

牡丹水庫大壩安全監測實務分析探討

The Analysis Practice and Disscusion of Dam Safety Monitoring of Mudan Reservoir

鄭俊昇¹ 周書弘² 張維哲³

摘 要

牡丹水庫供應屏東南端十五鄉鎮之一般用水、核三廠、墾丁國家公園、特種營區、船舶及五里亭機場等處之公共用水及恆春地區之旱作灌溉用水，為一多功能水庫。牡丹水庫之安全監測包含平時巡查、平時檢查及土木設施與水工機械定期檢查及不定期檢查。藉由事先檢查、預防、即時警戒、適時改善等積極作為以維持牡丹水庫所轄水利建造物之功能與安全，確保引水功能運轉正常及保障下游民眾之生命財產。

關鍵詞：牡丹水庫,安全監測，安全檢查

Abstract

Mudan Reservoir is a multiple function reservoir, which supply daily water of 15 districts in southeast of Pingtung, public use water of Maanshan Nuclear Power Plant, Kenting National Park, special barracks, boat, and Hengchun Airport. Mudan Reservoir even supply irrigation water for dry farming in Hengchun. The safety monitoring of Mudan Reservoir includes regular inspection, periodical inspection, and irregular inspeciton for civil facilities and hydraulic machinery. Mudan Reservoir control center execute many task such as inspect in advance, prevention, real-time alert, and timely improve to keep the pilotage function stable and assure the safety of life and property of people at downstream.

Keywords: Mudan Reservoir, Safety Monitoring, Safety Inspection

一、水庫概要

牡丹水庫位於屏東縣牡丹鄉境內之四重溪河谷上，係匯集四重溪上游之汝仍溪及牡丹流域之水，以供應屏東南端十五鄉鎮(獅子、牡丹、枋寮、枋山、車城、恆春、滿州、春日、佳冬、林邊、琉球、南州、崁頂、東港、新園等)之一般用水、核三廠、墾丁國家公園、特種營區、船舶及五里亭機場等處之公共用水，以及恆春地區之旱作灌溉用水，為一多功能水庫。

牡丹水庫於民國 84 年興建完成，壩高 65 公尺，集水面積 69.2 平方公里，計畫滿水位標高 142.00 公尺，滿水面積 1.42 平方公里，總蓄水量 3,140 萬立方公尺。大壩壩型為中央心層分區滾壓土石壩，壩頂長 445.6 公尺，壩頂寬 10.0 公尺，最大壩高 65 公尺。溢洪道屬閘門控制開渠式，設計排洪量為 3,600 秒立方公尺，溢洪堰頂寬度 36.0 公尺，溢洪堰頂標高 127.5 公尺，溢洪道長 156.0 公尺。取排水設施為斜塔式分段取水工，最低取水口標高 100.2 公尺，公共用水及農業用水控制閘門採用何本閘，最大出水量 4.0 秒立方公尺，另佈設控制閘門一座供緊急排放之用，最大出水量 52.0 秒立方公尺。為配合政府推動再生能源政策，有效利用牡丹水庫常態放流水開發牡丹水庫水力發電之自有電力，推動牡丹水庫小水力發電工程。工程範圍位於牡丹水庫閘閥室旁，工程內容包含新建發電廠房 1 間、新設 490KW 水輪發電機組 1 座、分歧管及壓力鋼管佈設、新設發電尾水路及佈設 380V 電纜線。

表 1.1.1 牡丹水庫基本數據

水庫		溢洪道	
集水面積	69.2 km ²	型式	閘門控制開渠式
滿水面積	1.42 km ²	設計洪水	3,600 cms
滿水位	142.0m	堰頂寬度	每孔寬 12m、三孔總寬 36m
最高洪水位	142.13m	堰頂標高	127.5m
可能最大洪水	3,815cms	弧形閘門(三座)	每座寬 12m、高 15.388m
水庫總容量	31,400,000 m ³	溢洪道長度	156m
水庫有效容量	26,521,700m ³ (民國 110 年)	公共給水與農業用水放水	
主壩		取水塔型式	斜塔式分層取水結構物
壩型	土石壩	輸水隧道直徑	2.40m
壩頂長	445.6m	設計流量	4.0cms
壩頂標高	145m	緊急放水	
壩高	65m	型式	與河道放水道共用一斜塔式進口結構物
壩體體積	2,819,000 m ³	設計流量	52 cms
導水設施		小水力發電	
導水隧道直徑	9m	型式	與河道放水道共用一斜塔式進口結構物
導水隧道長度	258m(隧道部份)	設計流量	52 cms
上游擋水壩	118m	水輪發電機	額定出力 490KW
擋水壩壩高	38m	設計流量	1.5cms

