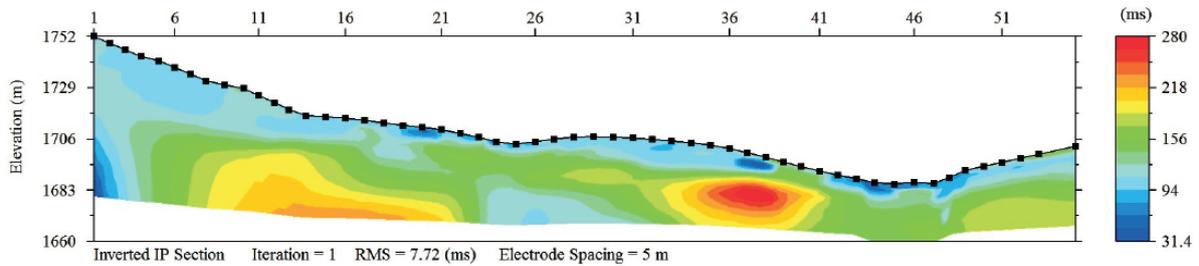


圖 2-6 感應極化法影像剖面圖 (Advanced Geosciences Inc., 2010)

透地雷達探測法：透地雷達主要可提供測線地表下高解析度之二維反射面影像，其檢測原理是利用發射天線發出高頻電磁波（10-3000MHz）用以穿透地層或被探測體，電磁波在兩個不同電性介質的界面(如：地層層面、空洞與岩層等等)產生反射訊號，再由接收天線接收反射訊號進而分析處理。將多個 2D 影像依空間位置整合後可得 3D 之立體影像(如圖 2-7 所示)，由所得之地層構造可應用於地層、壩體內部異常區域偵測。透地雷達檢測技術施測作業迅速便利且解析度及辨識能力高，適用於複雜構造、混凝土結構、鋪面以及地下孔洞探測。惟其探測深度受導電環境(如黏土礦物)影響甚鉅，一般小於 10 公尺，且其不易估計電磁波速以得到構造深度。

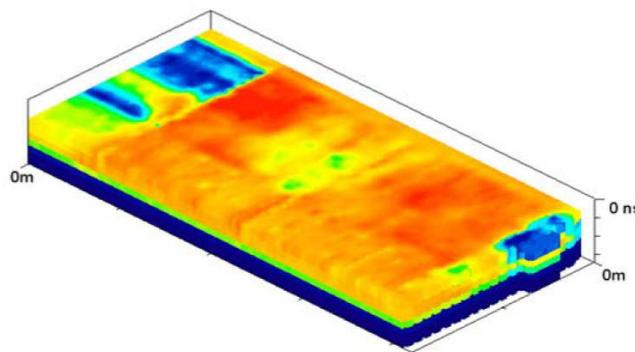


圖 2-7 透地雷達 3D 影像(大觀電廠溢洪道)

電磁探測法：電磁探測法是在地表利用線圈使其通過一週期性電流，當電流在降至零的過程中，根據法拉第定律(Faraday's Law)會使得在線圈中所產生的磁通量有所變化，而產生有電磁波向下傳遞，地層的材料亦會受到此電磁波所產生的磁通量變化，而又引發另一個電磁

發向上下傳遞，當位於地表的接收線圈感應到此感應電流，便可量測得其感應電位，而此一感應電位與地層材料之電阻率或導電率相關，透過接收此一電位值便可獲得地表下電阻率之分布情形，對於探測之結果可直接以所測得之電壓平面分布進行判釋(如圖 2-8 所示)，或在必要時可將所得之電壓值換算為視電阻率再進行剖面之反算。

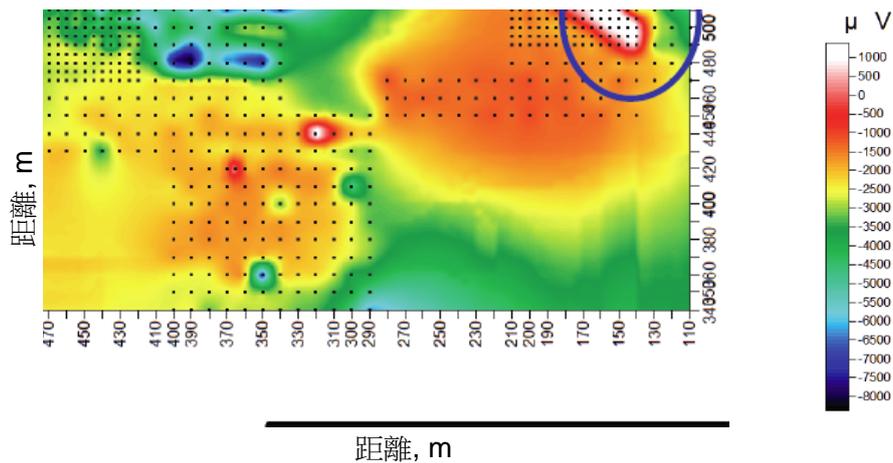


圖 2-8 電磁探測法平面影像圖(改繪自邱維宣等，2009)

重力探測法：重力探測法是量測在不同空間中的微小重力差異，譬如岩盤與覆土具有不同密度，則重力牽引將在岩盤的地形特徵下有所改變，岩盤構造凹陷或凸起下的不規則重力場取決於凹陷程度的大小、寬度與深度、以及覆土與岩盤之間的密度對比，伴隨顯著巨大密度對比的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。通常對於獲得之結果可直接以其空間分布進行判釋，若有數條測線資料，可產生重力場圖(如圖 2-9 所示)，由此結果可推估地下構造之可能平面位置，但若欲獲得其深度及其深度分布情況，則需進行反算分析。

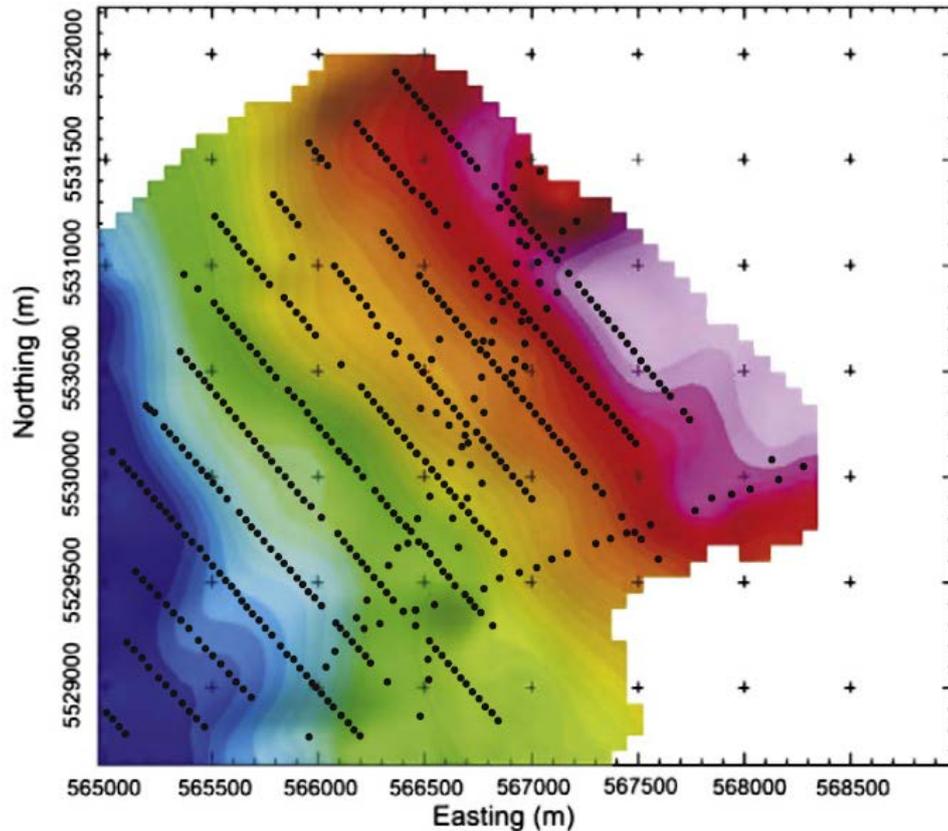


圖 2-9 重力探測法平面影像圖(Spicer et al., 2011)

彈性波層析成像法：彈性波層析成像法是藉由在地表面設置接收器，用以紀錄由人造震源所產生之震波的傳遞時間 (travel time) 又稱做初達波走時(first arrival time，即最先到達之波動)，被接收之震波包含直接震波(direct acoustic wave)及受到地層變化而折射回地表之折射震波(refracted acoustic wave)。初達波走時的不同與地層壓縮波波速、地形以及地層結構有關，透過反算可獲得地層之壓縮波波速分佈 (如圖 2-10 所示)。此法對於飽和土壤及土壤與岩石界面探測甚佳，可估計材料波速，然而在其本身原理的先天限制下，若僅採用同一平面之接收器收錄資料，其無法探測軟弱夾層及厚層中夾帶薄層材料；此外，對於含有孔洞之場址，可能會造成走時異常，但無法直接測繪。

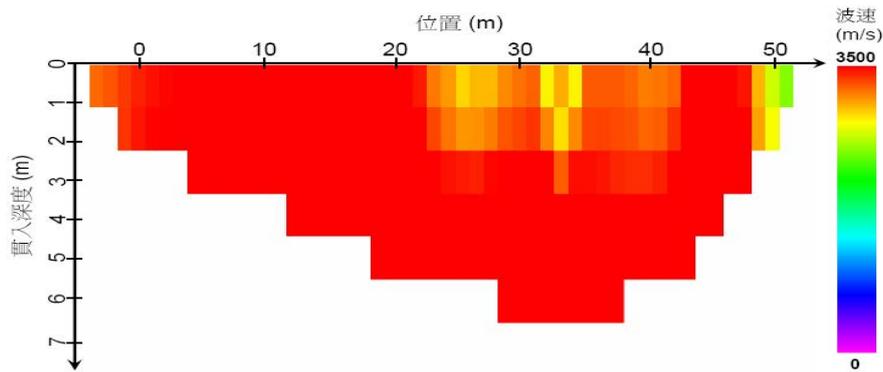


圖 2-10 壓縮波波速影像剖面圖(石門水庫廊道)

表面波震測法：在地表面製造一振動，在地表處會有一受擾動之質點是逆著其行進方向以一橢圓形軌跡滾動是為表面波。表面波傳遞時波傳影響範圍大約侷限於一個波長之深度內，因此，各個不同波長的表面波其所反映之地層深度特性將有所不同，亦即表面波影響深度隨頻率之不同而有差異。當土層剪力模數隨著深度變化，不同頻率所造成的表面波波速便有所不同，此一特性稱之為頻散現象，將不同頻率所對應之表面波波速集合，可得一曲線，稱之為頻散曲線(dispersion curve)。表面波震測即是於地表佈設受波器，收錄表面波訊號，藉由量測表面波於不同頻率之相位速度，獲得其頻散曲線後再進行剪力波速度層構造之反算解析可得剪力波速剖面以人造震源產生地表振動後將其收錄，透過訊號分析技術分析歷時振幅，再以反算技巧獲得不同深度的剪力波速剖面(如圖 2-11 所示)，由此剪力波速剖面便可應用至地層或壩體的動態性質推估。此法較適用於側向變化不明顯的地層剪力波速量測，其深層解析度較差，又因為土壤剪力波速不受地下水存在之影響，因此此法無法探測地下水位。此法可探測孔洞存在，但無法準確直接測繪。

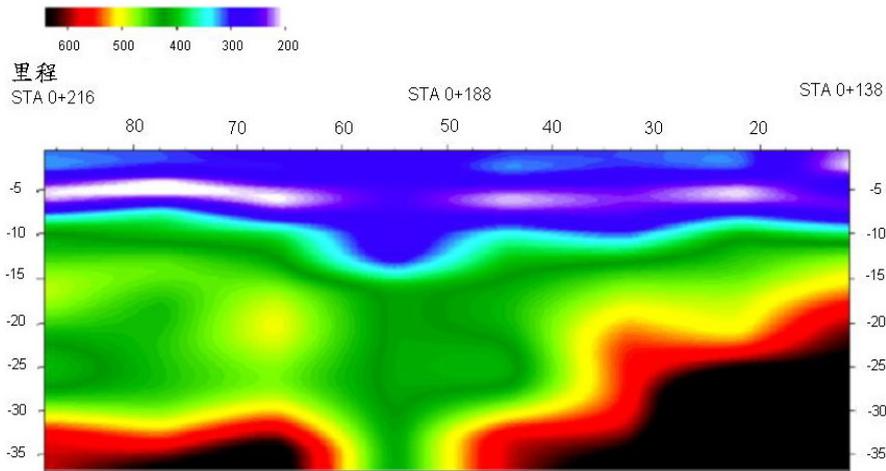


圖 2-11 剪力波波速影像剖面(新山水庫壩基)

反射震測法：當地表有一振動發生時，會有一彈性波的訊號傳遞出去，當地層材料的彈性波速有所差異時，便會於界面產生反射波以及折射波，而後此波動會被地表之接收器所接收，反射震測法便是直接根據所收錄得之反射波訊號進行分析，而由於地表所接收到之波動常是綜合反射波、折射波以及表面波，因此在採用反射震測法分析時，需先對原始訊號進行一系列的濾波動作，以便僅保留反射波之訊號而有利於辨識，其一波濾波後之結果如圖 2-12 所示，透過直接對此圖之界面判識，即可獲得地下構造之空間分布情形。

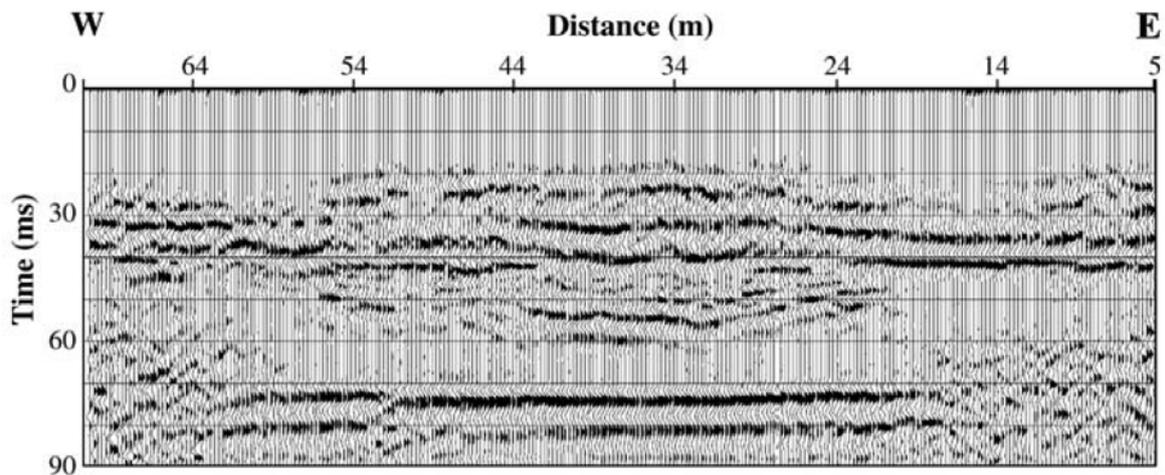


圖 2-12 反射震測法影像剖面(Sloan et al., 2007)

由前述內容可將各地球物理技術以其量測資料、所得物理性質以

及所得物理模型進行表列整理如表 2-4 所示，由表中可明確得知不同之地球物理探測技術可量測得不同物理性質，而此些物理性質之存在與否便是各地球物理探測技術應用於不同安全檢查問題之關鍵所在，在第參章第一節第一小節中將更進一步說明。

表 2-4 地球物理探測技術量測物理量

地球物理探測技術	量測資料	所得物理性質	所得物理模型
地電阻影像探測法	人造電流造成之電位差	電阻率	電阻率 2 維深度剖面或 3 維深度剖面
自然電位法	地中自然電位差	自然電位差	電位差 2 維平面分布
感應極化法	人造電壓消散速度	電容性	電阻率 2 維深度剖面
透地雷達探測法	電磁波之反射歷時及振幅	電學性質不連續面	反射層之 2 維深度或 3 維深度剖面
電磁探測法	感應電位	電阻率	電阻率 2 維平面剖面或 3 維深度剖面
微重力探測法	重力值	重力值	重力 2 維平面分布
彈性波層析成像法	壓縮波之初達波走時	壓縮波速	壓縮波速 2 維剖面
多頻道表面波震測法	彈性波歷時振幅	剪力波速	剪力波速 1 維深度剖面
反射震測法	彈性波之反射歷時及振幅	力學性質不連續面	反射層之 2 維深度或 3 維深度剖面

由此節可知，目前已有眾多地球物理探測技術可供應用，但是光是欲瞭解其最基本之應用原理便需花費許多時間，更何況還需先行針對不同的水庫結構物安全問題之可能的反應物理量進行瞭解後，再進行不同地球物理探測技術之選擇，且此中還牽涉各地球物理探測技術之解析以及感測能力，甚或施作條件等操作上之問題，此些種種皆為水庫管理人員應用上之障礙，也因此在國際上已有多份應用手冊之編撰用以降低此些阻礙。下節中將就國際地球物理方法應用手冊及導引進行簡單介紹。

四、國際地球物理方法應用手冊及導引介紹

地球物理探測技術已發展數十年，並已廣泛應用於工程問題之解

決上，部份學術教學用書籍(Telford et al., 1990; Reynolds, 1997; Sharma, 1997 等) 出版，藉以培養工程地球物理技術人材，然而，對於水庫管理人員而言，了解各地球物理技術之特性以及如何為欲解決之工程問題選用適當技術遠較了解其分析過程更為重要。

各國在此一議題上，針對不同應用領域已開始投入建立導引手冊的工作，而根據對於設定之閱覽讀者的不同，各版本有其編輯與內容摘選之差異，本中心目前收集有三本手冊，一為美國聯邦高速公路部門(Federal Highway Administration, 2003) 針對非破壞性檢測法於高速公路相關問題之應用所做之手冊；一為美國 ASTM 在其標準試驗手冊 D6429-99(2011) 一篇中對選用各非破壞性檢測法所提出的導引(guildline)；另一為日本地球探勘物理學家協會(The Society of Exploration Geophysicists of Japan, 2004) 針對非破壞性檢測法於工程以及環工問題之應用所做之手冊。本小節將對已收集到的手冊進行內容規劃比較。

(一) 美國聯邦高速公路部門手冊

在美國聯邦高速公路部門所撰寫之手冊(2003)中，其將手冊內容分做三部份，第一部份僅有一章是為總論，簡單說明此手冊之用途與內容規劃；第二部份是以調查之目標物為索引，再以問題做導向，將高速公路分為橋梁地下結構、橋樑主結構、鋪面、道路沉陷、地質調查以及振動等六種目標物，而後針對各目標物所遭受之問題提出適用之非破壞性檢測或地球物理探測技術，在所提之方法之下有簡單的方法介紹；而第三部份是以非破壞性檢測方法以及地球物理探測技術為導向，介紹非破壞性檢測方法以及地球物理探測技術所獲得之物理量，而後依其為地表施測或孔內施測再分別進行各非破壞性方法的介紹，介紹中包括有方法的概念與原理、施測法以及優缺點。

(二) 美國ASTM 標準試驗手冊

在制訂標準方法或建議準則手冊，以美國 ASTM 最具代表性，其在 D6429-99(2011) 一篇中提供選擇地球物理方法的導引。此導引可分做兩大部份，一部份是做為總論，在此總論中論述整個地球物理探測技術的特性，包括其使用時機、試驗特性以及應用領域，並依不同的方法與不同問題建立應用的評分建議表，以做為選用之用。而第二部份是簡單介紹各個非破壞性檢測方法，包括有簡介、應用、探測深度、試驗特性、解析能力、限制以及進階閱讀參考。

(三) 日本地球探勘物理學家協會(SEGJ)手冊

由日本地球探勘物理學家協會所編撰的手冊(2004)是以地球物理探測技術為導向，分章對每種方法進行介紹，並無一總提地球物理探測技術應用選擇之總論章節。但值得一提的是，其在各章對於各地球物理探測技術的介紹中，包含了有概念、應用、測線規劃、現場施測、資料分析、結果判釋以及報告內容，對於管理者在訂定合約規格上有其便利性。(其日文更新版已於 2011 年出版，而英文版預計於 2012 年翻譯完成，本中心將持續追蹤此最新版之出版情況)。

上述三種手冊之內容規劃各有其優缺點(如表 2-5 所列)，在本研究中，欲研訂地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用手冊以便利水庫管理者使用之前提下，美國聯邦高速公路部門以調查之目標物為索引，再以問題為導向的章節安排是不錯的概念，但在各問題下分列可用之地球物理探測技術則顯得過於冗長，不利於快速應用。在此點上，ASTM 以表評分的方式將問題與可用之地球物理探測技術結合之概念，可提供快速的選擇之用，但 ASTM 在各地球物理探測技術的介紹上太過於簡短，並且無法讓管理者了解該如何與技術人員進行測線

佈設之討論，並要求其提供所須之報告內容，在此點上，日本地球探勘物理學家協會對各地球物理探測技術的內容介紹可以補足。參考上述三本手冊之內容規劃，本研究所建議之地球物理探測技術水庫構造物安全檢查應用方法以及手冊編撰將於第參章第一小節中進一步說明。

表 2-5 不同地球物理技術應用手冊優缺點比較表

機關單位	內容	優	缺
ASTM D6429-99	Standard Guide for Selecting Surface Geophysical Methods		
	以問題與適用方法之評分製表，做為導引使用。	評分製表可簡單快速選擇。	介紹過於壟統，且參考資料不易索取使用。
Federal Highway Administration 2003	Application of Geophysical Methods to Highway Related Problems		
	分別以問題以及方法做導向，分兩部份編排撰寫。	以目標物為索引，問題為導向編排內容。	內容重覆出現顯得冗長。
SEGJ 2004	Application of Geophysical Methods to Engineering and Environmental Problems		
	以方法為導向編排內容。	測線佈設原則以及最後報告應涵蓋之內容。	以方法為導向。

第參章 地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查適用性評估與分析

一、適合應用於水庫構造物安全檢查應用之地球物理探測技術選定

在進行適合應用於水庫構造物安全檢查應用之地球物理探測技術之選定時其最重要者是瞭解欲進行檢查之工程問題所可能造成的特徵物理量變化，例如當壩體開始有滲露或管湧之情形時，水將在非設計區內之壩體存在，由於水與壩體材料之電學性質差異甚大，將顯著影響壩體之電學性質，因而可以電學性質做為滲流或管湧問題之特徵物理量，而後再加以選擇可用之地球物理探測技術。因此，在選定之過程中，如圖 3-1 所示，最先是需將由第 2.2 節中所得之水庫構造物安全檢查常見問題列表後，對其特徵物理量進行分析與討論，定義一至數個特徵物理量做為地球物理探測技術選用依據，然而，並非每種可量測該特徵物理量之地球物理探測技術皆適合做為檢測方法，其尚需考慮何種方法較能提供所需之空間解析度與目標辨識能力、何種檢測工具能在檢測區域之施測條件發揮功能等根據不同的地球物理探測技術的特性與施作位置之環境條件加以綜合考量後確定，又在同時有多種地球物理探測技術可作為檢測工具時，多種不同量測方法是否可有效提供更佳的判釋效果，亦是應當考慮的內容。

因此，在本節中將先檢討前述常見安全檢查問題之相對應反映物理量，而後說明個地球物理探測技術之施作特性，最終建立適用於各常見安全檢查問題之地球物理探測技術。

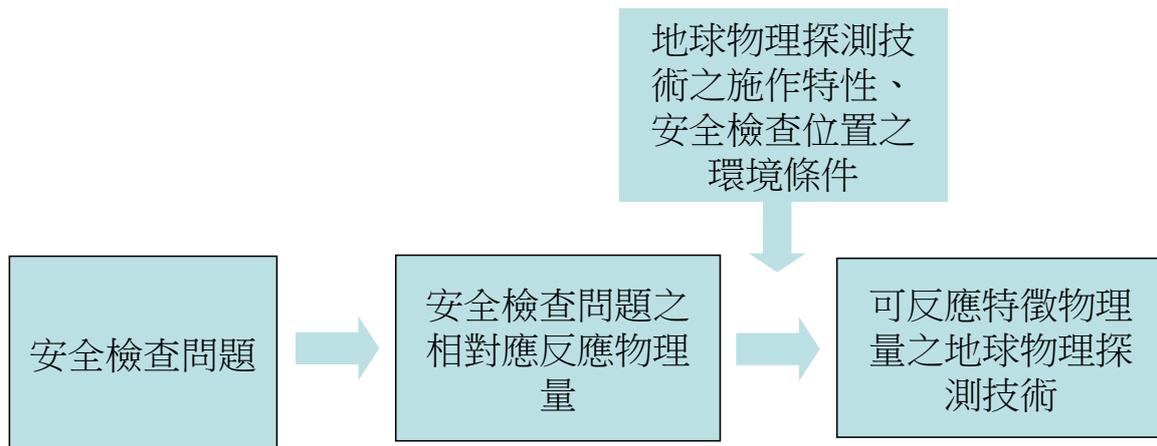


圖 3-1 適合應用於水庫構造物安全檢查應用之地球物理探測技術選定方法

(一) 常見安全檢查問題之相對應反映物理量

在本小節中將針對表 2-3 之常見安全檢查問題進行其相對應反映物理量之檢討，以便作為適當地球物理探測技術選用之基礎。

1. 混凝土壩

位於壩體之裂縫存在會使空氣進入，空氣與混凝土之電學性質有極大的差異而造成明顯的電學性質不連續面，若裂隙夠大，亦將有明顯的電阻率差異產生，此外，若裂隙大範圍的存在將使得整體勁度下降，而反映在壓縮波波速上；壩體之滲漏表示該處含有較多之水分，其電阻率較未含有水分之混凝土為小，可產生足夠之差異，同時滲漏亦表示有水的流動產生，其會產生較低的自然電位差，另一方面，在壩體上之滲漏通常亦顯示該處之混凝土較周邊不密實(衰化)，所以亦可能會反映在壓縮波波速之下降上；壩體混凝土強度之不足會影響其勁度，將直接反映在壓縮波波速上。

於壩址處之淘空會使該處產生孔洞造成壓縮波波速或剪力波波速

的改變，亦因而會有力學性質不連續面的存在，此外淘空產生的孔洞可能填滿空氣或水分，與周圍之土壤材料將有明顯的電阻率差異，並產生明顯的電學性質不連續面。

於壩基處之滲漏表示該處含有水分將會造成電阻率的下降，此外，滲漏亦表示有水的流動，其會有自然電位差的產生，另一方面，若滲漏情況嚴重其會帶走壩基之細顆粒而造成壓縮波速或剪力波速的下降；在壩基的滑動通常是由於壩基中軟弱材料的存在造成，軟弱材料之剪力強度或勁度通常較低，可有明顯的低速壓縮波速或剪力波速發現，此外，軟弱材料亦可能為含黏土量較高之地層，其電阻率會較低。

壩座之淘空狀態同壩址之淘空；壩座之滲漏同壩基之滲漏。溢洪道之滲漏狀態同壩體滲漏；溢洪道之裂縫狀態同壩體裂縫。

整理混凝土壩常見安全檢查問題相對應反映物理量於表 3-1。

表 3-1 混凝土壩常見安全檢查問題之相對應反映物理量

壩型	位置	安全檢查問題	反映之物理量
混凝土壩	壩體	裂縫	電學性質不連續面、電阻率、壓縮波波速
		滲漏	電阻率、自然電位差、壓縮波波速
		混凝土強度不足	壓縮波波速
	壩趾	淘空	壓縮波波速、剪力波速、電阻率、電學性質不連續面、力學性質不連續面
	壩基	滲漏	電阻率、自然電位差、壓縮波波速、剪力波速
		滑動	壓縮波波速、剪力波速、電阻率
	壩座	淘空	壓縮波波速、剪力波速、電阻率、電學性質不連續面、力學性質不連續面
		滲漏	電阻率、自然電位差、壓縮

			波速、剪力波速
	溢洪道	滲漏	電阻率、自然電位差、壓縮波波速
		裂縫	電學性質不連續面、電阻率、壓縮波波速

2. 土石壩

於土石壩壩體/壩頂發現之裂縫通常會在數公分寬以上，此類裂縫對造成彈性波傳遞的障礙而使得有異常之現象發生(呈現較低速或無訊號)，因此會反映在剪力波速與壓縮波速上，此外，裂縫中的空氣與周圍的大地材料電阻率可能差異不明顯，但可透過灌入石灰水等低電阻率物質使其充滿而產生差異，因此在正確的處置下亦可有電阻率的變化或是電學性質不連續面的存在；壩體/壩頂的差異沉陷形成原因通常有三，一者是為其下方有滲漏的情形，滲漏水流帶走細粒料而有淘空之情況，將造成差異沉陷的產生，在此情況下滲漏會使壩體材料含水而有較低之電阻率存在，且其淘空處會有剪力波速及壓縮波速降低的情形，而流動的滲漏水將會有低自然電位差的產生，其二可能原因是壩體材料含細粒料的不均勻性太大，若成因為此，則差異沉陷處可能會有剪力波速、壓縮波速較低以及低電阻率(含細粒料)之情況，第三種可能原因是填築之壩體材料高度不同使得壓密造成之沉陷量不同而有差異沉陷發生，此問題不易反映在物理量的差異上(若有適當長度之展距空間可透過探測原岩盤面瞭解)，應由設計圖說尋解較佳。

壩體坡面滑動主要為壩體材料剪力強度於相當條件下不穩定所致，具有較大坡面滑動危害之處通常剪力強度會較弱，會反映在剪力波速之上；壩體產生土壤液化之情形主因易在於剪力強度較弱，其會反映在低剪力波速之上，透過建立波速之調查結果，

可進行液化潛能分析以釐清其土壤液化之潛能；在壩體之滲漏表示該處含有水分將會造成電阻率的下降，此外，滲漏亦表示有水的流動，其會有自然電位差的產生，另一方面，若滲漏情況嚴重其會帶走壩基之細顆粒而造成壓縮波速或剪力波速的下降；壩體淘空通常是嚴重滲漏所造成，其反映之物理量狀態與滲漏同，另外因其有填滿空氣或水之孔洞存在，會有明顯電學性質不連續面存在。

壩趾滲漏之狀態同混凝土壩基滲漏。壩基之滑動狀態同混凝土壩基滑動；壩基之土壤液化狀態同壩體土壤液化。

溢洪道混凝土底版下積水或淘空在混凝土版與水或淘空造成之孔洞會有明顯的電學性質不連續面存在，此外其電阻率亦會有明顯的不同，另外混凝土版與淘空處的力學性質亦會有所不同，會有剪力波速與壓縮波速的變化，並有力學性質不連續面存在；在溢洪道之滲漏狀態同混凝土壩溢洪道滲漏；在溢洪道之裂縫狀態同混凝土壩溢洪道裂縫；在溢洪道之混凝土強度不足狀態同混凝土壩壩體混凝土強度不足。

在排水廊道之滲漏狀態同混凝土壩壩體滲漏；在排水廊道之裂縫狀態同混凝土壩壩體裂縫。在培厚區之滲漏狀態同壩體之滲漏。

整理土石壩常見安全檢查問題之相對應反映物理量於表 3-2。

表 3-2 土石壩常見安全檢查問題之相對應反映物理量

壩型	位置	安全檢查問題	反映之物理量
土石壩	壩體/壩頂	裂縫	壓縮波速、剪力波速、電阻率、電學性質不連續面
		差異沉陷	壓縮波速、剪力波速、電阻率、電學性質不連續面、自然電位差
	壩體	坡面滑動	剪力波速

		土壤液化	剪力波速
		滲漏	電阻率、自然電位差、壓縮波速、 剪力波速
		淘空	電阻率、自然電位差、壓縮波速、 剪力波速、電學性質不連續面
	壩趾	滲漏	電阻率、自然電位差、壓縮波速、 剪力波速
	壩基	滑動	壓縮波速、剪力波速、電阻率
		土壤液化	剪力波速
	壩座	滲漏	電阻率、自然電位差、壓縮波速、 剪力波速
	溢洪道	底版下積水/淘空	電學性質不連續面、電阻率、力學 性質不連續面
		滲漏	電阻率、壓縮波波速
		裂縫	電學性質不連續面、電阻率、壓縮 波波速
		混凝土強度不足	壓縮波速
	排水廊道	滲漏	電阻率、壓縮波波速
		裂縫	電學性質不連續面、電阻率、壓縮 波波速
	培厚區	滲漏	電阻率、自然電位差、壓縮波速、 剪力波速

(二) 常見安全檢查問題適用之地球物理探測技術

由前一小節檢討在混凝土壩與土石壩常見安全檢查問題所相對應之反映物理量所得之表 3-1 及表 3-2，透過表中之反映物理量一欄可將之與回顧各地球物理探測技術之量測物理性所得之表 2-4 相比對，獲得各安全檢查問題適用之地球物理探測技術如表 3-3、表 3-4 所示，然而在這其中可發現感應極化法、重力探測法以及反射震測法並未在適用技術中，主要原因在於感應極化法主要探測的是地體材料的電容性，一般的安全檢查問題並不會有極明顯的電容差異產生，最可能之應用處是在於對可能產生壩基滑動之黏土調查上，但其效果可能有限，主要還是以金屬或是汙染物會較為明顯，因此於此未有其應用；而重力探測法主要是量測地體的重力值，雖然目前的量測儀器精度已

大幅提升，但安全檢查問題所造成之重力變化極小(一般在地表下兩公尺內須至少達兩公尺直徑之球體空洞才有足夠之重力變化)，在未收集有安全檢查發生前之基準資料可做重力差量測比對下，僅透過針對環境(常需要區域性的修正法則)以及人造物之影響修正，以目前之技術尚無法進行有效之應用；而反射震測法主要之量測目標是力學性質不連續面，亦即是彈性波速有明顯差異的交界面，雖然在淘空發生或是土石壩溢洪道混凝土版下方淘空的情況下會有明顯的力學性質不連續面產生，但反射震測法主要需要透過反射波進行解讀，淘空的狀況主要發生在近地表的土壤層，過淺之區域內進行反射震測法受限於波長不夠小(頻率不夠高)，亦受到直達波之嚴重干擾不易濾除，若欲有效進行分離則需提升震源之頻率(Steeple and Miller, 1998)，但在土壤材料內欲產生高頻之震源並不容易，一般來說，在近地表 30 公尺內欲進行反射震測法而有良好結果十分困難，需有特殊之地質條件才有機會，因此在此前提下，於大壩安全檢查問題之應用中並不適用。

除前述三項地球物理探測技術尚不適用在大壩安全問題檢查應用上，在土石壩另有兩處之反映物理量經檢討後亦不適用，一處是在土石壩壩體淘空處，雖其會有電學不連續面的存在而具有應用透地雷達探測技術之可能，但對土石壩來說，其為柔性之結構物，淘空之發生將相對應產生上方土壤之沉陷，而不致使淘空所產生的孔洞過大，而此不甚大的孔洞在壩體中通常會有一兩公尺以上的覆土深度，對透地雷達探測技術而言，欲在濕潤的土壤(淘空通常是滲漏造成)中有足夠的探測深度須採用較低頻的系統，但低頻系統的解析能力將會下降，對於可能僅有數公分的電學不連續面其解析能力將不足，因此在此安全檢查問題上檢討後認為並不適用；另一處為溢洪道底版之淘空/積水，雖然其會有壓縮波速及剪力波速的差異而可應用彈性波層析成像

法以及多頻道表面波震測法，但此兩種方法皆需要採用震源敲擊，混凝土版與其下方的土層已有明顯的彈性波速差異，當在其上敲擊時大部分的能量都將集中在混凝土版中而無法順利往下傳遞進行探測，因此在此安全檢查問題之應用上，經檢討後認為並不適用。

表 3-3 混凝土壩常見安全檢查問題之適用地球物理探測技術

壩型	位置	安全檢查問題	反映之物理量	適用之地球物理探測技術
混凝土壩	壩體	裂縫	電學性質不連續面、電阻率、壓縮波波速	透地雷達探測法、地電阻影像探測法、彈性波層析成像法
		滲漏	電阻率、壓縮波波速	地電阻探測法、彈性波層析成像法
		混凝土強度不足	壓縮波波速	彈性波層析成像法
	壩趾	淘空	壓縮波波速、剪力波波速、電阻率、電學性質不連續面、力學性質不連續面	彈性波層析成像法、多頻道表面波震測法、地電阻影像探測法、透地雷達探測法、電磁探測法
	壩基	滲漏	電阻率、自然電位差、壓縮波波速、剪力波波速	地電阻影像探測法、自然電位法、彈性波層析成像法、多頻道表面波震測法、電磁探測法
		滑動	壓縮波波速、剪力波波速、電阻率	彈性波層析成像法、多頻道表面波震測法、地電阻影像探測法
	壩座	淘空	壓縮波波速、剪力波波速、電阻率、電學性質不連續面、力學性質不連續面	彈性波層析成像法、多頻道表面波震測法、地電阻影像探測法、透地雷達探測法、電磁探測法
		滲漏	電阻率、自然電位差、壓縮波波速、剪力波波速	地電阻影像探測法、自然電位法、彈性波層析成像法、多頻道表面波震測法、電磁探測法
	溢洪道	滲漏	電阻率、壓縮波波速	地電阻影像探測法、彈性波層析成像法
		裂縫	電學性質不連續面、電阻率、壓縮波波速	透地雷達探測法、地電阻影像探測法、彈性波層析成像法

表 3-4 土石壩常見安全檢查問題之適用地球物理探測技術

壩型	位置	安全檢查問題	反映之物理量	適用之地球物理探測技術
土石壩	壩體/ 壩頂	裂縫	壓縮波速、剪力波速、電阻率、電學性質不連續面	彈性波層析成像法、多頻道表面波震測法、地電阻影像探測法、透地雷達探測法、電磁探測法
		差異沉陷	壓縮波速、剪力波速、電阻率、電學性質不連續面、自然電位差	彈性波層析成像法、多頻道表面波震測法、地電阻影像探測法、透地雷達探測法、自然電位法、電磁探測法
	壩體	坡面滑動	剪力波速	多頻道表面波震測法
		土壤液化	剪力波速	多頻道表面波震測法
		滲漏	電阻率、自然電位差、壓縮波速、剪力波速	地電阻影像探測法、自然電位法、彈性波層析成像法、多頻道表面波震測法、電磁探測法
		淘空	電阻率、自然電位差、壓縮波速、剪力波速、電學性質不連續面	地電阻影像探測法、自然電位法、彈性波層析成像法、多頻道表面波震測法、電磁探測法
	壩趾	滲漏	電阻率、自然電位差、壓縮波速、剪力波速	地電阻影像探測法、自然電位法、彈性波層析成像法、多頻道表面波震測法、電磁探測法
	壩基	滑動	壓縮波速、剪力波速、電阻率	彈性波層析成像法、多頻道表面波震測法、地電阻影像探測法
		土壤液化	剪力波速	多頻道表面波震測
	壩座	滲漏	電阻率、自然電位差、壓縮波速、剪力波速	地電阻影像探測法、自然電位法、彈性波層析成像法、多頻道表面波震測法、電磁探測法
	溢洪道	底版下積水/淘空	電學性質不連續面、電阻率、力學性質不連續面、壓縮波速、剪力波速	透地雷達、地電阻影像探測法
		滲漏	電阻率、壓縮波波速	地電阻影像探測法、彈性波層析成像法
		裂縫	電學性質不連續面、電阻率、壓縮波波速	透地雷達探測法、地電阻影像探測法、彈性波層析成像法

		混凝土強度不足	壓縮波速	彈性波層析成像法
排水 廊道		滲漏	電阻率、壓縮波波速	地電阻影像探測法、彈性波層析成像法
		裂縫	電學性質不連續面、電阻率、壓縮波波速	透地雷達探測法、地電阻影像探測法、彈性波層析成像法
培厚 區		滲漏	電阻率、自然電位差、壓縮波速、剪力波速	地電阻影像探測法、自然電位法、彈性波層析成像法、多頻道表面波震測法、電磁探測法

二、地球物理探測技術應用案例蒐集

將非破壞性的地球物理探測技術應用於水庫構造物的安全檢查中可有效且快速的獲得無法目視之水庫構造物內部情形，甚或可在問題僅在發端之始便可加以發現而進行改善預防，並且對於異常現象之成因或機制可有進一步之瞭解，然而，誠如第貳章第二節中所述，地球物理探測技術有一定的空間解析能力，且由獲得材料之物理參數間接反應其工程問題，因此該如何正確解讀探測所得之異常物理量十分重要，除了可藉由長時間專業的訓練與驗證中累積經驗外，透過對於國內外之案例的蒐集，使用者可快速地認知單一判釋解讀技巧，並且可進一步了解數種地球物理方法聯合使用時之綜合判釋技巧；此外，透過蒐集的案例做為佐證可使使用者對於本計畫最後所選用之應用方法有一定程度的信心，因此，將針對選定適用之各個地球物理探測技術蒐集國內外案例，並針對於應用過程以及結果進行評析，以做為後續使用之參考。

為落實在案例收集上之應用構想，於資料整理上將案例以水庫為主要收集分類，再將各水庫之案例依照不同之應用細分為(1) 案例檢索資料、(2) 壩體環境與安全檢查問題說明、(3) 地球物理探測技術規劃與現地應用問題、(4) 檢測成果說明、(5) 應用成果評析五個部份進

行描述：

(1) 案例檢索資料：主要是為使此案例可實際做為其他類似情況之應用參考之檢索用，因此將以本計畫規劃進行之應用方法加以分類，此檢索資料會有四個檢索碼，分別是構造物類型-目標處-安全檢查問題-地球物理檢測技術，舉例來說，若是在某個水壩之混凝土結構物上，對其溢洪道有混凝土損害之安全檢查問題，而採用彈性波層析成像法進行檢測，則此案例之檢索資料將表示為：混凝土構造-溢洪道-混凝土損害-彈性波層析成像法，在許多情況下，通常會同時使用多種地球物理檢測方法互為檢視比較再進行最後判讀，在此情況下，將會將多種地球物理探測方法同時標註於第四個檢索碼中，以前例而言，若其同時使用地電阻探測進行檢測，則其檢索碼將表示為：混凝土構造-溢洪道-混凝土損害-折射震測法、地電阻探測法。

(2) 壩體環境與安全檢查問題說明：在此部份中對於水壩的周邊環境狀況以及所遭遇的安全檢查問題進行概要性的重點說明，以利閱讀者對水壩問題以及其地球物理技術應用原因有基本的瞭解。

(3) 地球物理探測技術規劃與現地應用問題：此部份將承接上部份說明在此水壩之安全檢查問題下所採用的地球物理探測技術，包含其規劃施作內容以及所面對的現地應用問題。

(4) 檢測成果說明：將檢測之成果進行分析說明其為水庫管理單位提供了哪些訊息，並解決了哪些問題。

(5) 應用成果評析：此部份將會以專業角度針對此案例之內容及應用成果進行評析，做為閱覽者的思考參考。

在此以日月潭第三次定期安全評估於水社壩所進行之地球物理探測補充調查應用做為案例收集之範例。

水社壩

(1) 檢索資料

土石壩-壩體-滲流-地電阻影像探測法。

(2) 壩體環境與安全檢查問題說明

水社壩為黏土心層，中心為鋼筋混凝土截水心牆之土壩，壩頂長度 363.6 公尺，最高 30.3 公尺，壩頂寬 7 公尺，該壩體長期以來有滲漏之問題，為瞭解其滲漏路徑，並與過去調查資料比對，以規劃有效之整治方案，故進行地球物理探測技術之調查。

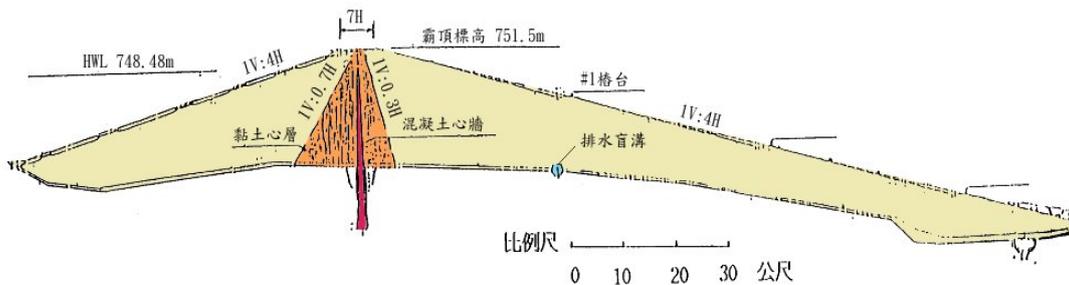


圖 3-2 水社壩標準斷面圖(台灣電力公司，民國 98 年)

(3) 地球物理探測技術規劃與現地應用問題

水社壩之壩體滲漏調查以 3D 地電阻探測進行施測，共規劃有 3 組測線：SE-H、SE-L 以及 SE-R(如圖 3-3 所示)。SE-H 測線以長 485 公尺測線圍成長 135 公尺、寬 20 公尺之 3D 地電阻長方陣列，其長向約略平行壩軸(為表方便，後續以 x 方向表示之)，主要為探查平行壩軸之壩體溼潤情形；SE-L 測線偏向壩體左側，以長 500 公尺測線圍成長 75 公尺、寬 50 公尺之 3D 地電阻長方陣列，其主要目的是為了解垂直壩軸向之壩體溼潤情形，因此其長向與壩軸垂直(為表方便，後續以 y 方向表示之)；SE-R 測線偏向壩體右側，以長 500 公尺測線圍成長 75 公尺、寬 50 公尺之 3D

地電阻長方陣列，其主要目的是為了解垂直壩軸向之壩體溼潤情形，因此其長向在 y 方向上。

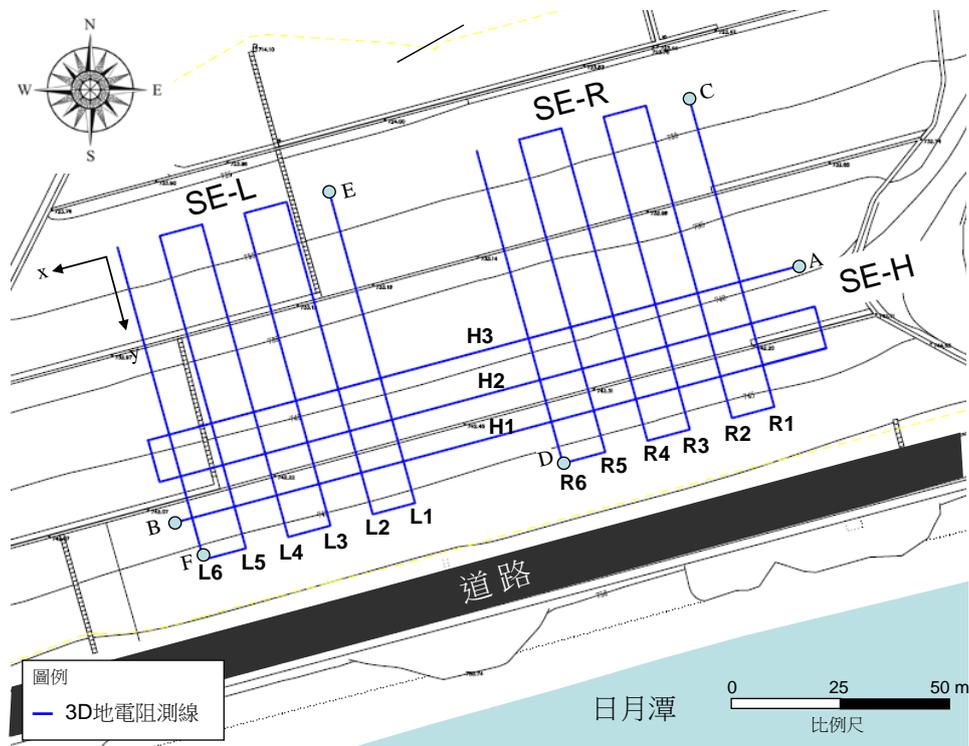


圖 3-3 水社壩 3D 地電阻探測測線位置圖

現場施測時，SE-H 測線電極間距設定為 5 公尺，在 y 方向線段與線段之間距採用 10 公尺，電極棒數目為 96 根，總展距為 x 方向 155 公尺、y 方向 20 公尺之 3D 測線，採用 wenner 法進行施測。SE-L 以及 SE-R 兩條測線之電極間距、展距與電極數皆相同，電極間距設定為 5 公尺，在 x 方向線段與線段之間距採用 10 公尺，電極棒數目為 96 根，組成在 x 方向 50 公尺、y 方向 75 公尺之 3D 測線，測線最頂端距離壩頂約 12.2 公尺(水平距)，測線最底端距離壩底約 10.6 公尺，採用 wenner 法進行施測。3 組測線中，SE-H 與 SE-L 以及 SE-R 互有相交，其位置關係圖如圖 3-4 所示，SE-L 與 SE-R 所在高程相同，兩者間相距 35 公尺，SE-L 之 L6 剖面位於 SE-H 自 B 點起算 5 公尺處，而 SE-R 之 R1 剖面位於 SE-H

自 A 點起算 15 公尺處。SE-H 與 SE-L 以及 SE-R 交於高程較高處，H1、H2 以及 H3 剖面分別與 SE-L 以及 SE-R 交於自 DF 起算 10 公尺 20 公尺以及 30 公尺處。

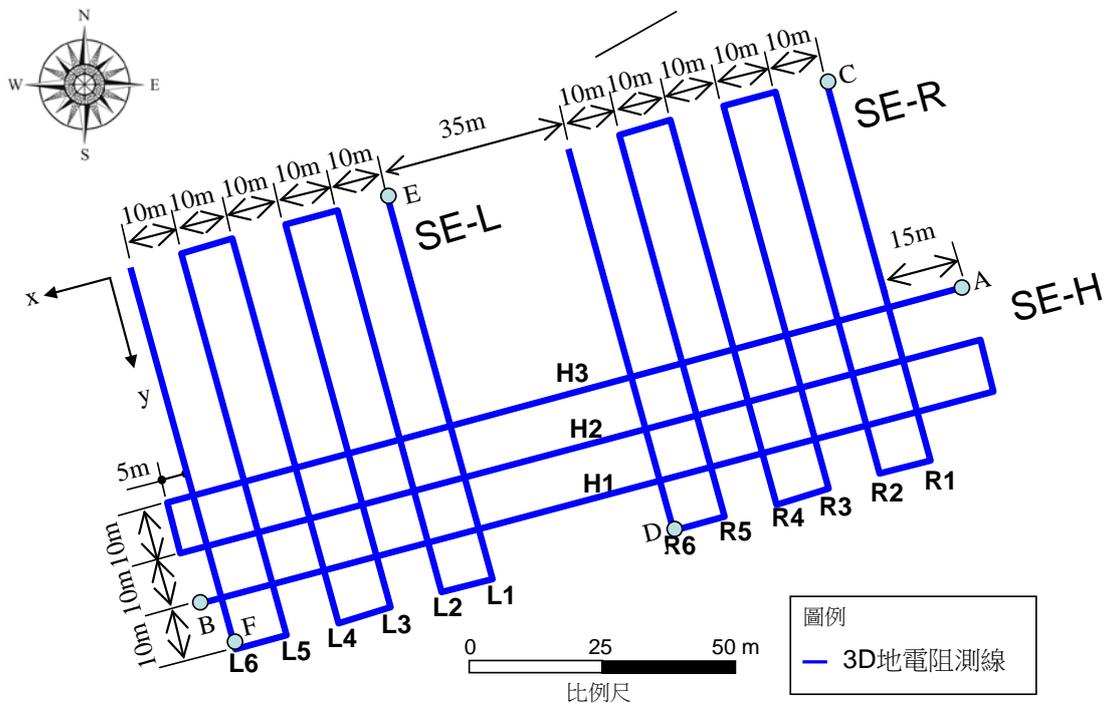


圖 3-4 水社壩 3D 地電阻探測測線相互關係圖

(4) 檢測成果說明

測線 SE-H 之 3D 地電阻探測結果如圖 3-5 所示，圖中顯示，偏左壩側之位置(測線約 100 公尺至 155 公尺)自地表開始便有低電阻率($<80\text{ohm}\cdot\text{m}$)土層之存在，該土層在測線 130 公尺至 155 公尺間往下延伸至少 18 公尺深，自測線 130 公尺處往右壩側，低電阻率帶開始往下平移，於測線 100 公尺至 50 公尺間，低電阻率土層主要存在於地表下 7 公尺至 13 公尺深度間。測線 0-90 公尺段近地表 10 公尺內土層之電阻率相對較高(主要在 200-800 $\text{ohm}\cdot\text{m}$ 之間)，惟在測線 0-25 公尺處地表下約 13 公尺處有局部性的低電阻土層存在。

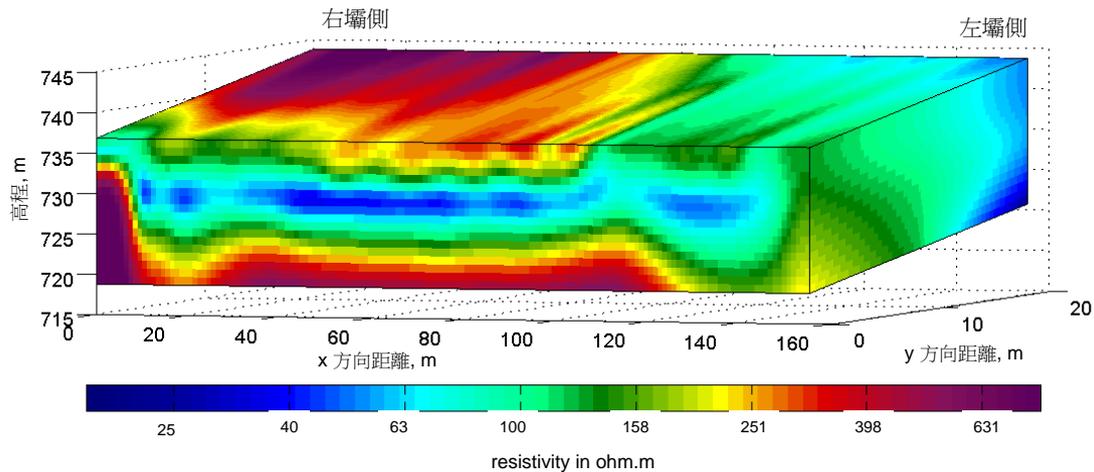


圖 3-5 SE-H 測線 3D 電阻率影像圖(台灣電力公司，民國 98 年)

SE-L 及 SE-R 測線之結果如圖 3-6 所示，結果顯示 SE-L 測線在偏左壩側之壩體可基本分為兩個帶狀低電阻率土層存在區，其一位於較高處，主要在測線 y 方向上約 45-70 公尺段(存在之高程約為 743-731 公尺)，該區土層自地表開始即有低電阻率(< 80 ohm-m)土層存在的情形，此區之低電阻率土層有向壩頂延伸的趨勢；另一低電阻率區位於測線 y 方向上約 18-30 公尺段(存在之高程約為 733-723 公尺)，低電阻率土層延伸至地表處。在測線最低處存在一明顯之高電阻率土層(> 200 ohm-m)，自地表延伸至地表下至少約 8 公尺深。SE-R 測線之結果顯示在偏右壩側之壩體主要存在一帶狀之低電阻率土層，該土層位於測線 y 方向上約 44-67 公尺段(存在之高程約為 737-至少 730 公尺)，該土層自地表下 5 公尺開始有低電阻率(< 80 ohm-m)土層存在的情形，另外，在測線最底部與最頂部存在一明顯之高電阻率土層(> 200 ohm-m)，自地表延伸至地表下至少約 5 公尺深。

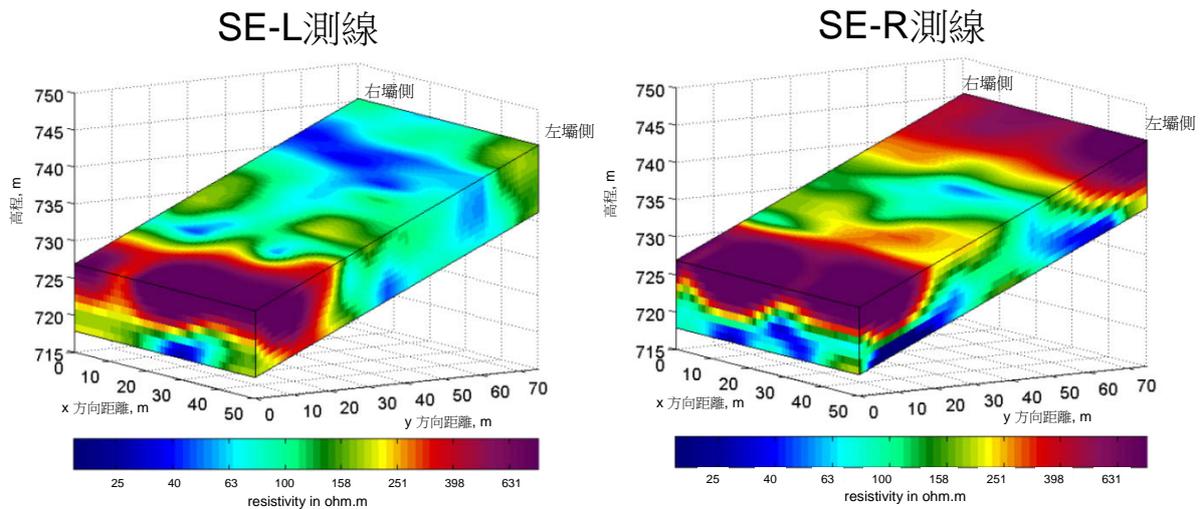


圖 3-6 SE-L 及 SE-R 測線 3D 電阻率影像圖(修改自台灣電力公司，民國 98 年)

於上述三組測線結果中可見有明顯之低電阻率存在區域，參考日月潭水庫整體安全檢查與評估現地探查及測試專題報告(台灣電力公司，民國八十一年)中對水社壩壩體電阻率與壩體材料含水關係之分類，電阻率在 20-40ohm-m 間者為含水壩材，電阻率在 50-100ohm-m 間者為濕潤壩材，綜合上述三組測線之結果將壩材含水特性整理如圖 3-7 所示，由圖中可清楚觀察到左壩側壩材含水情況明顯，在第一平台靠左壩側附近壩體表面便有含水情況，由該處漸往右壩側及下游側擴散；地下含水帶主要在第一平臺兩側，自壩體左側至右側皆存在，根據 WD12 與 WD13 兩處水位孔於民國九十八年九月之監測資料顯示，地下水位至少在地表下 11 公尺，此水位位置較圖中地下含水壩材之最低處還低，可知此地下含水壩材非地下水造成，而是由較高處之其它水源造成。將此圖與水社壩於 921 地震後由自然電位法量測所獲得之判釋流線圖所顯示之流線相符，推測造成壩體地下水位線以上壩材濕潤以及含水之水源可能是由左壩側流入。

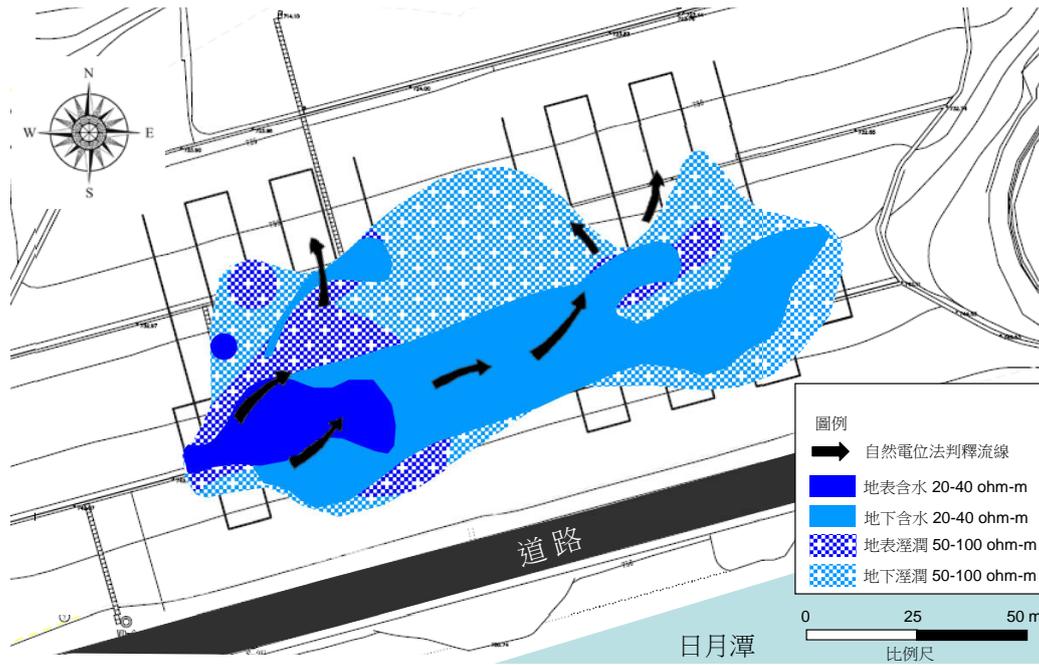


圖 3-7 水社壩地電阻探測綜合判釋結果(台灣電力公司，民國 98 年)

(5) 應用成果評析

此應用案例進行 3D 地電阻調查進行壩體滲漏調查，搭配自然電位法之結果可有效推測出平面之滲流流向趨勢，然而在最後綜合判釋結果中依據台灣電力公司(民國 81 年)對電阻率與含水狀態之分類進行簡化判讀，有兩點可進一步改善之處，其一，電阻率與含水狀態之關係是否恰當應該要更謹慎確認，才不致有誤判現地含水狀態之問題，其二，地電阻影像探測法較自然電位法之優處在於其可提供良好之深度資訊，在確認其平面滲漏區域與自然電位法相符後，應該再進一步以含有深度之訊息將滲漏在壩體中之可能 3D 滲流路徑找出，而可提供更為良好之工程訊息。

除此之外，此探測應用較為可惜處在於，就目前探測結果可推測推測造成壩體地下水位線以上壩材濕潤以及含水之水源可能是由左壩側流入，若可再補充進行更靠近左壩座以及壩體上游側之施作將可使探測結論更加明確，進一步提升探測成果的後續應

用性。

(6) 參考文獻

台灣電力公司，日月潭水庫整體安全檢查與評估現地探查及測試專題報告，民國 81 年。

台灣電力公司，日月潭水庫第三次整體安全檢查與評估報告，民國 98 年。

以上為案例收集之整理範例，共完成國內外 17 個案例整理，將其索引資料整理如所表 3-5 所示，為保持本文之簡潔，完整之案例內容說明請見附錄二第肆章之內容。

表 3-5 地球物理探測技術於大壩安全檢查應用案例整理表

地區	壩名	案例檢索資料
臺灣	水社壩	土石壩-壩體-滲漏-地電阻影像探測法
臺灣	新山水庫	土石壩-壩體-滲漏-地電阻影像探測法
臺灣	烏山頭水壩	土石壩-壩體-坡面滑動-表面波震測法
臺灣	石岡壩	混凝土壩-壩體-混凝土強度不足-彈性波層析成像法
臺灣	西勢水庫	混凝土壩-壩體-混凝土強度不足-彈性波層析成像法
韓國	Sandong 壩	土石壩-壩座-滲漏-地電阻影像探測法、自然電位法
韓國	中部某壩	土石壩-壩體-滲漏-地電阻影像探測法
敘利亞	Afamia B 壩	土石壩-壩基-滲漏-電磁探測法、地電阻影像探測法
印度	Som-Kamla-Amba 壩	土石壩-壩體-滲漏-地電阻探測法、自然電位法
中國大陸	廣東南水水壩	土石壩-壩體-裂縫-透地雷達探測法。
中國大陸	福建三清亭壩	混凝土壩-壩體-滲漏-透地雷達探測法
美國	Dana Lake 壩	土石壩-壩體-滲漏-地電阻影像探測法、自然電位法
美國墨西哥	Amistad 壩	土石壩(部分混凝土壩)-壩基-滲漏-地電阻影像探測法

美國	Barker 壩	混凝土壩-壩體-裂縫-彈性波層析成像法
希臘	Mornos 壩	土石壩-壩體-滲漏-彈性波層析成像法、地電阻影像探測法
西班牙	CHB 壩	土石壩-壩體-滲漏-自然電位法、地電阻影像探測法
西班牙	EI Tejo 壩	土石壩-壩體-滲漏-自然電位法
瑞典	Hällby 壩	土石壩-壩體-滲漏-地電阻影像探測法監測

三、地球物理探測技術之現地應用問題評析

(一) 現地應用問題評析要點說明

地球物理探測技術起初所應用之場址與水庫構造物有極大之差別，水庫構造物為人工結構物，其內部材料之變異性較天然環境大上許多，且其除地表之起伏較劇烈外，在其內部還常有維生或輸電管線存在，而使得施測環境的複雜度增加。欲對地球物理探測技術之現地應用問題進行評析，其可從三個方面切入(如圖 3-8 所示)：其一是探測法本身判釋方法之問題、其二是水庫構造物背景環境對探測法影響之問題，再次者是探測儀器適用性調整之問題。

在探測法本身判釋方法之問題上，對於地球物理探測所得之結果，通常是需要透過反算的過程以獲得現場空間分布狀況，在反算之過程中，其必需要對現場狀況進行若干假設以利反算之進行，例如在地電阻法或是折射震測法之反算過程中，其假設現場 2 維之環境，亦即在垂直測線的方向上地表下斷面沒有變化，此一假設在靠土石壩體中央之斷面上或許合理，但當測線靠近山脊時，此假設便不完全合理，但此一假設上的差異對於判釋所得之結果是否有所影響，是需要進一步分析探討的；又若在壩體上施測常會有地形的變化存在，此時對於地電阻探測法或折射震測法，在其反算過程中可將地形效應之影響考慮進入，而不致使結果有過大之差異，但對於表面波震測法而言，截

至目前為止，其並無法將地形影響造成的差異納入反算考量中，此即本中心所提之探測法本身判釋方法的問題。

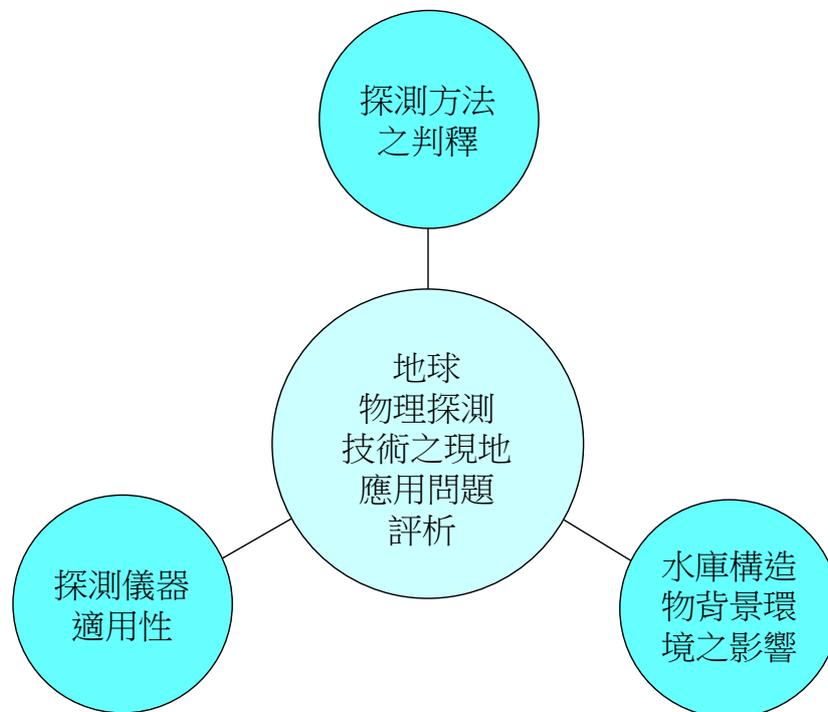


圖 3-8 地球物理探測技術之現地應用問題評析內容

其次是水庫構造物背景環境之影響問題。在地球物理探測技術中，其現場所收錄之資料是許多不同的物理量，其有電壓、振動等值，隨著不同的探測技術其所收錄的物理量有其大小的不同，倘若水庫構造物環境之背景值超越欲收錄的內容時，將造成探測所得之資料無法進行分析，例如在滲流調查中常用到的自然電位法，其所收錄之電壓值常只有幾毫伏的大小，倘若在佈滿有輸電管線或是運轉中之機具的水庫構造物周邊施作，則可能使得收錄所得之電壓值不具意義；又若有水力發電機組附近的水庫構造物中進行彈性波層析成像法施作，彈性波層析成像法於現場所收錄的是地表振動資料，但由於水力發電機組亦可能產生一定程度的振動，而造成其目標訊號不佳無法進行分析，此即所提水庫構造物背景環境之影響問題。

再次者是探測儀器適用性調整之問題。同樣的儀器在不同的水庫構造物環境下施作可能就有不同的適用性調整需求，例如同樣進行地電阻影像探測，在土石壩壩體上其可以將電極棒直接貫入地裡，但在混凝土構造物上欲進行施作時，直接貫入或是鑽孔插入的方法便變得不可行，因此需調整電極棒之型式使其適合施作；又如採用折射震測法進行探測時，一般以人工使用鐵鎚敲擊地面，由於混凝土波速甚高，需特別注意 Trigger delay 的問題，因此需要對震源進行適用性的調整，此即探測儀器適用性調整之問題。

在本節中將根據前述三個方向對各個地球物理探測技術進行現地應用之問題評析，在評析中會將可能面臨之問題提出，並蒐集文獻說明其影響性與可能之解決或避免方案，但由於不是每個問題都可在短時間內可以提出解決之道，尤其是牽涉到其反算分析之方法的問題，對於無法立即解決之問題亦會特別提出說明，或以說明其影響而避免判釋時的過度解讀。

(二) 地電阻影像探測法現地應用問題評析

1. 水庫構造背景環境之影響

地形效應影響及應對：在大壩中施作地形的變化為必然存在之影響，若在反算過程中不考量地形所造成之差異，將使結果有所誤差，目前 2D 以及 3D 地電阻影像施測技術皆可考慮地形效應之影響進行反算，因此於大壩上進行地電阻影像探測需進行地形測量，將地形之資料提供做為反算依據。此外，避免測線橫跨過落差太大的溝渠或土堤處，此種過度太大之落差將造成反算上之困難，一般而言，應避免測線在垂直向的變化大於 2 倍的電擊棒間距較佳。

人造物之影響及應對：在某些特定的大壩中會有高壓電塔、電波發射台及地下管線的存在，由於地電阻影像探測主要是收集地表電壓，此些具電磁波之人造物將對施測結果有所影響，於測線佈設上應注意避開，其閃避距離並無一定，須視電磁波之功率而定，但至少應避免自其正上方或正下方通過。

2. 探測儀器適用性問題

於拋石上施作及應對方式：在土石壩中，其壩面多有拋石層進行保護，此些拋石粒徑大且堅硬並不易將電極棒貫入並與之良好耦合，亦使得施作資料品質不佳，針對此點可採用在拋石縫中填入泥土後澆置鹽水以便利電極棒與之耦合，並維持泥土與周邊拋石之導電良好。

於混凝土、瀝青鋪面上施作：於大壩中應用常會有在壩頂或大壩躑台上施作之可能性，而此些位置之表面常會有混凝土或是瀝青鋪面的存在，以既有之電極棒是需要將其貫入土中約 30 公分以便與地表有足夠之耦合程度，雖於混凝土或是瀝青鋪面可直接以鑽孔後插入的方式進行，但其會造成施作速度較不具效率外，亦可能不小心造成整個鋪面的破壞。此外，地電阻影像探測法在混凝土壩中或是排水廊道中施作時，其有可能需要在混凝土立面上施作，此時進行鑽孔置放電極棒並不恰當亦通常不被允許。

於混凝土、瀝青鋪面上施作之應對方式：基於上述不便與無法施作之狀況，經濟部水利署(民國 94 年)之研究報告提出可採用平板式電極(如圖 3-9 所示)進行施作，其是利用紅銅製成，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，用以連接電極與纜線之用。

而為使此電極可與地面耦合良好，在電極與地面間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，此外，由於皂土拌水後具有良好黏著性，亦可有助於其在混凝土立面上附著施作。

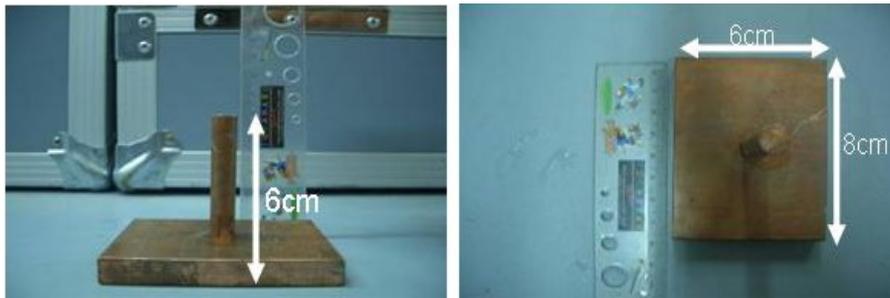


圖 3-9 平板式電極(修改自經濟部水利署，民國 94 年)

3. 探測技術判釋問題

3D 效應之影響：大多數的地電阻影像探測是採用 2D 影像探測法，在應用上常忽略了三維效應的影響，所謂 3D 效應，即 2D 地電阻測線剖面外的地質結構，其電阻率映射於 2D 地電阻測線剖面上所造成的探測誤差。2D 地電阻影像探測在反算上假設地層在垂直測線方向上並無變化，不過在大壩中電流卻是在三維的方向 (x, y, z) 流動，因而造成非二維剖面上的物體對地電阻電場產生一定程度的擾動，測線兩側之高程與電阻率變化可能造成二維剖面上映射出假訊息。由於大壩剖面之高程變化與材料分區明顯，當測線平行於壩軸時，需特別注意 3D 效應之問題。

3D 效應影響之應對方式：此問題之成因是 2D 地電阻影像探測法在反算上之問題，欲解決此問題須採用 3D 地電阻影像探測法，否則便須於測線規劃時盡量避免或搭配 3D 正算模式探討 3D 效應與資料判釋。採用 3D 地電阻影像探測法需要儀器具有較多

的頻道數進行資料收集，因此若設備不足而無法進行 3D 地電阻影像探測的情況下，Yang and Lagmansson(2006)提出了擬 3D 地電阻影像探測法，該法是採用多條彼此間間距不超過 2 倍電極棒間距之 2D 地電阻影像探測測線結果進行 3D 地電阻影像探測反算，亦可獲得與 3D 地電阻影像探測法相近之結果，降低 3D 效應之影響，但參考楊光程(民國 98 年)之研究，建議 2D 地電阻影像探測測線間距以 6 公尺與 2 倍電極棒間距較小者為佳；若在霸體上進行 3D 施測有其困難，則應在不影響探測目的下於規劃測線時避開垂直測線方向變化較大的位置施作，根據楊光程(民國 98 年)之研究，距離測線 6 公尺應已足夠避免 3D 效應之影響。若無法避免 3D 效應，亦可以考慮簡化與束制地層模型，進行 2D 施測結果的 3D 反算 (Kim et al., 2007)

電阻影像剖面判釋：地電阻影像探測法其解析度在距離電極棒越遠之位置解析度將越差，於判讀時應注意其是否有足夠能力對目標物進行呈現，例如地中若夾有弱帶(下方電阻值低於上方電阻值)其厚度小於電擊間距，則會受精度限制造成無法正確獲得其分布情況；此外，地電阻影響探測法之解析能力亦受到地層電阻率分佈之影響，如上方電阻值甚低時，電流密度集中於低電阻區域，易造成下方區域之靈敏度過低而無法清楚解析，如何評價各處施測結果是目前學者仍在研究的課題，實務上，可以搭配正算模式，由反算結果與工程背景提出合理電阻率模型，透過虛擬試驗了解施測結果的可能限制與合理解釋。此外，在進行 2D 地電阻探測資料判讀時，應注意可能的 3D 效應，避免錯誤解讀不可過度解讀。

(三) 自然電位法現地應用問題評析

1. 水庫構造背景環境之影響

人造物之影響及應對方式：在某些特定的大壩中會有高壓電塔、電波發射台及地下管線的存在，由於自然電位法主要是收集地表自然電壓，其電壓值往往僅為毫伏，此些具電磁波之人造物將對施測結果造成影響，但由於自然電位法之施測主要是大面積進行，並不易避開此些人造物，僅能在施測時標記其位置，以便於判讀時進行考量。

氣候之影響及應對方式：量測用之非極化電極內含有電極棒以及電解液，當溫度有所變化時，其本身之電學性質將有所改變，如此一來做為基準電位之處將不再是一固定值而有所變化，造成整體相對電位解讀之錯誤，因此應注意施測時整體溫度的變化勿使其過大。此外，對於滲流之調查應避免在大雨過後進行，因為大雨過後地表水將自地表往地下滲入，而有往下之水流產生，此水流將會造成地體之自然電位改變，而使得量測有所誤差。

地形影響及應對方式：在大壩頂之處會有較多的負電荷累積，其將使得該處電位較低，一般而言，於坡度大於 20 度之區域施作便需進行地形效應修正，由於地體電流效應在高程提升之處亦會有所變化，其與地形效應常會共伴發生，要將其完全消除極其困難，僅能做一般性之修正，關於修正之法可參考 Bhattacharya and Roy(1981)與 Bhattacharya(1986)之介紹。

2. 探測技術判釋問題

2D 水平剖面電位差影像圖判釋：自然電位法在現場的量測上極易受到地球的自然電流、土壤種類、地形效應以及微波電流等因素的影響，此些影響不易將其與目標探測物所產生的電壓差分

離，因此在判釋上應以保守為主，此外，在進行自然電位法時建議將自然電位法作為初次快速探測之方式，鎖定數個異常區再進行其他地球物理探測技術以供比對判釋會較佳。

(四) 電磁探測法現地應用問題評析

1. 水庫構造背景環境之影響

人工構造物之影響及應對：由於電磁探測法是透過磁通量變化進行之量測，其極易受到人工建築物、金屬欄杆、地下金屬管線、通訊系統等人造物的影響而產生量測錯誤，除施測時應當避免外，亦應當收集施測現場之所有相關構造物之位置，以便在結果判釋時先將此些因素造成之異常狀態排除。

2. 探測儀器適用性問題

差分全球衛星定位器(DGPS)之輔助施作：電磁探測法因為不需與地面接觸而可快速進行大範圍之量測，但正因其可快速大範圍施作，而會有大量資料產生，於施作前若未先將各量測點編號定位，很容易會造成後續進行判釋時會有點位誤植之情形，但事前之編號與定位將耗費較多之時間，因此若可採用具有較高量測精度之差分全球衛星定位器在量測同時進行量測點位座標之收集，將有效避免資料後續處理之錯誤，並可保有其快速施作之優點。

發送源與接收線圈之施測方向：發送源與接收線圈連線之方向與量測結果具有相關性，當施測目標物之線型方向與發送源與接收線圈連線方向垂直時可有最佳量測靈敏度，在可推估施測目標物之線型方向時應加以調整以達到最佳量測效果；而由於發送源與接收線圈之連線方向會對量測結果有所影響，因此在量測中

以及量測後之成果呈現時應當注意將同一量測方向之結果繪在一起，並避免將不同發送源與接收線圈之連線方向之成果混和，以避免對探測結果之誤判。

3. 探測技術判釋問題

水平剖面探測分析成果判釋：水平剖面探測分析成果之判釋僅就所量測得之視導電度(視電阻率)進行分析，會有較強烈之主觀意識存在，在判釋時應先行就可能之干擾源位置進行排除後，根據眾多蒐集所得背景資料(包含地質、壩體構造等)，在量測儀器之探測能力下進行可能異常區域之判斷，以求判釋結果不致過度解讀。

垂直剖面探測分析成果判釋：垂直剖面探測之成果，因其僅能使用極少量之地層層數進行反算，因此所獲得之自地層厚度以及地電阻值大部分為等量之值，無法較為細緻的表達其地表下之差異，應避免對此結果過度解讀；此外其採用 1 維水平層狀地層之假設，因此無可避免地在壩體應用上會有 3 維效應之影響，若有實際深度上調查之需求，建議改採地電阻影像探測法會較為妥適。

(五) 透地雷達探測法現地應用問題評析

1. 水庫構造背景環境之影響

高導電地體施測之影響及其應對方式：因透地雷達是透過分析返回地表之反射訊號以達到施測目的，在高導電度的環境下，電磁波之能量衰減情形嚴重，將會大大降低其有效探測深度，一般而言，若是探測目標在含水嚴重或黏土質高之土體下將難有明顯之訊號返回地表，而造成施測結果不佳之情形，在施測上，若

已了解該處之土壤特性如上所述而將無法達到施測目的時，應考慮採用它種檢測方法。

電學性質差異不顯處之施測及其應對方式：因透地雷達是透過分析返回地表之反射訊號以達到施測目的，因此對於無法產生良好反射面之處將無法探測得到，此種情形包括有：兩者材料間之電學性質差異不大、土層厚度過薄或是兩者材料間存在有足夠之漸變段，此些情形都將造成透地雷達無法進行探測之可能，在施測上，若已了解該處之特性如上所述，應考慮採用它種檢測方法。

2. 探測儀器適用性問題

透地雷達天線頻率之選取及應對方式：在透地雷達之施測上，為能達到預設之解析度與探測深度之目標，其需考慮三項主要因素：1.天線頻率；2.土層之電學特性(導電率及介電常數)；3.探測物與周邊材料之電學性質差異度。此中，第2與第3點皆是現場實際情形無法由我們控制，如此一來，天線頻率的選定無疑是影響成果最重要之一環。錯誤的天線頻率將可能無法達到探測目的，或無法清楚測得目標物而造成錯估。

目前坊間商業化之透地雷達天線可選用之頻率在 25MHz 至 1.5GHz 之間，一般而言，該頻率與解析度及探測深度有一對一的關係，然而，在未知地層電學性質之前，無法獲得此一絕對關係。經由對不同材料之測試，將各頻率天線於不同材料下之解析度圖繪如圖 3-10 所示，可做為選用時之參考指標。而在探測深度上，其受材料含水量以及材料本身電學性質影響過大，甚為複雜，僅能以一般性言之，大致而言，天線頻率在 1.5GHz 至 400MHz 之

間時，其探測深度約在 0.3 公尺至 2 公尺之間，而再低頻之天線，雖然在良好之情況下，其探測深度可超過 10 公尺，甚至對 25-50MHz 之天線於乾燥之結晶岩中可達 100 公尺以上之探測深度，但保守起見，以臺灣之地質材料特性而言通常以 10 公尺之探測深度為透地雷達之極限，另需注意，在預期有含水、含有金屬礦物或是含有黏土成份之土層，其探測深度將受影響而有所降低。

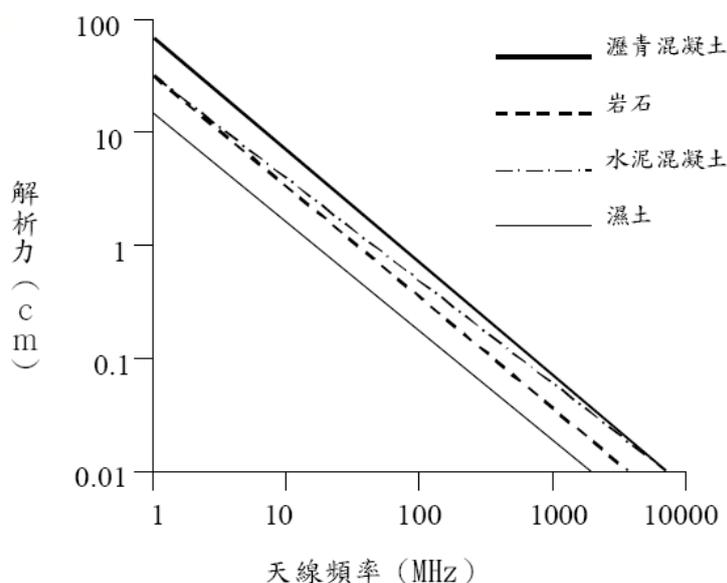


圖 3-10 天線頻率與解析度關係圖(修改自 EKKO UPDAT, 1996)

3. 探測技術判釋問題

地表位置之判斷：在透地雷達之判釋中，地表面反射訊號之位置為一重要判釋標的，對於地表面反射訊號之判斷，最簡易之法是於現場資料收集時，透過將透地雷達天線上下移動(對於天線頻率 $\geq 500\text{MHz}$ 表現尤佳)可於訊號顯示出一可辨識之反射訊號(強反射且將隨天線之移動有所移動)，該反射訊號即為地表面位置。

層面回波辨識：對於層面回波之認定上，由於所收集之訊號中雜含有在反射面上所產生之一次反射、在層與層間的二次反

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

雷達反射波剖面圖辨識：欲對探測結果做出良好之判斷應透過數值模擬方法或已知條件試驗，多了解並熟悉在不同配置下所可能產生之線形特徵，此外，其更需要長時間具回饋驗證之經驗累積。而在此之外，得於電腦輔助軟體之助，透過高密度的網格狀施測，藉由軟體將網格狀空間相對位置建立起，以顏色區分不同之反射強度，而可得 3D 之影像成果，在 3D 影像中，透過以顏色為群組之觀察，探測標的物以體積之型態出現，其所展示出之整體形狀以及大小將更加提升其可辨識度，進而降低其解析辨識之困難度以及可能的錯誤判斷。

(六) 彈性波層析成像法現地應用問題評析

1. 水庫構造背景環境之影響

受波器高程影響及應對方式：在進行施作時受波器所在之高程以及位置的不同會影響初達波走時曲線對於彈性波路徑與波速之估算，目前之反算技術已可將高程之影響納入考量，因此應針對各受波器之高程及位置進行量測，並將此資料提供做為反算分析。

特殊土壤狀況之影響與應對方式：彈性波層析成像法主要是

建立在初達波走時曲線的基礎上，因此當測線主要在一條線上而非在壩的上下游兩側時(例如測線只在上游壩面或是只在下游壩面)，其所得之走時曲線將會以折射波為主，使得對於夾有弱層(下方地層波速較上方為低)的或是上下地層波速相近的地層會難以探測獲得，此外，地層亦需以足夠的厚度以便可反應在走時曲線上，否則將無法探測到。對於前述地體狀況存在時，應注意測線之規劃，使測線在壩之上下游側之佈設較為均勻為佳。

人造物與交通之影響及應對方式：大壩常存在有不同的轉動機具進行運作，例如水力發電設備或是抽水設備，此外在某些具觀光目的之大壩亦會有來往的車輛以及行人，對於彈性波層析成像法而言，此些造成之地表振動皆為雜訊，尤其在彈性波層析成像法的分析過程中所挑選的 P 波初達波振動較小，在較為吵雜的環境中並不易抗雜訊，尤其是距離振源較遠處的地方，更容易發生無法分析的問題。欲改善此問題可由施作以及分析兩方面進行，在施作上，應建立交通管制措施，在施作時必要靜止人車之移動，此外可透過多次的疊加提升訊雜比，而人造機具的部份在必要時候應考量短暫的停止運轉可能性；而在分析上，挑選初達波應多注意，建立一固定的挑選準則，以避免整體初達波的挑選無一致的呈現，例如若挑選初達波的位置是在初達波訊號剛跳動的位置，或是在訊號最大的位置又或是在訊號斜率最大的位置。

2. 探測儀器適用性問題

於混凝土、瀝青鋪面上施作及應對方式：於大壩中應用常會有在壩頂或大壩踏台上施作之可能性，而此些位置之表面常會有混凝土或是瀝青鋪面的存在，以既有之常見受波器是需要將其貫入土中約 10 公分以便與地表有足夠之耦合程度，雖於混凝土或是

瀝青鋪面可直接以鑽孔後插入的方式進行，但其會造成施作速度較不具效率外，亦可能不小心造成整個鋪面的破壞。此外，彈性波層析成像法在混凝土壩中或是排水廊道中施作時，其有可能需要在混凝土立面上施作，此時進行鑽孔置放電極棒並不恰當亦通常不被允許，同時震源之敲擊極可能造成混凝土表面的破壞，此外，在混凝土上之施作，由於混凝土材料波速較快($>2500\text{m/s}$)，啟振器與實際敲擊時間的時間差(trigger delay)，將影響探測結果之判釋。

基於前述之不便及可能造成之問題，經濟部水利署(民國 94 年)研究報告提出一平板式受波器座之設計可供應用，如圖 3-11 所示，其使用鋁合金板，共有上下盤，上盤尺寸為 $16\text{cm} \times 10\text{cm} \times 0.6\text{cm}$ ，下盤尺寸為 $12\text{cm} \times 10\text{cm} \times 0.6\text{cm}$ ，總重為 0.6 公斤。而為使此受波器在混凝土立面施作時可黏著於混凝土面並與混凝土面耦合良好，在受波器與混凝土面間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媒介，可有效黏著在混凝土壁面上。而在震源方面，可改使用木槌或是將原有鐵鎚包覆硬橡皮後敲擊，亦可簡單採用 5mm 以上厚度之鐵板作為混凝土面上之敲擊面，可有效保護敲擊面之完好。而對於 trigger delay 之問題，可變更一般常使用之加速度器啟振器，改採用短路系統作為啟振器，此短路系統只需將啟振器之傳輸線串聯一乾電池後，使傳輸線之一端連接在鐵鎚上，另一端連接在置於混凝土面上之金屬板上，則當鐵鎚接觸到金屬板發生短路時，便會有一電壓產生而達到啟振的效果。

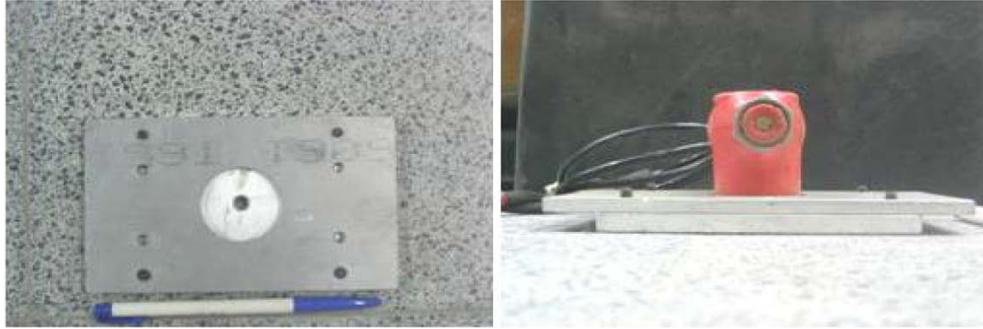


圖 3-11 平板式受波器(修改自經濟部水利署，民國 94 年)

於高懸處或水面下施作及應對方式：採用彈性波層析成像法在大壩施作常會將測線與壩軸垂直，則在混凝土壩下游面則有高懸之情況，而在混凝土壩或土石壩之上游面則有在水下施作之可能，若採用傳統受波器或平板式受波器在施作上有許多不便，並增加施作之危險度，因此在此情況下，考量大部分壩體上下游坡面皆非完全垂直而是有一坡度存在，因此可視情況改採用水下受波器，並在其下方綁墜重物以使其可貼附壩體坡面即可，惟施作時應先確認無風吹動之影響並且訊號良好才可有較佳之應用成效。

3. 探測技術判釋問題

3D 效應：此問題之成因是目前彈性波層析成像法在反算上主要採用 2D 地層之假設，欲解決此問題須採用 3D 施測並以 3D 地層反算，否則便須於測線規劃時盡量避免。3D 之彈性波層析成像法目前尚未十分成熟，因此僅能盡量避免，在不影響探測目的下於規劃測線時避開垂直測線方向變化較大的位置施作，然而其影響距離與地體材料有關，僅能根據經驗概估並在對結果判釋前謹慎比對相關資料。

壓縮波波速影像剖面圖判釋：在結果的判釋上，除應考量 3D 效應可能產生的映射假資訊情形外，另外應瞭解影像剖面圖有其

解析度之限制，一般概略為受波器間距之一半，但震波射線覆蓋較少的區域解析度較差。

(七) 多頻道表面波震測法現地應用問題評析

1. 水庫構造背景環境之影響

地形影響及其應對方式：就目前表面波震測試驗的研究上，對於存在地形效應時的解析方法尚無法提出一有效且合理的解析技術，根據經濟部水利署(民國 96 年)之研究報告指出，地形效應在表面波震測中可能會造成兩個影響：一是在頻散曲線上會造成低估的情形，另一是在頻散曲線中會使得高次振態的能量集中有增加的情形，使得基頻振態有效頻寬降低。以現今的分析技術尚於 1D 的理論架構下要將地形的影響納入僅能採用部份修正的方法，但在複雜的地質材料情形下，這些修正可能不具有代表性，因此，當沿著測線具有地形坡度大於 20 度的位置施作時，應要將上述影響納入考慮後再行解讀。