二、土石壩常見破壞型態

2.1 影響土石壩之安全因素

影響土石壩之安全因素主要有：1.土石壩築壩材料(依大壩分區功能不同，所需築壩材料不同)、2.大壩基礎(基礎承载力及水密性、地質構造)、3.洪水與出水高(出水高不足對水質造成汙染、逕流係數提升與洪峰流量加大、滯洪能力降低且潰堤風險提高)、4.邊坡穩定及 5.滲流影響，土石壩破壞形式如圖 2.1.1 所示。

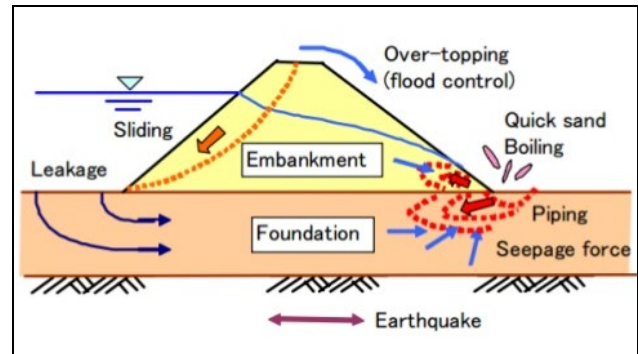


圖 2.1.1 土石壩破壞形式示意圖

2.2 土石壩常見破壞型態及現場檢查重點

土石壩常見之破壞型態為下列四種：裂縫、淺層滑動、下陷及滲水。根據破壞型態之不同，土石壩現場檢查重點分項敘述如下：

1. 裂縫(圖 2.2.1)

檢查壩體或壩面上是否有裂縫發生或舊有裂縫是否惡化，是否有植被生長。檢查裂縫並記錄其位置、長度、深度、寬度以及其他附帶之物理特徵。

2. 淺層滑動(圖 2.2.2)

大壩表面有無因暴雨沖下或由壩座上滑落之大量泥土及雜物、有無可見之沉陷或位移現象產生。應注意是否演變成規模深層滑動之危險。

3. 下陷(圖 2.2.3)

檢查大壩上游面之拋石有無被波浪沖動現象、壩座有無被沖蝕而需要修理之處；檢查時除拍照與紀錄下陷區之位置、範圍及深度，亦應檢查下陷區下方是否有孔洞，研判是否為大型沉穴，若發現大型的沉穴時，應檢視下游坡面及壩趾有無滲水現象。

4. 滲水(圖 2.2.4)

滲水經常發生於下游坡面及壩趾地區、壩座與壩體的交接面，若發現滲水，應紀錄滲水量、渾濁度、降雨量及水庫水位；觀察出水處有無堆積物或銹染現象或沉澱物。

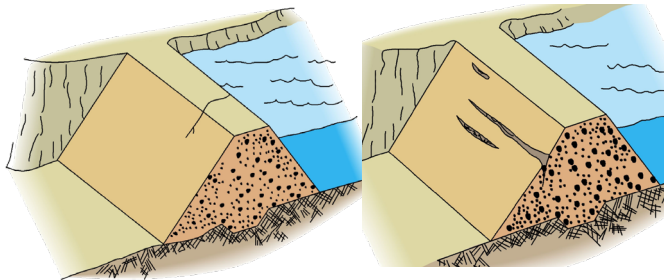


圖 2.2.1 裂縫破壞示意圖

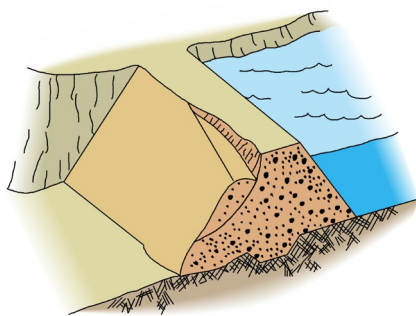


圖 2.2.2 淺層滑動示意圖

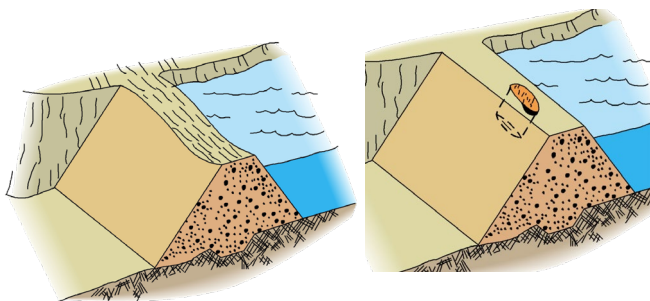


圖 2.2.3 下陷破壞示意圖

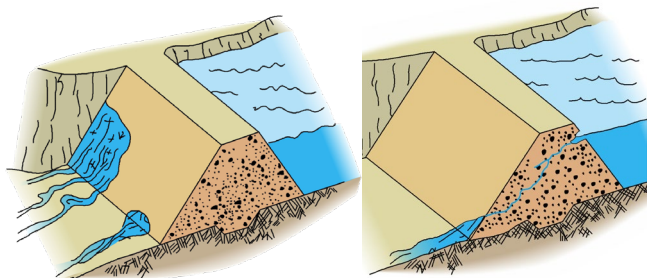


圖 2.2.4 滲水破壞示意圖

土石壩安全檢查的基礎概念:1.大壩行為隨受力狀態改變。2.壩體所處狀態並非全部都有試驗室的模擬成果。3.大壩材料隨著時間老化。4.原本細小的問題隨時間而擴大。

綜上所述，現場檢查的方式為有系統的路線檢視壩體表面及周圍區域；若為團隊行動可成一直線分散開來橫越設施表面，並在不同水庫水位時分別進行壩體檢查。而任何情況均須照相存檔，並用簡圖標明清楚觀察方向及位置，量測與估計數值紀錄，並與前次檢查報告做比對。目視檢查之順序與觀察角度如圖 2.2.5、圖 2.2.6 所示。

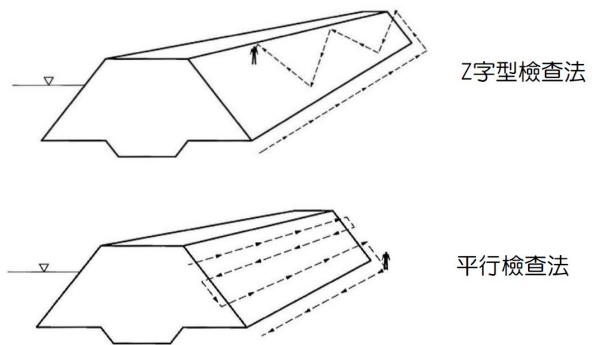


圖 2.2.5 目視檢查順序圖

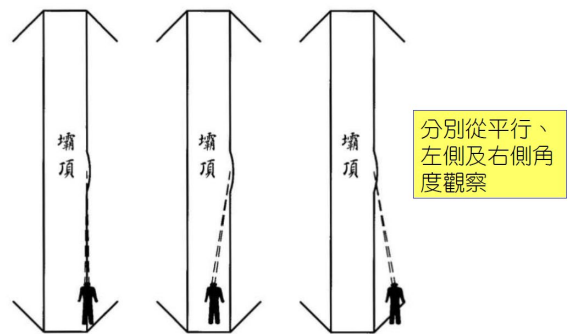


圖 2.2.6 目視檢查觀察圖

三、監測資料收集與研判分析

3.1 監測儀器介紹

牡丹大壩於構築期間為確保水庫蓄水及營運期間壩體之安全及穩定，裝設監測儀器系統，藉以印證設計、檢討施工及建立預警系統。牡丹水庫之監測儀器分別安裝於大壩、溢洪道、EL.135m 平台、左岸廊道、取水口上方(右岸)邊坡及 C 線道路邊坡，用以監測及掌握大壩、溢洪道及開挖邊坡之穩定性及安全性，俾使早日發現缺陷，適時加以處理。目前牡丹水庫監測系統包括水壓計、土壓計、水平變位計、測傾管、表面沉陷點、地震儀、量水堰及水位觀測井等監測儀器。各類儀器設備之觀測目的、數量及頻率分別詳表 3.1.1 及表 3.1.2。