此問題無法克服，僅能以避免或降低影響之方式進行，以避免地形影響之觀點而言，在測線規劃時應避免使測線上之地形坡度大於 20 度；以降低影響之觀點而言，可採用 Lin and Lin(2007)之高側向解析法進行現地施作，降低地形所造成之影響。

2. 探測儀器適用性問題

於混凝土、瀝青鋪面上施作及其應對方式：於大壩中應用常會有在壩頂或大壩蹠台上施作之可能性，而此些位置之表面常會有混凝土或是瀝青鋪面的存在，以既有之常見受波器是需要將其貫入土中約 10 公分以便與地表有足夠之耦合程度，雖於混凝土或是瀝青鋪面可直接以鑽孔後插入的方式進行，但其會造成施作速

度較不具效率外，亦可能不小心造成整個鋪面的破壞。

基於上述之不便及可能造成之問題，經濟部水利署(民國 94 年)研究報告提出一平板式受波器座之設計可供應用，如圖 3-11 所示，其使用鋁合金板，共有上下盤，上盤尺寸為 16cm*10cm*0.6cm，下盤尺寸為 12cm*10cm* 0.6cm，總重為 0.6 公斤，並可以以 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。

低頻能量不足及其應對方式：由長期現場試驗結果發現，一般常用做為震源之 12lb 鐵鎚在大壩施測上有低頻能量不足之缺點，雖然多次疊加歷時資料可稍提高訊號雜訊比，但低頻訊號之能量內涵總顯不足，以壩體動輒數十公尺至百公尺高度的條件，低頻訊號之良莠與測區深處探測結果好壞甚為相關。

基於上點，製作一套移動便利且可產生大能量之低頻震源系統將可增進資料品質，經濟部水利署(民國 94 年)研究報告提出一自由落槌系統，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如圖 3-12 所示，三腳架連桿接合長度為 3.5 公尺，腳架在許可範圍下展開時中點重鎚垂直落距可達 2.5 公尺，重鎚材質為碳鐵，不易脆化，是一直徑為 30 公分之球體，重量 125 公斤，球體上部有一倒 U 型扣環與懸吊系統連接。惟其重量達 125 公斤，施作時應注意其可能對地表面所造成之損害。



圖 3-12 自由落錘震源系統(修改自經濟部水利署，民國 94 年)

3. 探測技術判釋問題

頻散曲線高次振態之影響及其應對方式：如圖 3-13 所示，高次振態主要是指表面波在傳遞時在頻率下非最低速傳遞的波，在現行主要以基次振態為反算標的的反算技術下，高次振態的存在將造成基次振態有效頻寬的不足或是誤將高次振態辨識為基次振態進行反算，進而使得反算結果有高估剪力波速或錯估整體剪力波速趨勢(或特徵)之情形。根據經濟部水利署(民國 94 年)於石門水庫、新山水庫與仁義潭水庫之壩體所獲得之表面波震測測試結果顯示，頻散曲線之分析常有高次振態出現，因此須注意其影響。

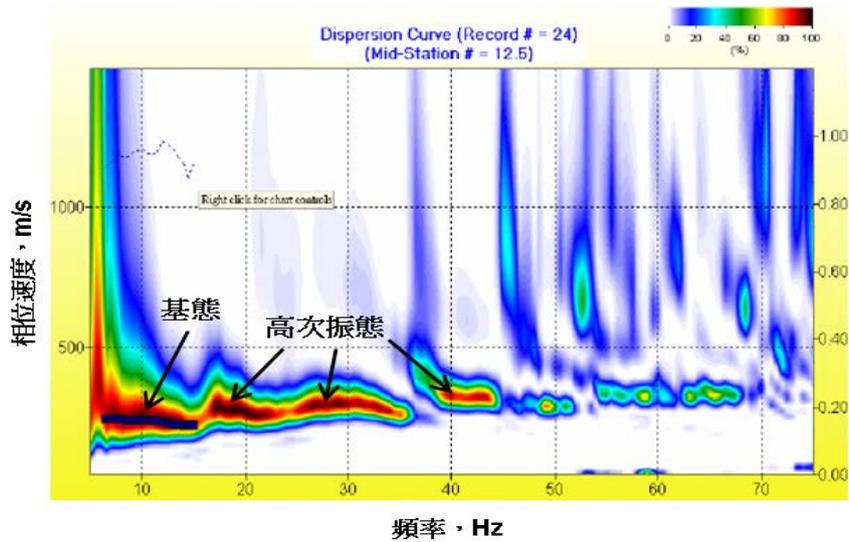


圖 3-13 仁義潭殼層表面波震測頻散曲線影像(摘自經濟部水利署，民國 94 年)

頻散曲線高次振態之問題主要是本技術在反算上之問題，在其反算技術提升前並無法解決，因此在解決策略上僅能朝降低高次振態影響之方面進行，在此點上，Zhang and Chan(2003)在其研究中指出，基態頻散曲線的頻寬在低頻處的資料較高頻處的資料更形重要，只要能確保低頻資料的正確，則反算結果皆可合理地反應出地層特性。因此，只要能有效的辨識出基態頻散曲線，則即使在頻寬較為不足的情形下只要有合理數量的頻寬(一般而言低頻頻寬至少約需 30Hz)便可掌握地層的整體趨勢與結構特徵。

由此有兩個實際應用上之應對方式可進行，其一是使不同振態間可明顯區分，其二是降低高次振態發生的機會。對於第一點，其雖可採用增加測線展距的方式分離不同振態，但這會降低量測結果的側向解析度且在大壩上不一定有足夠的空間可供增加展距使用，因此可採用 Lin and Lin(2007)的高側向解析法進行施作；而對於第二點來說，Park et al.(2005)建議採用較短(~1 公尺)的近站支距可降低高次振態能量主導的頻寬範圍(此一短近站支距的

使用已包含於高側向解析法中)，此外 O' Neill and Matsuoka(2005) 的研究指出，採用非線性的受波器排列進行施測，可使得各振態間的解析度提高，亦可提高振態間的分離。

剪力波速影像剖面判釋：由表面波震測法所獲得之地層剪力波速影像剖面可用以判別地層結構，然而，各種類的土層與剪力波速並非一對一的關係，並無法以某一範圍內之剪力波速便可辨識其為何者地層，在判斷上應搭配有一鑽孔資料以及該處地質資料做為佐證與比對之用將可使結果更具代表性。此外，剪力波波速可反應地層之剪力強度，由影像圖可得知其相對強弱，若有試驗資料，可搭配經驗公式獲得其可能之強度值，惟在最後判釋上仍應僅記解析度、地形效應以及高次態之影響避免過度解讀結果。此外，由於其假設地層為水平層狀，對於劇烈之側向變化以及具有地形變化的地層會有一定的扭區；又在較深處的薄層在其解析度可解析之能力以外，將難以明顯反應出，此些是其必然存在之誤差原因，僅能夠使用其它檢測或試驗方法進行補充。

第肆章 地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用方法建立

一、地球物理探測技術應用方法概念

地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用方法之建立以提供工程管理者規劃使用為主要目的，根據管理者之角度對於其進行規劃之過程可簡化為三個動作(如圖 4-1 所示)，首先是在安全評估過程中發現安全檢查問題欲進一步進行調查之需求，針對此一調查需求預採用適當之地球物理探測技術作為調查工具，在選擇方法的過程中，會需要考慮對安全檢查問題所掌握或所遇獲得之資訊而採用一至多項地球物理探測技術進行探測，待選定欲進行之地球物理探測技術後便進行整體探測內容之規劃(包含測線或測區、特定之施作方式、施作數量等)。

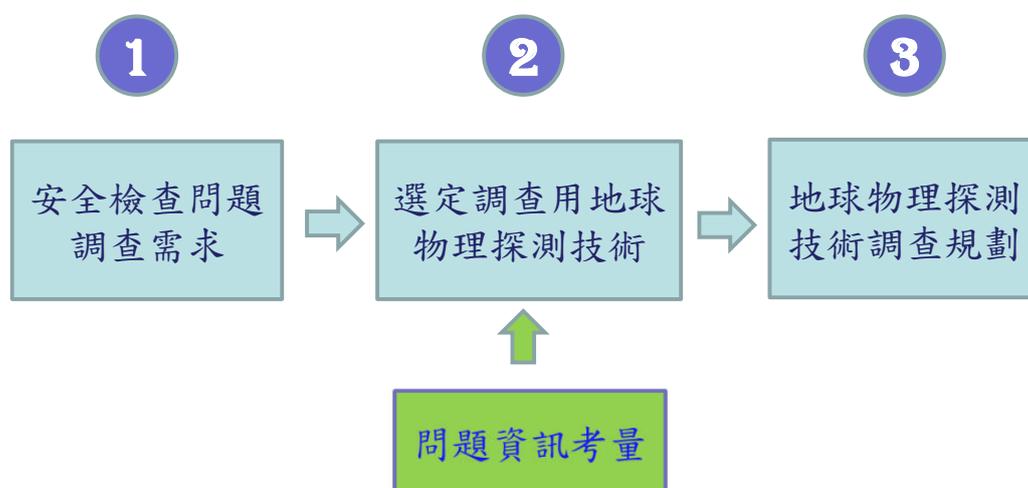


圖 4-1 地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用過程示意圖

本計畫所建立之地球物理探測技術應用方法便於此處切入，如圖 4-2 所示，首先由水庫安全評估產生對安全檢查問題之調查需求，而後在第二步驟中，本計畫於下節將建立一地球物理探測技術應用索引表，該索引表是做為不同安全檢查問題與可適用之地球物理探測技術

間的連結，由該索引表針對不同安全檢查問題可檢索得不同之適用地球物理探測技術，一併進行可互為比對驗證，增加探測結果之可靠度，然而在施作效率與對安全檢查問題已有其他資訊之情況下，便可進行取捨以達到最佳目的，根據此一需求，在索引表中的地球物理探測技術後方將設有選用類別，該類別提供不同之應用狀態供管理單位進行選擇不同程度之選擇；待確定選用之地球物理探測技術後便須開始進行調查規劃作業，在此步驟上便由根據第參章第三節現地應用問題評析所檢討之內容針對可於規劃階段進行改善與避免的項目進行整理提出調查規劃要點，作為測線或測區規劃之準則，並考量部分管理人員並無規劃之經驗，可由附於索引表中之參考案例作為規劃參考。

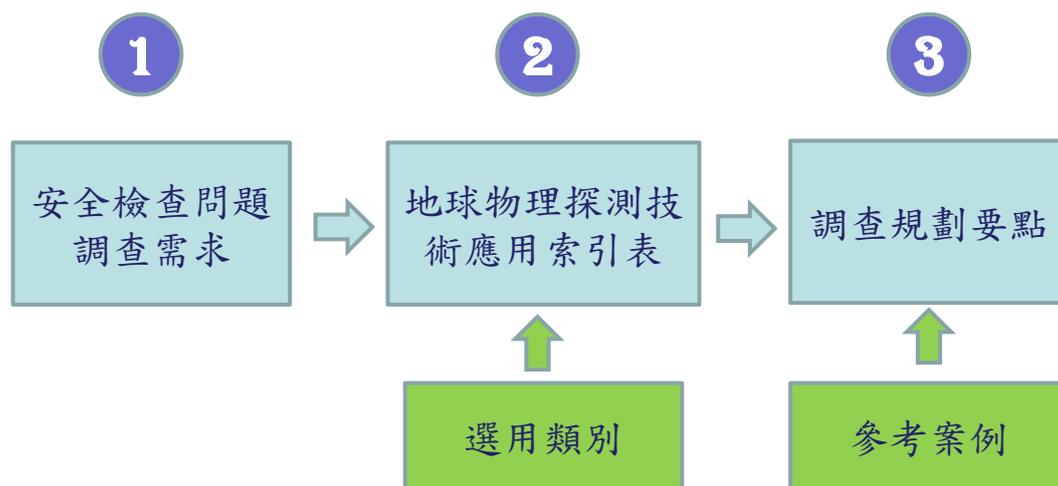


圖 4-2 地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用概念示意圖

二、地球物理探測技術選用索引表建立

地球物理探測技術選用索引表之建立為本計畫所欲建立之應用方法最重要的一環，如前所述，在此索引表中其不但可做為各常見安全檢查問題選用適用地球物理探測技術之用，其將根據各地球物理探測技術對於安全檢查問題可提供之訊息程度而給予選用分類以便在有經費考量時可進一步根據需求時擇要選用，並且在各常見安全問題之適用地球物理探測技術之後會有本計畫所收集之案例索引，提供做為調

查規畫之參考。

(一) 地球物理探測技術選用索引表建立概念

在地球物理探測技術選用索引表之建立上，為使其可與現階段之水庫安全評估規範具互通之便利性，參考在第貳章第四節中對三本國際地球物理方法應用手冊之索引方式，本計畫中以調查之位置為索引，再以問題為導向分列各個安全檢查問題之可選用地球物理探測技術。舉例而言，當現場檢查完畢後，其檢查結果是在壩趾處有滲漏現象，欲對此滲漏之情況進行進一步的調查，則其在使用時便只需先從調查目標物做索引找到壩址的部份，而後以安全檢查之問題「滲漏」做導向，便可得到其適用之地球物理探測技術有地電阻影像探測法、自然電位法等技術可供使用，在此處之地球物理探測技術之選用，因為已考慮調查目標物的環境狀況，因此對於在不同位置的相同安全檢查問題，其不一定有相同的適用地球物理探測技術可供使用，透過這樣直覺式的選用方法，繁瑣的理論瞭解與適用性問題已由本計畫將其系統化檢討，使得地球物理探測技術的選用更加容易。

由前述可知，此地球物理探測技術選用索引表之建立可分為三部分之工作，其一是建立常見安全檢查適用之地球物理探測技術，其二是根據此一建立之資料將適用之地球物理探測技術進行選用分類，而第三部分則是將適用之地球物理探測技術的參考案例建立索引。

(二) 地球物理探測技術選用分類建立

第一部份的工作已於第參章第一節第二小節中完成如表 3-3 與表 3-4 所示，以其為基礎進行第二部份工作。在選用分類上本計畫依其可提供之資訊程度與可應用程度分為 A、B、C 三個類別，A 類別表示該方法可提供快速大範圍之探測，可快速獲得問題的全貌掌握整體趨

勢，但並無法進行較為細部在深度或可能範圍中的調查，對於尚無法掌握其整體狀況或具異常區域時可做為對問題最初步之了解；B 類別表示該方法可提供深度以及可能範圍之資訊，但應先能大致掌握問題之位置或所在會較佳；C 類別則是表示該方法雖可作為應用，但是通常僅較適用於問題已十分嚴重之狀況才會有較好的成果。在考量時，若情況許可，可同時進行三種類別，若對資訊需求相對有限，可選擇 A 及 B 類別，若很明確所需之資訊，可根據對安全檢查問題的了解程度或需求程度選擇 A 或 B 類別。因在同一個適用地球物理探測技術中同一個類別可能同時存在多個，為可有其應用上選用之便利，於類別之後會根據其探測之成效加列 1、2 或 3 的數字，數字小者表其具較高的優先順序。以下進行選用分類之說明：

1. 混凝土壩

在壩體的裂縫其產生有明顯的電學性質不連續面，通常這些裂縫由目視可知其位置，採用較高頻的透地雷達探測系統可明確的探測裂縫之狀態，因此將其分類為 B，而通常要到較為嚴重的裂縫才可由彈性波層析成像法或地電阻影像探測法探測獲得，因此分類為 C，而這兩者中，因孔隙的產生直接影響其強度，反映在彈性波之變化會較為明顯，因此以彈性波層析成像法為 C1 而另一為 C2；而在滲漏問題上，水的存在對電阻率影像甚大，採用地電阻影像探測可有最佳效果，因此分類為 B，為有達到一定程度嚴重性的滲漏才可能間接反映混凝土衰化之情形，採用彈性波層析成像法才會就要效益，因此分類為 C；而混凝土強度的不足透過彈性波層析成像法可有良好的探測成果，可由其成果可獲得深度以及可能範圍，因此分類為 B。

在壩址之淘空上，所列之地球物理探測方法皆可提供深度與範圍之資料因此皆列為 B 類，惟淘空直接會牽連地體材料的崩落而有明顯

的低速帶產生，因此彈性波層析成像法與多頻道表面波震測法皆可具有極好之表現，惟考量多頻道表面波震測法受限於方法本身之 1D 反算基礎，整體之靈敏度會較低，因此以彈性波層析成像法最佳為 B1，而淘空後所含有的水分極有利於對電阻率敏感的地電阻影像探測法之施作，因此設定地電阻影像探測法為 B2，而透地雷達探測法因其為探測有些為深度之孔洞會稍微降低解析度之緣故而設為 B3，最末設多頻道表面波震測法為 B4。

在壩基處之滲漏，自然電位法本身可快速獲得整體滲流水平流向之趨勢，但限於目前反算技術的侷限而無法有效獲得深度與大致範圍之情形因此列為 A 類，而滲漏造成之含水量增加會明顯造成電阻率的下降，為地電阻影像探測法提供極好的探測標的，是為 B，而在有較為嚴重的滲流導致有細粒料洗出或有孔洞而造成彈性波速的變化，彈性波層析成像法與多頻道表面波震測法才可有較好的成效，而此兩者，彈性波層析成像法在調查之深度與範圍上有較好的解析度，因此設定彈性波層析成像法為 C1，多頻道表面波震測法為 C2；而壩基的滑動調查應用主要在於對黏土層的調查，三者調查成果皆可提供深度與範圍之訊息，但黏土層明顯有低電阻的行為，可較容易被地電阻影像探測法測得，因此設為 B1，而雖然黏土層皆有低強度的行為可被彈性波層析成像法與多頻道表面波震測法測得，但是考量在壩基施作，彈性波層析成像法可能因其測線皆在一直線上(地表)，而使得折射波為主要分析內涵，造成黏土層夾在上方較堅硬土層的下方而有無法測得之情形，因此以多頻道表面波震測法為 B2，彈性波層析成像法為 B3。

於壩座之淘空考量點同壩址之淘空；於壩座之滲漏考量點同壩基之滲漏。溢洪道之滲漏考量點同壩體之滲漏；溢洪道之裂縫考量點同

壩體之裂縫。前述之結果整理如表 4-1 所示。

2. 土石壩

在壩體/壩頂之裂縫調查上，將裂縫注以低電阻率之鹽水後可使裂縫與周邊有明顯的差異產生，可使地電阻影像探測法發揮極佳之調查效果，因此定其為 B1，而此裂縫及其周邊受到應力作用之部分會有明顯的強度下降情況，此現象以彈性波層析成像法可有良好的探測效果，但探測得之整體清晰度會較地電阻影像探測法差，因此訂為 B2，而採用透地雷達探測法隨著天線頻率的選定可對裂縫的分布有明確的調查結果，惟其訊號恐受地表的不平整以其破碎情形而較差，因此訂為 B3，而多頻道表面波震測法雖可測得其強度較低的範圍，但受到其 1D 反算的侷限，其在側向上的調查解析度較佳不佳，因此訂為 C 類。而差異沉陷之調查上，以黏土含量或滲漏為主要調查標的，此兩類可能性皆反映在低電阻率上，因此採用地電阻影像探測法可有良好探測效果，訂為 B1 類，其中有可能是滲漏造成之問題，而可透過自然電位法調查，但受限自然電位法僅提供水平滲流流向之趨勢資訊，因此設定其為 A 類，而沉陷本身所造成的土壤崩塌軟弱區可透過彈性波層析成像法與多頻道表面波法探測，兩者亦彈性波層析成像法之解析度較佳，因此設為 B2，多頻道表面波震測法設為 B3，而透地雷達探測法恐受到深度以及含水土體的影響造成解析度不足，若其問題影響不顯可能不易探測，因此設為 C。

壩體坡面滑動以及土壤液化皆與土壤剪力強度有關，透過多頻道表面波震測法可有良好探測結果，因此設為 B 類；壩體的滲漏考量點與混凝土壩壩基滲漏考量點相同；壩體淘空的考量點與滲漏相類，惟其已達淘空階段，顯示已有較嚴重之滲流發生，因此彈性波層析成像法與多頻道表面波震測法已可有良好的探測結果，因此分別設為 B2,

B3。壩趾滲漏考量點同壩體滲漏；壩基滑動考量點同混凝土壩壩基滑動；壩基土壤液化考量點同壩體土壤液化；壩座滲漏考量點同壩體滲漏。

溢洪道混凝土版下積水/淘空採用透地雷達探測可較地電阻影像探測之解析度更高，因次設定透地雷達探測為 B1，地電阻影像探測法為 B2；溢洪道的滲漏使混凝土含有水分，造成明顯的低電阻，採用地電阻影像探測可有良好探測結果，而採用彈性波層析成像法主要是在滲漏較嚴重情況下，間接認為是有混凝土衰化之發生，因此設定為 C；裂縫問題之考量點同混凝土溢洪道裂縫；混凝土強度不足直接反映在強度上，採用彈性波層析成像法可有良好探測結果，因此設定為 B。排水廊道之滲漏與裂縫考量點同溢洪道；培厚區之滲漏考量點同壩體滲漏。將前述之結果整理如表 4-2 所示。

(三) 地球物理探測技術參考案例索引建立

如表 4-1 及表 4-2 所示，參考案例索引將建立在地球物理探測技術選用索引表的最後一欄中，此中之案例是以第參章第二節所蒐集之地球物理探測技術應用案例為資料庫以利參考使用，因同一個適用之地球物理方法案例可能不只一個，所以欄位中之索引資料除將其頁數(下小節中所建立之導引手冊頁數)填入外，同時會有可參考之大壩的「地區-壩名」資料以利閱覽者可快速尋找，所以整個參考案例索引會有四碼，其形式為「p.#-地區-壩名-地球物理檢測技術」，例如「p.12-臺灣-新山水庫-地電阻探測法」，但在許多情況下，通常會同時使用多種地球物理探測方法互為檢視比較再進行最後判讀，在此情況下將會將多種地球物理探測方法同時標注於第四個索引碼中，以前例而言，「p.12-臺灣-新山水庫-地電阻探測法、自然電位法」。但在此需說明，因案例資料蒐集不易，恐無法每個常見安全檢查皆會有案例可供參

考，若如此將填入 N/A 之符號。

表 4-1 混凝土壩常見安全檢查問題地球物理探測技術選用索引表

壩型	位置	安全檢查問題	適用之地球物理探測技術	選用分類	參考案例檢索
混凝土壩	壩體	裂縫	透地雷達探測法	B	美國-Barker 壩-壩體-裂縫-彈性波層析成像法
			地電阻影像探測法	C2	
			彈性波層析成像法	C1	
		滲漏	地電阻探測法	B	中國大陸-三清亭壩-壩體-滲漏-透地雷達探測法
			彈性波層析成像法	C	
		混凝土強度不足	彈性波層析成像法	B	臺灣-石岡壩-壩體-混凝土強度不足-彈性波層析成像法 臺灣-西勢水庫-壩體-混凝土強度不足-彈性波層析成像法
	壩趾	淘空	彈性波層析成像法	B1	N/A
			多頻道表面波震測法	B4	
			地電阻影像探測法	B2	
			透地雷達探測法	B3	
			電磁探測法	A	
	壩基	滲漏	地電阻影像探測法	B	N/A
			自然電位法	A1	
			彈性波層析成像法	C1	
			多頻道表面波震測法	C2	
電磁探測法			A2		
滑動		彈性波層析成像法	B2	N/A	
		多頻道表面波震測法	B3		
		地電阻影像探測法	B1		

壩型	位置	安全檢查問題	適用之地球物理探測技術	選用分類	參考案例檢索
	壩座	淘空	彈性波層析成像法	B1	N/A
			多頻道表面波震測法	B4	
			地電阻影像探測法	B2	
			透地雷達探測法	B3	
			電磁探測法	A	
	壩座	滲漏	地電阻影像探測法	B	N/A
			自然電位法	A1	
			彈性波層析成像法	C1	
			多頻道表面波震測法	C2	
			電磁探測法	A2	
	溢洪道	滲漏	地電阻影像探測法	B1	N/A
			彈性波層析成像法	B2	
		裂縫	透地雷達探測法	B	N/A
地電阻影像探測法			C2		
彈性波層析成像法			C1		
選用類別說明：					
<ul style="list-style-type: none"> ● A 類別表示該方法可提供快速大範圍之探測，可快速獲得問題的全貌掌握整體趨勢，但並無法進行較為細部在深度或可能範圍中的調查，對於尚無法掌握其整體狀況或具異常區域時可做為對問題最初步之了解； ● B 類別表示該方法可提供深度以及可能範圍之資訊，但應先能大致掌握問題之位置或所在會較佳； ● C 類別則是表示該方法雖可作為應用，但是通常僅較適用於問題已十分嚴重之狀況才會有較好的成果。 ● 於類別之後會根據其探測之成效加列 1、2 或 3 的數字，數字小者表其具較高的優先順序。 					

表 4-2 土石壩常見安全檢查問題地球物理探測技術選用索引表

壩型	位置	安全檢查問題	適用之地球物理探測技術	選用類別	參考案例檢索
----	----	--------	-------------	------	--------

壩型	位置	安全檢查問題	適用之地球物理探測技術	選用類別	參考案例檢索
土石壩	壩體/壩頂	裂縫	彈性波層析成像法	B2	中國大陸-南水水壩-壩體-裂縫-透地雷達探測法。
			多頻道表面波震測法	C	
			地電阻影像探測法	B1	
			透地雷達探測法	B3	
			電磁探測法	A	
		差異沉陷	彈性波層析成像法	B2	N/A
			多頻道表面波震測法	B3	
			地電阻影像探測法	B1	
			透地雷達探測法	C	
			自然電位法	A1	
	壩體	坡面滑動	多頻道表面波震測法	B	臺灣-烏山頭水壩-壩體-坡面滑動-表面波震測法
			土壤液化	多頻道表面波震測法	B
		滲漏	地電阻影像探測法	B	臺灣-水社壩-壩體-滲漏-地電阻影像探測法 臺灣-新山水庫-壩體-滲漏-地電阻影像探測法 韓國-中部某壩-壩體-滲漏-地電阻影像探測法 印度-Som-Kamla-Amba壩-壩體-滲漏-地電阻探測法、自然電位法 美國-Dana Lake壩-壩體-滲漏-地電阻影像探測法、自然電位法 希臘-Mornos壩-壩體-滲漏-彈性波層析成像法、地電阻影像探測法 西班牙-CHB壩-壩體-滲漏-自然電位法、地電
			自然電位法	A1	
			彈性波層析成像法	C1	
多頻道表面波震測法	C2				
電磁探測法	A2				

壩型	位置	安全檢查問題	適用之地球物理探測技術	選用類別	參考案例檢索	
		淘空	地電阻影像探測法	B1	阻影像探測法 西班牙-EI Tejo 壩-壩體-滲漏-自然電位法 N/A	
			自然電位法	A1		
			彈性波層析成像法	B2		
			多頻道表面波震測法	B3		
			電磁探測法	A2		
	壩趾	滲漏	地電阻影像探測法	B	N/A	
			自然電位法	A1		
			彈性波層析成像法	C1		
			多頻道表面波震測法	C2		
	壩基	滑動	彈性波層析成像法	B3	N/A	
			多頻道表面波震測法	B2		
			地電阻影像探測法	B1		
		土壤液化		多頻道表面波震測	B	N/A
		滲漏		地電阻探測法	B1	敘利亞-Afamia B 壩-壩基-滲漏-電磁探測法、地電阻影像探測法 美國、墨西哥-Amistad 壩-土石壩(部分混凝土壩)-壩基-滲漏-地電阻影像探測法
				電磁波探測法	A1	
				多頻道表面波震測法	C2	
彈性波層析成像法				C1		
壩座		滲漏	自然電位法	A2	韓國-Sandong 壩-壩座-滲漏-地電阻影像探測法、自然電位法	
	地電阻影像探測法		B			
			A1			

壩型	位置	安全檢查問題	適用之地球物理探測技術	選用類別	參考案例檢索	
			彈性波層析成像法	C1		
			多頻道表面波震測法	C2		
			電磁探測法	A2		
	溢洪道	底版下積水/淘空		透地雷達	B1	N/A
				地電阻影像探測法	B2	
		滲漏		地電阻影像探測法	B	N/A
				彈性波層析成像法	C	
		裂縫		透地雷達探測法	B	N/A
				地電阻影像探測法	C2	
	彈性波層析成像法			C1		
	混凝土強度不足		彈性波層析成像法	B	N/A	
	排水廊道	滲漏		地電阻影像探測法	B	N/A
				彈性波層析成像法	C	
		裂縫		透地雷達探測法	B	N/A
				地電阻影像探測法	C2	
			彈性波層析成像法	C1		
培厚區	滲漏		地電阻影像探測法	B	N/A	
			自然電位法	A1		
			彈性波層析成像法	C1		
			多頻道表面波震測法	C2		
			電磁探測法	A2		

選用類別說明：

壩型	位置	安全檢查問題	適用之地球物理探測技術	選用類別	參考案例檢索
<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="248 280 2045 355">● A 類別表示該方法可提供快速大範圍之探測，可快速獲得問題的全貌掌握整體趨勢，但並無法進行較為細部在深度或可能範圍中的調查，對於尚無法掌握其整體狀況或具異常區域時可做為對問題最初步之了解； <li data-bbox="248 379 1671 416">● B 類別表示該方法可提供深度以及可能範圍之資訊，但應先能大致掌握問題之位置或所在會較佳； <li data-bbox="248 440 1733 477">● C 類別則是表示該方法雖可作為應用，但是通常僅較適用於問題已十分嚴重之狀況才会有較好的成果。 <li data-bbox="248 501 1563 537">● 於類別之後會根據其探測之成效加列 1、2 或 3 的數字，數字小者表其具較高的優先順序。 					

三、地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用導引(手冊)

地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用方法之建立與最終所訂定之使用手冊有其關聯性，由第貳章第四節對三種國際上所使用之手冊的內容規劃比較結果，其各有優缺點，美國聯邦高速公路部門以調查之目標物為索引，再以問題為導向的章節安排是不錯的概念，但在各問題下分列可用之地球物理探測技術則顯得過於冗長，不利於快速應用。在此點上，ASTM 以表評分的方式將問題與可用之地球物理探測技術結合之概念，可提供快速的選擇之用，但 ASTM 在各地球物理探測技術的介紹上太過於簡短，並且無法讓管理者了解該如何與技術人員進行測線佈設之討論，並要求其提供所須之報告內容，在此點上，日本地球探勘物理學家協會對各地球物理探測技術的內容介紹可以補足。

在前述應用方法之下，本計畫進行地球物理探測技術於水庫構造物應用之導引手冊架構與內容規劃，規劃所得之架構與內容，可充份滿足水庫管理人員進行應用方法選用、標案規格撰寫以及獲得基本概念之需求，至於地球物理探測技術之施作、分析以及判釋牽涉所需之儀器、軟體以及技巧具有高度專業性，無法單純由此手冊囊括，對於專業非在於此之水庫管理人員，仍需透過招標程序交由專業單位與人士進行。在此前提下，導引手冊架構主要分為二個部份(如圖 4-3 所示)，而其內容是以本年度之計畫成果針對水庫管理人員在對於壩體內部有安全檢查問題而需擬定標案內容之需要進行精簡摘錄而成。

在此前提下，導引手冊架構主要分為二個部份(如圖 4-3 所示)，第一部份主要以地球物理探測方法選用為主，第二部份為選用方法之規畫細節以及蒐集之國內外案例。在此兩部分之前有一前言，說明本導引手冊之使用目標以及地物探測技術於水庫構造物應用之角色，而在

第一部分中共有三章內容，第貳章為地球物理探測技術於水庫構造物應用之說明，說明導引手冊應用之方法以及索引表之使用，可供水庫管理人員根據導引手冊說明選擇適用之地球物理探測技術，而後在其根據索引找到探測技術後，以第參章搭配附錄 A 根據選出的地球物理探測技術進入標案之撰寫。第參章中簡要說明地球物理探測技術規劃要點，使管理人員有可最初步的規畫概念。

而在第二部份附錄 A 中進一步介紹提供基本的地球物理探測技術概念，並為可協助管理人員在進行以訂定出合理、適用以及符合調查目的之地球物理探測技術標案，在此附錄中針對不同地球物理探測技術將各個使用的地球物理探測方法進行介紹，此部份主要是為顧及不同專業之管理人員使用，以較深入淺出之方式進行原理介紹，在介紹中將包括有原理、試驗規劃及招標內容要點、施測方法與儀器現地適用性調整、分析方法與資料判釋需知、可能的誤差以及限制，最後是報告書內容，而在原理與分析的部份將主要以概念的方式陳述。該處會有對此技術在該位置及安全檢查問題下的規劃要點，該規劃要點將包括有說明進行規劃時的注意事項以及該如何訂定招標規格，此外，在此亦會提醒其適用性之問題，以便在後續監工或驗收過程中可加以審核。而在附錄 B 中將對本計畫執行中所蒐集之國內外案例進行整理，透過閱讀案例之方式可有助進行恰當的試驗規畫，快速學習各探測方法之聯合應用與判讀技巧，並且可讓對於在第一部份選用方法後較無信心者可在這獲得該方法可行之實證，而增加其使用的信心，實際內容如附件二所示。

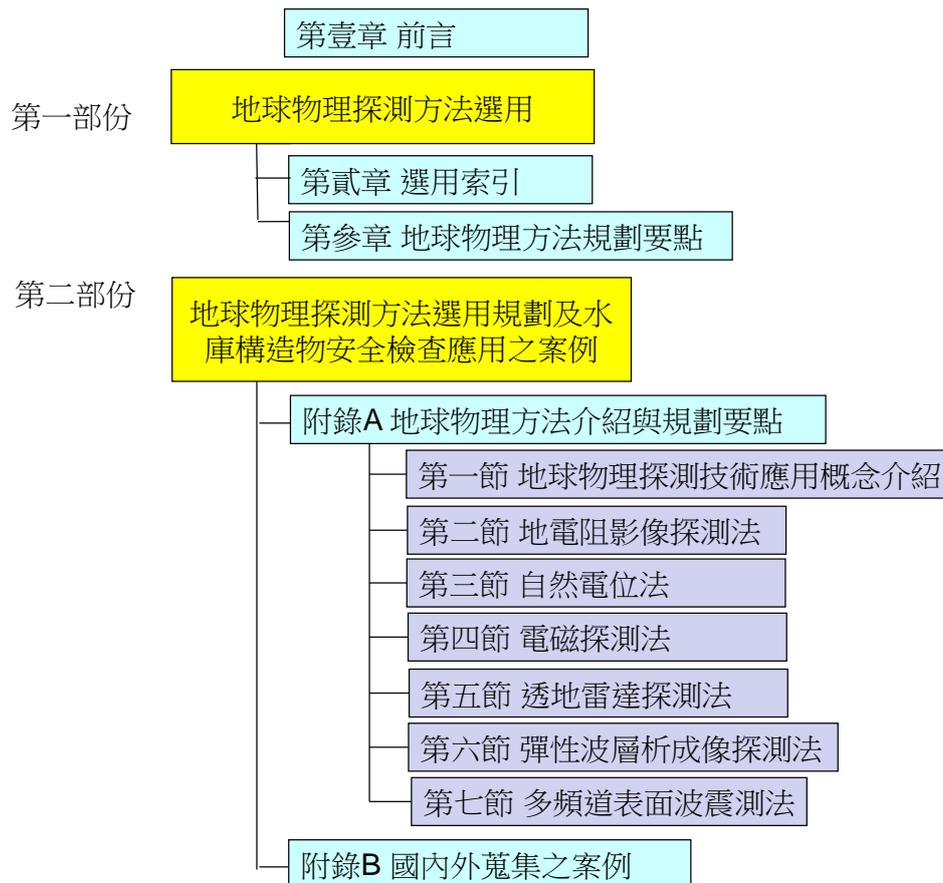


圖 4-3 地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用手冊架構說明圖

四、地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用方法

根據前三節所完成之內容，搭配上節所總結完成之導引手冊內容說明本計畫所建立之地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用方法之流程如圖 4-4 所示，總共是採用三個步驟進行，首先由水庫安全評估之結果或是水庫安全管理人員等處確認安全檢查問題調查之需求，在需求中會獲得安全問題之位置、可能深度以及解析度需求，而後由此需求利用導引手冊第貳章之索引表進行適用之地球物理探測技術選用，在此索引表中可同時獲得適用之地球物理探測技術之選用類別以及參考案例索引，選用類別可作為探測目的之選用考量，最後由最終選定之地球物理探測技術由導引手冊第參章(詳細參考附錄 A)之

調查規畫要點內容進行調查規畫，於規畫過程中若對選用之技術或是規畫方式不甚了解或有疑慮時，可以第二步驟中所獲得之參考案例索引，由導引手冊附錄 B 獲得案例參考。

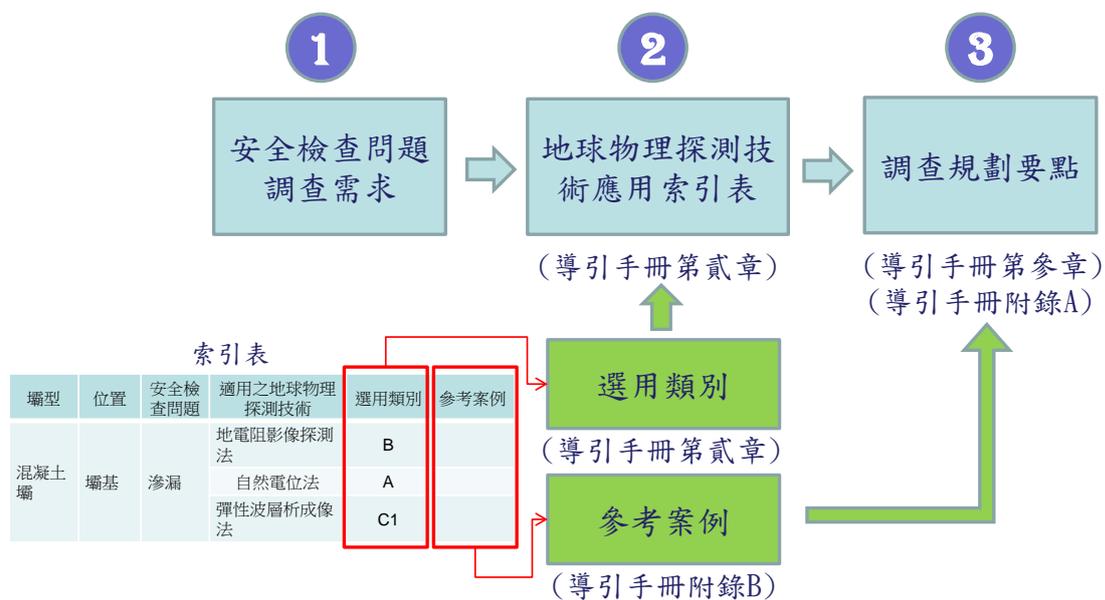


圖 4-4 地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用流程圖

第五章 地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用現地評估

一、現地評估之水庫構造物選擇

於本計畫預計挑選國內兩座水庫壩體進行地球物理探測技術現地測試，此現地測試工作主要是為評估本計畫所建立之應用方法是否適宜，因此在進行現地評估作業的壩體在選取時可考量其所遭遇問題的嚴重性以及該壩的築壩材料進行挑選，基本上將選取一座土石壩以及一座混凝土壩進行現地評估作業。

(一) 現地評估土石壩場址選擇

於現地評估土石壩場址之選擇上，本計畫將選定新山水庫作為現地評估場址，選定之原因如下：

1. **具多項典型土石壩安全檢查問題**：在表 2.1 中，根據民國 95-100 年間曾進行過安全評估或安全複查之水庫所整理出之大壩安全檢查問題(除溢洪道外，未將水工機械及附屬結構物之安全檢查問題納入)，國內具有安全檢查問題之土石壩共有 18 座，根據其安全檢查問題進行數量統計如圖 5-1 所示，其發生頻率最高也是最典型之安全檢查問題為壩體、壩趾滲漏以及溢洪道滲漏三項，比較各壩之安全檢查問題，新山水庫同時存在此三項，可將其視為典型土石壩作為現地評估之選擇。

2. **具重要性**：新山水庫供應基隆與汐止之公共用水，目前因壩體滲漏問題無法解決而致使其無法達到預定蓄升高度，而造成用水供給之靈活性不足。

3. **具安全檢查問題關注性**：新山水庫之滲漏問題嚴重，自民國 89

年發現滲水問題起歷經多次調查與整治尚無法解決，使其在國內相關管理單位、學術界及業界有極大之關注性。

4. 具充足之多面向資料：如前所述，由於其受到水庫管理單位之重視，持續以來之相關調查資料保留完整，且由於管理單位持續對此問題之探究，因此有眾多不同之調查方法結果存在，其包含有現地調查資料、舊有鑽孔地質資料、地球物理技術調查資料、同位素追蹤劑調查資料、大壩滲流數值模擬資料以及第一手之現地監測資料可供後續應用地球物理探測技術後做為比對探討之用。

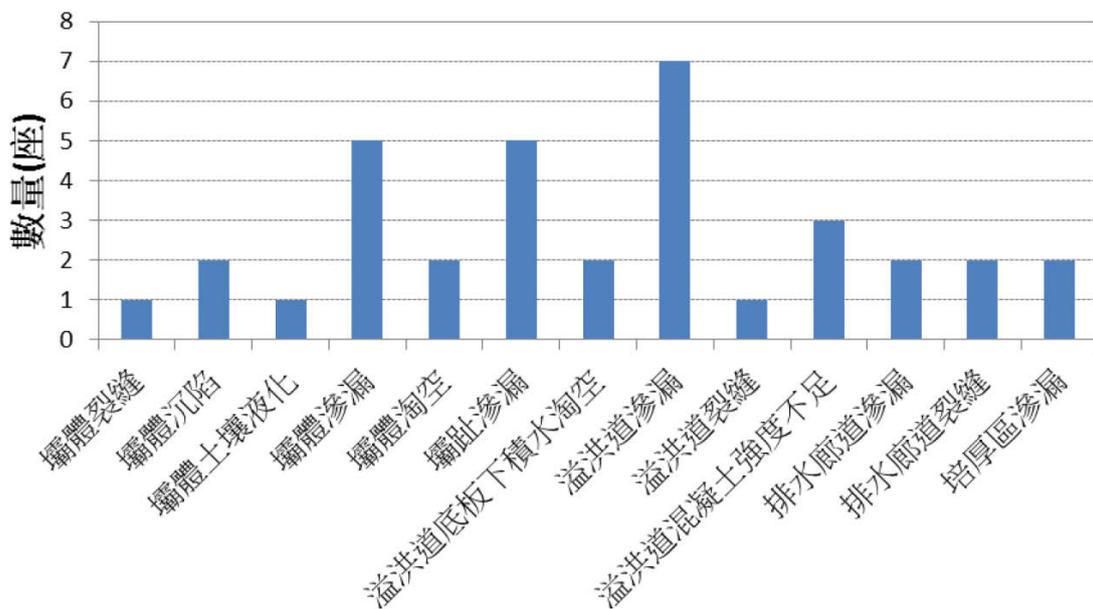


圖 5-1 臺灣地區土石壩常見安全檢查問題數量統計圖

5. 具應用教學性：如第 4 點所述，其有眾多資料可供比對之用，透過此現地評估可做為演繹地球物理探測技術應用與其他資料相互比對應用之良好學習案例，此外，其上下游壩面皆有拋石，但上游壩面為狀態良好之卵礫石，下游壩面為風化嚴重之塊狀岩石，在應用不同地球物理探測技術時可示範現地應用問題之解決方案的可行性，而可

為後來應用之人實際參考。

6. **具恰當之壩體規模**：根據表 2.1 中各土石壩之規模，此些壩體之壩高在 8.5-133.1 公尺間，壩寬在 3-12 公尺間，而新山水庫之規模為壩高 66 公尺、壩寬 10 公尺，是一適中之壩體規模，不致過小而使得無法呈現地球物理探測技術之效益性，亦不致過大而使得執行單位有過大之經費負擔。

綜合上述 6 點原因，選取新山水庫作為本計畫現地評估之土石壩場址。

(二) 現地評估混凝土壩場址選擇

於現地評估混凝土壩場址之選擇上，本計畫將選定西勢水庫作為現地評估場址，選定之原因如下：

1. **具多項典型混凝土壩安全檢查問題**：在表 2.1 中，根據民國 95-100 年間曾進行過安全評估或安全複查之水庫所整理出之大壩安全檢查問題(除溢洪道外，未將水工機械及附屬結構物之安全檢查問題納入)，國內具有安全檢查問題之混凝土壩共有 9 座，根據其安全檢查問題進行數量統計如圖 5-2 所示，其發生頻率最高也是最典型之安全檢查問題為壩體混凝土強度不足，其次是壩體裂縫、溢洪道滲漏以及壩座滲漏三項，比較各壩之安全檢查問題，西勢水庫除存在有發生頻率最高之壩體混凝土強度不足外，尚有壩體裂縫以及溢洪道滲漏之問題，可將其視為典型混凝土壩作為現地評估之選擇。

2. **具恰當之壩體規模**：根據表 2.1 中各混凝土壩之規模，此些壩體之壩高在 12.5-180 公尺間，壩寬在 2-7 公尺間，而西勢水庫之規模為壩高 29.6 公尺、壩寬 3.4 公尺，是一適中之壩體規模，不致過小而

使得無法呈現地球物理探測技術之效益性，亦不致過大而使得執行單位有過大之經費負擔。

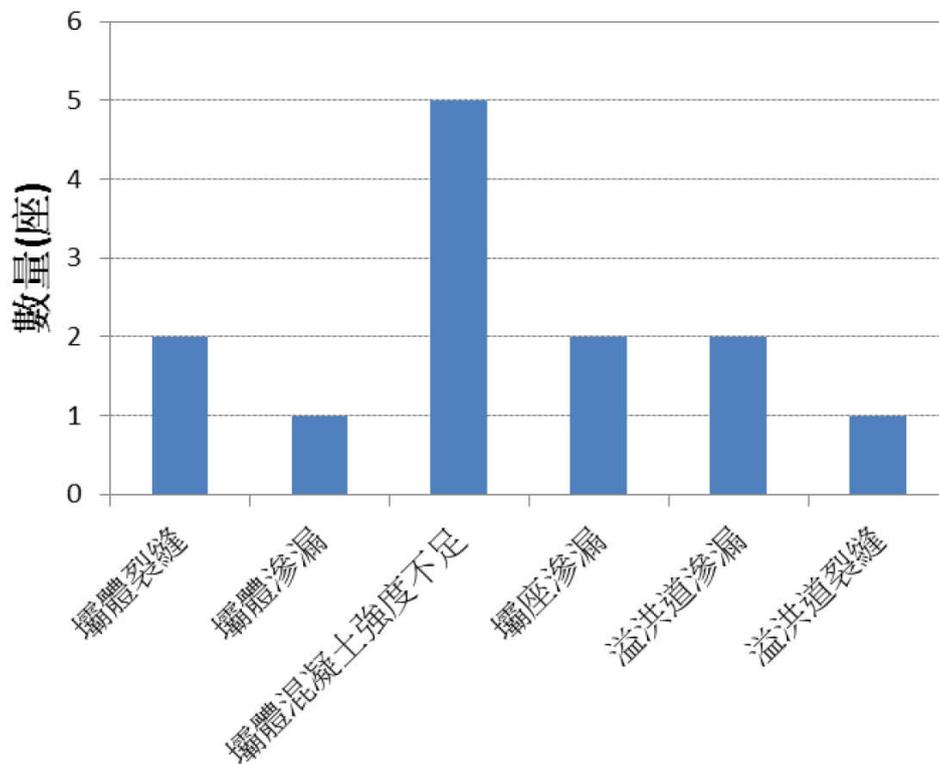


圖 5-2 臺灣地區混凝土壩常見安全檢查問題數量統計圖

3. 具高度價值性：西勢水庫至今已進行過三次安全評估檢查，在其中雖有進行鑽心取樣以及非破壞性之施密特鎚而之壩體混凝土有強度不足之問題，但此些試驗皆僅為局部以及表面之評估，對於整個壩體內不知情況並無法得知，於此進行地球物理探測技術之應用，將可補足此一不足，而提供進一步之資料供管理單位參考。

4. 具充足之多面向資料：如前所述，由於在此壩中已進行過鑽心取樣以及施密特鎚之試驗，可提供不同於地球物理方法之資料用以比對，並作為推測整體狀態之標定點，發揮地球物理方法所得資料之最大價值。

5. 具應用教學性：如第 4 點所述，其有眾多資料可供比對之用，透過此現地評估可做為演繹地球物理探測技術應用與其他資料相互比對應用之良好學習案例。

綜合上述 6 點原因，選取西勢水庫作為本計畫現地評估之混凝土壩場址。

二、現地評估之水庫構造物介紹

(一) 新山水庫背景說明

1. 壩體資訊

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，距基隆港約三公里，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，為單一目標公共給水，供應基隆、汐止地區之用水，管理單位為台灣自來水股份有限公司。新山水庫大壩壩型採「滾壓式斜心層堆石壩」(如圖 5-3 所示)，工程分兩期完成，於民國 69 年完成第一期工程，壩頂標高 EL.75m，壩高 51m，最高蓄水位 EL.71m，蓄水容量 400 萬噸，自民國 73 年 10 月完工開始營運；第二期加高工程於 82 年初開始先期作業，民國 84 年 4 月開始進行壩體加高填築工程，民國 88 年 2 月完成第二期壩體加高填築工程，加高後壩高為 66m，壩軸長度 262m，壩頂標高 EL.90m，最高蓄水位提升至標高 86m，蓄水容量增至 1000 萬噸。

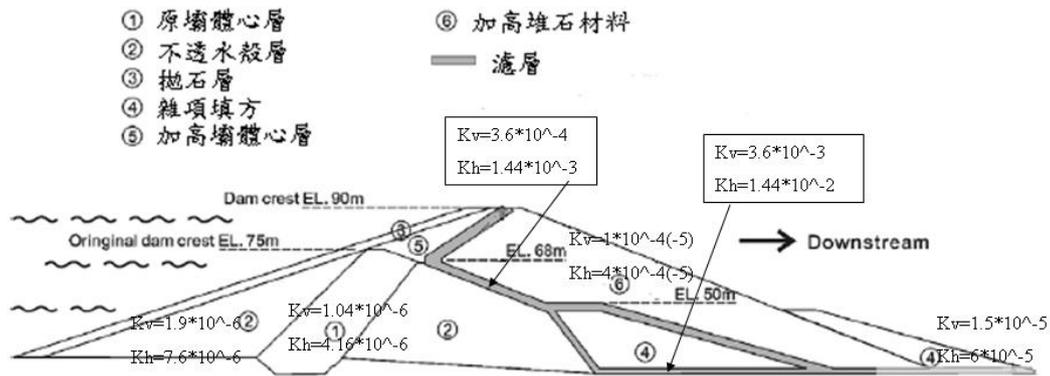


圖 5-3 新山水庫大壩標準斷面圖（修改自 Peng et. al, 2008）

2. 地質情況

如圖 5-4 所示，左壩座之岩性以中至粗粒厚實含石灰質之塊狀砂岩為主，局部出現薄葉層狀之砂岩與頁岩互層，岩層位態為 $N78^\circ E/24^\circ S$ ，岩體中之節理並不太發達，主要分佈地形凹處及靠近上下游處，對左壩座與壩體交界面而言為一順向，岩層走向與壩軸垂直，岩層間偶有含泥層縫及結核出現，層縫所夾之泥質填充物頗為緊密，由於砂岩含石灰質，故於層縫間偶有石灰質流出，表層因風化程度較劇而呈現局部較為破碎及鐵染的現象。而右壩座逆向坡的層理位態約略平行壩軸，右山脊岩層走向為東西向(上下游方向)，且其外側因築路開挖而造成崩塌，時有滲水情形，經由地質調查發現，該處砂岩與頁岩互層之破裂指數較高，地下水位較低，滲水之裂隙可能發達，有漏水途徑之潛勢。

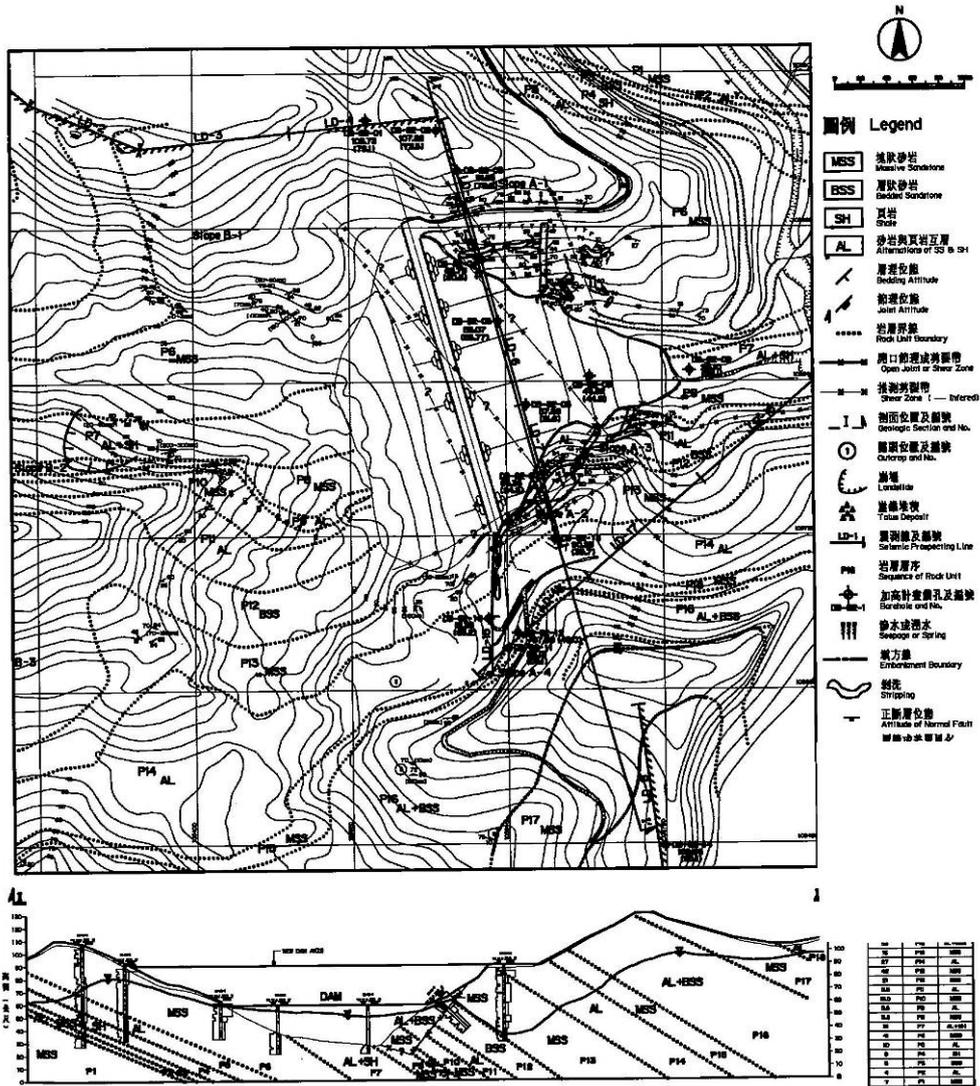


圖 5-4 壩址地質圖 (台灣自來水公司, 民國 97 年 a)

3. 隔幕灌漿露改善工程

大壩二期工程完成後，基礎隔幕灌漿自原有灌漿幕延續至加高壩頂並伸入右岸 38m，伸入左岸 98m，如形成連續緊密之灌漿幕(如圖 5-5 所示)，隔幕灌漿孔深至標高 25m，左岸灌漿孔最小孔距 1.5m，右岸最小孔距 0.75m，孔徑為 AX。另由灌漿資料可知，左岸共施灌 116 孔，共長 6,643.7m，平均灌入量為 60.61 kg/m，右岸共施灌 93 孔，共長 4,814.4m，平均灌入量為 154.16 kg/m，

右岸灌入量顯著大於左岸，其岩層破碎情況較左岸嚴重。

而因水庫加高後無法達到滿水之蓄水功能，經第二次安全評估計畫總報告指出在加高工程調查階段即發現左壩座地表透水度偏高，約大於 10Lugeon，由地表調查也發現多處滲水，其來源可能為水庫沿塊狀岩內之節理及山脊附近地表水下滲至低處湧出。有鑑於此滲水問題，為確保大壩蓄水安全，於民國 91 年，自來水公司管理單位針對左壩座山脊可能之孔隙再進行隔幕灌漿工程，灌漿深度約為 80~97m，以增進新山水庫蓄水功能。隔幕灌漿線大致上分為兩段，一段約略平行左山脊的稜線，另一段則完全平行於水庫壩頂，如圖 5-6 所示，兩條隔幕線相交於壩頂，形成一完整的防水層，另外在隔幕灌漿線的前後兩端，分別設計於雨傘形狀隔幕線，以在前後二端造成更大阻水面積。

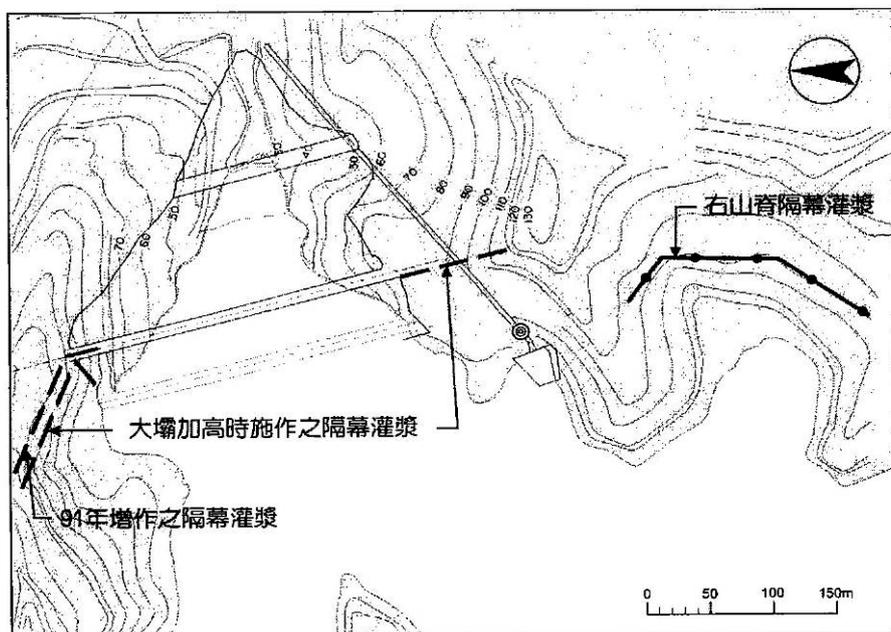


圖 5-5 壩體加高後基礎隔幕灌漿平面圖（摘自台灣自來水公司，民國 97 年 a）

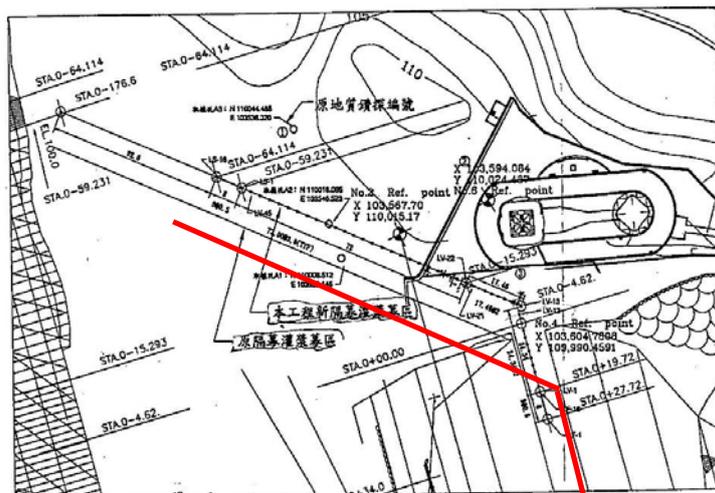


圖 5-6 民國 91 年左山脊隔幕灌漿施工平面圖(摘自台灣自來水公司，民國 97 年 a)

4. 壩體滲漏近況

由「新山水庫第三次安全評估總報告」(台灣自來水公司，民國 97 年 a)內容指出，97 年數次現地檢查結果發現壩體下游面計有 7 處滲水點，如圖 5-7 所示，其中滲水點 1、2、3、4 是於新山水庫第二次安全評估(台灣自來水公司，民國 90 年)現地檢查時已存在，滲水點 5、6、7 是於本次安全評估所新發現。

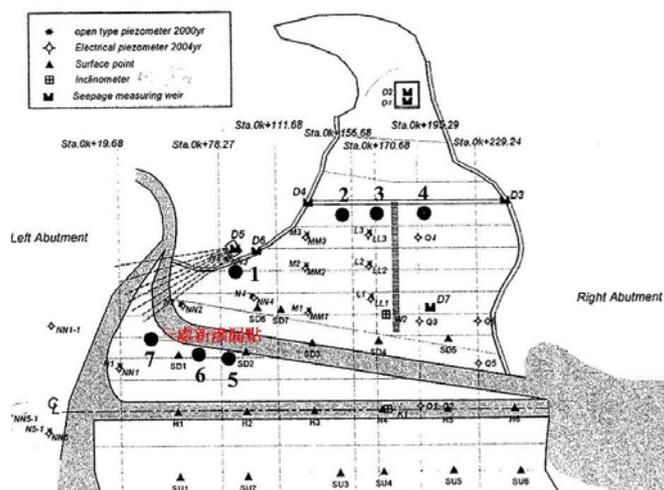


圖 5-7 新山水庫壩體下游面滲水點位置示意圖(台灣自來水公司，民國 97 年 a)

5. 既有地球物理探測資料

民國 94 年經濟部「水庫安全監測問題評析與非破壞性檢測技術應用之研究」與 95 年「水庫壩體監測及檢測與安全診斷技術研發(1/3)」的報告中針對滲水部份進行地電阻探測，依據壩頂(測線 A)與下游殼層道路(測線 B)的施測結果顯示(如圖 5-8 所示)，異常地電阻區與壩觀察到的滲漏區具有一致的關係，並由結果推估滲流水並非全由濾層排出，在殼層疑似形成一滲漏路徑，且此一路徑位於濾層之上，最終由下游拋石殼層滲漏出(如圖 5-9 所示)，顯示殼層異常滲漏通道的可能性，並推測在壩體有棲止水存在之可能；此外，由左山脊測線的結果顯示，隔幕灌漿形成明顯的高電阻阻隔區塊，未有明顯滲漏路徑穿越隔幕灌漿；而由下游殼層道路地電阻剖面長期的監測結果顯示庫水位(水位變化約 EL81~EL83m)及降雨量的變化對於濕潤區的電阻率值影響不大，推估該濕潤區應為長期的高含水狀態。

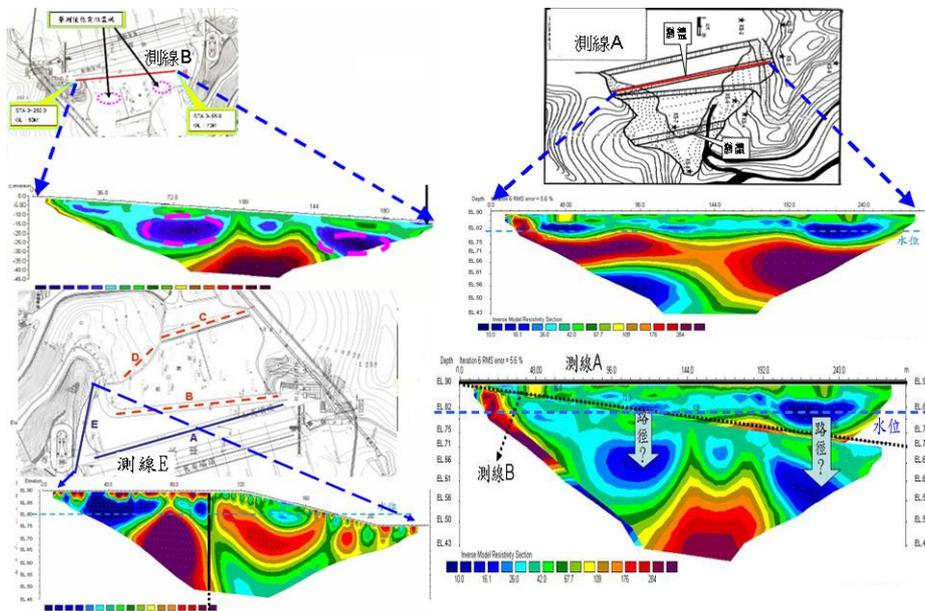


圖 5-8 新山水庫殼層及左山脊地電阻影像剖面

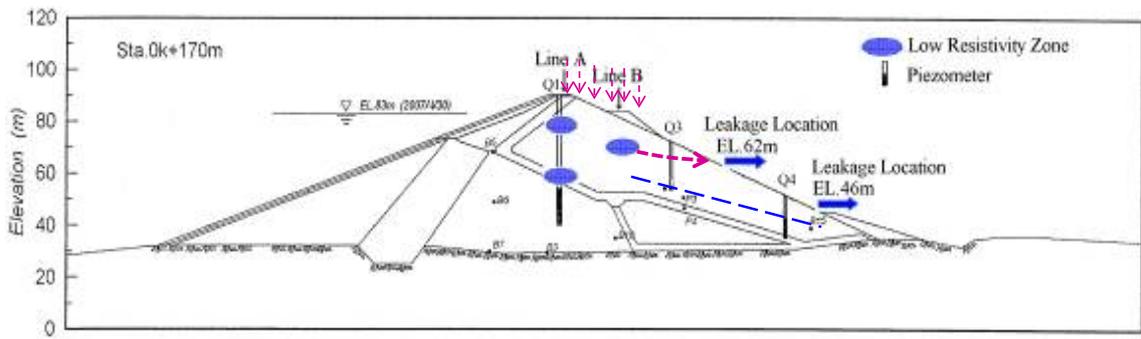


圖 5-9 新山水庫大壩斷面圖與潛在滲漏區域

對於壩體滲漏處之水源推測是來自於棲止水，在無明顯出現滲流直接穿越心層流出之證據下，可合理假設棲止水之補充來自於雨水，但由現場滲水點 D6 之流量與雨量關係圖(如圖 5-10 所示)中可發現，在 D6 處之流量始終有一基流之存在，可能有降雨入滲以外的因素，壩體之滲水並不完全來自於雨水，應當進一步調查探討。

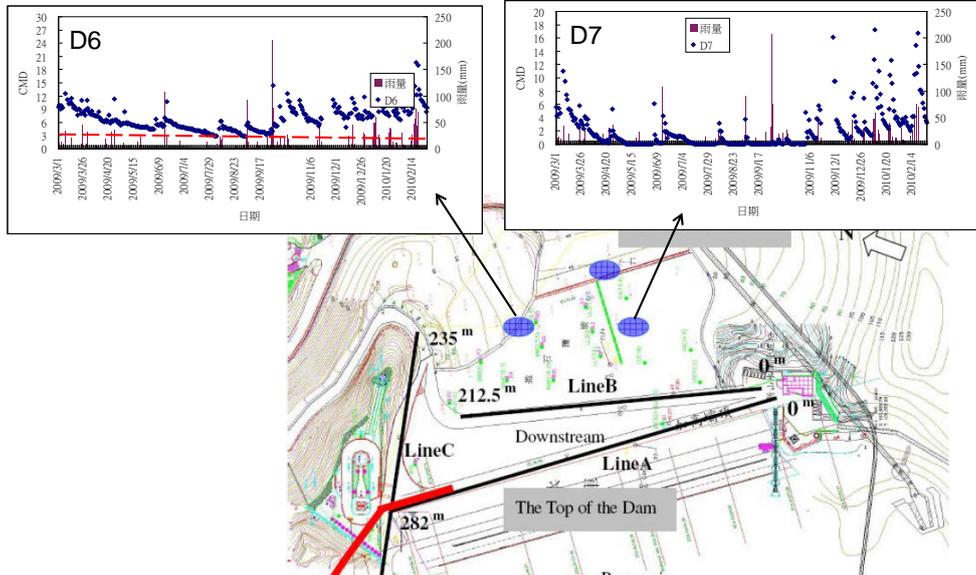


圖 5-10 新山水庫滲漏點流量與降雨關係

(二) 西勢水庫背景說明

1. 壩體資訊

西勢水庫位於基隆市暖暖區，為基隆河系支流西勢溪流域，東鄰東勢坑溪集水區，西至基隆市七堵區區界，南達台北縣、平溪鄉鄉界，集水區面積為 6.5 平方公里，為在槽水庫。水庫壩址位於西勢溪上，為一混凝土拱形重力壩(如圖 5-11 所示)，上游壩表面直立成弧形(曲率半徑 221.85 公尺)，下游壩表面斜立，壩頂弧半徑 12.35 公尺，斜角 53 度成弧形(如圖 5-12 所示)，於民國 15 年建造完成，水庫滿水位標高 72.08 公尺，滿水位面積 8.94 公頃，壩頂標高 73.6 公尺，蓄水總容量 65 萬立方公尺。依照經濟部於民國 97 年 5 月 5 日公告之「水利建造物檢查及安全評估技術規範蓄水與引水篇」西勢水庫屬於二級水庫，災害潛勢則屬於輕微。由於水庫容量有限，因此冬季東北季風盛行之際，常有水量溢流情形發生。集水區屬於水源保護區範圍內，區內並無居民居住，且林況完整，植生覆被良好。

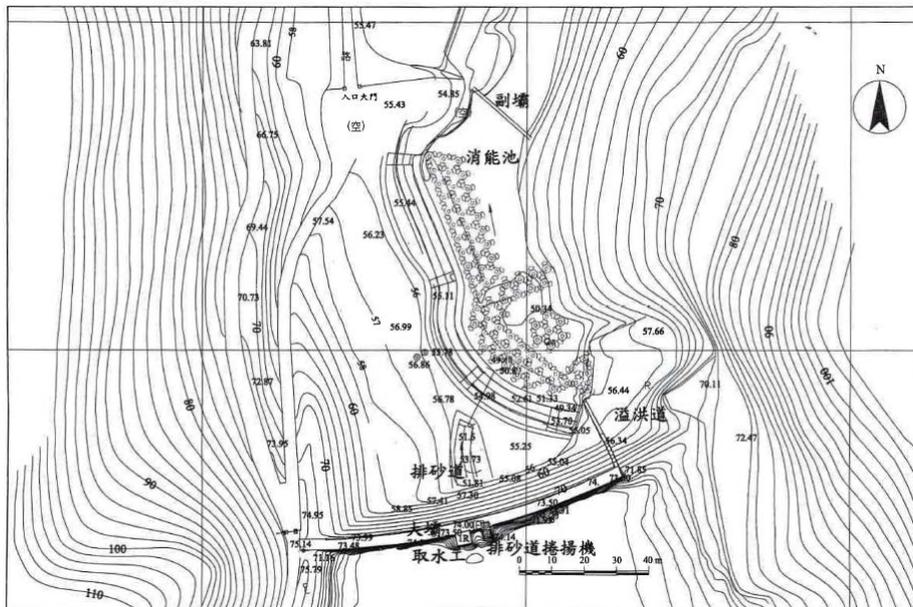


圖 5-11 西勢水庫壩體平面圖

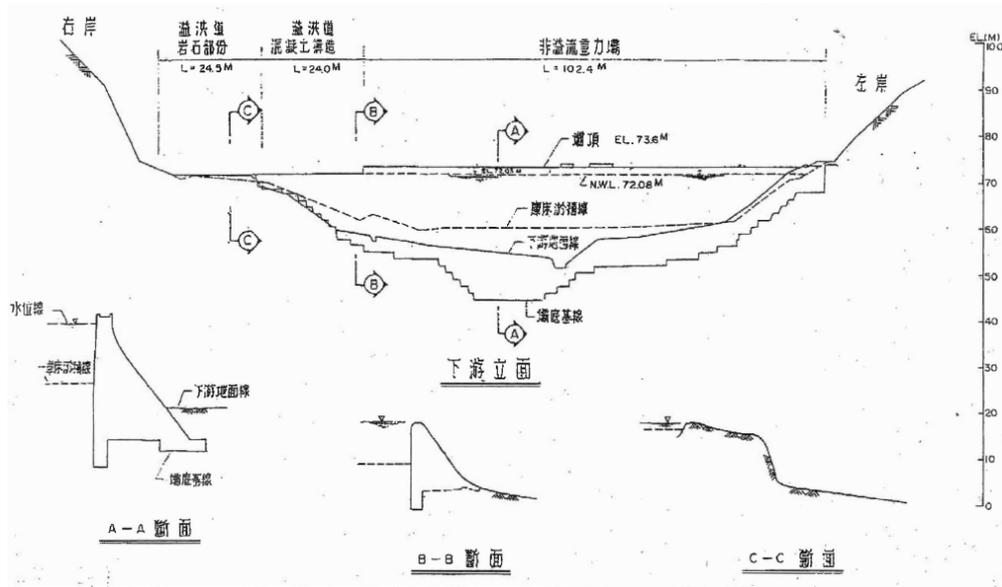


圖 5-12 西勢水庫壩體立面圖

2. 壩址地質

西勢水庫既有壩座主要位於左、右山脊出露之塊狀砂岩及粉砂岩上，層面位態為 $N61^{\circ}E/77^{\circ}NW$ ，於岩石溢洪道頂往上游約 6-7 公尺處有一小型之背斜褶皺；壩體下游靠壩址右岸之邊坡岩性以黃棕色至青灰色塊狀細粒砂岩為主，另有灰黑色頁岩層，主要層面位態為 $N70^{\circ}E/88^{\circ}NW$ ，地表岩盤球狀風化之關係節理較為發達；右山脊處之岩性以大寮層中段之中至細粒厚層塊狀砂岩為主，呈黃棕色至灰白色，富含鈣質膠結砂岩，在下游接近壩趾處為大寮層砂岩，常形成抗風化及地形突出之山脊或陡峭山崖等大寮砂岩層之地形特徵，此砂岩段往下游有部份漸轉變為含泥量較高的砂岩或粉砂岩，於風化後極易形成發達的洋蔥狀剝離構造，岩層位態為 $N62^{\circ}E/77^{\circ}NW$ ，共有三組主要節理，節理位態為 $N22^{\circ}W/86^{\circ}SW$ ，與河谷走向一致，為河谷沖蝕解壓所造成，另一組節理走向為 $N70^{\circ}E/88^{\circ}NW$ 大致與層面方向一致，另一組節理

走向為 $N43^{\circ}W / 41^{\circ}SW$ ；而左山脊岩性與右山脊一致，層面位態主要為 $N65^{\circ}E/75^{\circ}NW$ ，主要節理有兩組，節理位態為 $N25^{\circ}E/80^{\circ}SE$ ，亦為河谷沖蝕解壓所造成，另一組節理 $N67^{\circ}E/80^{\circ}NW$ ，可視為砂岩內一組共軛節理(台灣自來水公司，民國 97 年 b)。

3. 壩體安全檢查問題說明

大壩：第三次安全評估報告(台灣自來水公司，民國 97 年 b)指出，以施密特錘檢測西勢水庫大壩之混凝土強度結果顯示強度不均勻，僅 38%測點強度達到預估一般標準 210 kg/cm^2 ，62%測點強度達到預估一般標準之 0.85 倍，已知民國 72 年第一次安全評估之混凝土試體取樣以及試錘試驗結果顯示混凝土鑽心抗壓強度分佈約在 146 至 205 kg/cm^2 ，表面硬度對應抗壓強度分佈約在 135 至 246 kg/cm^2 ，與第三次安全評估測試結果相當接近。雖然壩體混凝土強度有不足之情形，但由於本壩體為重力壩，混凝土重量及穩定性佔主要因素，故第三次安全評估結果進行結構靜態分析後認為壩體現況安定良好。此外，目視檢查在壩體下游面部分表面有多處表面寬度大於 3 mm 之裂縫，其發展深度超出 10 cm ，第三次安全評估根據現場觀察認為此類裂縫是巨積混凝土之表面剝離，並非應力狀態造成，無影響壩體安全之疑慮。

溢洪道：根據西勢水庫第三次安全評估報告(台灣自來水公司，民國 97b 年)指出，溢洪道陡槽以施密特錘檢測 11 處之結果有四處介於 95 - 135 kg/cm^2 之間，整體強度不均勻，且略為薄弱，現場檢查於表面有混凝土崩離之現象，此外，目視檢查在溢洪道

立面有多處表面寬度大於 3mm 之裂縫，其發展深度超出 10cm，第三次安全評估根據現場觀察認為此類裂縫是巨積混凝土之表面剝離，並非應力狀態造成，無影響結構行為之疑慮。

三、現地評估工作規劃與試驗成果

(一) 新山水庫現勘與現地評估工作規劃

民國 101 年 6 月 8 日進行新山水庫現勘工作，除第三次安全評估工作所描述之問題外，於大壩址部根據水庫管理人員以及現地勘查發現有一處長期濕潤區存在，該處雖尚未有漏流之情形，但其濕潤之狀態並不尋常，需注意該處底下滲流的情形。

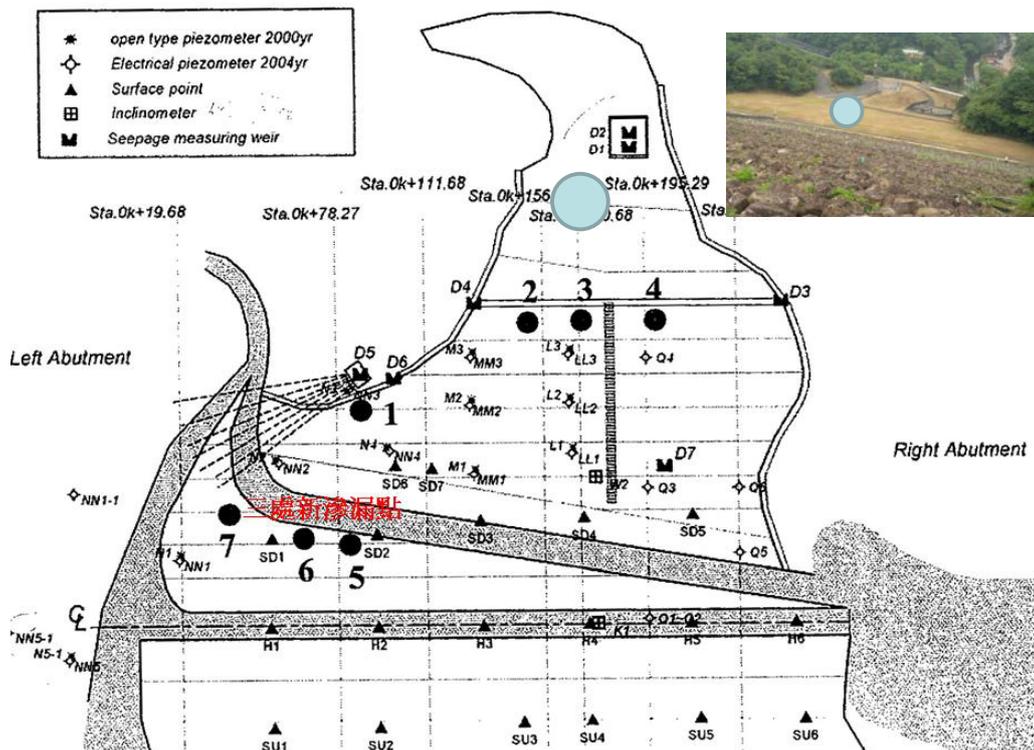


圖 5-13 新山水庫壩體下游面滲水點位置示意圖(民國 101 年 6 月現勘)

在經費有限之情況下，考量新山水庫大壩滲漏之情況相較溢

洪道更形嚴重，因此將新山水庫之現地評估工作著重在大壩滲流之調查上，已知此壩為土石壩，在壩體以及壩址處有滲流之情形，根據本計畫所建立之地球物理探測技術應用方法，由表 4-2 以壩體及壩址兩個位置之滲流安全檢查問題進行適用之地球物理探測技術選用，適用之技術有地電阻影像探測法(B)、自然電位法(A1)、彈性波層析成像法(C1)、多頻道表面波震測法(C2)以及電磁探測法(A2)可供選擇，由於已有過往調查資料可供參考，但為較為妥切地進行適用評估，因此對於 A 類及 B 類選用類別皆用以進行調查工作，而其中，考量自然電位法在拋石壩面之施作困難，其電極與地面不易有良好接觸，因此未將其採用。據此，在新山水庫壩體及壩址滲漏之安全檢查問題之現地評估作業包含有電磁探測法以及地電阻影像探測法。

現地規劃作業如圖 5-14 所示，首先針對選用類別為 A 的電磁探測法，因其具有施作快速且可掌握整體趨勢之優點，將其測探範圍規劃為大壩壩體及壩址處整體並涵蓋接近右山脊之水庫管理中心與左山脊無林木的部分，預計由此兩者之結果先行掌握整體可能的滲流流向以及較具異常之區域，而後再以選用類別為 B 的地電阻影像探測法採用 2D 方式施作，初步先行規劃三條自壩體上游側至壩趾之測線三條，惟其最終施作位置將視電磁探測法之結果做確認，以便可有最佳之探測結果可供問題之了解與檢討。



圖 5-14 新山水庫壩體及壩址滲漏問題地球物理探測技術現地施作規劃示意圖

(二) 新山水庫現地施作與試驗成果

1. 電磁探測法現地施作與試驗成果

本次於新山水庫進行之電磁探測法，根據過往地球物理探測結果顯示在地表下 6 公尺內應可有足夠之探測反應呈現，因此採用探測深度為 6 公尺之頻域電磁探測法，所使用之儀器為捷克 GF Instruments 所生產之 CMD 4，有效探測深度為 6 公尺。量測點之佈設在平行壩軸之方向上採用 5 公尺間距，垂直壩軸之方向上視地點調整間距在 5-10 公尺，現地施測時，發送源與接收線圈方向與壩軸平行(如圖 5-15 所示)。量測點採用經緯儀進行定位。



圖 5-15 新山水庫電磁探測法現地施測情形

新山水庫電磁探測結果如圖 5-16 所示，將所量測得之資料繪製為 2 維水平影像，顏色表示視電阻值，由圖中可發現，有五個明顯的低電阻率區塊，首先是在左山脊區明顯整體電阻率偏低，尚無法確認是山脊地層之特性或是有其他潛在因素；而壩頂道路亦整體呈現低電阻現象，在這區塊較為複雜，可能是下方之黏土心層所造成，但亦可能是受到道路兩旁金屬柵欄之影響；再其次是在右壩 A 區，該處呈現集中小範圍的低電阻，是受地表人造物之影響；再往下游看，整個平台區連接著壩中央的階梯，因為是採用鋼筋混凝土建造，而使得整個區塊呈現低電阻的反應；而在最下游的壩趾 B 區，在壩體與原土層的邊緣設有混凝土排水溝，因此亦呈現低電阻之反應；整體低電阻區除左山脊原因不明外，主要是受到人造物之影響。

而整個探測最為主要之壩體拋石區，由圖中可見其電阻率約 80 ohm.m，整體電阻率分布均勻，惟在左壩較右壩電阻值稍高，並無明顯特異處；相鄰壩體拋石區的左壩 A 區電阻值稍較壩體拋石區為低，主要原因在於此處地表已可明顯見到滲水狀況，而類

似之狀態也可在壩趾 A 區見到，相較兩旁，該處局部稍低，是於現場目視發現地表較為濕潤的區域。

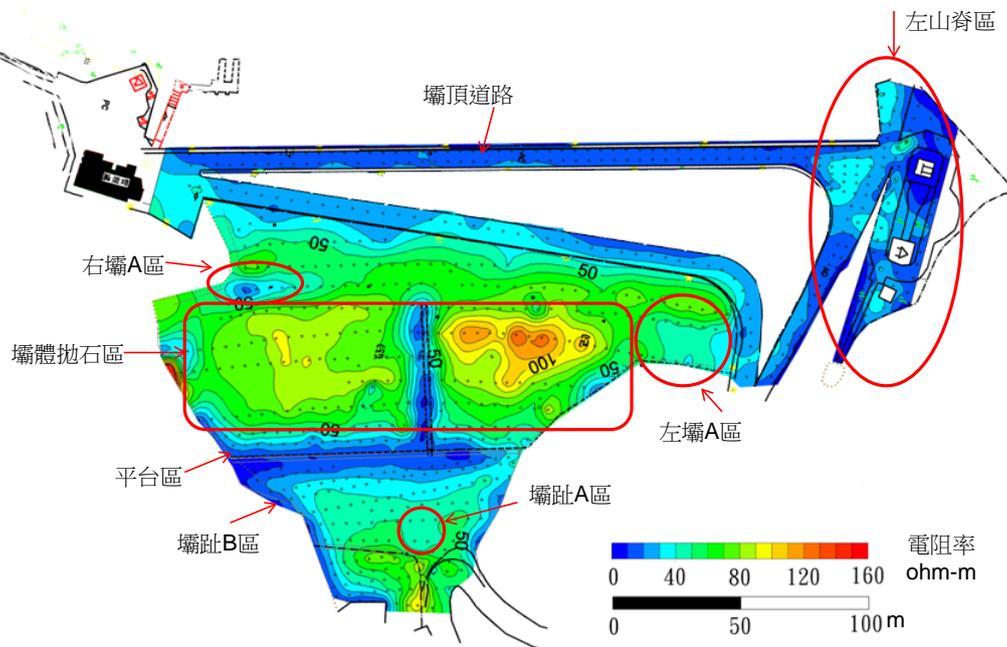


圖 5-16 新山水庫電磁探測法探測成果

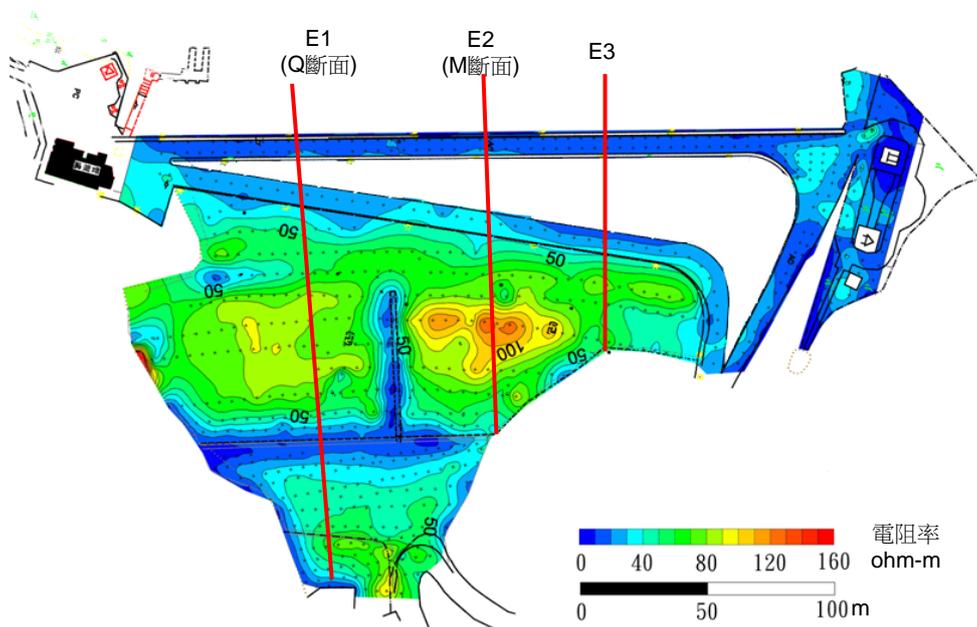


圖 5-17 新山水庫地電阻探測法測線規劃(根據電磁探測法成果調整)

2. 地電阻影像探測法現地施作與試驗成果

由此次電磁探測法探測成果，其整體而言並無顯示特別特異區域，但有兩點可加以注意，其一是右壩拋石區較左壩拋石區電阻率稍低，另一是在鄰近壩體拋石區之左壩 A 區呈現電阻率稍低的情況，且似乎與左山脊之低電阻有所關連，因此，根據原規劃之地電阻影像探測測線位置，參考電磁探測法成果對測線進行位置微調，最終規劃如圖 5-17 所示，共規劃三條測線，E1 位於右壩側 Q 斷面上，E2 位於左壩側 M 斷面上，使其通過電阻率較高處，E3 靠近左壩 A 區。三條測線之佈設將盡可能往上游側延伸。

現場測線佈設電極棒採用 5 公尺間距，E1 採用 24 根電極棒，測線長度 115 公尺；E2 採用 31 根電極棒，測線長度 150 公尺；E3 採用 43 根電極棒，測線長度 210 公尺，總計 475 公尺。由於在大壩上施做會遭遇電極棒需貫入拋石以及道路等情形(如圖 5-18 所示)，因此為確保其與土層之接觸良好，除在拋石面會視情況增添砂石外，另有澆置鹽水增加導電性。於現場之施測，三條測線皆同時採用 wenner 以及 pole-pole 兩種電極排列模式進行施測，以獲得近地表以及深層之探測結果。現場量測資料採用 RES2DINV 進行反算分析。



圖 5-18 新山水庫地電阻探測法現場施測情形

探測結果將根據各條測線進行說明：

E1 測線：E1 測線之電阻率影像剖面成果如圖 5-19 及圖 5-20 所示。圖 5-19 為採用 Wenner 法施作之成果，圖中水平箭頭表示現場觀察到有滲水之位置，由圖中可見在壩體上半部地表下 10-15 公尺深的範圍內有一區低電阻存在，且其接近地表處即為地表水點；而再往下游面觀察，在較下游的滲水點處下方約 10 公尺深的範圍內亦有一區低電阻存在。

圖 5-20 為 pole-pole 電極排列模式所探測之結果，因為採用 pole-pole 法的關係使其探測深度較深，在近地表之位置與 wenner 法之探測結果相吻合，且對於壩體上半部之低電阻區域之整體分布狀態顯示地更加完整，此一低電阻帶位於濾層上方，與現場水位井觀測到水位高於濾層之狀態吻合，且呼應過去地探結果所推測有棲止水存在的可能性，而此處之棲止水之水源，由圖 5-19 wenner 法之近地表施測結果中可見，其極可能是由雨水透過壩頂道路系統入滲補充；而 pole-pole 之探測結果較為特殊的是在深層的地方有大片的低電阻反應，由於其所在位置深度較深，已進入原地層之範圍，初步不認為是含水造成，推估可能是原地層中之砂頁岩地層所造成，需透過比對更精細之地質圖確認。

E2 測線：E2 測線之地電阻影像剖面如圖 5-21、圖 5-22 所示。圖 5-21 為 wenner 法施作之成果，由圖中可見到整個壩體之地電阻影像分布可約略根據上中下分為三個部分，每個部份皆為局部性的低電阻區域，而較為特別的是，如同 E1 測線之結果，除下部低電阻區外，其餘兩個低電阻區之頂部皆位在道路系統處，極

可能成為下方低電阻區含水之水源補充處，但在此兩區之低電阻下方與地表皆處位置並未記錄到滲水狀態，可能是受到地表拋石之遮蓋而漫流至其他位置，可再於進行確認；而下部之低電阻區其空間分佈進入到濾層，可能透過濾層排出，而現場滲水點之位置已在水平濾層附近，兩者間是否有所關聯可進一步探察確認。

圖 5-22 為採用 pole-pole 法進行施測之結果，其近地表皆與 wenner 法吻合，而較特殊點在於其深度探測結果，在進入到原地層後與 E1 測線不同，顯示出高電阻的反應，比對地質圖該處可能是為厚砂岩層之位置，高電阻之反應是為正常。

E3 測線：E3 測線之地電阻影像剖面如圖 5-23 及圖 5-24 所示。圖 5-23 為採用 wenner 法施作之成果，由圖中可見如同 E1 以及 E2 測線之結果，在道路系統下方皆存在有低電阻區，上部之低電阻區，其低電阻區有與壩面相連，該位置為現場記錄有滲水點之位置；下部之低電阻區呈垂直分布直接進入濾層，其含水可能透過濾層排出。而現場所記錄到之滲水點約為水平濾層所在位置。

圖 5-24 為採用 pole-pole 法施作之結果，其近地表之結果與 wenner 法相吻合，且更進一步顯示上部之低電阻區，雖然其低電阻區有與壩面相連且現場有滲水點，但其下方亦有延伸至濾層的現象，可能滲入之水亦會透過濾層排出；而其在較深處之探測結果顯示原地層呈現高電阻反應，與 E2 測線下方相同皆為砂岩地層之反應。