表 3.1.1 牡丹水庫監測系統一覽表

儀器名稱	數量	裝設目的	成果圖表
孔隙水壓計 基礎型	大壩 9 只 溢洪道 8 只 18 只	監測大壩施工期間及水庫 運轉時之孔隙水壓。	地下水壓、水庫水位、降雨量歷時 曲線及關係圖
測傾儀 及沉陷計	壩體型 2 孔 岩盤型 18 孔	觀測壩體內或山坡變位情 形及潛在滑動面位置，岩盤 型不設沉陷計	1.傾斜管累積位移量變化圖 2.可能滑動面位置之歷時變化曲線 3.層別沉陷量與水庫水位歷時曲線
水平變 位計	23 只	觀測壩軸方向之水平變位 量，瞭解壩體內部之應變分 佈	相對位移量與水庫水位歷時曲線
地震儀	3 組	記錄自由場、壩體及壩基受 地震作用時之反應加速度	地震歷時曲線
土壓計	6 組(18 只)	觀測壩體內之土壓力大小	土壓力與水庫水位歷時曲線
滲漏量堰	4 處	觀測壩基及左右基座之滲 漏水量	滲漏量、水庫水位、降雨量歷時 曲線及關係圖
壩體 位移沉陷點	57 點	觀測壩體、溢洪道及壩座山 脊不同高程之沉陷量及表 面位移	1.縱斷面沉陷曲線 2.沉陷相對填土高度與完成時間關 係圖
溢洪道 基礎水壓計	8 只	監測溢洪道堰體基礎水壓 變化	溢洪道地下水壓、水庫水位、降雨 量歷時曲線及關係圖
落水池 右護岸沉陷點	8 點	觀測溢洪道落水池右護岸 混凝土塊沉陷變化情形	1.縱斷面沉陷曲線 2.沉陷相對填土高度與完成時間 關係圖
自計式 水位觀測井	7 處	觀測壩體下游側或山坡之 地下水位變化	1.地下水位與水庫水位關係圖

表 3.1.2 監測儀器觀測頻率

項目		例行監測頻率	特別監測頻率
孔隙水壓計		人工 雨季 2 次/1 月 乾季 1 次/1 月 自動 3 次/1 日	壩址量得震度 5 弱級以上之地震時，每日至少一次
測傾管	IM1、IM2、IM3、IM6A、IM6C、IM7、IM7A、IM7B、IM8、IM8A、IM9A、IM10 及 IM11	三個月(IM6A、IM6C、IM7、IM7A、IM7B、IM8、IM8A、IM9A、IM10 及 IM11 雨季時應加密觀測)	壩址量得震度 5 弱級以上之地震或發生 24 小時累積雨量達 500 公釐以上之超大豪雨時，以每週兩次為原則
	IM4、IM5 及 T5	1 次/半年	壩址量得震度 5 弱級以上之地震或發生 24 小時累積雨量達 500 公釐以上之超大豪雨時，以每週兩次為原則
水平變位計		人工 雨季 2 次/1 月 乾季 1 次/1 月 自動 3 次/1 日	壩址量得震度 5 弱級以上之地震或發生 24 小時累積雨量達 500 公釐以上之超大豪雨時，以每週兩次為原則
地震儀		自動記錄	自動記錄
土壓計		人工 雨季 2 次/1 月 乾季 1 次/1 月 自動 3 次/1 日	壩址量得震度 5 弱級以上之地震時，以每週兩次為原則
滲流量測		人工 2 次/1 月 自動 1 次/1 時	壩址量得震度 5 弱級以上之地震時，每日至少一次
壩面測點		1 次/半年	壩址量得震度 5 弱級以上之地震時，每週一次
落水池右護岸沉陷點		1 次/半年	壩址量得震度 5 弱級以上之地震時，每週一次
水位觀測井		人工 1 次/1 月 自動 1 次/1 時	壩址量得震度 5 弱級以上之地震或發生 24 小時累積雨量達 500 公釐以上之超大豪雨時，以每週兩次為原則

大壩監測系統平面配置如圖 3.1.1 所示，
監測儀器安裝位置依功能性分述如下：
(一)壓力計

1.壩基及壩體水壓

基礎水壓計裝於壩體基礎，共有 9 只，
安裝位置如圖 3.1.2 所示；壩體水壓計分別埋
設於 EL.85m(4 只)、100m(8 只)及 120m(6 只)
等三個高程，合計共 18 只，安裝位置如圖 3.1.2
所示。

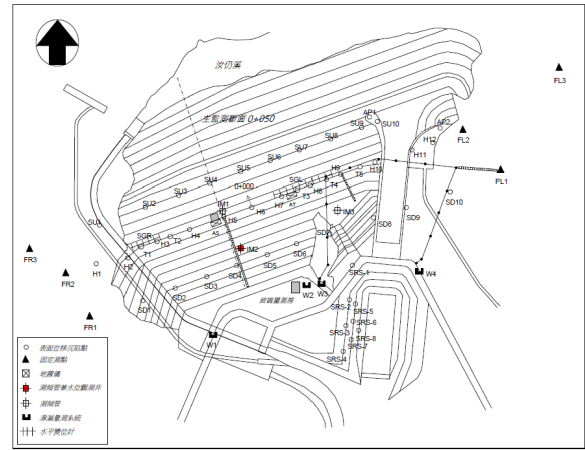


圖 3.1.1 大壩監測系統平面配置圖

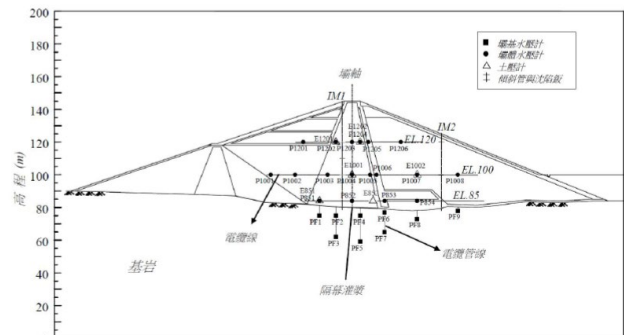


圖 3.1.2 大壩監測系統剖面位置圖

2.壩體土壓

大壩土壓計分別埋設於 85m、100m 及
120m 三個高程，每個高程兩處，每處 3 只土
壓計，分別以向上游傾斜 45°、水平及向下游
傾斜 45°等三種角度埋設，合計共 18 只，安
裝位置如圖 3.1.3 所示。

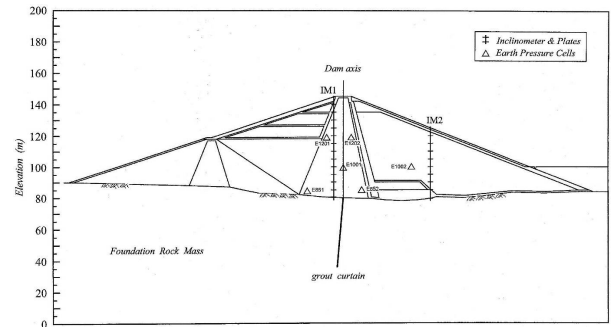


圖 3.1.3 土壓計埋設位置示意圖

3.溢洪道基礎水壓

溢洪道堰體基礎共設有 8 只水壓計，用
以監測堰體基礎上頂水壓變化，埋設高程約
在 113~115m 之間，安裝位置如圖 3.1.4 所示。

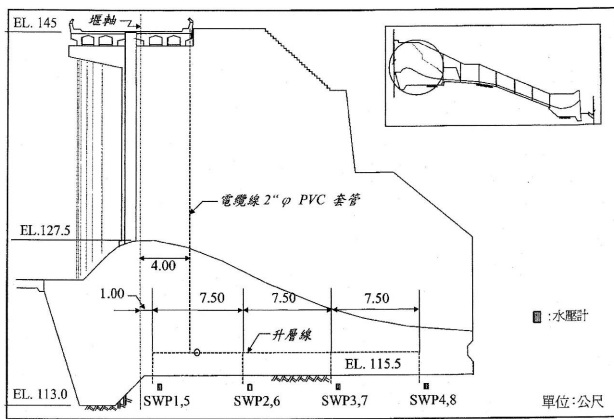


圖 3.1.4 溢洪道基礎孔隙水壓計位置圖

壩基水壓、壩體水壓及土壓、溢洪道基礎水壓及壩體水平變位現場測讀如圖 3.1.5、圖 3.1.6 所示。



圖 3.1.5 現場監測資料測讀(1/2)