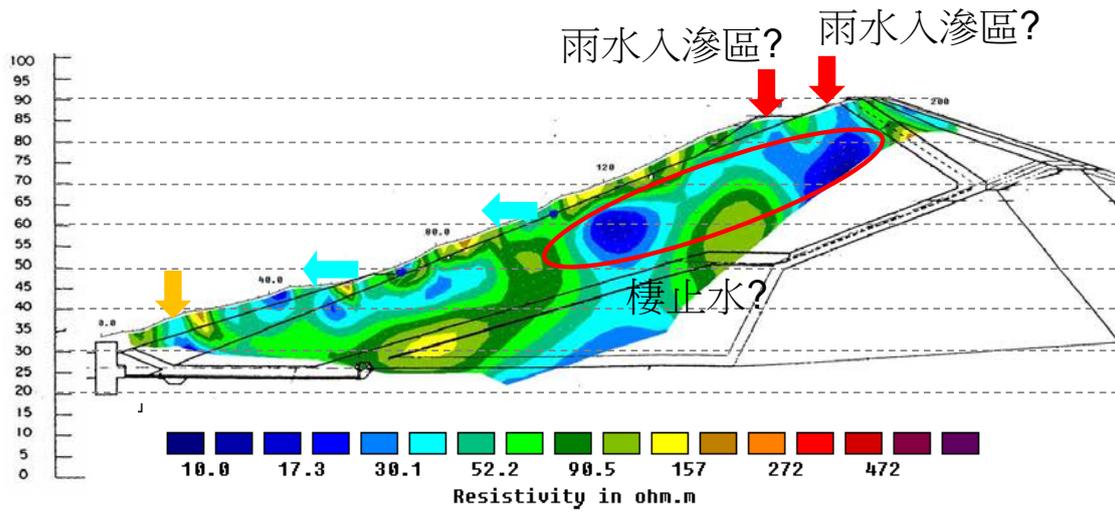


圖 5-19 E1 測線地電阻影像剖面(wenner 法施作)

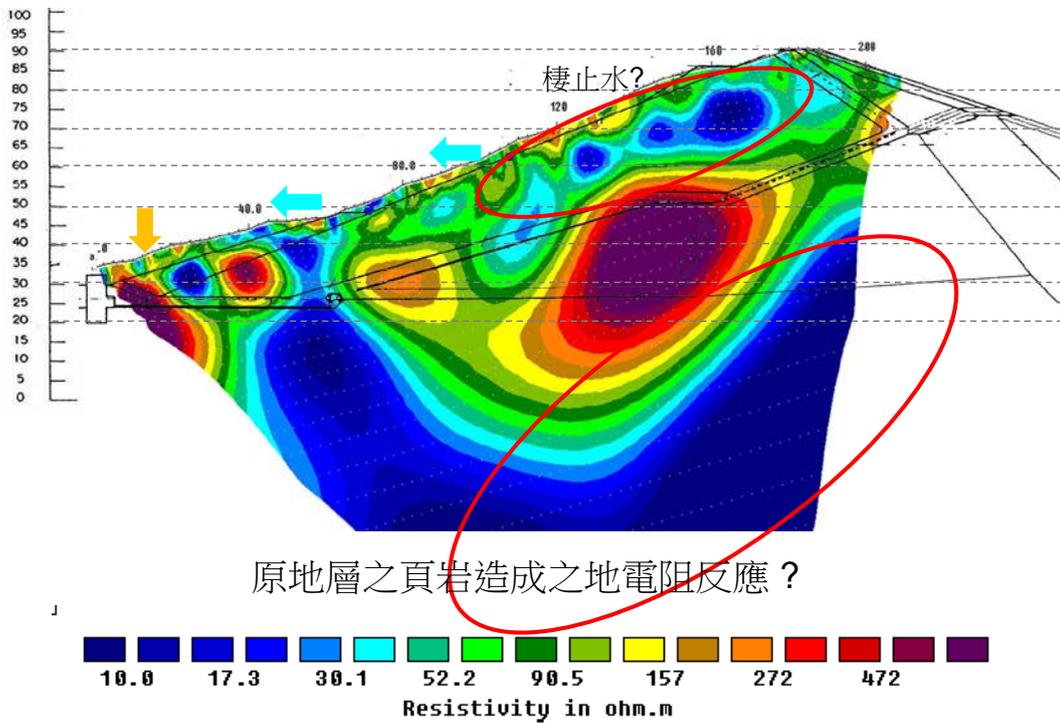


圖 5-20 E1 測線地電阻影像剖面(pole-pole 法施作)

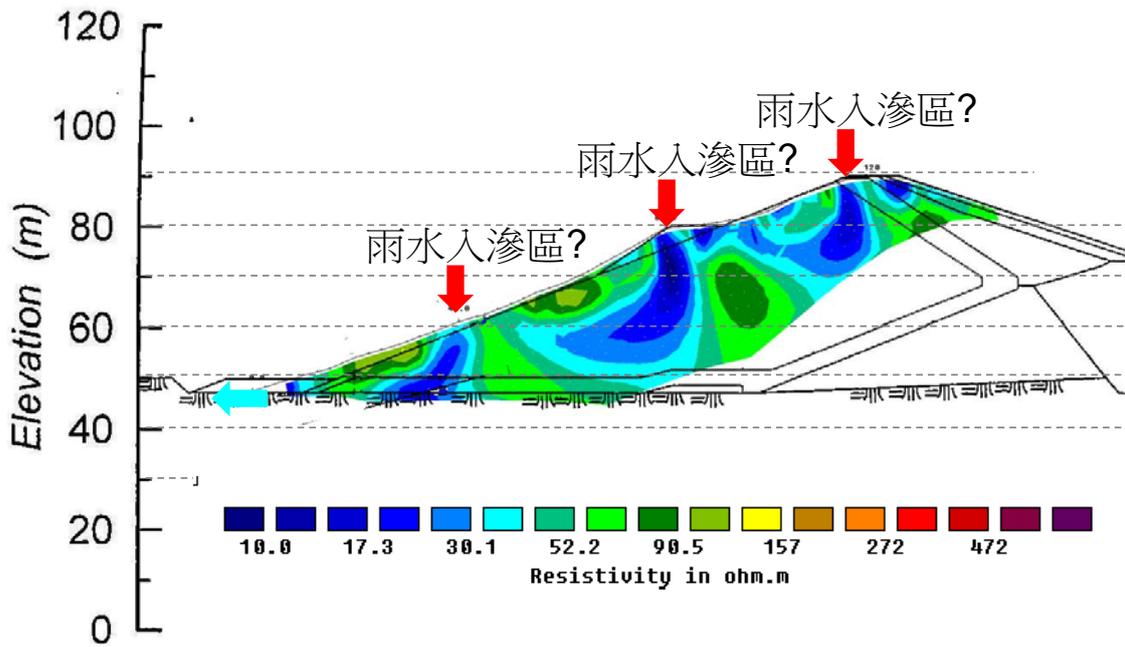


圖 5-21 E2 測線地電阻影像剖面(wenner 法施作)

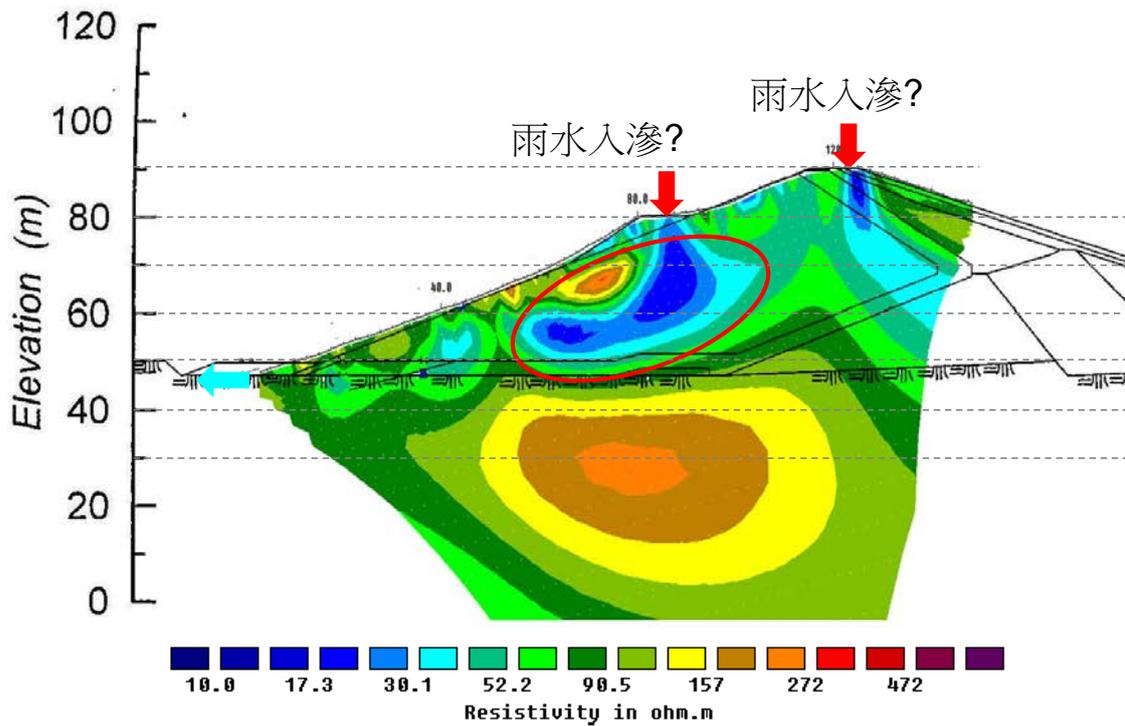


圖 5-22 E2 測線地電阻影像剖面(pole-pole 法施作)

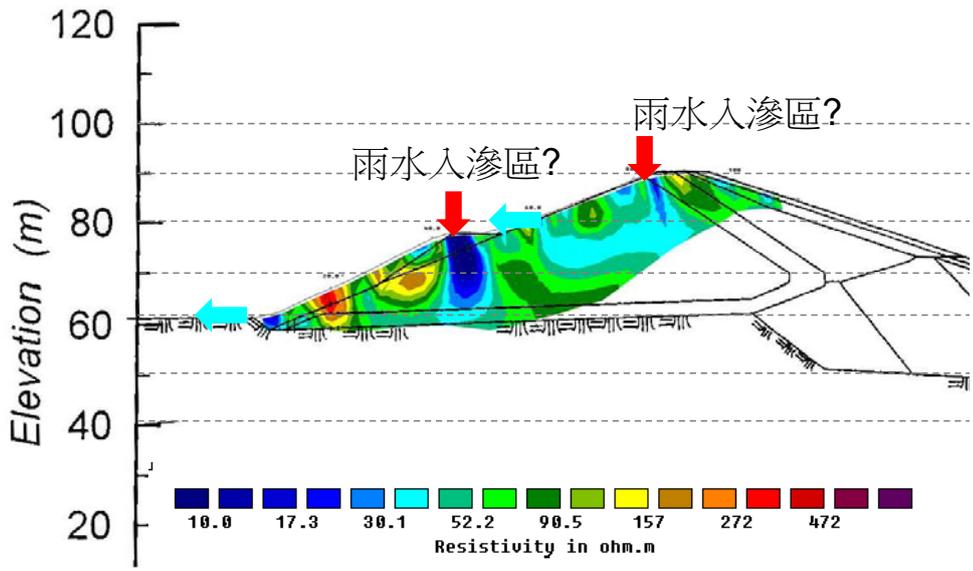


圖 5-23 E3 測線地電阻影像剖面(wenner 法施作)

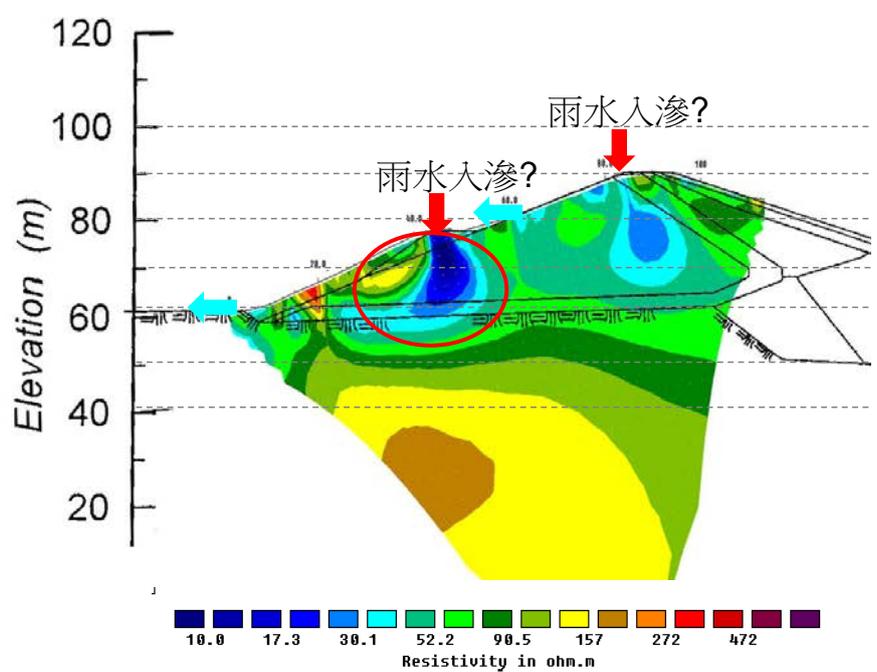


圖 5-24 E3 測線地電阻影像剖面(pole-pole 法施作)

3. 綜合判釋

綜合此次探察成果呈現如圖 5-25 所示，與過去新山水庫於壩頂道路(測線 A)以及壩面道路(測線 B)所進行之地電阻調查結果相

比較，雖然兩者施測時間已有六年之差異，但兩者之探查結果仍然相互吻合一致，顯示目前造成新山水庫壩體滲流之原因並無改變，而透過此次之調查結果輔助並補充過去之探查結果，對新山水庫滲流問題進行下列幾點結論：

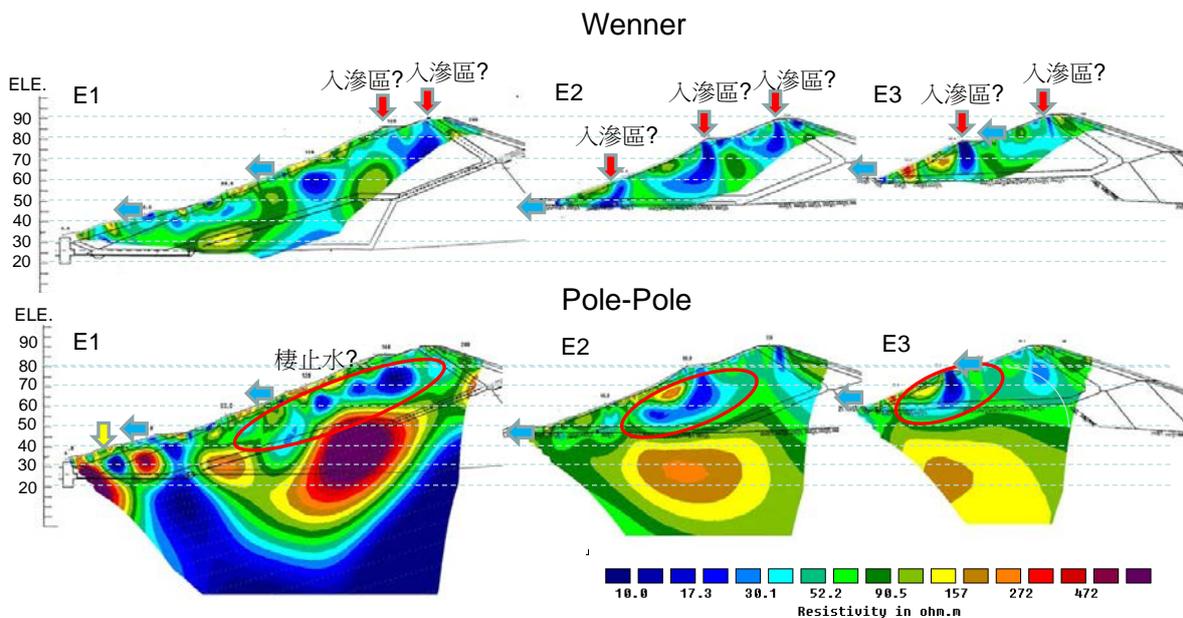


圖 5-25 地電阻影像剖面綜合判釋

- (1) 壩體內部有棲止水存在，應是壩面滲流之水源來源，而棲止水之範圍具有局部性。
- (2) 壩體內部棲止水之補充水源推測是為雨水，且其補充點主要在於道路系統。
- (3) D6 處滲流流量有一基流存在，顯示可能有降雨入滲以外的因素，其原因可能是因為該處鄰近水平濾層，若水平濾層有局部超出其排水能力，將造成正常滲流自水平濾層上方滲出，而使其有一基流存在。

根據上述結論以及探查結果有幾點建議如下：

- (1) 道路系統可能為棲止水主要補注點，可初步重新檢討並改善道路排水問題，並觀察滲水量以驗證其可能性。
- (2) 在此調查結果中，心層所在位置皆未有出現預期中低電阻之明顯反應，是否因為目前探測深度內之心層位置長期位於水位面以上而有乾燥情形，造成電阻率上升或是其他可能潛在問題，建議可進一步探討。

(三) 西勢水庫現勘與現地評估工作規劃

民國 101 年 6 月 8 日進行西勢水庫現勘工作，除第三次安全評估工作所描述之問題外，於溢洪道處發現在未有溢流之情況下亦有水自溢洪道表面混凝土裂縫中流出，建議應持續觀察其是否有惡化之情況，此外，以簡單深度尺進行壩體上游側之水位深度量測，量測結果顯示自壩頂起算僅有約 9 公尺。

於西勢水庫之現地應用評估工作，考量經費有限，以國內大部分混凝土壩所存在之壩體混凝土強度不足問題作為主要評估工作。已知此壩為混凝土壩，在壩體有混凝土強度不足的問題，根據本計畫所建立之地球物理探測技術應用方法，由表 4-2 以壩體位置之混凝土強度不足安全檢查問題進行適用之地球物理探測技術選用，有彈性波層析成像法(B)可供適用，其在此之選用類別為 B，顯示可有效進行探測調查亦可有足夠之探測能力。



圖 5-26 西勢水庫溢洪道現勘照片(民國 101 年 6 月現勘)

考量可達到之探測效果及可供使用之經費，在此地之測線規劃三條垂直彈性波層析成像法剖面以及二條水平斜剖面如圖 5-27 所示，根據現地規劃要點避開可能造成 3D 效應之區域，選定三處垂直剖面進行探測，測線在下游側由壩頂延伸至下游地表面(約有 26 公尺高)，而測線上游側自壩頂延伸至淤積線(約僅 9 公尺)，另外，此三組垂直剖面對於整體之代表性恐尚不足，因此另規劃二組斜剖面之測線，測線之上游側緊貼淤積線，而其下游側將在靠近下游地表面處，但為使其避免太過接近地表而產生之 3D 效應，將會使下游側測線距離地表約 1-2 公尺之高度。

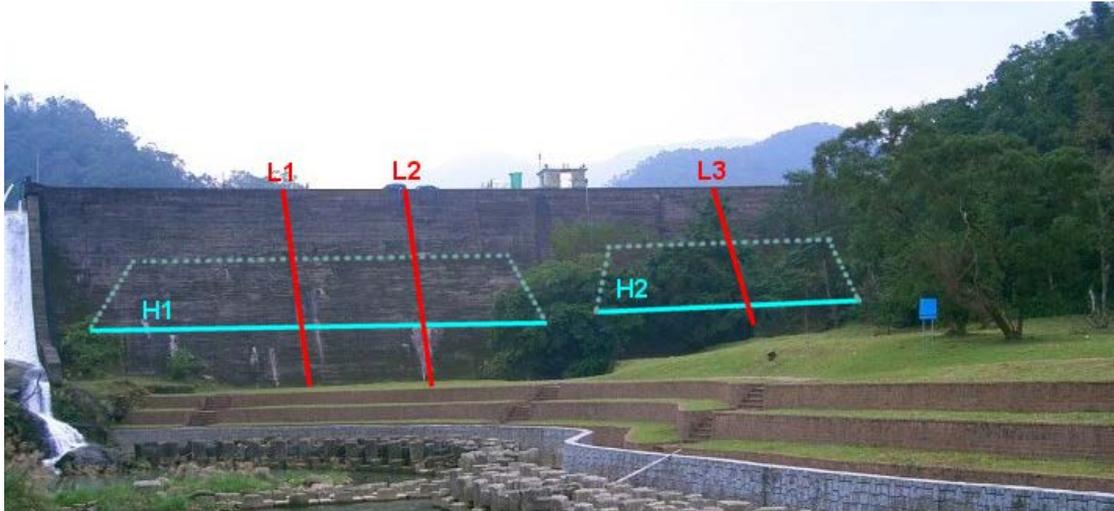


圖 5-27 西勢水庫壩體混凝土強度不足問題地球物理探測技術現地施作規劃示意圖

(四) 西勢水庫現地施作與試驗成果

1. 彈性波層析成像法現地施作與試驗成果

如前所述，西勢水庫壩體檢測依據現場條件及需求，共計規劃五處層析成像速度剖面(如圖 5-27 所示)，測線剖面編號 L1、L2 及 L3 為沿壩軸方向之垂直剖面，以取水工機房為界，L1 與 L2 測線位於右岸側，而 L3 則靠近左岸側，震源設置於下游壩面，而接收器則置於上游壩面(包含水下至淤積庫床處，如圖 5-28 所示)，現場資料收錄使用美國 Geometrics 公司之 Strata View 全功能震測儀，接收器以及震源間距為 1 公尺，接收器為 28Hz 速度型水中受波器(如圖 5-29 所示)，採用橡膠鎚作為人工敲擊式震源，施作時以攀爬掛梯之方式進行敲擊，現場資料以德國 Geotomographie 公司所發展之 GeoTom CG 進行資料反算分析。

H1 與 H2 剖面則為水平走向橫切壩體且向下游方向下傾之剖面，震源設置於下游壩面，沿壩軸方向水平施測；接收器則水平

設置於上游壩面水下之淤積庫床上(如圖 5-30 所示), H1 剖面斜切垂直剖面 L1 與 L2, 下傾角度約 23.56 度; 而 H2 則斜切 L3 剖面, 下傾角度約為 21.67 度。

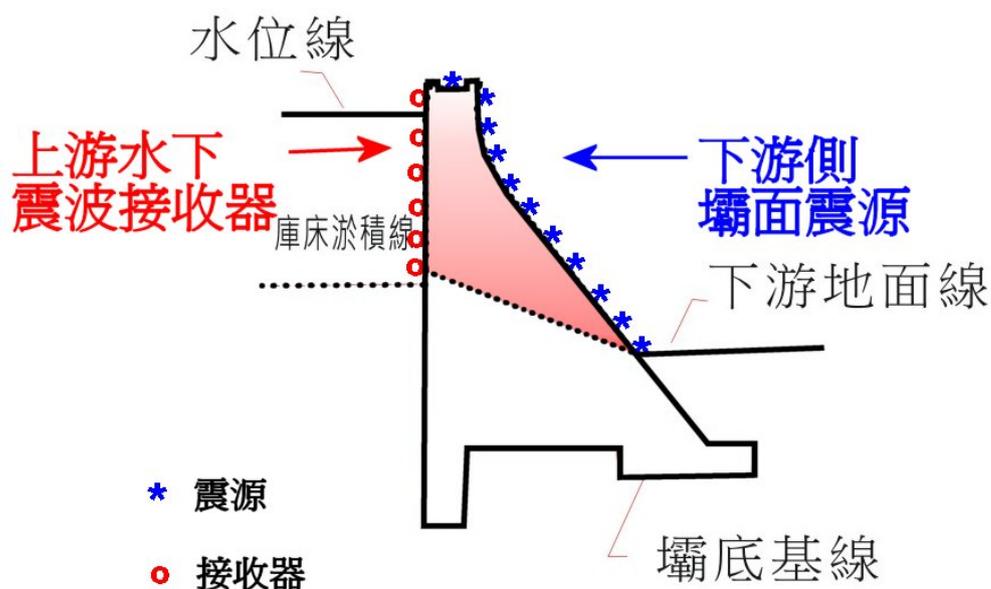


圖 5-28 層析成像垂直剖面(L1~L3)震源及接收器佈置示意圖



圖 5-29 層析成像現場施作情形



圖 5-30 層析成像橫向剖面(H1~H2)震源及接收器佈置示意圖(虛線位於壩體內部至上游側，虛線區為預定速度剖面資料區)

西勢水庫壩體之震波層析成像震波波速剖面結果將根據表 5-1 之震波波速標準以色階呈現，當混凝土之波速高於 3.6km/s 即可分類為品質佳(以 ” G” 來表示)；而速度低於 3.0km/s 則歸類為品質差(Poor)，值得關注的部份；波速介於其間則可視之具可疑性(doubtful)(以” Q” 表示)或須與周遭波速整體評估部份，並考量其整體及局部之波速變異(如波速度漸變或劇變)；接近品質分類之上下界者分別以 ” Q+” 或 ” Q- “ 來表示。

表 5-1 混凝土品質優劣及波速速度分類 (Leslie and Cheeseman, 1949)

分 類	P 波波速 (km/s)
優(Excellent)	高於 4500
佳(Good)	3600~4500
可(Questionable)	3000~3600
差(Poor)	2100~3000
極差(Very Poor)	低於 2100

根據施測結果，茲將速度剖面成果分述如下：

L1 剖面：剖面(如圖 5-31 所示)顯示整體波速呈現由上游向下游方向之帶狀遞減趨勢，高速區皆位於壩體上游側，水平寬度約

4 範圍內，波速達 4.0~4.2km/s 間，屬於品質”佳”之範圍，然於上游壩面表層仍有局部呈現品質超差波速稍低，如標高 67.5~69m 與 71~73m 表層，其約屬”佳”之下界(G-)，其向內部延伸皆在 1m 以內，僅屬輕微劣化程度。

壩體下游側則明顯呈現速度帶狀下降現象，且以標高 65m 左右區分上下兩段，其中標高 65m 以上至壩頂之下游面波速明顯偏低，約 3.0~3.2 km/s，屬品質”可” (Q-)之底限，其向內部延伸約 1~2m 垂直帶狀分布，其中以標高 65.5~69m 範圍最明顯，其中於標高 70m 左右向壩體內部延伸速度有降低之水平帶狀出現，雖速度仍在”可” (Q+)的範圍，但其為內部窄幅帶狀，仍不可忽視，值得注意；標高 65m 以下之下游側壩體則整體速度稍低，且均勻下降，整體呈現較為均勻之速度，品質於”可” (Q+)至”佳” (G-)的範圍，然波速仍較若上游側為低。標高 60m 至壩趾地面線範圍則多呈現穩定之波速品質等級”可” (Q)，其內部深部範圍超過 5m 以上。

L2 剖面：L2 測線剖面結果(如圖 5-32 所示)整體波速呈現與剖面 L1 類似，波速範圍亦介於 3.0~4.2 km/s 間，多數屬品質”可”~”佳”範圍。仍以上游側水平範圍 4m 內波速最高，上游壩面僅局部輕微弱化(標高 66.5~69m)弱化深度在 0.5m~1m 範圍內；下游壩面仍呈現整體均勻速度下降，其品質範圍仍屬”可” (Q)範圍，但仍有幾處已至品質”可”之下界(Q-)，如標高 67~70.m、63~64.5m 處，後者更有朝壩體內部大範圍延伸擴大之趨勢(深度約向內部 2m 左右)，該處其與 L1 相較波速下降幅度較為明顯；標高 60m 至壩趾地面線範圍與 L1 結果相同，內部皆屬”可” (Q)之範圍。

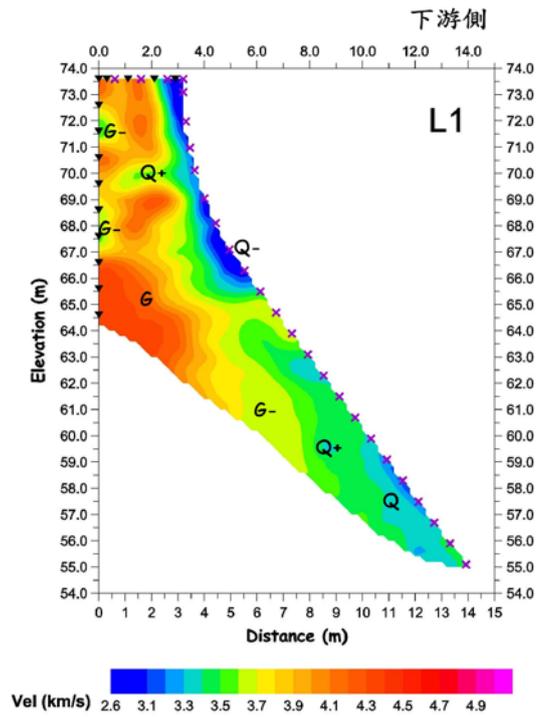


圖 5-31 測線 L1 速度分布剖面圖(▼表接收器；×表震源位置)

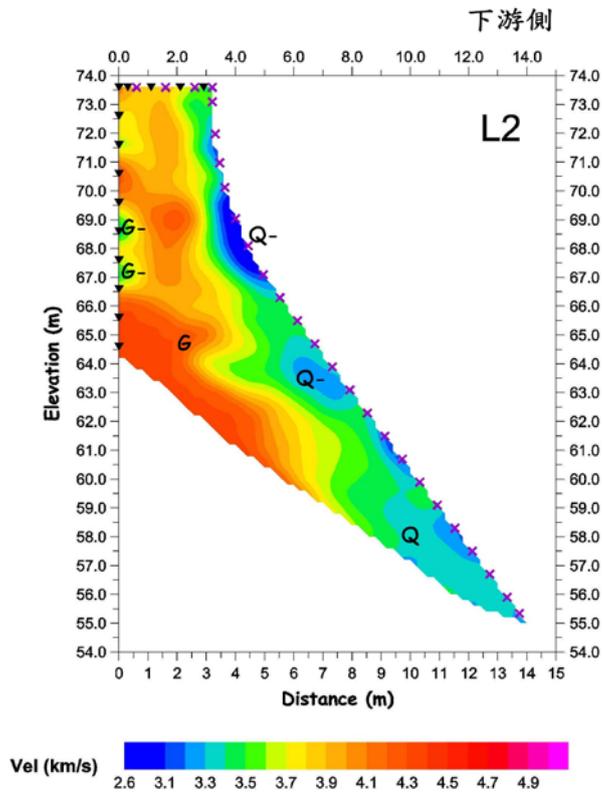


圖 5-32 測線 L2 速度分布剖面圖(▼表接收器；×表震源位置)

L3 剖面：剖面結果(如圖 5-33 所示)與前述二剖面結果特性相近，上游側局部低速(G-)位於標高 67~68.5m 附近，弱化輕微；下游側表面仍有局部低速出現，其中以標高 67~70m 與 64~65.5m 最為明顯，前者品質分類已至”可”下界(Q-)，惟深度在 1m 以內，尚屬輕微劣化處，後者品質仍屬”可”(Q)等級，內部波速等級仍屬”佳”(G-)範圍，然其向壩體內部延伸屬大範圍波速下降，向內延伸趨勢約有 2~3m 左右，其與 L2 剖面有類似情形出現；下游側標高 61m 以下速度仍有波速較低現象，其與 L1 與 L2 結果類似，惟地面線較高，推測底部壩體深部與前述結果類似。

H1 剖面：H1 剖面與測線 L1 與 L2 剖面之下半部剖面斜交，由速度剖面結果(如圖 5-34 所示)顯示，其波速由上游側向下游側呈現沿壩軸方向帶狀分布至為明顯，高波速範圍(G)位於上游側 4~5m 範圍，整體上品質多屬”佳”範圍(G)，上游壩面二處波速有輕微略降處皆位於 L1 與 L2 測線間，仍屬”佳”(G-)範圍；下游側沿壩軸方向仍屬整體波速降低範圍，其側向延伸尚稱均勻，僅在下游近壩面附近才出現接近等級”可”下界之相對低速區(Q-)，均屬局部之表層弱化，並無明顯向壩體內部(向上游側)出現明顯低速帶狀延伸現象，惟於剖面下游側靠近左岸側之相對低速範圍較廣，推測其應與排砂道與取水工結構有關。

H2 剖面：H2 剖面與測線 L3 剖面之下半部剖面斜交，速度剖面結果(如圖 5-35 所示)顯示，其波速由上游側向下游側仍呈現沿壩軸方向帶狀分布，整體而言相對高速區域尚稱均勻，僅於右岸側有極小範圍輕微弱化現象；下游側則亦呈現沿壩軸方向表層相對低速帶狀分布(等級”可”)，其向壩體內部影響深度約

1~1.5m 範圍(Q-)，尚稱輕微；較為明顯之速度低區位於下游右岸側 2.5m 範圍處，其與 H1 下游左岸側之低速區似乎皆與排砂道及取水工構造結構有關，惟其品質等級皆尚能維持於”可”(Q-)範圍。

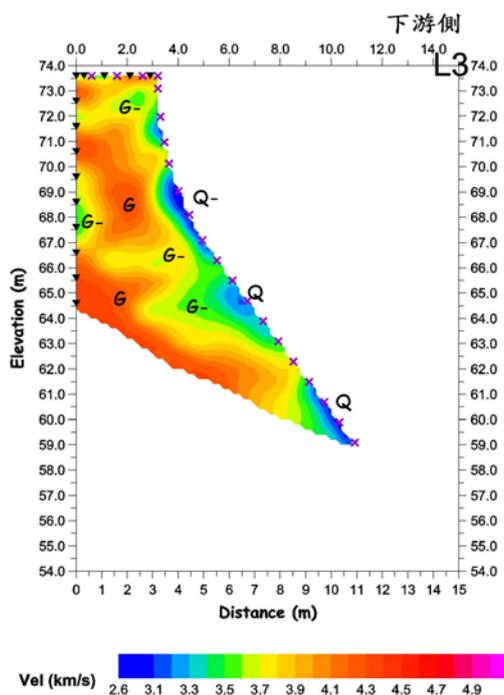


圖 5-33 測線 L3 速度分布剖面圖(▼表接收器；X表震源位置)

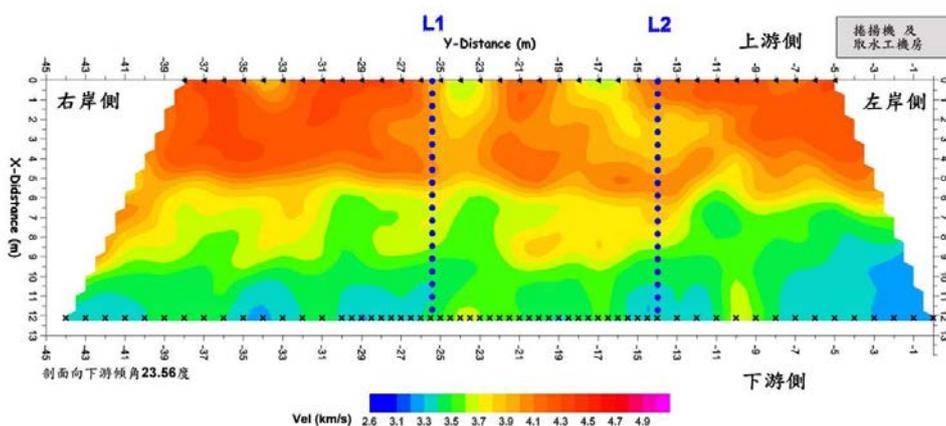


圖 5-34 測線 H1 速度分布剖面圖(▼表接收器；X表震源位置)

2. 綜合判釋

綜合西勢水庫混凝土壩體施測之波速層析成像結果，依測線相對位置及傾斜角度，將其整合繪製如圖 5-36 所示，波速層析成像檢測結果顯示，其整體波速約於 3.0~4.2 km/s 範圍間，最低速區仍可達品質分類”可”之下界(Q-)，且皆出現於下游壩面表層附近，其向壩體內部弱化多僅限於 1~2m 範圍尚屬輕微弱化，且其波速降低多呈現沿壩軸方向均勻帶狀分布，尚稱均勻，並無明顯因破裂劣化造成之明顯向內部延伸之弱帶出現；沿壩軸方向，側向之速度變化尚稱均勻，帶狀分布明顯，整體而言可發現由下游向內部速度之變化率似乎有從左岸向右岸側漸增現象(高速區範圍漸向上游側退縮)，但並未發現有局部明顯低速帶延伸至高波速區域；再則，於取水工附近壩體下游側，於二側向剖面皆有較明顯大範圍的速度低區出現，雖該區域位於剖面邊界附近，震波資料量稍嫌不足，但其速度變化甚為明顯，應不可忽略其存在之可能性。

而由此探測結果可合理說明在西勢水庫第三次安全評估報告中所獲得之混凝土強度成果偏低主要原因在於其僅在壩體下游面表面施作，壩體下游表面受時間以及風化之影響較為嚴重，而使得探測結果顯示混凝土強度不足之疑慮，而由此彈性波速層析成像成果可進一步瞭解壩體內部整體而言並無太大混凝土強度不足之疑慮，再次顯示地球物理探測技術在壩體檢測上相較其他僅能獲得表層資訊之調查技術的優點。

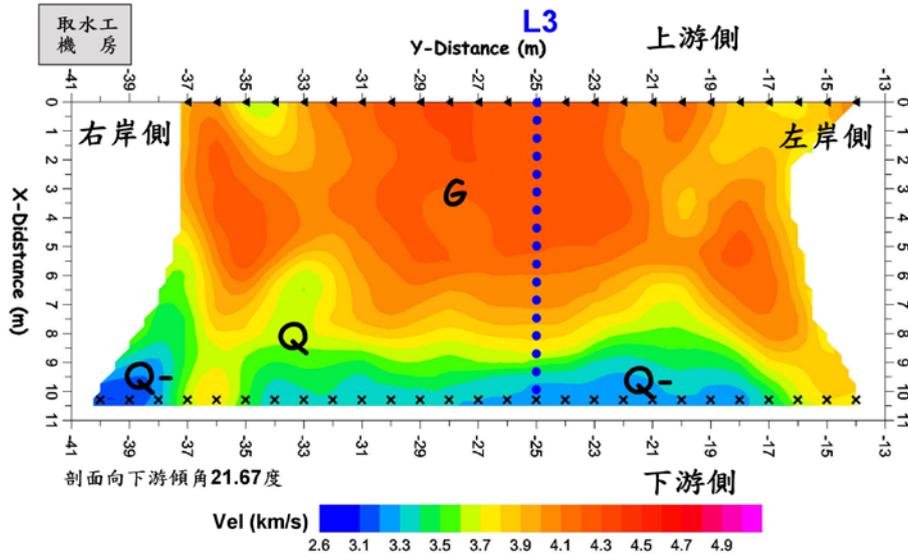


圖 5-35 測線 H2 速度分布剖面圖(▼表接收器；×表震源位置)

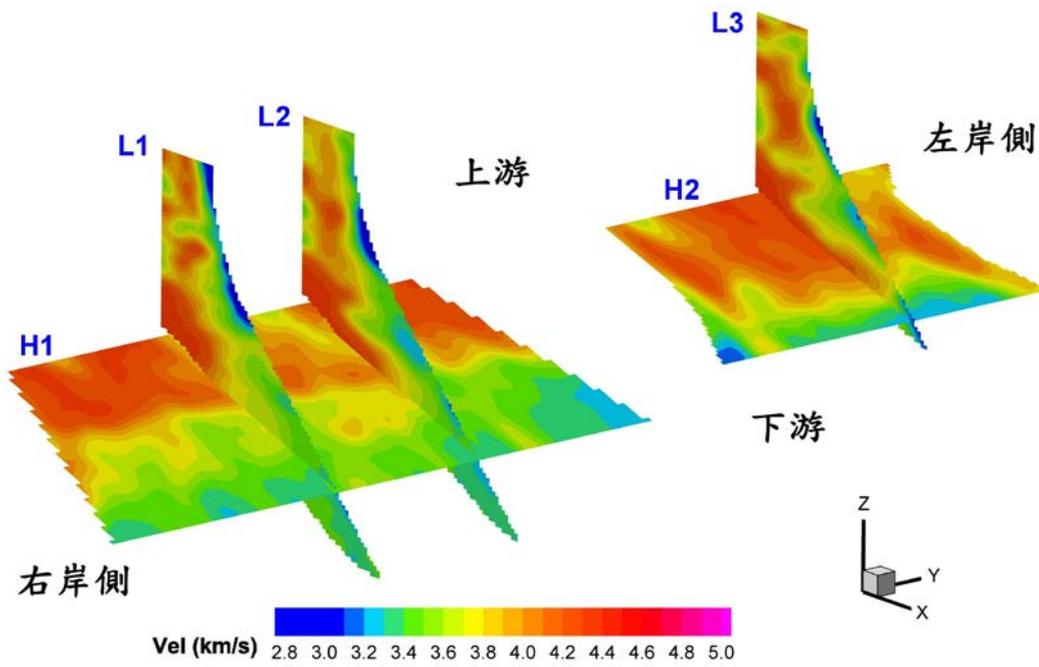


圖 5-36 西勢水庫震波層析成像速度剖面柵狀圖

第陸章 水庫構造物安全檢查教育訓練

本中心致力於「蓄水庫安全評估報告審查協助與教育訓練」工作經歷數年，並完成數十場相關內容之教育訓練，深感水庫安全實為重要，而水庫安全評估執行單位之執行能力以及相關專業素養至為關鍵，本計畫之執行成果對此一課題實有極大之助力，因此將針對本計畫之多項重要成果安排設計為課程，邀請水利署水規所及各水資源局、相關學術單位與工程實務單位等進行教育訓練，以期提升各相關單位對此新技術之了解與信賴。

在教育訓練課程之規劃上，以多年來辦理教育訓練之經驗，除了針對水庫構造物安全檢查之應用進行課程說明外，同時亦將規劃有地球物理探測技術的實作體驗，讓參與的學員可在課程中的理論吸收獲得實作體驗的應證，並且加深各學員對這些技術的熟悉度，降低對新興技術的陌生感而達到普遍認知並且有加以應用之意願，而在課後的時間，本中心於教育訓練中精心編撰的課程講義也將可做為各學員的基本資料庫，可在未來的時間中慢慢吸收並提升個人的專業能力。本年度教育訓練課程內容(議程表如表 6-1 所示)包括：(1) 地球物理探測技術介紹；(2) 地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用方法；(3) 地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用方法與案例；(4) 地球物理探測技術實作體驗。

表 6-1 地球物理探測技術於大壩常見安全檢查問題應用教育訓練議程表

時 間	講 題
9 月 27 日 (四)	
08:00~09:00	報到
09:00~10:20	工程地球物理探測技術介紹 主講人：國立交通大學 林志平 教授

10:20~10:40	休息時間
10:40~12:00	地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用導引之介紹 主講人：國立交通大學 林俊宏 博士候選人
12:00~13:00	午餐
13:00~14:20	地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用案例介紹 主講人：國立交通大學 林志平 教授 新中光物理探測公司 謝盛雄 經理
14:20~14:40	休息時間
14:40~16:20	工程地球物理探測技術實作體驗 主講人：國立交通大學 林俊宏
16:20~17:40	地球物理探測技術於大壩常見安全檢查問題應用相關專題綜合討論 【與會講員】

教育訓練已於民國 101 年 9 月 27 日假國立交通大學浩然國際會議廳順利舉辦圓滿結束，與會人士共計有 39 人，其中包括有水利署水資源局、河川局、水利規劃試驗所等政府機關以及台灣電力公司、台灣自來水公司與民間工程顧問人員，教育訓練當日現場情形如圖 6-1 所示，會中詢問討論踴躍，可收推廣之效。



圖 6-1 教育訓練現場情形

於教育訓練期間設計有問卷調查表作為後續教育訓練舉辦改善參考之用，問卷內容如附錄三所示，發出之問卷共計有 39 份，回收之有效問卷共計有 27 份，回收率 69%，在此將就講習內容之調查結果進行問卷成果說明。本問卷在講習內容上主要就講員之專業性、講員之講授內容是否豐富、講員之講授內容是否容易瞭解、講員之講授時間是否足夠以及課程對於水庫壩體安全檢查相關實務是否有助益等五項重點進行調查，每個評分皆是有 1 分至 5 分，1 分為劣，5 分為優，調查結果如圖 6-2 所示，在每個重點上之平均得分皆約為 4.5 分，顯示本次教育訓練所準備之講習內容雖尚有些許不足，但已頗受到參訓者之認同，且講習內容對其水庫管理工作有相當程度的助益。

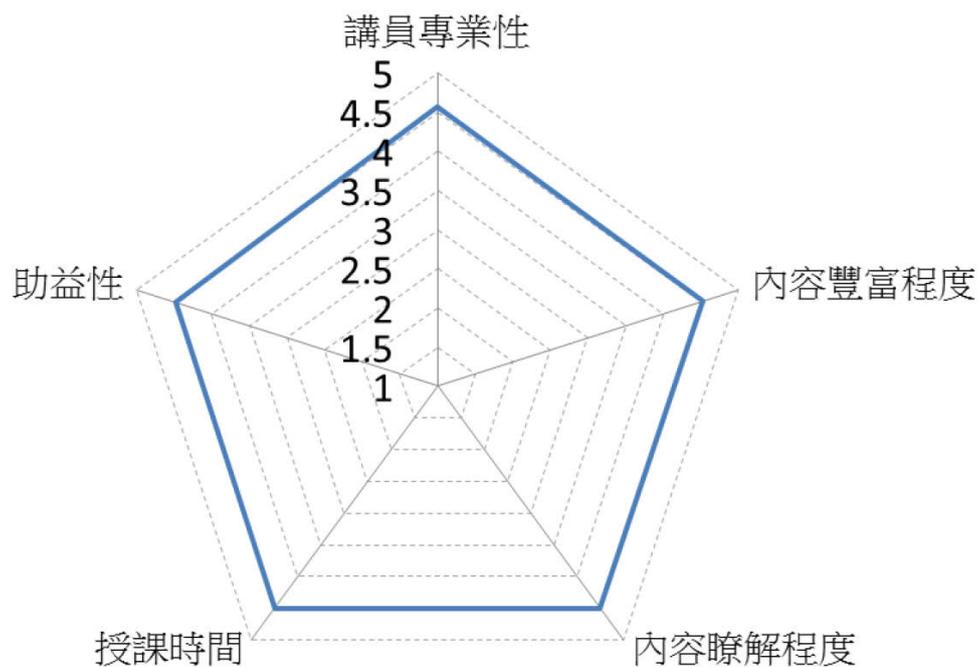


圖 6-2 教育訓練問卷成果

參考文獻

- 台北翡翠水庫管理局，翡翠水庫第三次整體安全檢查與評估計畫報告書，民國 96 年。
- 台灣自來水公司，西勢水庫第三次安全評估報告，民國 97 年 b。
- 台灣自來水公司，新山水庫第二次安全評估總報告，民國 90 年。
- 台灣自來水公司，新山水庫第三次安全評估總報告，民國 97 年 a。
- 台灣自來水公司，仁義潭水庫第二次安全評估報告，民國 98 年。
- 台灣自來水公司，鳳山水庫第三次安全評估及潰壩緊急應變計畫，台灣自來水公司，民國 100 年。
- 台灣自來水公司，蘭潭水庫第三次安全評估報告，民國 98 年。
- 台灣自來水公司，寶山水庫第三次安全評估及潰壩緊急應變計畫報告書，民國 100 年。
- 台北自來水事業處，直潭壩第三次安全評估報告，民國 95 年。
- 台北自來水事業處，青潭堰第三次安全評估報告，民國 95 年。
- 台灣電力股份有限公司，日月潭水庫整體安全檢查與評估現地探查及測試專題報告，民國 81 年。
- 台灣電力公司，日月潭水庫第三次整體安全檢查與評估報告，民國 98 年。
- 台灣電力股份有限公司，銃櫃壩第二次安全評估及潰壩緊急應變計畫，民國 100 年。
- 台灣電力股份有限公司，德基水庫第三次安全評估及潰壩緊急應變計畫報告書，民國 100 年。
- 台灣電力股份有限公司，霧社水庫第 3 次安全評估及潰壩緊急應變計畫，民國 100 年。
- 台灣電力股份有限公司，龍溪壩整體安全評估計畫報告，民國 95 年。

台灣糖業股份有限公司，尖山埤水庫第三次安全評估報告，民國 97 年。

林俊宏、林志平、洪瑛鈞、林正杰（2008），”地球物理檢測方法應用於水庫壩體之適用性探討”，第十七屆水利工程研討會，August 5-6, 2008。

邱維宣，陳洲生，李準勝，林慶仁，姜智文，“應用三維時間域電磁探測技術於基礎工程構造物之研究”，水土保持學報 41(4)：357-370 (2009).

南投農田水利會，頭社水庫第 4 次安全評估及潰壩緊急應變計畫報告書，民國 100 年。

苗栗農田水利會，明德水庫第四次安全評估及潰壩緊急應變計畫報告書，民國 100 年。

嘉南農田水利會，內埔子水庫第三次安全評估報告，民國 98 年。

嘉南農田水利會，鹽水埤與虎頭埤第三次安全評估總報告，民國 97 年。

經濟部水利署，小池水庫水利建造物檢查及安全評估小組蓄水與引水工作分組 98 年度第一次安全複查會議，民國 98 年。

經濟部水利署，水庫安全監測問題評析與非破壞性檢測技術應用之研究，民國 94 年。

經濟部水利署，水庫壩體監測及檢測與安全診斷技術研發(2/3)，民國 96 年。

經濟部水利署，日月潭水庫水利建造物檢查及安全評估小組蓄水與引水工作分組 99 年度第一次安全複查會議，民國 99 年。

經濟部水利署，石門水庫水利建造物檢查及安全評估小組蓄水與引水工作分組 98 年度第二次安全複查會議，民國 98 年。

經濟部水利署，永和山水庫水利建造物檢查及安全評估小組蓄水與引水工作分組 100 年度第一次安全複查會議，民國 100 年。

經濟部水利署，阿公店水庫水利建造物檢查及安全評估小組蓄水與引水工作分組 99 年度第二次安全複查會議，民國 99 年。

經濟部水利署，牡丹水庫第二次安全評估及潰壩緊急應變計畫報告書，民國 100 年。

經濟部水利署，0304 甲仙地震虎頭埤水庫壩體災損改善會議，民國 99 年。

經濟部水利署，鯉魚潭水庫水利建造物檢查及安全評估小組蓄水與引水工作分組 100 年度第一次安全複查會議，民國 100 年。

經濟部水利署，寶山第二水庫水利建造物檢查及安全評估小組蓄水與引水工作分組 96 年度第一次安全複查會議，民國 96 年。

Al-Fares W., “Contribution of the geophysical methods in characterizing the water leakage in Afamia B dam, Syria” *Journal of Applied Geophysics* 75, 464-471, 2011.

ASTM, 2011, “Selecting Surface Geophysical Methods”, Standard Guide D6429-99.

Bradley J.C., “DC Resistivity Induced Polarization and self-potential”, *Advanced Geosciences, Inc.*, Aug. 2011, Taipei.

Cho, I., and Yeom, J.-Y., Crossline resistivity tomography for the delineation of anomalous seepage pathways in an embankment dam: *Geophysics*, 72, G31–G38, 2007.

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

Johansson S., Friberg J., Dahlin T., and Sjö Dahl P., “LONG TERM RESISTIVITY AND SELF POTENTIAL MONITORING OF EMBANKMENT DAMS – Experiences from Hällby and Sädva Dams, Sweden”, *Elforsk Rapport* 05:15, 2005.

Karastathis and Karmis, Investigation of seepage and settlement problems at the Mornos earth dam, Greece, by geophysical methods, *Symposium on the*

- Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, 25th Annual Meeting SAGEEP 2012, Tucson, Arizona, USA, 2012.
- Kepler W. F., Leonard J. Bond, and Dan M. Frangopol, Improved assessment of mass concrete dams using acoustic travel time tomography. Part II-application, *Construction and Building Materials* 14, p.147-156., 2000.
- Kim, J.H., Yi, M.J., Song, Y., Seol, S.J., Kim, K.S., 2007, Application of Geophysical Methods to the safety analysis of an earth dam. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 12, 221-235.
- Moore J.R., A. Boleve, J.W. Sanders, S.D. Glaser, Self-potential investigation of moraine dam seepage, *Journal of Applied Geophysics*, vol. 74, 277-286, 2011.
- O'Neill, A., Matsuoka T., "Dominant higher surface-wave modes and possible inversion pitfalls", *Journal of environmental and engineering geophysics*, 10, pp. 185-201. , 2005.
- Peng, TR, and Wang, CH, "Identification of sources and causes of leakage on a zoned earth dam in northern Taiwan: Hydrological and isotopic evidence", *Applied Geochemistry*, 23, 2438-2451, 2008.
- Sharma, P. V., *Environmental and Engineering Geophysics*, Cambridge University Press, p. 475, 1997
- Song, S. H., Song, Y., and Kwon, B. D., "Application of hydrogeological and geophysical methods to delineate leakage pathways in an earth fill dam" *Exploration Geophysics* 36, 92-96, 2005.
- Spicer B., B. Morris, H. Ugalde , "Structure of the Rambler Rhyolite, Baie Verte Peninsula, Newfoundland: Inversions using UBC-GIF Grav3D and Mag3D", *Journal of Applied Geophysics* 75, 9–18 (2011)
- Steven D. Sloan , Georgios P. Tsoflias, Don W. Steeples, Paul D. Vincent, "High-resolution ultra-shallow subsurface imaging by integrating

near-surface seismic reflection and ground-penetrating radar data in the depth domain”, *Journal of Applied Geophysics* 62, 281–286 (2007).

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

The Society of Exploration Geophysicists of Japan, “Application of Geophysical methods to Engineering and Environmental Problems:”, 2004.

Zhang S.X., Chan Lung.S., “Possible effect of misidentified mode number on Rayleigh wave inversion”, *Journal of Applied Geophysics*, 53, pp. 17-29, 2003.

附錄一 報告審查意見回覆

經濟部水利署水利規劃試驗所

「地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用之研究」委託專業服務案工作執行計畫書審查暨期初簡報會議紀錄

壹、開會時間：101年2月29日（星期三）下午2時30分

貳、開會地點：本所霧峰辦公區A棟4樓會議室

參、主持人：廖副所長培明 記錄：楊光程

工作執行計畫書審查意見回覆	
中興大學 蘇教授苗彬	
審查意見	處理情形
一、對既有資料整理，如混凝土壩災害成因均為設計與施工不良，則為甲方的問題，是否有天災的部份。	有些係因設計外在條件之改變，成因之用語已修正如表 2-2。
二、地物探測已有很多年，其應用已有很多個案報告，應儘量整理可得之資料，以求事半功倍。	誠如委員所言，本中心已收集有數十筆國內外應用案例，將陸續整理後於期中報告內容中呈現，已整理完成者請參閱第參章第二節。
三、工作團隊自數年前即已支援署裡的研究，如報告 P50 所述，過去累積的成果應表現在計畫中。	本中心對此計畫之整體執行概念即為過去累積經驗之呈現，將在應用案例蒐集及適用性評估中適當引入本研究報告中。
四、地物探測很重要的在於解析能力，尤其是地下的不確定性很高，如何確定結果應加強說明。	此部份為本計畫之工作內容之一，探測成果在未鑽探或開挖前並無法確認，因此本計畫是以避免過度解讀之角度進行此方法之說明，請參見第參章第三節之說明
五、對將來手冊的編撰，以水庫管理人員為使用人是否恰當，需要專業人員及儀器設備才能實施。	手冊主要目的在於使水庫管理人員具備有標案撰寫以及成果驗收之能力，並非使其瞭解操作並進行操作，在此前提下，應無不妥。
六、擬定選擇兩處水庫安全評估案施	本計畫中之現地評估工作是為評估

<p>作，是否有預定的對象，是否足夠作為手冊編定的依據。</p>	<p>所計畫建立之適用方法選取是否恰當，而地球物理探測技術之適用性部分除於現地評估中測試外，另有國內外案例收集(第參章第二節)做輔助。</p>
<p>陳顧問茂生</p>	
<p>審查意見</p>	<p>處理情形</p>
<p>一、傳統之非破壞性物理檢測之延用，與地球物理探測之差異及其效益、經濟性，請於選用時作研討。</p>	<p>地球物理探測就方法上言，亦屬非破壞性試驗之一類，惟習慣上過去非破壞性試驗較專指金屬、混凝土材料等施作尺度在數十公分等級之方法，與地球物理探測技術是在公尺以上之尺度有別，兩者之適用範圍與調查內容有所差異，無效益比較之問題。</p>
<p>二、請檢討舉例各項水庫安全檢查項目中，可適當應用之檢測方法及工具，以便工作人員參酌。</p>	<p>請參閱第肆章第二節。</p>
<p>三、水庫安全檢查所需精密度與檢測方法之經濟、時效與便利性之研討。</p>	<p>本計畫將針對地球物理方法能夠提供的解析能力及可能的限制進行討論，以作為安全評估之適當應用。本計畫之主要緣起之一即在有鑑於鑽探方法不是非破壞性，且經濟、時效與便利性不佳，探討如何適當的應用地球物理方法，計畫工作項目將不特別探討其經濟、時效與便利性。</p>
<p>四、水庫週邊環境原始之地球物理基礎資料參數之調查，影響水庫安全分析相關之基礎資料如何建立？規劃、調查、設計施工與蓄水各階段之技術規範？以利營運階段監測成果之比對。</p>	<p>委員提出之問題極具重要性，惟本計畫主要著重於在既有水庫構造物之應用。</p>
<p>林委員火木</p>	
<p>審查意見</p>	<p>處理情形</p>
<p>一、地球物理探測技術彙集示範案例以石岡壩為主其為混凝土壩，應用方法與本計畫研擬之方式相關性如何，而土石壩又是如何示</p>	<p>此案例主要是為說明本計畫在執行「應用案例收集」之案例整理方法，後續將依此一格式進行不同案例(包含土石壩與混凝土壩)收集工作，請見第參章第二節。</p>

範建請說明。	
二、各種探測法常見之誤差為何？是否有對應修正之方法與驗證方式建請說明。	本工作將於本計畫中執行，請參見 第參章第三節 。
三、表 3-1 中混凝土壩與土石壩常見潛在破壞模式有 13 項其中混凝土壩佔 5 項，土石壩為 8 項，此表能否加列欄位說明象徵壩堰之名稱及可擇用物理探測法輔助，可得快速與實際成效，請參酌。	遵照辦理，請參閱 表 2-2 。
四、對於既設壩堰中，目前埋設觀測、監測系統為配合地球物理探測技術方法之應用，有無應增設之相關觀測、監測系統，建請納入評析，必要時並提建議。	若有監測資料可搭配結果判釋會比較佳情況，但所需者以孔內之資料為主，於既有壩體之增設尚須考慮其迫切性及管理單位之認可。另外相關監測系統之建議，需視個別水庫之狀況而定，已列於水庫安全評估之工作項目中，不在本研究範圍內。
國立中央大學地球科學系 陳教授洲生（書面意見）	
審查意見	處理情形
<p>一、本研究案之水庫安全檢查工作執行計畫內容正確豐富，方法具體可行並具有以下特色，包括：</p> <p>1、本研究以水庫管理者使用為主，以調查之目標物為索引導向之地球物理探測技術，用於水庫構造物安全檢查，是相當務實可行之水庫安全檢查方法。</p> <p>2、所研訂之地球物理探測技術用於水庫構造物安全檢查應用手冊，參考美、日等先進國家之相關資料，以 ASTM 評分表方式將問題與可用之地球物理探測技術結合，提供快速的選擇使用，當執行時，可再參照日本地球物理探勘協會之技術介紹，內容相當豐富完整。</p>	感謝委員對本中心工作構想之認同。

<p>3、透過對於國內外之案例的蒐集，並針對應用過程以及結果進行評析，使用者可快速地認知單一判釋解讀技巧，並且可進一步了解數種地球物理方法聯合使用時之綜合判釋技巧，極具參考價值。</p>	
<p>二、地球物理探測雖屬非破壞性檢測，但由於水庫構造物之敏感度極高，安全檢查仍應優先考慮採取被動式波源方式檢測，以減少對水庫構造物之衝擊，如自然電位法、微震波法等等，如果因訊雜比之要求而必需考慮主動式波源檢測，也以感應式波源，如透地雷達或電磁法為主，主動式波源檢測法中，地電阻法又優先於折射(或反射)震測。</p>	<p>各地球物理方法在不同水庫構造物之適用性將予以探討，除了波源之考量，主要在於安全問題之相關物理量，其可能造成之傷害亦為探討之一部份，而當對某一安全檢查問題有多種地球物理探測方法可使用時，可加以考慮較不傷害構造物之方法，但整體仍應以可達到施測目標為主要考量。</p>
<p>三、將地球物理探測之資料反演成材料之物理參數是屬於非唯一性之數學解，因此選擇最適解以反應其工程問題變成十分重要，一般選擇最適解之方式有許多方法，但已知條件之約制是或缺之技術，此包括井資料收集、樣體試驗甚至於現場資料收集、比對等等，建議可包括於工作執行計畫中。</p>	<p>此為探測結果之判釋的部份，係為應用地球物理方法之概念，本中心擬於案例收集中，透過實際案例之應用來加以呈現，而使得此概念可更加具體。</p>
<p>四、地球物理探測技術有一定的空間解析能力，但聯合使用數種地球物理方法，再予以綜合判釋是有希望補足，工作執行計畫書中雖已提及，仍建議加強。再者地球物理 4D 探測（空間加時間，亦即監測）可進一步提高地球物理探測之解析能力，是目前地球物理探測技術主流趨勢，建議工作執行計畫書中應考慮。</p>	<p>如委員所述，聯合應用具有其利基，此優勢擬以實際案例呈現。而地球物理 4D 探測確實為最新之趨勢，然竊以為其主要是進一步將地探檢測提升為監測，並透過時序資料降低反算結果可能之特定誤差及瞭解環境變動之相關性而非可提高探測之解析能力，會於各方法之分析方法中加以補充說明。</p>
<p>水利規劃試驗所 曾課長國柱</p>	

審查意見	處理情形
一、交大團隊研擬以問題導向、建立應用方法，惟在本工作執行計畫書及簡報之基本資料收集尚不足。	工作執行計畫書以說明本中心對此計畫之執行方法為主，因此未將成果在此階段中呈現，此部份完整內容請見第貳章。
二、請加強收集國內外水庫構造物安全檢查常見問題，以及這些問題被地物探測所應用之案例，予以列表說明，進而導入本計畫工作項目—適用性評估、應用方法建立、使用手冊等。	水庫構造物安全檢查常見問題為本工作之基礎，本中心必會多所收集，詳請參見第參章第二節。
三、現地應用之水庫選定，需考慮探測方法、管理單位意願、代表性、比對驗證等，請與本所大地課研討提出建議。	遵照辦理。
四、預定進度表中，資料收集之時程應延長。	遵照辦理。
五、參考文獻太少，應該再蒐集歸納整理。	工作執行計畫書以說明本中心對此計畫之執行方法為主，故參考文獻較少，後續報告將補充。
經濟部水利署水源經營組 邱助理工程司士恩	
審查意見	處理情形
一、既有水庫安全檢測方法，於相關規範已有明確破壞性及非破壞性方式，本計畫研究目的是否有別於該等方法或該方法作業提升，請確認。	如第參章第一節第一小節之內容所述，根據目前之「水利建造物檢查及安全評估技術規範」中之補充調查與試驗中之說明，雖在混凝土檢驗與水工機械非破壞性檢驗中提及非破壞性檢驗，但並未明確指出何種非破壞性檢驗方式，此外，根據其內容所指主要是為數十公分尺度之非破壞性檢驗方式，與本計畫所提之地球物理探測技術不同。
二、本計畫研究之物探方法未說明破壞性或非破壞性方式辦理，請確認。若涉及未來相關水庫之檢測工作，建請該等管理單位參加。	地球物理探測方法除特殊需求而進行孔內試驗外，皆為非破壞性試驗方法(請見第貳章第二節說明)。本計畫主要為提供管理單位在有地球物理探測試驗需求時，進行標案內容撰寫

	參考之用，未來進行現地評估工作時，將會同管理單位。
三、物理探測方法有限度，對安全問題探討適用性具有盲點，如何客觀研判應於未來內容上加以強調及說明。	本中心對於此部份會進行相關說明，請參見 第參章及附錄二第一章與附錄 A 之說明。
四、本計畫採問題導向（似採取潛在破壞模式），惟該問題對水庫安全可能影響及程度宜先釐清，鑒於目前國內水庫尚屬安全情況下，如何確認該問題性對本研究具有實質意義。	雖然國內水庫大部分屬於安全情況，但仍有一些潛在問題，因為水庫之重要性高，所以仍須謹慎的定期進行水庫安全評估。地球物理方法為協助釐清該問題對於水庫安全可能影響及程度的方法之一，本計畫即在於探討如何利用地球物理方法輔助既有的水庫安全評估。
五、本計畫物探方法若屬最新方式則如何驗證成果宜請說明。	本計畫所納入之最新物探方法將會是具有國內外之應用案例或相關驗證可供參考。且在水庫安全評估之應用，主要在提供輔助資訊，而非單獨提供問題之答案。
六、水庫管理單位針對所管水庫皆訂有水庫安全維護手冊，本計畫成果（依不同壩型）宜融入該手冊內，不宜再另訂手冊，以符執行實際。（方法之應用）	本計畫之手冊應視為將本計畫成果針對水庫管理人員於標案撰寫參考使用此一目的之精簡摘要版本，是否納為水庫安全維護手冊之部份，非本中心之意向所訂。
七、選定水庫 5 座（建議 2 座）皆為土石壩，建請混凝土壩選項。	目前現地測試之水庫尚未確認，將與主辦單位溝通後確認，原則上本中心希望可有土石壩與混凝土壩。
八、石岡壩已非屬永久性結構，似不宜列入案例作探討。	石岡壩之案例是為說明案例收集之一部份，主要闡明安全檢查問題與應用之地探方法間的適用性，與其是否為永久結構無關。
經濟部水利署水源經營組 李副工程司慶平	
審查意見	處理情形
一、台灣水庫情況各異，安全因素均不同，如何應用探測技術？用何種技術？應請列表說明。	此為本計畫之重點，將於本年度陸續進行，煩請參考 第四章 之說明。
二、各探測因素對不同安全因子之探	各個地球物探方法之限制將於本計

測限制性如何？請說明。	畫之成果中說明，可參考第參章第三節及附錄二導引手冊之第一章與附錄 A 之說明。
三、現場調查、補充調查之對象及內容為何？請說明。	現場調查與補充調查之對象及內容於「水利建造物檢查及安全評估技術規範」有所說明，可參閱第貳章第一節之內容。
四、ASTM、SEGT 及 Highway 等應用手冊可參考，但其使用對象均非水庫，台灣情況脆弱的地質及水庫特性，在參考應用上應謹慎。	本報告所提之此三種手冊是做為本計畫手冊架構參考之用，本計畫將針對水庫應用進行研究。
五、報告中，根據近五年水庫安全評估之現場檢查問題進行統計整理，該等問題是否可用於物理探測技術來探測？建請說明。	此問題在本計畫中將加以探討，請見第參章第一節之說明。
六、使用手冊以水庫管理人員為使用人，其內容及對象應請謹慎，一般人員之使用，可能無法僅藉由短期的訓練即可使用，有時甚或會需使用相關儀器，因此，使用手冊的內容，建議應與委託單位再進一步協商確定為宜。	手冊主要目的在於使水庫管理人員具備有標案撰寫以及成果驗收之能力，並非使其瞭解操作並進行操作，在此前提下，目前之內容規劃應無不妥。
水利規劃試驗所大地工程試驗課 楊工程員光程	
審查意見	處理情形
一、基於未來應用考量，安全檢測儀器或方法之研擬，應以簡易方便為原則。	本計畫以提出便利選擇”水庫構造物安全檢查應用之地球物理方法”為目的，與方法本身無關，此外，地球物理探測技術皆需仰賴不同類型的高階儀器及專業人員進行施作，因此就本中心之認知，普及此技術至各管理單位並非本計畫之目的。
二、工作執行計畫所提非破壞性檢測技術，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	各個地球物探方法之限制將於本計畫之成果中說明，可參考附錄二導引手冊之附錄 A 之說明。

參考使用。	
三、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。	此為探測結果之判釋的部份，係為應用地球物理方法之概念，本中心擬於案例收集中，透過實際案例之應用來加以呈現，而使得此概念可更加具體。
四、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該如何執行。	煩請參考第一項審查意見之回覆。
五、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。	常見材料之電阻值會於期中報告中加入，惟電阻值不具惟一性，僅可參考使用；地球物理探測技術是為安全檢測之”輔助工具”，本研究將探討不同問題之適用方法與應用注意事項。
結論	
一、期初簡報及工作執行計畫書審查，原則認可。	感謝委員之認同。
二、期中報告書送達時間為6月20日。	遵照辦理。
三、應用案例之選定及探測計畫，請研擬探測計畫書於4月25日前送達本所，由大地課本於權責核辦。	遵照辦理。
四、應針對不同壩型、安全檢查因素等，研擬地球物理探測技術。	煩請參考第參章第一節之說明。
五、使用手冊適用範圍宜確認，如何能提供水庫管理人員及相關技術服務人員應用，請一併敘明。	遵照辦理，補充說明於第肆章第四節。
六、教育訓練場次、時間與地點宜重	遵照辦理。

<p>新擬訂，俟期中簡報後研提計畫書，送本所核辦。</p>	
<p>七、請依各委員及各單位意見，在合約要求的範圍內於3月12日前將修正稿3份送達本所，由大地課依權責審核。</p>	<p>遵照辦理。</p>

經濟部水利署水利規劃試驗所

「地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用之研究」委託專業服

務案(案號：100104)第 1 次工作會議紀錄

壹、開會時間：101 年 5 月 11 日（星期五）上午 9 時 30 分

貳、開會地點：本所舊正辦公區大地工程試驗課 2 樓會議室

參、主持人：廖副所長培明 記錄：楊光程

第 1 次工作會議紀錄意見回覆	
水利規劃試驗所水資源規劃課 程正工程司運達	
審查意見	處理情形
一、現地測試場址選定原則為何？(現地測試目的為何?)是否以可行性(可及、管理單位可接受)、可展示待解決問題(適合以地物法輔助)、可驗證為方向，完成技術手冊之重點(如何選擇適當技術？施作有何注意事項？技術本身有何限制？及施測結果如何判釋?)之詮釋。	請參閱第伍章第一節以及第參章第三節。
二、請檢討舉例各項水庫安全檢項目中可適當應用之檢測方法及工具，以便工作人員參酌。	請見第肆章第二節。
三、水庫安全檢查所需精密度與檢測方法之經濟與時效與便利性之研討。	安全檢查問題所需之精密度視各問題不同而定，未有一定標準；而各檢測方法與既有之破壞性調查方式皆較具經濟、時效以及便利性。
四、水庫週邊環境原始之地球物理基礎資料參數之調查，影響水庫安全分析相關之基礎資料如何建立？規劃、調查、設計施工與蓄水各階段之技術規範？以利營運階段監測成果之比對。	委員提出之問題極具重要性，惟本計畫主要著重於在既有水庫構造物之應用。

經濟部水利署水源經營組 李副工程司慶平(書面意見)

審查意見	處理情形
<p>一、本計畫目的誠如前言所述：水庫構造物具特殊性，可協助目視檢查無法提供之內部損害情形及可能損害範圍及其路徑過程之問題，對不同問題之選用、可能應用方式以及可能遭遇的問題尚未有明確的瞭解，今僅對國內已檢查出安全問題的水庫各 5 座，並於其中選出土石壩及混凝土壩各一座是否能具代表性？是否能對前述團隊辦理本計畫欲達成的目的有所決定性或可行性的成果？</p>	<p>測試場址之選定是針對全台灣地區具大壩安全檢查問題之水庫進行，請見第伍章第一節說明。本計畫中之現地評估工作是為評估所計畫建立之適用方法選取是否恰當，而地球物理探測技術之適用性部分除於現地評估中測試外，另有國內外案例收集(第參章第二節)做輔助。</p>
<p>二、合約規定至少二座以上的測試，團隊選擇了最少的座數，並且在已知有問題的水庫群中篩選再篩選後各選一座辦理測試，其結果是否僅證明了地球物理探測技術可用於水庫構造物檢查而已？今天如果拿到不知是否有問題的水庫，做相當的探測後，團隊能否判讀該水庫是否有損害之處，或可能損害範圍…等？</p>	<p>本計畫中之現地評估工作是為評估所計畫建立之適用方法選取是否恰當，因此選用兩座已可達到目的。而在未知有安全檢查問題之壩體探測以其先期發現極具重要性，惟本計畫主要著重於在既有水庫構造物之應用。</p>
<p>三、如果需建立地球物理探測技術樣本，依前述各一座的資料是否足夠？如不需樣本，團隊是否能在證明了地球物理探測技術可行之外，該技術是否可提供不同水庫壩齡的場址探測結果並提出如前言所述的期望成果？</p>	<p>本計畫中之現地評估工作是為評估所計畫建立之適用方法選取是否恰當，而地球物理探測技術之適用性部分除於現地評估中測試外，另有國內外案例收集(第參章第二節)做輔助。</p>
<p>四、本計畫是否可以增做？有無必要增做？增做成本是否會增許多？</p>	<p>本計畫中之現地評估工作是為評估所計畫建立之適用方法選取是否恰當，因此選用兩座已可達到目的。</p>
<p>五、是否可以建議選定不同壩齡之水庫(壩齡級距應可再商訂)，逕以</p>	<p>本計畫中之現地評估工作是為評估所計畫建立之適用方法選取是否恰當，因此選用兩座已可達到目的，無</p>

<p>地球物理探測技術探測，配合以 95-100 年間國內具有安全檢查問題之大壩分期探測的樣本資料，建立地球物理探測技術探測結果資料庫，供日後探測成果判讀分析參考應用，並可發展地球物理探測技術更廣的應用層面。</p>	<p>需特別以壩齡進行選取。第參章第二節之案例蒐集整理視為結果資料庫之用途。</p>
<p>水利規劃試驗所大地工程試驗課 曾課長國柱</p>	
<p>審查意見</p>	<p>處理情形</p>
<p>一、表 2.1 名稱水庫與大壩「安全問題」，宜改為「安全檢查發現之問題」，並且將參考文獻以水庫對照列出，以符契約工作「基本資料收集分析」之目的及研究計畫之精神</p>	<p>遵照辦理，如表 2.1 所示。</p>
<p>二、現地測試之水庫建議名單，選擇考量之因素說明不夠清楚，應將考慮之各項因素列表對應到各水庫。</p>	<p>請參閱第五章第一節。</p>
<p>三、現地探測計畫書 P5，建議之理由欠明確說明，顯得凌亂，以至於簡報時提出新山、西勢 2 座水庫之說明力就不充分。</p>	<p>請參閱第五章第一節。</p>
<p>四、新山水庫滲流問題存在已久，過去也已經很多相關調查，本計畫似難有新的發現或結論，建議另擇適當之水庫。</p>	<p>選擇原因請參閱第五章第一節。</p>
<p>水利規劃試驗所大地工程試驗課 楊工程員光程</p>	
<p>審查意見</p>	<p>處理情形</p>
<p>一、本計畫最終目的:提出與計畫名稱相符合之技術。</p>	<p>遵照辦理。</p>
<p>二、建議水庫名單考核依據為何？P7 所提安全檢查問題，適用之地球物理方法有 4~5 種，是否每一種</p>	<p>現地評估試驗場址之選定請參閱第五章第一節。本計畫中之現地評估工作是為評估所計畫建立之適用方法</p>

方法均會使用，以尋求最佳之試驗方法。	選取是否恰當，因此無進行每一種方法之需要，各方法之應用將由案例補充。
三、本計畫透過現地施測實務，目的在於建立適用之地球物理技術應用在構造物安全檢查上，故希望本研究報告最終能達到管理單位可使用之階段。如發現滲漏問題，初步可以採用的地球物理方法有那些…等等。	遵照辦理，請參閱第肆章。
結論	
一、現地測試之水庫選定原則，請交大於期中報告詳細交代。	遵照辦理，請參閱第五章第一節。
二、新山水庫資料較多，水庫安檢問題與本計畫應用之研究相關，原則同意土石壩以新山水庫進行地球物理探測。	遵照辦理，後續工作規劃請見第五章第三節。
三、西勢水庫壩體具裂縫、混凝土有劣化之虞，原則同意混凝土壩以西勢水庫進行地球物理探測。	遵照辦理，後續工作規劃請見第五章第三節。
四、日月潭水庫曾做過地物探測，請交大將相關資料蒐集至本計畫。	遵照辦理，請參閱第參章第二節。
五、上述第二、三點應視本計畫期中簡報審查結果辦理。	遵照辦理。

經濟部水利署水利規劃試驗所

「地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用之研究」委託專業服務案期中報告書審查暨期中簡報會議紀錄

壹、開會時間：101年7月11日（星期三）上午9時30分

貳、開會地點：本所舊正辦公區大地工程試驗課2樓會議室

參、主持人：廖副所長培明(曾課長國柱代理) 記錄：楊光程

期中報告書審查意見回覆	
陳顧問茂生	
審查意見	處理情形
一、經本計畫完成地球物理探測技術於水庫安全檢查，就慣用之設備及特殊案例，具有可供採用之檢查成果供水庫管理單位參考。	本計畫所進行之現地評估工作完成後，將提供完整之探測成果供水庫管理單位參考。
二、茲以水庫構造物遇異常時藉地球物理探測技術檢查時，需將其現象分析，並應用於改善或加強安全管理之用，故希望有可供設計依據之量化參數。	地球物理探測技術所得之物理量與工程需求之參數間雖有關聯性，但有許多次要因子的影響，通用性之參數轉換具有高不確定性。地球物理探測主要的目的在於探查異常區及輔助調查異常機制。
三、現行水庫安全監測，大部份以埋設儀器定期量測，將長期之紀錄分析安全建檔，如將地球物理探測技術亦供常設長期之監測，可提高安全檢核之依據。	地球物理探測技術用於監測為目前國際上積極發展之應用技術，透過適當之規畫可有效提升水庫安全管理之工作，是為未來可積極投入的研究工作，本計畫將於期末報告提出相關建議。
四、自水庫計畫規劃、調查、設計及施工階段，擬具整體計畫，建立環境基礎參數，經施工環境之改變、初次蓄水，至蓄滿水庫之各變化均建立詳細之紀錄分析，列為常用安全檢查，可提高本案技	委員所提可為新建水庫之整體規劃，具有可行性及後續應用性，惟本計畫以既有之水庫構造物為目標，因此對於蓄水前之各階段不另加著墨。

<p>術之應用，並確保管理單位掌握含水、滲流應力、變位等多項安全評核。</p>	
<p>謝委員敬義</p>	
<p>審查意見</p>	<p>處理情形</p>
<p>一、由表 2.1 中顯示，混凝土壩所佔比例較少，且涉及壩體安全之疑慮亦較少，土石壩則以壩體左右山脊滲漏、溢洪道混凝土劣化、龜裂、滲水、壩頂沈陷、壩體下游趾部滲漏（可能引起管湧），疑似土壤液化等問題較多，雖尚不致引起潰壩之慮，但上述這些土石壩所產生的問題則需加以處理以免惡化，引起災害，如何針對這些問題研擬可行、具體的調查方法，以了解產生問題的原因，地球物理調查技術誠如報告中所言，為一種輔助工具，不可視為主要的調查手段。</p> <p>本研究報告中曾針對壩體常見安全檢查問題提出地球物理探測技術之選用表如表 4-1，其中，對於混凝土壩之壩體、壩趾、壩基等之裂縫滲漏，或混凝土強度不足等採用地電阻影像探測法、彈性波層析成像法、多頻道表面波震測法、電磁探測法，有待商榷，因混凝土壩之結構有別於土石壩，多屬垂直或拱型之混凝土版體，上述之施測方法似有困難，國內目前之應用亦無案例(?)，但對於壩座或溢洪道則尚可施行，惟壩座多為壩體與兩岸山脊接觸地帶，恐受地形影響。</p>	<p>誠如委員所言，本報告中多處說明強調地球物理調查技術應搭配不同調查技術同時進行才可獲得合理且有效之成果，其為提供多面向資料之一轉技術而非唯一之調查技術。</p> <p>於垂直或拱型之混凝土版之應用較為困難但並非不可行，於國內已有許多案例，在本計畫之現地評估中亦有應用案例，請參考。</p>
<p>二、地球物理探測技術是一種數理解以及對某一些物理量變異現象的解釋，無法具體而明確指出實</p>	<p>請參閱第一項處理情形。</p>

<p>際問題產生的原因，因此絕不可單獨作為工程問題調查的主要方法，應搭配其他諸如鑽探等探查方法，以驗證地球物理探查中所發現其物理量變異和產生問題的真正原因，以作為後續處理的依據。</p>	
<p>三、以經費為依據進行選用分類不合邏輯，應以解決工程問題為主，選用適當之地物技術，發掘問題所在。</p>	<p>選用分類之基本概念是基於其對問題解決之應用性，更改其用語如第肆章所示。</p>
<p>彭委員瑞國</p>	
<p>審查意見</p>	<p>處理情形</p>
<p>一、期中報告內容均限於水庫大壩之應用，建議針對水利建造物檢查及安全評估技術規範，補充調查與試驗項目中之淤積測量、地質調查（包括水庫蓄水區邊坡穩定）等之地探技術應用也能進行初步探討。</p>	<p>本計畫主要針對壩體檢測，淤積測量已相當成熟，因此未將其納入；另地質調查等其他部分不似壩體與傳統地球物理探測技術之應用領域有相當之特殊性，因此在本計畫中以壩體為主要標的。</p>
<p>二、P.2-8，水庫構造物安全檢查常見問題收集之國內外案例，建議就安全問題之現象、造成原因、相關調查方法綜合整理，並探討可採用地探方法之項目。</p>	<p>目前之案例收集皆囊括此些內容，請參閱第參章第二節。</p>
<p>三、台灣地區土石壩佔大部分，大壩滲漏問題相對重要，本年度計畫建議以土石壩之滲漏調查為重點，建立確實可行之步驟。</p>	<p>本計畫所提之應用方法為針對國內壩體常見安全檢查問題之用，大壩滲漏之問題亦涵蓋其內。在現地評估之部分針對土石壩之滲漏調查作完整性規劃之示範，可為參考。</p>
<p>四、土石壩滲漏調查之地探法應用，建議考量自水庫完工初期、初期蓄水安全評估、運轉後定期及非常期安全評估之長期運用。</p>	<p>委員所提可為新建水庫之整體規劃，具有可行性及後續應用性，惟本計畫以既有之水庫構造物為目標，因此對於蓄水前之各階段不另加著墨。</p>
<p>五、指引手冊編撰時，請考量地探技術運用之角色定位。</p>	<p>請參考導引手冊之第一章內容。</p>

國立中央大學地球科學系 陳教授洲生(書面意見)

審查意見	處理情形
<p>一、本研究案期中報告書之特色，透過對於國內外之案例的蒐集，針對應用過程以及結果進行評析，使用者了解數種地球物理方法聯合使用時之綜合判釋技巧，內容正確豐富，方法具體可行極具參考價值。</p>	<p>感謝委員之認同。</p>
<p>二、地球物理探測技術有一定的空間解析能力，但聯合使用數種地球物理方法，再予以綜合判釋是有可以補足，已如前述，為進一步提高地球物理探測之空間解析度，建議爾後施測時，縮小測點之展距，例如案例一之水社壩，電極距採 5m，若能減至 1m 或更小，將獲致高解析度之成果，案例二石岡壩受波器採 2m，也建議減至 1m 以下，或可獲致工程界之要求水準。</p>	<p>感謝委員之建議，然在實際應用面，本計畫建議仍可根據現場之需求進行調整，以使地球物理探測調查工作可同時達到施作與經費之高效率。</p>
<p>三、地球物理探測雖屬非破壞性檢測，但由於水庫構造物之敏感度極高，安全檢查仍應優先考慮採取被動式波源方式檢測，以減少對水庫構造物之衝擊，如自然電位法、微震波法等等。本研究期中報告書中已有多次引用自然電位法案例，於下一次報告書中，不妨也嘗試微震波法(或表面波法)應用水庫構造物安全檢查之案例，因為考量水庫構造物之堅固與否，速率參數較電阻率為佳。</p>	<p>被動式波源具有其優勢，但往往無法提供足夠之解析度，因此本計畫仍以主動式波源為主要應用技術；而彈性力學參數對於壩體進行力學分析有其必然性，然而力學參數並非調查之唯一目的，因此速度參數與電阻率皆有其可供參考之處。應用表面波震測之案例增加如附錄二導引手冊附錄 B所示。</p>
<p>四、各案例盡可能也提供壩齡參數參考。</p>	<p>國內外案例受限於資料來源，不一定皆可完整之水庫資料，在可獲得其壩齡之案例皆已予補充。</p>

經濟部水利署 鍾科長寬茂	
審查意見	處理情形
一、地物方法規劃流程建請再詳實明確，以問題及水庫實際情況為導向，經費為次。	地物方法之規劃基本概念是基於其對問題解決之應用性，更改經費用語如 第肆章 所示。
二、以“潛在問題之水庫”有所不妥，建請重點在“潛在問題”，不以水庫為之。	本計畫之標的皆在於”潛在問題”，”潛在問題之水庫”僅是作為”潛在問題”之統計歸納之用，並非本計畫之重點。
三、地物探查方法之解析度及深度為何？能否顯示滲流情形（滲徑或 piping）？能否主動探查可能破壞情形？	地物探查方法之解析度及深度估計煩請參閱導引手冊第三章內容；同時適當地電阻、自然電位法及彈性波層析成像法具顯示滲流之能力；恰當選用可主動探查可能破壞情形。
四、國內外水庫物探案例，建請補充水庫壩高、壩長、容量等相關資料。	國內外案例受限於資料來源，不一定皆可有完整之水庫資料，在可獲得其壩高、壩長、容量等相關資料之案例皆已予補充。
五、驗證係為修訂所研提規劃流程，本計畫之驗證實施構想為何？	煩請參閱第五章之內容。
六、報告格式請依所之制式格式修訂，報告中有部分用字誤植，如“側線”、“公哩”等，建請修正。	已修正。
本所大地工程試驗課 楊工程員光程	
審查意見	處理情形
一、根據期中報告書現地評估作業方面，截至目前尚未進行現地施測，有關現地佈設數據，建議縮小測點之展距（1.0m~2.0m），以提高地球物理探測之空間解析度。	本計畫根據現場之需求以使地球物理探測調查工作在可達成調查目的下兼顧施作之效率，因此維持原調查規劃，煩請參閱第五章之內容。
二、教育訓練請製作意見調查表，並	遵照辦理，煩請參見 第陸章 。

將辦理成果納入報告附錄。	
<p>三、附錄二水庫構造物安全檢查應用導引，可否再增加 1 個章節或附錄—「經費估算參考」，包括不同施測方法之單價分析(人力、施測…等等)及招標注意事項，以利水庫管理人員及相關技術人員參考使用。</p>	<p>經費之估算牽涉到各場址之特殊性以及施作難易度之問題，較無法以一致性之估算進行，因此在此不建議增加另章，惟於導引手冊附錄 B 各節中另增加經費計價單位及招標注意事項做為訪價參考。</p>
結論	
<p>一、地物探測方法之選用，應以解決既有問題(或發現潛在問題)為目的，並綜合各選用之考量因素評判，排列出參考之選用順序，不宜以經費為優先考量。</p>	<p>地物方法之選用基本概念是基於其對問題解決之應用性，更改經費用語如第肆章所示。</p>
<p>二、於撰擬地球物理探測應用於水庫構造物安全檢查之導引手冊時，應強調水庫各階段(調查、規劃、調查、設計、施工、營運等)基本資料收集之重要性，及有助地物探測技術應用時之研判分析。</p>	<p>遵照辦理，煩請參見附錄二導引手冊第壹章。</p>
<p>三、為提高計畫成果之廣泛應用性，可於地物探測運用於土石壩滲流問題之探討及預測加強著墨。</p>	<p>本計畫所提之應用方法為針對國內壩體常見安全檢查問題之用，大壩滲漏之問題亦涵蓋其內。在現地評估之部分針對土石壩之滲漏調查作完整性規劃之示範，可為參考。</p>
<p>四、現地測試評估工作，請交通大學掌握計畫期限儘速辦理，並注意作業時之安全。</p>	<p>遵照辦理，已於 9 月 27 日前完成現地測試評估工作。</p>
<p>五、教育訓練規劃，請速提送本所核辦(提送日期請洽大地課)。</p>	<p>遵照辦理，已於 7 月 24 日提送核辦。</p>
<p>六、期中報告及簡報原則同意，後續執行及期末報告，請交通大學參依委員及與會單位人員意見辦理，並於期末報告具體回應。</p>	<p>遵照辦理。</p>

經濟部水利署水利規劃試驗所

「地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用之研究」委託專業服務案期末簡報暨報告書審查會議紀錄

壹、開會時間：101 年 11 月 6 日上午 9 時 30 分

貳、開會地點：本所舊正辦公區大地課 2 樓會議室

參、主持人：廖副所長培明 記錄：楊光程

成果報告初稿審查意見回覆	
中興大學 蘇教授苗彬	
審查意見	處理情形
一、地球探勘理論上非常完整，但在實際應用上有很多其他的影響因子，如何確定其可行性，能分離出欲探測的因子與雜訊，能更有效的看出問題，是最主要的項目。	地物探測技術之理論皆有其基本假設存在，了解這些假設是應用以及解讀上的重要基礎，亦是可行性判斷最根本的部分；而不同因子的影響與徹底分離有時非常困難，其在於問題與物理量間並非一對一關係，因此透過多種地球物理探測之聯合應用以及綜合不同調查方法之結果可最佳化對問題的瞭解進而獲得結論。
二、案例說明中應特別評定其成果，報告中的案例，多只有結果，無法進一步評定確實與否，是否最佳、是否唯一，有否更佳方案等。	實際上無法評定過去案例探測結果的準確性，但在方法適用之認定上，以其是否可提供解決或回答欲探查問題之有效輔助資訊為標準，就此來說，在案例中之探測結果皆可滿足此一標準。
三、P.2-10 的表 2-1，許多的水庫大壩有安全性的問題，評定完後是否有後續追蹤與其他方法的驗證，這麼多水庫有問題，怎麼辦？是否不重要或問題不大。	該表目的為整理國內常見安全檢查問題，僅針對各安全檢查報告或安全複查所明列之內容表列，其處理及改善情形已於水庫安全評估相關工作中按優先等級列入追蹤，非本計畫之範圍。
四、如 P.5-39 新山水庫探勘測定完	現場評估主要是針對本計畫所提出

<p>成，所作成的研判是否合理，是否排水系統無法發揮功能。仍營運中，改善工程沒有發揮效果。</p>	<p>之系統性選用方法是否適用進行評估測試，所作之研判是地球物理應用後的成果，其與現場之監測資料吻合，但是否正確需進一步進行驗證，非本計畫之計畫範圍，將提供探測結果與建議給營運單位參考。</p>
<p>五、地物探勘本來就有很多影響因子，較適合做大範圍檢測，用來發現問題，有疑似問題點，應結合監測系統及後續補充調查來確定問題與規模，不可有過多推測。</p>	<p>地物探測結果之判釋如委員所言應搭配監測系統以及其他調查之成果進行綜合判釋以獲得最佳成果。地物除了可用於發現問題，對於已存在問題的可能機制調查，亦有發揮的空間，綜合各項資訊合理推測問題發生的機制即是綜合判釋中最重要的一環，結果可作為後續決策參考。</p>
<p>六、地物的研判應注意可能受構造物的影響，研判應力求合理，如新山探測不到心層，是否測試的侷限性，探測是否有重複性乾濕變化等。</p>	<p>新山水庫之地電阻探測成果並非探測不到心層，而是心層處之電阻值較典型的黏土層高，因此建議可進一步探討。</p>
<p>陳顧問茂生</p>	
<p>審查意見</p>	<p>處理情形</p>
<p>一、經本計畫研究提出「地球物理探測技術於水庫構造安全檢查應用導引手冊稿」可供便利選用適當之探測技術，如再增加所需經費與經濟效益評析，則更為實用。</p>	<p>感謝委員認同。相較於提供各項單價，在導引中提供經費估計的各項考量要點，建議各單價還是應採用訪價之方式取得會較具時效性。</p>
<p>二、常見安全檢查問題，地球物理探測技術選用索引表中，如增加傳統之相對替代方法作比較，及所列多項地球物理探測之更精準更迅速、更經濟與非破壞等優良事項，便於參考應用。</p>	<p>針對各項不同安全檢查問題之調查方法眾多，且已在工程界普遍應用，本計畫主要在地球物理探測技術之應用上，因此未予納入。</p>
<p>三、地球物理探測技術已相當普遍應用於水庫安全檢查，惟探測設備之日新月異，如有編擬招標採購</p>	<p>對於編擬招標採購之注意事項已於導引之附錄 A 中明列。</p>

規範要領，供實務之參考。	
四、期中報告所提示有關長期有系統監測及建立水庫範圍環境基礎參數以掌握各項安全管理等，於研討列入建議，作後續之研究。	已提出相關概念之後續探討於建議中。
謝委員敬義	
審查意見	處理情形
一、「水利建造物檢查及安全評估技術規範」中，除了壩體本身及附屬結構之外，周邊地質以及集水區地質亦包括在內，其中水庫庫區漏水問題國內外均有案例，如鳳山水庫、龍溪水庫等。因庫區漏水幅員較廣，故其漏水途徑不易經由地質鑽探資料加以判明，若能配合地物探測技術才能獲得較明確的漏水途徑，有助於止漏對策之研擬。本研究多專注於壩體之問題，對於庫區漏水之探測技術較少著墨，請對此方面加以補充。	庫區漏水以及周邊地質等之水庫安全檢查問題皆可應用地球物理探測技術輔助調查，惟本計畫已水庫構造物為主要研究標的，因此在計畫中主要著墨在壩體。
二、導引手冊之內容雖然豐富，但其格式與本研究報告之內容以論述方式撰寫，失去導引手冊以簡明扼要、易查易用之原則，建請斟酌改變其格式(format)，以條列式或表列式，再配合解說案例之引申說明即可。	已將導引手冊內容重組簡化，請見附錄二之內容。
三、提供經濟部水利司民國 81 年所撰寫之「壩工之岩盤開挖」類似之手冊請參考。	感謝委員提供參考。
國立中央大學地球科學系 陳教授洲生（書面意見）	
審查意見	處理情形
一、本研究案透過對於國內外之地球物理探測技術應用於水庫構造	感謝委員之認同。

<p>物安全檢查案例的蒐集，針對應用過程以及結果進行評析，使讀者了解數種地球物理方法聯合使用時之綜合判釋技巧，內容豐富，方法具體可行，極具參考價值，尤其是在短短不到一年期間完成此成果報告，著實難能可貴。為求工作執行計畫更完美，仍建議事項如下。</p>	
<p>二、有關自然電位法施測(P47)，其成功之關鍵在於(1)必需採用非極化電極(成果報告述及)與(2)埋設待穩定後才能觀測記錄，其等待穩定時間可能長達半天(12h)，因此，實務上常常前晚埋設於次日讀值；疏忽(2)往往是自然電位法施測失敗之主因。</p>	<p>感謝委員提供意見，將其補充於附錄二導引手冊之附錄 A 中。</p>
<p>三、有關電磁法施測(P56)，根據發射形式可簡化為兩種：時間域電磁法與頻率域電磁法，前者高效率施測與豐富訊息(極寬頻)但 S/N 低(P2-22 圖 2-8)，而後者 S/N 高，是成果報告電磁法施測章節主題，對時間域電磁法未予任何著墨。又電磁法誤差與限制章節內容(P61)可能誤植自然電位法內容。</p>	<p>關於時間域電磁法，考量其目前可提供之垂直解析度較無法達到工程需求，因此於導引中僅有說明該法之存在，但未針對其進行細部說明。又導引手冊電磁法章節中誤差與限制之誤植已更正。</p>
<p>四、有關地球物理探測技術方面(P.摘-2)可能尚需考慮磁力探測法，因壩體內一定存在鋼筋，有關鋼筋發生問題，考量非破壞性檢測適用性與可達到之探測靈敏度則非磁力探測莫屬。</p>	<p>工程上，鋼筋的檢測以具空間解析度的 GPR 為主，已列入回顧與分析。本計畫之尺度主要將其定位於壩體的部分，土石壩沒有鋼筋的問題，混凝土壩的設計以承壓為主，因此未針對鋼筋檢測與水工構造檢測技術進行回顧與分析。</p>
<p>五、贊同有關地球物理探測水庫構造物監測規劃之建議(P 結-5)，或可能解決壩齡參數對水庫構造物安全影響之問題。本人曾參與大屯火山對台北盆地之防災研</p>	<p>感謝委員認同。</p>

究，計劃團隊們從最初之探查岩漿庫，發展至目前之火山監測，可參考。	
六、有關收集國內外之地球物理探測技術應用 17 案例方面(P3-48)，亦請勿忽略國內外工程顧問公司報告以及國內外物探儀器公司之服務報告之案例，該等案例有時更具體、實用、有效。	在已收集之案例中已有包含國內工程顧問公司以及物探公司之案例，而國外的部分，亦有一至二個確定為國外物探儀器公司之案例。
七、電阻率影像圖(如 P3-46 圖 3-6 等及其他)可能需採色或符號表示，如以目前之黑白影像印刷，將無法區分電阻率高低值(因均屬深黑色)，這對電阻率影像判釋很重要。	成果報告針對現地評估之成果已採彩頁列印。
八、地球物理探測技術選用分類別 A、B、C、1、2…等；具創意(P4-3)，但仍請於而後出現時(如表 2-1 或表 2-2 等及其他)註明其意義以方便讀者閱讀。	已加註於表中。
水利署 曾簡任正工程司國柱	
審查意見	處理情形
一、對於地物探測利用於水庫安全檢查，本計畫已相當程度地提出理論基礎、原則性及通案性之論述。	感謝委員之認可。
二、表 2.1 所列安全檢查問題，應確實摘錄自相關單位正式報告或正式的會議之結論。(避免僅摘錄非結論或節錄發言者之意見)	該表內容主要摘錄自水庫安全評估報告或是安全複查中明列之問題，而非僅是發言者之意見。
三、應用導引手冊之參考文獻要列出來。	闕漏已補充。
四、摘要請依成果逐項交代，但是文字不必長篇，意即工作項目都提到。	已修改如摘要所示。

五、結論敘述過於長篇大論，請以條列式方式，但儘量用圖表、數據表達。	已修改如結論所示。
六、建議水規所對於本計畫成果後續之進一步研究或應用，加以規劃推展，以利本計畫之效益及提供現行各水庫管理單位安全檢查之參考。	轉請業務單位參考。
水利規劃試驗所大地工程試驗課 楊工程員光程	
審查意見	處理情形
一、有關報告出版品統一編號及 ISBN 碼已申請中。	將於成果報告完稿中埔入相關資料。
二、摘要部份請重新節錄，另請補充英文摘要。	已修改摘要並補充英文摘要。
三、地物成果圖，請以彩色頁呈現，以利判讀。	遵照辦理，請見第五章第三節。
四、教育訓練的現況照片，請納入附錄三，問卷調查表請彙整意見概述。	現況照片已於第陸章本文中提供，而問卷調查表中，因無提供意見，因此未有意見彙整之資料。
五、案例成果評定，其所使用之方法是否為最適之方法，抑或有其他方法可使用，請說明。	在方法適用之認定上，以其是否可提供解決或回答欲探查問題之有效輔助資訊為標準，就此來說，在案例中之探測結果皆可滿足此一標準。
六、導引手冊只是提供有那些調查及工作，原理及方法請移至附錄另限制及注意事項亦放至附錄。	已重組修改導引手冊內容，煩請參閱附錄二導引手冊之內容。
結論	
一、期末簡報及期末報告書審查原則認可，依各委員及各單位意見在合約要求的範圍內，作必要的補充與修訂。修訂稿乙式 3 份於 11 月 22 日前送達本所由大地課本於權責自行審查，必要時再召開	遵照辦理。

工作會議審核。	
二、報告書內的用詞用語宜謹慎為之，尤其甚多相關圖表之適用為甚。	遵照辦理，已重新檢視謹慎用字。
三、地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用導引手冊(初稿)，宜依簡單易懂的方式編撰，且讓第一線維管人員能了解地球物理探測技術如何應用在構造物安全檢查上。	已重組修訂內容如附件二導引手冊之內容。
四、摘要(且缺少英文摘要)參考期末簡報資料內容重擬。	遵照辦理，請見摘要與英文摘要。
五、結論與建議亦請一併重擬，尤其在建議上補充如何推廣應用在水庫安全評估。	遵照辦理，請見結論與建議。
六、P.2-10，表 2-1 甚為敏感，宜重擬避免不必要之困擾。	該表內容主要摘錄自水庫安全評估報告或是安全複查中明列之問題，屬於可獲得之資訊，但為避免敏感，重擬如表 2-1 所示。
七、有關現地勘查新山水庫及西勢水庫 2 個案例，結論根據地球物理探查結果與水庫安全檢查不謀而合，但根據初步研判有可能水的來源在何處，因係推測，是否需進一步調查，宜說明。	關於新山水庫之判釋結果，屬根據地物結果的推論，可作為後續調查的重點，列為建議建請管理單位可參考做進一步調查。

附錄二 地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用
導引手冊(初稿)

地球物理探測技術於水庫構造物
安全檢查應用導引
(初稿)



主辦機關：經濟部水利署水利規劃試驗所

執行單位：國立交通大學

中華民國 101 年 12 月

地球物理探測技術於水庫構造物
安全檢查應用導引
(初稿)

主辦機關：經濟部水利署水利規劃試驗所

執行單位：國立交通大學

編著者：林志平

目錄

目錄.....	I
表目錄.....	V
圖目錄.....	VII
第壹章 前言.....	1
一、導引手冊之目的與應用範圍.....	1
二、地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用之角色.....	1
三、地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用之觀念.....	2
第貳章 地球物理探測技術選用.....	3
第參章 地球物理探測方法規劃要點.....	11
一、地電阻影像探測法.....	11
二、自然電位法.....	12
三、電磁探測法.....	13
四、透地雷達探測法.....	15
五、彈性波層析成像法.....	16
六、多頻道表面波震測法.....	17
附錄 A 地球物理探測方法介紹與規劃要點.....	21
一、地球物理探測技術應用概念.....	21
二、地電阻影像探測法.....	22
(一) 大壩安全檢查問題應用.....	22
(二) 原理.....	23
(三) 施測方法與儀器現地適用性調整.....	24
(四) 分析方法與資料判釋須知.....	28
(五) 試驗規劃及招標內容要點.....	29

(六) 可能的誤差以及限制	34
三、自然電位法	35
(一) 大壩安全檢查問題應用	35
(二) 原理	35
(三) 施測方法與儀器現地適用性調整	36
(四) 分析方法與資料判釋須知	38
(五) 試驗規劃及招標內容要點	41
(六) 可能的誤差以及限制	43
四、電磁探測法	44
(一) 大壩安全檢查問題應用	44
(二) 原理	45
(三) 施測方法與儀器現地適用性調整	46
(四) 分析方法與資料判釋須知	48
(五) 試驗規劃及招標內容要點	49
(六) 可能的誤差以及限制	51
五、透地雷達探測法	52
(一) 大壩安全檢查問題應用	52
(二) 原理	53
(三) 施測方法與儀器現地適用性調整	54
(四) 分析方法與資料判釋須知	57
(五) 試驗規劃及招標內容要點	60
(六) 可能的誤差以及限制	63
六、彈性波層析成像法	65
(一) 大壩安全檢查問題應用	65
(二) 原理	66
(三) 施測方法與儀器現地適用性調整	67

(四) 分析方法與資料判釋須知	70
(五) 試驗規劃及招標內容要點	72
(六) 可能的誤差以及限制	76
七、多頻道表面波震測法	77
(一) 大壩安全檢查問題應用	77
(二) 原理	78
(三) 施測方法與儀器現地適用性調整	79
(四) 分析方法與資料判釋須知	85
(五) 試驗規劃及招標內容要點	88
(六) 可能的誤差以及限制	91
八、參考文獻	92
附錄 B 地球物理探測技術應用案例整理	95
一、應用案例蒐集與檢索說明	95
二、臺灣地區	97
(一) 土石壩	97
(二) 混凝土壩	112
三、亞洲地區	125
(一) 土石壩	125
(二) 混凝土壩	151
四、美洲地區	156
(一) 土石壩	156
(二) 混凝土壩	166
五、歐洲地區	169
(一) 土石壩	169

表目錄

表 2-1 混凝土壩常見安全檢查問題地球物理探測技術選用索引表	5
表 2-2 土石壩常見安全檢查問題地球物理探測技術選用索引表	7
表 A-1 地球物理探測技術量測物理量	21
表 A-2 地電阻影像探測法於大壩安全檢查問題之應用	22
表 A-3 地電阻影像探測法電極棒排列模式之施測特性表	31
表 A-4 自然電位法於大壩安全檢查問題之應用	35
表 A-5 電磁探測法於大壩安全檢查問題之應用	44
表 A-6 透地雷達探測法於大壩安全檢查問題之應用	52
表 A-7 常見土層材料之電磁波波速(摘自 Davis and Annan, 1989; Ulriksen,1982)	58
表 A-8 天線頻率選擇建議表(MALA Geoscience)	62
表 A-9 彈性波層析成像法於大壩安全檢查問題之應用	65
表 A-10 多頻道表面波震測法於大壩安全檢查問題之應用	77
表 B-1 地球物理探測技術於大壩安全檢查應用案例索引表	96
表 B-2 混凝土品質優劣及波速速度分類表(Leslie and Cheeseman, 1949)	115
表 B-3 混凝土品質優劣及波速速度分類 (Leslie and Cheeseman, 1949)	123
表 B-4 Barker 壩頂部 5m 層析成像分析結果與已知水平裂隙位置比較	168

表 B-5 水平圓柱體模型之參數.....178

圖目錄

圖 2- 1 地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用流程圖	3
圖 A-1 電探施測示意圖.....	24
圖 A-2 二維地電阻電極排列施測流程(Wenner array).....	25
圖 A-3 三維地電阻電極排列施測示意圖(Dipole-Dipole array)	26
圖 A-4 地電阻探測測線地表與孔內佈設示意圖	27
圖 A-6 自然電位影像平面圖 (Johansson et al., 2005).....	36
圖 A-7 自然電位法電極構造示意圖(摘自 Reynolds, 1997)	37
圖 A-8 一維視電位剖面圖(改繪自 Boleve et al., 2007)	38
圖 A-9 壩體滲流影響之電荷分佈與電位量測結果示意圖(摘自 Bulter and Llopis, 1990)	40
圖 A-10 地下水流動造成之電位分佈示意圖(摘自 Sato et al., 1997)...	41
圖 A-11 電磁探測法原理(Klein and Lajoie, 1980)	45
圖 A-12 電磁探測法平面影像圖(新山水庫).....	46
圖 A-13 電磁探測法 1 維水平剖面分析(Reynolds, 1997)	48
圖 A-14 透地雷達施測原理示意圖(改繪自 Reynolds, 1997)	53
圖 A-15 透地雷達 3D 影像(大觀電廠溢洪道).....	54
圖 A-16 同中點施測法示意圖(改繪自 Reynolds, 1997)	55
圖 A-17 同中點施測法地層電磁波速反算示意圖(改繪自 Reynolds, 1997)	55
圖 A-18 斷層掃描施測法示意圖(摘自 SEGJ, 2004)	56

圖 A-19 透地雷達二維反射訊號影像(混凝土塊體，摘自鄧景龍, 1990)	58
圖 A-20 透地雷達遇有地下掩埋物時之訊號線型示意圖(摘自 SEGJ, 2004)	60
圖 A-21 層析成像反算分析原理	66
圖 A-22 二維地層壓縮波波速剖面	67
圖 A-23 地表及孔內彈性波層析成像施測配置	68
圖 A-25 初達波走時曲線挑選	71
圖 A-26 彈性波層析成像法現場施測參數圖	74
圖 A-27 震波波傳路徑示意圖(謝盛雄等人，2011)	75
圖 A-28 雷利波示意圖 (Bolt, 1976)	78
圖 A-29 多頻道表面波震測法現場施測參數圖	79
圖 A-30 表面波震測影像法案例-交大嘉義校區規劃調查	80
圖 A-31 靜態誤差與縫合動作示意圖	81
圖 A-32 高側向解析施測法概念說明	82
圖 A-33 自由落錘震源系統(修改自經濟部水利署，民國 94 年)	83
圖 A-34 仁義潭殼層表面波震測頻散曲線影像(摘自經濟部水利署，民國 94 年)	84
圖 A-35 多頻道表面波震測分析	85
圖 A-36 地層剪力波速剖面	86
圖 A-37 表面波頻散曲線	87

圖 A-38 二維剪力波速剖面造影技術示意圖	90
圖 B-1 水社壩標準斷面圖(台灣電力公司，民國 98 年).....	97
圖 B-2 水社壩 3D 地電阻探測測線位置圖	98
圖 B-3 水社壩 3D 地電阻探測測線相互關係圖	99
圖 B-4 SE-H 測線 3D 電阻率影像圖(台灣電力公司，民國 98 年)....	100
圖 B-5 SE-L 及 SE-R 測線 3D 電阻率影像圖(修改自台灣電力公司，民國 98 年).....	101
圖 B-6 水社壩地電阻探測綜合判釋結果(台灣電力公司，民國 98 年)	102
圖 B-7 新山水庫滲流區與推估浸潤面	104
圖 B-8 新山水庫電阻法測線佈設及壩體水位高程分布圖	105
圖 B-9 新山水庫壩頂測線 A 與殼層測線 B 電阻率剖面.....	106
圖 B-10 新山水庫可能滲流路徑.....	107
圖 B-11 烏山頭水壩標準斷面圖	109
圖 B-12 施測位置示意圖	109
圖 B-13 測線 1 剪力波速影像剖面圖	110
圖 B-14 測線 2 剪力波速影像剖面圖	111
圖 B-15 石岡壩俯視圖.....	113
圖 B-16 石岡壩溢洪道標準斷面圖	114
圖 B-17 石岡壩墩柱上游測受波器設置圖(經濟部水利署，2011).....	114
圖 B-18 水下受波器(經濟部水利署，2011).....	114

圖 B-19 石岡壩墩柱編號 SP9 混凝土 P 波波速影像剖面圖(謝盛雄等，2011)	115
圖 B-20 石岡壩墩柱與堰體混凝土 P 波波速影像剖面圖(改繪自謝盛雄等，2011)	116
圖 B-21 西勢水庫壩體平面圖	119
圖 B-22 西勢水庫壩體立面圖	119
圖 B-23 西勢水庫壩體混凝土強度不足問題地球物理探測技術現地施作規劃示意圖	121
圖 B-24 層析成像垂直剖面(L1~L3)震源及接收器佈置示意圖	121
圖 B-25 層析成像現場施作情形	122
圖 B-26 層析成像橫向剖面(H1~H2)震源及接收器佈置示意圖(虛線位於壩體內部至上游側，虛線區為預定速度剖面資料區)	122
圖 B-27 西勢水庫震波層析成像速度剖面柵狀圖	124
圖 B-28 Sandong 壩標準斷面圖	125
圖 B-29 Sandong 壩俯視圖	126
圖 B-30 地球物理探測規劃示意圖	127
圖 B-31 地電阻量測結果	128
圖 B-32 自然電位法量測結果	128
圖 B-33 溫度剖面量測結果	129
圖 B-34 壩體平面圖及地電阻影像探測測線規劃示意圖	131
圖 B-35 Line1-Line3 電阻率影像垂直剖面圖	132

圖 B-36 Line1-Line2 電阻率影像水平剖面圖	133
圖 B-37 敘利亞-Afamia B 壩位置圖	134
圖 B-38 敘利亞-Afamia B 壩 D-D1 剖面圖	135
圖 B-39 地球物理探測規劃示意圖	136
圖 B-40 電磁探測量測結果	138
圖 B-41 一維電探量測結果	139
圖 B-42 地電阻量測結果(BP2、BP3 與 BP5).....	140
圖 B-43 地電阻量測結果(BP1 與 BP4).....	141
圖 B-44 Som-Kamla-Amba 三號副壩標準斷面圖	143
圖 B-45 Som-Kamla-Amba 三號副壩地球物理探測試驗規劃	144
圖 B-46 Som-Kamla-Amba 三號副壩自然電位法與地電阻成果	145
圖 B-47 Som-Kamla-Amba 三號副壩自然電位法與地電阻成果	146
圖 B-48 南水水壩標準斷面圖	148
圖 B-49 水上區域透地雷達檢測成果(具驗證處之資料).....	150
圖 B-50 水下區域透地雷達檢測成果(舉例)	150
圖 B-51 三清亭壩衛星照片(摘自谷歌地圖)	152
圖 B-52 三清亭壩透地雷達探測測線規劃	152
圖 B-53 三清亭壩透地雷達探測 L1 成果	153
圖 B-54 三清亭壩透地雷達探測 L2 成果	154
圖 B-55 三清亭壩透地雷達探測 L3 成果	154
圖 B-56 三清亭壩透地雷達探測 L4 成果	154

圖 B-57 三清亭壩透地雷達探測綜合判釋成果	155
圖 B-58 Dana Lake 壩平面圖與現場照片	157
圖 B-59 Dana Lake 壩水平自然電位差影像	159
圖 B-60 Dana Lake 壩一維地電阻剖面施作結果(A)與 section 1 自然電位法垂直剖面數值模擬(B)	160
圖 B-61 Dana Lake 壩 section 2 自然電位法垂直剖面數值模擬結果	161
圖 B-62 Amistad 壩標準斷面	163
圖 B-63 Amistad 壩上游洩水孔位置面(墨西哥側)	163
圖 B-64 Amistad 壩上游壩趾地電阻影像探測結果(400-670 公尺段)	165
圖 B-65 Barker 壩斷面與試驗配置圖	167
圖 B-66 Barker 壩 4-14 之層析成像(左側五條線代表已知的裂隙位置)	167
圖 B-67 Mornos 壩標準斷面圖	170
圖 B-68 Mornos 壩平面圖及彈性波層析成像法測線規劃示意圖	171
圖 B-69 Mornos 壩橫剖面圖及地電阻影像探測測線規劃示意圖	171
圖 B-70 Mornos 壩右壩座地球物理探測結果	172
圖 B-71 Mornos 壩左壩座地球物理探測結果	173
圖 B-72 CBH 壩斷面圖(A)與平面圖(B):BF—排水濾層;N—黏土心層;1—出口管道;2—SP 與地電阻佈線;3—水位面(Rozycki Et. Al, 2006)	175
圖 B-73 CBH 壩之自然電位剖面:1—量測資料;2—擬合模型;F—排	

水濾層位置.....	177
圖 B-74 CBH 壩之殘餘自然電位剖面：1—現地資料；2—擬合模型；F—排水濾層位置；箭頭位置為圓柱體模型的中心點.....	177
圖 B-75 通過排水濾層之地電阻率影像圖，極小電阻率值(<70Ωm)以粗線強調.....	178
圖 B-76 EI Tejo 壩之斷面圖(A)與平面圖(B)：1—SP 剖面；2—出口管道；3—溢洪道.....	180
圖 B-77 EI Tejo 壩之自然電位法剖面圖：1—量測資料；2—擬合模型；虛線為分析模型判斷滲流通道之位置.....	181
圖 B-78 Hällby 壩平面圖：虛線為電極排列位置.....	182
圖 B-79 Hällby 壩斷面圖：①—心層；②—濾層；③—堆石區；④—庫區水；⊗表示電極排列位置.....	183
圖 B-80 庫區水的溫度變化(左)；量測電阻率與其於 18°C 正規化電阻率(右).....	185
圖 B-81 Hällby 左壩頂之視電阻率的原始資料及濾波資料.....	185
圖 B-82 Hällby 左壩上游面視電阻率的原始資料及濾波資料.....	186
圖 B-83 Hällby 左壩頂於 1997-09-24 至 2005-05-08 的中值反算電阻率分布(左)；相對變異反算電阻率分布(右).....	186
圖 B-84 Hällby 左壩頂 5 個不同深度時間序列反算資料.....	187
圖 B-85 Hällby 左壩頂 5 個不同深度時間序列反算資料以 Pole-dipole 排列量測.....	188
圖 B-86 Hällby 右壩下游壩趾 5 個不同深度時間序列反算資料.....	189

圖 B-87 Hällby 左壩上游壩面於 1997-09-24 至 2005-05-08 的中值反算
電阻率分布(左)；相對變異反算電阻率分布(右).....189

圖 B-88 Hällby 左壩上游壩面 5 個不同深度時間序列反算資料190

第壹章 前言

一、導引手冊之目的與應用範圍

臺灣地區水庫之安全檢查主要大部份尚以目視以及監測資料做為最直接之第一手安全診斷基礎，雖然此些資料可做為水庫構造物之安全警示，但其主要為顯露於構造物表面之狀態，無法提供構造物內部之損害情形以及可能損害範圍及其路徑過程，具非破壞性且可快速大面積施作之地球物理探測技術實為一有效之輔助工具。

雖然地球物理探測技術具有其應用於水庫構造物安全檢查之潛力，但因水庫構造物具有其特殊性，與一般地球物理探測技術所應用之場址有所差異，因此針對不同安全檢查問題之選用、可能應用方式以及可能遭遇的問題等進行歸納統整，建立此導引手冊作為地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用之推廣，以期透過應用地球物理探測技術提升水庫構造物安全檢查及其維護營運作業之成效。

本導引手冊主要以水庫構造物之安全檢查問題為應用範圍，其包含大壩整體、培厚區以及溢洪道，但部分安全檢查問題牽涉至與壩體相鄰之山脊或壩座，在應用上可一併適用，無須侷限應用範圍僅至前述水庫構造物區域。

二、地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用之角色

在水庫安全檢查中，地球物理探測技術可做為現地檢查與評估以及補充調查與試驗的一部分，協助提供水庫進行安全評估時額外的壩體資訊，使得水庫工程師可擁有更多元的壩體安全資訊，進行更準確地分析，並獲得更精準的綜合評估結果。

在現場檢查工作中，地球物理探測技術可採用非破壞性的方法協助瞭解水庫構造物內部之情況，而可更有助於對安全問題的先期瞭解

與控制，更明確一點的說明，在現場檢查之工作項目中，地球物理探測技術可有效用於協助地質、壩與堰、附屬結構物以及壩基座及周邊邊坡之應用上。此為第一項地球物理探測技術可應用於水庫構造物安全檢查之處，是為較積極的主動調查部份。

另一項地球物理探測技術可加以應用之處在於補充調查與試驗中，在此地球物理探測技術可做為較被動的針對已發現之問題點進行深入的調查，以瞭解異常現象於整個水庫結構物之影響範圍與情形，甚或加以釐清異常現象之發生機制作為改善規劃支用，此外，透過適當的地球物理探測技術選用，以此調查所得結果尚可獲得後續校核分析所需之材料參數(如楊氏模數或剪力模數)，以「水利建造物檢查及安全評估技術規範(蓄水與引水篇)」中所列之補充調查與試驗項目，可透過地球物理探測技術進行應用者有地質調查、大地力學試驗以及混凝土試驗。

三、地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用之觀念

對於所有的地球物理探測技術而言，其必然存在不具有惟一性的問題，並且每種方法皆有其方法特性，有其解析度、探測深度以及應用狀況的限制，僅單獨依靠單一地球物理探測技術之成果進行現地狀態研判是具有風險的，因此，除透過多種地球物理探測技術應用成果相互比對外，所得到的結果亦必需與現場所得之監測資料、鑽探資料、地質調查等其他調查結果與壩體基本資料進行比對，並透過具有專業訓練以及經驗的判釋人員進行解讀，以免對於結果有過度解讀的錯誤產生。

第貳章 地球物理探測技術選用

使用本導引手冊進行地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用方法選用之流程如圖 2-1 所示，總共是採用三個步驟進行，首先由水庫安全評估之結果或是水庫安全管理人員等處確認安全檢查問題調查之需求，在需求中會獲得安全問題之位置、可能深度以及解析度需求，而後由此需求利用表 2-1、表 2-2 之索引表進行適用之地球物理探測技術選用，在此索引表中可同時獲得適用之地球物理探測技術之選用類別以及參考案例索引，選用類別可作為探測目的及對安全檢查問題之資訊程度之選用考量，最後由最終選定之地球物理探測技術由導引手冊第參章之調查規畫要點內容進行調查規畫，於規畫過程中若對選用之技術或是規畫方式不甚了解或有疑慮時，可以第二步驟中所獲得之參考案例索引，由導引手冊第肆章獲得案例參考。

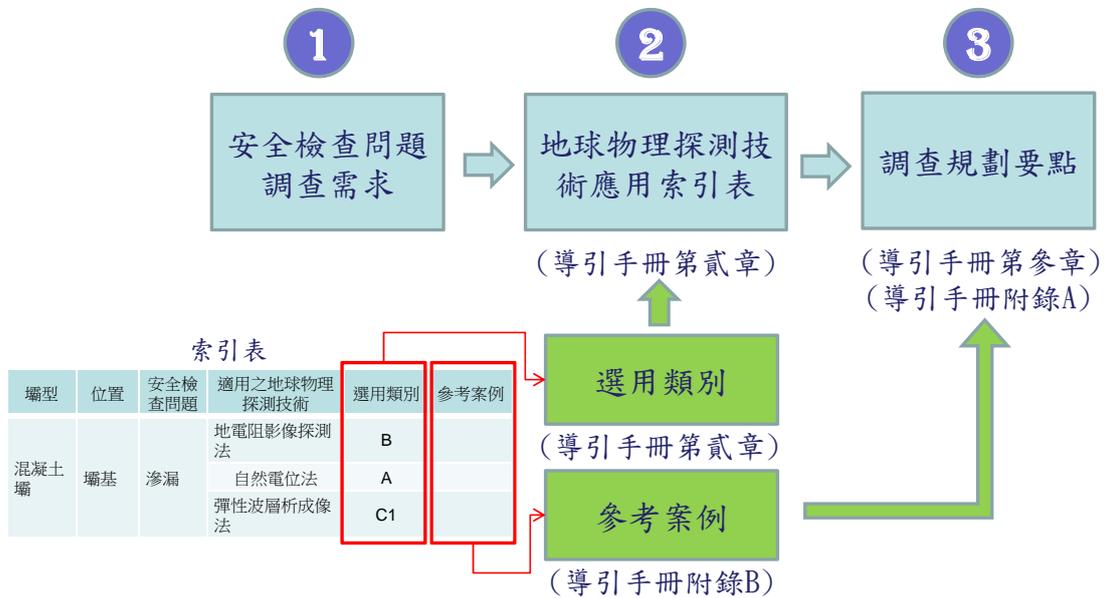


圖 2-1 地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用流程圖

舉例而言，新山水庫於至今三次之安全評估結果中皆顯示在壩體有原因不明之滲流問題，欲使用地球物理探測技術進行壩體內部滲流

狀態之調查，欲進行適用技術之選用，採用本導引手冊遵循前述之三步驟，在第一步驟中，由安全評估報告得知本壩體為土石壩，在壩體有滲流之問題欲加以進行調查，確認需求後進入第二步驟，使用索引表表 2-2，根據「土石壩」「壩體」「滲流」此三項可獲得有「地電阻影像探測法 B」、「自然電位法 A1」、「彈性波層析成像法 C1」、「多頻道表面波震測法 C2」以及「電磁探測法 A2」五種地球物理探測技術可供選用。

表 2-1 混凝土壩常見安全檢查問題地球物理探測技術選用索引表

壩型	位置	安全檢查問題	適用之地球物理探測技術	選用分類	參考案例檢索
混凝土壩	壩體	裂縫	透地雷達探測法	B	美國-Barker 壩-壩體-裂縫-彈性波層析成像法
			地電阻影像探測法	C2	
			彈性波層析成像法	C1	
		滲漏	地電阻探測法	B	中國大陸-三清亭壩-壩體-滲漏-透地雷達探測法
			彈性波層析成像法	C	
		混凝土強度不足	彈性波層析成像法	B	臺灣-石岡壩-壩體-混凝土強度不足-彈性波層析成像法 臺灣-西勢水庫-壩體-混凝土強度不足-彈性波層析成像法
	壩趾	淘空	彈性波層析成像法	B1	N/A
			多頻道表面波震測法	B4	
			地電阻影像探測法	B2	
			透地雷達探測法	B3	
			電磁探測法	A	
	壩基	滲漏	地電阻影像探測法	B	N/A
			自然電位法	A1	
			彈性波層析成像法	C1	
			多頻道表面波震測法	C2	
電磁探測法			A2		
滑動		彈性波層析成像法	B2	N/A	
		多頻道表面波震測法	B3		
		地電阻影像探測法	B1		

壩型	位置	安全檢查問題	適用之地球物理探測技術	選用分類	參考案例檢索	
	壩座	淘空	彈性波層析成像法	B1	N/A	
			多頻道表面波震測法	B4		
			地電阻影像探測法	B2		
			透地雷達探測法	B3		
			電磁探測法	A		
		滲漏	地電阻影像探測法	B		N/A
			自然電位法	A1		
			彈性波層析成像法	C1		
			多頻道表面波震測法	C2		
			電磁探測法	A2		
	溢洪道	滲漏	地電阻影像探測法	B1	N/A	
			彈性波層析成像法	B2		
		裂縫	透地雷達探測法	B	N/A	
			地電阻影像探測法	C2		
			彈性波層析成像法	C1		

選用類別說明：

- A 類別表示該方法可提供快速大範圍之探測，可快速獲得問題的全貌掌握整體趨勢，但並無法進行較為細部在深度或可能範圍中的調查，對於尚無法掌握其整體狀況或具異常區域時可做為對問題最初步之了解；
- B 類別表示該方法可提供深度以及可能範圍之資訊，但應先能大致掌握問題之位置或所在會較佳；
- C 類別則是表示該方法雖可作為應用，但是通常僅較適用於問題已十分嚴重之狀況才會有較好的成果。
- 於類別之後會根據其探測之成效加列 1、2 或 3 的數字，數字小者表其具較高的優先順序。

表 2-2 土石壩常見安全檢查問題地球物理探測技術選用索引表

壩型	位置	安全檢查問題	適用之地球物理探測技術	選用類別	參考案例檢索
土石壩	壩體/壩頂	裂縫	彈性波層析成像法	B2	中國大陸-南水水壩-壩體-裂縫-透地雷達探測法。
			多頻道表面波震測法	C	
			地電阻影像探測法	B1	
			透地雷達探測法	B3	
			電磁探測法	A	
		差異沉陷	彈性波層析成像法	B2	N/A
			多頻道表面波震測法	B3	
			地電阻影像探測法	B1	
			透地雷達探測法	C	
			自然電位法	A1	
	電磁探測法	A2			
	壩體	坡面滑動	多頻道表面波震測法	B	臺灣-烏山頭水壩-壩體-坡面滑動-表面波震測法
		土壤液化	多頻道表面波震測法	B	N/A
		滲漏	地電阻影像探測法	B	臺灣-水社壩-壩體-滲漏-地電阻影像探測法 臺灣-新山水庫-壩體-滲漏-地電阻影像探測法 韓國-中部某壩-壩體-滲漏-地電阻影像探測法 印度-Som-Kamla-Amba壩-壩體-滲漏-地電阻探
			自然電位法	A1	
彈性波層析成像法			C1		

壩型	位置	安全檢查問題	適用之地球物理探測技術	選用類別	參考案例檢索	
			多頻道表面波震測法	C2	測法、自然電位法 美國-Dana Lake 壩-壩體-滲漏-地電阻影像探測法、自然電位法 希臘-Mornos 壩-壩體-滲漏-彈性波層析成像法、地電阻影像探測法 西班牙-CHB 壩-壩體-滲漏-自然電位法、地電阻影像探測法 西班牙-El Tejo 壩-壩體-滲漏-自然電位法	
			電磁探測法	A2		
		淘空	地電阻影像探測法	B1		N/A
			自然電位法	A1		
			彈性波層析成像法	B2		
			多頻道表面波震測法	B3		
		壩趾	滲漏	電磁探測法		A2
				地電阻影像探測法		B
	自然電位法			A1		
	彈性波層析成像法			C1		
	多頻道表面波震測法			C2		
	壩基	滑動	地電阻影像探測法	A2		
			彈性波層析成像法	B3		
			多頻道表面波震測法	B2		
		土壤液化	地電阻影像探測法	B1	N/A	
多頻道表面波震測			B			
滲漏	地電阻探測法	B1	敘利亞-Afamia B 壩-壩基-滲漏-電磁探測法、地			

壩型	位置	安全檢查問題	適用之地球物理探測技術	選用類別	參考案例檢索
			電磁波探測法	A1	美國、墨西哥-Amistad 壩-土石壩(部分混凝土壩)-壩基-滲漏-地電阻影像探測法
			多頻道表面波震測法	C2	
			彈性波層析成像法	C1	
			自然電位法	A2	
	壩座	滲漏	地電阻影像探測法	B	韓國-Sandong 壩-壩座-滲漏-地電阻影像探測法、自然電位法
			自然電位法	A1	
			彈性波層析成像法	C1	
			多頻道表面波震測法	C2	
			電磁探測法	A2	
	溢洪道	底版下積水/淘空	透地雷達	B1	N/A
			地電阻影像探測法	B2	
		滲漏	地電阻影像探測法	B	N/A
			彈性波層析成像法	C	
		裂縫	透地雷達探測法	B	N/A
			地電阻影像探測法	C2	
	彈性波層析成像法	C1			
混凝土強度不足	彈性波層析成像法	B	N/A		
排水廊道	滲漏	地電阻影像探測法	B	N/A	
		彈性波層析成像法	C		
	裂縫	透地雷達探測法	B	N/A	
		地電阻影像探測法	C2		
		彈性波層析成像法	C1		

壩型	位置	安全檢查問題	適用之地球物理探測技術	選用類別	參考案例檢索
	培厚區	滲漏	地電阻影像探測法	B	N/A
			自然電位法	A1	
			彈性波層析成像法	C1	
			多頻道表面波震測法	C2	
			電磁探測法	A2	
<p>選用類別說明：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● A 類別表示該方法可提供快速大範圍之探測，可快速獲得問題的全貌掌握整體趨勢，但並無法進行較為細部在深度或可能範圍中的調查，對於尚無法掌握其整體狀況或具異常區域時可做為對問題最初步之了解； ● B 類別表示該方法可提供深度以及可能範圍之資訊，但應先能大致掌握問題之位置或所在會較佳； ● C 類別則是表示該方法雖可作為應用，但是通常僅較適用於問題已十分嚴重之狀況才會有較好的成果。 ● 於類別之後會根據其探測之成效加列 1、2 或 3 的數字，數字小者表其具較高的優先順序。 					

第參章 地球物理探測方法規劃要點

地球物理探測技術主要於施測後獲得檢測物體之不同物理量，而後由不同問題所反應之物理量變化間接推估工程問題之解答，目前已有各種成熟可供應用之技術，本導引手冊選用地電阻影像探測法、自然電位法、透地雷達探測法、電磁探測法、彈性波層析成像法以及表面波震測法做為可能之應用技術，並扼要說明規劃要點於本章，細節部分可參考附錄 A 之內容。

一、地電阻影像探測法

(一) 應用限制

地電阻影像探測法法主要是利用顆粒與顆粒之間或顆粒間之孔隙液體來傳遞電流，藉由地層中各種材料、地質構造其電阻值之差異性來進行量測判斷，因此對於有極低電阻下方之材料性質，電流無法有效傳遞至地層下方而造成無法正確獲得該層下方之築壩材料參數，而有遮蔽的情形出現；另若上方電阻值過高，則易造成電流有效無法通過，而亦無法有效獲得分層之界面位置，其會造成地層厚度誤判之情形。

(二) 解析能力

探測所得之最高解析度約為電極棒間距之 $1/2$ ，隨著深度的增加會有所降低，一般而言，在土石壩體上之探測採用 5 公尺間距最為常見，而於其他混凝土壩或溢洪道等混凝土結構處則視實際需求而定；而測線展距與探測深度有關，其又與電極棒採用之排列模式有關，可參考表 A-3 進行探測深度的估計。

(三) 規劃要點

1. 進行 2 維地電阻探測時，測線應盡量與壩軸垂直。

2. 避免測線橫跨過落差太大的溝渠或土堤處。
3. 於測線佈設上應注意避開高壓電塔、電波發射台及地下管線。
4. 測線儘可能為直線，避免轉彎角度或曲折過大。
5. 欲調查之可疑區域盡量使其位於測線之中央。

(四) 委託工作說明內容

為使成果可達到探測需求，建議委託工作內容應說明施測目的與目標、施測範圍、施測方式(1 維、2 維、3 維或擬 3 維施測法，是否有限定之電極棒排列模式)、施測數量、施測電極棒排列模式以及要求之報告書內容(詳細說明請見附錄 A)。

(五) 資料判釋須知

資料判釋上，除了需將實際所使用的施測參數解析度加以考量外，由於實務上主要以 2 維地電阻探測為主，應注意 2 維地電阻剖面外的地質結構，其電阻率映射於 2 維地電阻剖面上所造成的 3 維效應影響。

二、自然電位法

(一) 應用限制

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

(二) 解析能力

在水平解析度上，其與測點間的間距有關，較小的間距可有較佳的解析度。而在垂直解析度上並沒有一定，會與電壓差來源

物的大小及深度有關，一般會隨著深度的增加而降低，而其探測深度受到電壓差來源物的大小、深度所影響，一般而言，其探測深度最大可達 60-100 公尺。

(三) 規劃要點

1. 基準電壓之位置，其應要避免置於可能有礦化電位或流動電位之處。
2. 1 維施測之移動電極應將各測點以直線排列，且此測線走向儘量垂直滲流路徑，並採用較密集之間距(10 公分至兩公尺不等)。
3. 2 維施測之移動電極以網格狀設置測點為準則，一般在土石壩的應用採用 5-10 公尺間隔。
4. 移動電極應避開金屬管線、電機裝置等位置。

(四) 委託工作說明內容

為使成果可達到探測需求，建議委託工作內容應說明施測目的與目標、施測範圍、施測方式(線性探測或網格探測)、施測數量以及要求之報告書內容(詳細說明請見附錄 A)。

(五) 資料判釋須知

自然電位法之施測除受雜訊、人造電磁波以及金屬管線之影響外，同時亦受到地體電流以及地形效應之影響。當量測範圍達平方公里時應予以考慮，否則可以忽略不計；而當地形之坡度大於 20 度時，需考慮因地形所造成之影響。

三、電磁探測法

(一) 應用限制

電磁探測法極易受到人工建築物、金屬欄杆、地下金屬管線、通訊系統等人造物的影響而產生量測錯誤，應避免；此外，在極高電阻的情況下，其探測效率會下降，在極低電阻的情況下，量測可能會有非線性的狀況發生。

(二) 解析能力

電磁探測法的側向解析度以及探測深度與發射源和接收線圈的距離有關，通常發射源和接收線圈的距離越大，其側向解析度較差，但探測深度較佳，反之，亦然。

(三) 規劃要點

除了已有之目視以及監測等資料作為調查規劃之協助外，整體測線量測以可均勻分布於欲探測區域為主，然而根據特定施測需求或現場狀況可有下列規劃準則：

1. 採用 1 維水平剖面之施測時，應使測線盡量垂直待測標的。
2. 進行 2 維水平剖面施測時，量測儀器之發送源與接收器之連線應與待測目標物垂直所得結果較佳。
3. 量測點應盡量避免距離建築物過近，並且亦應當與金屬欄杆、地下金屬管線有一定之距離，以避免量測受到金屬之干擾。

(四) 委託工作說明內容

為使成果可達到探測需求，建議委託工作內容應說明施測目的與目標、施測範圍、施測方式(線性探測或網格探測)、施測數量以及要求之報告書內容(詳見附錄 A)。

(五) 資料判釋須知

由於電磁探測法是透過磁通量變化進行之量測，其極易受到人工建築物、金屬欄杆、地下金屬管線、通訊系統等人造物的影響而產生量測錯誤，除施測時應當避免外，亦應當收集施測現場之所有相關構造物之位置，以便在結果判釋時先將此些因素造成之異常狀態排除。

四、透地雷達探測法

(一) 應用限制

透地雷達在高導電度的環境下，電磁波之能量衰減情形嚴重，將會大大降低其有效探測深度，因此，在施測上，若已了解該處之土壤特性如上所述而將無法達到施測目的時，應考慮採用它種檢測方法。此外，對於無法產生良好反射面之處將無法探測得到，此種情形包括有：兩者材料間之電學性質差異不大、土層厚度過薄或是兩者材料間存在有足夠之漸變段。

(二) 解析能力

針對不同的探測深度與解析度需求，可選擇不同的透地雷達天線頻率，大抵來說，較低的頻率可提供較深的探測深度，但解析度較差；而較高的頻率無法有較深的探測深度，但可有較佳的解析度。其所得之垂直解析度可在幾公分至一公尺的範圍，而水平解析度則需視儀器本身之取樣頻率以及拖拉速度而定；而在一般的土層中，透地雷達最大探測深度不大於 10 公尺，若在含有金屬礦物或富含電離子之水的土層中，探測深度將不大於 1 公尺。

(三) 規劃要點

測線之位置設置以及測線間距並無一定準則，應視欲探測物之形狀、大小以及土層特性而定。一般測線之安排以能獲得代表性斷面為目標，對於線性之探測物(如管線等)，測線安排應儘量與其長軸垂直；而在測線間距上，以可最有效率(在最短施測時間內完成，而其結果可達到欲設目標)施測之前提下訂定，對大部份之壩體混凝土構造物應用上來說，1至5公尺為普遍使用之間距，然而若探測目標較小或欲獲得較密集且高解析之網格狀施測結果(做為三維影像分析使用)，其間距可再視需求進行調整縮小。

(四) 委託工作說明內容

為使成果可達到探測需求，建議招標內容應說明施測目的與目標、施測範圍、施測方式(水平剖面法、同中點施測或層析成像法)、施測數量以及要求之報告書內容(詳見附錄 A)。

(五) 資料判釋須知

在資料判釋中應注意地表位置確認以及層面回波辨識以有利於對反射面之判斷，此問題並不容易完全避免，應搭配較完整之地層資訊綜合解讀，降低過度認定之發生。

五、彈性波層析成像法

(一) 應用限制

當僅採用單一平面(或不同平面夾角過小)進行施作時對於夾有弱層(下方地層波速較上方為低)的或是上下地層波速相近的地層會無法探測獲得，其會造成下方的堅硬地層厚度有高估的情形；此外，地層亦需以足夠的厚度以便可反應在走時曲線上，否則將無法探測到。

(二) 解析能力

一般而言，探測可得之最深深度約是測線長度的 $1/4$ 至 $1/6$ 倍；側向解析度約為接收器間距的 $1/2$ 倍，而垂直解析度與側向解析度相近，但隨著深度增加將有所降低。

(三) 規劃要點

1. 進行探測規畫時，測線應盡量與壩軸垂直，若異常區域無法符合此條件時，可考慮進行 3 維探測或是考量探測結果的 3 維效應問題。
2. 若採用有孔內或壩體上下游之測線佈設時，接收器或震源距離實體界面(如築壩材料與原地層界面、壩體與山脊之界面等)較近時，應注意反算技術是否有考慮折射波之能力。
3. 測線儘可能為直線，避免轉彎角度或曲折過大。
4. 欲調查之可疑區域盡量使其位於測線之中央。

(四) 委託工作說明內容

為使成果可達到探測需求，建議委託工作內容應說明施測目的與目標、施測範圍、施測方式(地表施測、孔內施測、壩斷面施測或綜合施測)、施測數量以及要求之報告書內容(詳見附錄 A)。

(五) 資料判釋須知

在結果的判釋上，除應考量地形以及 3D 效應可能產生的映射假資訊情形外，另外應瞭解影像剖面圖有其解析度之限制。

六、多頻道表面波震測法

(一) 應用限制

在地形或地層傾度大於 20 度的地方施測，會使所得剪力波速結果有所低估或解析能力降低。在較深處或厚層中所存在之薄弱

層不易明顯探測到，此外，表面波震測主要是建立在頻散曲線上，所有的頻散曲線才能反應出地層的所有特性，通常，夾有弱層的地層會有許多能量集中於高次態中，以基態做為反算的方法便不易將此探測出。

(二) 解析能力

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

(三) 規劃要點

1. 在盡量使測線為直線的前提下，避免在垂直測線的方向上有明顯的變化。
2. 避免其地表高程變化坡度在 20 度以上。
3. 在已知可能有高度側向變化之位置應注意避免採用過長之展距或直接規劃使用高側向解析度施測。

(四) 委託工作說明內容

為使成果可達到探測需求，建議委託工作內容應說明施測目的與目標、施測範圍、施測方式(一般施測法或是高側向解析施測)、施測數量以及要求之報告書內容(詳見附錄 A)。

(五) 資料判釋須知

在判釋上應僅記解析度、地形效應以及高次態之影響避免過

度解讀結果。此外，由於其假設地層為水平層狀，對於劇烈之側向變化以及具有地形變化的地層會有一定的扭區；又在較深處的薄層在其解析度可解析之能力以外，將難以明顯反應出。

附錄 A 地球物理探測方法介紹與規劃要點

一、地球物理探測技術應用概念

地球物理探測技術主要於施測後獲得檢測物體之不同物理量，而後由不同問題所反應之物理量變化間接推估工程問題之解答，目前地球物理探測技術可測得之物理量大致有電阻率、介電度、電容、磁化率、重力、彈性波速以及地層反射性等，由此些不同之物理量以及不同之分析理論，已成熟可應用之地球物理探測技術有地電阻影像探測法(Electrical Resistivity Method)、自然電位法(Self-potential method)、感應極化法(Induced Polarization Method)、透地雷達探測法(Ground Penetrating Method)、電磁探測法(Electromagnetic Method)、重力探測法(Gravity Method)、彈性波層析成像法(Elastic Waves Tomography Method)、表面波震測法(Seismic Surface-wave Method)以及反射震測法(Seismic Reflection Method)等九種，這些方法可於地表面上進行施測，亦可應用於鑽孔內施測或是鑽孔內與地表面聯合施測。將各地球物理技術以其量測資料、所得物理性質以及所得物理模型進行表列整理如表 A-1 所示，由表中可明確得知不同之地球物理探測技術可量測得不同物理性質，而此些物理性質之存在與否便是各地球物理探測技術應用於不同安全檢查問題之關鍵所在。

表 A-1 地球物理探測技術量測物理量

地球物理探測技術	量測資料	所得物理性質	所得物理模型
地電阻影像探測法	人造電流造成之電位差	電阻率	電阻率 2 維深度剖面或 3 維深度剖面
自然電位法	地中自然電位差	自然電位差	電位差 2 維平面分布
感應極化法	人造電壓消散速度	電容性	電阻率 2 維深度剖面
透地雷達探測法	電磁波之反射歷時及振幅	電學性質不連續面	反射層之 2 維深度或 3 維深度剖面
電磁探測法	感應電位	電阻率	電阻率 2 維平面剖面或 3 維深度剖面

微重力探測法	重力值	重力值	重力 2 維平面分布
彈性波層析成像法	壓縮波之初達波走時	壓縮波速	壓縮波速 2 維剖面
多頻道表面波震測法	彈性波歷時振幅	剪力波速	剪力波速 1 維深度剖面
反射震測法	彈性波之反射歷時及振幅	力學性質不連續面	反射層之 2 維深度或 3 維深度剖面

根據對常見水庫壩體安全檢查問題之檢討，考量解析度以及施作可能性，本導引手冊選用地電阻影像探測法、自然電位法、透地雷達探測法、電磁探測法、彈性波層析成像法以及表面波震測法做為可能之應用技術，而在應用前應瞭解地球物理探測技術普遍存在由現場資料分析所得結果不具有惟一性的問題，其單獨使用並無法提供足夠的調查結果，因此同時聯合多種探測技術並搭配鑽孔、地質調查資料、水庫構造物設計圖等資料進行綜合解讀可有最佳的應用，此外，各方法皆有因距訊號接收器深度增加而解析能力降低的情形，對於深度較深以及位於探測成果邊緣之判釋應保守。

二、地電阻影像探測法

(一) 大壩安全檢查問題應用

表 A-2 地電阻影像探測法於大壩安全檢查問題之應用

壩型	位置	安全檢查問題	選用分類	參考案例檢索
混凝土壩	壩體	裂縫	C2	
		滲漏	B	
	壩趾	淘空	B2	
	壩基	滲漏	B	
		滑動	B1	
	壩座	淘空	B2	
		滲漏	B	
	溢洪道	滲漏	B1	
裂縫		C2		

土石壩	壩頂/壩體	裂縫	B1	
		差異沉陷	B3	
	壩體	坡面滑動	B2	
		滲漏	B	
		淘空	B1	
	壩趾	滲漏	B	
	壩基	滑動	B1	
	壩座	滲漏	B	
	溢洪道	底板下積水/淘空	B2	
		滲漏	B	
		裂縫	C2	
	排水廊道	滲漏	B	
		裂縫	C2	
	培厚區	滲漏	B	

(二) 原理

地電阻探測的量測原理為藉由外加低頻電流經由圖 A-1 中電流極 C1、C2 流入地層中，再利用電位極 P1、P2 量測地層所反應的電位差值，由該量測的電壓值與電流值經由靜電學理論計算受測土層之視電阻率 (apparent resistivity)，每一筆視電阻率其影響深度與其電擊棒間距有關，藉由改變電極間距的大小以及空間位置，即可量到不同位置以及不同影響深度的視電阻率值，將所量測得之視電阻率透過反算技巧即可獲得 1 維乃至 3 維之壩體材料地電阻剖面。

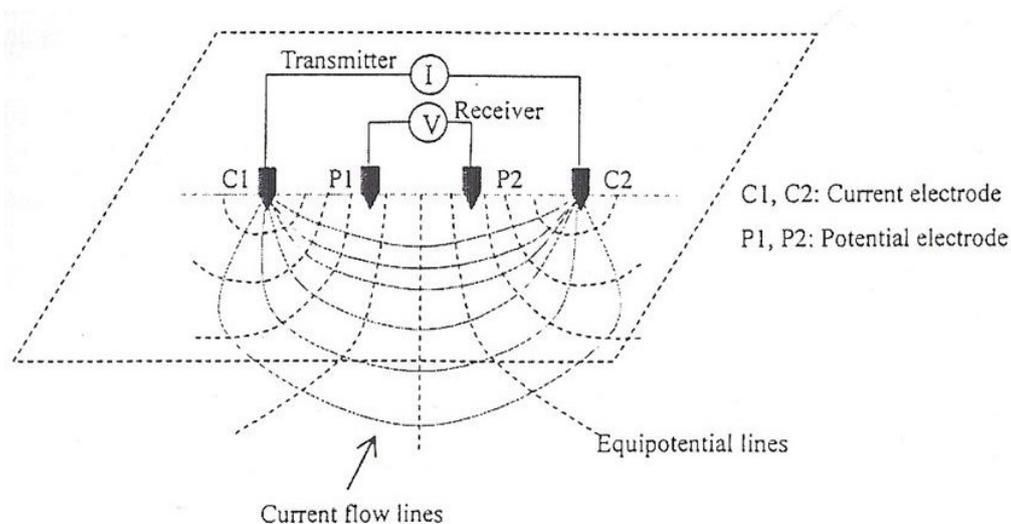


圖 A-1 電探施測示意圖

(三) 施測方法與儀器現地適用性調整

電極棒排列模式：其施測方法主要是將金屬製之電極棒貫入土中與土壤緊密接合，每次量測共四根電擊棒，透過兩根電擊棒放電與兩根電擊棒量測電壓進行，根據其電流與電位極排列的不同，可將其施測模式至少分為五種，包括 Wenner、Wenner-Schlumberger、Dipole-Dipole、Pole-Dipole 及 Pole-Pole 等方式。不同排列模式與其水平或垂直解析度及探測深度有關

1 維施測：藉由改變電極間距的大小，即可量到不同影響深度的視電阻率值，在同中點處採用不同電極間距施測，由不同電極間距所得到之視電阻率可反算地電阻率剖面，稱為 1 維地電阻垂直剖面探測(sounding)；若不改變電極間距，但將同中點移動，僅量測在某深度內之視電阻率隨空間的變化(一般而言並不進行反算)，稱為 1 維地電阻水平剖面探測(profiling)。

2 維施測：若量測過程藉由平移電極和改變電極間距可以獲得不同探測位置與影響深度之視電阻率資料(受益於科技之進步，目前之量測是在一直線上等間距佈設完電極棒後，透過儀器自行

排序量測不同間距與中點之電極棒組合獲得)，該資料常以二維似電阻剖面 (pseudo section) 表示，如圖 A-2 所示，在一倍電極間距下，先以第一支與第四支電極為電流極 C1 和 C2，由第二支與第三支為電位極 P1 和 P2，如此即可量測到第一個的視電阻率值，在固定一倍電極間距之下，不斷平移四根電極棒，即可量測到第一層視電阻率值，而藉由改變電極間距的大小，即可量到不同深度的視電阻率值，因而得到二維似電阻影像剖面，由似電阻剖面資料，可反算 2 維地電阻率剖面分佈，稱為 2 維地電阻影像探測法 (2D electrical resistivity tomography, 2D ERT)。在此特別提醒，似電阻剖面資料僅為現地量測資料之呈現方法，不可據以進行施測結果之判斷。

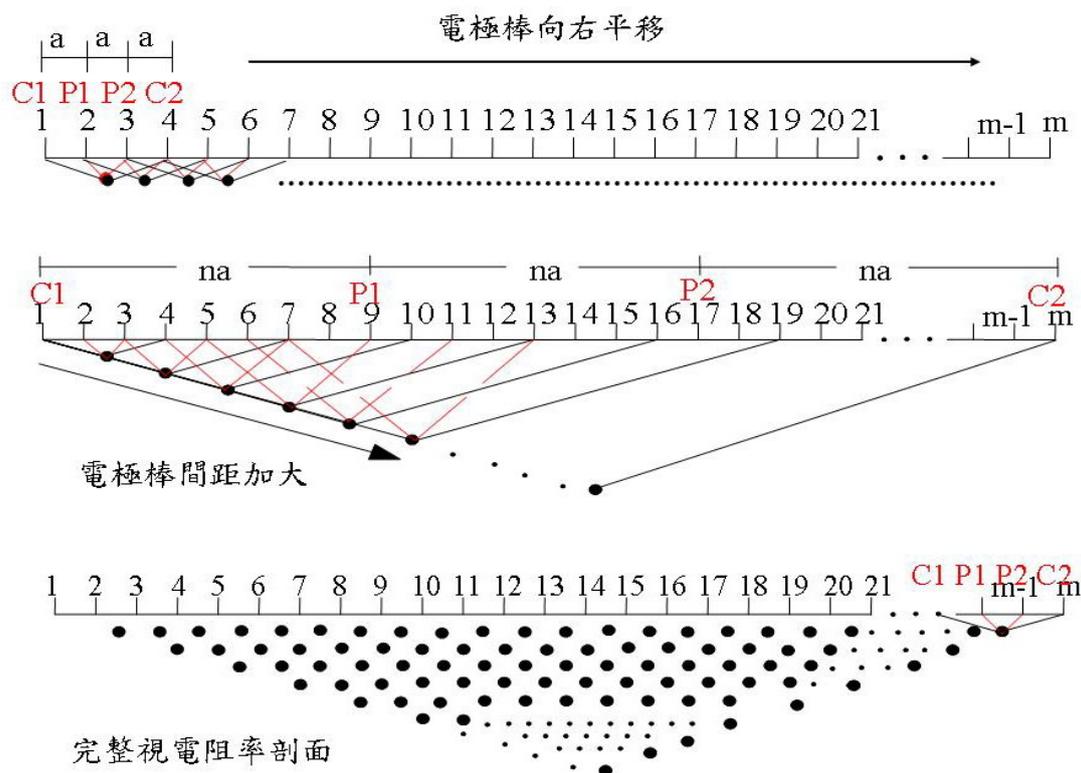


圖 A-2 二維地電阻電極排列施測流程(Wenner array)

擬3維及3維施測:當地層三維的地形與地層變化較複雜時，1 維與 2 維電探之結果可能會有三維效應而造成人造假象，3 維地

電阻影像剖面法是唯一解決之方式，如圖 A-3 所示，3 維電探將多條測線以反覆 S 型的佈線方式將每一根電極棒串聯起來，除了如 2 維電探在直線內之電極排列施測外，增加跨測線(cross string)的施測，使電流與電壓場通過不同直線間，以獲得測線與測線間之地表下訊息，再藉由 3 維的反算分析推估電阻率的 3 維分佈。然而，3 維地電阻探測對於電極棒、連接線等儀器資源之需求極大，因此有擬 3 維之施測法提出，此方法與 3 維施測之最大差異在於其採用多條平行之 2 維施測結果結合進行 3 維反算，由於其並沒有跨測線的量測資料，因此與 3 維施測仍有差異，並且在施測上必須要求其測線與測線之間距小於 6 公尺。

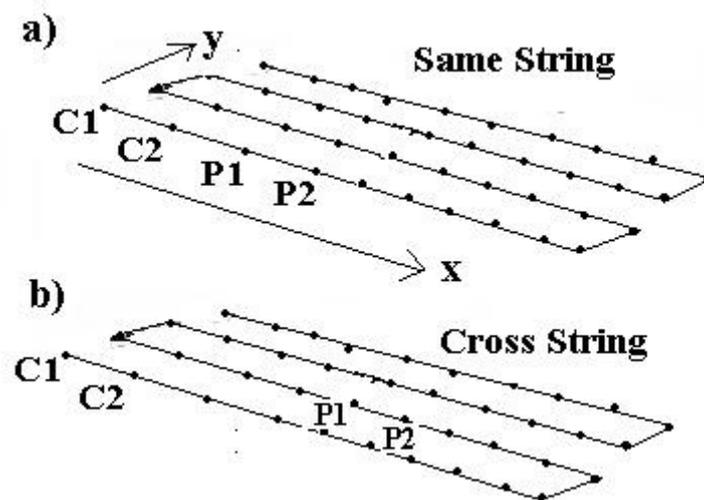


圖 A-3 三維地電阻電極排列施測示意圖(Dipole-Dipole array)

地表與孔內探測：進行地表地電阻量測(如圖 A-4a 所示)雖可獲得地表下電阻值之深度剖面，但其因僅有表面具有電極棒進行資料收集，使得較深處所得之量測解析度較低，而無法在深度上獲得較佳之探測結果，而若壩體存在有恰當之鑽孔(以全開管之鑽孔較適合)，則在壩體採用地電阻探測之量測上可有較大的靈活度，其可單孔孔內配合表面地電阻施作(如圖 A-4b 所示)，亦可兩孔孔內或多孔孔內搭配地表地電阻施作(如圖 A-4c 所示)，如此對於地

電阻探測之量測結果可增加其在深度上之解析度，提升對潛在問題的檢測能力。

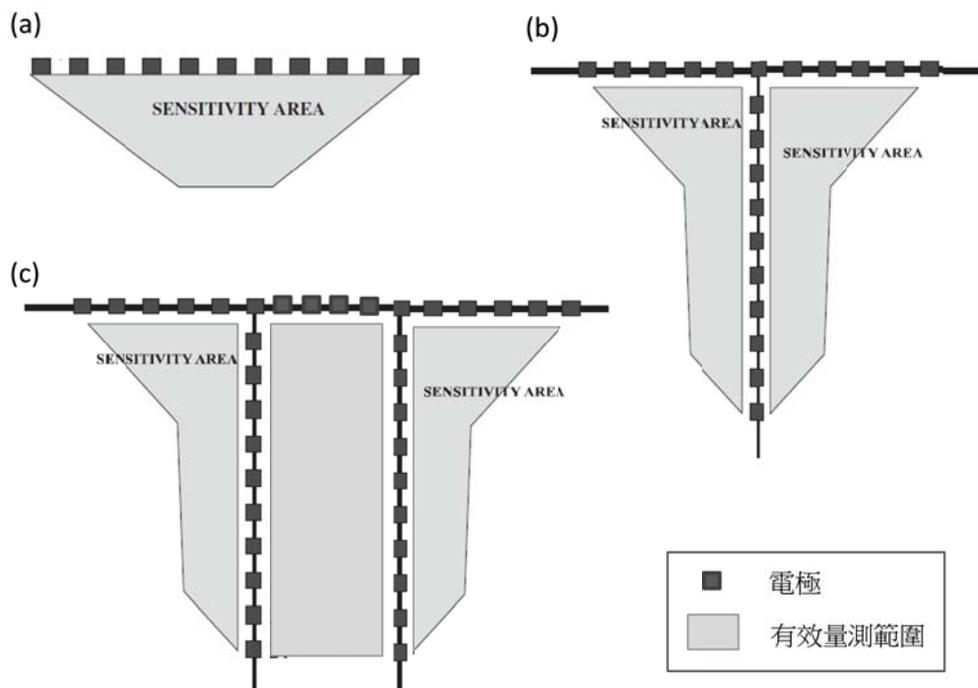


圖 A-4 地電阻探測測線地表與孔內佈設示意圖

監測：地電阻影像探測法可作為監測工具使用，在施作上，於慎選監測斷面後，以固定的時間固定的電極棒位置進行相同電極棒排列的量測，透過獨立之反算或具時移考量之反算(time-lapse inversion)可獲得有效監測成果。

於拋石上施作：在土石壩中，其壩面多有拋石層進行保護，此些拋石粒徑大且堅硬並不易將電極棒貫入並與之良好耦合，亦使得施作資料品質不佳，針對此點可採用在拋石縫中填入泥土後澆置鹽水以便利電極棒與之耦合，並維持泥土與周邊拋石之導電良好。

於混凝土、瀝青鋪面上施作：經濟部水利署(民國 94 年)之研究報告提出在不利於或不允許貫入之施作環境時可採用平板式電極(如圖 A-5 所示)進行施作，其是利用紅銅製成，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，用以連接電極與纜線之用。而為使此電極可與地面耦合良好，在電極與地面間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，此外，由於皂土拌水後具有良好黏著性，亦可有助於其在混凝土立面上附著施作。

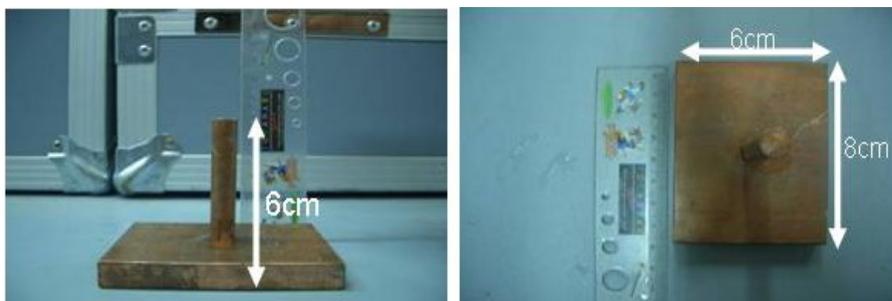


圖 A-5 平板式電極(修改自經濟部水利署，民國 94 年)

(四) 分析方法與資料判釋須知

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

電阻影像剖面判釋：地電阻影像探測法其解析度在距離電極棒越遠之位置解析度將越差，於判讀時應注意其是否有足夠能力對目標物進行呈現，例如地中若夾有弱帶(下方電阻值低於上方電

阻值)其厚度小於電擊間距，則會受精度限制造成無法正確獲得其分布情況；此外，地電阻影響探測法之解析能力亦受到地層電阻率分佈之影響，如上方電阻值甚低時，電流密度集中於低電阻區域，易造成下方區域之靈敏度過低而無法清楚解析，如何評價各處施測結果是目前學者仍在研究的課題，實務上，可以搭配正算模式，由反算結果與工程背景提出合理電阻率模型，透過虛擬試驗了解施測結果的可能限制與合理解釋。

3 維效應：資料判釋上，除了需將實際所使用的施測參數解析度加以考量外，另由於實務上主要以 2 維地電阻探測為主，故在應用上常忽略了 3 維效應的影響。所謂 3 維效應，即 2 維地電阻剖面外的地質結構，其電阻率映射於 2 維地電阻剖面上所造成的探測誤差。因 2 維地電阻探測將地層假設為二維 (x, y) 的半無限域空間分佈，不過在真實的地質狀態中，電流卻是在 3 維的方向 (x, y, z) 流動，因而造成非 2 維剖面上的物體對地電阻電場產生一定程度的擾動，而造成 2 維剖面上部份不規則電阻率與雜訊。因此，當 2 維測線非垂直壩軸，或垂直壩軸但靠近左右山脊時在資料判釋上，應考量大壩之構造進行 3 維正算模式探討 3 維效應的可能性，採較為保守之解釋，不可過度解讀。

(五) 試驗規劃及招標內容要點

測線位置規劃：先根據既有資料(目視檢查、監測資料或其他顯示壩體狀態異常之資料)規劃可疑區域，而後進行定線之動作，在定線之過程中應注意

5. 進行 2 維地電阻探測時，測線應盡量與壩軸垂直，若異常區域無法符合此條件時，可考慮進行 3 維地電阻探測或是

考量探測結果的 3 維效應問題。

6. 避免測線橫跨過落差太大的溝渠或土堤處，此種過度太大之落差將造成反算上之困難，一般而言，應避免測線在垂直向的變化大於 2 倍的電擊棒間距較佳。
7. 在某些特定的大壩中會有高壓電塔、電波發射台及地下管線的存在，由於地電阻影像探測主要是收集地表電壓，此些具電磁波之人造物將對施測結果有所影響，於測線佈設上應注意避開，其閃避距離並無一定，須視電磁波之功率而定，但至少應避免自其正上方或正下方通過。
8. 測線儘可能為直線，避免轉彎角度或曲折過大，若因地表因素而須有局部之電極棒閃讓的情形，該電極棒距測線預定位置以不超過電極棒間距的 1/5 為基準，而整體之曲折應避免在垂直測線方向上最大電極棒的偏移超過測線展距的 5%。
9. 欲調查之可疑區域盡量使其位於測線之中央，位於測線的端點時，其可能會在測線盲區(測線兩端點向下 45 度線以下的範圍)內而無法被測得。

電極棒排列模式(探測深度與探測目標)：常見之電極棒排列模式有五種，包括 Wenner、Wenner-Schlumberger、Dipole-Dipole、Pole-Dipole 及 Pole-Pole，此五種排列方式有其施測特性以及探測深度，於施測規劃上可根據探測目標加以考量，如表 A-3 所示，Wenner 以及 Wenner-Schlumberger 模式在探測垂直變化上有較佳的解析度，但在側向解析度上則顯得普通，而相對的 dipole-dipole 在側向變化上則有良好的解析度，但在垂直變化上解析度則較差，

前述三種之探測深度較淺，可採用測線長度之 0.2 倍進行推估，而若欲有較深的探測深度時，則須採用 pole-dipole 或 pole-pole 模式。pole-dipole 模式其探測深度可採用 0.36*測線長度進行估計，其垂直解析度普通，但仍保有良好的側向解析度，而 pole-pole 模式主要是為增加探測深度而設，其探測深度可達 0.86*測線長度，但其垂直及側向解析度皆不佳。

表 A-3 地電阻影像探測法電極棒排列模式之施測特性表

電極棒排列模式	垂直解析度	側向解析度	探測深度
Wenner	佳	普通	0.17*測線長度
Wenner-Schlumberger	佳	普通	0.19*測線長度
Dipole-dipole	不佳	佳	0.22*測線長度
Pole-dipole	普通	佳	0.36*測線長度
Pole-pole	不佳	不佳	0.86*測線長度

在壩體探測常使用之電極棒排列模式有 dipole-dipole 以及 Wenner，另外，透過合併使用 dipole-dipole 及 pole-dipole 模式亦是具效率之施測模式組合。

電極棒間距與測線展距(探測深度與解析度)：施測時電極棒間距與測線展距為兩項重要施測參數，在設定上，電極棒間距之設定應考量探測所需之最高解析度，一般而言，探測所得之最高解析度約為電極棒間距之 1/2，隨著深度的增加會有所降低，一般而言，在土石壩體上之探測採用 5 公尺間距最為常見，而於其他混凝土壩或溢洪道等混凝土結構處則視實際需求而定；而測線展距與探測深度有關，其又與電極棒採用之排列模式有關，可參考表 A-3 進行探測深度的估計。

招標內容：為使成果可達到探測需求，建議招標內容應說明施測目的與目標、施測範圍、施測方式(1 維、2 維、3 維或擬 3 維施測法，是否有限定之電極棒排列模式)、施測數量(詳見下段

計價單位與考量)、施測電極棒排列模式以及要求之報告書內容(詳見本小節最後之報告書內容)。

計價單位與考量：在招標內容中建議含有施測數量，在施測數量之訂定上應根據不同施測法進行要求，並且應考量其測線長度與使用之電極棒間距：

1. 1 維施測法，建議為每公尺每根電極需多少元，即元/(公尺*電極數量)，而其數量亦應以此進行設定。但因現行常用計價單位為每公尺多少元，即元/公尺，此計價方式未考慮電極棒間距，因此若在不改變目前常用之計價方式下，建議應將電極棒間距之要求作為前提條件。
2. 2 維施測法，其現行常用計價單位為每公尺多少元，即元/公尺，但此計價方式未考慮電極棒間距，其計價單位建議為每公尺每根電極需多少元，即元/(公尺*電極數量)，而其數量亦應以此進行設定，例如，欲進行測線長度 100 公尺且電極棒間距不超過 5 公尺之探測，則其數量為 $100*(100/5+1) = 100*21 = 2100$ 公尺*電極數量。但因現行常用計價單位為每公尺多少元，即元/公尺，此計價方式未考慮電極棒間距，因此若在不改變目前常用之計價方式下，建議應將電極棒間距之要求作為前提條件。
3. 擬 3 維施測法，其現行常用計價單位為每公尺多少元，即元/公尺，但此計價方式未考慮電極棒間距，其計價單位建議為每公尺每根電極需多少元，即元/(公尺*電極數量)，而其數量亦應以此進行設定，例如，欲進行 3 條平行之測線長度 100 公尺且電極棒間距不超過 5 公尺之探測，則其

數量為 $3*100*(100/5+1) = 3*100*21 = 6300$ 公尺*電極數量。但因現行常用計價單位為每公尺多少元，即元/公尺，此計價方式未考慮電極棒間距，因此若在不改變目前常用之計價方式下，建議應將電極棒間距之要求作為前提條件。

4. 3 維施測法，其現行常用計價單位為每公尺多少元，即元/公尺，但此計價方式未考慮電極棒間距，其計價單位建議為每平方公尺每根電極需多少元，即元/(m^2 *電極數量)，而其數量亦應以此進行設定，例如，欲進行 3 條平行之測線長度 100 公尺電極棒間距不超過 5 公尺且平行測線間距不超過 6 公尺之探測，則其數量為 $6*100*(100/5+1) = 6*100*21 = 12600$ m^2 *電極數量。但因現行常用計價單位為每公尺多少元，即元/公尺，此計價方式未考慮電極棒間距，因此若在不改變目前常用之計價方式下，建議應將電極棒密度之要求作為前提條件。

施作維度越高所牽涉之施作與分析技術越高，因此在單價上 3 維施測法>>擬 3 維施測法>2 維施測法>1 維施測法，另外，施測模式每多一種會增加其施測時間，因此若有明列多種施測模式，建議可考量增加單價，而各式施作單價尚需考量大壩現場之實際施測環境之難易度進行調整，而有所不同。

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

(六) 可能的誤差以及限制

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

人為因素，是指在現場施測過程以及結果分析過程中所造成的誤差，其可透過對施測人員嚴謹的訓練與要求達到改善。

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

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

先天因素，是指地電阻探測法本身理論上便無法達到的探測能力。例如不同築壩材料間需有較明顯之電阻值差異以便能判斷其界面位置、而另因水對於材料之電學性質影響極大，故浸潤面下方之地層性質將有一定的誤差存在，此些是其必然存在的誤差原因，僅能夠過使用其它檢測或試驗方法進行補充。

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

應用限制，在地電阻探測法的分析中，係利用量測所得之電流、電位差與測線幾何因子經過計算來求得該點之電位值，故其解析能力會隨測線幾何因子而有所變化，如電極棒之間距愈大則解析能力愈低等。地電阻影像探測法法主要是利用顆粒與顆粒之

間或顆粒間之孔隙液體來傳遞電流，藉由地層中各種材料、地質構造其電阻值之差異性來進行量測判斷，因此對於有極低電阻下方之材料性質，電流無法有效傳遞至地層下方而造成無法正確獲得該層下方之築壩材料參數，而有遮蔽的情形出現；另若上方電阻值過高，則易造成電流有效無法通過，而亦無法有效獲得分層之界面位置，其會造成地層厚度誤判之情形。

三、自然電位法

(一) 大壩安全檢查問題應用

表 A-4 自然電位法於大壩安全檢查問題之應用

壩型	位置	安全檢查問題	選用分類	參考案例檢索
混凝土壩	壩基	滲漏	A1	
	壩座	滲漏	A1	
土石壩	壩體/壩頂	差異沉陷	A1	
	壩體	滲漏	A1	
		淘空	A1	
	壩趾	滲漏	A1	
	壩座	滲漏	A1	
	培厚區	滲漏	A1	

(二) 原理

自然電位法與其它施測法之不同是在於其屬於被動式量測技術，即表示其並不透過主動產生擾動源，存粹僅量測自然界所存在之物理量特性。此法主要是量測地表上某兩點之電位差，此電位差之來源複雜，但主要者有三，一是由電動位(electrokinetic potentials)或稱為流動電位(streaming potentials)所產生，產生之原因是由於水在孔隙介質中的流動；其二為電化學電位(electrochemical potentials)，主要是由地下水中所含有不同濃度之電解質所造成；第三是由礦化電位(mineral potentials)所產生，由於在地底下存有不同之可導電礦物，且其之間存在有含電解質之

地下水，因而有電位差存在。在此三種來源中，在水庫壩體之應用上，主要是欲獲得因水流動（電耦運動）而產生的電壓差，對於所測得之結果最後以電壓差之平面空間分佈表示(如圖 A-6 所示)，由此一平面差異圖可應用於水庫之滲流路徑與滲流流向之偵測。以此種檢測方式可迅速便利完成施測，並且有利於調察地下水滲流狀況，惟其空間解析及辨識能力較差，不適用探測空氣孔洞。

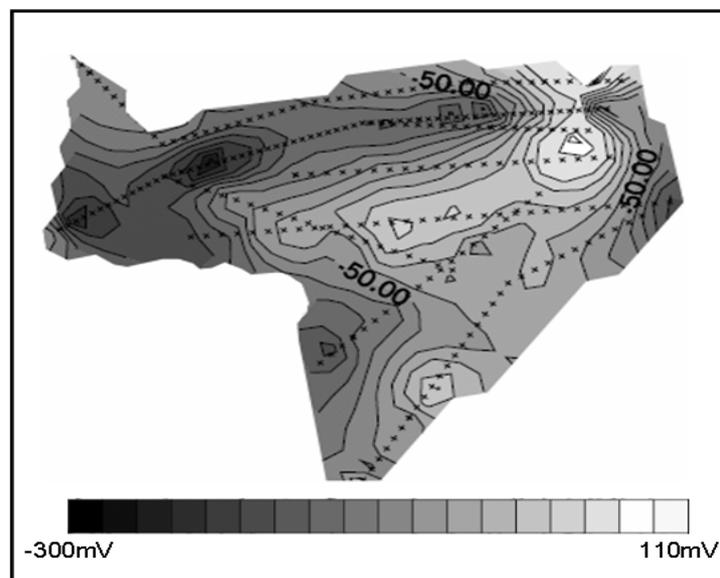


圖 A-6 自然電位影像平面圖 (Johansson et al., 2005)

(三) 施測方法與儀器現地適用性調整

自然電位法之施作非常簡單，將固定電極安置於選定之基準電壓位置後，逐次將移動電極置於預定之測點，確認電極與地面接觸良好後，紀錄其電壓值即可，惟為提升雜訊比，埋設待穩定後才能觀測記錄，其等待穩定時間可能長達半天，因此，實務上常常前晚埋設於次日讀值，且在同一測點進行多次量測後予以平均，此量測次數可依現場訊號之穩定情形適當調整，一般而言，量測5-15次已足夠。此外，為確保施測過程不受地體電流之影響，

會有多餘一組固定不動之量測對照組做為地體電流變化之參考。

格網施測與線性施測：現地量測之施作可分為格網施測以及線性施測，前者是將欲調查之區域以固定之間距分隔成網狀後，於網格點上量測，此種方式的間距較大，較適合對大壩滲流狀況較不明確時使用，一般在土石壩體之應用上，會採用 5-10 公尺的間隔進行網格的繪製；而線性施測是針對較為明確的線段位置進行精細的調查，通常採用較密集之間距(10 公分至兩公尺不等)，以便可獲得較明確的滲流位置。

監測：自然電位法可作為監測工具使用，在施作上，於慎選監測斷面或範圍後，以固定的時間固定的基準電壓點及量測點進行量測，透過比對不同時間點之結果可獲得有效監測成果。

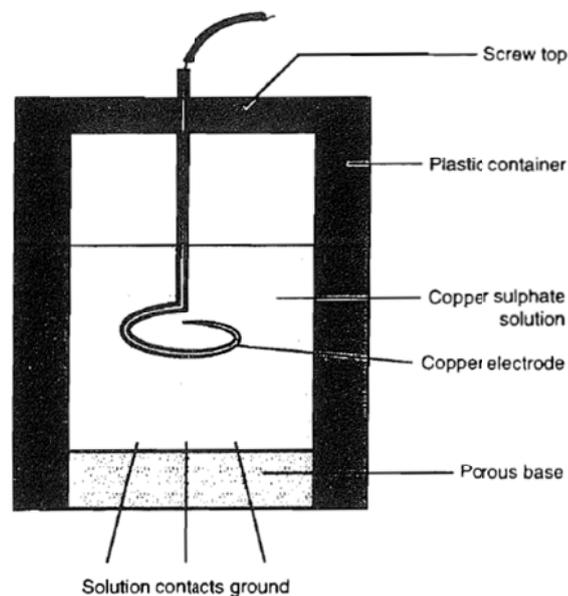


圖 A-7 自然電位法電極構造示意圖(摘自 Reynolds, 1997)

非極化電極：由於自然電位之電壓值極小，約是在毫伏的等級，若採用金屬製之電極棒與地面接觸將容易造成量測的錯誤，因此須採用非極化電極進行施作，非極化電極之構造約如圖 A-9 所示，為使電極與地面有良好之接觸，故採用電極棒搭配電解液

之方式，且在與地面接觸之一側使用具透水性之材料，以使得電解液可以直接與地面接觸，一般來說，電極棒是採用銅而電解液採用硫酸銅溶液，鋅與硫酸鋅溶液或銀與氯化銀溶液亦可使用。

電壓計：自然電位之電壓值大約在毫伏(millivolt)的等級，因此用於量測此電壓之電壓計需至少可量測到 0.1 毫伏之精度，且為避免電壓計本身之電阻消耗此自然電位，其內部電阻之電阻值至少需在 10^8 歐姆(ohms)以上。

(四) 分析方法與資料判釋須知

視電位圖解法：傳統上對於自然電位法之分析是直接對所量測到之電位依空間分佈排列呈現後，根據電位之大小或極化情形進行分析判釋，由於此中之電位是在測點與基準點間各深度與距離所綜合呈現之值，因此名之為視電位。對於線性施測之結果，將其依測線之位置繪出，如圖 A-8 所示；而若為二維之施測結果，根據其平面相對位置，可採用灰階或色階方式呈現，如圖 A-6 所示。

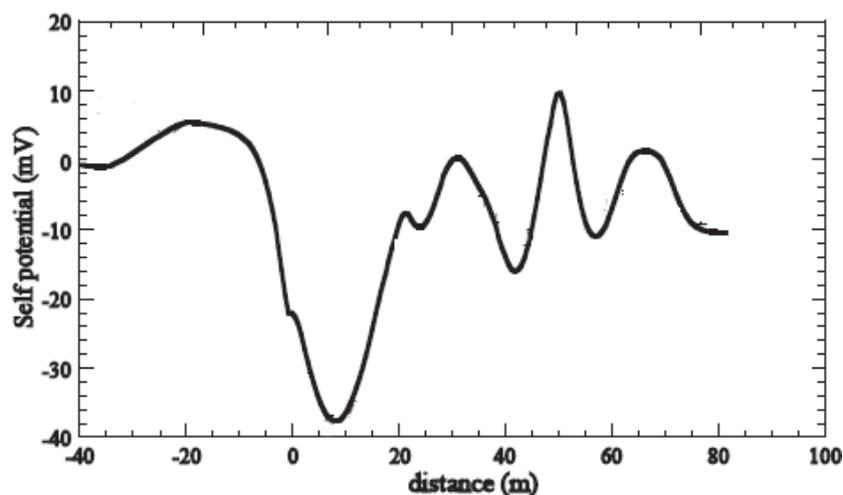


圖 A-8 一維視電位剖面圖(改繪自 Boleve et al., 2007)

在欲以上述之圖進行判釋前，尚需對此資料進行修正之動作。

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

反算分析法：反算分析法是將探測範圍之下方區域分為一個一個的元素/格網，而後透過有限元素法或有限差分法等數值方法做為正算模式，再以反算技巧獲得地表下之實際電位分佈情形，以目前之技術而言，其已可將地形效應納入考率，對於其實際理論與計算可參考 Patella(1997a,b)，惟此一分析法其分析結果可靠度不佳，針對不同之應用，其分析結果之準確性與所使用之理論以及分析時之初始模型有極大相關，針對地下水流動之問題，以流動電位為理論基礎進行研究者尚有 Boleve et al.(2007)等，可做為分析時參考之用；實務上採用此法者，為增加其可靠度通常會搭配地電阻影像探測之結果，結合已知之地層狀態假設其電學模型，根據假設之可能情境，再搭配以人工調整之方式針對線性探測之結果進行反算分析。

滲流方向與滲流位置：如圖 A-9 所示，在壩體中產生滲流時，在滲流路徑周邊將開始聚集有負電荷，而使得該滲流位置會有較

低之電位，此一特性便是在採用自然電位法時對於可能之滲流位置進行判斷的依據。然而，對於滲流之問題，除了欲得知其在壩體之滲流位置外，亦期望可以獲得其流動方向，關於此點，可由二維之視電位影像平面推估。

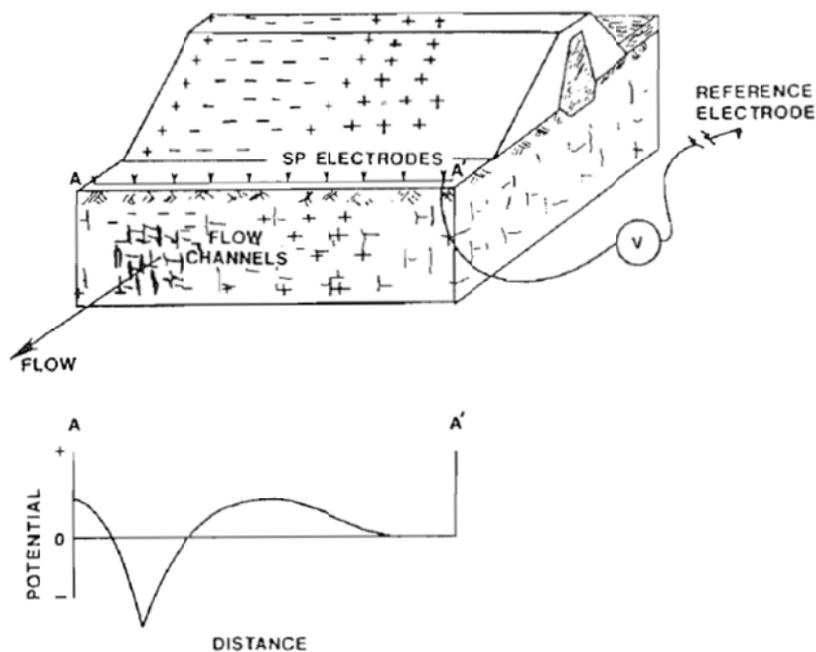


圖 A-9 壩體滲流影響之電荷分佈與電位量測結果示意圖(摘自 Bulter and Llopis, 1990)

一般而言，如圖 A-10 所示，其流動是自低電位向高電位方向流動。綜合上述，在無足夠資訊推估滲流路徑之情形下，可先行佈設較疏之二維均勻網格進行初步探測，待由此二維視電位影像平面圖中找出最可能之滲流路徑後，再以垂直該流路之方向佈設幾處密集測點之測線較精確的找出滲流位置。至於滲流所在深度則須依賴反算進行，才可有機會獲得。

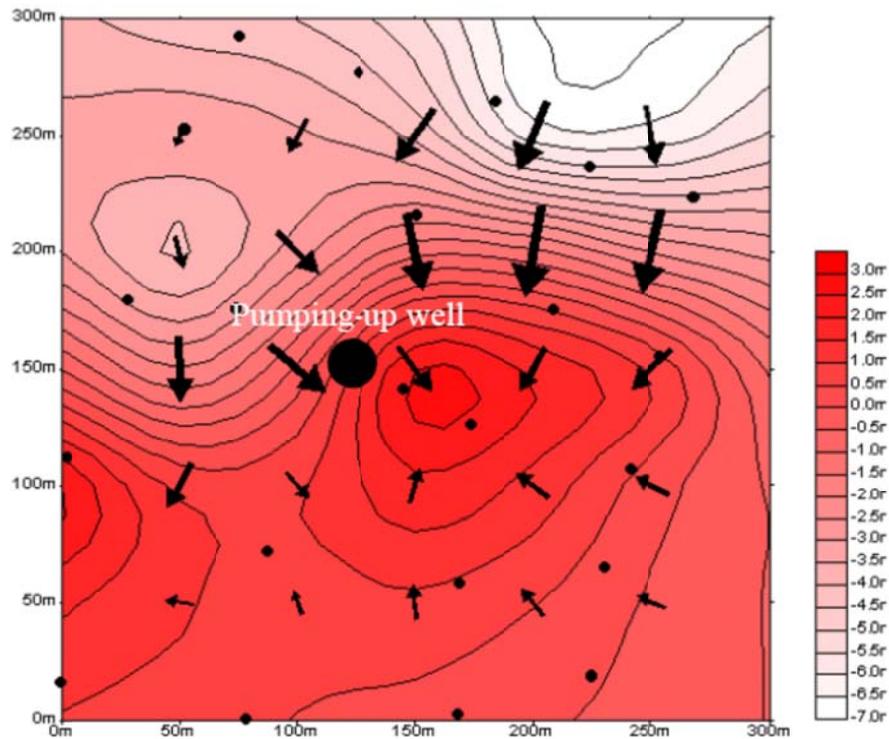


圖 A-10 地下水流動造成之電位分佈示意圖(摘自 Sato et al., 1997)

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

(五) 試驗規劃及招標內容要點

測點位置：對於自然電位法之使用，於壩體之應用上主要是在於滲流之調查，在規劃時應先行了解調查範圍之大小，並對於調查範圍中可能對量測造成影響之因素有所了解，例如金屬管線、電機裝置等，而後視需求，根據不同之施測方法訂定量測間距。

施測方法：移動電極之測點位置選定可分為線性探測及網格

探測兩種來說明，在線性施測上，為能較靈敏感測出滲流位置，應將各測點以直線排列，且此測線走向儘量垂直滲流路徑，並採用較密集之間距(10 公分至兩公尺不等)；而進行網格施測時，以網格狀設置測點為準則，若可估計可能之滲流路徑，則可在其垂直向上設置較密之一維測線，而以較疏之間距(5 公尺至 10 公尺不等)設置測線形成網格狀測點；但若現場資料不足以推估滲流路徑，可先行均勻佈設較疏之網格點，判斷其可能滲流路徑後，再挑選幾處具代表性之處，垂直滲流路徑進行較密測點之線性施測。

基準電壓位置：自然電位法所量測之電壓值皆為相對之結果，而基準電壓即是作為各量測點之電壓比較基準，基為做為基準之用途，基準電壓之位置應要避免置於可能有礦化電位或流動電位(滲流)之處，一般而言，在大壩量測之應用上，通常會選擇壩頂無管線通過之處作為基準電壓位置。

招標內容：為使成果可達到探測需求，建議招標內容應說明施測目的與目標、施測範圍、施測方式(線性探測或網格探測)、施測數量(詳見下段計價單位與考量)以及要求之報告書內容(詳見本小節最後之報告書內容)。

計價單位及考量：在招標內容中建議含有詳細之施測數量說明，在施測數量之訂定上應根據不同施測法進行要求，並且應考量其測線長度與使用之量測間距：

1. 線性施測法，建議為每公尺每個量測點需多少元，即元/(公尺*量測點數量)，而其數量亦應以此進行設定，如此可同時對量測間距與量測長度進行規範。
2. 網格施測法，其計價單位建議為每平方公尺每個量測點

需多少元，即元/(m²*量測點數量)，而其數量亦應以此進行設定，如此可同時對量測密度與量測長度進行規範。

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

(六) 可能的誤差以及限制

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

人為因素，是指在現場施測過程以及分析過程中所造成的誤差，其可透過嚴謹的訓練與要求的過程達到改善，在此可能造成誤差之原因需特別注意電極溫度以及施測時機。電極內含有電極棒以及電解液，當溫度有所變化時，其本身之電學性質將有所改變，如此一來做為基準電位之處將不再是一固定值而有所變化，造成整體相對電位解讀之錯誤。而施測時機，對於滲流之調查應避免在大雨過後進行，因為大雨過後地表水將自地表往地下滲入，而有往下之水流產生，此水流將會造成地體之自然電位改變，而使得量測有所誤差。