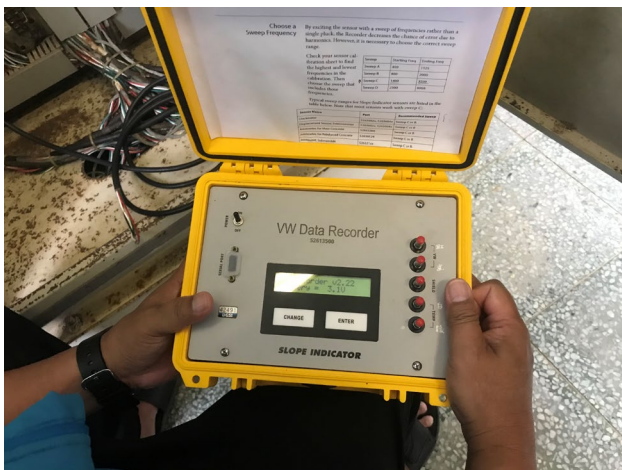


圖 3.1.6 現場監測資料測讀(2/2)

(二)變位

1.壩體沉陷

壩體共裝設 2 支測傾管觀測壩體滑動變位。

2.壩體水平變位

牡丹大壩水平變位計裝設於高程 140m 之靠右壩座(SGR)及左壩座(SGL)心層內，共設置 23 只，安裝位置如圖 3.1.7。

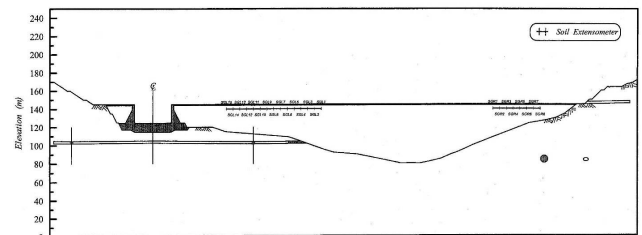


圖 3.1.7 水平變位計埋設位置圖

3.壩面沉陷

牡丹水庫大壩共設置 57 個壩面測點，以監測大壩之變形行為。其中包括壩頂測點 17 點(H1~H12、T1~T5)、上游壩面測點 10 點(SU1~SU10)、下游壩面測點 27 點(SD1~SD10、A1~A8、C1~C9)及溢洪道 3 點(AP1、AP1-1、AP2)，沉陷點位置如圖 3.1.8、圖 3.1.9 所示，現場測量如圖 3.1.10。