儀器因素，是指對於電壓的反應以及在資料的擷取上的錯誤而造成的誤差。以現有的儀器製造技術，此一因素影響不大，但

應注意在施測過程中訊號線於固定電極端以及移動電極端是否固定不變，此外，亦應注意自然電位在訊號線中可能的損耗情形。

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

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

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

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

四、電磁探測法

(一) 大壩安全檢查問題應用

表 A-5 電磁探測法於大壩安全檢查問題之應用

壩型	位置	安全檢查問題	選用分類	參考案例檢索
混凝土壩	壩趾	淘空	A	
	壩基	滲漏	A2	
	壩座	淘空	A	
土石壩	壩體/壩頂	裂縫	A	
		差異沉陷	A2	
	壩體	滲漏	A2	
		淘空	A2	

	壩趾	滲漏	A2	
	壩座	滲漏	A2	
	培厚區	滲漏	A2	

(二) 原理

電磁探測法是在地表利用線圈使其通過一週期性電流(如圖 A-11 所示)，當電流在降至零的過程中，根據法拉第定律(Faraday's Law)會使得在線圈中所產生的磁通量有所變化，而產生有電磁波向下傳遞，地層的材料亦會受到此電磁波所產生的磁通量變化，而又引發另一個電磁發向上下傳遞，當位於地表的接收線圈感應到此感應電流，便可量測得其感應電位，而此一感應電位與地層材料之電阻率或導電率相關，透過接收此一電位值便可獲得地表下電阻率之分布情形，對於探測之結果可直接以所測得之電壓平面分布進行判釋(如圖 A-12 所示)，或在必要時可將所得之電壓值換算為視電阻率再進行剖面之反算。

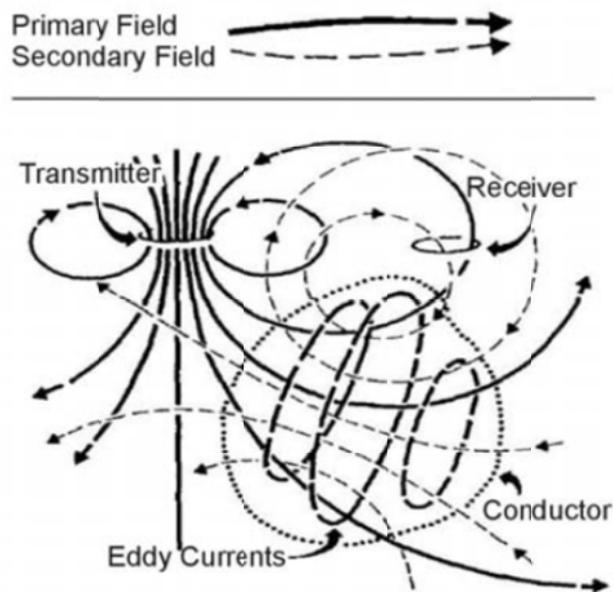


圖 A-11 電磁探測法原理(Klein and Lajoie, 1980)

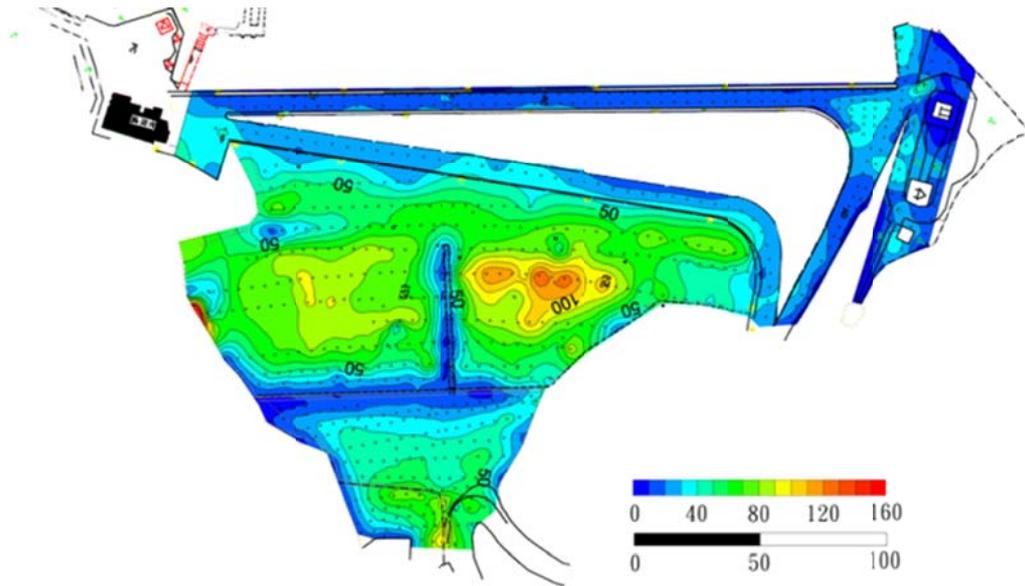


圖 A-12 電磁探測法平面影像圖(新山水庫)

(三) 施測方法與儀器現地適用性調整

電磁探測法是眾多應用電磁波性質之探測方法的統稱，根據其採用之發送源頻率或形式的不同，其可再細分為控制音頻電磁探測法(Contralled source audio-frequency magneto-telluric method)、空載電磁探測法(Airborne electromagnetic method)、超低頻電磁探測法(Very Low Frequency method)、時域電磁探測法(Time domain electromagnetic method)以及頻域電磁探測法(Frequency domain electromagnetic method)等，在此些方法中，其分別有不同的量測解析度以及有效探測深度，考量其適用於大壩之量測解析度以及有效探測深度，在此節中所談論者將針對頻域電磁探測法進行。

1 維水平剖面探測：此種探測法是將過量測之探測點安排在一直線上施作，且其量測所使用之頻率以及線圈距離並不改變，而使得全線之量測在某一個固定的有效探測深度內。通常用於調查地下線型之構造物。

2 維水平剖面探測：此種探測法是採用固定頻率且固定線圈

距離之儀器，將調查範圍內進行網格狀劃分後在網格點上施測，有時受限於現場狀況或探測需求，亦可以是將多條 1 維水平剖面探測結果綜合，其可對無過多資料之現場進行快速且初步的調查，粗略的定義出可能異常之區域，以便進一步排定後續其他探測方法之調查規劃，通常其施作時之間距會較密，在水庫壩體的應用上，是對調查成果之應用需求，通常間距設定在 1 至 10 公尺之間。

1 維垂直剖面探測：相較於水平剖面探測，1 維垂直剖面探測主要是在同一個量測點上變動量測之頻率、線圈距離或線圈角度以達到在同一個地方量測不同有效深度之資料，一般來說最常使用者是以改變線圈角度進行施作，透過 1 維水平層狀之反算假設，可由此資料獲得現場 1 維垂直地電阻剖面，只是因為由此方法所得之反算結果精度較地電阻影像法為低，因此較少應用。

差分全球衛星定位器(DGPS)之輔助施作：電磁探測法因為不需與地面接觸而可快速進行大範圍之量測，但正因其可快速大範圍施作，而會有大量資料產生，於施作前若未先將各量測點編號定位，很容易會造成後續進行判釋時會有點位誤植之情形，但事前之編號與定位將耗費較多之時間，因此若可採用具有較高量測精度之差分全球衛星定位器在量測同時進行量測點位座標之收集，將有效避免資料後續處理之錯誤，並可保有其快速施作之優點。

發送源與接收線圈之施測方向：發送源與接收線圈連線之方向與量測結果具有相關性，當施測目標物之線型方向與發送源與接收線圈連線方向垂直時可有最佳量測靈敏度，在可推估施測目標物之線型方向時應加以調整以達到最佳量測效果；而由於發送源與接收線圈之連線方向會對量測結果有所影響，因此在量測中以及量測後之成果呈現時應當注意將同一量測方向之結果繪在一

起，並避免將不同發送源與接收線圈之連線方向之成果混和，以避免對探測結果之誤判。

(四) 分析方法與資料判釋須知

1 維水平剖面分析：對於 1 維水平剖面探測結果通常直接將位置與所得到之視導電度(視電阻值)繪出，如圖 A-13 所示，而後針對其空間特定之變異點進行判釋解讀即可。

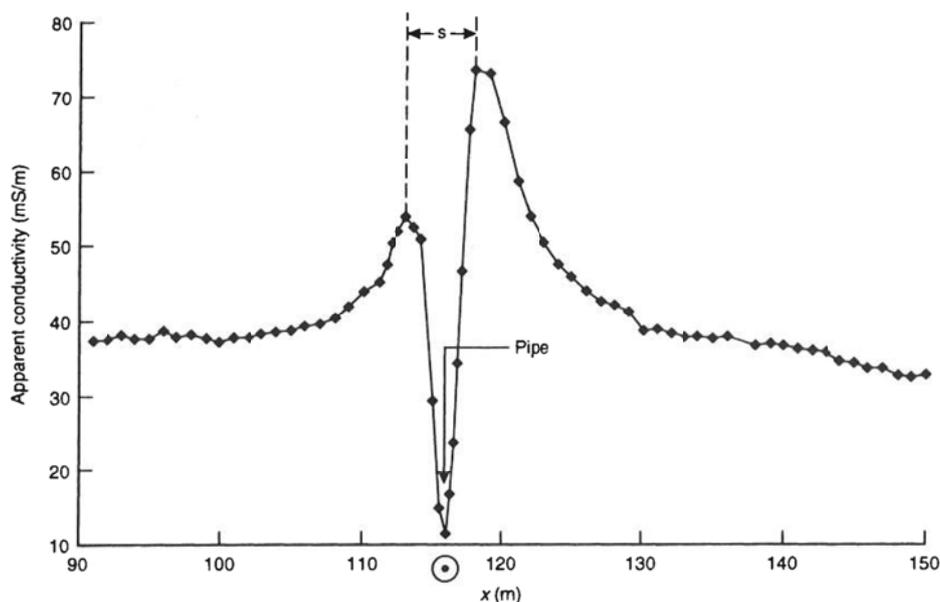


圖 A-13 電磁探測法 1 維水平剖面分析(Reynolds, 1997)

2 維水平剖面分析：2 維水平剖面之分析與 1 維水平剖面分析相類似，將所獲得之量測視導電度(視電阻率)根據其空間位置進行繪製，如圖 A-12 所示，而後根據其視電阻值異常之位置進行判釋。

1 維垂直剖面分析：1 維垂直剖面之分析較為複雜，其需要將同一量測點所得不同有效深度之視導電度(視電阻率)透過對地層水平層狀的假設進行反算分析，且通常其假設之地層以不超過 3 層為佳，透過反算可獲得量測點處之 1 維之垂直地電阻剖面，綜

合多個不同量測點之資料即可形成 3 維之資料呈現，並據以進行判釋工作。

人工構造物之影響：由於電磁探測法是透過磁通量變化進行之量測，其極易受到人工建築物、金屬欄杆、地下金屬管線、通訊系統等人造物的影響而產生量測錯誤，除施測時應當避免外，亦應當收集施測現場之所有相關構造物之位置，以便在結果判釋時先將此些因素造成之異常狀態排除。

水平剖面探測分析成果判釋：水平剖面探測分析成果之判釋僅就所量測得之視導電度(視電阻率)進行分析，會有較強烈之主觀意識存在，在判釋時應先行就可能之干擾源位置進行排除後，根據眾多蒐集所得背景資料(包含地質、壩體構造等)，在量測儀器之探測能力下進行可能異常區域之判斷，以求判釋結果不致過度解讀。

垂直剖面探測分析成果判釋：垂直剖面探測之成果，因其僅能使用極少量之地層層數進行反算，因此所獲得之自地層厚度以及地電阻值大部分為等量之值，無法較為細緻的表達其地表下之差異，應避免對此結果過度解讀；此外其採用 1 維水平層狀地層之假設，因此其無可避免地在壩體應用上會有 3 維效應之影響，若有實際深度上調查之需求，建議改採地電阻影像探測法會較為妥適。

(五) 試驗規劃及招標內容要點

測線位置：由於電磁探測法一般採用作為探測之最前端，因此除了已有之目視以及監測等資料作為調查規劃之協助外，整體測線量測以可均勻分布於遇探測區域為主，然而根據特定施測需

求或現場狀況可有下列規劃準則：

4. 採用 1 維水平剖面之施測時，應使測線盡量垂直待測標的，如此會有較佳之探測結果，若無法掌握調查標的之走向，建議採用 2 維水平剖面施測。
5. 進行 2 維水平剖面施測時，量測儀器之發送源與接收器之連線應與待測目標物垂直所得結果較佳，若無法確認待測目標物之方位，或是與待測目標物的另一方向上亦有其他可能干擾之物體存在時，在同一個量測點應進行發送源與接收器連線兩種方位(互相垂直)的量測，且在結果之呈現時應當將同一方位之結果繪製在同一張圖上，如此可有助於了解待測物之方位。
6. 量測點應盡量避免距離建築物過近，並且亦應當與金屬欄杆、地下金屬管線有一定之距離，以避免量測受到金屬之干擾，只是其恰當之距離並沒有一定之規則，僅能依靠施作者根據現場量測資料進行調整。

而由於探測深度以及探測之解析度僅與現場環境以及採用之量測儀器有關，與量測點間距並無相關，因此在施測規劃上對於量測點間距之主要考量僅在於其是否可較不失真的將待測務所呈現之異常反亦在量測結果上。

計價單位及考量：在招標內容中建議含有詳細之施測數量說明，在施測數量之訂定上應根據不同施測法進行要求，並且應考量其測線長度與使用之量測間距：

1. 1 維水平探測，建議為每公尺每個量測點需多少元，即元/(公尺*量測點數量)，而其數量亦應以此進行設定，如此

可同時對量測間距與量測長度進行規範。

2. 2 維水平施測法，其計價單位建議為每平方公尺每個量測點需多少元，即元/(m^2 *量測點數量)，而其數量亦應以此進行設定，如此可同時對量測密度與量測長度進行規範。
3. 1 維水平探測，建議為每公尺每個量測點需多少元，即元/(公尺*量測點數量)，而其數量亦應以此進行設定，如此可同時對量測間距與量測長度進行規範。

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

(六) 可能的誤差以及限制

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

人為因素，是指在現場施測過程以及分析過程中所造成的誤差，其可透過嚴謹的訓練與要求的過程達到改善，在此可能造成誤差之原因需特別注意量測時線圈方位的確定，以避免線圈方位差異所造成的人為誤差。

儀器因素，是指對於電壓的反應以及在資料的擷取上的錯誤而造成的誤差。以現有的儀器製造技術，此一因素影響不大，但

應注意在施測過程中量測值之穩定情形。

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

先天因素，是指電磁探測法本身理論上便無法達到的探測能力。例如對於薄層土層之探測，或是對於電學性質差異不大的兩種地層，此些是其必然存在的誤差原因，僅能夠過使用其它檢測或試驗方法進行補充。

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

應用限制：電磁探測法極易受到人工建築物、金屬欄杆、地下金屬管線、通訊系統等人造物的影響而產生量測錯誤，應避免；此外，在極高電阻的情況下，其探測效率會下降，在極低電阻的情況下，量測可能會有非線性的狀況發生。

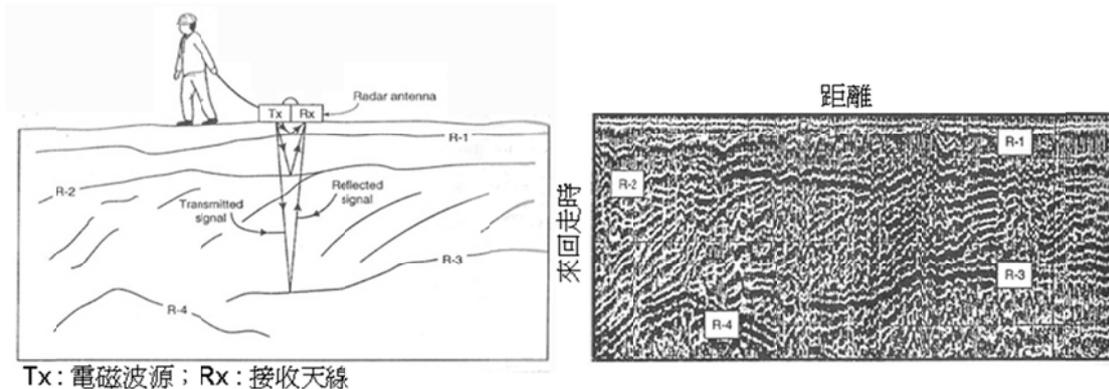
五、透地雷達探測法

(一) 大壩安全檢查問題應用

表 A-6 透地雷達探測法於大壩安全檢查問題之應用

壩型	位置	安全檢查問題	選用分類	參考案例檢索
混凝土壩	壩體	裂縫	B	
	壩趾	淘空	B3	
	壩座	淘空	B3	
	溢洪道	裂縫	B	
土石壩	壩體/壩頂	裂縫	B3	
		差異沉陷	C	
	溢洪道	底板下積水/淘空	B1	

(二) 原理



Tx: 電磁波源; Rx: 接收天線

圖 A-14 透地雷達施測原理示意圖(改繪自 Reynolds, 1997)

透地雷達系統主要由一產生電磁脈衝之電磁波源以及可接收電磁波之接收天線組成。如圖 A-14 所示，當由含有數百伏特線圈組成之電磁波源產生一脈衝波（頻率在 1MHz-10GHz）射入地表下後，電磁波以地表下材料之電磁波波速向下傳遞，一旦遭遇有電磁波波速改變之材料界面時(如層面、孔洞位置或地下結構物)，其將有反射之現象發生，此一反射之波將返回地面而被位於地表之接收天線接收。透過在一直線上不斷移動電磁波源與接收天線，可獲得測線地表下高解析度之 2 維或 3 維反射面影像(如圖 A-15 所示)，藉由對此一高解析 2 維或 3 維反射面影像之訊號分析後，可獲得地表下之構造分佈情形。透地雷達檢測技術施測作業迅速便利且解析度及辨識能力高，適用於複雜構造、混凝土結構、鋪面以及地下孔洞探測。惟其探測深度受導電環境(如黏土礦物)影響甚鉅，一般小於 10 公尺，且其不易估計電磁波速以得到構造深度。

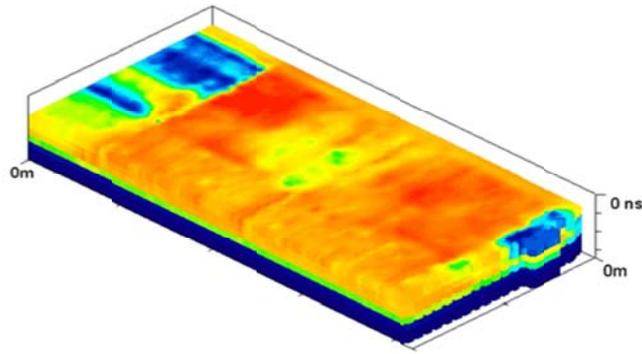


圖 A-15 透地雷達 3D 影像(大觀電廠溢洪道)

(三) 施測方法與儀器現地適用性調整

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

水平剖面法：此法為透地雷達於大壩檢測上應用最普遍使用之施測模式，如圖 A-14 所示，其電磁波源與接收天線之距離保持固定，在施測過程中以此固定間距沿著測線移動即可，為使施測更為便利，可將此透地雷達系統加裝輪子或便於移動之裝置上，以此法施測可直接獲得地表下結構之影像。

同中點施測法：此法之施測如圖 A-16 所示，在施測之過程中，測點之移動是以電磁波源與接收天線之中點移動為準，在同一個測點時，需要改變電磁波源與接收天線之間距。此法在施測上較為緩慢，然而對於在無法掌握地下土層電磁波速(用以將來回走時轉換為深度用)之場所，採用此法施測，可獲得土層之電磁波速。由同中點施測所得之某一測點結果以電磁波源與接收天線之間距為橫軸可表示如圖 A-17a)所示，在波形中可見有多條線型產生，最先出現的是為空氣波之直線線形，其次為直達波(direct wave)

之直線線型再次為反射波(reflect wave)之拋物線線型，在此中之直達波線型之切線倒數即為第一層之電磁波波速 V_1 。而欲獲得第二層之土層波速，可將垂直及水平軸予以平方(如圖 A-17b 所示)，即可使反射波呈現直線型，該直線之斜率開根號即為第二層之電磁波波速 V_2 。採用此方法施測需使用分離式之電磁波原與接收天線。

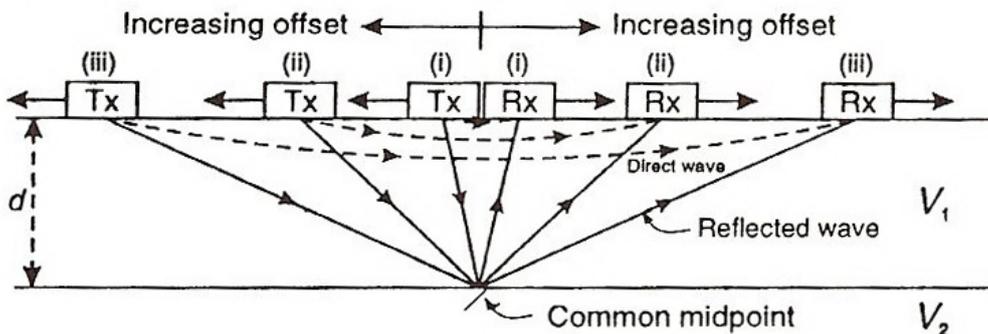


圖 A-16 同中點施測法示意圖(改繪自 Reynolds, 1997)

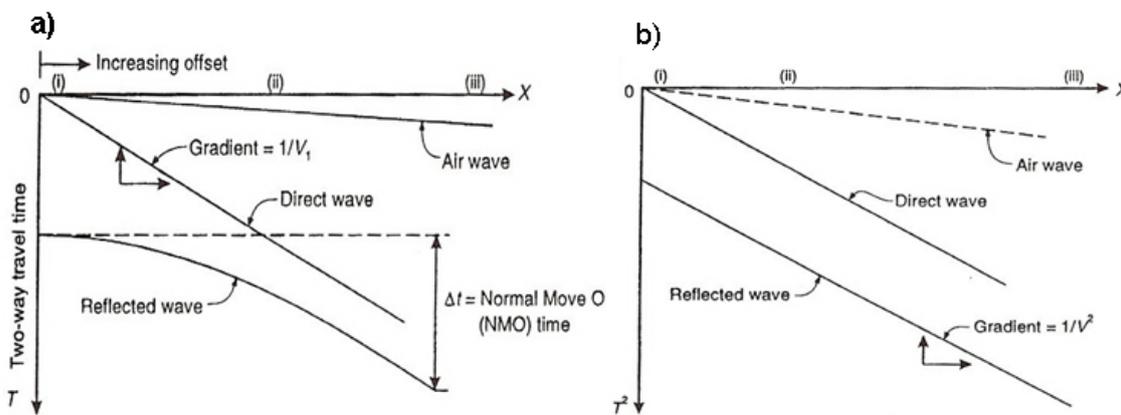


圖 A-17 同中點施測法地層電磁波速反算示意圖(改繪自 Reynolds, 1997)

層析成像法:此施測法最為耗時且無法直接獲得施測之結果，並且為有足夠良好之結果，通常需伴有鑽孔等增加施測表面之環境，其施測如圖 A-18 所示，於施測時，固定電磁波源於某位置，移動接收天線於欲探測之區域，等完成後再移動電磁波源於第二個位置，移動接收天線於已訂出之測線上，以此類推，直至最後

一個電磁波源位置。此施作法之分析同於彈性波層析成像法，需挑選初達波之走時曲線，而後以射線追蹤之理論進行反算以獲得電磁波速之二維剖面，與前述兩法所得之結果不同。採用此方法施測需使用分離式之電磁波源與接收天線。因此法於現時之應用上較不常使用，後續之說明以上述另二法為主，不再於此節中另行說明。

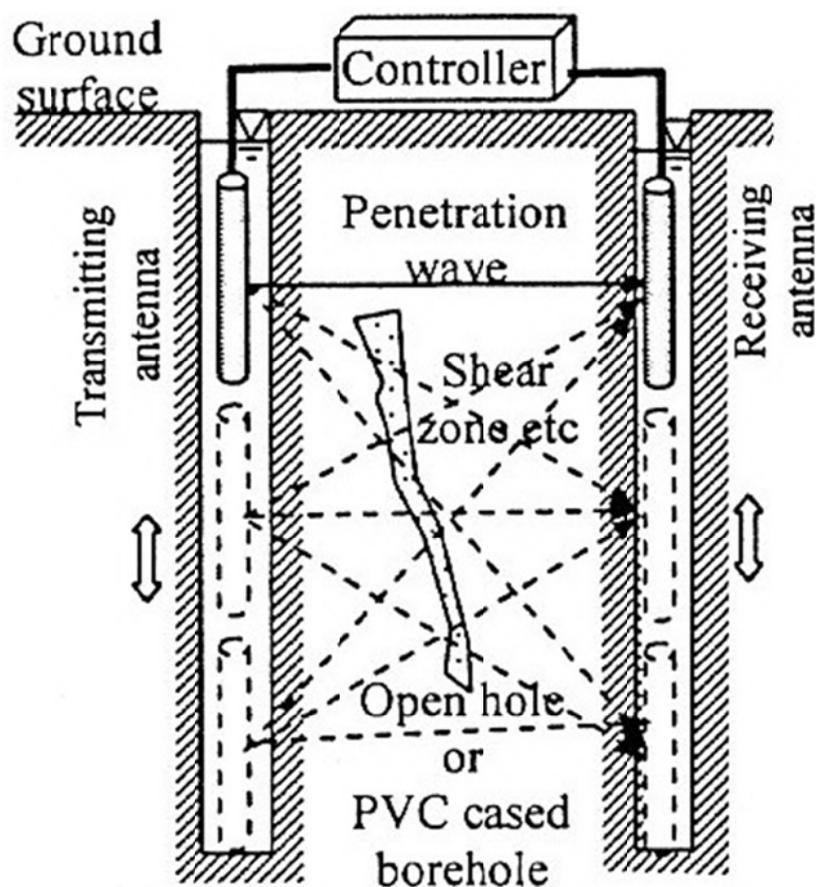


圖 A-18 斷層掃描施測法示意圖(摘自 SEGJ, 2004)

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

高導電地體施測：因透地雷達是透過分析返回地表之反射訊號以達到施測目的，在高導電度的環境下，電磁波之能量衰減情形嚴重，將會大大降低其有效探測深度，一般而言，若是探測目標在含水嚴重或黏土質高之土體下將難有明顯之訊號返回地表，而造成施測結果不佳之情形，在施測上，若已了解該處之土壤特性如上所述而將無法達到施測目的時，應考慮採用它種檢測方法。

電學性質差異不顯處之施測：因透地雷達是透過分析返回地表之反射訊號以達到施測目的，因此對於無法產生良好反射面之處將無法探測得到，此種情形包括有：兩者材料間之電學性質差異不大、土層厚度過薄或是兩者材料間存在有足夠之漸變段，此些情形都將造成透地雷達無法進行探測之可能，在施測上，若已了解該處之特性如上所述，應考慮採用它種檢測方法。

(四) 分析方法與資料判釋須知

探測深度計算：現場施測完後所收錄之資料應首先以電磁波源與接收天線之中點位置為橫軸，而以所收到反射訊號之來回走時為垂直軸進行資料之整理與展示，如圖 A-19 所示者為整理後以灰階展示。於圖中可注意到其垂直軸包含有來回走時時間以及深度同時存在之情形，其深度之計算是將所收錄之來回走時透過地層之電磁波速進行轉換，實務上，電磁波之波速是為未知，除採用同中點施測法假設地層為層狀結構可獲得試驗數據用以計算深度外，一般是由所收集之資料得知該處土層之可能組成，而後以之電磁波波速進行推估(可參考表 A-7)。待此資料之整理與展示完成後，便可以開始對資料進行訊號處理以及結果解析之動作。

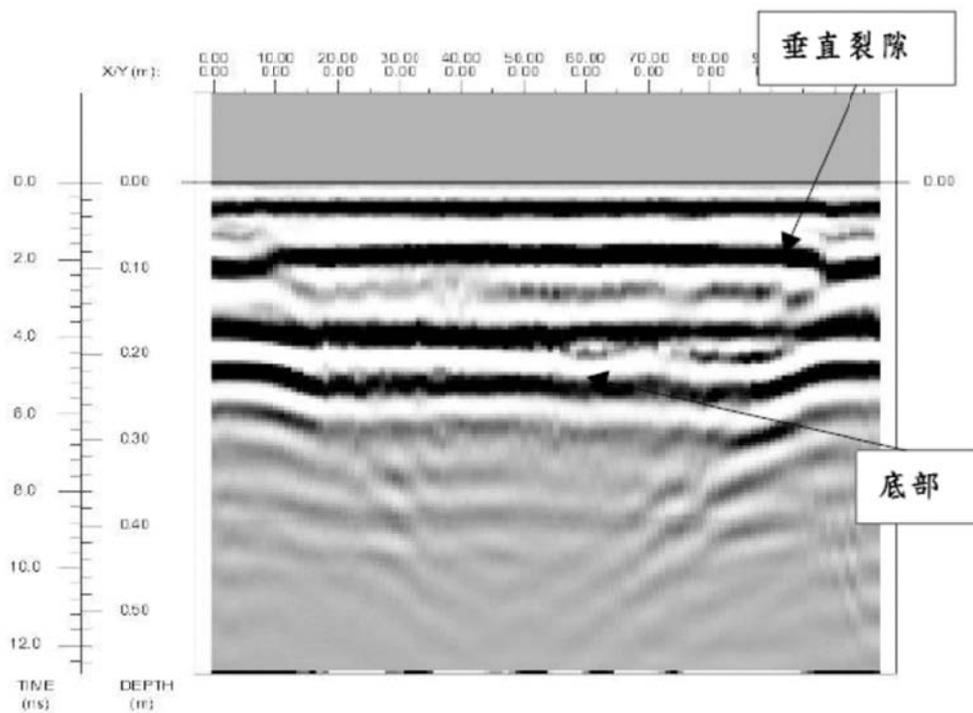


圖 A-19 透地雷達二維反射訊號影像(混凝土塊體，摘自鄧景龍，1990)

表 A-7 常見土層材料之電磁波波速(摘自 Davis and Annan, 1989; Ulriksen, 1982)

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

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

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

特殊性訊號處理包含有解迴旋(deconvolution filtering)、f-k 濾波(frequency-wavenumber domain filtering)、移位(migration)等。如圖 A-19 所示, 當訊號已到達試體底部後, 其陸續還會再有反射波出現, 此些波是由於波不斷在層面與層面間來回反射而造成, 此種迴波(echo)之情形在地層中亦會發生, 此將造成解析上之錯誤, 因此透過解迴旋或是 f-k 濾波可將其所造成之問題略為降低; 而除此之外, 如圖 A-20 所示, 當透地雷達所發送之電磁波遇到地下掩埋物(如管線)時, 其原始訊號所展現出之形狀與介面形狀不同而呈一拋物線狀, 對於此一問題, 可透過進行移位之訊號處理而使得其訊號線型與實際介面形狀較為接近。

地表位置之判斷: 在透地雷達之判釋中, 地表面反射訊號之位置為一重要判釋標的, 對於地表面反射訊號之判斷, 最簡易之法是於現場資料收集時, 透過將透地雷達天線上下移動(對於天線頻率 $\geq 500\text{MHz}$ 表現尤佳)可於訊號顯示出一可辨識之反射訊號(強反射且將隨天線之移動有所移動), 該反射訊號即為地表面位置。

層面回波辨識: 對於層面回波之認定上, 由於所收集之訊號中雜含有在反射面上所產生之一次反射、在層與層間的二次反射、多次反射以及雜訊等, 此些反射訊號皆會影響對於層面數量以及位置之判斷, 此外, 波場與波場間之干涉情形亦容易造成側向層

面存在的誤判。對此，透過應用解迴旋(deconvolution)之訊號分析方法，可使波場中向下傳遞之波型較明顯而有助辨識主要反射面，利用量化之分析方法搭配辨識所得之主要反射面可有助於降低對於層面回波的過度認定，然而，此問題並不容易完全避免，應搭配較完整之地層資訊綜合解讀，降低過度認定之發生。

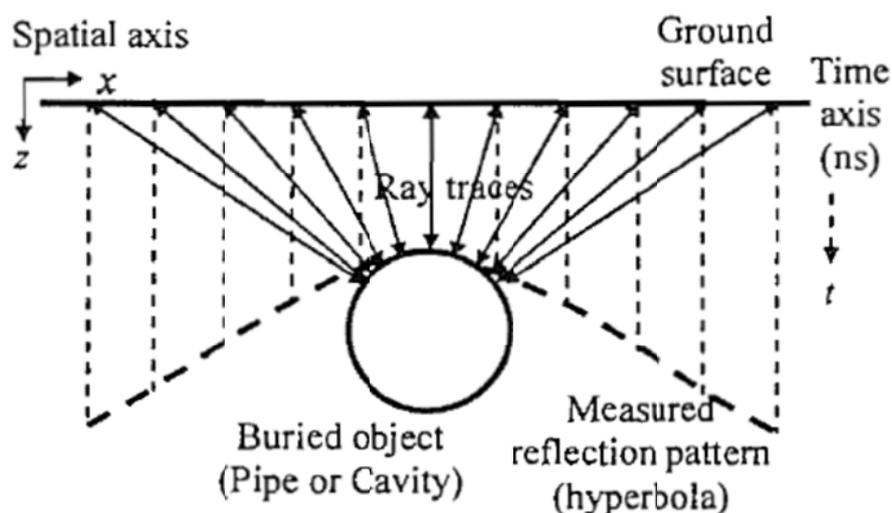


圖 A-20 透地雷達遇有地下掩埋物時之訊號線型示意圖(摘自 SEGJ, 2004)

雷達反射波剖面圖辨識：欲對探測結果做出良好之判斷應透過數值模擬方法或已知條件試驗，多了解並熟悉在不同配置下所可能產生之線形特徵，此外，其更需要長時間具回饋驗證之經驗累積。而在此之外，得於電腦輔助軟體之助，透過高密度的網格狀施測，藉由軟體將網格狀空間相對位置建立起，以顏色區分不同之反射強度，而可得 3D 之影像成果，在 3D 影像中，透過以顏色為群組之觀察，探測標的物以體積之型態出現，其所展示出之整體形狀以及大小將更加提升其可辨識度，進而降低其解析辨識之困難度以及可能的錯誤判斷。

(五) 試驗規劃及招標內容要點

測線位置：測線之位置設置以及測線間距並無一定準則，應視欲探測物之形狀、大小以及土層特性而定。一般測線之安排以能獲得代表性斷面為目標，對於線性之探測物(如管線等)，測線安排應儘量與其長軸垂直；而在測線間距上，以可最有效率(在最短施測時間內完成，而其結果可達到欲設目標)施測之前提下訂定，對大部份之壩體混凝土構造物應用上來說，1 至 5 公尺為普遍使用之間距，然而若探測目標較小或欲獲得較密集且高解析之網格狀施測結果(做為三維影像分析使用)，其間距可再視需求進行調整縮小。

天線頻率選擇(探測深度與解析度)：在透地雷達之施測上，為能達到預設之解析度與探測深度之目標，其需考慮三項主要因素：1.天線頻率；2.土層之電學特性(導電率及介電常數)；3.探測物與周邊材料之電學性質差異度。此中，第2與第3點皆是現場實際情形無法由我們控制，如此一來，天線頻率的選定無疑是影響成果最重要之一環。錯誤的天線頻率將可能無法達到探測目的，或無法清楚測得目標物而造成錯估。探測深度與解析度此兩者皆與所使用之接受天線頻率有關，然而其間有互斥之矛盾情形：高解析度需要高頻之天線，然而高頻之電磁波所能探測之深度，反之，亦然。

目前坊間商業化之透地雷達天線可選用之頻率在 25MHz 至 1.5GHz 之間，一般而言，該頻率與解析度及探測深度有一對一的關係，然而，在未知地層電學性質之前，無法獲得此一絕對關係。而在探測深度上，其受材料含水量以及材料本身電學性質影響過大，甚為複雜，僅能以一般性言之，大致而言，天線頻率在 2300MHz 至 400MHz 之間時，其探測深度約在 0.4 公尺至 5 公尺

之間，而再低頻之天線，雖然在良好之情況下，其探測深度可超過 10 公尺，甚至對 25-50MHz 之天線於乾燥之結晶岩中可達 100 公尺以上之探測深度，但保守起見，以臺灣之地質材料特性而言通常以 10 公尺之探測深度為透地雷達之極限，可參考表 A-8，根據所欲探測之目標尺度(解析度)以及探測深度進行天線頻率之選用；另需注意，在預期有含水、含有金屬礦物或是含有黏土成份之土層，其探測深度將受影響而有所降低。

表 A-8 天線頻率選擇建議表(MALA Geoscience)

天線頻率(MHz)	調查目標尺度(m)	探測深度估計(m)
25	>1.0	5-30
50	>0.5	5-20
100	0-1.0	2-15
200	0.05-0.5	1-10
400	~0.05	1-5
500	~0.05	1-5
800	0.05-0.01	1
1000	0.01-0.025	0.5
2300	~0.01	0.4

招標內容：為使成果可達到探測需求，建議招標內容應說明施測目的與目標、施測範圍、施測方式(水平剖面法、同中點施測或層析成像法)、施測數量(詳見下段計價單位與考量)以及要求之報告書內容(詳見本小節最後之報告書內容)。

計價單位及考量：在招標內容中建議含有詳細之施測數量說明，在施測數量之訂定上應根據不同施測法進行要求，並且應考量其測線長度與使用之量測間距：

1. 水平剖面法，建議為每公尺需多少元，即元/公尺，而其數量亦應以此進行設定。

2. 同中點施測，建議為每公尺需多少元，即元/公尺，而其數量亦應以此進行設定。
3. 層析成像法，其計價單位建議為每公尺每個接收天線(含電磁波源)需多少元，即元/(公尺*接收天線數量(含電磁波源))，而其數量亦應以此進行設定。但因現行常用計價單位為每公尺多少元，即元/公尺，此計價方式未考慮接收天線間距，因此若在不改變目前常用之計價方式下，建議應將天線間距之要求作為前提條件。

施作方法的不同所牽涉之施作與分析技術越高，因此在單價上層析成像法>>同中點施測>水平剖面施測。

報告書內容：完成施測與分析判釋後，報告書的撰寫中至少須包含下列幾項內容，以便提供足夠資訊予管理者或其它專業人員對其報告結果進行合理判斷。其分別為：1.施測的目的與範圍；2.測線的佈設位置；3.現場環境說明；4.施測之方法；5.所使用之透地雷達儀器設備、天線頻率以及取樣時間；6.訊號之處理方法；7.施測與結果分析所用之程式軟體；8.分析結果判釋以及與現有資料之綜合評估，在此所做出之判釋結果應搭配施測結果一同呈現。

(六) 可能的誤差以及限制

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

人為因素，是指在現場施測過程以及分析過程中所造成的誤差，其可透過嚴謹的訓練與要求的過程達到改善，在此可能造成誤差之原因主要是在於特殊性訊號處理之過程中，分析人員對於

各個訊號處理方法之掌握度不足而可能造成有效資料之遺失。此外，對於現場之資料掌握不足，造成在選用地層電磁波波速時有所錯估，而造成結果之誤差。

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

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

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

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

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

方法。

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

六、彈性波層析成像法

(一) 大壩安全檢查問題應用

表 A-9 彈性波層析成像法於大壩安全檢查問題之應用

壩型	位置	安全檢查問題	選用分類	參考案例檢索
混凝土壩	壩體	裂縫	C1	
		滲漏	C	
		混凝土強度不足	B	
	壩趾	淘空	B1	
	壩基	滲漏	C1	
		滑動	B2	
	壩座	淘空	B1	
		滲漏	C1	
	溢洪道	滲漏	B2	
		裂縫	C1	
土石壩	壩頂/壩體	裂縫	B2	
		差異沉陷	B2	
	壩體	坡面滑動	B1	
		滲漏	C2	
		淘空	B3	
	壩趾	滲漏	C2	
	壩基	滑動	B3	
	壩座	滲漏	C2	

	溢洪道	滲漏	C	
		裂縫	C1	
		混凝土強度不足	B	
	排水廊道	滲漏	C	
		裂縫	C1	
	培厚區	滲漏	C1	

(二) 原理

彈性波層析成像法是藉由在地表面設置接收器，用以紀錄由人造震源所產生之震波的傳遞時間 (travel time) 又稱做初達波走時 (first arrival time，即最先到達之波動)，被接收之震波包含直接震波 (direct acoustic wave) 及受到地層變化而折射回地表之折射震波 (refracted acoustic wave)，初達波走時的不同與地層壓縮波波速、地形以及地層結構有關，透過將探測之地層劃分為數個單元 (圖 A-21) 後，透過反算技巧可獲得地層之壓縮波波速分佈 (如圖 A-22 所示)。

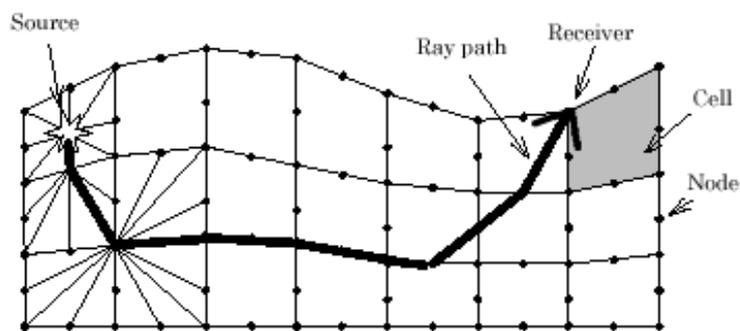


圖 A-21 層析成像反算分析原理

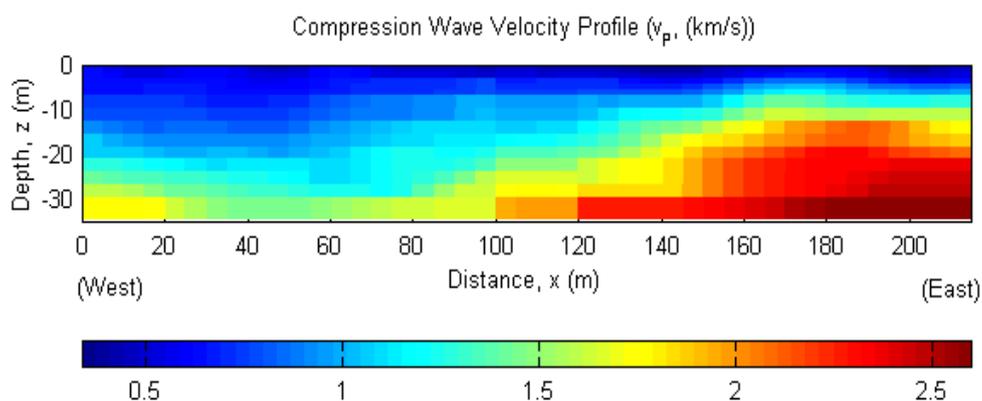


圖 A-22 二維地層壓縮波波速剖面

(三) 施測方法與儀器現地適用性調整

現場施測：彈性波層析成像法之現場施測容易，根據規劃所在位置進行接收器之設置，確保接收器與地表接觸良好後，於預定震源位置進行敲擊產生振動訊號加以收集即可，通常一個震源位置會依現場狀況的不同而有多次敲擊的需求，其最主要目的是要透過多次的結果疊加後使得雜訊比降低，而可有較好的資料品質。於現場進行施作時確保收錄到良好的資料品質是施作成功與否的重要關鍵。

地表與孔內探測：進行地表彈性波層析成像量測(如圖 A-23a 所示)雖可獲得地表下壓縮波波速之深度剖面，但其因僅有表面具有接收器進行資料收集，使得較深處所得之量測解析度較低，而無法在深度上獲得較佳之探測結果，而若壩體存在有恰當之鑽孔，則在壩體中採用彈性波層析成像之量測上可有較大的靈活度，其可孔內施作(如圖 A-23b 所示)，亦可兩孔孔內或多孔孔內搭配地表地電阻施作(如圖 A-23d 所示)，如此對於探測之結果可增加其在深度上之解析度，提升對潛在問題的檢測能力，而一般大壩在垂直壩軸方向之地形(如圖 A-23c 所示)可視為圖 A-23d 之簡化，

極為適合使用此種方式進行施測。

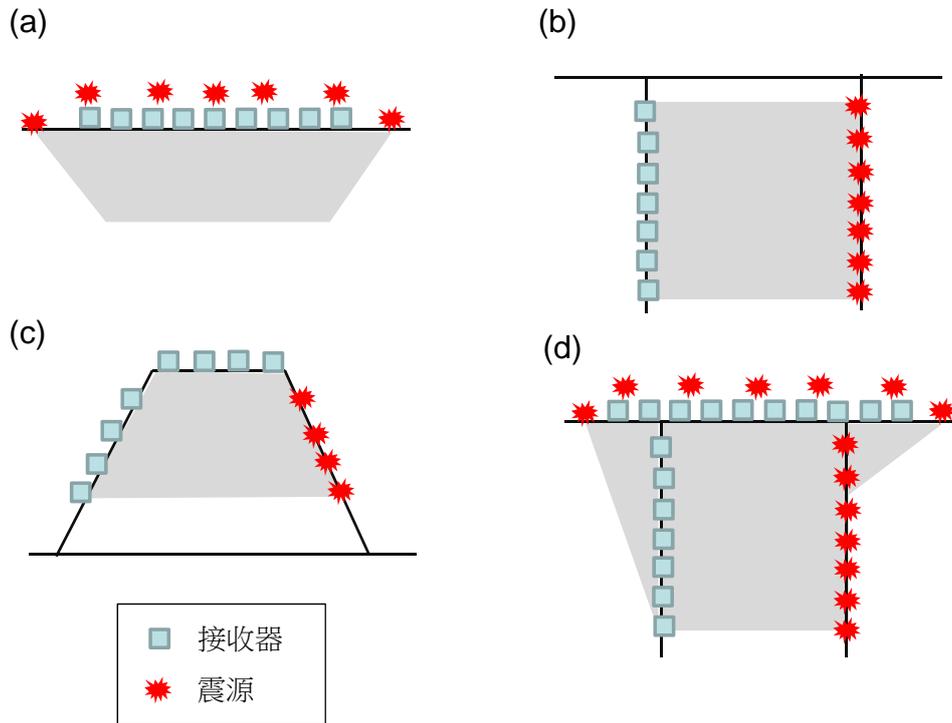


圖 A-23 地表及孔內彈性波層析成像施測配置

監測：彈性波層析成像探測法可作為監測工具使用，在施作上，於慎選監測斷面後，以固定的時間固定的接收器、震源位置進行量測，透過獨立之反算或具時移考量之反算(time-lapse inversion)可獲得有效監測成果。

人造物與交通之影響：大壩常存在有不同的轉動機具進行運作，例如水力發電設備或是抽水設備，此外在某些具觀光目的之大壩亦會有來往的車輛以及行人，對於彈性波層析成像法而言，此些造成之地表振動皆為雜訊，尤其在彈性波層析成像法的分析過程中所挑選的 P 波初達波振動較小，在較為吵雜的環境中並不易抗雜訊，尤其是距離振源較遠處的地方，更容易發生無法分析的問題。欲改善此問題可由施作以及分析兩方面進行，在施作上，應建立交通管制措施，在施作時必要靜止人車之移動，此外可透

過多次的疊加提升訊雜比，而人造機具的部份在必要時候應考量短暫的停止運轉可能性。

於混凝土、瀝青鋪面上施作：於大壩中應用常會有在壩頂或大壩踏台上施作之可能性，而此些位置之表面常會有混凝土或是瀝青鋪面的存在，以既有之常見受波器是需要將其貫入土中約 10 公分以便與地表有足夠之耦合程度，雖於混凝土或是瀝青鋪面可直接以鑽孔後插入的方式進行，但其會造成施作速度較不具效率外，亦可能不小心造成整個鋪面的破壞。此外，彈性波層析成像法在混凝土壩中或是排水廊道中施作時，其有可能需要在混凝土立面上施作，此時進行鑽孔置放電極棒並不恰當亦通常不被允許，同時震源之敲擊極可能造成混凝土表面的破壞，此外，在混凝土上之施作，由於混凝土材料波速較快($>2500\text{m/s}$)，啟振器與實際敲擊時間的時間差(trigger delay)，將影響探測結果之判釋。

基於前述之不便及可能造成之問題，經濟部水利署(民國 94 年)研究報告提出一平板式受波器座之設計可供應用，如圖 A-24 所示，其使用鋁合金板，共有上下盤，上盤尺寸為 $16\text{cm} \times 10\text{cm} \times 0.6\text{cm}$ ，下盤尺寸為 $12\text{cm} \times 10\text{cm} \times 0.6\text{cm}$ ，總重為 0.6 公斤。而為使此受波器在混凝土立面施作時可黏著於混凝土面並與混凝土面耦合良好，在受波器與混凝土面間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媒介，可有效黏著在混凝土壁面上。而在震源方面，可改使用木槌或是將原有鐵鎚包覆硬橡皮後敲擊，亦可簡單採用 5mm 以上厚度之鐵板作為混凝土面上之敲擊面，可有效保護敲擊面之完好。而對於 trigger delay 之問題，可變更一般常使用之加速度器啟振器，改採用短路系統作為啟振器，此短路系統只需將啟振器之傳輸線串聯一乾電

池後，使傳輸線之一端連接在鐵鏈上，另一端連接在置於混凝土面上之金屬板上，則當鐵鏈接觸到金屬板發生短路時，便會有一電壓產生而達到啟振的效果。

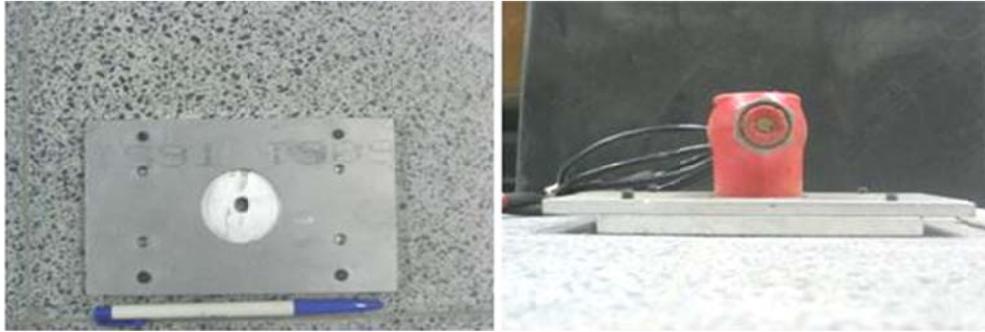


圖 A-24 平板式受波器(修改自經濟部水利署，民國 94 年)

於高懸處或水面下施作：採用彈性波層析成像法在大壩施作常會將測線與壩軸垂直，則在混凝土壩下游面則有高懸之情況，而在混凝土壩或土石壩之上游面則有在水下施作之可能，若採用傳統受波器或平板式受波器在施作上有許多不便，並增加施作之危險度，因此在此情況下，考量大部分壩體上下游坡面皆非完全垂直而是有一坡度存在，因此可視情況改採用水下受波器，並在其下方綁墜重物以使其可貼附壩體坡面即可，惟施作時應先確認無風吹動之影響並且訊號良好才可有較佳之應用成效。

(四) 分析方法與資料判釋須知

初達波分析：初達波為接收器所接收到的第一個振動訊號，須由所獲得的地層振動訊號中挑選。在實際的挑選上，並非每一條震波訊號逐一辨識即可。震測所獲得的訊號會包含所有的震動，包括有 P 波、S 波以及表面波，而在此所欲挑選的是 P 波(其波速最快)。相較於其它兩種波的震動，P 波震動的振幅較小容易被忽略或是被雜訊干擾而無法判別出來(如圖 A-25 所示)，因此，在挑選初達波時，應比較同一炸點之其他震源結果並利用晉像

(Phatoming)之技巧比較其他炸點收集到之波形來決定初達波之走時曲線。此外，挑選初達波應多注意，建立一固定的挑選準則，以避免整體初達波的挑選無一致的呈現，例如若挑選初達波的位置是在初達波訊號剛跳動的位置，或是在訊號最大的位置又或是在訊號斜率最大的位置。

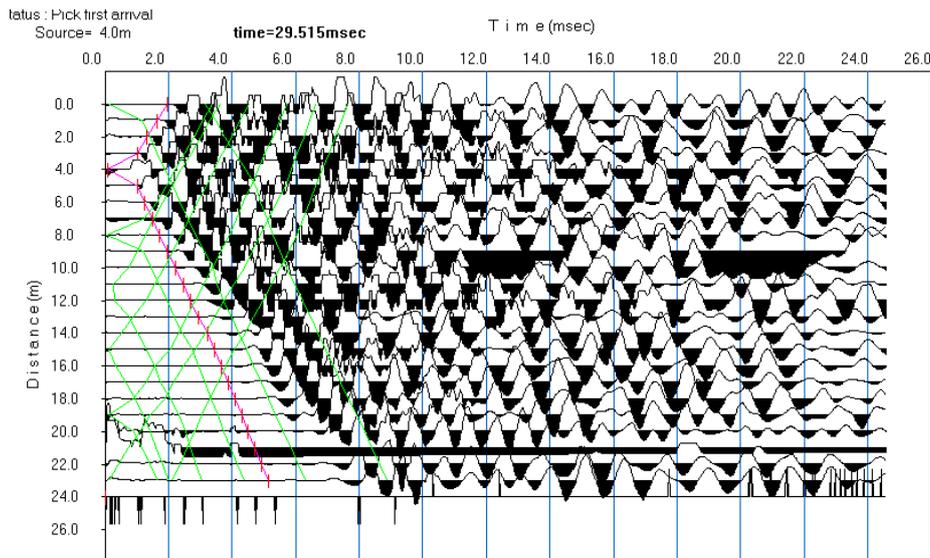


圖 A-25 初達波走時曲線挑選

反算分析：層析成像之基本理論乃是以震波之波線(ray)為基礎，將配置震源與接收器間之檢測區域，區劃分成數個單元(cell)，如圖 A-21 所示，每一方格皆對應其速度(常數或未知)，而後透過不同反算技巧進行參數解算。在應用上，混凝土壩因組成材料相較於土石壩而言較為單純，波傳路徑可單純採用直線或曲線追蹤(ray tracing)模擬，此類資料運算時間較短，但對土石壩之應用，其構築材料物性變化相對較具多樣性，如折射之高低速層(refraction layer)、局部高低速度反差 (high velocity contrast)及散射體之干涉波(scattering wave)等情況出現，致使運算結果誤差不易降低，故在具有疑慮之情況下，除上述波線理論之模擬計算外，另應考量以波場(wave field)理論為基礎之反算分析方法。

地形修正：在試驗的場址處，若有地形的起伏時應當對地形的高程剖面進行測繪，用於後續對於走時曲線的修正使用。

3D 效應：此問題之成因是目前彈性波層析成像法在反算上主要採用 2D 地層之假設，欲解決此問題須採用 3D 施測並以 3D 地層反算，否則便須於測線規劃時盡量避免。3D 之彈性波層析成像法目前尚未十分成熟，因此僅能盡量避免，在不影響探測目的下於規劃測線時避開垂直測線方向變化較大的位置施作，然而其影響距離與地體材料有關，僅能根據經驗概估並在對結果判釋前謹慎比對相關資料。

壓縮波波速影像剖面圖判釋：在結果的判釋上，除應考量 3D 效應可能產生的映射假資訊情形外，另外應瞭解影像剖面圖有其解析度之限制，一般概略為受波器間距之一半，但隨著探測位置距受波器距離越遠而越差。

(五) 試驗規劃及招標內容要點

測線位置：先根據既有資料(目視檢查、監測資料或其他顯示壩體狀態異常之資料)規劃可疑區域，而後進行定線之動作，在定線之過程中應注意

5. 進行探測規畫時，測線應盡量與壩軸垂直，若異常區域無法符合此條件時，可考慮進行 3 維探測或是考量探測結果的 3 維效應問題。
6. 若採用有孔內或壩體上下游之測線佈設時，接收器或震源距離實體界面(如築壩材料與原地層界面、壩體與山脊之界面等)較近時，應注意反算技術是否有考慮折射波之能力。
7. 測線儘可能為直線，避免轉彎角度或曲折過大，若因地表

因素而須有局部之接收器閃讓的情形，該接收器距測線預定位置以不超過接收器間距的 1/5 為基準，而整體之曲折應避免在垂直測線方向上最大接收器的偏移超過測線展距的 5%(於混凝土結構物上施作時應避免此些狀況)。

8. 欲調查之可疑區域盡量使其位於測線之中央，位於測線的端點時，其可能會在測線盲區(測線兩端點向下 45 度線以下的範圍)內而無法被測得。
9. 彈性波層析成像法主要是建立在初達波走時曲線的基礎上，因此當測線主要在一條線上而非在壩的上下游兩側時(例如測線只在上游壩面或是只在下游壩面)，其所得之走時曲線將會以折射波為主，使得對於夾有弱層(下方地層波速較上方為低)的或是上下地層波速相近的地層會難以探測獲得，此外，地層亦需以足夠的厚度以便可反應在走時曲線上，否則將無法探測到。對於前述地體狀況存在時，應注意測線之規劃，使測線在壩之上下游側之佈設較為均勻為佳。

測線長度、接收器間距(探測深度、解析度)：層析成像法的探測深度以及解析度與所探測的地層有關，在不同的地層情形下會有不同的結果，但一般而言，探測可得之最深深度約是測線長度的 1/4 至 1/6 倍；側向解析度約為接收器間距的 1/2 倍，而垂直解析度與側向解析度相近，但隨著深度增加將有所降低。而對於有採用孔內施作的情況(圖 A-23b,c,d)，其可以涵蓋範圍估算，涵蓋範圍即為最外圍側的接收器與震源連線，解析度同前，為其解析度的下降是以與接收器或震源越遠處其解析度越低，例如圖 A-23b 中解析度最低處會是在兩個鑽孔之間。在此要特別說明，

探測深度與測線長度相關，在接收器數目固定的情況下，接收器間距同時決定了測線的長度。一般而言，在混凝土結構物的施作上，接收器之間距不超過 2 公尺，以確保其在混凝土壩中有足夠之解析能力，且混凝土之波速極快，接收器與震源之定位將對結果有較明顯的影響。

震源位置：一般而言，在僅有地表施作(圖 A-23a)之配置下，震源的施測可採用七點法或九點法。顧名思義，七點法就是使用七個炸點，九點法是使用九個炸點，可依需求調整。如圖 A-26 所示為七點法之佈設例子，兩個炸點在測線外測稱做線外炸點，為有最佳的探測深度，其與最近的接收器距離通常是測線長度的 1/3-1/4 倍；另有兩個炸點是設在測線的起點與終點；其餘的三點平均分散在測線中。以如此對稱的方式佈設的主意是因為對於探測地層未有任何資料與了解，因而採取如此佈設，倘若對於欲探測的地層已有所了解便可透過正算模擬的方式調整炸點的安排，以期震源所產生的射線能涵蓋所欲探測的地層；而在具有孔內施做的佈設下(圖 A-23b,c,d)，其震源之佈設主要以震源產生之震波射線可直進至接收器為主要目標，通常在兩個鑽孔的佈設下(圖 A-23b)，會以一側為接收器另一側為震源，並使其等高程放置，而在垂直壩軸之壩體斷面上(圖 A-23c)，除在上下游壩面分別佈設接收器與震源外，亦會在壩頂之位置佈設兩者，以期產生之波傳路徑對探測區域有最佳的覆蓋率。

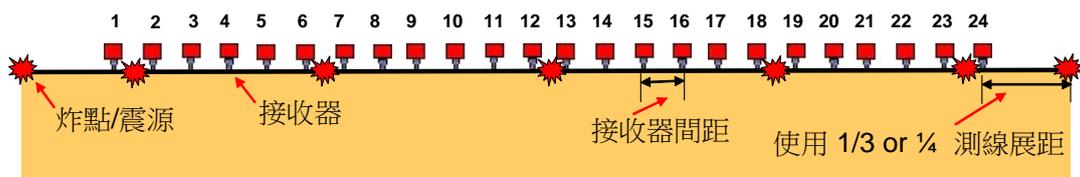


圖 A-26 彈性波層析成像法現場施測參數圖

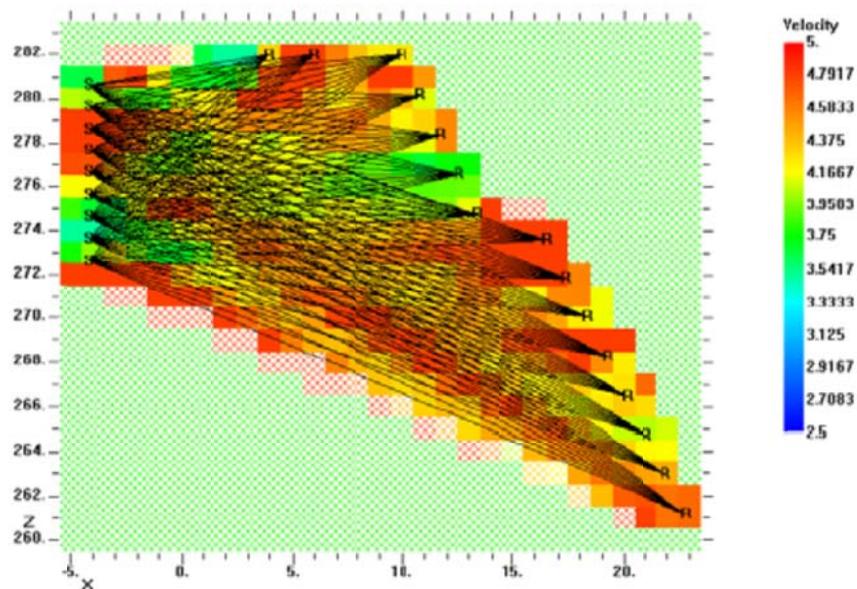


圖 A-27 震波波傳路徑示意圖(謝盛雄等人，2011)

招標內容：為使成果可達到探測需求，建議招標內容應說明施測目的與目標、施測範圍、施測方式(地表施測、孔內施測、壩斷面施測或綜合施測)、施測數量(詳見下段計價單位與考量)以及要求之報告書內容(詳見本小節最後之報告書內容)。

計價單位及考量：在招標內容中建議含有施測數量，現行常用計價單位為每公尺多少元，即元/公尺，但此計價方式未考慮接收器間距，其計價單位建議為每公尺每個接收器需多少元，即元/(公尺*接收器數量)，而其數量亦應以此進行設定，例如，欲進行測線長度 100 公尺且接收器間距不超過 5 公尺之探測，則其數量為 $100 \times (100/5 + 1) = 100 \times 21 = 2100$ 公尺*接收器數量。但因現行常用計價單位為每公尺多少元，即元/公尺，此計價方式未考慮接收器間距，因此若在不改變目前常用之計價方式下，建議應將接收器間距之要求作為前提條件。

彈性波層析成像法在採用壩斷面施測上其施測難度較高，需考量大壩現場之實際施測環境之難易度進行調整，尤其是在混凝

土壩之應用上，因此一般來說，其施測單價會較單純表面施作更高。

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

(六) 可能的誤差以及限制

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

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

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

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

先天因素，是指彈性波層析成像法本身理論上便無法達到的探測能力。例如在僅有單一平面上施作時，其需要地層間有足夠

的波速差異做為折射面、需要地層有足夠的厚度、需要下方地層的波速較上方地層為高等條件，是其必然存在的誤差原因，僅能夠透過配合孔內施作、其它檢測或試驗方法進行補充。

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

彈性波層析成像法應用限制：彈性波層析成像法主要是建立在初達波走時曲線的基礎上，因此當僅採用單一平面(或不同平面夾角過小)進行施作時對於夾有弱層(下方地層波速較上方為低)的或是上下地層波速相近的地層會無法探測獲得，其會造成下方的堅硬地層厚度有高估的情形。此外，地層亦需以足夠的厚度以便可反應在走時曲線上，否則將無法探測到。

七、多頻道表面波震測法

(一) 大壩安全檢查問題應用

表 A-10 多頻道表面波震測法於大壩安全檢查問題之應用

壩型	位置	安全檢查問題	選用分類	參考案例檢索
混凝土壩	壩趾	淘空	B4	
	壩基	滲漏	C2	
		滑動	B3	
	壩座	淘空	B4	
		滲漏	C2	
土石壩	壩頂/壩體	裂縫	C	
		差異沉陷	B3	
	壩體	坡面滑動	B1	
		土壤液化	B	
		滲漏	C2	

		淘空	B3	
	壩趾	滲漏	C2	
	壩基	滑動	B2	
	壩座	滲漏	C2	
	培厚區	滲漏	C2	

(二) 原理

一般所謂之表面波有兩種，一是雷利波 (Rayleigh wave) 另一是勒夫波 (Love wave)，其是地體受到擾動後在地表產生沿著地表面傳遞之波種，不類於在地體中傳遞之壓縮波或剪力波。於工程上使用之表面波震測是應用雷利波之特性做為分析標的。雷利波(為便利用語，後續之表面波專指雷利波)傳遞時，在地表處受擾動之質點是逆著其行進方向以一橢圓形軌跡滾動(如圖 A-28 所示)，其波傳影響範圍大約侷限於一個波長之深度內，因此，各個不同波長的表面波其所反映之地層深度特性將有所不同，亦即表面波影響深度隨頻率之不同而異。

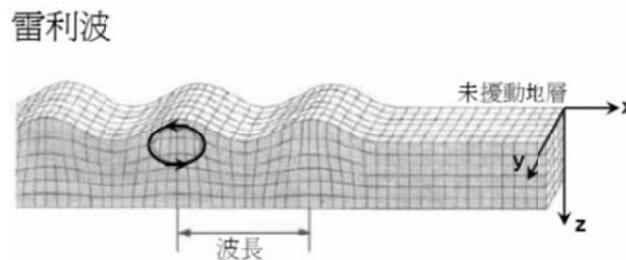


圖 A-28 雷利波示意圖 (Bolt, 1976)

當土層剪力模數隨著深度變化，不同頻率所造成的表面波波速便有所不同，此一特性稱之為頻散現象，將不同頻率所對應之表面波波速集合，可得一曲線，稱之為頻散曲線(dispersion curve)。表面波震測之基本原理即藉由量測表面波於不同頻率之相位速度，獲得其頻散曲線後再進行剪力波速度層構造之反算解析。

(三) 施測方法與儀器現地適用性調整

多頻道表面波震測法：多頻道表面波震測法在現地施測時，採用多個在同一直線上的接受器(如圖 A-29 所示)，其現場施測時將多個接受器於現地佈設完畢，使接受器與地表緊密接合，以鐵鎚等可產生地表震動之器具製造人造震源產生地表擾動，施作時反覆在同一震源處施作，將其疊加以消除雜訊之影響，直至收錄到清晰之表面波訊號為止，而後將此地表垂直位移訊號收錄即可。

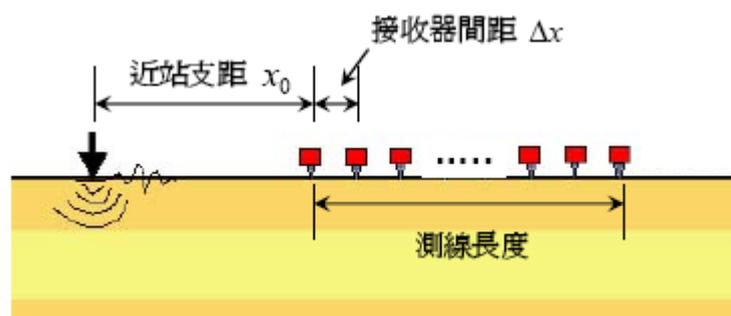


圖 A-29 多頻道表面波震測法現場施測參數圖

每一回施作可獲得一 1 維剪力波速深度剖面，此一 1 維波速剖面是測線下方土層性值之某一權重組合，在習慣上以測線中點做為代表，藉由不斷移動測線位置便可得到多個不同位置之地層波速剖面，這些不同測線位置之波速剖面反應出各不同位置之地層情形，具有地層構造之側向變化，透過內插之方式進而可合成得到 2 維剪力波速度剖面影像(如圖 A-30 所示)。

只需敲擊一次，便可完成。於定線後，需要決定接收器間距、測線長度以及近站支距，而由於其整體測線展距受到接收器數目決定，因此，需同時考量解析度與探測深度的問題，再加以決定接收器間距。而最佳的近站支距會受到不同地層而有所不同，可在現場進行測試後決定，但一般可採用 5 至 15 公尺。以 24 個接

收器為例，在第一個受波器之線外取適當近站支距，在施測上以解析度為主要考量，但至少要有 20 公尺的測深，因此設定接收器間距為 1 公尺，則有 23 公尺的展距，施作時反覆在同一震源處施作，將其疊加以消除雜訊之影響，直至收錄到清晰之表面波訊號為止。

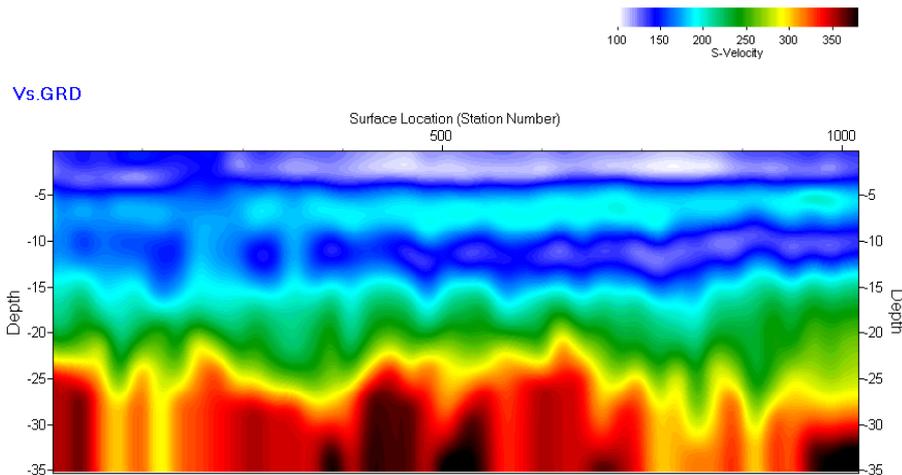


圖 A-30 表面波震測影像法案例-交大嘉義校區規劃調查

高側向解析法：高側向解析法的概念是固定地聽器位置，藉由多次改變震源擊發處，而後將這些資料以震源至地聽器距離重新排列，模擬出一極長展距的震測資料，就像是在一個單一地層情況的場址施測所得到的震測資料。當震源移動時，因為地層側向變化的存在會使波傳遞至相同距離時，在相位角上有一靜態的誤差，此一靜態誤差與頻率相關，不同的頻率下會有不同的誤差值。如圖 A-31 所示，該圖是以兩個半無限域的側向變化地層模擬出在頻率 65Hz 時的結果。為消除此靜態誤差，在將各個震源資料以震源至地聽器距離重新整合時需先進行縫合(seaming)的動作，強迫在相同的波傳距離有相同的相位角，而後再進行空間上的傅力葉轉換。

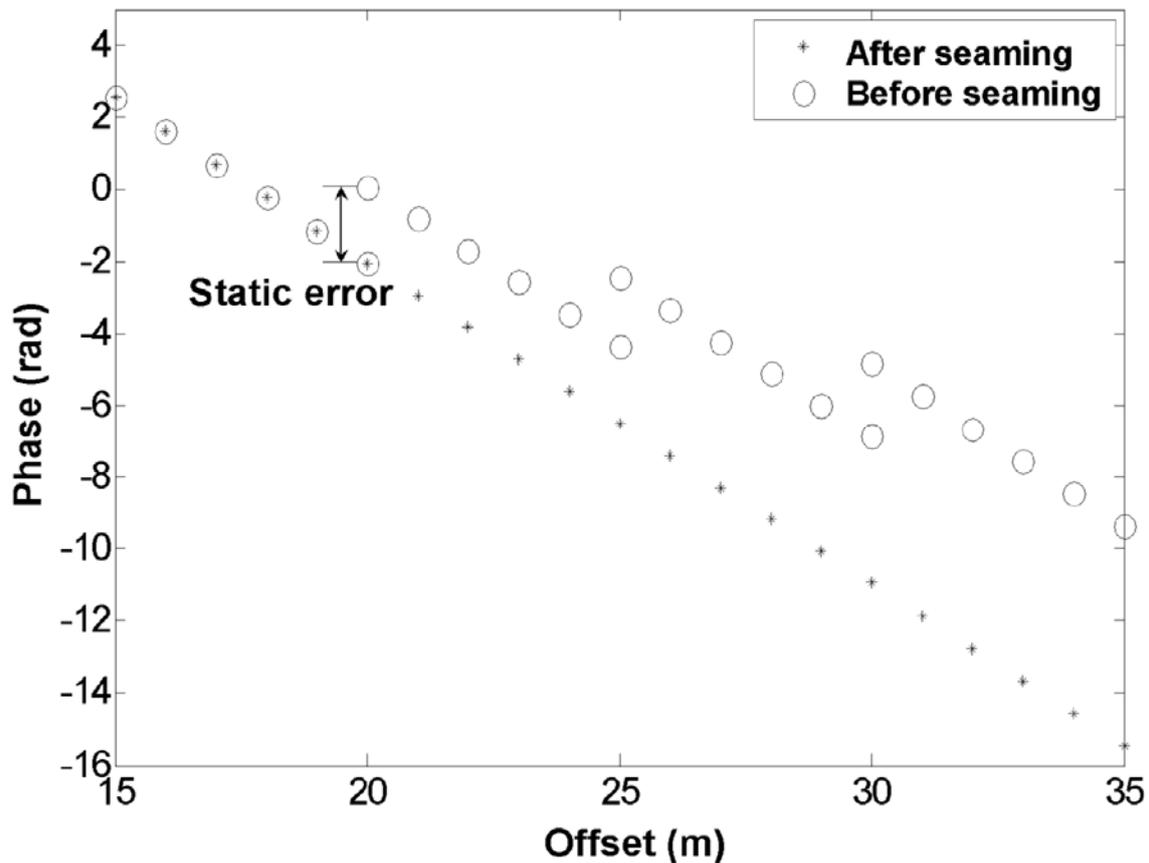


圖 A-31 靜態誤差與縫合動作示意圖

此改良後的施測過程，舉例來說，如圖 A-32 所示，以四個接收器進行高側向解析法施測，選用近站支距(x_0)為 1 公尺，地聽器間距為 1 公尺，將震源位置一次往後移動一個測線展距($L, 3m$)的距離。第一個震源處施作時可得到支距範圍 1m~4m 的資料，第二個震源處施作後可得到支距範圍 4m~7m 的資料，第三個震源施作後可得到支距範圍 7m~10m 的資料。以此類推，進行多個不同震源位置試驗之後則可得到足夠展距範圍的資料用以避免資料洩漏。換言之，若重複施作八個不同震源位置可分別得到與震源相距 1~4m, 4~7m, 7~10m, 10~13m, 13~16m, 16~19m, 19~22m, 22~25m 的震測資料，將資料組合即可得到類似 1~25m 展距範圍資料。

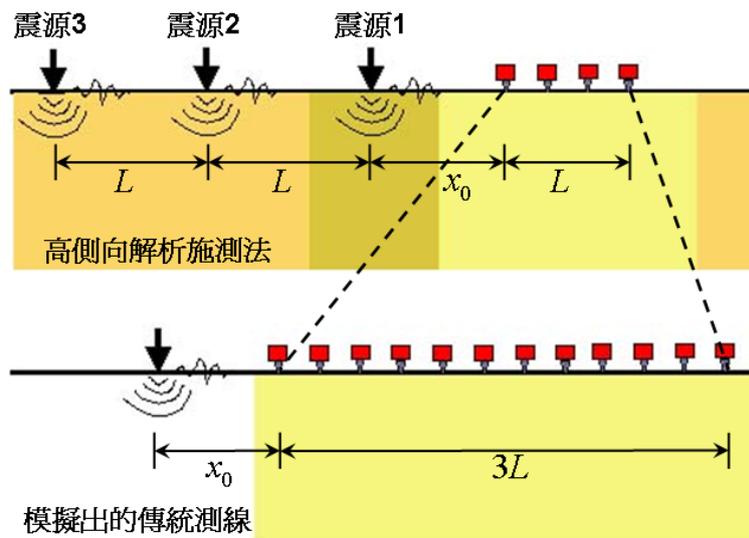


圖 A-32 高側向解析施測法概念說明

監測：多頻道表面波震測法可作為監測工具使用，謹慎選擇監測斷面後，在相同的接收器位置，相同之震源位置，並採用相同之分析方法，以固定的時間頻率進行資料收錄，期間之結果可顯示不同時間點的變化。

於混凝土、瀝青鋪面上施作：於大壩中應用常會有在壩頂或大壩踏台上施作之可能性，而此些位置之表面常會有混凝土或是瀝青鋪面的存在，以既有之常見受波器是需要將其貫入土中約 10 公分以便與地表有足夠之耦合程度，雖於混凝土或是瀝青鋪面可直接以鑽孔後插入的方式進行，但其會造成施作速度較不具效率外，亦可能不小心造成整個鋪面的破壞。

基於上述之不便及可能造成之問題，經濟部水利署(民國 94 年)研究報告提出一平板式受波器座之設計可供應用，如圖 A-24 所示，其使用鋁合金鈹，共有上下盤，上盤尺寸為 16cm*10cm*0.6cm，下盤尺寸為 12cm*10cm* 0.6cm，總重為 0.6 公斤，並可以以 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。

壩頂/壩體施作增加低頻能量：由長期現場試驗結果發現，一般常用做為震源之 12lb 鐵鎚在大壩施測上有低頻能量不足(探測深度較淺)之缺點，雖然多次疊加歷時資料可稍提高訊號雜訊比，但低頻訊號之能量內涵總顯不足，以壩體動輒數十公尺至百公尺高度的條件，低頻訊號之良莠與測區深處探測結果好壞甚為相關。

基於上點，製作一套移動便利且可產生大能量之低頻震源系統將可增進資料品質，經濟部水利署(民國 94 年)研究報告提出一自由落槌系統，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如圖 A-33 所示，三腳架連桿接合長度為 3.5 公尺，腳架在許可範圍下展開時中點重鎚垂直落距可達 2.5 公尺，重鎚材質為碳鐵，不易脆化，是一直徑為 30 公分之球體，重量 125 公斤，球體上部有一倒 U 型扣環與懸吊系統連接。惟其重量達 125 公斤，施作時應注意其可能對地表面所造成之損害。



圖 A-33 自由落錘震源系統(修改自經濟部水利署，民國 94 年)

降低頻散曲線之高次振態：如圖 A-34 所示，高次振態主要是指表面波在傳遞時在頻率下非最低速傳遞的波，在現行主要以基次振態為反算標的的反算技術下，高次振態的存在將造成基次振態有效頻寬的不足或是誤將高次振態辨識為基次振態進行反算，進而使得反算結果有高估剪力波速或錯估整體剪力波速趨勢(或特徵)之情形。根據經濟部水利署(民國 94 年)於石門水庫、新山水庫與仁義潭水庫之壩體所獲得之表面波震測測試結果顯示，頻散曲線之分析常有高次振態出現，因此須注意其影響。

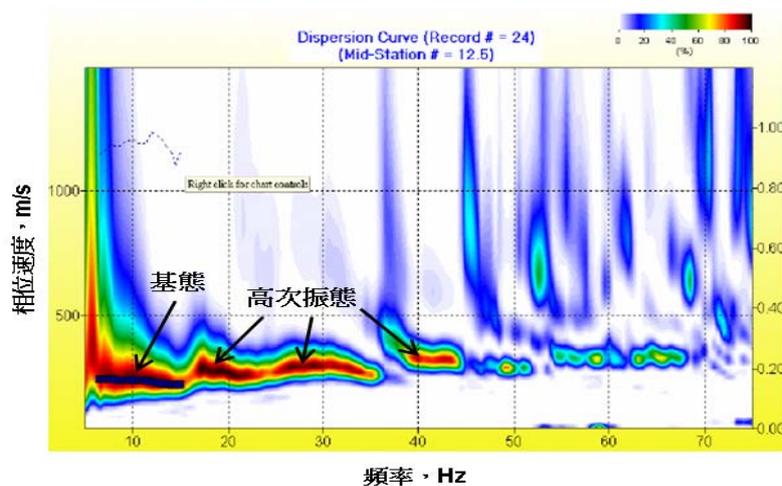


圖 A-34 仁義潭殼層表面波震測頻散曲線影像(摘自經濟部水利署，民國 94 年)

頻散曲線高次振態之問題主要是本技術在反算上之問題，在其反算技術提升前並無法解決，因此在解決策略上僅能朝降低高次振態影響之方面進行，只要能有效的辨識出基態頻散曲線，則即使在頻寬較為不足的情形下只要有合理數量的頻寬(一般而言低頻頻寬至少約需 30Hz)便可掌握地層的整體趨勢與結構特徵。

由此有兩個實際應用上之應對方式可進行，其一是使不同振態間可明顯區分，其二是降低高次振態發生的機會。對於第一點，其雖可採用增加測線展距的方式分離不同振態，但這會降低量測

結果的側向解析度且在大壩上不一定有足夠的空間可供增加展距使用，因此可採用 Lin and Lin(2007)的高側向解析法進行施作；而對於第二點來說，Park et al.(2005)建議採用較短(~1 公尺)的近站支距可降低高次振態能量主導的頻寬範圍(此一短近站支距的使用已包含於高側向解析法中)，此外 O' Neill and Matsuoka(2005)的研究指出，採用非線性的受波器排列進行施測，可使得各振態間的解析度提高，亦可提高振態間的分離。

(四) 分析方法與資料判釋須知

頻散曲線分析與反算：表面波震測之施作與分析可簡分為三大步驟：現場施作、頻散曲線分析以及地層反算(如圖 A-35)。將地表所收錄之垂直位移訊號，對其進行訊號分析而獲得表面波頻散曲線，再透過反算技巧對此頻散曲線進行反算分析便可得到現地 1-D 地層剪力波速剖面。多個接收器的收錄資料，提供了更多空間上的訊息，使得多頻道表面波震測法在頻散曲線的分析上可利用二維訊號處理技術分析震測資料，求得訊號品質優良之頻散關係曲線。

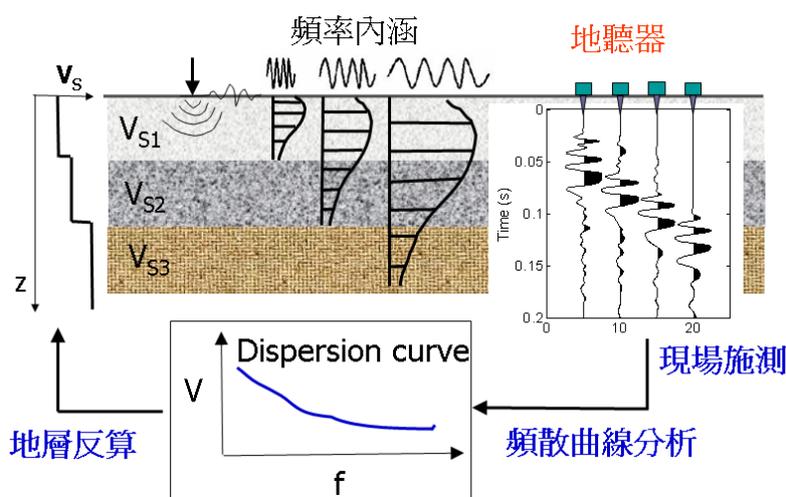


圖 A-35 多頻道表面波震測分析

欲由頻散曲線獲得地層剪力波速剖面（如圖 A-36）需要透過反算的技術。至目前為止，表面波震測之反算僅止於 1D 的反算，亦即是將地層假設為水平層狀地層，其可透過搭配正算模式由試誤而後多次疊代的技巧達成，亦可透過啟法式學習法如類神經網路(artificial neurons network)或退火模擬(simulated annealing)等無需正算模式的學習法達成。

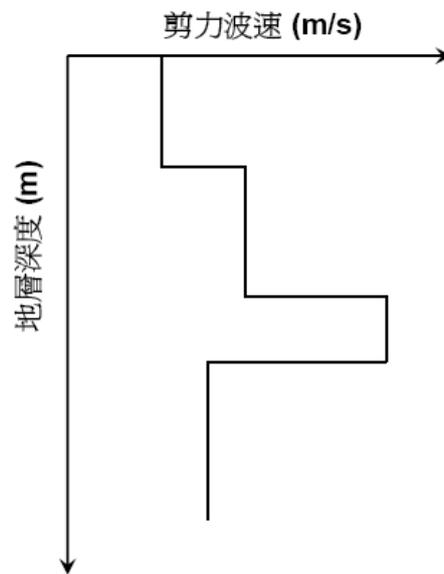


圖 A-36 地層剪力波速剖面

無論其採用之方法為何，在 1D 反算的架構下，其著重者在於以何者為反算標的。如前所述，在表面波震測法中是藉由頻散曲線進行反算，然而，如圖 A-37 所示，在水平層狀地層下所得之頻散曲線是有無限多條，在最低速處的稱為基態，其餘稱做高次態。在反算上可單採用基態，也可採用基態與數個高次態 (Xia et al., 2003, SWM)，另外亦可使用不將其區分為基態或高次態，稱做視頻散曲線 (apparent dispersion curve, Ganji et al., 1998; O'Neill et al, 2003; Bohlen et al., 2004) 做為反算標的。在進行頻散曲線分析時應當要特別注意反算中所使用的標的物為何，將所得到的頻

散曲線進行區分。

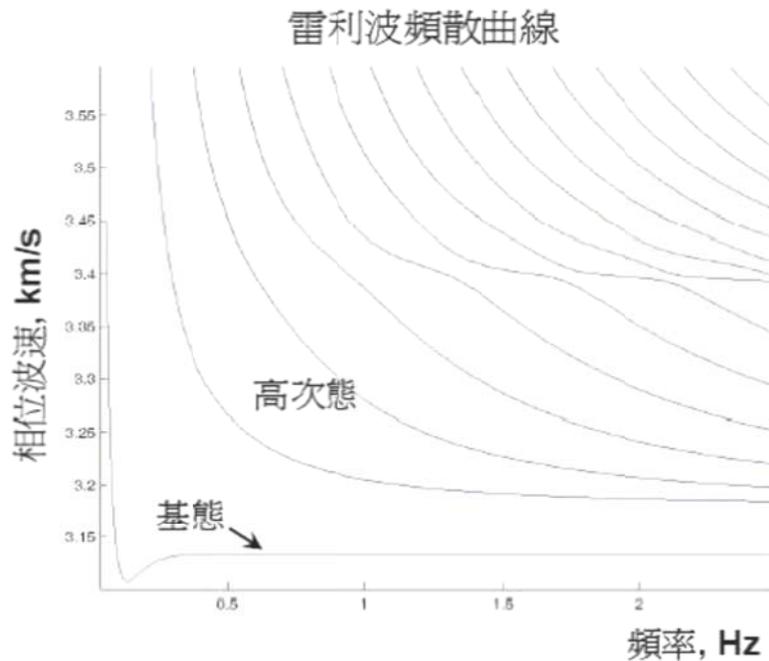


圖 A-37 表面波頻散曲線

剪力波速影像剖面判釋：由表面波震測法所獲得之地層剪力波速影像剖面可用以判別地層結構，然而，各種類的土層與剪力波速並非一對一的關係，並無法以某一範圍內之剪力波速便可辨識其為何者地層，在判斷上應搭配有一鑽孔資料以及該處地質資料做為佐證與比對之用將可使結果更具代表性。此外，剪力波波速可反應地層之剪力強度，由影像圖可得知其相對強弱，若有試驗資料，可搭配經驗公式獲得其可能之強度值，惟在最後判釋上仍應僅記解析度、地形效應以及高次態之影響避免過度解讀結果。此外，由於其假設地層為水平層狀，對於劇烈之側向變化以及具有地形變化的地層會有一定的扭區；又在較深處的薄層在其解析度可解析之能力以外，將難以明顯反應出，此些是其必然存在之誤差原因，僅能夠使用其它檢測或試驗方法進行補充。

地形影響：就目前表面波震測試驗的研究上，對於存在地形

效應時的解析方法尚無法提出一有效且合理的解析技術，根據經濟部水利署(民國 96 年)之研究報告指出，地形效應在表面波震測中可能會造成兩個影響：一是在頻散曲線上會造成低估的情形，另一是在頻散曲線中會使得高次振態的能量集中有增加的情形，使得基頻振態有效頻寬降低。以現今的分析技術尚於 1D 的理論架構下要將地形的影響納入僅能採用部份修正的方法，但在複雜的地質材料情形下，這些修正可能不具有代表性，因此，當沿著測線具有地形坡度大於 20 度的位置施作時，應要將上述影響納入考慮後再行解讀。此問題無法克服，僅能以避免或降低影響之方式進行，以避免地形影響之觀點而言，在測線規劃時應避免使測線上之地形坡度大於 20 度；以降低影響之觀點而言，可採用 Lin and Lin(2007)之高側向解析法進行現地施作，降低地形所造成之影響。

(五) 試驗規劃及招標內容要點

測線位置規劃：先根據既有資料(目視檢查、監測資料或其他顯示壩體狀態異常之資料)規劃可疑區域，而後進行定線之動作，通常最主要考量點如下：

4. 在盡量使測線為直線的前提下，避免在垂直測線的方向上有明顯的變化(如測線緊鄰基礎構造物或測線一側為懸崖另一側為懸壁等情形)。
5. 避免其地表高程變化坡度在 20 度以上。
6. 在已知可能有高度側向變化之位置應注意避免採用過長之展距或直接規劃使用高側向解析度施測。

接收器間距與測線長度(探測深度與解析度，參考圖 A-29 所

示)：在決定接收器間距與測線長度時主要需考量探測深度與解析度之需求，一般而言，探測可得之信賴深度約是與測線長度相等，側向解析度則與測線長度相等，而在對接收器間距之考量上，其為可探測得知之最淺層深度。就土石壩體之應用，常見採用 1 公尺接收器間距，測線長度採用 23 公尺，但就特定問題可根據需求進行調整。

近站支距(參考圖 A-29 所示)：近站支距主要是震源擊發所在，其距離主要控制表面波的成形，最佳的近站支距會受到不同地層而有所不同，可在現場進行測試後決定，但一般可採用 5 至 15 公尺。而在高次振態能量主導的施作位置，Park et al.(2005)建議採用較短(~1 公尺)的近站支距可降低高次振態能量主導的頻寬範圍。

測線中點移動距離：如圖 A-38 所示，一般見到由表面波震測所獲得之 2 維影像剖面結果是由多條測線進行施測所得之 1 維剪力波速剖面以中點維代表點，而後將各中點位置以外區域採用內插所得，因此在預期探測區域具有較明顯之側向變化（如有地下結構物，高角度斷層、孔洞或坍塌區）時，每條測線中點的間距應當要加以控制，以便能充份反應地層之側向變化情形，建議應用時，對於異常區塊內(如沉陷區)至少應涵蓋有三個測線中點較佳。

招標內容：為使成果可達到探測需求，建議招標內容應說明施測目的與目標、施測範圍、施測方式(一般施測法或是高側向解析施測)、施測數量(詳見下段計價單位與考量)以及要求之報告書內容(詳見本小節最後之報告書內容)。

計價單位及考量：一般採用施作的淨長度(如圖 A-38 中最右側接收器至最左側接收器的距離)作為計價單位，即每公尺多少元(元/公尺)，但如此計價並無法將每一測線的展距(接收器間距)以及測線中點移動距離納入考量，建議以每公尺每個 1 維反算剖面多少元，即元/(公尺*剖面數量)，並以加註每個 1 維反算剖面之測線長度與接收器間距之方式進行計價。

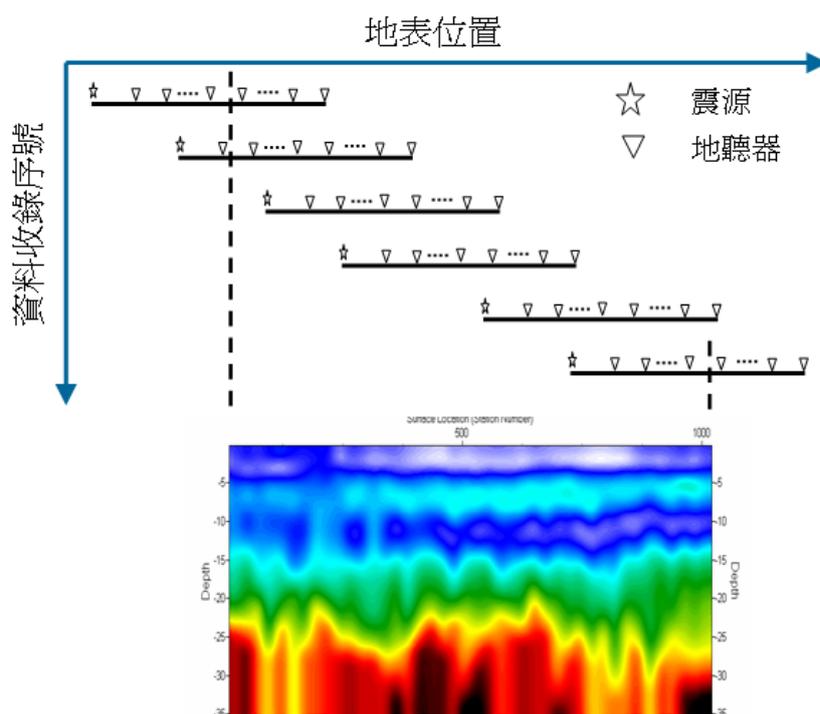


圖 A-38 二維剪力波速剖面造影技術示意圖

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

於分析的程式軟體；6.分析所得之頻散曲線；7.反算用之參數，如層數、地層厚度等；8.分析結果的判釋以及與現有資料的綜合評估。

(六) 可能的誤差以及限制

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

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

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

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

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

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

應用限制：在表面波震測的分析中，是假設地層為均質均向

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

八、參考文獻

1. 經濟部水利署，水庫安全監測問題評析與非破壞性檢測技術應用之研究，民國 94 年。
2. 經濟部水利署，水庫壩體監測及檢測與安全診斷技術研發(2/3)，民國 96 年。
3. 謝盛熊、黃貞凱、顏呈仰、紀文龍及胡志昕，彈性波層析成像於壩體之應用與分析，第 14 屆大地工程研討會，桃園臺灣，2011。
4. Bhattacharya, B.B., 1986, Reply to comment by N.S. Rajan, N.L. Mohan and M. Narasumha Chary., *Geophysical prospecting*, 34(8), p.1294-1295.
5. Bhattacharya, B.B. and Roy, N., 1981, A note on the use of a nomogram for self-potential anomalies., *Geophysical prospecting*, 29(1), p.102-107.
6. Boleve, A., A. Revil, F. Janod, J.L. Mattiuzzo, and A. Jardani, 2007, Forward modeling and validation of a new formulation to compute self-potential signals associated with ground water flow, *Hydrology and Earth system sciences*, 11, p.1661-1671.
7. Bohlen, T., Kugler, S., Klein, G., Theilen, F., "1.5D inversion of lateral variation of Scholte-wave dispersion", *Geophysics*, 69, pp. 330-44, 2004.
8. Butler D.K. and Llopis, J.L., 1990, Assessment of anomalous seepage conditions., In: Ward, S.H.(ed.), *Geotechnical and Environmental Geophysics. Vol2: Environmental and Groundwater*. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, p.153-173.
9. Ganji, V., Gucunski, N., Nazarian, S., "Automated inversion procedure for spectral analysis of surface waves", *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 124, pp. 757-70., 1998.
10. Johansson S., Friborg J., Dahlin T., and Sjö Dahl P., "LONG TERM RESISTIVITY AND SELF POTENTIAL MONITORING OF EMBANKMENT DAMS – Experiences from Hällby and Sädva Dams, Sweden", *Elforsk Rapport 05:15*, 2005.
11. Lin, C.-P. and Lin, C.-H., "Effect of Lateral Heterogeneity on Surface Wave Testing: Numerical Simulations and a Countermeasure," *Soil Dynamics and Earthquake*

Engineering, Vol. 27, pp. 541-552., 2007.

12. O'Neill, A., Matsuoka T., "Dominant higher surface-wave modes and possible inversion pitfalls", *Journal of environmental and engineering geophysics*, 10, pp. 185-201 , 2005.
13. Park, C.B., R.D. Miller, N. Ryden, J. Xia and J. Ivanov, "Combined use of active and passive surface wave method", *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, v. 10. p. 323-334,2005.
14. Patella., D., 1997a, Introduction to ground surface Self-potential tomography, *Geophysical prospecting*, 45, p.653-681.
15. Renolds J.M., " An introduction to applied and environmental geophysics", Wiley Inc., 1997.
16. Xia, J., Miller, R.D., Park, C.B., and Tian, G., "Inversion of high frequency surface waves with fundamental and higher modes", *Journal of Applied Geophysics*, 52, pp. 45-57, 2003.

附錄 B 地球物理探測技術應用案例整理

一、應用案例蒐集與檢索說明

將非破壞性的地球物理探測技術應用於水庫構造物的安全檢查中可有效且快速的獲得無法目視之水庫構造物內部情形，甚或可在問題僅在發端之始便可加以發現而進行改善預防，並且對於異常現象之成因或機制可有進一步之瞭解，然而，地球物理探測技術有一定的空間解析能力，且由獲得材料之物理參數間接反應其工程問題，因此該如何正確解讀探測所得之異常物理量十分重要，除了可藉由長時間專業的訓練與驗證中累積經驗外，透過對於國內外之案例的閱讀可快速地認知單一判釋解讀技巧，並且可進一步了解數種地球物理方法聯合使用時之綜合判釋技巧。

在應用案例資料整理上，將案例以水庫為主要收集分類，再將各水庫之案例依照不同之應用細分為(1) 案例檢索資料、(2) 壩體環境與安全檢查問題說明、(3) 地球物理探測技術規劃與現地應用問題、(4) 檢測成果說明、(5) 應用成果評析五個部份進行描述：

(1) 案例檢索資料：主要是為使此案例可實際做為其他類似情況之應用參考之檢索用，因此將以本計畫規劃進行之應用方法加以分類，此檢索資料會有四個檢索碼，分別是構造物類型-目標處-安全檢查問題-地球物理檢測技術(如所示)，而在許多情況下，通常會同時使用多種地球物理檢測方法互為檢視比較再進行最後判讀，在此情況下，將會將多種地球物理探測方法同時標註於第四個檢索碼中。

(2) 壩體環境與安全檢查問題說明：在此部份中對於水壩的周邊環境狀況以及所遭遇的安全檢查問題進行概要性的重點說明，以利閱讀者對水壩問題以及其地球物理技術應用原因有基本的瞭解。

(3) 地球物理探測技術規劃與現地應用問題：此部份將承接上部份說明在此水壩之安全檢查問題下所採用的地球物理探測技術，包含其規劃施作內容以及所面對的現地應用問題。

(4) 檢測成果說明：將檢測之成果進行分析說明其為水庫管理單位提供了哪些訊息，並解決了哪些問題。

(5) 應用成果評析：此部份將會以專業角度針對此案例之內容及應用成果進行評析，做為閱覽者的思考參考。

本章中共有國內外 17 個應用案例可供參考，為便閱讀選擇，將其索引資料整理於表 B-1。

表 B-1 地球物理探測技術於大壩安全檢查應用案例索引表

地區	壩名	案例檢索資料	頁數
臺灣	水社壩	土石壩-壩體-滲漏-地電阻影像探測法	p.97
臺灣	新山水庫	土石壩-壩體-滲漏-地電阻影像探測法	p.103
臺灣	烏山頭水壩	土石壩-壩體-坡面滑動-表面波震測法	p.108
臺灣	石岡壩	混凝土壩-壩體-混凝土強度不足-彈性波層析成像法	p.112
臺灣	西勢水庫	混凝土壩-壩體-混凝土強度不足-彈性波層析成像法	p.118
韓國	Sandong 壩	土石壩-壩座-滲漏-地電阻影像探測法、自然電位法	p.125
韓國	中部某壩	土石壩-壩體-滲漏-地電阻影像探測法	p.130
敘利亞	Afamia B 壩	土石壩-壩基-滲漏-電磁探測法、地電阻影像探測法	p.133
印度	Som-Kamla-Am ba 壩	土石壩-壩體-滲漏-地電阻探測法、自然電位法	p.143
中國大陸	廣東南水水壩	土石壩-壩體-裂縫-透地雷達探測法。	p.147
中國大陸	福建三清亭壩	混凝土壩-壩體-滲漏-透地雷達探測法	p.151
美國	Dana Lake 壩	土石壩-壩體-滲漏-地電阻影像探測法、自然電位法	p.156
美國墨西哥	Amistad 壩	土石壩(部分混凝土壩)-壩基-滲漏-地電阻影像探測法	p.162
美國	Barker 壩	混凝土壩-壩體-裂縫-彈性波層析成像法	p.166

希臘	Mornos 壩	土石壩-壩體-滲漏-彈性波層析成像法、地電阻影像探測法	p.169
西班牙	CHB 壩	土石壩-壩體-滲漏-自然電位法、地電阻影像探測法	p.174
西班牙	Ei Tejo 壩	土石壩-壩體-滲漏-自然電位法	p.179
瑞典	Hällby 壩	土石壩-壩體-滲漏-地電阻影像探測法監測	p.182

二、臺灣地區

(一) 土石壩

1. 臺灣-水社壩

(1) 檢索資料

土石壩-壩體-滲流-地電阻影像探測法。

(2) 壩體環境與安全檢查問題說明

水社壩為黏土心層，中心為鋼筋混凝土截水心牆之土石壩，壩頂長度 363.6 公尺，最高 30.3 公尺，壩頂寬 7 公尺，該壩體長期以來有滲漏之問題，為瞭解其滲漏路徑，並與過去調查資料比對，以規劃有效之整治方案，故進行地球物理探測技術之調查。

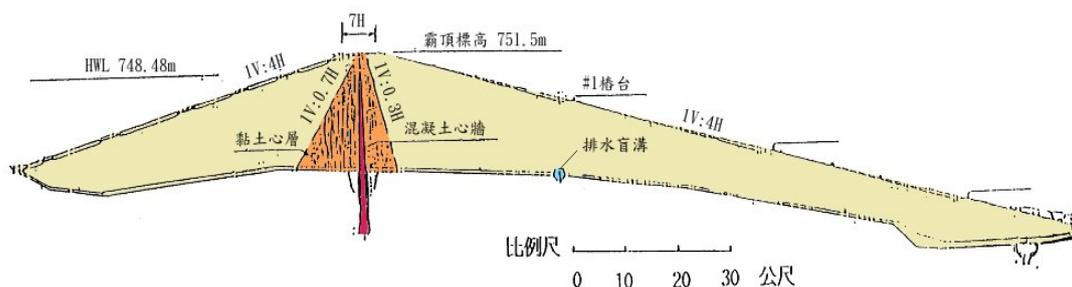


圖 B-1 水社壩標準斷面圖(台灣電力公司，民國 98 年)

(3) 地球物理探測技術規劃與現地應用問題

水社壩之壩體滲漏調查以 3D 地電阻探測進行施測，共規劃有 3 組測線：SE-H、SE-L 以及 SE-R(如圖 B-2 所示)。SE-H 測線

以長 485 公尺測線圍成長 135 公尺、寬 20 公尺之 3D 地電阻長方陣列，其長向約略平行壩軸(為表方便，後續以 x 方向表示之)，主要為探查平行壩軸之壩體溼潤情形；SE-L 測線偏向壩體左側，以長 500 公尺測線圍成長 75 公尺、寬 50 公尺之 3D 地電阻長方陣列，其主要目的是為了解垂直壩軸向之壩體溼潤情形，因此其長向與壩軸垂直(為表方便，後續以 y 方向表示之)；SE-R 測線偏向壩體右側，以長 500 公尺測線圍成長 75 公尺、寬 50 公尺之 3D 地電阻長方陣列，其主要目的是為了解垂直壩軸向之壩體溼潤情形，因此其長向在 y 方向上。

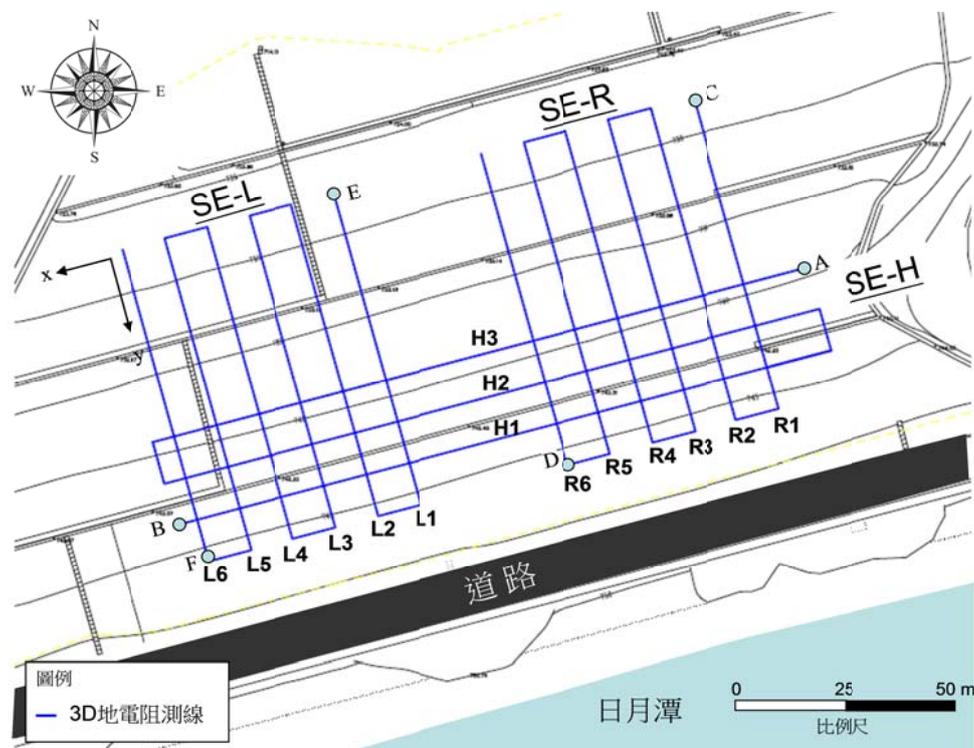


圖 B-2 水社壩 3D 地電阻探測測線位置圖

現場施測時，SE-H 測線電極間距設定為 5 公尺，在 y 方向線段與線段之間距採用 10 公尺，電極棒數目為 96 根，總展距為 x 方向 155 公尺、y 方向 20 公尺之 3D 測線，採用 wenner 法進行施測。SE-L 以及 SE-R 兩條測線之電極間距、展距與電極數皆相同，

電極間距設定為5公尺，在x方向線段與線段之間距採用10公尺，電極棒數目為96根，組成在x方向50公尺、y方向75公尺之3D測線，測線最頂端距離壩頂約12.2公尺(水平距)，測線最底端距離壩底約10.6公尺，採用wenner法進行施測。3組測線中，SE-H與SE-L以及SE-R互有相交，其位置關係圖如圖B-3所示，SE-L與SE-R所在高程相同，兩者間相距35公尺，SE-L之L6剖面位於SE-H自B點起算5公尺處，而SE-R之R1剖面位於SE-H自A點起算15公尺處。SE-H與SE-L以及SE-R交於高程較高處，H1、H2以及H3剖面分別與SE-L以及SE-R交於自DF起算10公尺20公尺以及30公尺處。

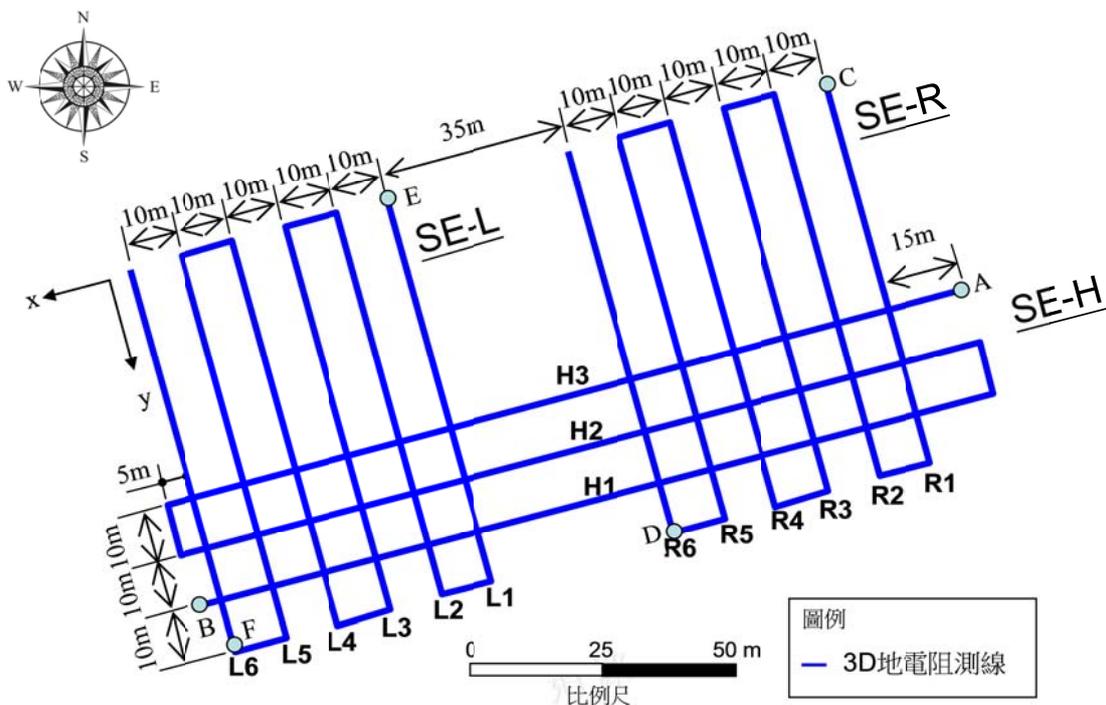


圖 B-3 水社壩 3D 地電阻探測測線相互關係圖

(4) 檢測成果說明

測線 SE-H 之 3D 地電阻探測結果如圖 B-4 所示，圖中顯示，偏左壩側之位置(測線約 100 公尺至 155 公尺)自地表開始便有低電阻率(<80ohm-m)土層之存在，該土層在測線 130 公尺至 155 公

尺間往下延伸至少 18 公尺深，自測線 130 公尺處往右壩側，低電阻率帶開始往下平移，於測線 100 公尺至 50 公尺間，低電阻率土層主要存在於地表下 7 公尺至 13 公尺深度間。測線 0-90 公尺段近地表 10 公尺內土層之電阻率相對較高(主要在 200-800 ohm-m 之間)，惟在測線 0-25 公尺處地表下約 13 公尺處有局部性的低電阻土層存在。

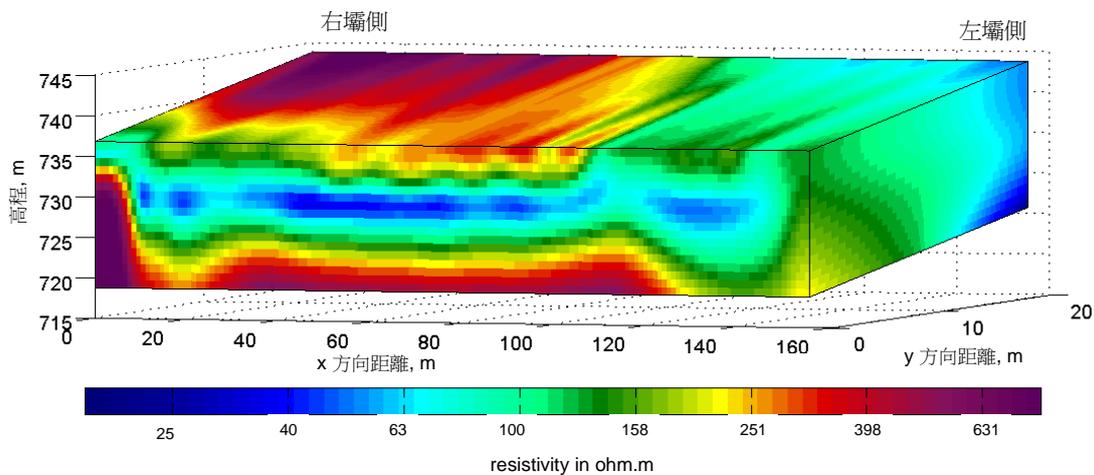


圖 B-4 SE-H 測線 3D 電阻率影像圖(台灣電力公司，民國 98 年)

SE-L 及 SE-R 測線之結果如圖 B-5 所示，結果顯示 SE-L 測線在偏左壩側之壩體可基本分為兩個帶狀低電阻率土層存在區，其一位於較高處，主要在測線 y 方向上約 45-70 公尺段(存在之高程約為 743-731 公尺)，該區土層自地表開始即有低電阻率(< 80 ohm-m)土層存在的情形，此區之低電阻率土層有向壩頂延伸的趨勢；另一低電阻率區位於測線 y 方向上約 18-30 公尺段(存在之高程約為 733-723 公尺)，低電阻率土層延伸至地表處。在測線最低處存在一明顯之高電阻率土層(> 200 ohm-m)，自地表延伸至地表下至少約 8 公尺深。SE-R 測線之結果顯示在偏右壩側之壩體主要存在一帶狀之低電阻率土層，該土層位於測線 y 方向上約 44-67 公尺段(存在之高程約為 737-至少 730 公尺)，該土層自地表下 5

公尺開始有低電阻率($< 80 \text{ ohm-m}$)土層存在的情形，另外，在測線最底部與最頂部存在一明顯之高電阻率土層($> 200 \text{ ohm-m}$)，自地表延伸至地表下至少約 5 公尺深。

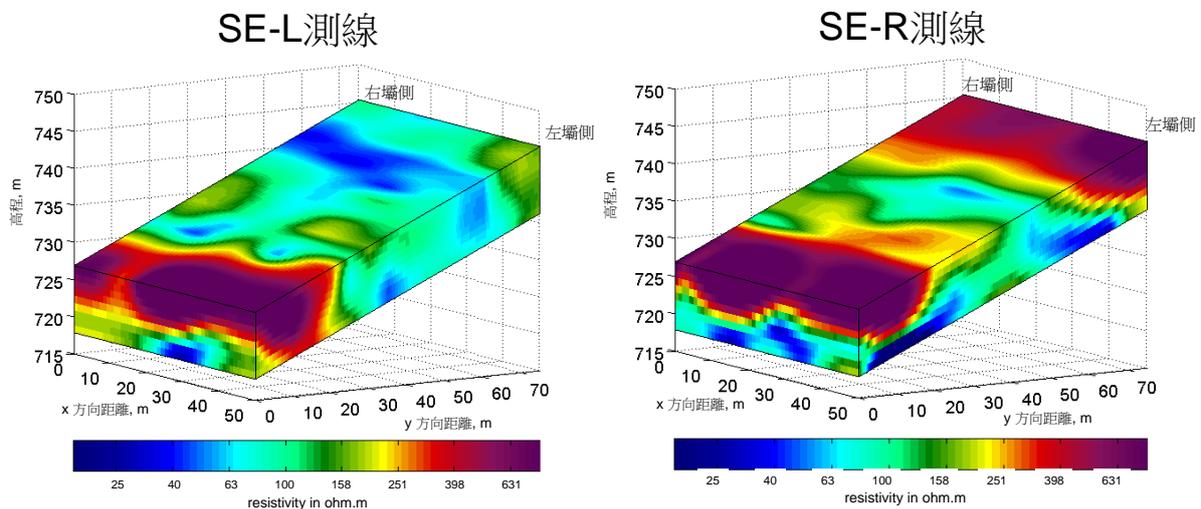


圖 B-5 SE-L 及 SE-R 測線 3D 電阻率影像圖(修改自台灣電力公司，民國 98 年)

於上述三組測線結果中可見有明顯之低電阻率存在區域，參考日月潭水庫整體安全檢查與評估現地探查及測試專題報告(台灣電力公司，民國八十一年)中對水社壩壩體電阻率與壩體材料含水關係之分類，電阻率在 $20\text{-}40\text{ohm-m}$ 間者為含水壩材，電阻率在 $50\text{-}100\text{ohm-m}$ 間者為濕潤壩材，綜合上述三組測線之結果將壩材含水特性整理如圖 B-6 所示，由圖中可清楚觀察到左壩側壩材含水情況明顯，在第一平台靠左壩側附近壩體表面便有含水情況，由該處漸往右壩側及下游側擴散；地下含水帶主要在第一平臺兩側，自壩體左側至右側皆存在，根據 WD12 與 WD13 兩處水位孔於民國九十八年九月之監測資料顯示，地下水位至少在地表下 11 公尺，此水位位置較圖中地下含水壩材之最低處還低，可知此地下含水壩材非地下水造成，而是由較高處之其它水源造成。將此圖與水社壩於 921 地震後由自然電位法量測所獲得之判釋流線圖

所顯示之流線相符，推測造成壩體地下水位線以上壩材濕潤以及含水之水源可能是由左壩側流入。

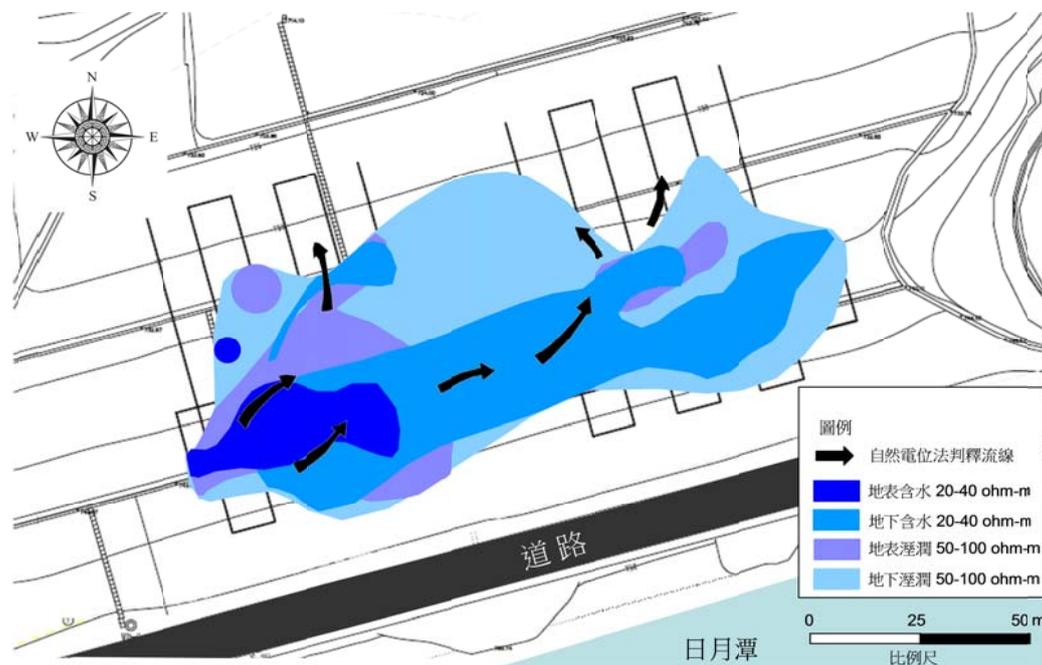


圖 B-6 水社壩地電阻探測綜合判釋結果(台灣電力公司，民國 98 年)

(5) 應用成果評析

此應用案例進行 3D 地電阻調查進行壩體滲漏調查，搭配自然電位法之結果可有效推測出平面之滲流流向趨勢，然而在最後綜合判釋結果中依據台灣電力公司(民國 81 年)對電阻率與含水狀態之分類進行簡化判讀，有兩點可進一步改善之處，其一，電阻率與含水狀態之關係是否恰當應該要更謹慎確認，才不致有誤判現地含水狀態之問題，其二，地電阻影像探測法較自然電位法之優處在於其可提供良好之深度資訊，在確認其平面滲漏區域與自然電位法相符後，應該再進一步以含有深度之訊息將滲漏在壩體中之可能 3D 滲流路徑找出，而可提供更為良好之工程訊息。

除此之外，此探測應用較為可惜處在於，就目前探測結果可

推測推測造成壩體地下水位線以上壩材濕潤以及含水之水源可能是由左壩側流入，若可再補充進行更靠近左壩座以及壩體上游側之施作將可使探測結論更加明確，進一步提升探測成果的後續應用性。

(6) 參考文獻

台灣電力公司，日月潭水庫整體安全檢查與評估現地探查及測試專題報告，民國 81 年。

台灣電力公司，日月潭水庫第三次整體安全檢查與評估報告，民國 98 年。

2. 臺灣-新山水庫

(1) 檢索資料

土石壩-壩體-滲漏-地電阻影像探測法。

(2) 壩體環境與安全檢查問題說明

新山水庫位於基隆河大武崙溪支流上游，大壩為一土石壩，水庫於 1980 年完成第一期工程，壩頂標高 EL.75 公尺，蓄水容量 400 萬噸，1998 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。

在新山水庫第一次(1998)及第二次安全評估(2001)中指出，壩體主要有兩處明顯滲流(如圖 B-7a 所示)，一處位於左山脊；另一處位於下游殼層趾部右側。於 2002 年新山水庫管理局針對左山脊滲水問題，經過研判其可能原因為左山脊處之地質不良條件造成，因而進行隔幕灌漿工程，以期能有改善，惟於新山水庫第三次安全評估(2008)報告初稿中指出，此處滲水問題依舊存在，對於滲

水機制實有進一步確認之必要。

對於下游殼層趾部之滲水問題，台灣自來水公司(民國 95 年)利用同位素追蹤試驗，發現在 2005 年夏季殼層趾部處滲流水約有 70-84% 來自庫水，然至目前為止，因對其滲流機制尚未有足夠了解，因而未有進行工程改善工作。本案例針對利用地球物理方法協助調查下游殼層之滲流問題進行探討。

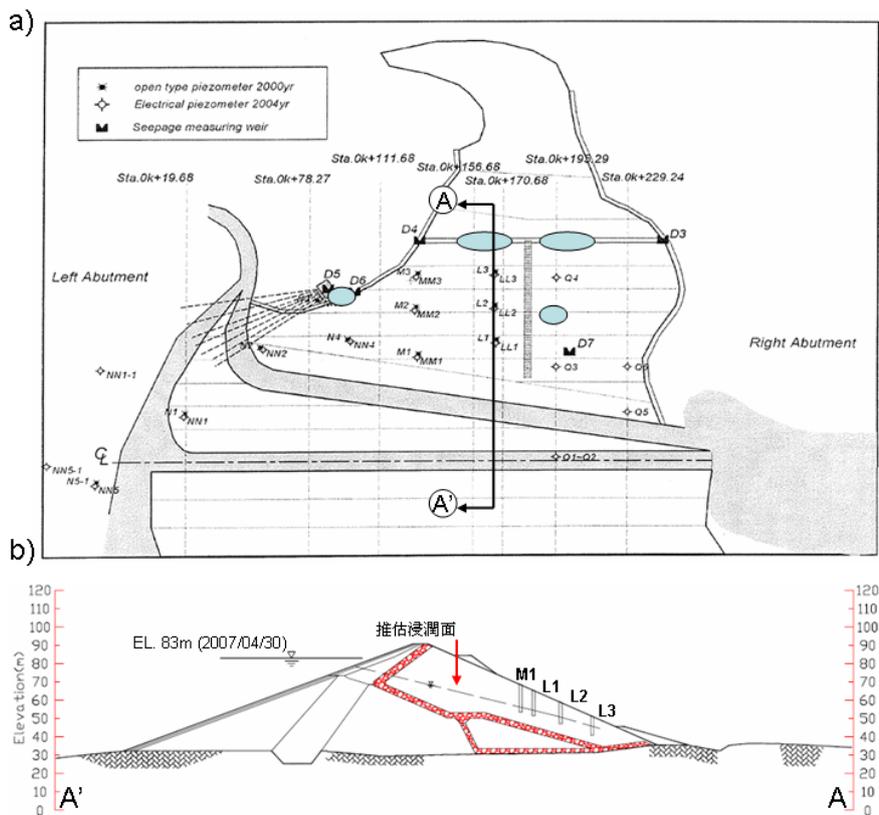


圖 B-7 新山水庫滲流區與推估浸潤面

(3) 地球物理探測技術規劃與現地應用問題

以地電阻影像探測法進行現地壩體滲漏問題調查，測線之佈設如圖 B-8 所示，以約略平行壩軸之方向佈設兩條有間距之地電阻探測測線(測線 A、測線 B)，測線 A 位於壩頂道路，測線長 282 公尺，電極棒間距 6 公尺，使用 Wenner 施測法施作；測線 B 延著壩頂聯絡道延伸，測線長 212.5 公尺，電極棒間距 5 公尺，使

用 Wenner 施測法施作。如此佈設是因為在未施測前並沒有足夠的訊息可提供可能的滲流路徑，將測線橫跨整個壩體，較可以全面性的界定出其在壩體中的可能位置，而不至於有所遺漏。透過如此的兩條測線可協助推估可能滲漏路徑。

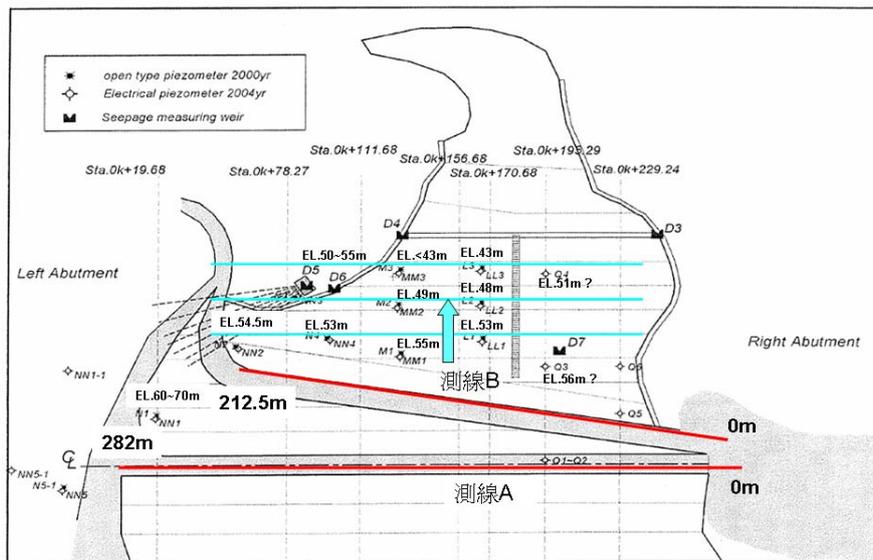


圖 B-8 新山水庫電阻法測線佈設及壩體水位高程分布圖

(4) 檢測成果說明

電阻法施測結果如圖 B-9 所示，由圖中可見在測線里程 67-90 公尺以及 198-240 公尺的位置出現有較低的電阻存在，在較靠近上游的測線 A 處其出現的高程約略是在 78-84 公尺處，而在測線 B 處其出現的高程分別是在 67-75 公尺以及 60-73 公尺處，此低電阻率區域表示是有較周邊濕潤的材料存在，以該區如此之低(~16 歐姆-公尺)之電阻率而言，很可能是已飽和的土壤。

為進一步了解滲流路徑之問題，將鄰近 L1、L2、L3 以及 M1，測線里程在 67-90 公尺位置的低電阻區域搭配水位觀測資料繪於壩體斷面圖中，如圖 B-10 所示。由此圖可十分清楚靠近左壩座低電阻率區與水位資料及有滲流位置的相對關係，測線 A 之低電阻

率區域高程與庫水位相近，但測線 B 之低電阻區是在庫水位以下，由此圖上之相對關係，再參照圖 B-8 中壩體上各個水位計所得到的水位結果(自上游往下游，整個壩體之整體水頭分佈約略均勻遞降)推測，壩體殼層之滲流路徑很可能是由壩頂低電阻率區域往測線 B 處之低電阻區流動，而後自高程 62 公尺處滲出壩體。至於高程 50 公尺處之滲流很可能是因為高程 62 公尺以下的位置皆極濕潤，滲流水在近地表的區域流竄，正好在高程 50 公尺處有較明顯的集中之故。但因壩體 A A' 剖面上於測線 A 及 B 的位置處並無監測資料可供驗證，因此所得此一結論尚需進一步獲取數據證實。

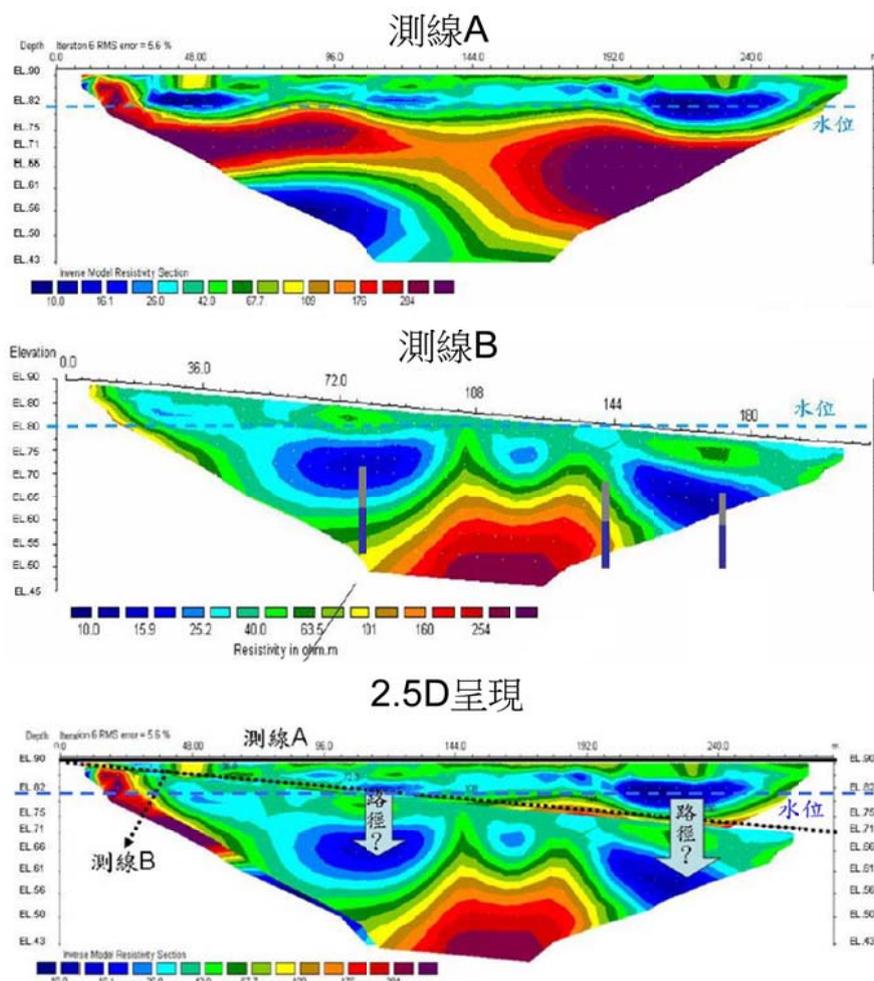


圖 B-9 新山水庫壩頂測線 A 與殼層測線 B 電阻率剖面

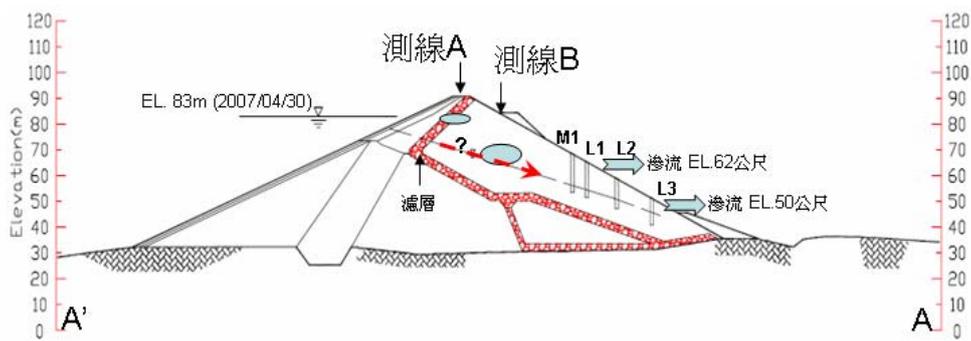


圖 B-10 新山水庫可能滲流路徑

(5) 應用成果評析

本案例利用地電阻影像探測法之結果配合大壩之監測資料對可能滲漏路徑進行推估，是應用地球物理探測技術於工程問題解決之良好範例，但此案例中僅依地電阻影像探測之低電阻結果進行濕潤區之推測，稍嫌不足，若可有其他地球物理方法之結果或是直接鑽孔資料配合解讀，將更具說服力。針對此案例，建議可另採用自然電位法進行調查，使用自然電位法可獲得較為整體的滲流趨勢，並可加以比對地電阻影像探測所得之濕潤區是否為在可能之滲流路徑上，如此對於滲流路徑的推估可靠度更大，此外，此案例中亦同時指出，因不確定滲流之路徑可能所在位置，因此以盡量平行壩軸之方式佈設測線，若有自然電位法之初步結果，將可有更加之測線佈設規劃。但在此壩中進行自然電位法應注意，該壩壩面具有拋石，於施作上之困難度會增加，應注意非極化電極與地表之接觸，若能盡量與壩面直接接觸為佳。

(6) 參考文獻

- 台灣自來水公司，新山水庫第一次安全評估計畫，民國 87 年。
- 台灣自來水公司，新山水庫第二次安全評估計畫，民國 90 年。
- 台灣自來水公司，新山水庫第三次安全評估計畫，民國 97 年。

台灣自來水公司，新山水庫滲流水之同位素特徵調查研究(第二年) 期中報告，民國 95 年。

林俊宏、林志平、洪瑛鈞、林正杰，地球物理檢測方法應用於水庫壩體之適用性調查，第 17 屆水利工程研討會論文集，民國 97 年。

3. 臺灣-烏山頭水庫

(1) 檢索資料

壩體-坡面滑動-表面波震測法。

(2) 壩體環境與安全檢查問題說明

烏山頭水庫是一半水淤式施工填築之土石壩，其壩高 56 公尺，壩長 1273 公尺，壩頂寬 9 公尺，於 1920 年開始興建，1930 年完工，庫容量達 1 億 5 千萬立方公尺。於 2001 年納莉風災造成大壩外坡樁號 0K+650 附近部分崩塌，經辦理緊急工程搶修後該處邊坡均維持穩定狀態，至 2005 年因發生超大雨勢(依烏山頭水庫雨量站觀測資料，6 月 12 日至 6 月 15 日降雨量即達 1,079mm)，大量而集中之降雨亦對大壩外坡造成災害，經搶修工作，烏山頭水庫大壩外坡暫呈穩定狀態，然而為壩體長期穩定著想，進行土壤材料性質以及潛在軟弱區域之調查以利後續改善工作進行，因此規畫進行地球物理探測試驗。

(3) 地球物理探測技術規劃與現地應用問題

本案例於調查上採用表面波震測法，施測位置在於烏山頭水庫壩體下游面樁號 0K+500 至 0K+850 段第一階滯台(測線 2)以及靠近聯絡道路之第二階滯台上(測線 1，如圖 B-12 所示)，兩滯台中心點水平相距約 19 米，皆位於崩塌位置之上部，現場施測採用

14Hz 受波器，受波器間距 0.5 公尺，近站支距 10 公尺，單一測線長 11.5 公尺，每次測線移動間距為 10 公尺，使用 13 磅長柄鐵鎚為震源。

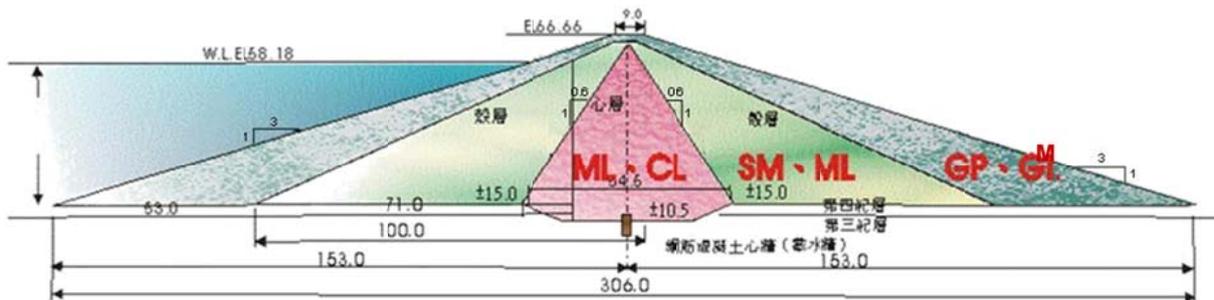


圖 B-11 烏山頭水壩標準斷面圖

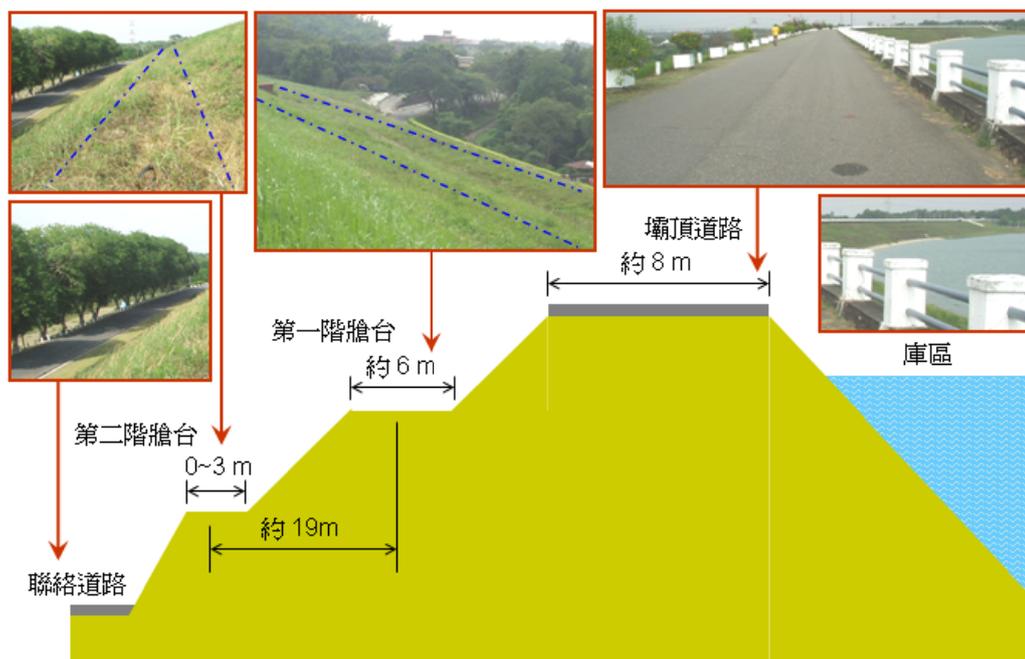


圖 B-12 施測位置示意圖

(4) 檢測成果說明

測線 1 地層剪力波速剖面影像圖如圖 B-13 所示，影像下方繪有三角形處表示為子測線中心位置，每一子測線所得之一維反算結果以該中心點為表示位置，全影像是由 35 筆反算結果內插繪出。由圖中的影像顯示，測線 1 樁號 0K+590 至 0K+850 可大致分為三層，地表至地下 3 米為一層，此層剪力波速在 200 至 300m/s 之間；

地下 3 米至地下 9 米為一層，此層剪力波速主要在 300 至 380m/s 之間；而地下 9 米後為一層，其剪力波速皆達 400m/s 以上。0K+590 至 0K+500 之間，影像中顯示至地下 9 米，地層剪力波速尚以 200 至 300m/s 為主要地層波速，僅於 0K+520 處地表下 4 至 6 米有剪力波速約 380m/s 之土層存在。將影像結果與現場狀況比對，0K+650、0K+750、0K+780、0K+800 下邊坡處有崩塌情形，0K+580 至 0K+640 下邊坡崩塌已夯實加勁處理，進行對照可發現，發生崩塌位置多與地表下 2 米處剪力波速為 200m/s 上下（白色影像）相符，已整治過之區域其地表下 3 米內之剪力波速較為均勻，波速也較未整治段 0K+660 至 0K+700 處（依影像結果，已整治段之原地層情形應與此段相類）為高。綜合上述比對，測線 1 下邊坡之穩定與測線 1 地表下 3 米內地層波速極有關係，除已有崩塌發生之位置外，對於在地表下 2 米處出現有白色影像之位置(0K+520 至 0K+540、0K+660 至 0K+700 以及 0K+810 至 0K+850) 應加以檢視其穩定性。

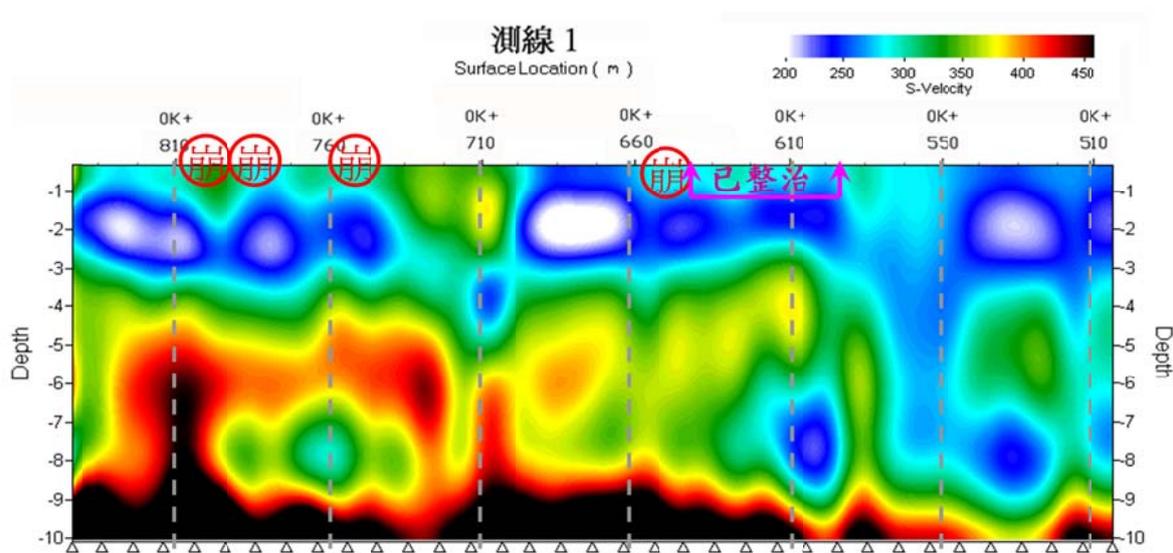


圖 B-13 測線 1 剪力波速影像剖面圖

測線 2 地層剪力波速剖面影像如圖 B-14 所示，影像中顯示，

地層剪力波速在 250m/s 以下之土層多在地表下 3 至 5 米的範圍，近地表 2 米內除在 0K+790、0K+740 以及 0K+660 附近有約 250m/s 之土層出現外，其餘剪力波速皆高於 300m/s。就現場紀錄，其下邊坡並未發現明顯崩塌情形，對比測線 1 之地層結果，並知此測線下邊坡坡度更較測線 1 為緩，可知此測線下邊坡確實較為穩定。

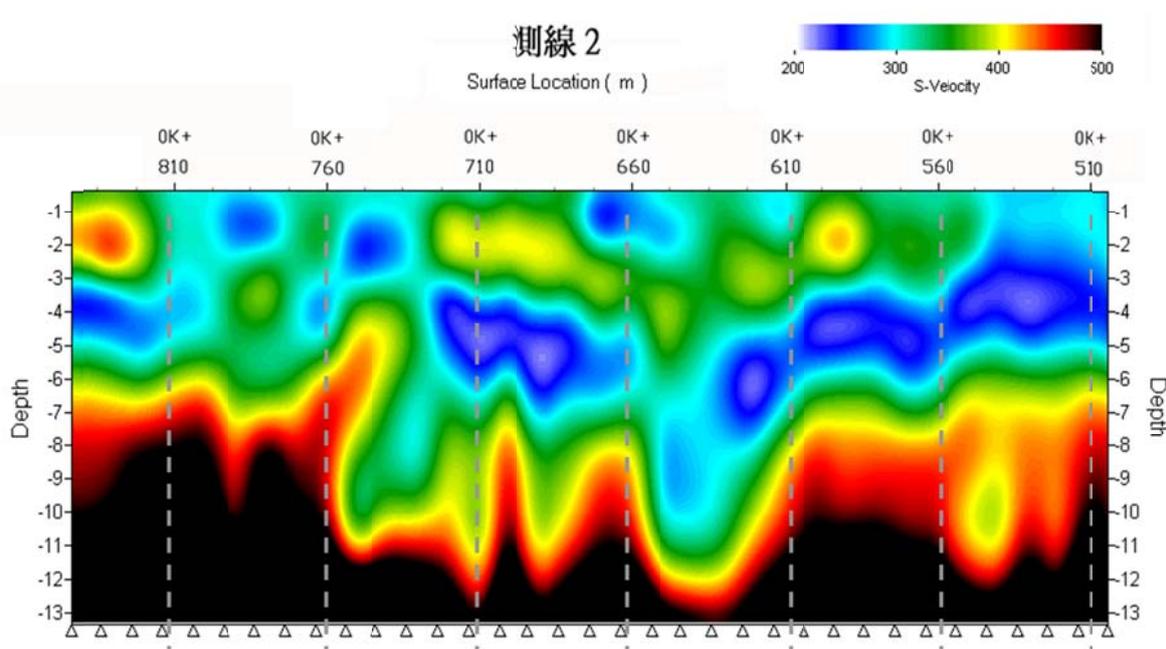


圖 B-14 測線 2 剪力波速影像剖面圖

比較測線 1 與測線 2 之結果發現，位於低處之測線 1 結果與測線 2 地表下 4 米後之結果高度類似，可猜測壩體同高程位置之土壤應相當類似，可能與築壩過程有關，對於此一高程範圍之土壤強度建議皆應當加以整治以確保其穩定度。

(5) 應用成果評析

表面波震測應用於地表 20 公尺內軟弱層之調查具有其便利性，在此試驗雖然於壩體上施作，但因其主要在壩面之平台上施作，且平行壩軸，地形所造成的影響可忽略不計，但當在連續吳

平台之壩面上施作時，應適當考量地形可能造成的影響；另外，由探測影響成果中，軟弱層之波速約 200m/s，但因為其顏色尺標最低者便是為 200m/s，無法確認其實際波速是否更低，若 200m/s 確實是整體之最低速，則此處之地層並不算是太過軟弱，這點與平時壩面呈現穩定狀態吻合，但崩塌之原因是在於大量降雨過後所造成之強度下降或是因水的存在所造成應當進一步確認，若可在現場於不同降雨情形後持續進行表面波震測施作之監測作業，進行該軟弱層剪力波速變化之監測，應當有助於釐清此一問題。

(6) 參考文獻

台灣省嘉南農田水利會，烏山頭水庫壩體改善評估規劃(第一年)」，2006。

(二) 混凝土壩

1. 臺灣-石岡壩

(1) 檢索資料

混凝土結構-墩柱、溢洪堰-混凝土損壞-彈性波層析成像法。

(2) 壩體環境與安全檢查問題說明

石岡壩位於大甲溪下游，為混凝土重力壩，壩體主要構造物有溢洪道、排砂道、取水工以及消能池及下游副壩(如圖 B-15 所示)。此壩於臺灣 921 大地震斷層錯動中受到破壞，亦歷經不同程度的修補，對於修補後之改善狀態以及其結構物之整理安全性具有疑慮，為可較為全面地評估石岡壩閘墩及溢洪道之結構體安全情形，並進而做為壩體風化、裂隙程度與結構安全評估監測之依據，故進行地球物理探測技術之檢驗。



圖 B-15 石岡壩俯視圖

(3) 地球物理探測技術規劃與現地應用問題

此探測分別於具混凝土損害疑慮之排砂及溢洪道之墩柱與堰面進行共計 33 處折射震測層析成像(tomography)之檢測，其標準斷面圖如圖 B-16 所示，溢洪道下部為混凝土之堰體，在堰體上設有弧形閘門以及墩柱，於墩柱施測時，在下游柱面佈置震源(如圖 B-17 所示)，上游壩面水下佈設數個受波器以接受穿透墩柱體之震波；而在壩體堰面檢測時則於下游壩面設置震源，上游則佈置水下受波器，其採用受波器數目視各墩柱及堰面不同而有所不同，原則上每 2 公尺間距設置一個受波器，每 1 公尺間距設置一個震源。

於混凝土構造物進行折射震測探測因無法於混凝土面進行鑽孔貫入，因此需要使用非貫入式受波器，此外，於此進行之測線規劃，其受波器位置會有置放於水下之需求，因此採用之受波器及訊號傳輸線需有防水功能。在受波器的現場應用問題之外，尚有震源之應用問題，採用鐵鎚敲擊混凝土面恐有破壞混凝土結構物表面之虞，因此需採用較軟式的鎚子為佳。在此案例中，對於受波器的問題的解決方法是使用無需貫入的水下受波器(如圖

B-18 所示)進行，而震源是採用橡膠鎚。

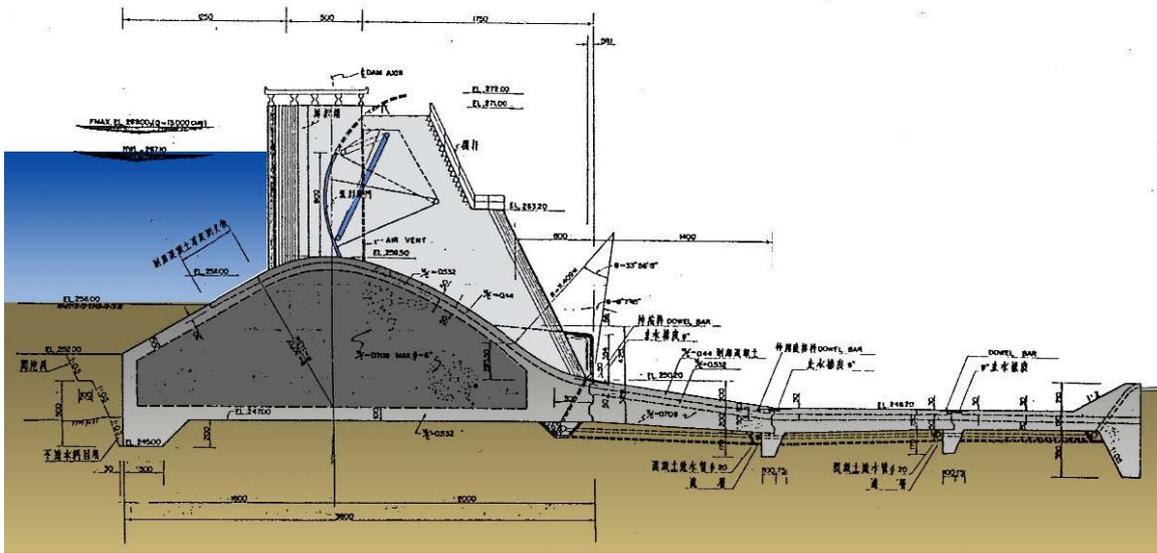


圖 B-16 石岡壩溢洪道標準斷面圖

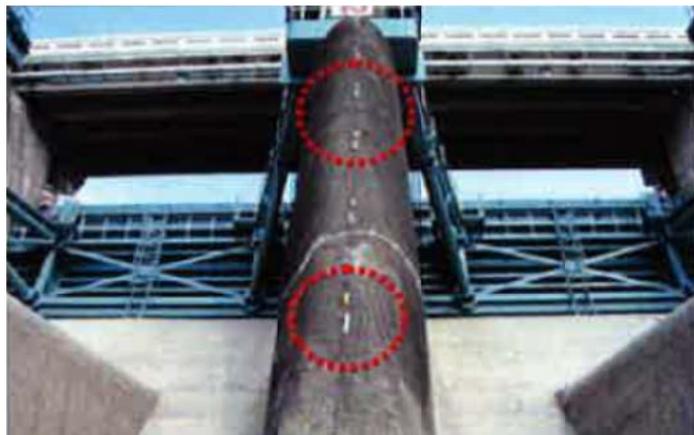


圖 B-17 石岡壩墩柱上游測受波器設置圖(經濟部水利署，2011)



圖 B-18 水下受波器(經濟部水利署，2011)

(4) 檢測成果說明

現地試驗所獲得之資料採用層析成像(tomography)法進行分析，對於分析所得之 P 波波速剖面以表 B-2 進行品質分類，單一測線施測成果如圖 B-19 所示，其為編號 SP9 墩柱之成果，整體波速分類屬”佳”範圍，僅下游面上部階梯段標高 276 與 279 公尺附近及下層段 269~272 公尺間出現些微低速向內部延伸現象，惟尚未出現貫穿現象。

表 B-2 混凝土品質優劣及波速速度分類表(Leslie and Cheeseman, 1949)

分類	P 波波速 (m/s)
優(Excellent)	> 4500
佳(Good)	3600 – 4500
可(Questionable)	3000 – 3600
差(Poor)	2100 – 3000
極差(Very Poor)	< 2100

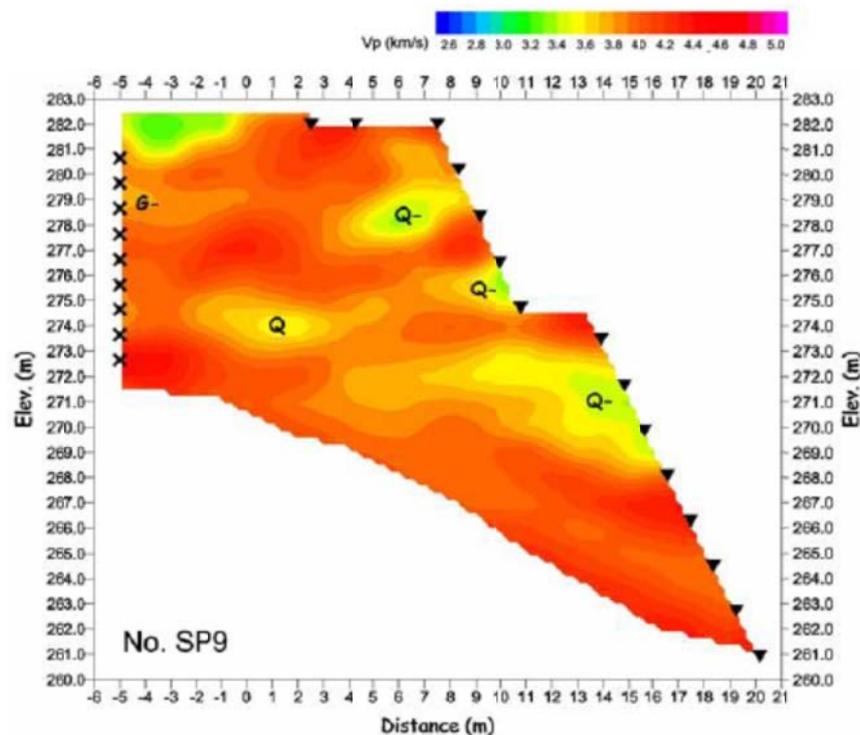


圖 B-19 石岡壩墩柱編號 SP9 混凝土 P 波波速影像剖面圖(謝盛雄等，2011)

整體墩柱與堰面之混凝土速度(如圖 B-20 所示)大多介於 3000-4800m/s 之間,屬”可(Questionable)”至”佳(Good)”範圍,品質最差處之波速接近”差(Poor)”與”可(Questionable)”之分界,墩柱以 SP7、SP10~11 速度變化較大,尤以 SP7 墩柱最嚴重。堰面 SP10~12 波速屬擴散式降低,SP10 壩頂下游側速度變化最大,可能有破碎或淘空產生,爾後向北側 SP11~12 延伸。歸納石岡壩之墩柱與堰面整體之波速分佈特性,主要之相對弱帶有兩處(如圖 B-20 所示),一處始於堰面 SP4 止於墩柱 SP7;另一處則始於墩柱 SP9 而止於堰面 SP12,兩處弱帶主要位於墩柱與堰面交界處,且均有自下游向上游延伸之現象,對結構之影響有必要進一步評估並作定期觀察與檢測。

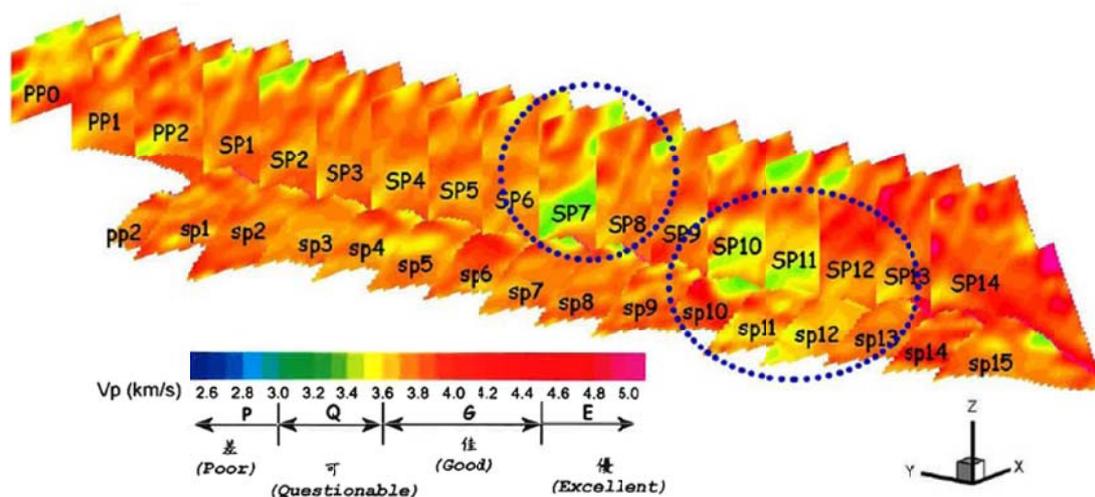


圖 B-20 石岡壩墩柱與堰體混凝土 P 波波速影像剖面圖(改繪自謝盛雄等, 2011)

為驗證藉由彈性波層析成像結果獲得混凝土波速成果之可靠性,遂將其結果與鑽心抗壓試驗及試體超音波量測等結果交叉比對分析。依層析成像結果,壩體堰面與墩柱之震波速度介於 3200m/s-4600m/s 之間,參照林宗濂(2004)與陳裕盛(2006)之研究,壩體 P 波速度與混凝土強度之關係式可表示如下:

$$f_c' = \alpha_p V_p - 211.269 \quad (3.1)$$

其中， f_c' 為混凝土強度(kg/cm²)； α_p 為修正係數； V_p 為P波波速(m/s)。將 α_p 採用0.145，壩體堰面與墩柱波速對應之混凝土強度介於252 kg/cm²~455 kg/cm²；以平均波速3900m/s計算，混凝土平均強度約為354 kg/cm²；另壩體兩組鑽心試體之抗壓強度分別為354 kg/cm²與261 kg/cm²，超音波量測鑽心試體之波速分別為3900m/s及3160 m/s，與層析成像之分析成果甚為接近，顯示以層析成像評估壩體之強度與波速具可靠性。

(5) 應用成果評析

在現地應用問題上，其採用非貫入的水下受波器進行墩柱及堰面之資料收錄可成功解決之原因在於此兩處位置的測線是以垂直為主佈設，重力可使此類受波器與結構物緊靠並由結構物表面或傳輸線做為支撐而無掉落之虞，因此可成功應用，然對於混凝土結構側壁或是側風較大之區域將不試用。

對於折射震測之成果驗證，採用經驗式進行推估可獲得一基本概念，但由於經驗式往往與許多潛在因子有關，在不同物理量轉換驗證之使用上應特別注意(或增加安全係數)：搭配有實際的取樣試驗做為比對是對於地物成果驗證的較佳方式，可降低不確定因子所造成的誤差疑慮，可使得有限的數點取樣試驗成果透過地球物理探測擴大至整體線或面的試驗成果，在此案例中其選則取樣處並未參考地球物理探測之成果進行決定，建議可先由地球物理探測之成果獲得整體情況後，選擇較為關注(如由地球物理探測成果判讀混凝土品質較不佳或是較為不合理處)所在進行取樣分析。

(6) 參考文獻

Leslie, JR. and Cheeseman WJ., An ultrasonic method for studying deterioration and cracking in concrete structures, Amer. Concrete Inst., Proceedings, Vol 46, p.17-36, 1949.

林宗濂，混凝土波速與強度關係之實驗研究，逢甲大學土木工程研究所，碩士論文，2004。

陳裕盛，又積波速儀應用於現場鋼筋混凝土構造可行性之探討，逢甲大學土木工程研究所，碩士論文，2006。

經濟部水利署，石岡壩第四次定期安全評估總報告，2011。

謝盛熊、黃貞凱、顏呈仰、紀文龍及胡志昕，彈性波層析成像於壩體之應用與分析，第 14 屆大地工程研討會，桃園臺灣，2011。

2. 臺灣-西勢水庫

(1) 檢索資料

混凝土壩-壩體-強度不足-彈性波層析成像法。

(2) 壩體環境與安全檢查問題說明

西勢水庫位於基隆市暖暖區，為基隆河系支流西勢溪流域，東鄰東勢坑溪集水區，西至基隆市七堵區區界，南達台北縣、平溪鄉鄉界，集水區面積為 6.5 平方公里，為在槽水庫。水庫壩址位於西勢溪上，為一混凝土拱形重力壩(如圖 B-21 所示)，上游壩表面直立成弧形(曲率半徑 221.85 公尺)，下游壩表面斜立，壩頂弧半徑 12.35 公尺，斜角 53 度成弧形(如圖 B-22 所示)，於民國 15 年建造完成，水庫滿水位標高 72.08 公尺，滿水位面積 8.94 公頃，壩頂標高 73.6 公尺，蓄水總容量 65 萬立方公尺。依照經濟

部於民國 97 年 5 月 5 日公告之「水利建造物檢查及安全評估技術規範蓄水與引水篇」西勢水庫屬於二級水庫，災害潛勢則屬於輕微。由於水庫容量有限，因此冬季東北季風盛行之際，常有水量溢流情形發生。集水區屬於水源保護區範圍內，區內並無居民居住，且林況完整，植生覆被良好。

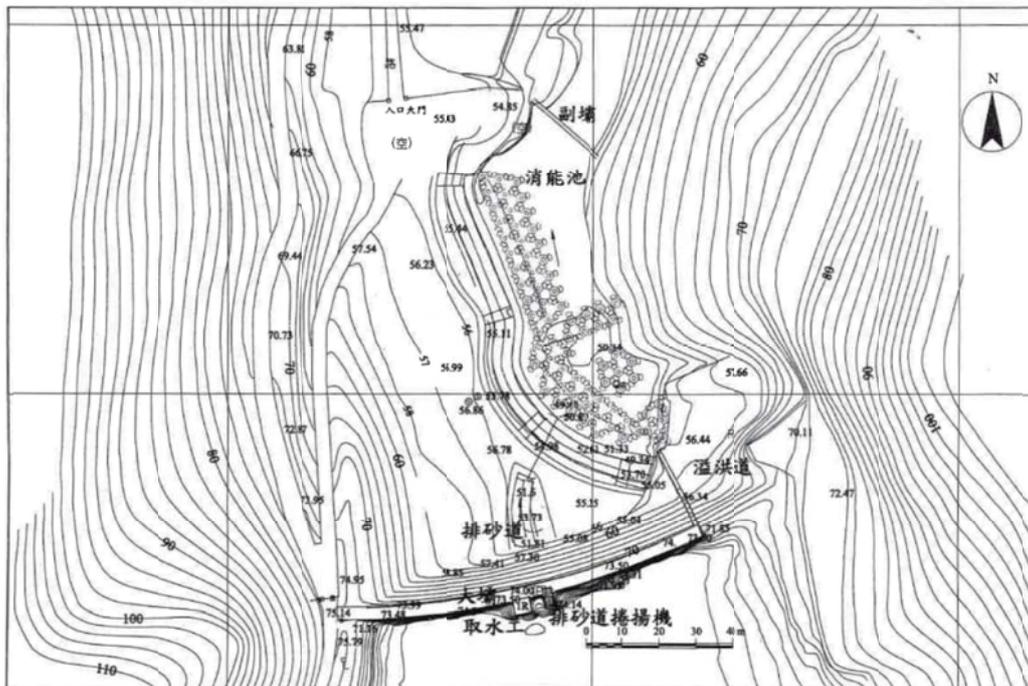


圖 B-21 西勢水庫壩體平面圖

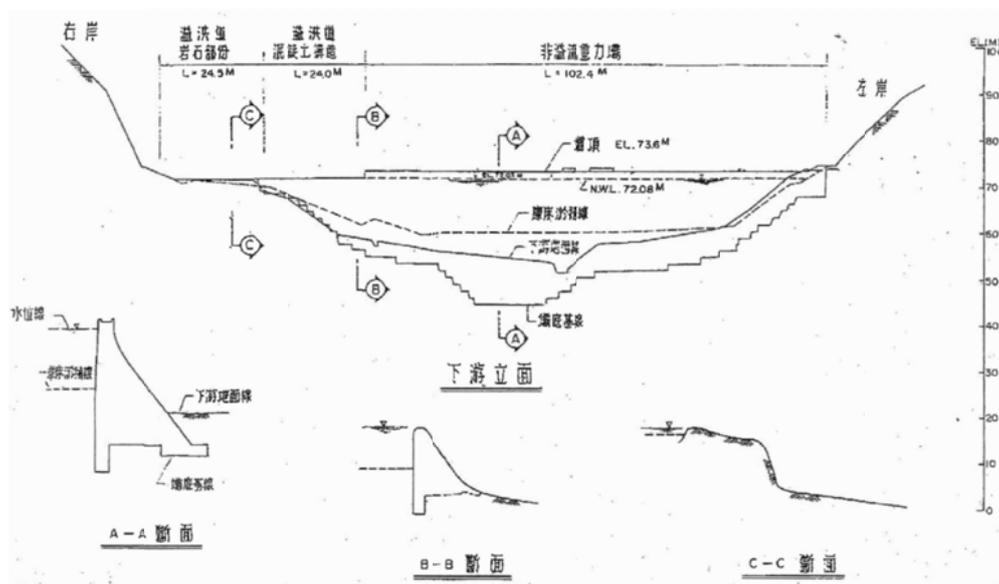


圖 B-22 西勢水庫壩體立面圖

第三次安全評估報告(台灣自來水公司，民國 97 年 b)指出，以施密特錘檢測西勢水庫大壩之混凝土強度結果顯示強度不均勻，僅 38%測點強度達到預估一般標準 210 kg/cm²，62%測點強度達到預估一般標準之 0.85 倍，已知民國 72 年第一次安全評估之混凝土試體取樣以及試錘試驗結果顯示混凝土鑽心抗壓強度分佈約在 146 至 205kg/cm²，表面硬度對應抗壓強度分佈約在 135 至 246kg/cm²，與第三次安全評估測試結果相當接近。雖然壩體混凝土強度有不足之情形，但由於本壩體為重力壩，混凝土重量及穩定性佔主要因素，故第三次安全評估結果進行結構靜態分析後認為壩體現況安定良好。此外，目視檢查在壩體下游面部分表面有多處表面寬度大於 3mm 之裂縫，其發展深度超出 10cm，第三次安全評估根據現場觀察認為此類裂縫是巨積混凝土之表面剝離，並非應力狀態造成，無影響壩體安全之疑慮。但由於此壩年代久遠，由前述施密特錘以及鑽心之成果顯示壩體表面強度不足，而整體混凝土強度之狀態未知，因此規劃地球物理探測試驗進行壩體整體混凝土強度檢測。

(3) 地球物理探測技術規劃與現地應用問題

本案例根據本導引手冊之索引選用彈性波層析成像法進行探測作業，依據現場條件及需求，共計規劃五處層析成像速度剖面(如圖 B-23 所示)，測線剖面編號 L1、L2 及 L3 為沿壩軸方向之垂直剖面，以取水工機房為界，L1 與 L2 測線位於右岸側，而 L3 則靠近左岸側，震源設置於下游壩面，而接收器則置於上游壩面(包含水下至淤積庫床處，如圖 B-24 所示)，現場資料收錄使用美國 Geometrics 公司之 Strata View 全功能震測儀，接收器以及震源間距為 1 公尺，接收器為 28Hz 速度型水中受波器(如圖 B-25 所

示)，採用橡膠鎚作為人工敲擊式震源，施作時以攀爬掛梯之方式進行敲擊，現場資料以德國 Geotomographie 公司所發展之 GeoTom CG 進行資料反算分析。

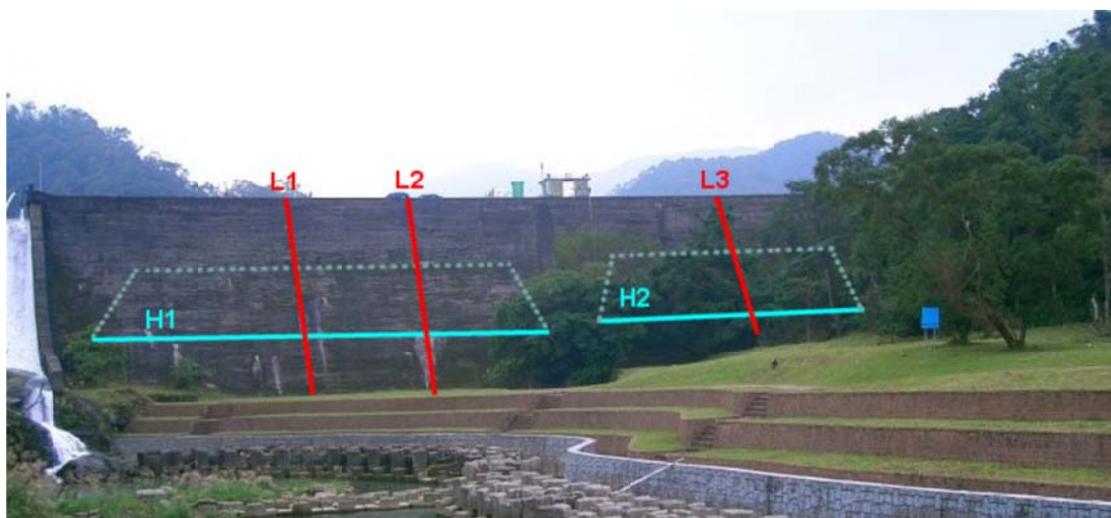


圖 B-23 西勢水庫壩體混凝土強度不足問題地球物理探測技術現地施作規劃示意圖

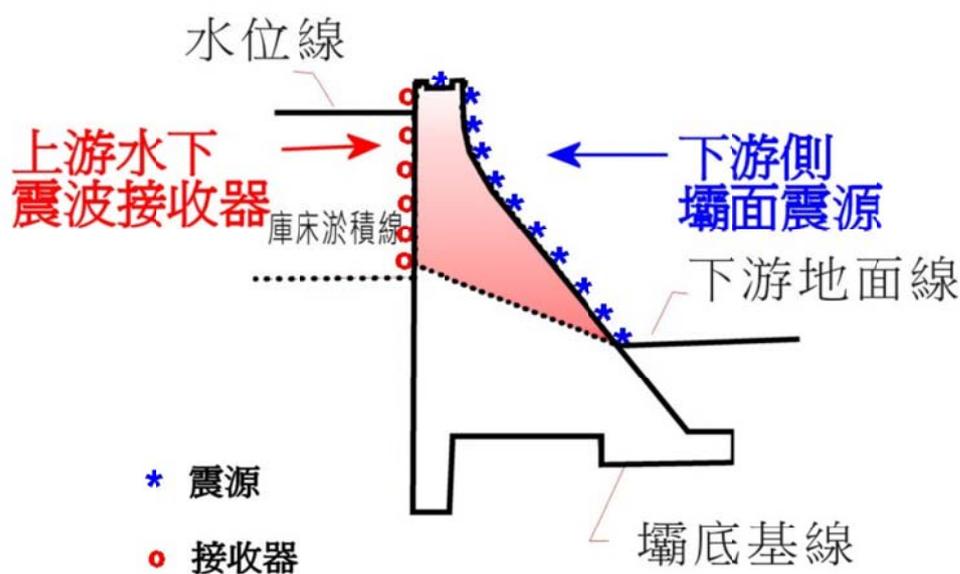


圖 B-24 層析成像垂直剖面(L1~L3)震源及接收器佈置示意圖



圖 B-25 層析成像現場施作情形

H1 與 H2 剖面則為水平走向橫切壩體且向下游方向下傾之剖面，震源設置於下游壩面，沿壩軸方向水平施測；接收器則水平設置於上游壩面水下之淤積庫床上(如圖 B-26 所示)，H1 剖面斜切垂直剖面 L1 與 L2，下傾角度約 23.56 度；而 H2 則斜切 L3 剖面，下傾角度約為 21.67 度。



圖 B-26 層析成像橫向剖面(H1~H2)震源及接收器佈置示意圖(虛線位於壩體內部至上游側，虛線區為預定速度剖面資料區)

(4) 檢測成果說明

西勢水庫壩體之震波層析成像震波波速剖面結果將根據表 B-3 之震波波速標準以色階呈現，當混凝土之波速高於 3.6km/s 即可分類為品質佳(以 "G" 來表示)；而速度低於 3.0km/s 則歸類為品質差(Poor)，值得關注的部份；波速介於其間則可視之具可

疑性(doubtful)(以” Q” 表示)或須與周遭波速整體評估部份，並考量其整體及局部之波速變異(如波速度漸變或劇變)；接近品質分類之上下界者分別以 ” Q+” 或 ” Q- “ 來表示。

表 B-3 混凝土品質優劣及波速速度分類 (Leslie and Cheeseman, 1949)

分 類	P 波波速 (km/s)
優(Excellent)	高於 4500
佳(Good)	3600~4500
可(Questionable)	3000~3600
差(Poor)	2100~3000
極差(Very Poor)	低於 2100

綜合西勢水庫混凝土壩體施測之波速層析成像結果，依測線相對位置及傾斜角度，將其整合繪製如圖 B-27 所示，波速層析成像檢測結果顯示，其整體波速約於 3.0~4.2 km/s 範圍間，最低速區仍可達品質分類”可”之下界(Q-)，且皆出現於下游壩面表層附近，其向壩體內部弱化多僅限於 1~2m 範圍尚屬輕微弱化，且其波速降低多呈現沿壩軸方向均勻帶狀分布，尚稱均勻，並無明顯因破裂劣化造成之明顯向內部延伸之弱帶出現；沿壩軸方向，側向之速度變化尚稱均勻，帶狀分布明顯，整體而言可發現由下游向內部速度之變化率似乎有從左岸向右岸側漸增現象(高速區範圍漸向上游側退縮)，但並未發現有局部明顯低速帶延伸至高波速區域；再則，L1 測線標高 70m 及 L3 剖面 72~73m 和 66.5m 附近，下游坡面 L2 與 L3 測線標高 63~66m 附近以及於取水工附近壩體下游側，皆有較明顯的速度低區或是延伸性低速區出現，值得列為未來觀察檢測之區域。

而由此探測結果可合理說明在西勢水庫第三次安全評估報告中所獲得之混凝土強度成果偏低主要原因在於其僅在壩體下游面

表面施作，壩體下游表面受時間以及風化之影響較為嚴重，而使得探測結果顯示混凝土強度不足之疑慮，然整體而言，壩體混凝土強度尚可。

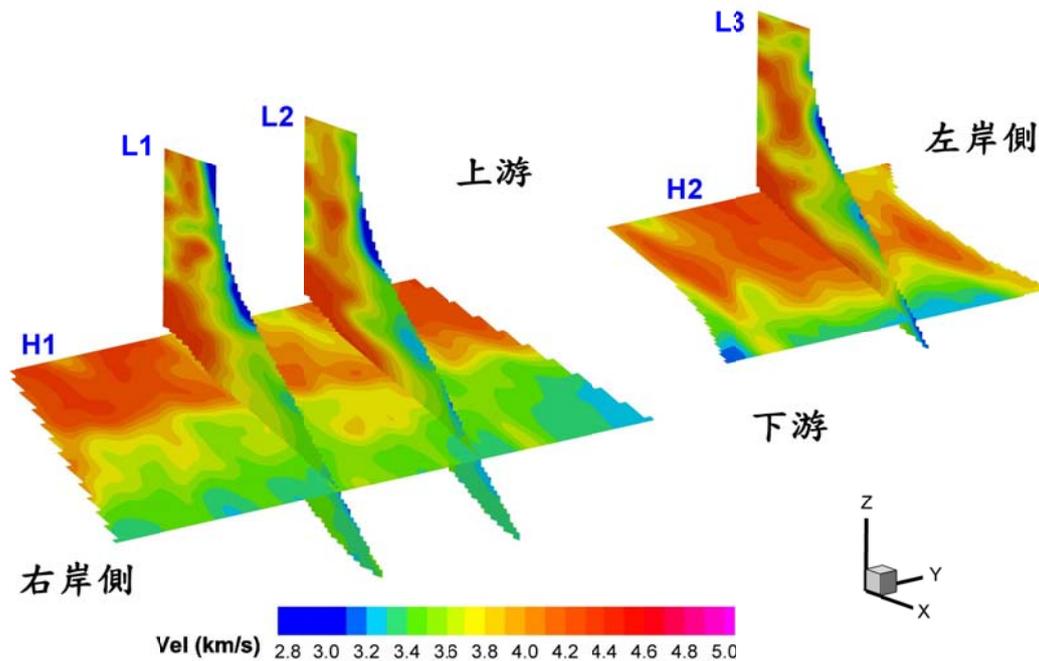


圖 B-27 西勢水庫震波層析成像速度剖面柵狀圖

(5) 應用成果評析

由此案例成果再次驗證地球物理探測技術在壩體檢測上相較其他僅能獲得表層資訊之調查技術的優點就在於其可透過表面之調查而獲得內部之訊息，增加水庫管理人員以及水壩工程師對壩體安全性之掌握；此外，由此案例中對於現場施作之描述以及照片可發現，於混凝土壩進行彈性波層析成像法有諸多現場實務問題須注意並解決，例如在進行垂直剖面之施測上，震源敲擊須由人力執行，則吊掛或攀爬之工具以及施作安全性需要規畫並考慮，又如，進行水平剖面之施測，在上游側置入水中之接收器的定位需特別注意，以確保施測結果的正確性。

(6) 參考文獻

經濟部水利署，地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用之研究，民國 101 年。

三、亞洲地區

(一) 土石壩

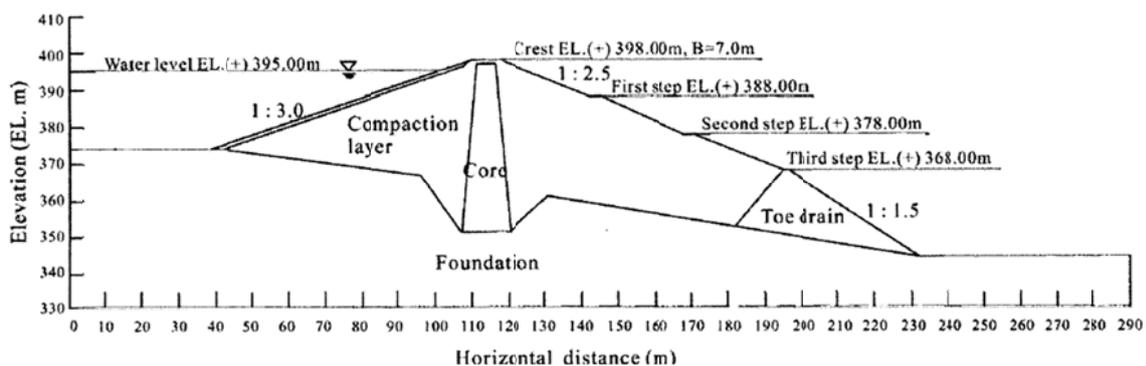
1. 韓國-Sandong

(1) 檢索資料

土石壩-壩座-滲流-地電阻探測、自然電位法。

(2) 壩體環境與安全檢查問題說明

Sandong 壩位於韓國西南方狹窄河谷上，為土石壩，共分三個階層，壩體主要構造物有溢洪道、取水塔以及下游水質淨化廠。此壩於下游壩面出現滲漏點，分別為 S1、S2 與 S3(如圖 B-29 所示)，為了解其滲流原因，因此於下游壩面與壩座分別鑽設 8 處鑽探孔，分別為 BH-1~BH-8(如圖 B-29 所示)，試圖進行水文地質學與地球物理探測技術等方法之檢驗，尋求可能之滲流路徑。



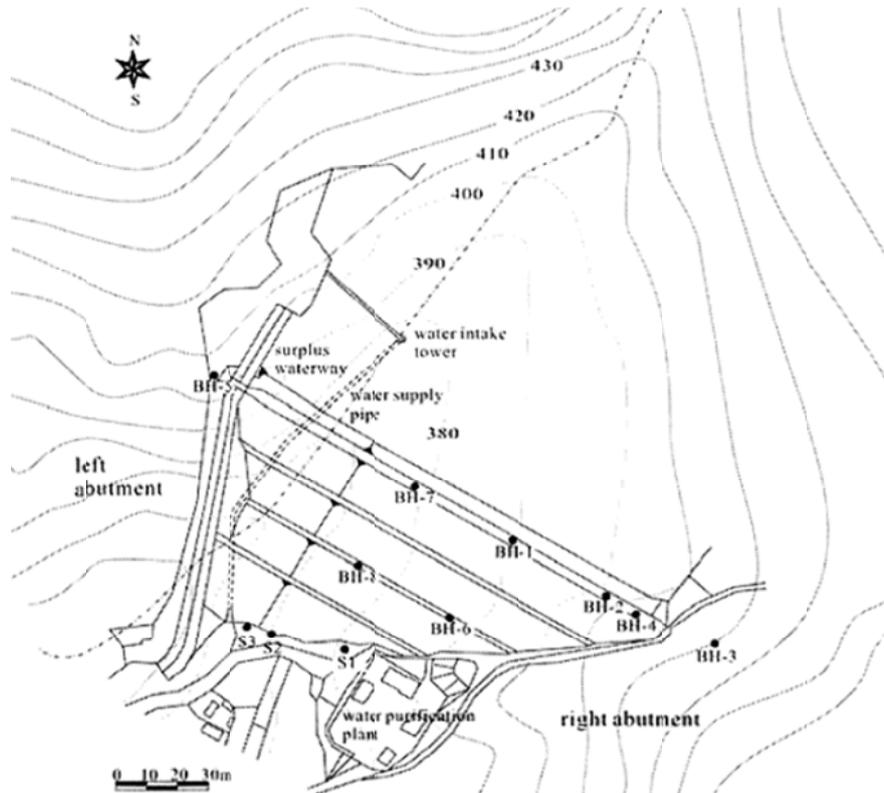


圖 B-29 Sandong 壩俯視圖

(3) 地球物理探測技術規劃與現地應用問題

在地球物理探測方面，主要係採用了地電阻探測、自然電位法與溫度剖面量測三種方法。地電阻影像探測共佈設 7 條測線(如圖 B-30 所示)，主要佈設於壩頂與壩體之各階層，其中壩頂之測線再延伸 150m 至右壩座，另壩體與壩座之交界處及左壩座各皆佈設一條測線，量測方法採用 Dipole-Dipole 排列；而自然電位法測線佈設位置，亦與地電阻測線相同，以便比較二者量測結果，在施測期間為避免量測結果受其他磁氣圈之影響及排除其他雜訊干擾，因此將參考點設於壩體，以校正所量測之資料；另溫度剖面量測部份，則選擇較靠庫區之 BH-1 與 BH-2 孔進行量測，以了解庫水、右壩座及壩體滲流水間之相互關係。

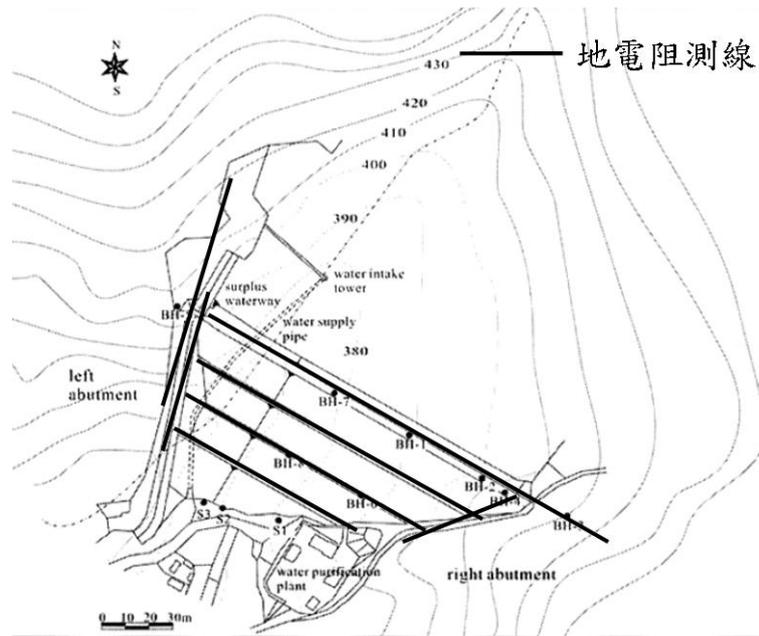


圖 B-30 地球物理探測規劃示意圖

(4) 檢測成果說明

現地試驗結果如圖 B-31 至圖 B-33 所示，由地電阻影像探測結果可知七組地電阻剖面中，電阻率小於 300 ohm-m 之低電阻區域，主要位於壩頂與壩體右側，並且沿著右壩座向下游分佈(如圖 B-31 所示)；而自然電位法量測結果顯示，於壩體第一階層右側靠近右壩座處，有不規則之電壓產生，高達-120mV，且第三階層亦分佈相同之不規則電壓(如圖 B-32 虛框處所示)，其與地電阻量測結果之低電阻區域相互符合，由此可推估滲流路徑為沿著右壩座與岩盤交界處；而為確認滲流路徑是否確實穿過右壩座，因此進行溫度剖面量測，由量測結果可知，靠近右壩座之 BH-2 孔位，其溫度剖面變化與庫水具有高度之相依性，除顯示其可能有相同之水源外，亦證明滲流路徑確實穿過右壩座，此推測與透過鑽孔所進行之示蹤劑結果吻合。

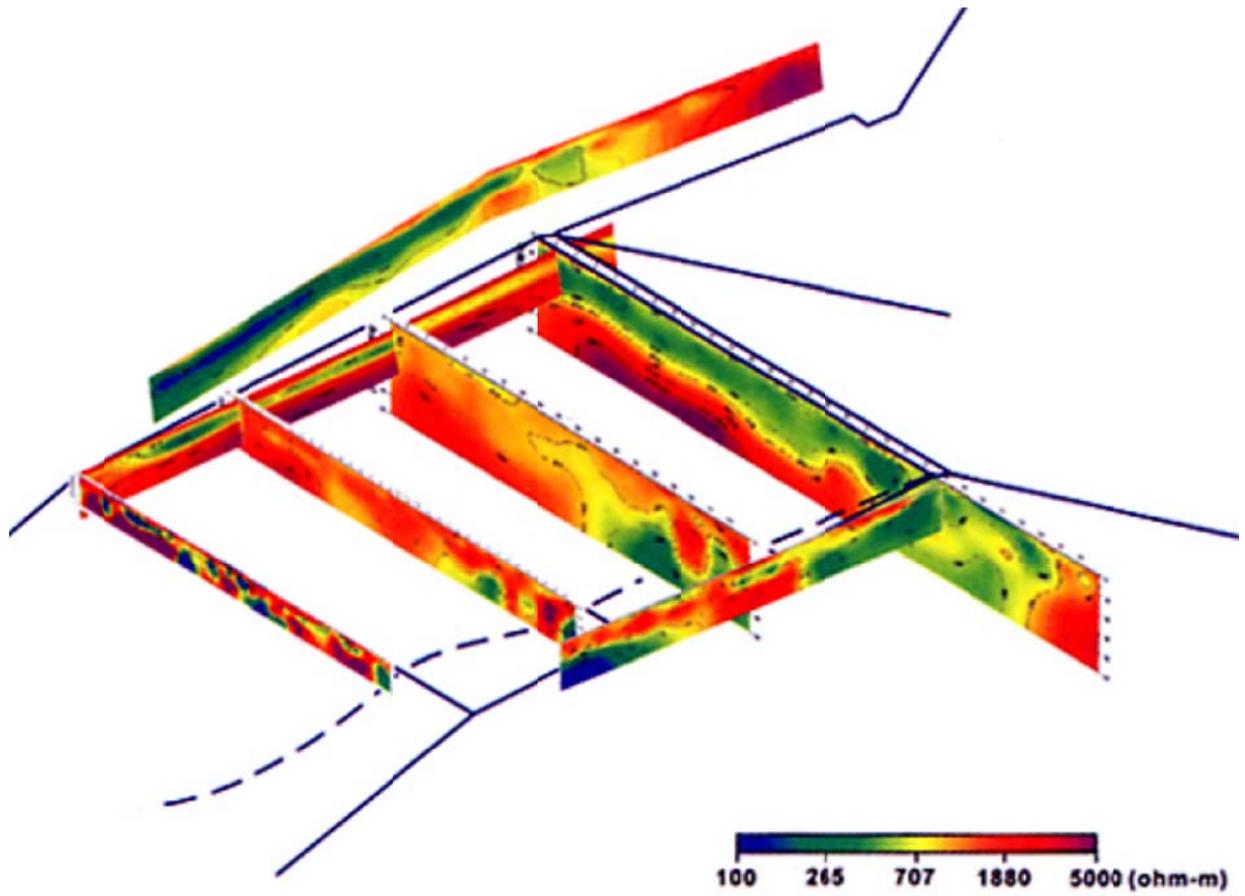


圖 B-31 地電阻量測結果

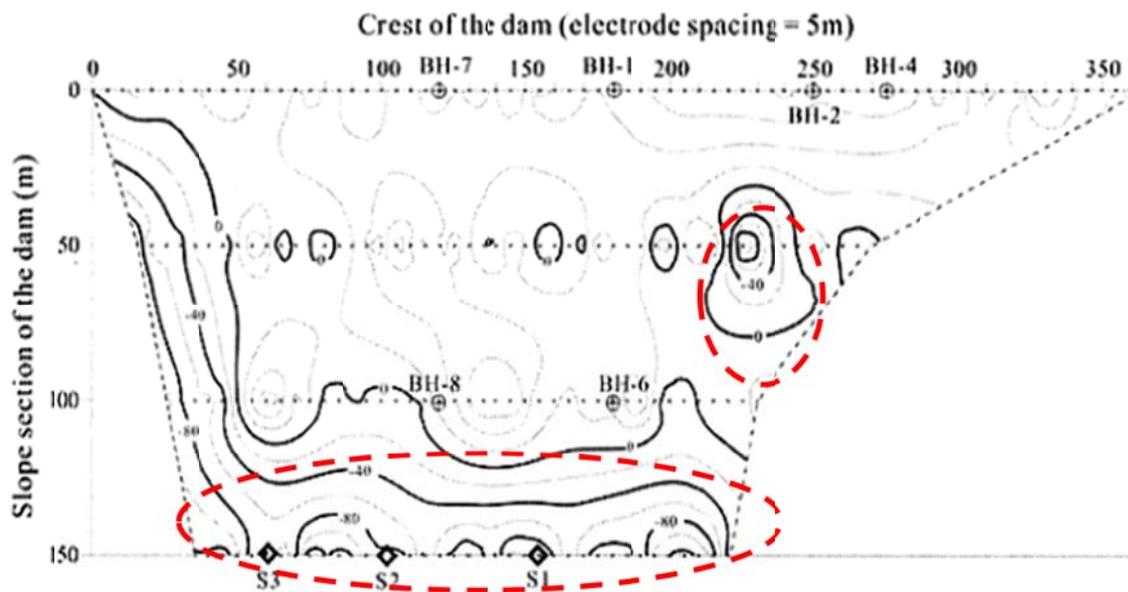


圖 B-32 自然電位法量測結果

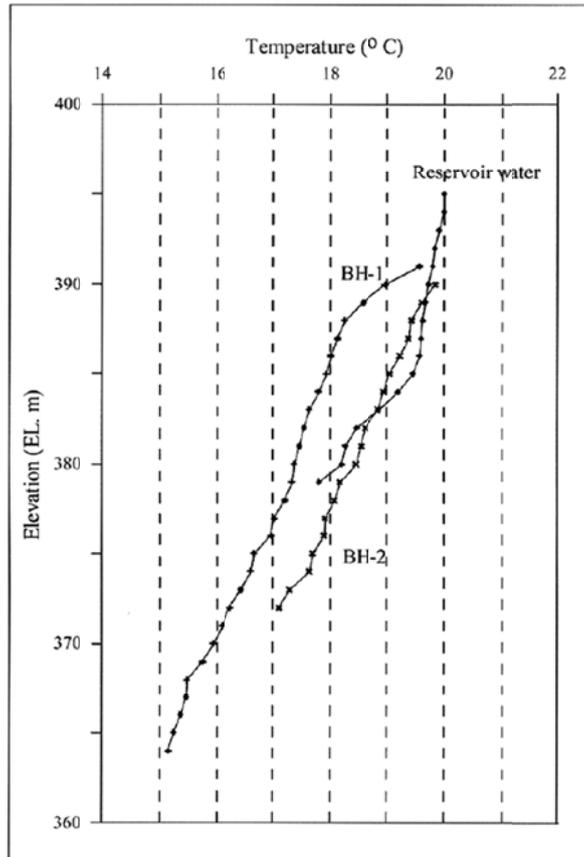


圖 B-33 溫度剖面量測結果

(5) 應用成果評析

本案例綜合使用地球物理探測技術以及示蹤劑調查進行綜合判釋，可有效地互相驗證結果而使調查結果可靠度增加，是為應用地球物理探測技術之良好應用案例，然而整體案例略嫌可惜者在於，在此調查計畫中，其有在壩體進行鑽孔作業，於壩體鑽孔可為地球物理探測之結果提供極為有力之證據與比對資訊，應當謹慎小心之進行與安排，於案例中其鑽孔位置之規劃原因並未交代，但若主要是為此調查計畫所進行，建議應當先進行自然電位法瞭解整體狀況發現較為異常之位置，而後針對此些異常區域進行地電阻探測調查，最終由前兩者所得之初步結果進行鑽孔位置之安排，以便使鑽孔可提供必要確認資訊並在示蹤劑施作時可有最佳之比對驗證效果。

除進行調查之順序問題外，本案例之地球物理探測測線規劃主要在平台地區進行，而未針對問題做最佳化之調整，於一開始進行自然電位法時可為避免在拋石上施作而有訊號不佳之情形，但地電阻影像探測法之現地適用性較自然電位法佳，若已發現在滲流路徑由右壩座進入壩體之可能性高時，應當調整或增加在右壩座接近壩址處之地電阻影像探測測線，如此可使探測結果更加明確，以目前未調整測線之成果可見，在圖 B-31 的右壩座側的側現結果僅出現明顯之跡象，但未能顯示出完整的路徑存在，甚為可惜。

(6) 參考文獻

Song, S. H., Song, Y., and Kwon, B. D., (2005) “Application of hydrogeological and geophysical methods to delineate leakage pathways in an earth fill dam” *Exploration Geophysics* 36, 92-96.