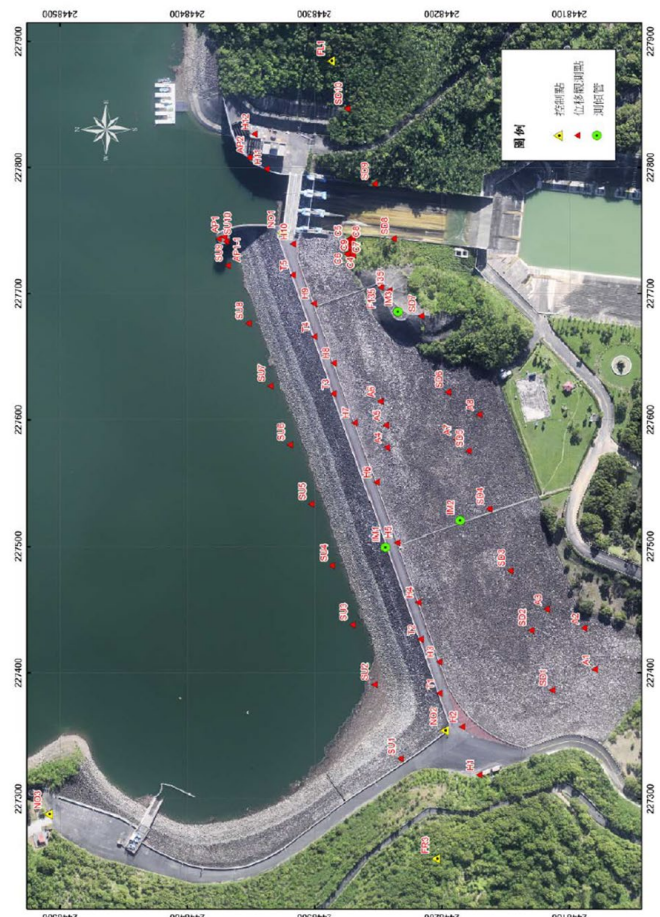


圖 3.1.8 大壩觀測點布置圖

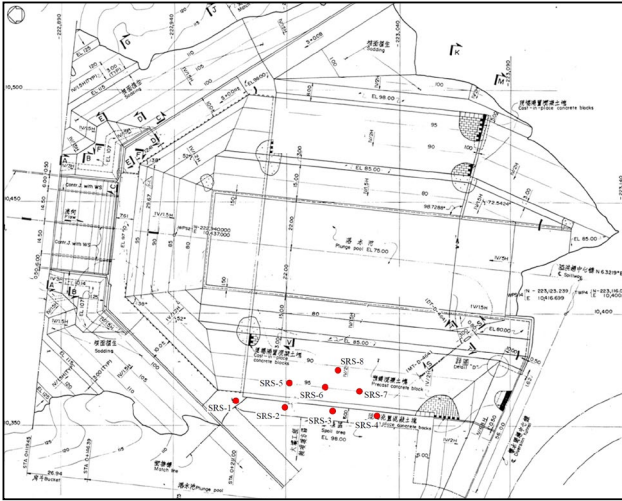


圖 3.1.10 現場高程測量

(三) 滲流量

牡丹水庫大壩於施工導水隧道出口、壩趾排水及左岸 LD1、LD2 排水隧道內分別設置滲漏量水堰(W1~W4)，設置位置如圖 3.1.1 所示，量水堰現況如圖 3.1.11 所示。



圖 3.1.11 W4 量水堰現況照片

(四)地震

牡丹水庫壩區設置的地震儀分別位於自由場、壩頂及壩基廊道(大壩底部)，可由遠端操控觸發地震測試或受地震觸發後將地震資料回傳至資料庫儲存。地震儀現況照片如圖 3.1.12。



圖 3.1.12 壩基廊道地震儀現況照片

(五)鄰近邊坡變位及地下水位

1.右山脊邊坡

取水口上方(右岸)邊坡目前共設置8處測傾管及 5 處水位觀測井以掌握邊坡滑移範圍及規模，測傾管與水位觀測井設置位置如圖 3.1.13 所示。

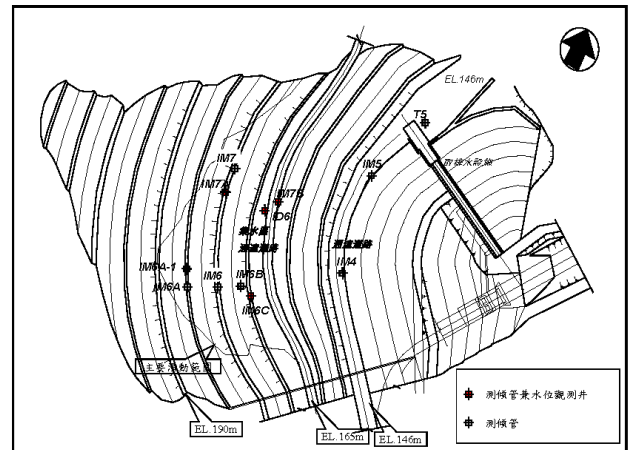


圖 3.1.13 右岸邊坡測傾管布置平面圖

2.右岸 C 線道路邊坡

左岸 C 線道路邊坡目前共設置 5 處測傾管及 2 處水位觀測井，設置位置如圖 3.1.14 所示。地下水位除自記式遠端回傳外，人員也會定期量測地下水位，如圖 3.1.15 所示。