2. 韓國-中部某壩

(1) 檢索資料

土石壩-壩體-滲漏-地電阻影像探測法。

(2) 壩體環境與安全檢查問題說明

此地球物理探測技術應用之大壩位於韓國中部之某壩，此壩於 1957 年建造，主要作為民生供水之用，最大庫容量為 1,530,000 立方公尺。此壩為長 300 公尺，高 20 公尺之黏土心層土石壩，壩頂寬約 6.2 公尺，上下游坡面皆為 1:2.1，其有壩體滲漏之問題，為找出其滲漏路徑，進行此項地球物理探測工作。

(3) 地球物理探測技術規劃與現地應用問題

此探測案例以地電阻影像探測法進行，如圖 B-34 所示，在接近壩頂處共佈設三條測線，分別是 Line1、Line2 以及 Line3，其中 Line 1 位於上游側壩面距壩頂 6.9 公尺處，測線長 180 公尺；Line 2 位於下游側壩面，距壩頂 6.9 公尺處(與 Line 1 等高程)；Line 3 位於壩頂靠近下游側，測線長 200 公尺，三條測線之電極棒間距皆為 5 公尺，採用 dipole-dipole 施測法進行施測，除此之外，為可更加明確獲得滲漏水流經心層之位置，Line 1 及 Line 2 另進行有跨孔式地電阻影像探測法，採用 modified pole-dipole 施測法進行施測。

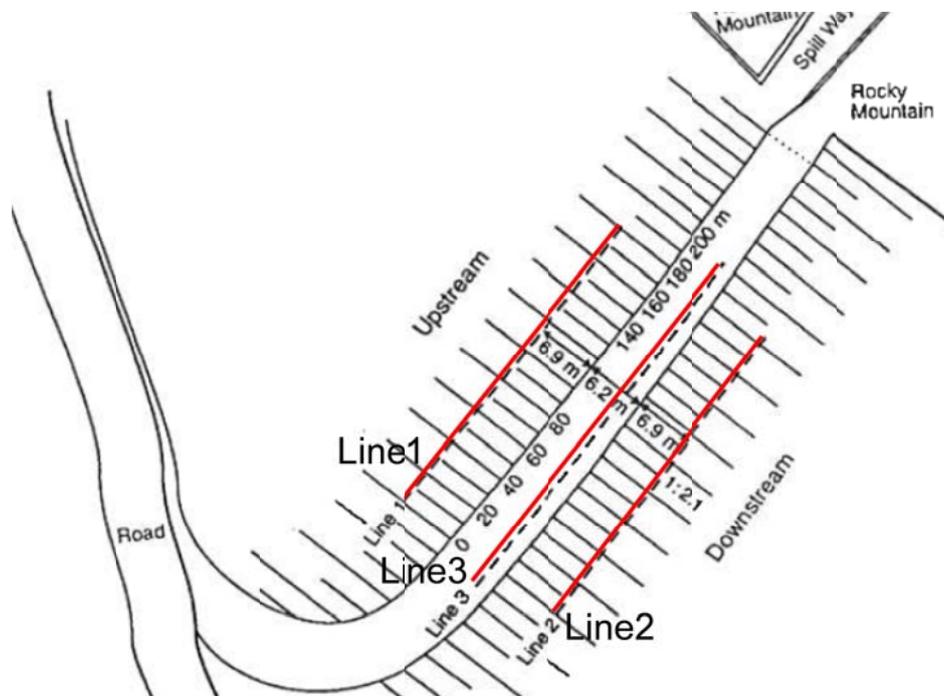


圖 B-34 壩體平面圖及地電阻影像探測測線規劃示意圖

(4) 檢測成果說明

三組測線之地電阻影像探測結果如圖 B-35 所示，在上游側之 Line 1 測線(圖 B-35a)可發現在測線第 8 根電極棒處地表下約 15 公尺處以及第 22 根電極棒地表下約 20 公尺處有低電阻之反應，而至 Line 3 處(圖 B-35b)，第 8 根電極棒地表下 20 公尺處以及第

22 根電極棒地表下 20 公尺處有低電阻之反應，此兩條測線之低電阻反應區可能是為滲漏之所在位置，彼此之空間位置距有連續性，然而當測線至 Line 2 處(圖 B-35c)，未能有明顯的異常區出現，在整條測線下方 5 公尺至 15 公尺間的低電阻帶推測可能是受到心層黏土低電阻 3D 效應映射而無法明確顯示出滲漏位置所在。雖然在此三條測線之結果可推估可能之滲漏位置，但其滲漏路徑之延續性不明確，且在下游測之測線並未確實顯示出。

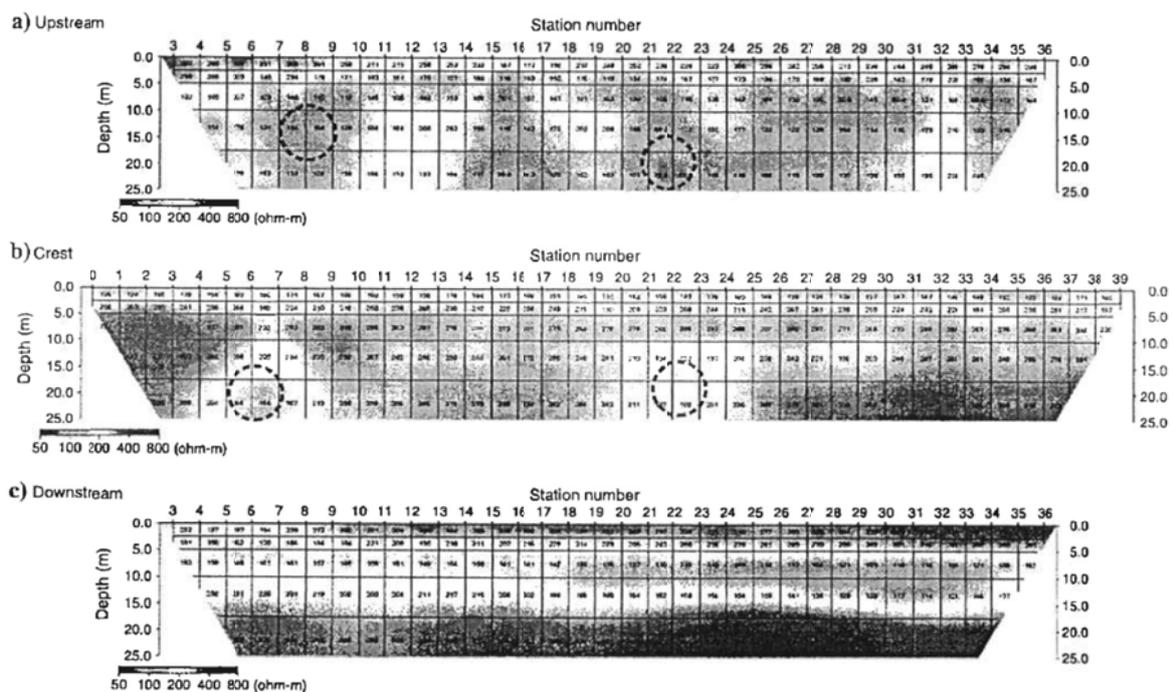


圖 B-35 Line1-Line3 電阻率影像垂直剖面圖

而採用跨孔式地電阻影像探測法之 Line1-Line2 結果如圖 B-36 所示，此圖為水平剖面，由圖中可見在第七根電極棒位置以及第 20 根電極棒位置處有高電阻區域產生，在黏土心層區域，當滲流通過時，因其會帶走細粒料而使得原本低電阻之黏土變為較高電阻，由此可判斷該兩處為滲流在此高程上通過心層之滲流路徑。相較前三條垂直剖面之結果，此水平剖面可更為直接且明確的指出滲流路徑所在。

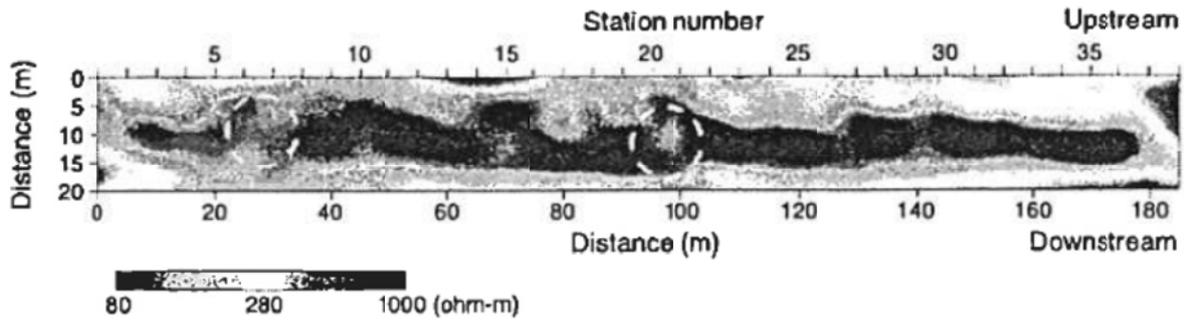


圖 B-36 Line1-Line2 電阻率影像水平剖面圖

(5) 應用成果評析

本案例採用跨孔式地電阻影像探測法可有效達到調查滲漏路徑之目的，是為一具有創意性之作法，雖然本案例在現地施作前有採用數值模擬之方式確認採用 modified pole-dipole 之跨孔式地電阻影像探測施作法可降低 3D 效應之影響，但仍建議在使用此種探測方式時，必要注意 3D 效應所可能造成之錯誤狀況，根據楊光程(民國 98 年)對 3D 效應影響之研究，建議測線高程應至少離壩頂 6 公尺較佳。此外，此應用對於判讀結果並無其他資料可供比對，其正確性具有疑慮，即使在無足夠經費進行其他地球物理探測技術或其他調查手段時，應至少與大壩既有之水位監測資料進行比對，確認調查出之滲漏位置之可能性，會使調查結果更具說服力。

(6) 參考文獻

Cho, I., and Yeom, J.-Y., Crossline resistivity tomography for the delineation of anomalous seepage pathways in an embankment dam: *Geophysics*, 72, G31–G38, 2007.

3. 敘利亞-Afamia B 壩

(1) 檢索資料

土石壩-壩基-滲流-電磁探測、一維電探探測、地電阻探測。

(2) 壩體環境與安全檢查問題說明

Afamia 壩位於敘利亞 Al-Ghab 平原右岸，沿著死海斷層體系，坐落在哈馬省西北方四十公里處，靠近阿帕米亞古文明，為土石壩，由 A、B 和 C 三壩所組成(如圖 B-37 所示)，其中 Afamia B 壩則是受滲漏水影響最大的壩，其壩長 2870m，高 55m，蓄水量 3 千 7 百萬 m^3 。過去許多學者、專家為解決滲漏問題，進行了許多地球物理與水文地質調查，調查結果皆顯示壩體範圍內遍佈了一些破裂及散亂的構造，但仍無法確認確切之滲流路徑，另其調查亦顯示壩體區域內部存有泥岩、砂岩與石灰岩等不同種類之岩盤互層，此外於 Afamia B 壩所進行之土壤氣體-氬元素量測顯示，其可能的斷層或滲透區域位於壩體附近。因此為了確切了解壩體之滲流路徑，試圖進行更為詳細之地球物理探測技術，以了解可能之滲流原因。

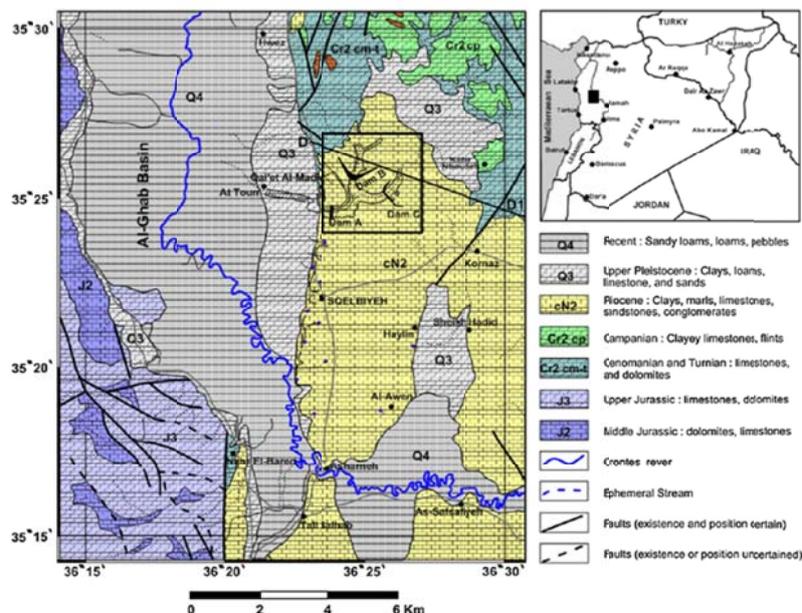


圖 B-37 敘利亞-Afamia B 壩位置圖

此次研究區域內地質結構部份，其向斜層部份主要係由白堊

紀的含碳酸鹽之岩石所組成，而岩石組成主要係由破碎之白雲石和石灰岩，因此主要為喀斯特地形形成之孔穴、孔洞與地下導水路徑；另壩體主要建造於新第三紀沉積物上方，主要由泥岩、石灰質泥岩、膠結良好聚合物與砂岩所組成，厚度約 100m；第四紀厚度主要為 1~3m，由非膠結之紅粘土與沉泥組成，但最近沉積物厚度增加，特別在某些部份達到 15m，係由於局部山谷的底部侵蝕和風化所造成(如圖 B-38 所示)。早於 1980 年代和壩體建造之前，已完成許多地質調查，地層電阻量測與監測孔位，但這些調查仍不足以描述壩體之真實地質環境，因此藉由地球物理調查技術，以了解滲流路徑。

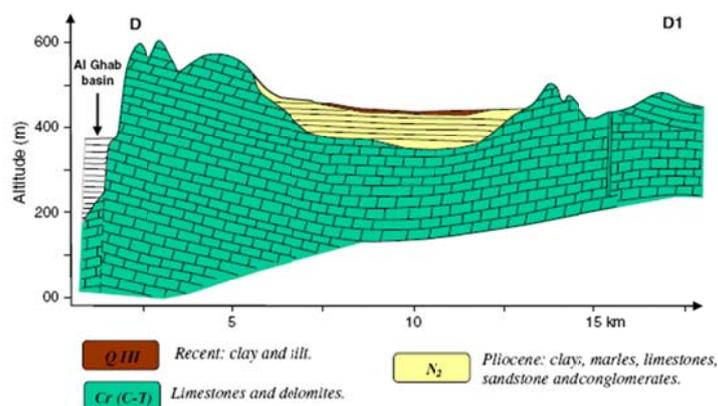


圖 B-38 敘利亞-Afamia B 壩 D-D1 剖面圖

(3) 地球物理探測技術規劃與現地應用問題

在地球物理探測方面，主要係使用電磁探測、一維地電阻探測與地電阻影像探測三種方法，測線規劃如圖 B-39 所示，電磁探測主要佈設於所要調查之 Afamia B 壩附近，尤其是乾罕之湖岸更有可能為滲透和洩漏發生之區域，分別為 zone I、zone II 和 zone III，共佈設 6500 以上之量測點位，除 zone III 部份採用 2x2 m 網格點外，其餘皆採用 4x4 m 網格點，儀器使用之頻率為 9.8kHz，探測深度約 6 公尺。

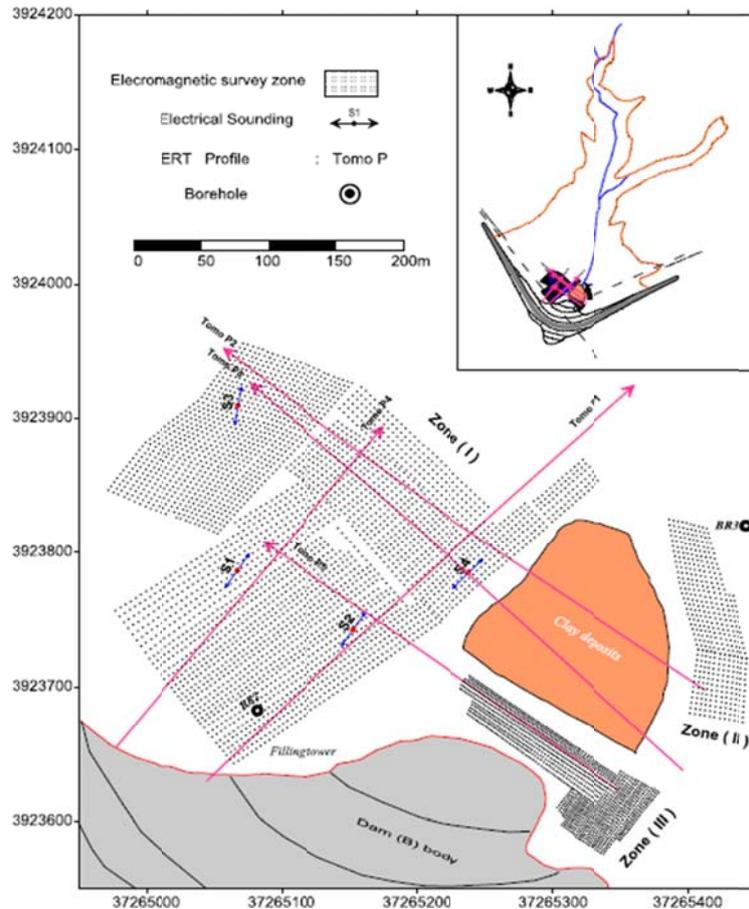


圖 B-39 地球物理探測規劃示意圖

一維電阻量測主要調查地質構造之垂直變化電阻值，以了解岩盤的地質序列，和壩體山肩與基礎構造，並結合其他地球物理量測結果，描繪出較清楚之結構圖與壩體構造，共有 4 組一維電阻佈設於湖水右側，靠近壩體，所有一維電探量測皆位於電磁探測範圍內，各組電探相互平行皆為西北向東南之方向，高程分別為 ES1 (246 m), ES2 (243 m), ES3 (247 m) 和 ES4 (238 m)，施測排列部份則採用 Schlumberger，最大電流極(AB)間距介於 300 至 600m 之間，依電流極(AB)間距，探測深度可達到 100 公尺，量測 RMS 值約為 2.2~3.3% 之間。

地電阻影像探測主要係透過 2D 量測剖面，獲得更多更詳細之岩石與地質結構，並與電磁探測和一維探測結果相互結合，其

總共於壩體附近施測五條地電阻剖面，三條垂直主要之山谷，另二條則平行主要之山谷，每條剖面佈設 72 根電極，其長度介於 320~430m 之間，測線排列採用 Wenner-Schlumberger，間距為 3m，測深約 30m。

(4) 檢測成果說明

地球物理探測結果如圖 B-40 ~圖 B-43 所示。電磁探測量測結果如圖 B-40 所示，zone I 則為最大且最重要之區域，因有異常之導電度值值得注意、確認，特別於西南邊，其導電度變化範圍為 60~170 mS/m，其異常的原因可能因黏土與沉泥沉積物存在所導致，而異常區域之走向為南北向，且被導電度變化範圍為 30~50 mS/m 之區域圍繞著。在 zone I 範圍內，可發現相對導電度較高之值其分佈方向朝西北走向，而此異常值存在之原因，可歸咎於位於地下 2-3m 深之金屬管路，管路與大壩之樓塔連接，作為蓄水其間之排氣口。因所量測之高電阻值受地下管路影響，使其無法反應出壩體區域內地質構造之導電度，因此地下是否局部存在堅固岩石或古文明遺跡等，仍無法有效證實；此外異常電阻值亦分佈於湖的東方，走向為西北朝東南，此異常可能與窪地，或與主要山谷垂直之次要支流有關係，沿著此支流之導電度值介於 50~80 mS/m。而 zone II 量測資料於左邊皆是均質，沒有任何重要的異常區域，因此，這一部份於湖水洩漏或滲流之間之關係應可忽視。而 zone III 則位於壩體附近，量測結果大多為中等導電度值，特別係沿著中心的部份，此反映的可能是其部份滲漏係從湖中剩下的水所造成。

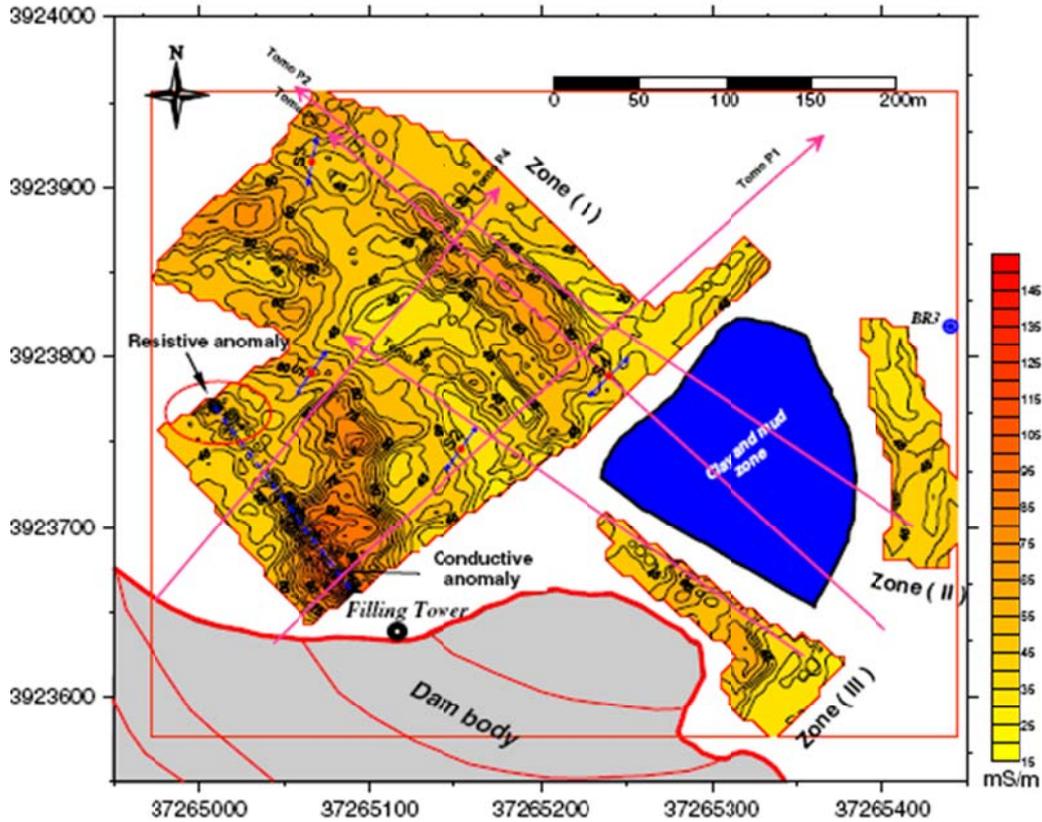


Fig. 4. Conductivity map of the electromagnetic survey carried out in Afamia B dam.

圖 B-40 電磁探測量測結果

一維電探(S1、S2、S3 和 S4)量測結果如圖 B-41，電阻曲線組成分別為三階層、四階層和六階層，其中電阻值與每一階層之厚度，皆係將每一點試驗資料曲線與理論曲線調整至最適合之結果。一維電探反算提供了地下結構之電阻影像，深度由地表至地下 100m，根據電阻剖面，發現清楚的岩層互層(低與高之電阻層)，其岩層互層之狀況與先前此區域所完成之岩盤紀錄相互吻合。而電阻值(少於 15ohm-m)主要與表面粘土和沉泥沉積物有關，其他之電阻值則是與泥灰岩、沙岩、薄層石灰岩和聚合物有所關聯。從湖的山谷和山肩之岩石序列可觀察到，不同的電阻值與每一層岩層可能之物理和水力特性相關，再者由水文地質觀點可知，因其有裂縫的存在，且斷層和鑽探井可能將表面結構與森諾曼階-

土侖階下層之喀斯特地形的鈣質石灰岩相互連結(白堊紀上方)，造成橫向滲流穿過滲透性之結構，進而導致垂直滲漏。

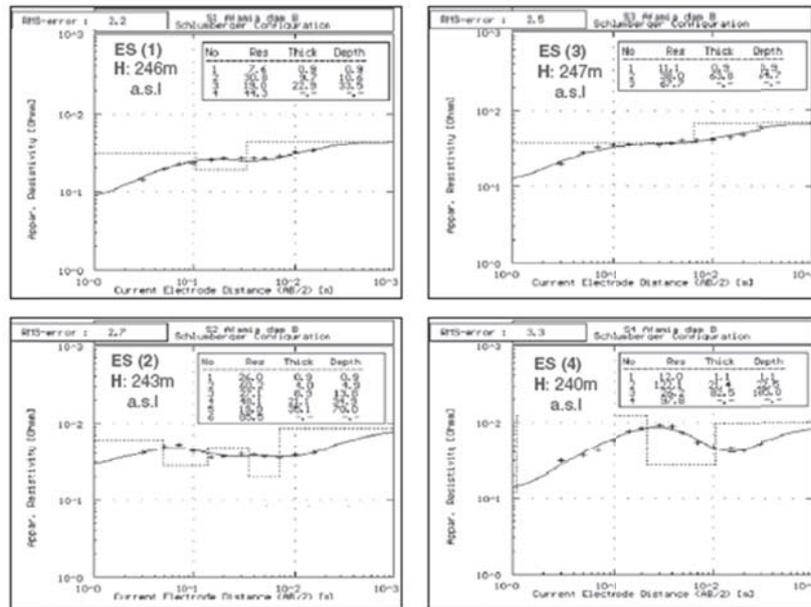


圖 B-41 一維電探量測結果

地電阻探測量測結果如圖 B-42 與圖 B-43 所示，圖 B-42 剖面顯示其相對岩石層理與一維電探所得結果相同（低電阻層與高電阻層輪流交替），低電阻值範圍在 5~25ohm-m，大部份與粘土或沉泥沉積物相關，而高電阻值範圍由 30~120ohm-m，主要與泥岩和沙岩構造有關，反之電阻值範圍為 200~350ohm-m，顯示於此處之剖面，應與新第三紀構造裡數個水平層中之石灰岩化石薄層相關。對於湖的地質環境，一維電探與地電阻所量測到之岩石序列係相互符合，其傾角約 15~20°，朝東南走向，如 BP2 與 BP3 剖面。此岩石序列的存在與滲透層結構和水力特性的差異，將構成滲漏之有效路徑。而此地電阻剖面中最顯著的跡象，則是存在明顯的結構性中斷，其平均距離約 30~170m 之間，如圖 B-42，此距離與大壩湖中央之凹陷部份相互符合，其最有可能係破裂或斷層與主山谷平行的填塔水道有關。此一不連續、斷裂或斷層區域

的發生，可能可歸納其主要因素為，透過新第三紀構造下方的白堊紀森諾曼階-土侖階之喀斯特岩石，造成垂直滲漏發生。

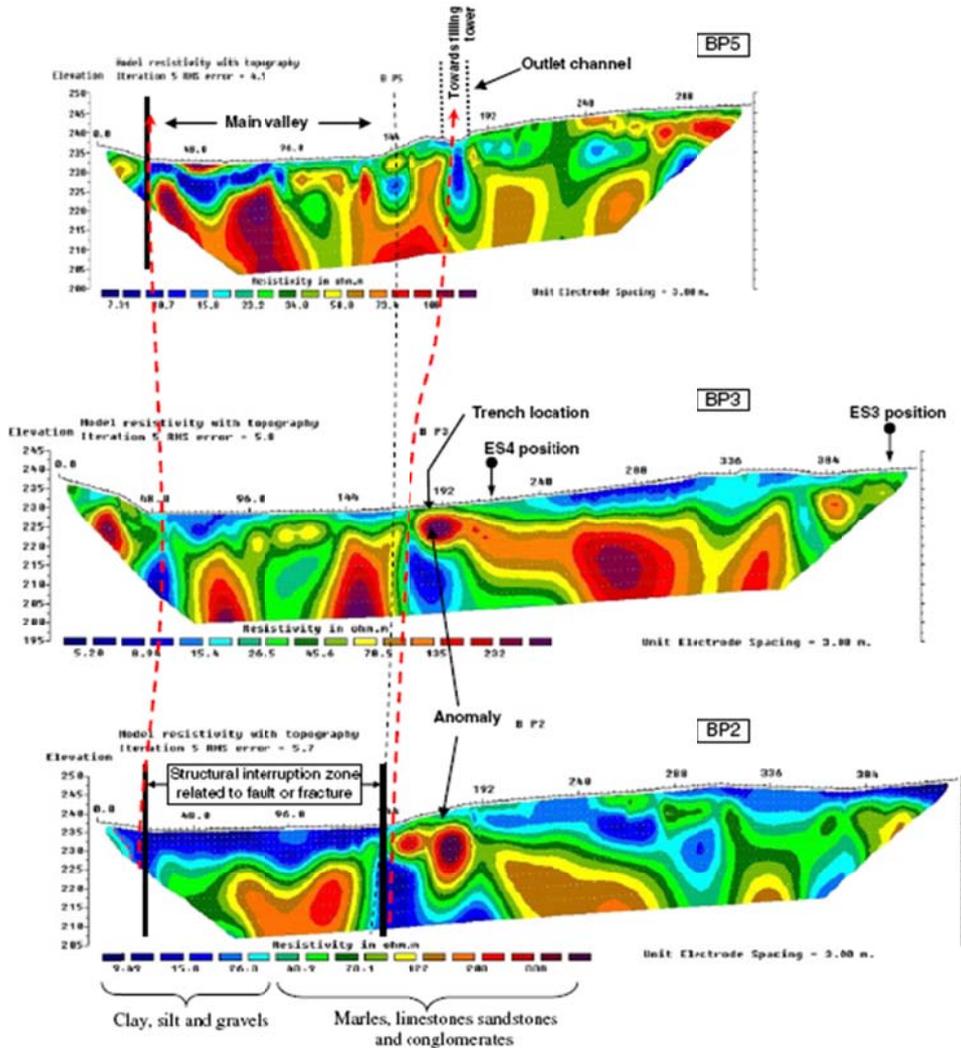


圖 B-42 地電阻量測結果(BP2、BP3 與 BP5)

另於 BP2 剖面，湖底部沉積物的形成部份，其水平層粘土與沉泥沉積厚度達到 10~12m，此沉積似乎垂直連接至位於深度 12m 之粘土沉積物，穿過上述不連續區域，可能係因地面粘土構造被流動水往下方轉移所致，而且填滿了不連續部份，此外在填壩期間，亦觀察到一些區域，其水流很快的滲出且穿過被 ERT 技術所發現的相同不連續區域，特別是位於地電阻剖面發現電阻異常部份 (200~350 ohm-m)。在測線中一位於深度 6-7 公尺之異常區透

過直接挖掘進行驗證，開挖結果證實，不連續面之深度、延展和平面與 ERT 所測得之異常區域相符。

關於其他剖面 (BP1 與 BP4)，則分佈於湖的右岸，且平行相同主要山谷，並與先前剖面幾個點位相互交叉(如圖 B-39)。量測結果如圖 B-43 所示，其結果顯示與一維電探、BP2、BP3 和 BP5 剖面相同的岩性序列，而最重要的特徵描繪於 BP1 剖面，此值得注意之構造位於距剖面起點約 70~100m，深度約 10m，且異常構造存在特別之幾何形狀並向下延伸，同時被厚的粘土結構所圍繞。異常構造之電阻值為 1200ohm-m，其可能與特有的地下地質構造或考古學遺跡有關，例如古代基礎或埋藏的隧道，皆可能形成或提高從大壩湖滲漏的主要因素。然而，後續仍須進一步研究，以確認真正異常的性質和周圍環境情況。

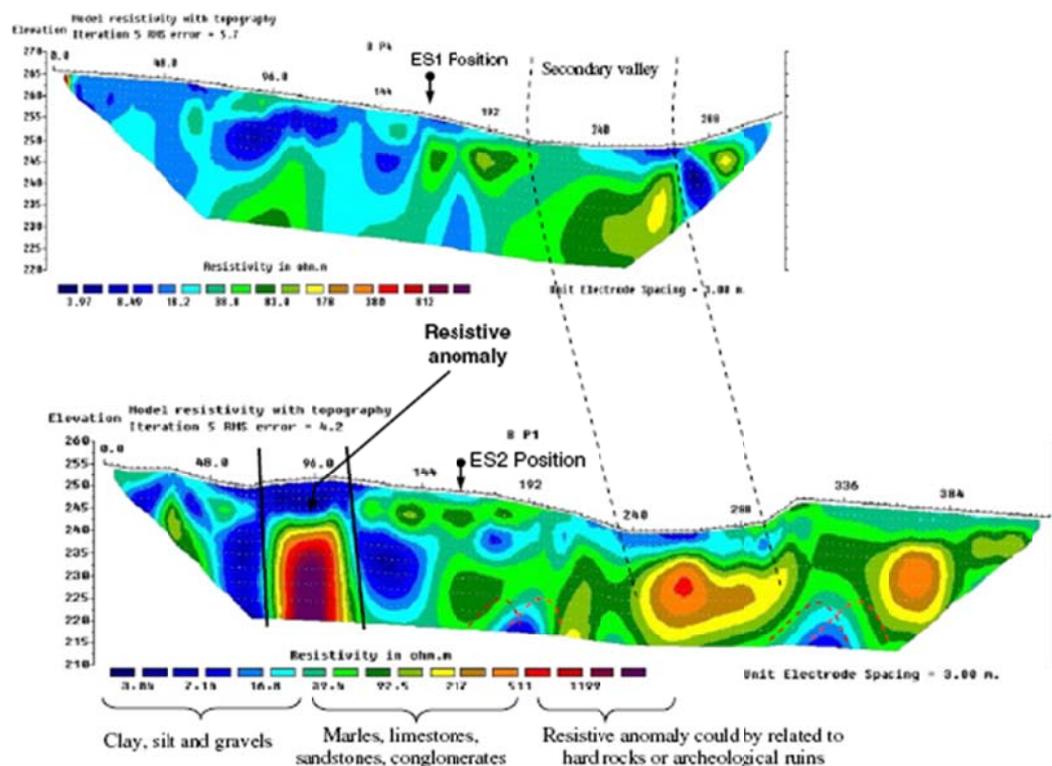


圖 B-43 地電阻量測結果(BP1 與 BP4)

(5) 應用成果評析

此案例透過不同地球物理方法的整合，包括電磁探測、一維電探和地電阻量測欲利用量測結果決定壩基可能滲漏路徑與原因，而量測結果與地質調查，皆證實滲透性岩層與非滲透性岩層相互交替存在，導致發生滲漏。

雖然其結論推論出滲漏之原因，然在此案例之應用概念上，有兩點需說明，其一，此些地球物理探測技術之應用主要是在於對壩上游側的地質情況進行確認，由地質之問題進行滲漏路徑的瞭解，而非針對滲漏問題本身進行調查，此類應用之前題應是在已有足夠背景資料確認壩基滲漏之主因在於地質之不良，因而由地質之狀況調查可能滲漏路徑；其二，由其對結果之論述可知其採用電磁探測法之主要目的在於探查近壩體上游處下方是否有孔洞或是古文明遺跡存在，因此在判讀上並未將此結果與地電阻影像探測法結果互相比對。

由此種地球物理應用方式，雖可瞭解滲流發生之原因，但對於滲漏路徑仍無法有效獲得，因此針對此案例之應用有數點建議，其一，地質狀態之確認上，目前對其調查所得地質狀態之描述皆為推測而未有實際驗證，應可由現有地球物理探測技術調查所得之結果，針對特別異常區進行鑽孔調查，以便與地質狀態實際比對；其二，其施作時為低水位期間，建議可在高水位期間於壩體以及壩之下游側搭配上流側之鑽孔再進行調查，以直接調查滲流水之流路而達到此案例之調查目的。

(6) 參考文獻

Walid Al-Fares (2011) “Contribution of the geophysical methods in characterizing the water leakage in Afamia B dam, Syria”
Journal of Applied Geophysics 75, 464-471.

4. 印度-Som-Kamla-Amba 壩

(1) 檢索資料

土石壩-壩體-滲漏-地電阻探測法、自然電位法。

(2) 壩體環境與安全檢查問題說明

位於印度西部 Durgapur 省之 Som-Kamla-Amba 壩於 1993 年興建，是為土石壩，其主壩長 1025 公尺，高 23 公尺，為提高壩容且不增加蓄水面積，根據地形需求另有 4 座副壩亦同時施作，其中 3 號副壩由原來的 14 公尺壩高提升至 19.5 公尺(如圖 B-44 所示)，並在下游側增加填土以提升壩體在庫容增加後之穩定性，然而就在試蓄水的過程中發現在 3 號副壩的壩體右側有滲水的情形(如圖 B-45 所示)，為了解滲水路徑以進行後續整治工作，故規劃地球物理探測試驗進行調查。

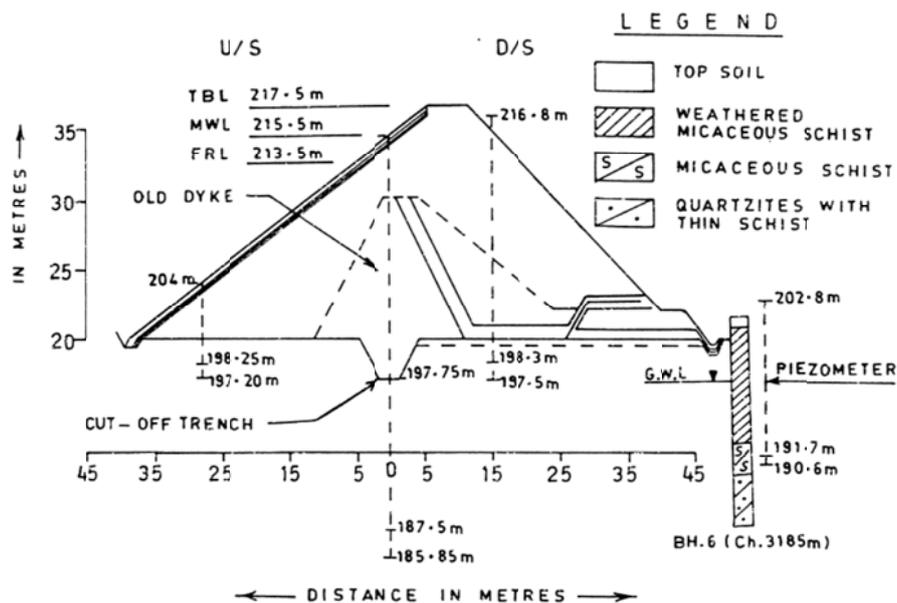


圖 B-44 Som-Kamla-Amba 三號副壩標準斷面圖

(3) 地球物理探測技術規劃與現地應用問題

為瞭解滲流範圍與路徑，在本案例中規劃有自然電位法與地電阻探測法，如圖 B-52 所示，自上游至下游沿著壩軸共佈設有 5 條自然電位法測線 P1-P5，其中 P1,P2 位於上游側，P3 接近壩軸，P4,P5 位於下游側，為確保量測之品質，每個量測點會量測 2-3 次，根據本案例之量測成果，其變動值小於 5mV，此外，為確保電極與土壤間接觸導電良好，在量測前會先將量測處之土壤潤濕 5-6 小時；而配合各個自然電位法之測線佈設有 12 個 1 維地電阻垂直剖面測線，在 P1,P2,P4 測線上還有進行 1 維地電阻水平剖面量測，兩者地電阻探測之電極排列模式皆採用 Schlumberger 法進行施測，1 維地電阻垂直剖面探測之結果會使用 RESIX-IP 進行 1 維垂直地電阻剖面分析。

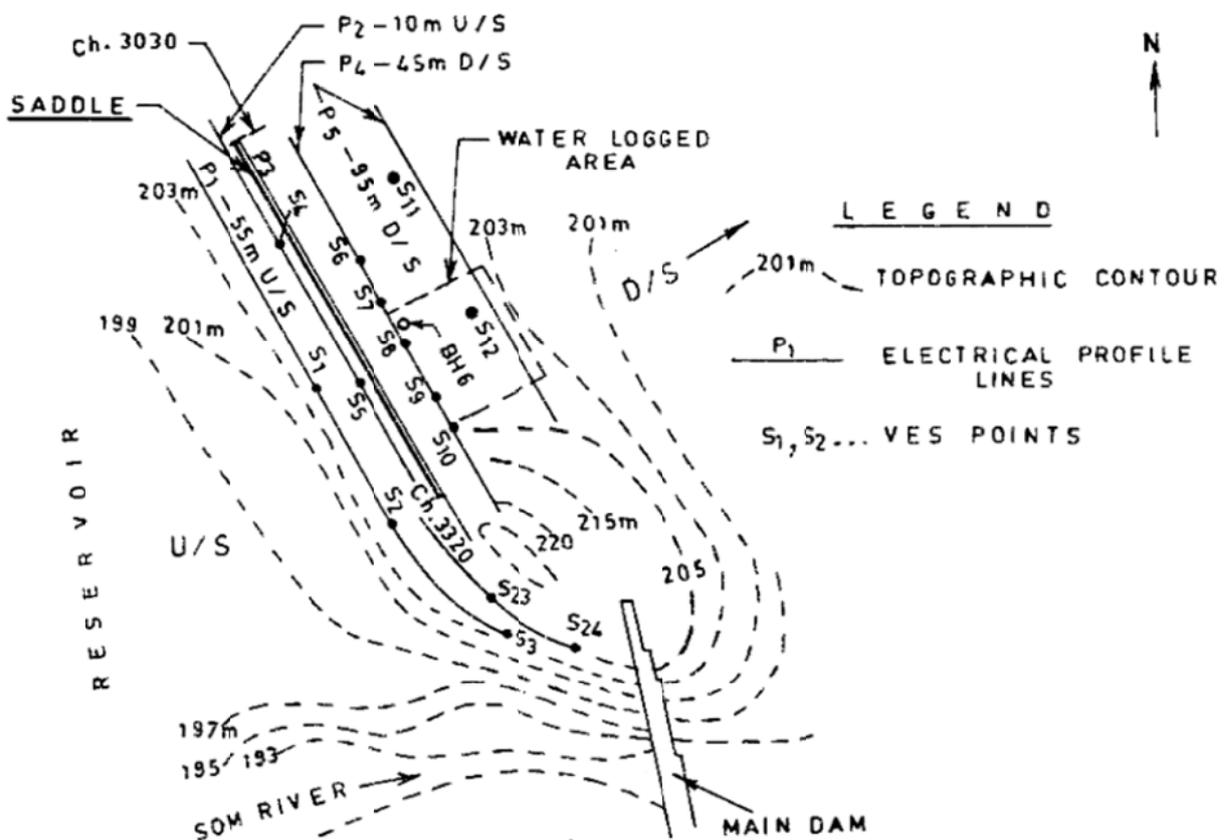


圖 B-45 Som-Kamla-Amba 三號副壩地球物理探測試驗規劃

(4) 檢測成果說明

自然電位法以及1維地電阻水平剖面之結果如圖B-46所示，在自然電位法的判釋上，根據現場所獲得之資料、地形以及地表高程繪有一區域的趨勢線(regional gradient)，作為判斷滲流位置的基準，現場自然電位在此一趨勢線以下的區段則判釋為滲流所在位置，以實心長條標註位置；而1為地電阻水平剖面探測資料之判釋以現場觀測得滲水點位置所得之視電阻值 200ohm-m 作為是否為滲流位置之判斷，將電阻率低於此值的區段標示為滲流所在位置，以條紋長條標註，如此將兩者左右邊界連起即可獲得其滲流路徑於地表之映射範圍。

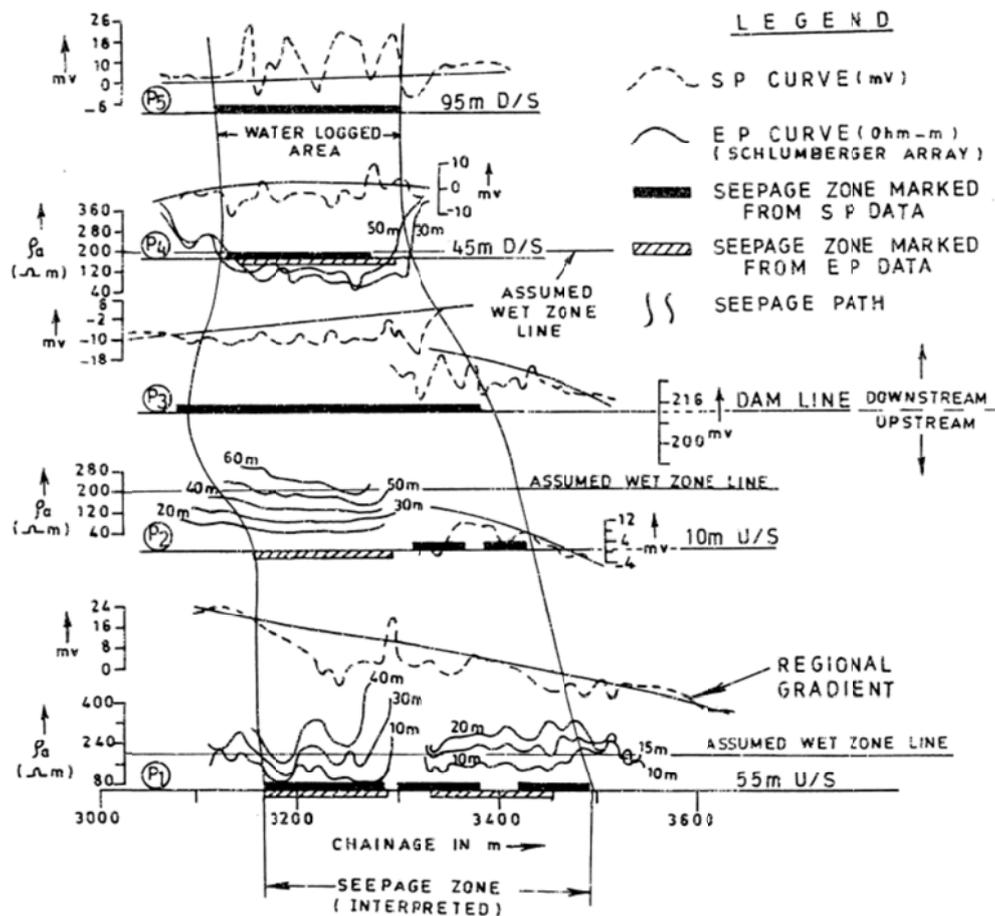


圖 B-46 Som-Kamla-Amba 三號副壩自然電位法與地電阻成果

將 1 維地電阻垂直剖面探測反算分析所得之 1 維地電阻垂直剖面按照空間以及現場鑽孔所得之地質資料搭配可得到其成果如圖 B-47 之結果，整體結果顯示地底濕潤區在上游處由壩體外之右壩座向下游延伸。綜合圖 B-46 所得之結果顯示，滲流自壩體右壩座與壩體之界面滲入壩體厚自下游滲出。

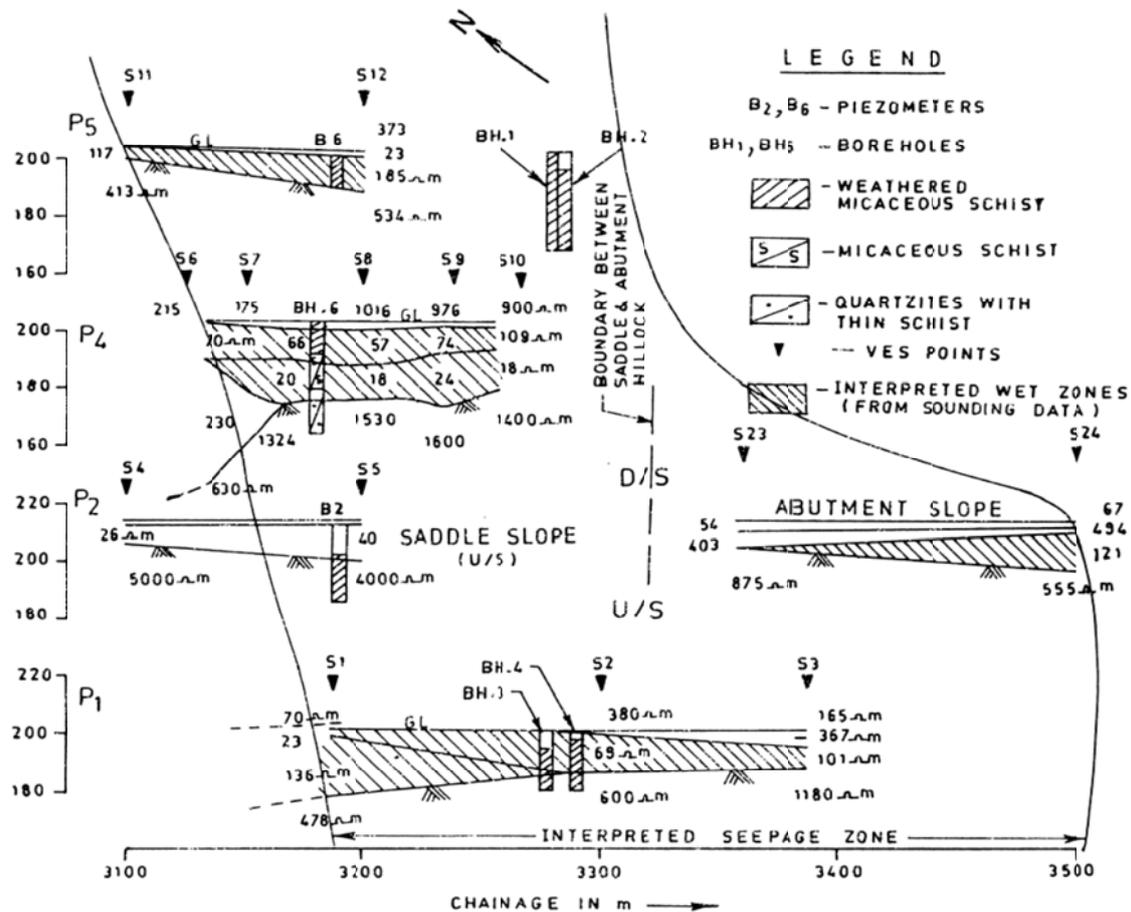


圖 B-47 Som-Kamla-Amba 三號副壩自然電位法與地電阻成果

(5) 應用成果評析

本案例呈現了採用 1 維自然電位法以及 1 維地電阻法在壩體滲流調查上之分析以及判釋方法，過去在地電阻探測儀器發展尚未如現今成熟與發達的期間，現場作業常受限於儀器而無法進行有效率的 2 維甚至是 3 維資料的收集，而只能採用 1 維之方法，

由此案例之分析與判釋中可知，在採用 1 維之分析方法時，先不論其 1 維假設在壩體上的適用性(3D 效應、地形效應等)，無論是自然電位法或是地電阻法，對結果的判釋都極為困難，分析人員需有足夠之判釋經驗與訓練才具有足夠能力將作為判斷準則之自然電位區域趨勢線或是滲流區域之電阻率訂出，而且此兩項準則皆亦受到判釋者之主觀影響而導致對成果的判釋有明顯的不同。因此在目前探測儀器已具足夠成熟之際，建議採用 2 維甚或 3 維之探測方式，降低判釋上的困難，也增加調查結果之正確性。

(6) 參考文獻

Panthulu, T., Krishnaiah, C., Shirke, J., Detection of seepage paths in earth dams using self-potential and electrical resistivity methods, *Engineering Geology*, 59, pp. 281-295, 2001.

5. 中國大陸-南水水庫

(1) 檢索資料

土石壩-壩體-裂縫-透地雷達探測法。

(2) 壩體環境與安全檢查問題說明

南水水壩位於中國大陸廣東省，建成於 1969 年，屬於土石壩，其壩高 81.3 公尺，壩長 215 公尺，最大蓄水量達 12.8 億立方米。其主壩標準斷面如圖 B-48 所示，是一具有傾斜黏土心層之土石壩，該黏土心層位於上游面，在其上有 20 公分厚之混凝土版進行表面覆蓋，而在黏土心層之下設計有傾向上游之濾層存在。

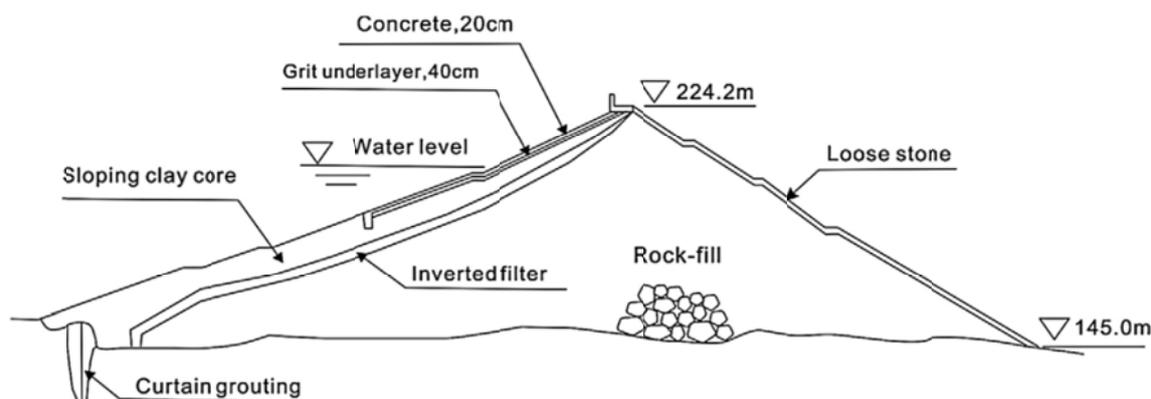


圖 B-48 南水水壩標準斷面圖

根據水庫管理單位之資料顯示，曾多次針對部分上游混凝土覆蓋進行鑽鑿作業檢視下方之黏土心層，發現有許多，數公尺至數十公尺長1-30公厘寬之裂縫以及數公尺寬之破碎區存在地表下一公尺以內的深度範圍，雖然這些已發現之問題區域已進行改善工作，但其餘未鑽鑿開檢視的區域可能存在相同的問題，因此規劃地球物理探測方法進行裂縫地檢視。

(3) 地球物理探測技術規劃與現地應用問題

本次檢測採用透地雷達進行施測作業，在現地作業之規畫上將工作區域分為兩個部分，第一個部分是水上區域，在水面以上的區域考量其探測深度以及解析度採用 300MHz 之透地雷達進行施測，測線與壩軸平行，每條測線與測線間之間距為 2 公尺，而為了避免受到地表雜物或是施測過程中因地表不平整而有跳動情形所造成的異常訊號干擾，在施測過程中對於有異常訊號發生地測線將重複施作，以降低誤判的可能性；另一個部分是水下區域，在水下區域的施作，考量電磁波在水中能量衰減較快，因此採用 50MHz 的低頻天線進行施測，測線同樣與壩軸平行，每條測線與測線間之間距為 2 公尺。

在此處之施測主要困難將會是對水下區域進行探測的工作，

水下區域的施作對一般使用之透地雷達會有所困難，主要原因有二，一是儀器本身並不具防水功能，二是欲於水下拖行需有潛水人員或是特殊儀器輔助，而於本案例中，其對水下區域的探測是採用水表面施作之方式，其使用可漂浮於水表面並具有防水功能的透地雷達儀器進行施作，以獲得欲探測之結果，關於此部分可參考 Xu et al.(2006)進行較細節的瞭解。

(4) 檢測成果說明

水上區域之檢測成果顯示壩體心層有多處裂縫以及破碎帶存在，其中有三處裂縫以及一處破碎帶有進行現場驗證工作，該四處之探測結果如圖 B-49 所示，在有裂縫的地方，於透地雷達影像中會呈現有突發極短的異常多重反射訊號，而對於破碎帶則會有一定帶寬的異常反射訊號出現。此四處位置皆進行有現地開挖之驗證工作，且結果顯示確實有裂縫以及破碎帶的存在，只是作者特別提到，由於驗證時間距施測時間已經過一個半月時間，並進入雨季，其中一處較小之裂縫以及破碎帶在挖開後其裂縫及破碎帶有因為黏土較潮濕而膨脹閉合的情形，但仍可發現該處黏土與周圍狀態明顯不同。

水下區域透地雷達之探測結果如圖 B-50 所示，由圖中可明顯分辨出壩體的不同組成，而此測線之探測結果顯示水面下黏土心層有兩處異常區域，推測可能是黏土心層有崩解的現象，其餘多條測線亦有類似的結果，但因水庫管理單位在營運需求與壩體安全之考量下並未進行水下成果的驗證。

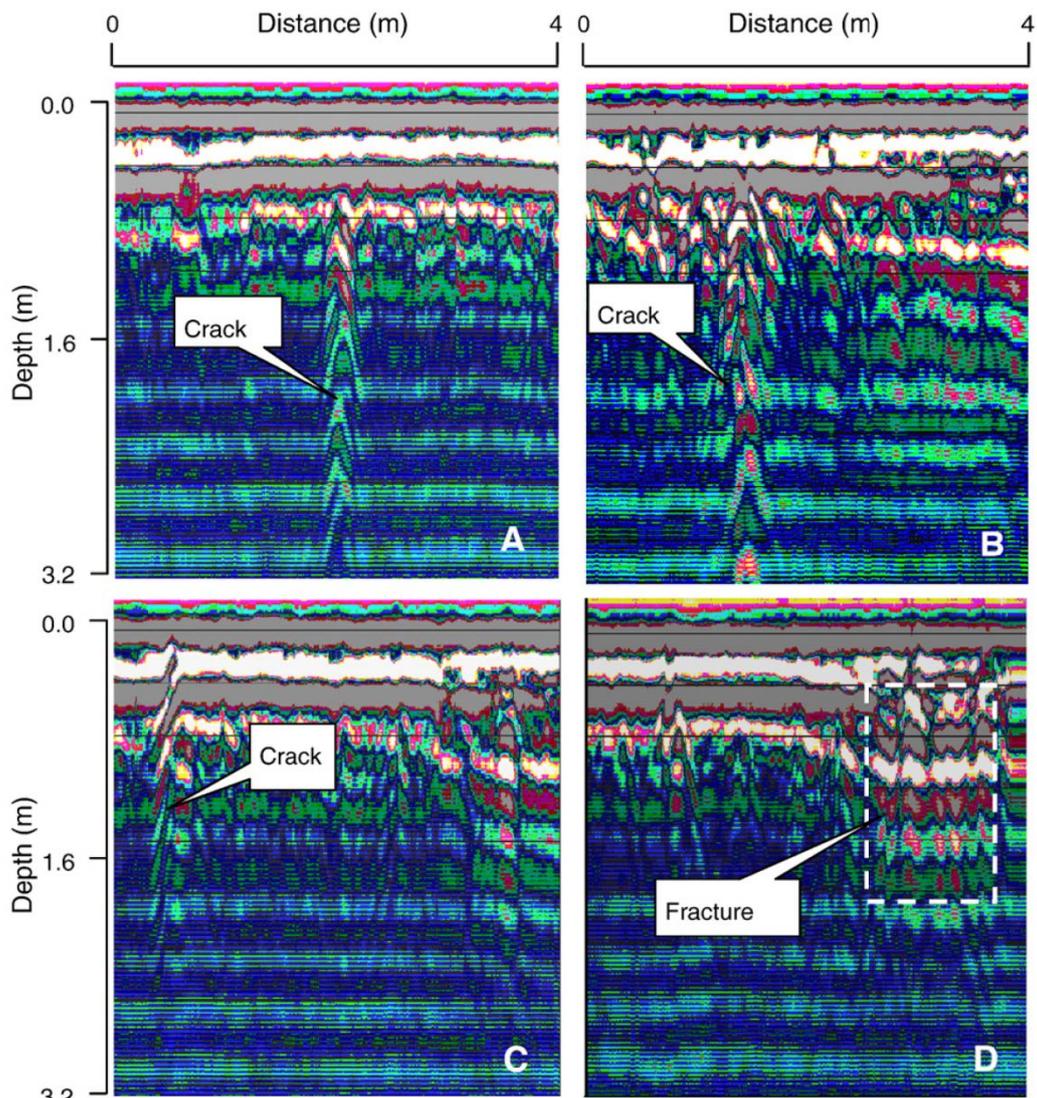


圖 B-49 水上區域透地雷達檢測成果(具驗證處之資料)

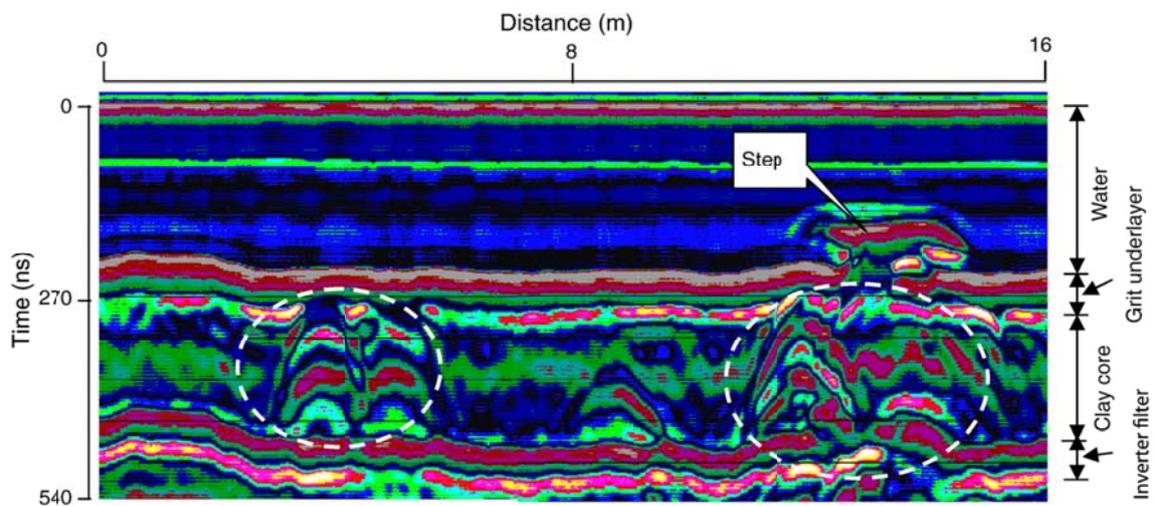


圖 B-50 水下區域透地雷達檢測成果(舉例)

(5) 應用成果評析

採用透地雷達進行壩體水下結構的調查具有其實用性，但在應用上為可使其穿透水層並對水層下方地層進行探測需犧牲解析度而以其可達之探測深度為透地雷達天線選擇之主要考量，如此對於較細部之狀態將可能無法探測得到，於選擇應用時應當注意此點；此外，於水面上進行透地雷達調查有多項現場應用問題須解決，例如透地雷達之防水、漂浮載具、施測位置之定位、施測之啟動器等問題應先考量，以確保有良好之施測結果。

(6) 參考文獻

Xu, X., Wu, J., Shen, J., He, Z., Case study: application of GPR to detection of hidden dangers to underwater hydraulic structures, *Journal of hydraulic Engineering*, 132, pp. 12-20, 2006.

Xu, X., Zeng, Q., Li, D., Wu, J., Wu, X., Shen, J., GPR detection of several common subsurface voids inside dikes and dams, *Engineering Geology*, 111, pp.31-42, 2010.

(二) 混凝土壩

1. 中國大陸-三清亭壩

(1) 檢索資料

混凝土壩-壩體-滲漏-透地雷達探測法。

(2) 壩體環境與安全檢查問題說明

三清亭壩位於福建省汀江上游之逕美村，是為混凝土拱壩，其壩高 52.2 公尺，壩頂寬 3 公尺，集水面積 2.06 平方公里，最大庫容為 208 萬立方公尺(如圖 B-51 所示)。根據現場的目視檢測發現在壩體中央有一明顯滲漏區域存在，為確認其滲漏裂縫範圍所

在，因此規劃地球物理探測現地試驗。



圖 B-51 三清亭壩衛星照片(摘自谷歌地圖)

(3) 地球物理探測技術規劃與現地應用問題

混凝土壩壩體之滲漏常肇因於裂縫的產生，因此在此選用透地雷達探測技術進行裂縫的調查，為可較全面又經濟的對壩體進行檢查，共佈設有 4 條測線分別是 L1-L4，如圖 B-52 所示，L1 位於壩頂，沿著壩軸進行垂直剖面探測，測線長 87 公尺；L2 及 L3 位於壩面下游側，沿著壩軸進行橫剖面探測，測線長分別是 45 公尺及 50 公尺；L4 位於壩面上游側，其施作高程貼近庫水位，沿著壩軸進行橫剖面探測，測線長 50 公尺。

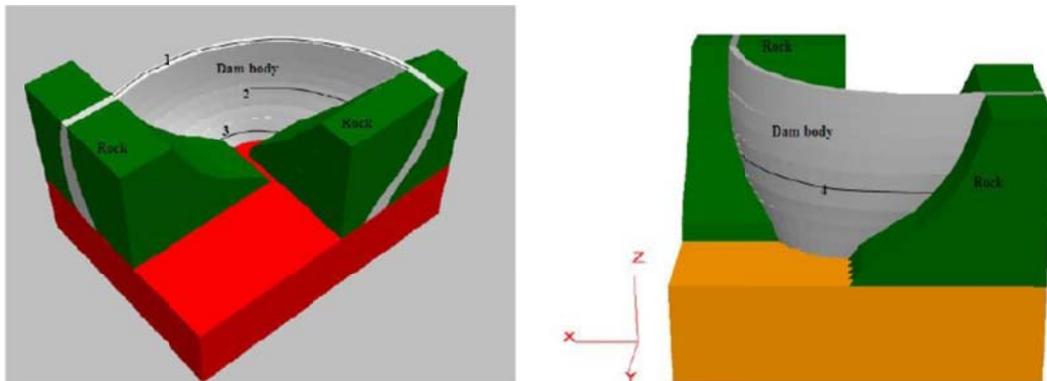


圖 B-52 三清亭壩透地雷達探測測線規劃

由於透地雷達之探測深度與其所選用之頻率有關(頻率越低探測深度越深，但解析度較差，反之亦然)，四條測線位置所需之探測深度需求不同，因此應適當選擇所使用之透地雷達頻率以達到深度與解析度的需求，根據此壩的電磁波速特性，L1 採用 100MHz 之天線頻率，最深可達 40 公尺之探測深度，L3-L4 採用 400MHz 之天線頻率，最深可達 7 公尺之探測深度。除適當選擇天線頻率外，因 L2-L4 需垂直貼緊壩面施作，無法如 L1 採用連續拖拉的方式進行施作，因此其在施作上是採單點施作的模式，用以克服現場實際施作的困難。

(4) 檢測成果說明

L1 測線成果如圖 B-53 所示，整體而言此混凝土拱壩之壩體內部材料均勻性良好，主要有三處有異常訊號存在，第一部分是在測線 40-43 公尺處深度約 3-20 公尺有異常反射訊號存在，第二部分是在測線 45-48 公尺處深度約 3-20 公尺有異常反射訊號存在，而第三部分是在測線 53-55 公尺處深度約 4-20 公尺處有異常反射訊號，此三個異常訊號區可能是壩體具裂縫所造成。

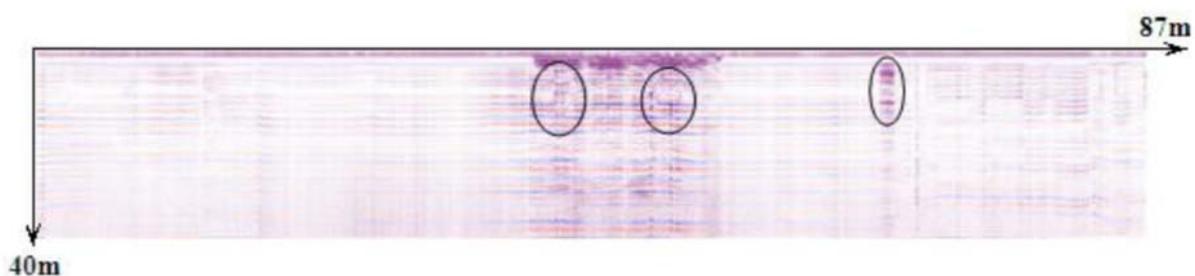


圖 B-53 三清亭壩透地雷達探測 L1 成果

L2 測線之探測成果如圖 B-54 所示，測線整體無異常反射訊號存在，壩體狀態良好；L3 測線之探測成果如圖 B-55 所示，壩體整體均勻性良好，但在測線 25-30 公尺深度約 2-4 公尺處有一異常訊號存在，可能為壩體內存在的裂縫；L4 測線成果如圖 B-56

所示，壩體狀態整體良好，但在測線 5-8 公尺深度 2-4 公尺的部分可看見有線性的向右傾斜的異常反射訊號，此異常訊號顯示在壩體外側之岩層內可能有孔洞或是異常區域存在。

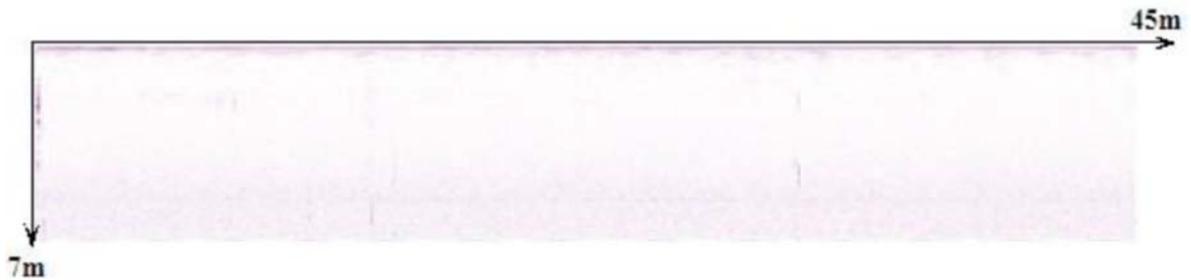


圖 B-54 三清亭壩透地雷達探測 L2 成果

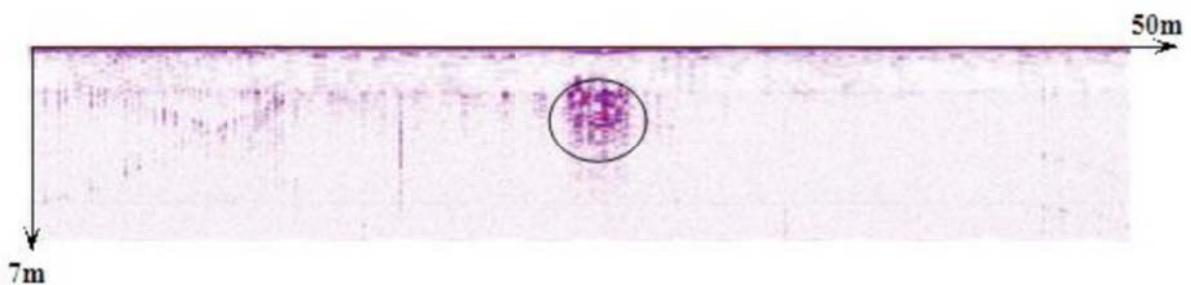


圖 B-55 三清亭壩透地雷達探測 L3 成果

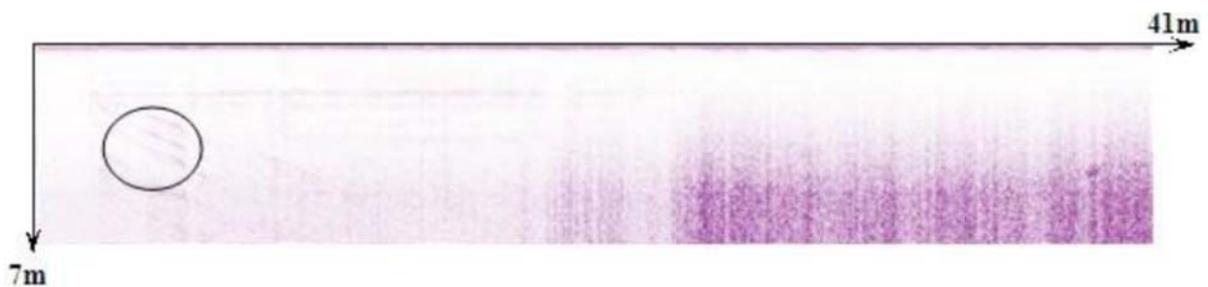


圖 B-56 三清亭壩透地雷達探測 L4 成果

根據測線判釋結果將可能之裂縫範圍標記如圖 B-57 所示，主要在壩體中央有一垂直的裂縫帶存在，該範圍與現場壩面滲漏區域吻合，將據以進行後續整治工作。

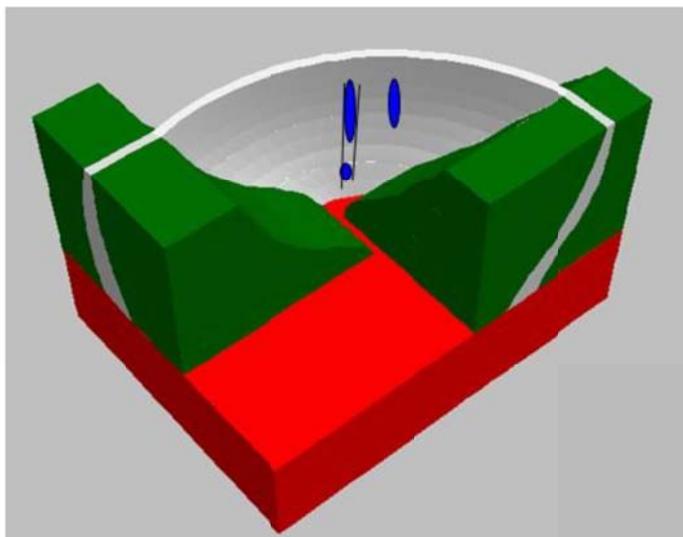


圖 B-57 三清亭壩透地雷達探測綜合判釋成果

(5) 應用成果評析

透地雷達探測技術用於混凝土構造物內部裂縫之檢測具有良好成效，但在壩體應用上應考量其可能具有的施作難度，在壩面上之量測須採用懸吊或是吊車之方式施作；此外，進行垂直剖面之調查時，因其需較深之探測深度而採用低頻天線，在裂縫不明顯的狀況下可能無法探測到，於測線規劃時應加以考量；部分混凝土拱壩會有鋼筋在壩體中，於應用上應考量鋼筋可能對結果判釋所造成的影響。

本案例中 L2-L4 測線進行橫剖面探測，在探測結果中未觀察到有另一側與空氣介面的強反射訊號出現，因未有足夠資訊瞭解各測線處壩體橫剖面之寬度，因此無法確認是否超過估計之 7 公尺探測深度，倘若在有足夠探測深度的情況下，建議先行判斷另一側強反射的位置，如此將有助於修正原先估計壩體材料電磁波速，而可得到較佳的位置判釋。

(6) 參考文獻

H. Li and H. Ma, Application of ground penetrating Radar in Dam body detection, Procedia Engineering, 26, pp.1820-1826, 2011.