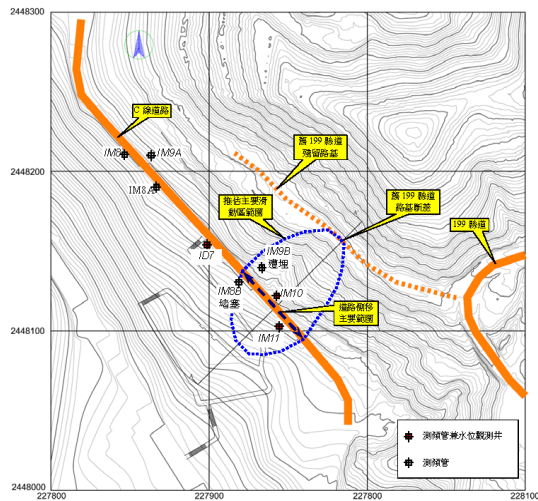


圖 3.1.14 C 線道路邊坡監測系統平面布置圖



圖 3.1.15 人員現場量測地下水位

(六)135 平台

大壩與溢洪道間山座原為壩址溪谷最窄處之左岸山脊，築壩時清除表層疏鬆材料，修整成一平台(簡稱 EL.135 平台)山座，留置於大壩左岸下游側。平台上有設置一組測傾管觀測大壩之變位情況；由於平台旁溝面有濕潤的狀態，為了解濕潤狀態與水庫水位和降雨歷時變化關係，從 103 年起至 111 年每月觀測記錄。135 平台現況如圖 3.1.16 所示。



圖 3.1.16 135 平台現況照片

3.2 監測儀器概要及現況

管理單位為確保水庫蓄水及營運期間壩體之安全及穩定，自大壩填築期間即委託專業技術顧問公司進行安全監測分析工作至今，內容包括儀器概況、觀測結果、監測資料評估分析、大壩邊坡安定分析、警戒值建議、結論與建議等，以了解壩體行為及安全性。以下擬針對監測系統及項目、頻率、警戒值進行說明：

一、監測系統及項目

彙整牡丹水庫監測系統現況詳表 3.2.1，故障儀器除測傾管外各監測儀器皆埋設於壩體內，因已無法修復亦無法補裝，目前可由鄰近正常之儀器推估監測標的行為，整體監測系統應足以監測營運時期大壩行為。

二、監測頻率

依據經濟部頒訂之蓄水庫構造物管理基準(民 80 年)，考量監測項目對壩及構造物之靈敏性及重要性，各營運管理時期之監測週期詳表 3.2.2。牡丹水庫蓄水迄今已 26 年，應達穩定期，複核各階段之監測頻率皆符合標準。由歷年監測成果顯示壩體行為已大致趨於穩定，故現階段執行之監測頻率，應可達到監控大壩及附屬設施之要求，惟若遇地震、大豪雨等狀況仍應立即辦理特別檢查作業，以利掌握即時狀況。

三、監測警戒值

目前各監測儀器採用之警戒值係牡丹水庫第三次安全評估針對各監測項目之特性研定，其訂定依據整理如表 3.2.3。以民國 109~111 年度牡丹水庫功能正常之監測資料與警戒值進行比對，發現其測值皆未超越前次安全評估訂定之警戒值，且大壩定期之現場檢查亦無異狀，顯示前次安全評估所訂定之警戒值尚屬合宜。

表 3.2.1 現場儀器狀況表

項目	數量	檢測情況				正常儀器編號	故障儀器編號
		功能正常	故障數量	疑似故障	故障數量		
1.大壩孔隙水壓計							
壩體基礎孔隙水壓計	9 只	1 只	8 只	0 只	PF1	PF2、PF3、PF4、PF5、PF6、PF7、PF8、PF9	
壩體孔隙水壓計	18 只	6 只	12 只	0 只	P851、P1002、P1005、P1007、P1203、P1205	P852、P853、P854、P1001、P1003、P1004、P1006、P1008、P1201、P1202、P1204、P1206	
2.土壓計	6 組 18 只	16 只	2 只	0 只	E851-1、E851-2、E851-3、E852-1、E852-2、E852-3、E1001-1、E1001-3、E1002-1、E1002-2、E1002-3、E1201-2、E1201-3、E1202-1、E1202-2、E1202-3	E1001-2、E1201-1	
3.水平變位計	23 組	12 組	11 組	0 組	SGR1、SGR2、SGR4、SGR7、SGL1、SGL4、SGL5、SGL7、SGL8、SGL9、SGL12、SGL15	SGR3、SGR5、SGR6、SGR8、SGL2、SGL3、SGL6、SGL10、SGL11、SGL13、SGL14	
4.測傾管	20 處	16 處	4 處	0 處	IM1、IM2、IM3、IM4、IM5、T5、IM6A-1、IM6C、IM7、IM7A、IM7B、IM8、IM8A、IM9A、IM10、IM11	IM6、IM6B、IM8B、IM9B	
5.