四、美洲地區

(一) 土石壩

1. 美國-Dana Lake 壩

(1) 檢索資料

土石壩-壩體-滲漏-地電阻影像探測法、自然電位法。

(2) 壩體環境與安全檢查問題說明

Dana Lake 壩是一座由冰磧石自然堆積形成的壩體，其上游側之 Dana Lake 將近有 300,000 立方公尺的水量，每年湖水面大約有 2 至 3 公尺的變化，根據目前之資料並無法確切得知此處自何時開始蓄有湖水，但根據舊有之地圖，可知至少在 140 年前已有此湖之存在。如圖 B-58 所示，壩體東北側較為平緩，組成材料主要為橘色的石英質二長岩(quartz monzonite, Qmo)，而壩體西南側較為狹窄且坡度可達 30 度，主要組成材料是灰色層狀層積岩(如角頁岩)。在此壩的下游處上有兩個較小未命名的湖存在，為便利辨識，在此分別稱為東湖與西湖，此兩湖雖然僅相距 50 公尺，但兩者湖底床有極大之不同，在西湖之湖床底內為厚層之粉土沉積，但在東湖之湖床底確是大卵礫石沉積。現場勘察發現，Dana Lake 壩在其西側有一天然形成之溢洪道(圖 B-58 箭頭處為其流向)，當湖水位過高時，將由此溢流而出，而後進入地表後自圖 B-58 中 x 標示處湧出，而後流入西湖。但此流路並無法解釋西湖中含有大量粉土沉積的原因，由現場多次之勘查顯示，溢流而出的水中幾乎不含有細粒料，因此，由此兩小湖湖床底調查差異之結果

初步認為，Dana Lake 壩有壩體滲漏之問題，且其滲漏路徑是向西湖流去，因而造成在西湖湖床底有大量粉土沉積。此滲漏問題將可能造成 Dana Lake 壩的破壞，過去並無相關安全評估調查對此進行評估，因此欲進行地球物理探測作業進行滲漏調查，以作為安全評估之依據。

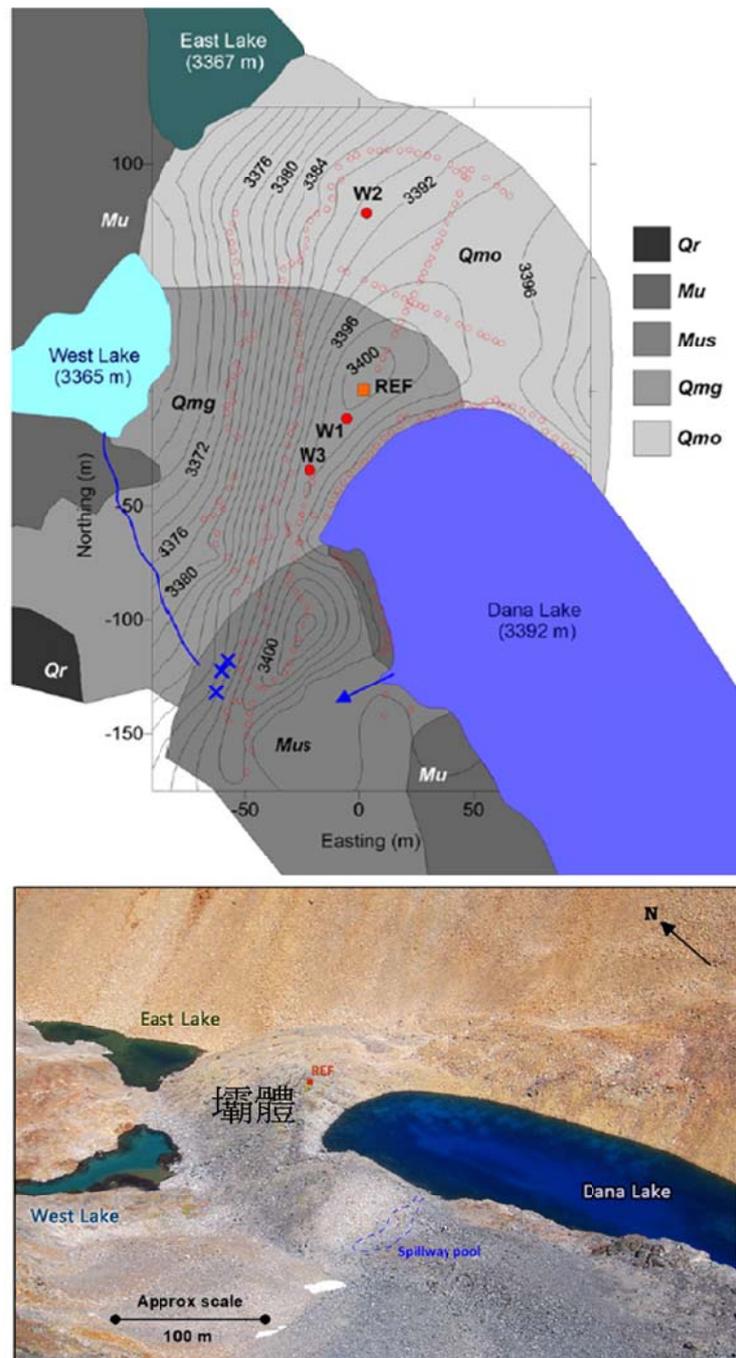


圖 B-58 Dana Lake 壩平面圖與現場照片

(3) 地球物理探測技術規劃與現地應用問題

對於此壩體安全檢查問題，採用自然電位法以及一維垂直剖面地電阻探測進行。如圖 B-58 所示，自然電位法測點(空心圓圈)規劃於整個壩體進行，使用硫酸銅溶液之非極化電極施作，共有 235 個測點，各測點之平均間距為 2 公尺，但實際位置視地表情況而略有調整，而各測點之位置使用經緯儀進行精確的定位。每個量測點在施作時會稍微挖除地表之土壤，確保地表有足夠之濕潤度使電極接觸電阻(electrode contact resistance)降至 100 kΩ 以下，而其基準點設在壩體中央(圖 B-58 REF 處)。另外，為確保地體自身電位差對量測之影響，一組相距 40 公尺之電極獨立置於壩頂進行地體電位差監測，另外為避免電極漂移(electrode drift)的問題，同一位置會進行多次量測。而由於壩面主要為乾燥的岩塊，因此在施作時會挖開地表在同一處置入 5 根電極棒進行量測，且為增加與地體材料的耦合，在放電端電極灌入鹽水溶液，但在電流量測端並未如此施作。

(4) 檢測成果說明

自然電位法檢測成果如圖 B-59 所示，整體探測結果有兩處較異常之負電壓差區域，分別位在壩體之東北側以及西南側。在壩體東北側處之異常區接近放置量測基準點的位置，此負電壓差顯示有水流流經之現象，主要隨著地型自高處往低處流動，可能是貼近壩體表面之地下水流動，此處所測得知自然電位非最低點，最低點之處位在壩體的西南側，顯示該處有更加明顯的水流流動情形，由此處之結果初步推論東湖與 Dana Lake 間無特定的滲流管道存在，但西湖與 Dana Lake 間因受限於西湖正下方處的地表狀況不適合進行自然電位法施作而無法確認壩體西南側之明顯流

動水是否與西湖有所連通而產生特定的滲流通道。

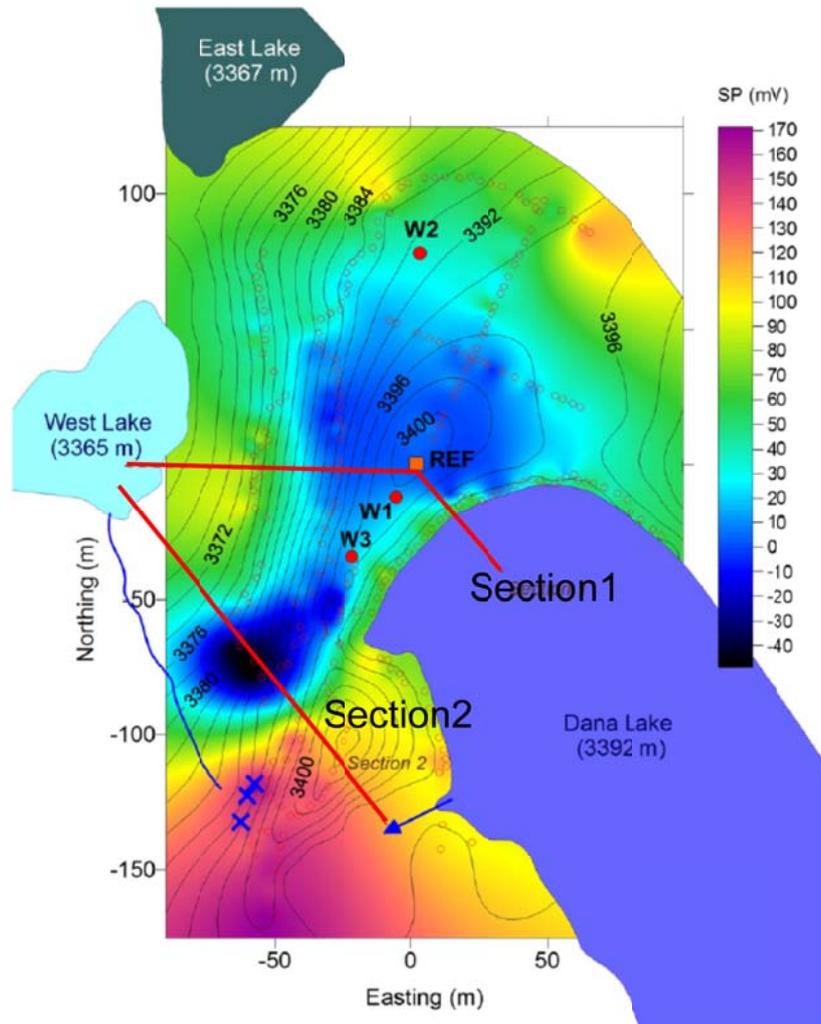


圖 B-59 Dana Lake 壩水平自然電位差影像

W1 及 W3 施作所得之一維地電阻剖面資料與反算結果如圖 B-60A 所示，兩者反算所得之地層剖面構造相近，其所得地層可分為三層，在地表 2 公尺內有電阻率為 $2000\Omega\cdot\text{m}$ 之無凍冰礫土，其下有 $11000\Omega\cdot\text{m}$ 厚度 20 公尺之冰凍冰礫土，而在最下方為電阻率為 $3000\Omega\cdot\text{m}$ 之沉積岩岩盤。為進一步探討自然電位法所得之結果推論的合理性，採用一維地電阻所得之剖面資料進行深度剖面模擬，將 section 1 之剖面模擬如圖 B-60A 所示，並將推測近地表地下水流動之假設情況加入剖面中，採用 COMSOL multiphysics

有限元素法數值模擬軟體進行正算模擬，其所獲得之自然電位法結果(如圖 B-60B)顯示與現場量測所得結果相近，增加對於 Dana Lake 與東湖間無特定滲流路徑推測之信心；另外對於壩體西南側異常區域與西湖間之連結問題，亦採同樣方式進行模擬，並根據一開始現場調查之結果假設兩者間有特定滲流路徑連通，但正算結果皆無法與現場測得資料正確比對。

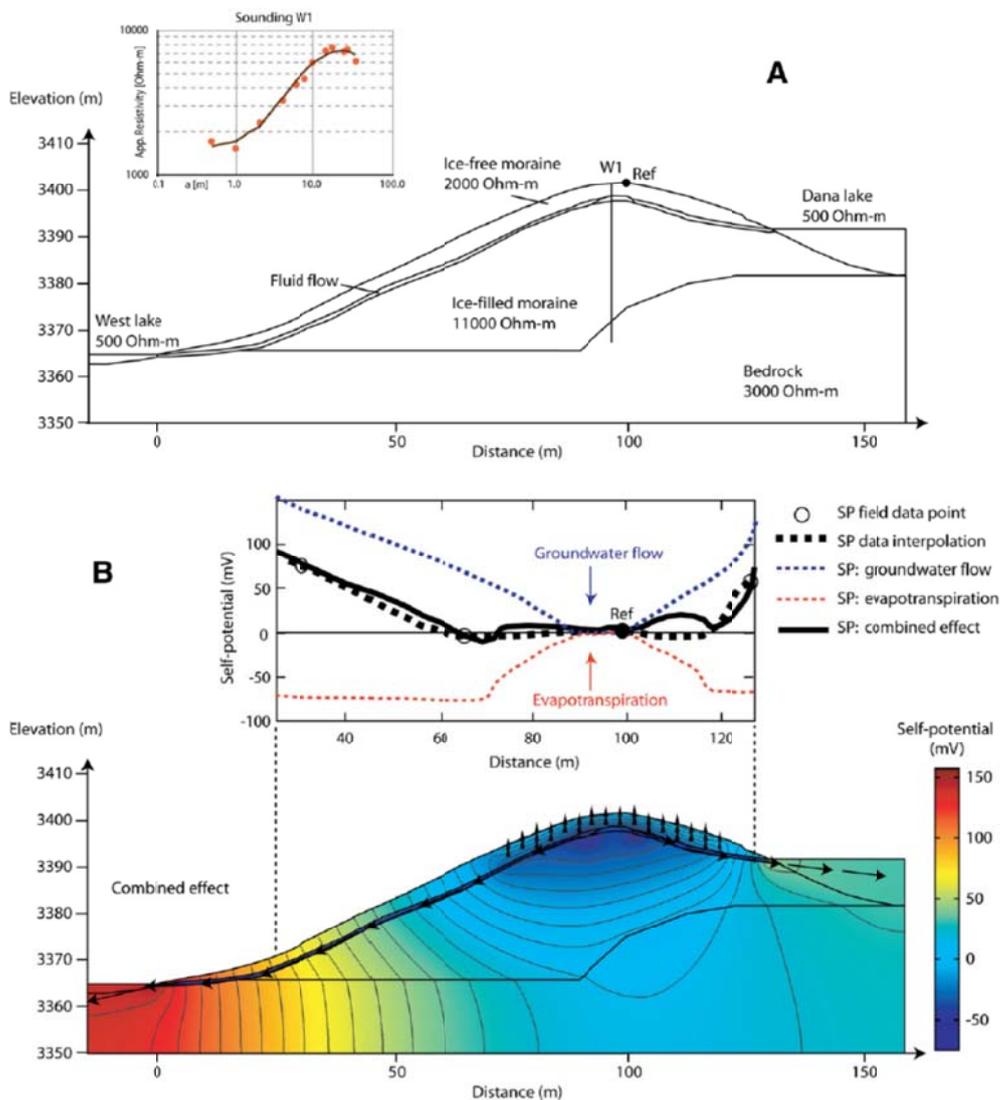


圖 B-60 Dana Lake 壩一維地電阻剖面施作結果(A)與 section 1 自然電位法垂直剖面數值模擬(B)

由該地區之過去地質研究資料顯示在壩體西南側異常區域有

一垂直通過壩體下方之斷層存在，因此將 Section 2 之地層剖面進行修改如圖 B-61 所示，在異常區域附近有一垂直流路存在，則此地層模型之正算模擬結果與現地自然電位法量測結果十分吻合，因此判釋西湖與 Dana Lake 間並無明顯滲流通路存在。

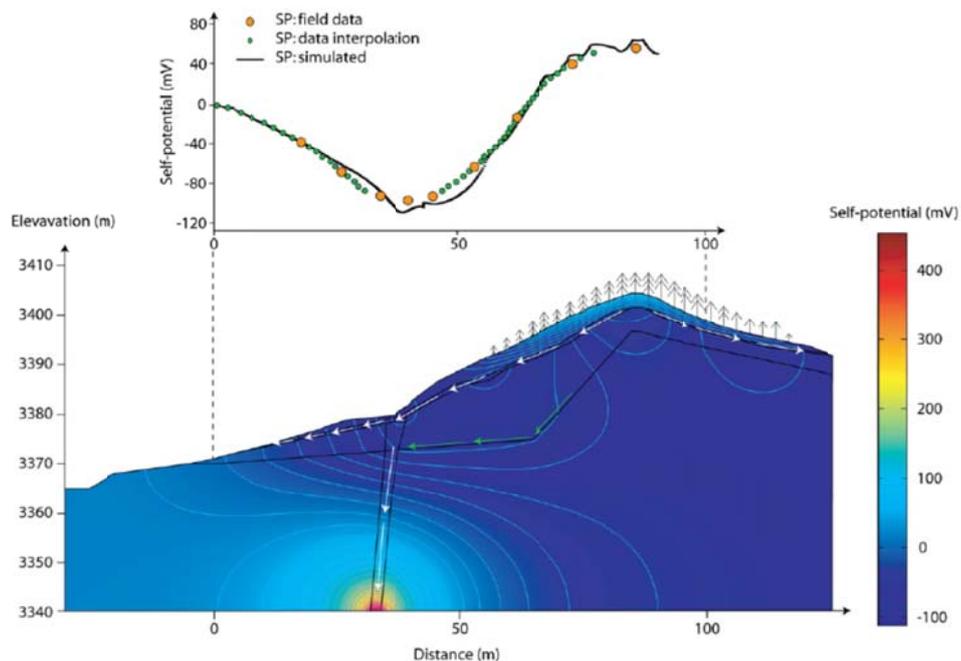


圖 B-61 Dana Lake 壩 section 2 自然電位法垂直剖面數值模擬結果

(5) 應用成果評析

對於過於複雜之現地狀況，透過一般反算程序並無法有效且正確獲得與現地狀況合理之調查結果，藉由對現地地質狀況或結構配置之掌握並對現場提出可能之不同情境，以其建立與現地相符之地層模型進行數值正算模擬，可更為有效地瞭解在複雜情況下的不同安全檢查機制或行為，本案例提供一良好之範例作為此種概念之實際現地應用，亦更顯示出各項不同現場調查工作對於安全檢查問題之探討皆有其必要性，透過不同調查成果的互相比對與驗證，可提升調查之合理性與可靠度。然而在此情況下，也

正由於現地狀況的高度複雜程度，正算地層模型建立時所需之參數將十分眾多，對於各參數的正確掌握亦將有助於對驗證結果的判斷，在測試中的合理假設是可被接受，但應多調整此類假設的參數，確定其靈敏度，以避免對參數假設錯誤而帶來人為誤差的產生。此壩在壩體中無監測儀器可提供其他壩體內部的資訊甚為可惜，建議可針對異常區域以及探測所得到之結論進行現場鑽探工作並設立監測儀器，將可更有助於對此壩之安全維護管理。

(6) 參考文獻

J.R. Moore, A. Boleve, J.W. Sanders, S.D. Glaser, Self-potential investigation of moraine dam seepage, Journal of Applied Geophysics, vol. 74, 277-286, 2011.

2. 美國、墨西哥-Amistad 壩

(1) 檢索資料

土石壩(部分混凝土壩)-壩基-滲漏-地電阻影像探測

(2) 壩體環境與安全檢查問題說明

Amistad 壩位於美國德州與墨西哥兩國邊界上，建造於 1963 年，其為土石壩結合混凝土壩的形式，壩高 77 公尺，壩長 9760 公尺，其中有 665 公尺為混凝土重力壩，蓄水量可達 6.98 立方公里。其土石壩的壩體標準斷面如圖 B-62 所示，中心有一相對不透水之心層(1 區)，上下游各有一相對透水層(3 區與 4 區)，但與現今壩體設計較為不同的是在壩體中並未設計有濾層，僅有一位於上游之過度區(2 區)。

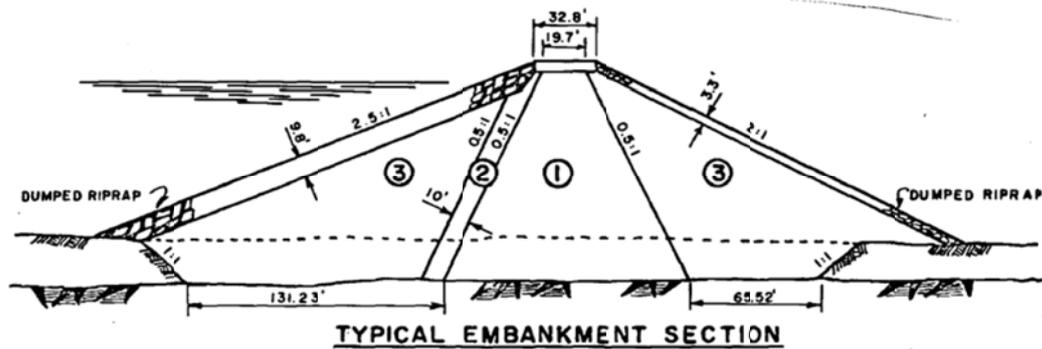


圖 B-62 Amistad 壩標準斷面

在壩體下方之地質主要為喬治鎮石灰岩 (Georgetown limestone)，其厚度約有 150 公尺，而近地表 10 至 15 公尺為含黏土質之石灰岩以及泥灰岩的過渡帶。此壩體所在之位置，其下方石灰岩具有溶洞的問題存在。

自 1968 年開始蓄水起，在壩體下游便有監測到滲流的問題，在這之間對滲流之觀察並未發現有細料被沖刷出來，直至 1993 年於 Carmina 處開始觀察到有細料的出現，隔年，Amistad 壩蓄水高度由正常之高程 340.5 公尺降至 328 公尺，在蓄水範圍內發現有數十個洩水孔的存在，在 1995 年開始對這些洩水孔位置進行灌漿作業以便確保蓄水之穩定與安全，但為對潛在地表下之洩水孔或溶洞進行調查，規劃有地球物理探測作業。

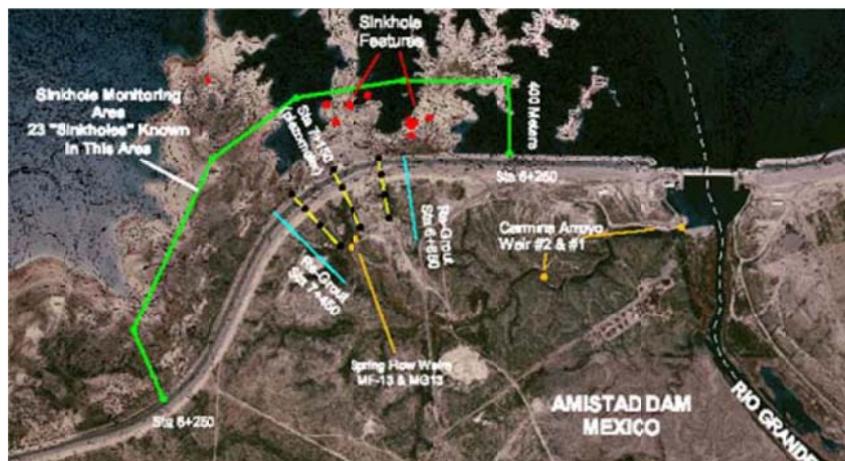


圖 B-63 Amistad 壩上游洩水孔位置面(墨西哥側)

(3) 地球物理探測技術規劃與現地應用問題

在對此溶洞之調查上，本案例選擇採用地電阻影像探測法，測線沿著壩體上游趾部佈設(施作期間壩體上游側趾部為乾燥的狀態)，電極棒間距為 5 公尺，單一測線施測長度 265 公尺，採用 dipole-dipole、Schlumberger 以及 Wenner 三種電極排列模式進行施測。

(4) 檢測成果說明

採用地電阻影像探測法之結果如圖 B-64 所示，在標示 400-670 段的結果中可發現，地電阻影像在近地表 10 公尺為低電阻，此低電阻應是前述在石灰岩層上方含黏土成分的過渡帶，而在地表下 10 公尺厚普遍為高電阻存在，而由 dipole-dipole 之探測結果可辨識出在 565 公尺以及 620 公尺處有向下延伸的低電阻區存在，是可能之溶洞位置。後續經由鑽探結果顯示，在 565 公尺下方為一溶洞上方的破碎帶，而於 620 公尺處為溶洞。而由此中之結果可發現，三種不同電極棒排列模式所得到之結果雖然在地電阻分布大趨勢上相符合，但由於各模式在垂直與水平解析能力的不同，而所獲得之地電阻影像細節會有所不同，採用 Wenner 法將不易探測得具有高度側向變化之狀態，而 dipole-dipole 法則有良好之側向解析度。

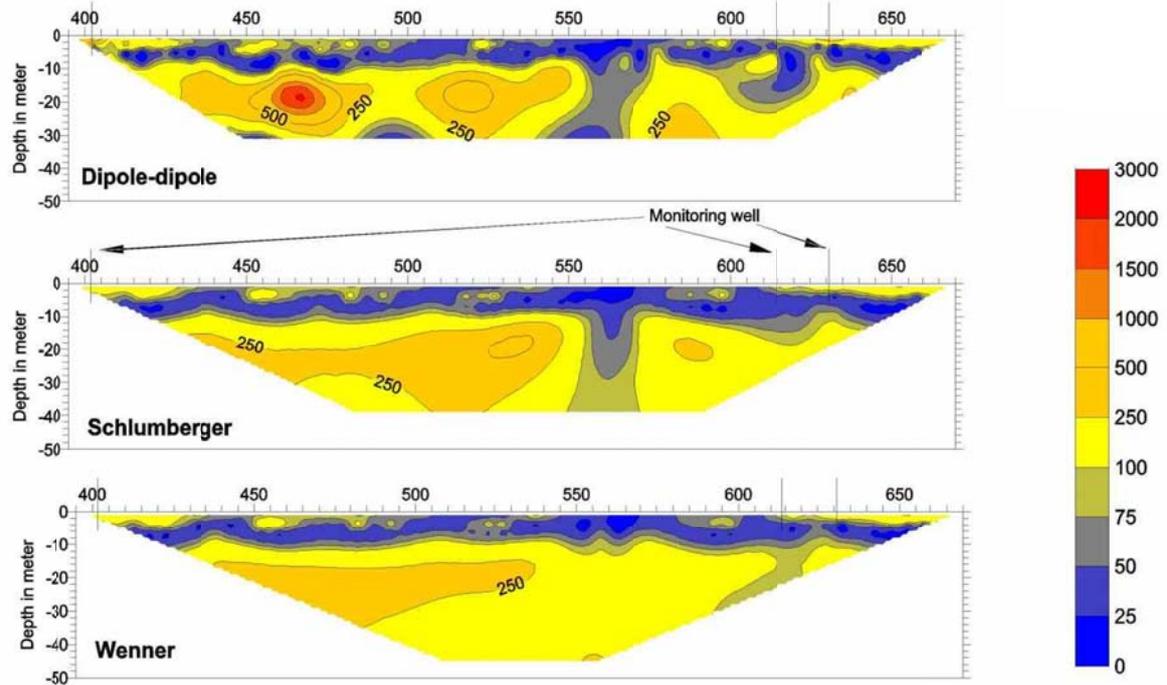


圖 B-64 Amistad 壩上游壩趾地電阻影像探測結果(400-670 公尺段)

(5) 應用成果評析

此案例提供採用地電阻影像法進行孔洞探測的良好示範，然而其更重要的是顯示出採用不同電極棒排列模式對探測結果之影響，於地電阻影像探測中應針對探測之問題考量其所需之水平以及垂直解析度而適當的選取量測模式，以便可獲得最佳化之成果。若以時間成本考量，地電阻法測線的佈設為最耗時之部分，相對而言進行多種施測模式之資料收錄所需時間成本較低，建議可同時施作，以便施測工作可有最佳成效。

(6) 參考文獻

Engemoen, W., Mead, R., Hernandez, L., Evaluating the risks of an internal erosion failure at Amistad dam, proceeding of 31st Annual USSD conference, San Diego, California, pp.527-543, 2011.

Lagmanson, M., Electrical Resistivity Imaging, http://www.epa.gov/tio/tsp/download/2005_fall/monday/3_lagmanson.pdf, 2005.

(二) 混凝土壩

1. 美國-Barker 壩

(1) 檢索資料

混凝土結構-壩體下游面-裂縫-彈性波層析成像法。

(2) 壩體環境與安全檢查問題說明

Barker 壩位於美國科羅拉多州，為一巨積混凝土重力壩，最初於 1909 年建成，壩體高度 53.3 m、長度 220 m，壩頂寬度 6.7m，壩底寬度 34.4m。為評估層析成像(tomography)法應用於分析巨積混凝土構造內部裂隙之可靠性，因 Barker 壩具備已知水平裂隙的位置，可與層析成像法之分析結果進行比對，因此選定該壩為現地實驗場址進行地球物理探測技術之檢驗。

(3) 地球物理探測技術規劃與現地應用問題

此試驗分別於壩頂 6m 的兩部分進行彈性波層析成像法，大壩斷面與試驗設置如圖 B-65 所示，在壩體下游面沿垂直線放置受波器，間距約 0.6m。為避免對混凝土壩面之破壞，使用凡士林直接將感測器與大壩連接，且每個感測器之導線皆以熱熔膠固定於壩上，而除壩面外，於壩頂亦設置兩個受波器，分別距離下游面 0.9m 及 1.5m 之處。採用重量為 3.6kg 的大錘作為震源，大錘頭部一端連接加速度計，以大錘敲擊長寬各 100mm、厚度 25mm 之金屬鈹產生震波，共敲擊三次，震源分別位於壩頂距離大壩下游面 1.2m、1.8m、2.4m 處。

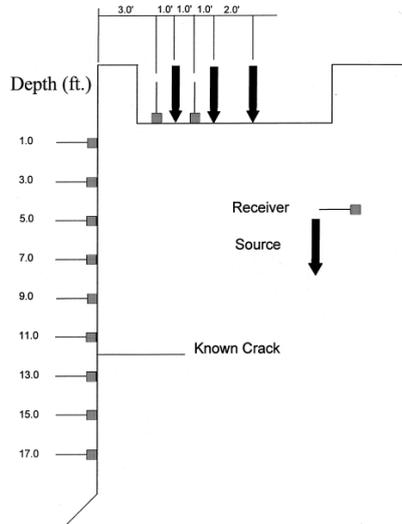


圖 B-65 Barker 壩斷面與試驗配置圖

(4) 檢測成果說明

現地試驗結果如圖 B-66 所示，大壩頂部 6m 內之混凝土波速介於 3-4 km/s 之間，波速較低(3km/s)處顯示可能為裂隙之所在，而圖中左側五條水平向虛線代表五處已知裂隙位置深度。由影像所推測裂縫位置與已知裂縫位置比較如表 B-4 所示，比對結果顯示，探測分析結果與實際裂隙位置大致吻合，顯示以層析成像評估壩體之裂隙位置具可靠性。

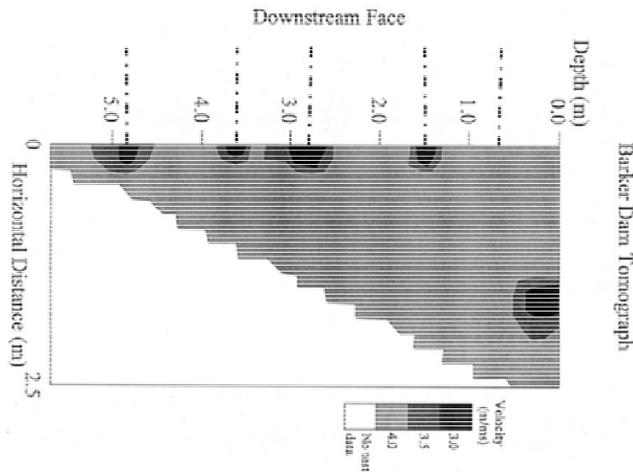


圖 B-66 Barker 壩 4-14 之層析成像(左側五條線代表已知的裂隙位置)

表 B-4 Barker 壩頂部 5m 層析成像分析結果與已知水平裂隙位置比較

Block 4-14 North		Block 4-24 North	
Known crack location	Tomographic estimate of crack location	Known crack location	Tomographic estimate of crack location
0.61 (2.0)	0.91 (3.0)	0.46 (1.5)	0.55 (1.8)
1.37 (4.5)	Not apparent	1.37 (4.5)	1.40 (4.6)
2.56 (8.4)	2.52 (8.3)	2.56 (8.4)	2.62 (8.6)
3.29 (10.8)	3.29 (10.8)	3.29 (10.8)	3.20 (10.5)
4.42 (14.5)	4.42 (14.5)	4.39 (14.4)	4.39 (14.4)

^aThe vertical distance from the top of the dam in meters (feet) are given.

(5) 應用成果評析

本案例主要顯示利用彈性波層析成像法進行混凝土壩體內部之裂隙的可行性，裂隙所在之位置將以較低壓縮波速的形式反應。由此應用成果可獲得一應用上之重點，由表 B-4 之比較結果可知，在越靠近壩頂處之裂隙其所得之深度位置誤差會較大，而深度增加後便較為正確，此一現象之主要原因在於，當震源與受波器之距離過近時，因其無較足夠的時間傳遞，在分析進行初達波挑選時產生的誤差將對反算結果影響較為明顯，因此在應用彈性波層析成像法時，應盡量使各受波器處之資料皆有足夠之距離之震源所提供之資料，以利其於反算時降低因初達波挑選所造成之些微誤差產生。此外，在這需強調，裂隙之存在可否被測得亦與受波器之間距以及產生的波的頻率有關，一般而言，最佳解析能力在於受波器間距的一半，而隨著距離受波器越遠，其解析能力將漸次變差，但整體而言，此法可反應出可能有潛在問題之位置。

(6) 參考文獻

William F. Kepler, Leonard J. Bond, and Dan M. Frangopol, *Improved assessment of mass concrete dams using acoustic travel time tomography. Part II-application*, Construction and Building Materials 14 (2000), p.147-156.

五、歐洲地區

(一) 土石壩

1. 希臘-Mornos 壩

(1) 檢索資料

土石壩-壩體-滲漏-彈性波層析成像法、地電阻影像探測法。

(2) 壩體環境與安全檢查問題說明

Mornos 壩是一座長 816 公尺，高 139 公尺的黏土心層土石壩，主要用途是作為雅典城的民生供水，其於 1972 至 1976 年間建造，1978 年進行初次蓄水，壩頂高程 446 公尺，而蓄水最高高度為 435 公尺，蓄水量達 780,000,000 立方公尺。如圖 B-67 所示，其黏土心層直接座落在一不透水之沉積岩上，而心層之頂部一直到壩頂之位置，此外在此心層壩基下方進行有隔幕灌漿的工程，以降低地層之滲水性。

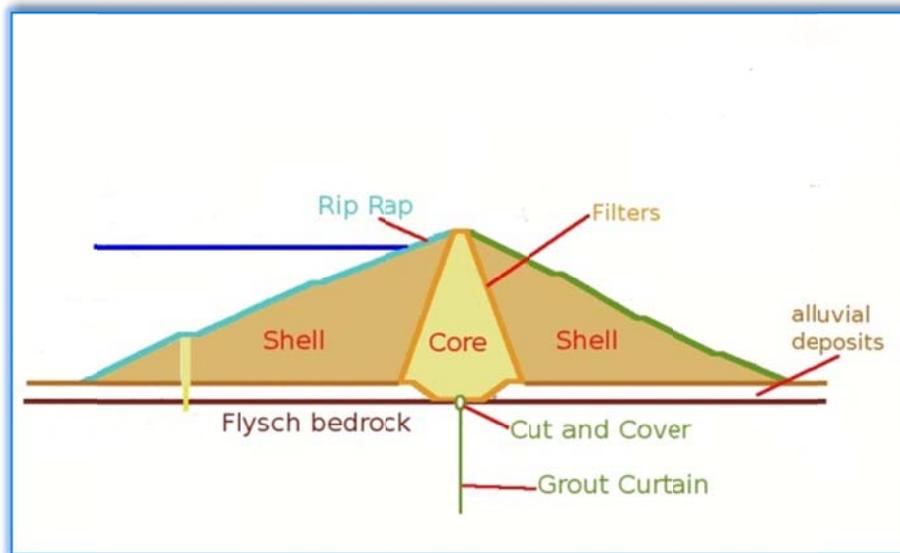


圖 B-67 Mornos 壩標準斷面圖

自此壩蓄水初期，在右壩座處便有滲漏之現象產生，於 1986 年採用放射性物質之示蹤劑調查中，由試劑自庫水進入 cut and cover 處之過短時間顯示庫水有其他非預計滲漏路徑產生，而於 1990 年之調查報告亦指出，根據水壓計之監測值顯示在壩基中的部分隔幕灌漿區域並未如期發揮其阻水作用。為確認其滲漏路徑因而進行此地球物理探測工作。

(3) 地球物理探測技術規劃與現地應用問題

此次地球物理探測工作共規劃有三組彈性波層析成像測線以及三組地電阻影像探測測線，如圖 B-68 所示，為使探測所得之結果可盡量涵蓋大部分的區域，彈性波層析成像法採用跨孔式方式施作，每一組皆在壩頂以及相對應之下方廊道(如圖 B-69)進行施作，分別是 S2S2'測線、S3S3'測線以及 S4S4'測線；而地電阻探測法視其施作處之情況進行跨孔式施作，如圖 B-69 所示，分別有測線 E1、E2 以一般方式施作，而另有 E4E4'採以跨孔式方式施作。

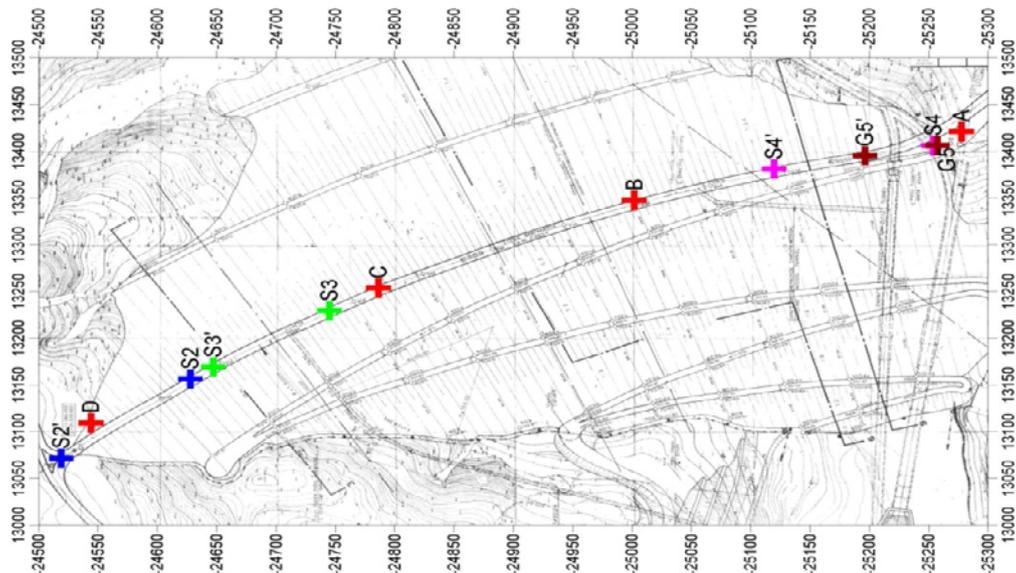


圖 B-68 Mornos 壩平面圖及彈性波層析成像法測線規劃示意圖

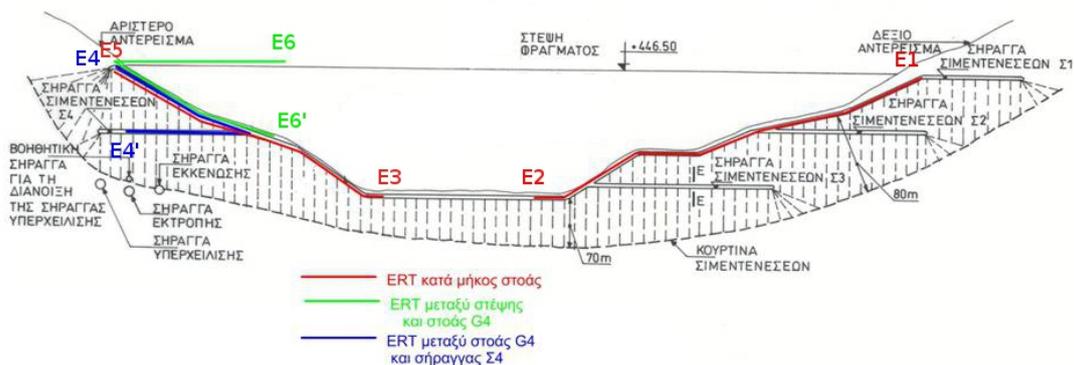


圖 B-69 Mornos 壩橫剖面圖及地電阻影像探測測線規劃示意圖

(4) 檢測成果說明

在右壩座之探測結果如圖 B-70 所示，其分別包含彈性波層析成像法之 S2S2' 以及 S3S3' 測線的壓縮波速剖面，另有地電阻影像探測法之 E1 與 E2 電阻率剖面。由壓縮波速剖面可見，整體探測結果良好，築壩材料與原始岩盤介面明顯且與設計圖說符合，而在岩盤中之波速整體達到 3500m/s，但在右壩座 S2S2' 剖面之右下側處以及 S3S3' 剖面左下側處有明顯的低速區域存在，此為可能之滲漏位置；而將其與 E1 與 E2 之電阻率剖面比對，在壓縮波速剖面顯示異常的位置處皆有低電阻的反應，顯示含水量較高，兩

者比對之結果可互為驗證，增加可能滲漏位置的可靠度。

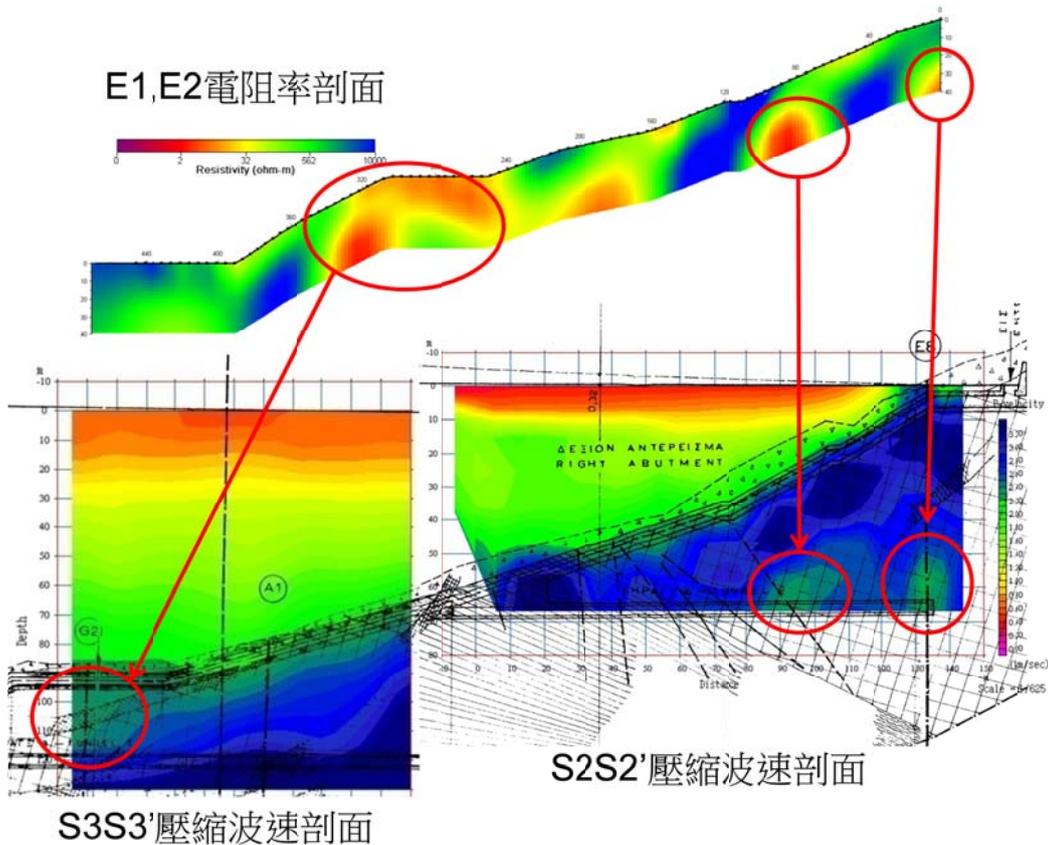


圖 B-70 Mornos 壩右壩座地球物理探測結果

在左壩座之地球物理探測結果如圖 B-71 所示，其中包括有彈性波層析成像法之 S4S4' 壓縮波速剖面以及 E4E4' 之電阻率剖面。同樣，此處之探測結果良好，築壩材料與原始岩盤面明顯，且與圖說符合，在岩盤處之壓縮波速約為 3500m/s，但在測線中間偏左有兩處低波速的出現，推測可能是為滲漏路徑所在，而比對 E4E4' 之電阻率剖面結果，其在相同的位置亦有低電阻之反應，兩者互為比對驗證，增加調查所推測滲漏位置之可靠度。

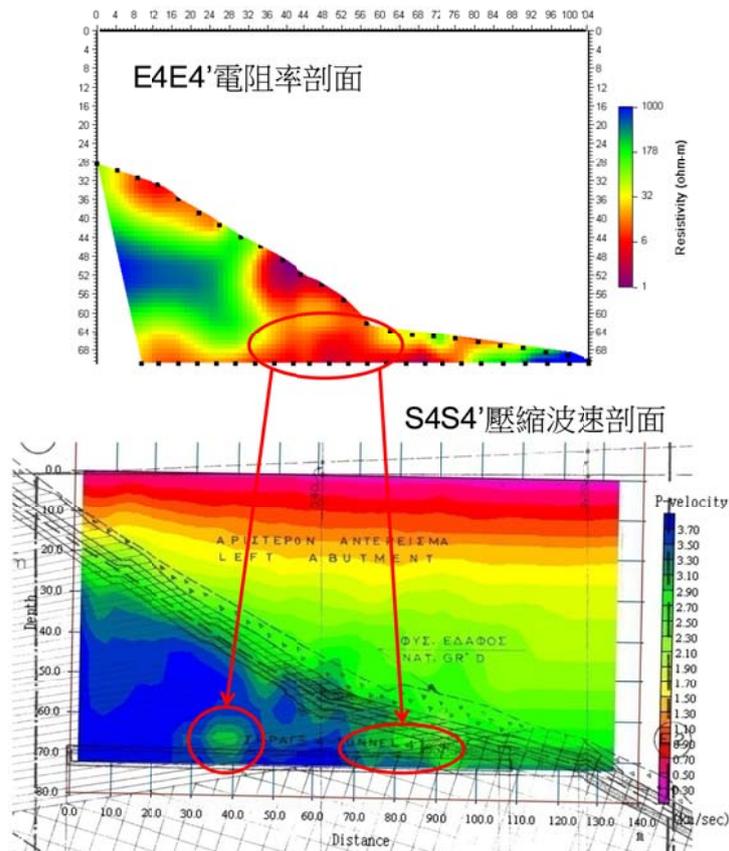


圖 B-71 Mornos 壩左壩座地球物理探測結果

(5) 應用成果評析

本案例以地電阻影像探測法以及彈性波層析成像法互相驗證獲得良好之調查結果，為一聯合應用地球物理探測技術之良好教材，由探測結果與圖說之初步比對可對探測結果有一定的信心程度，而兩者比較結果互可驗證，使得探測結果之可靠度增加，然而，較為不足者是在此案例中僅有地球物理探測方法作為結果之驗證比對，若可有大壩之監測資料或是其他水文或鑽探調查資料，將可使其結果更具說服力，而可作為後續工程之重要資訊。

在此案例中應用有跨孔式之彈性波層析成像法，且其兩側距離甚大，3D 效應之影響對於結果之正確性有極大之決定性，於案例中雖有提及其針對初達波走時曲線有進行 3D 效應無影響之確

認，但未說明其方法為何，無法提供做為參考應用。

(6) 參考文獻

Karastathis and Karmis, Investigation of seepage and settlement problems at the Mornos earth dam, Greece, by geophysical methods, Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, 25th Annual Meeting SAGEEP 2012, Tucson, Arizona, USA, 2012.

2. 西班牙-CHB 壩

(1) 檢索資料

土石壩-壩體-滲流-自然電位法、地電阻影像探測法。

(2) 壩體環境與安全檢查問題說明

CBH 壩位於西班牙中部科爾多瓦附近，是一個小水庫，此土石壩座落在一個小山谷，心層為黏土(標準斷面如圖 B-72 所示)，壩高 19 公尺，壩頂長度 284 公尺，庫容體積恆定，約 3 H 立方公尺，其排出的水量由另一座水壩補充。大壩最初建於 1979 年，但 10 年後發生災難性沉陷，因此，壩體部分重建於 1992 年，在重建過程中，增建了 175 公尺長、1 公尺厚的水平排水濾層在壩體中間。

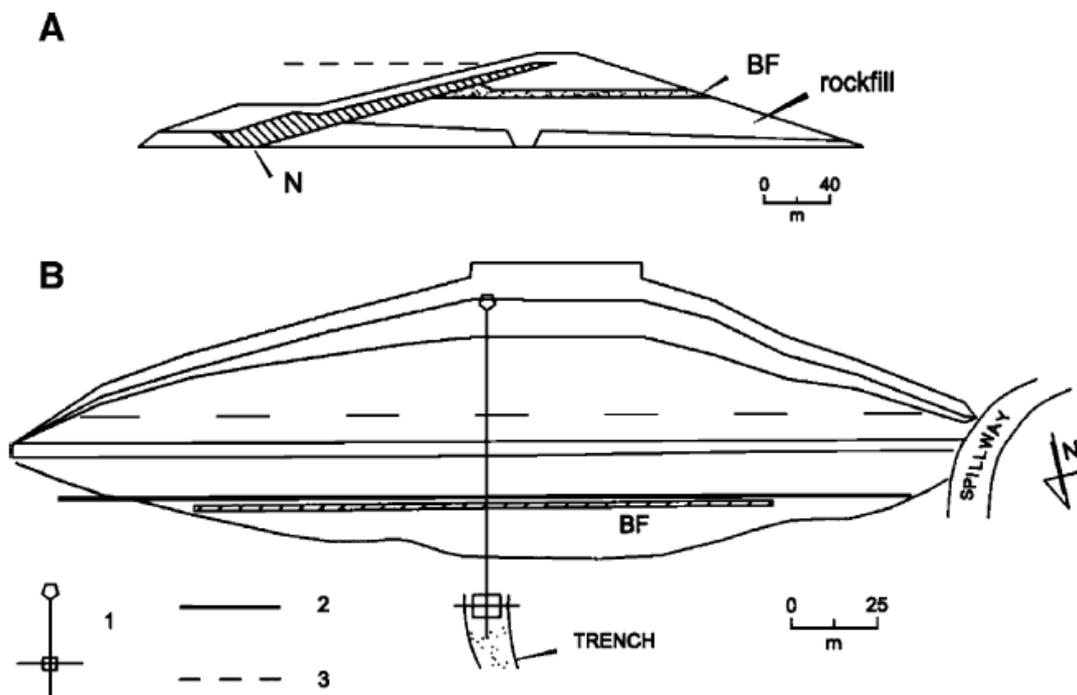


圖 B-72 CBH 壩斷面圖(A)與平面圖(B)：BF—排水濾層；N—黏土心層；1—出口管道；2—SP 與地電阻佈線；3—水位面(Rozycki Et. Al, 2006)

在壩體下游面，儘管是炎熱且乾燥的期間，於濾層周圍與其下方的位置觀察到一些永久的濕潤帶，表示這附近可能有不規則的滲流通過濾層。正常來說水流應當均勻通過濾層，但若出現”優勢水道”則產生滲流，進而破壞壩體，這種情形早期不易發現，但行為一旦開始則很快產生管湧或脹裂現象，為了防止此狀況，因此規劃進行地球物理探測技術之調查。

(3) 地球物理探測技術規劃與現地應用問題

本案例採用地電阻影像探測法以及自然電位法進行滲流調查，其試驗規劃圖 B-72B 所示，地電阻影像探測測線垂直壩軸佈設，測線相對於濾層長度前後各超過 40 公尺，並距離濾層上部深度約 4 公尺上方處，電極排列方式為 dipole-dipole (a_1 - na_1 - a_1)，其中距離採用 $a_1=5\text{m}$ ； $a_2=10\text{m}$ ； $a_3=15\text{m}$ ； $n_1=1, 2, 3, 4, 5, 6$ ； $n_2=$

3, 4, 5; $n_3=4, 5$ 進行施測，數據以 RES2DINV 軟體進行反算；而自然電位法測線與地電阻影像探測測線相同，其量測點間距為 5 公尺，電壓基準點設在距離壩體 150 公尺外，而為了估計量測之重複性，每個量測點皆量測 2 次並進行標準偏差之計算，根據現場資料結果顯示，此次施測之標準偏差為 13 mV。此外，為考量地體電流效應之影響，在壩體下游面佈設有監測偶極，偶極之排列與測線方向相同，根據現場資料顯示，於施作過程中，監測到之變化量在 $\pm 3\text{mV}$ ，此外，為確保電極棒與地面導電良好，在電極棒周邊之土壤澆水使其皆度電阻低於 $3\text{k}\Omega\text{m}^{-1}$ 。

(4) 檢測成果說明

本場址利用簡化之自然電位理論進行 SP 紀錄值之比對比較，其自然電位剖面如圖 B-73 所示，虛線為濾層所在位置，整體而言，現場資料與理論模型之結果呈現 U 型曲線之趨勢，然而在濾層的區段可以明顯發現不吻合點，若進一步將現地資料與模型資料相減，可以得到如圖 B-74 的殘餘自然電位剖面，而此殘餘表示在濾層中有些異常狀態存在。因此假設此濾層存在一些優勢水道，並以水平圓柱體理論進行模擬，將濾層中加入 10 個圓柱體(C1~C10)使其與現地資料進行反算，並以互相關函數(cross correlation)修正，找出異常值正確的位置，結果如表 B-5 所示。

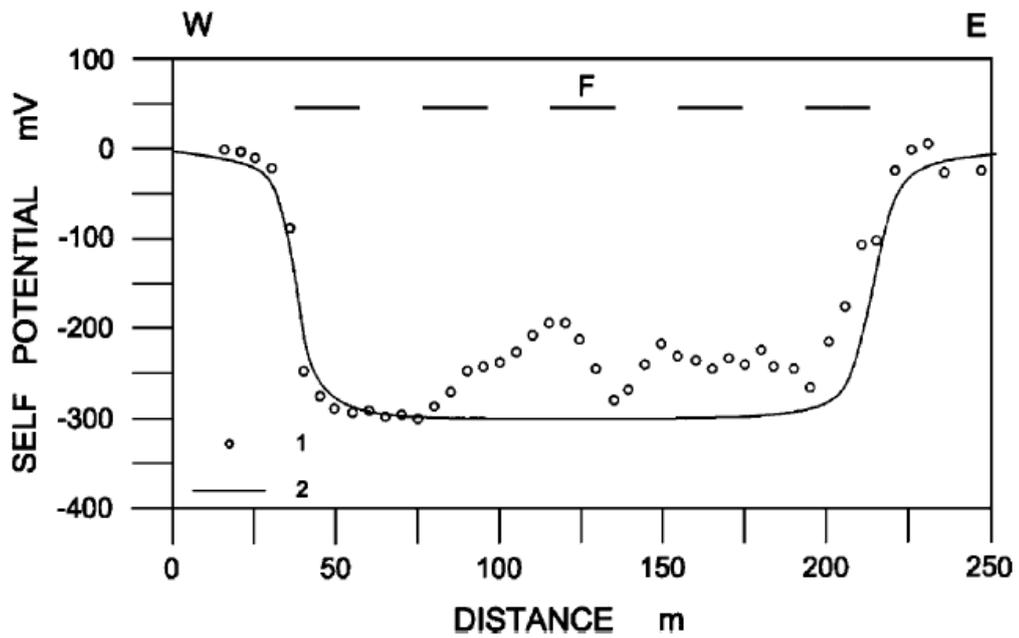


圖 B-73 CBH 壩之自然電位剖面：1—量測資料；2—擬合模型；F—排水濾層位置

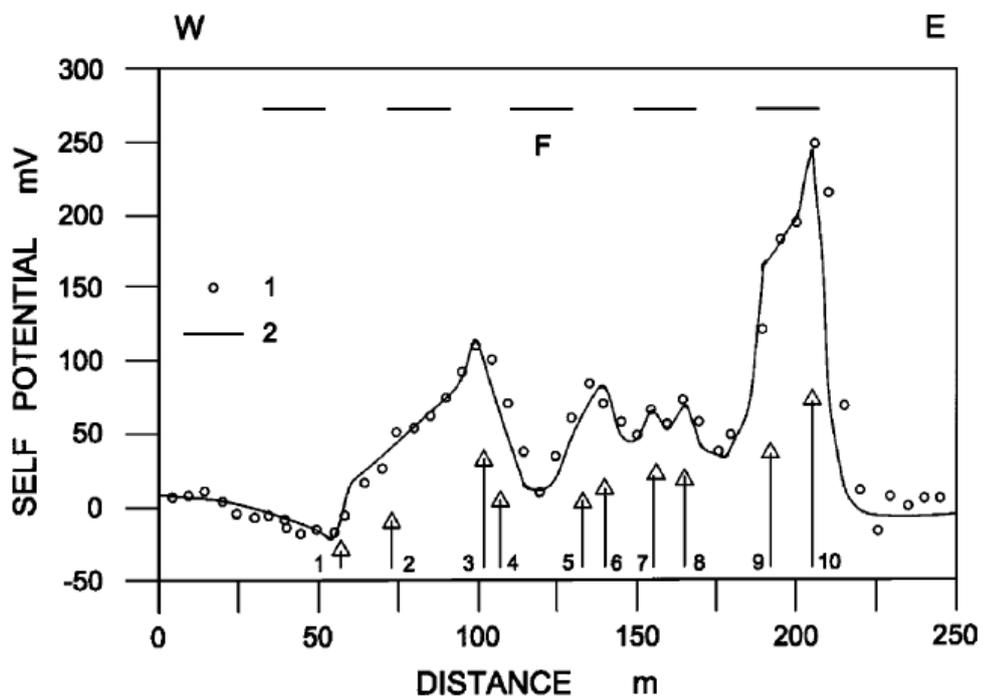


圖 B-74 CBH 壩之殘餘自然電位剖面：1—現地資料；2—擬合模型；F—排水濾層位置；箭頭位置為圓柱體模型的中心點

表 B-5 水平圓柱體模型之參數

Body	Apparent polarizability (mV)	Centre (m)	Depth (m)	Polarization angle grades
C1	220	57	4.5	20
C2	150	73	4.0	-20
C3	420	102	4.0	-160
C4	430	107	4.5	-95
C5	250	133	3.5	-90
C6	200	141	3.0	-90
C7	200	155	4.0	-90
C8	150	165	3.0	-90
C9	500	192	3.0	-85
C10	1300	205	5.0	-115

而地電阻影像探測法結果如圖 B-75 所示，圖中顯示低電阻區域為濾層所在位置，而若將超低電阻範圍($<70 \Omega \text{ m}^{-1}$) 標示出來，將其與表 B-5 之反算參數結果相比對可發現兩個探測所得異常區域互相吻合，而這幾處位置可能是發生異常滲流而可能造成壩體損害的位置。

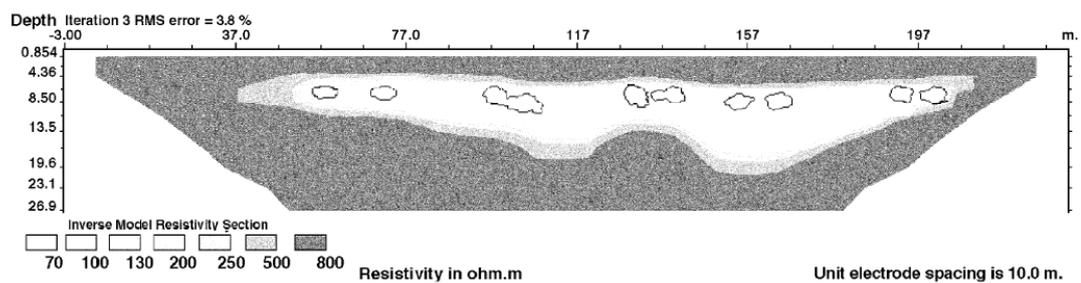


Fig. 7. Geoelectrical section over the drainage filter. The interpreted minimum resistivity values ($<70 \Omega \text{ m}$) are enhanced with a thick line.

圖 B-75 通過排水濾層之地電阻率影像圖，極小電阻率值($<70 \Omega \text{ m}$)以粗線強調

(5) 應用成果評析

此應用案例利用自然電位法量測之結果與其本案例作者所提之簡化模型進行比對，提供對自然電位法判釋的另一種途徑，可作為分析技術之參考使用，相較過去僅能獲得滲流方向之影像直接判釋法，透過此種分析方法可進一步獲得異常區域深度之訊息，然而，相較地電阻影像探測法而言，此種分析方法還是過於複雜

且主觀，建議還是應當採用地電阻影像法搭配自然電位法，以地電阻影像剖面進行深度位置之判釋，以自然電位法進行滲流方向的判釋；此外，其測線垂直壩軸佈設，根據其文中說明，其測線是佈設在濾層上方 4 公尺，但並未說明其是如何達成使測線可位於濾層上方 4 公尺而不受壩體地形的影響，於相關應用時應當注意，若有地形變化存在時，應當將地形之影響加以考慮。

(6) 參考文獻

A. Rozycki, J.M. Ruiz Fonticiella , A. Cuadra, 2006, “Detection and evaluation of horizontal fractures in earth dams using the self-potential method”, Engineering Geology 82 ,145– 153

3. 西班牙-El Tejo 壩

(1) 檢索資料

土石壩-壩體-滲漏-自然電位法。

(2) 壩體環境與安全檢查問題說明

El Tejo 壩為位於靠近馬德里一座土壩，並有 0.25 公尺厚的混凝土護層，壩高 40 公尺，壩頂長 340 公尺，標準斷面圖與平面圖如圖 B-76 所示，為均質壩，無黏土心層亦無濾層。此壩建於 1976 年，但自 1985 年以來，發現有一個穩定的水流洩漏，約 43 l s^{-1} ，推測壩體內部可能有滲流路徑存在，因此進行地球物理探測技術之調查。

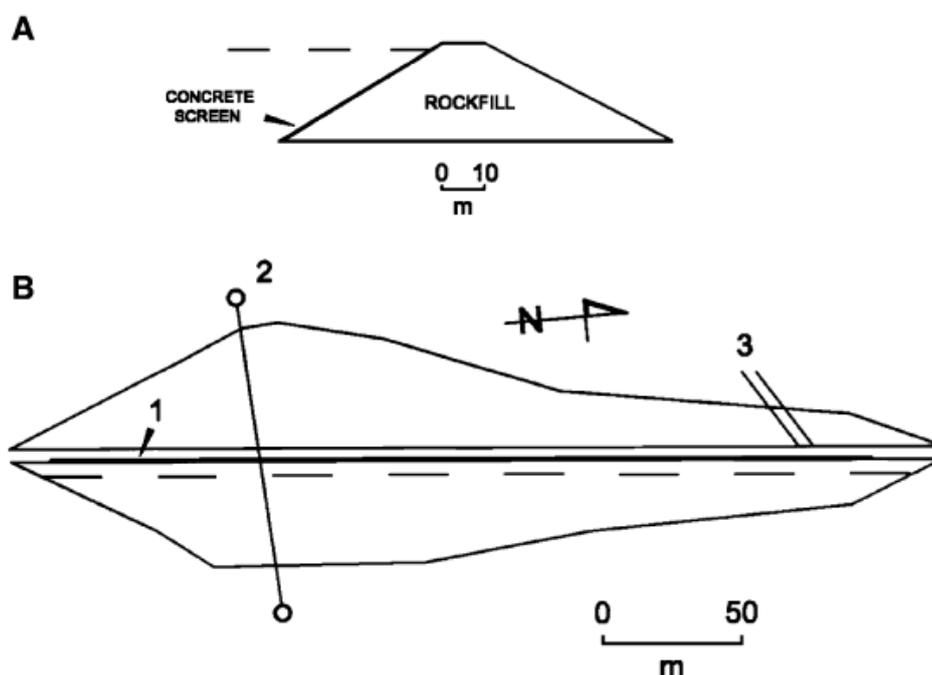


圖 B-76 EI Tejo 壩之斷面圖(A)與平面圖(B)：1—SP 剖面；2—出口管道；3—溢洪道

(3) 地球物理探測技術規劃與現地應用問題

本案例於 EI Tejo 壩之滲流路徑調查透過自然電位法進行施測，測線沿著壩頂軸向佈置(如圖 B-76B 所示)，量測點間距為 5 公尺，測線長度 300 公尺。

(4) 檢測成果說明

EI Tejo 壩之自然電位法量測結果如圖 B-77 所示，其擬合模型之 r.m.s 誤差為 2.1%，根據模型反算之結果，估計其於深度 13 公尺處，沿著壩軸存在有長度 176 公尺的滲水路徑。此一探測判釋結果 2003 年時水位下降後，發現上游混凝土護層在同一深度發現有長度為 173 公尺之裂縫而得到驗證。

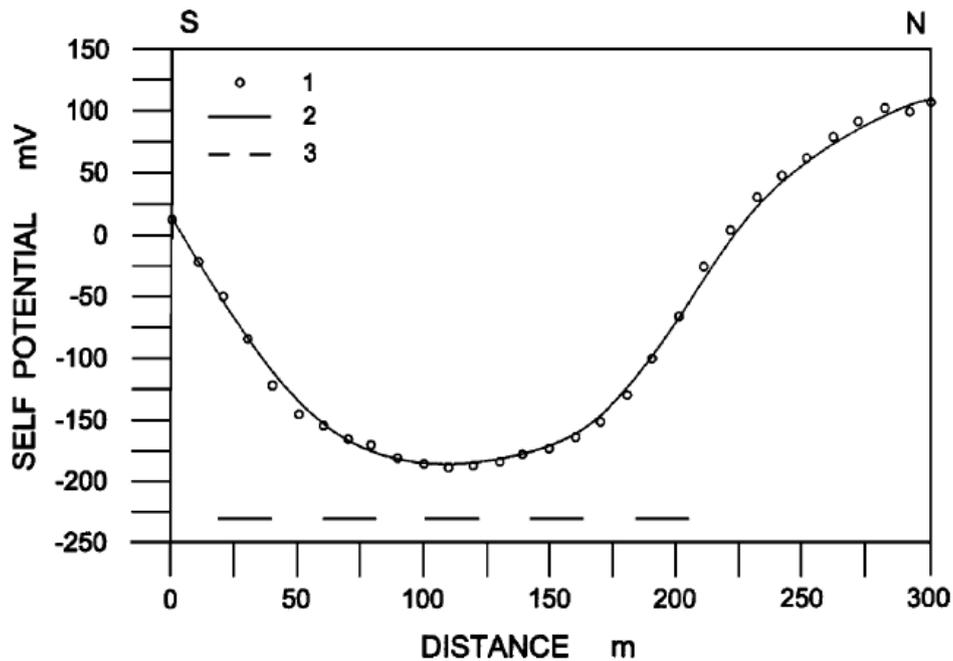


圖 B-77 EI Tejo 壩之自然電位法剖面圖：1—量測資料；2—擬合模型；虛線為分析模型判斷滲流通道之位置

(5) 應用成果評析

此案例於自然電位法應用於滲流調查上與一般常用判釋其滲流路徑之方法不同，本案例之作者採用其所提出之簡化自然電位理論對現場量測資料進行反算分析，而加以獲得空間上之資訊，此種分析方法可做為對自然電位法資料分析之另一種判釋技術，然而由於其有簡化之過程，對於組成較複雜以及有明顯地形影響處之資料較不適用，若欲加以採用，應當確實理解其分析程序並瞭解其假設條件，以免有錯誤解讀之問題發生；此外，其結果的驗證僅是在上游壩面同高程處之混凝土版發現有裂縫，上游壩面裂縫與壩頂下方土壤間之狀態是否一致頗有疑慮，應當有其他探測與調查資料互相比對會較妥當。就此類大壩安全檢查問題，建議還是應當採用地電阻影像法搭配自然電位法，以地電阻影像剖面進行深度位置之判釋，以自然電位法進行滲流方向的判釋較理

想。

(6) 參考文獻

A. Rozycki, J.M. Ruiz Fonticiella , A. Cuadra, “Detection and evaluation of horizontal fractures in earth dams using the self-potential method”, Engineering Geology 82 ,145– 153, 2006.

4. 瑞典-Hällby 壩

(1) 檢索資料

土石壩-壩體-滲漏-地電阻影像探測法監測。

(2) 壩體環境與安全檢查問題說明

Hällby 為瑞典第一個安裝永久監控電阻率測量系統的堤壩，並從 1996 年年底每日測量，其結構可分為左、右兩部份，中間設置電站和溢洪道，如圖 B-78，左壩長 120 公尺，右壩長 200 公尺長，壩高 30 公尺。壩體分三部分(如圖 B-79 所示)，中間為一垂直的冰積土心層，滲透性低；兩旁緊鄰砂土濾層；外圍則是粗粒堆石區。其水位變化小於 0.8 公尺（海拔+291.2 至 +292.0m）。

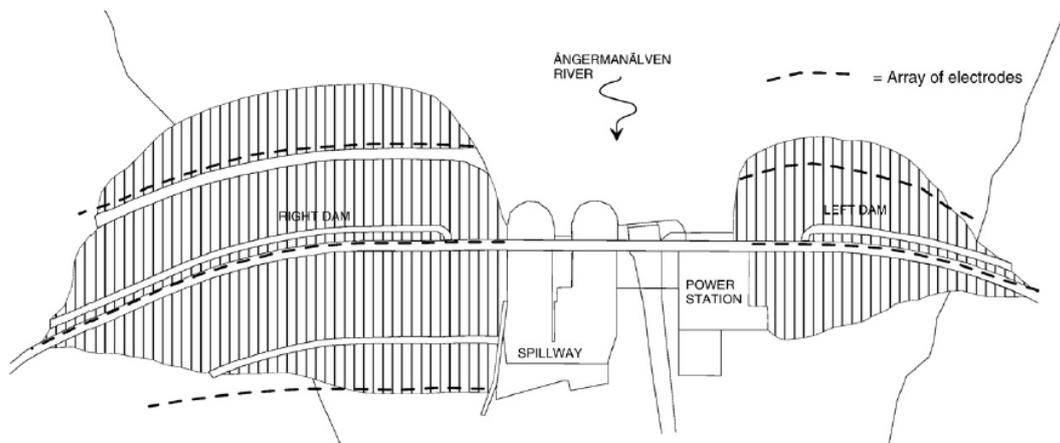


圖 B-78 Hällby 壩平面圖：虛線為電極排列位置

Hällby 壩於 1985 年在左壩靠近進水口結構發現一個坑洞，雖以灌漿修復，但 Nilsson et al. (1999) 指出濾層設計不當可能與堤壩坑洞發展相關，心層材料透過滲流被運送至下游側濾層，屬於內部侵蝕。當侵蝕增加，則會向上游側發展，其後於上游的濾層的材料掏空，可能會導致壩體頂部之內部結構崩潰。雖然通常此為一個緩慢的發展過程，甚至某些情況下會自行修復，但它依然使得壩體安全受到威脅，因此最重要的是儘早發現這樣的進展過程。內部侵蝕是堤壩失敗的重要原因之一，相對於使用傳統的方法檢測內部侵蝕，利用地球物理探測技術，以地電阻率監測可能有機會在早期階段檢測內部侵蝕的發展。

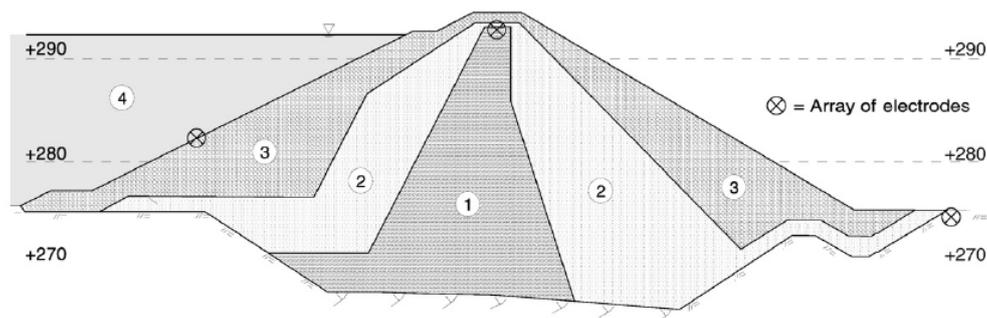


Fig. 2. Cross-section of Hällby dam. 1 Core, 2 filter, 3 support rockfill (upstream and downstream), 4 reservoir water. Principal location of electrodes marked out.

圖 B-79 Hällby 壩斷面圖：①—心層；②—濾層；③—堆石區；④—庫區水；⊗表示電極排列位置

(3) 地球物理探測技術規劃與現地應用問題

Hällby 壩之電阻率監測系統具自動監測及防雷功能，並以電腦控制數據採集，含有遠端控制及數據傳輸之解調器，總共五條測線，其纜線分別埋於上游壩面底部(左壩、右壩)，壩頂(左壩、右壩)及下游壩趾(右壩)，可參考圖 B-78 及圖 B-79 的電極排列位置，共有 102 電極安裝在此壩中，其中 43 個在壩頂和 21 個在下游壩趾，這些屬於陸地上的電極採用不銹鋼板為材料，其餘的 38

個電極分別安裝在水庫壩體上游面，使用不銹鋼環電極，各電極之間的距離是 7 公尺。

其監測系統的表現良好，自 1996 年開始只有三個較長的中斷，分別於 2000 年和 2002 年的冬天及 2004 年的夏天，其中只有一個中斷情況是由於電阻率監測設備中的一個組件故障所造成。施測方法上，經資料品質比較以 Wenner-Schlumberger 方法進行量測，然而其並不完全滿足所有測線，特別是右壩頂的資料，因此處於電極與心層間存在熱絕緣層，造成高電極接觸電阻及高雜訊，而其他兩個於陸地上的佈線(左壩頂及右下游壩趾)同樣也受高接觸電阻影響，只是雜訊沒這麼大。基於這個原因，有些有問題的資料品質必須經由消除尖峰及低通濾波方法來預處理，再進行建模反算。濾波參數以能消除尖峰值且不影響自然變異為主，低通濾波法採用 IIR (infinite impulse response)。

數據集以 Res2dinv version 3.54r for Win XP 軟體進行反算，2D 電阻率影像反算以 Loke et al. (2003)提出之 L_1 -norm 優化法，除了能將雜亂數據區隔開，並容易產生區塊模型，以清晰的界線分隔區域。另一方面，自動監測資料將利用時間序列反算方法 (Time-lapse inversion)，將電阻率隨時間變化以百分比方式呈現，不但能記錄空間變化，也能記錄電阻率影像剖面的時間變化。以時間的前後變化作為參考值。

(4) 檢測成果說明

在監測地電阻率的同時，溫度也是監測事項之一，由圖 B-80 可發現，庫區內的水溫隨季節變化，然而其電阻率亦然，且擁有相同趨勢。最後推斷出不論是庫區內水或是壩體內部水，其季節

性的溫度變化造成了季節性的電阻率變化。

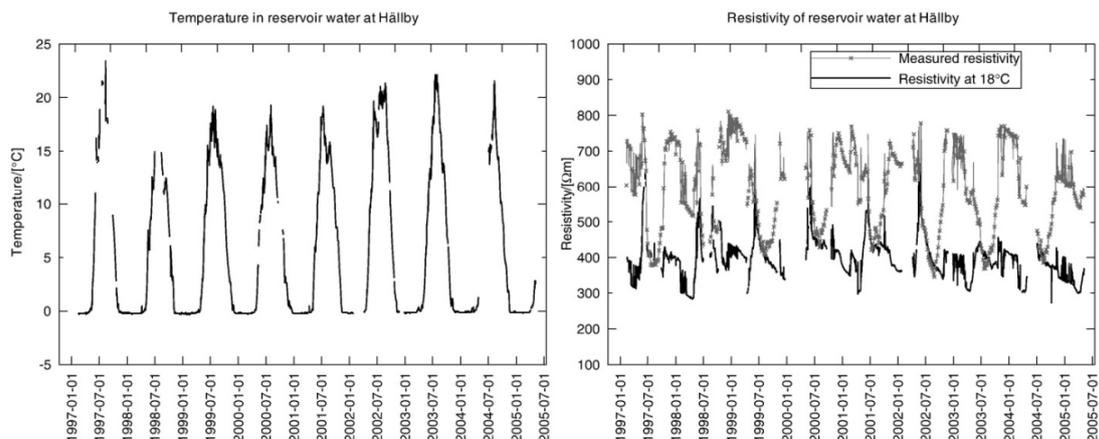


圖 B-80 庫區水的溫度變化(左);量測電阻率與其於 18°C 正規化電阻率(右)

另一方面，對於陸地上佈線資料品質與水面下佈線資料品質的比較可以參考圖 B-81 與圖 B-82。圖 B-81 以陸地上不同位置資料來舉例，左圖為資料品質良好，右圖則資料品質皆不佳，很多雜訊，因此須消除尖峰值及進行濾波處理。相較之下，圖 B-82 的佈線資料於水面下，資料品質好很多，運用相同的濾波方式，一樣也有很好的結果。

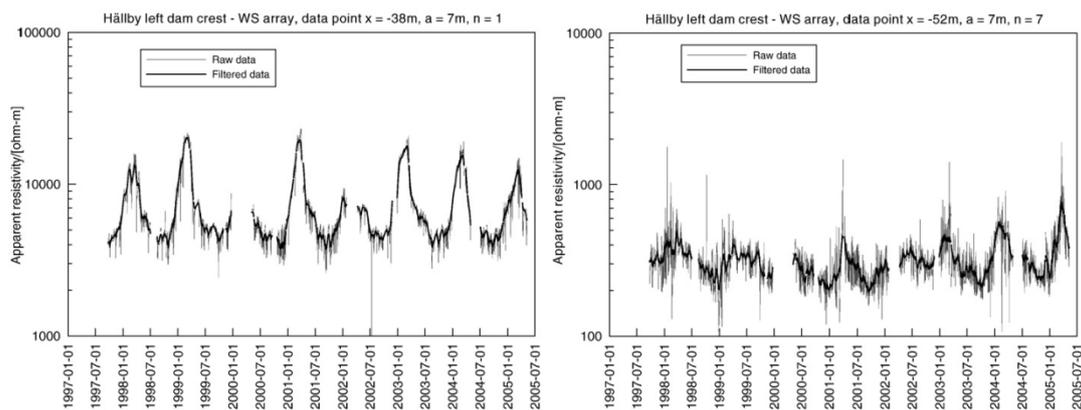


圖 B-81 Hällby 左壩頂之視電阻率的原始資料及濾波資料

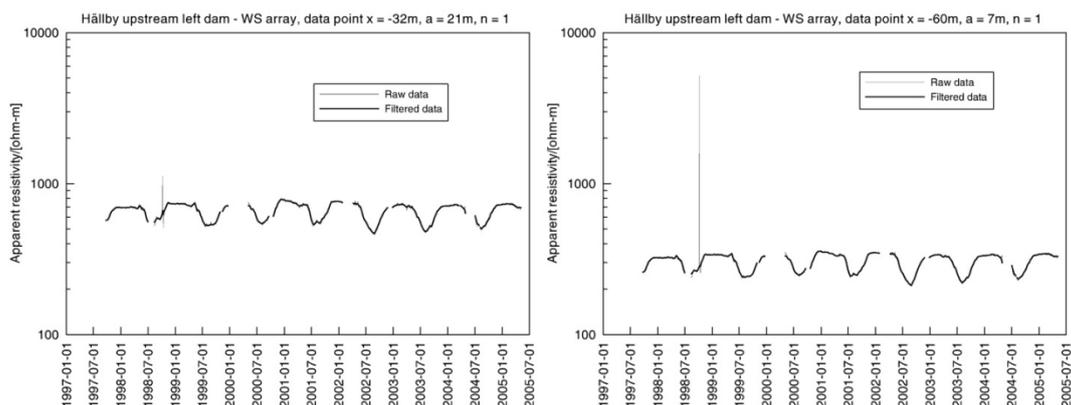


圖 B-82 Hällby 左壩上游面視電阻率的原始資料及濾波資料

而對於長期監測的 2D 地電阻率影像反算表示方式有兩種，分別為以中值表示以及相對變異的分布來表示，以圖 B-83 為例，壩頂上的電極埋在 1 公尺深處，每 7 天作為長期監測時間間隔。中值反算模型斷面表現出監測時間內的平均狀態，但除此之外並無法得到其他資訊。而相對變異雖是一個概略的統計參數，但其反算模型斷面卻較能解釋狀況、並給予壩體概括性的季節變化情形。從圖 B-83 中可以發現接近壩頂地表的相對變異較大，推測是冬天結冰產生高電阻率。然而底層也存在高變異性，可以解釋為位於低滲透性的心層出現季節性的高電阻率變異，則有很大出現滲漏的可能性，因此對於壩體較深的高電阻率變化確實是值得關切注意的警告。

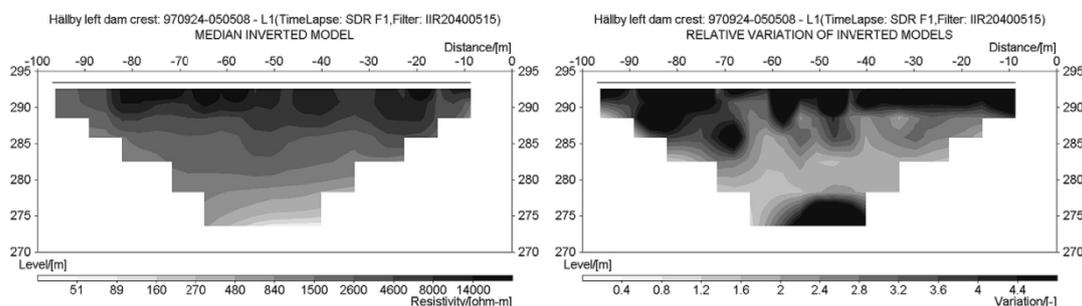


圖 B-83 Hällby 左壩頂於 1997-09-24 至 2005-05-08 的中值反算電阻率分布(左)；相對變異反算電阻率分布(右)

此時若要詳細觀察此位置隨時間變化的資料，可呈現如圖 B-84 的形式，根據圖 B-83 的高變異區，選擇了里程-61.25m 及 -43.75m 斷面來舉例說明，並以里程-61.25m 斷面作為健康壩體的參考值。其可以從圖中看出電阻率隨季節溫度變化情形，且淺層變化較深層大，然而里程-43.75m 斷面則可明顯發現深層的電阻率變化大，且逐年上升，因此推斷電阻率增大是由於心層土壤材料的變化所造成，而變異的增加則是滲流不斷擴大造成內部侵蝕。

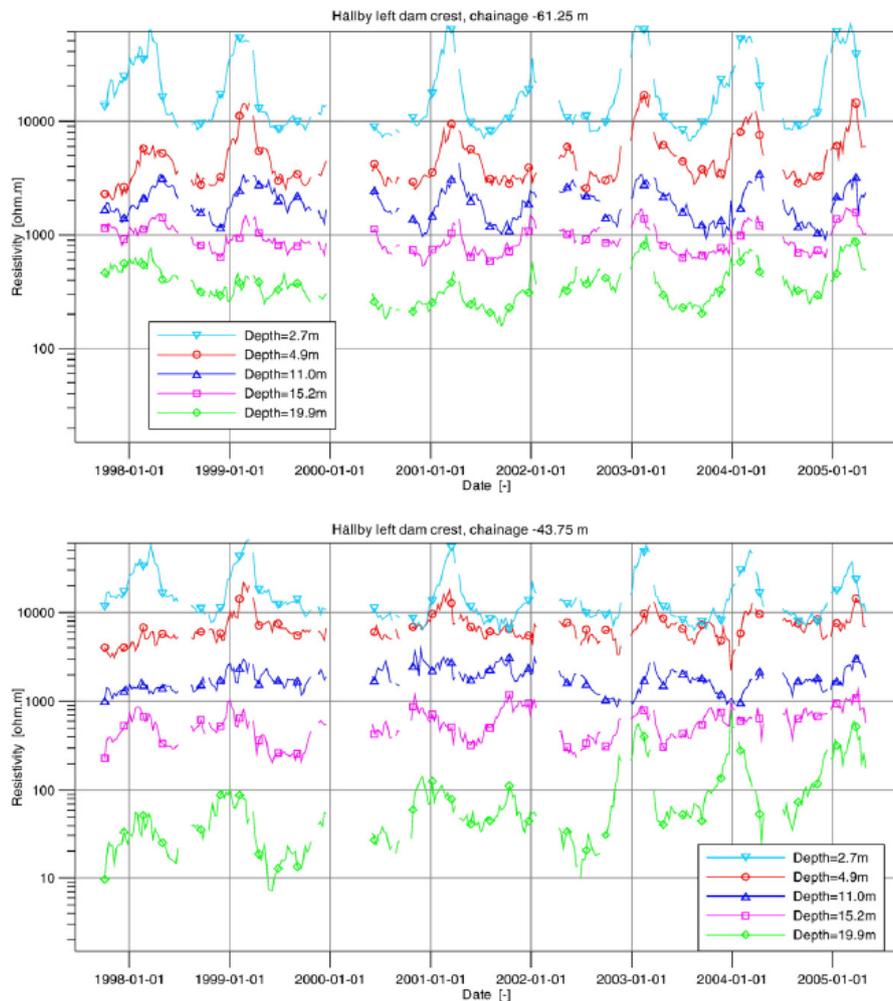


圖 B-84 Hällby 左壩頂 5 個不同深度時間序列反算資料

此外，為了證實此區域內部侵蝕的情形，特別從 1999 年開始

以 Pole-dipole 排列方式補充資料，雖然其結果並無 Wenner-Schlumberger 排列的成效好，但從圖 B-85 即可發現深層電阻率的整體趨勢皆是逐年提高，甚至高於淺層，證實了此地區的問題。

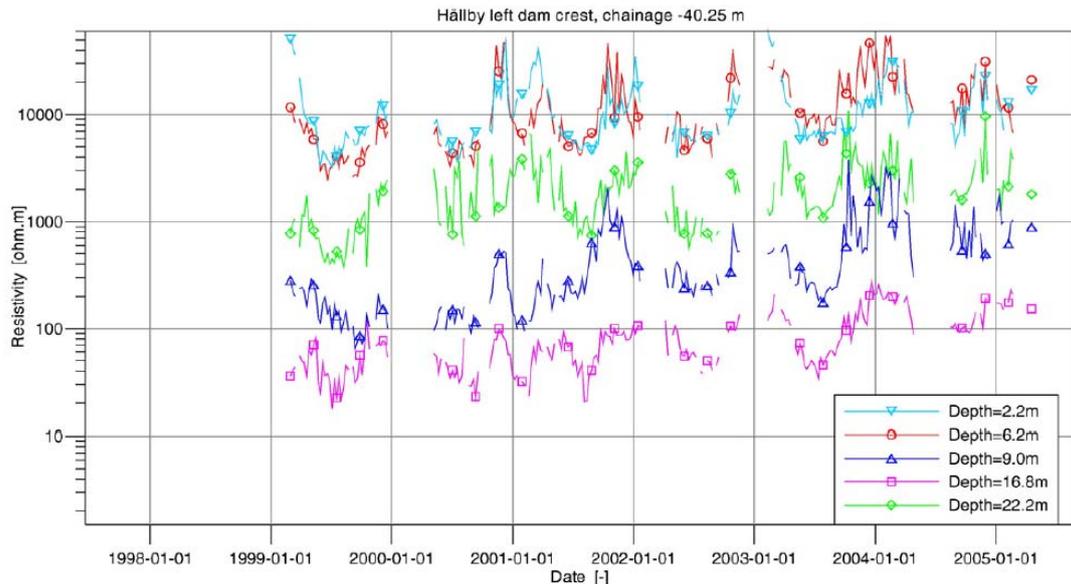


圖 B-85 Hällby 左壩頂 5 個不同深度時間序列反算資料以 Pole-dipole 排列量測

而較可惜的是，若在下游壩趾處佈線，從其結果能輔助壩頂的量測資訊，但是由於左壩趾的區域難以靠近，無法建立測線，因此沒有足夠的數據來輔助左壩頂測得的內部侵蝕狀況，不過從右壩下游壩趾的成果來看，如圖 B-86，可以發現其穩定的狀態，僅有淺層隨季節性的變化較大，深層電阻率變化很小，因此壩體內部並無滲流問題。

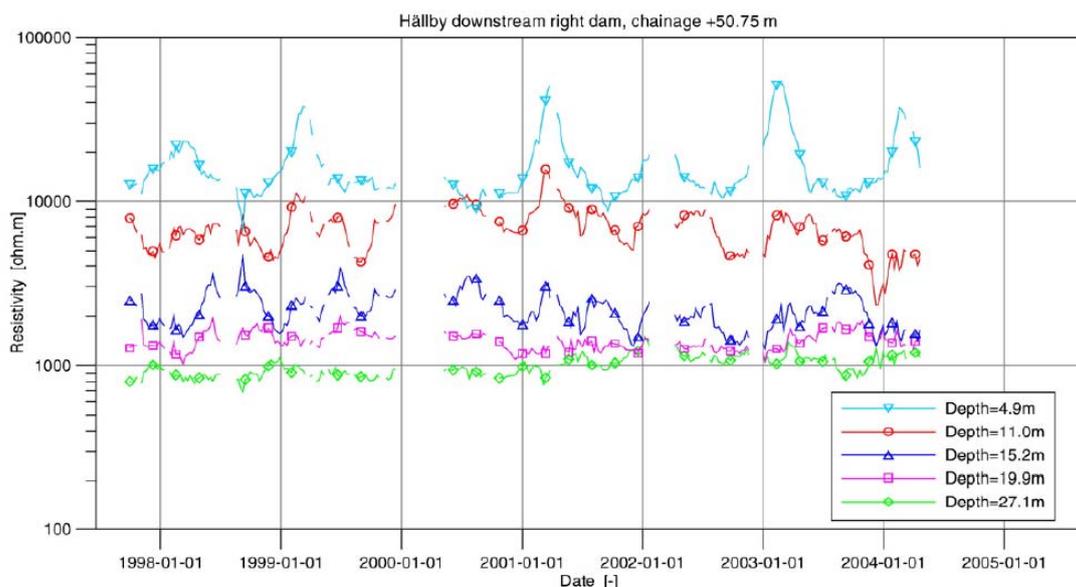


圖 B-86 Hällby 右壩下游壩趾 5 個不同深度時間序列反算資料

至於上游壩面的成果可以參考圖 B-87、圖 B-88。從圖 B-87 可以發現右側里程-20m~-40m 處有一較大的電阻率變化，但其變化量與壩頂觀測結果明顯小了許多，以圖 B-88 的時間序列反算資料趨勢來看，其季節性的變異不大，此事合理的，因為深度 7-9m 處在這樣的氣候下溫度變化小，而從右側區域提取里程-22.75m 處剖面也發現較大較雜亂的變化跡象，表示可能有一定程度的滲漏。與壩頂較不同的是，此處長期監測電阻率變化並無逐年增加或下降，長期的變化與材料特性變化有關，而上游堆石區並不可能會有這種內部侵蝕或材料變化狀況發生。

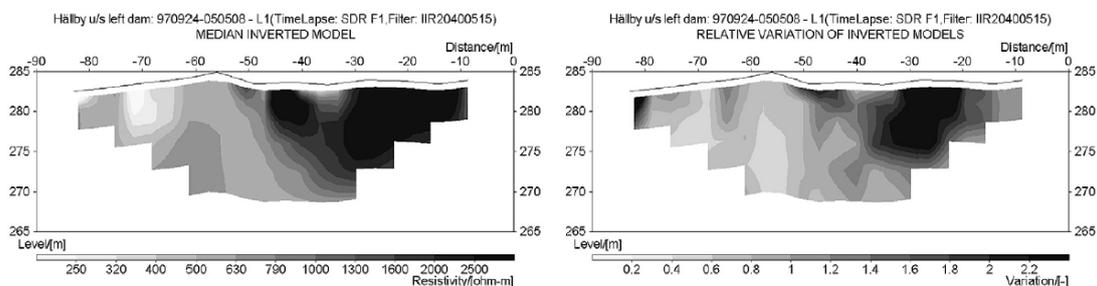


圖 B-87 Hällby 左壩上游壩面於 1997-09-24 至 2005-05-08 的中值反算電阻率分布(左)；相對變異反算電阻率分布(右)

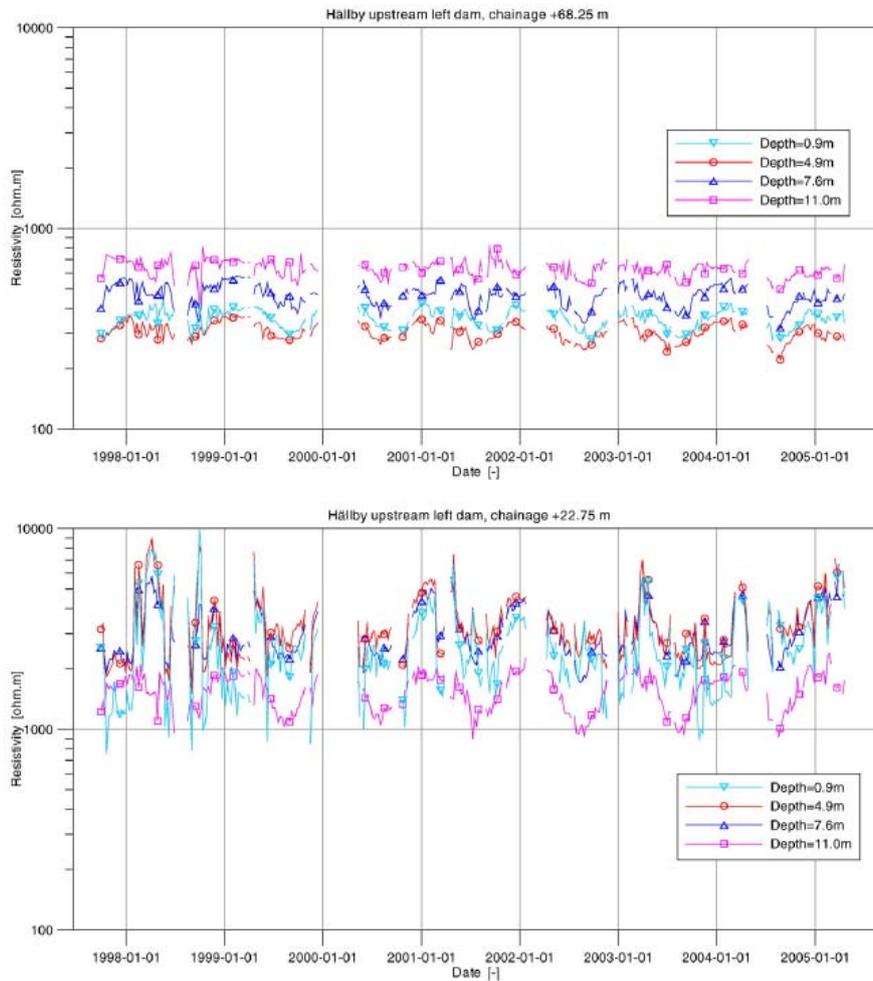


Fig. 11. Examples of time series of inverted resistivity data at four different depths from two different locations upstream Hällby left dam; Chainage +68.25 m (above) and chainage +22.75 m (below) (approx. length marks).

圖 B-88 Hällby 左壩上游壩面 5 個不同深度時間序列反算資料

整體而言，Hällby 的左壩存在因內部侵蝕導致坑洞的問題，而左壩體支撐填方的孔隙水壓也被發現在增加中，因此最後判斷要加強左壩體下游的支撐填方；另一方面，從壩頂的測線上發現在之前報告坑洞位置的附近，其電阻率以及其電阻率變化也都有增加的趨勢，顯示此處有內部侵蝕。

下游壩趾基礎的測線，雖然能檢測到滲漏區域來輔助解釋，但對於 Hällby 的左壩趾因無法裝設電極，故無從輔助壩頂的數據；而右壩趾的結果顯示穩定狀態，近表層受到季節影響，而深層變

化漸小。

(5) 應用成果評析

壩體內部侵蝕是土石壩失敗的重要原因之一，當壩體內部侵蝕發生時，心層的細料會被沖刷帶走。以地電阻率監測來看，長期的趨勢可發現受到電阻率的季節性變化的干擾，而內部侵蝕區則表現出相對於其他壩面區域較大的季節性變化，且變異性不斷增加，這樣的現象可能涉及到壩體中正在進行的內部侵蝕過程。長期變化可能是材料性能的變化，而日益增加的變化可能反映了更高且增加的滲漏等級，因此裝設電阻率監測系統有機會在早期階段檢測內部侵蝕的發展。

然而，由此一案例可知，除對於作為監測系統作用之地電阻量測系統需具備可長期置於野外施作之能力外，對於數量眾多的數據分析工作也極為重要，如何將發生異常的現象與正常環境的變化進行區別，將會是地電阻影像探測作為監測工具成功與否的重要關鍵，此外，為了確保量測資料的有效性以及資料品質，側線的佈設以及電極的裝設很重要，從 Hällby 壩的案例可發現，透過準確的濾波處理與反算技巧，即使有雜訊存在同樣能獲取相當良好之工程訊息。

(6) 參考文獻

- P. Sjö Dahl, T. Dahlin, S. Johansson, M.H. Loke, “Resistivity monitoring for leakage and internal erosion detection at Hällby embankment dam”, *Journal of Applied Geophysics* 65 ,155– 164, 2008.

附錄三 教育訓練問卷調查表

水庫構造物安全檢查教育訓練問卷調查表

各位先進：

本問卷主要在瞭解各界對水庫構造物安全檢查教育訓練之需求，同時這份問卷將作為本計畫未來工作改進的參考。請在下列問題中選擇相近看法的選項打勾。

一、背景

1.您工作之單位：水利署 水庫管理單位 工程顧問公司 其它_____

2.您目前的工作職務為何

二、講習內容

1.地球物理探測技術介紹

項次	問題	5(優)	4	3(普)	2	1(劣)
(1)	講員之專業性					
(2)	講員之講授內容是否內容豐富					
(3)	講員之講授內容是否容易了解					
(4)	講員之講授時間是否足夠					
(5)	教材內容對您執行水庫壩體監測及檢測與安全診斷相關實務是否有助益					

對於此教材有其它寶貴意見或問題：_____

2.地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用方法

項次	問題	5(優)	4	3(普)	2	1(劣)
(1)	講員之專業性					
(2)	講員之講授內容是否內容豐富					
(3)	講員之講授內容是否容易了解					
(4)	講員之講授時間是否足夠					
(5)	教材內容對您執行水庫壩體監測及檢測與安全診斷相關實務是否有助益					

對於此教材有其它寶貴意見或問題： _____

3.地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用案例介紹

項次	問題	5(優)	4	3(普)	2	1(劣)
(1)	講員之專業性					
(2)	講員之講授內容是否內容豐富					
(3)	講員之講授內容是否容易了解					
(4)	講員之講授時間是否足夠					
(5)	教材內容對您執行水庫壩體監測及檢測與安全診斷相關實務是否有助益					

對於此教材有其它寶貴意見或問題： _____

翻頁繼續

4.地球物理探測技術實作體驗

項次	問題	5(優)	4	3(普)	2	1(劣)
(1)	講員之專業性					
(2)	講員之講授內容是否內容豐富					
(3)	講員之講授內容是否容易了解					
(4)	講員之講授時間是否足夠					
(5)	教材內容對您執行水庫壩體監測及檢測與安全診斷相關實務是否有助益					

對於此教材有其它寶貴意見或問題： _____

三、講習相關事項

項次	問題	5(優)	4	3(普)	2	1(劣)
(1)	工作人員服務態度					
(2)	上午休息時之點心茶水					
(3)	中午休息時之便當					
(4)	下午休息時之點心茶水					

對於此事項有其它寶貴意見或問題： _____

翻頁繼續

四、其它意見

謝謝您提供寶貴之意見！

交通大學防災與水環境工程研究中心

國家圖書館出版品預行編目資料 CIP

地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用之研究

／林志平編著. -- 初版 -- 臺中市：水利

署水規所，2012.12

面；公分

ISBN 978-986-03-4780-7 (平裝附光碟片)

1. 水庫 2. 水利工程

443.64

101024070

地球物理探測技術於水庫構造物安全檢查應用之研究

出版機關：經濟部水利署水利規劃試驗所

地址：台中市霧峰區吉峰里中正路1340號

電話：(04)23304788

傳真：(04)23300282

網址：<http://www.wrap.gov.tw>

編著者：國立交通大學/林志平

出版年月：2012年12月

版次：初版

定價：新台幣700元

展售門市：五南文化廣場

台中市中山路6號 (04) 22260330

<http://www.wunanbooks.com.tw>

國家書店松江門市 台北市松江路209號1樓 (02)25180207

<http://www.govbooks.com.tw>

GPN：1010102994

ISBN：978-986-03-4780-7

著作權利管理資訊：經濟部水利署水利規劃試驗所保有所有權利。欲利用
本書全部或部分內容者，須徵求經濟部水利署水利規
劃試驗所同意或書面授權。

電子出版：本書附光碟片

聯絡資訊：經濟部水利署水利規劃試驗所

電話(04)23304788

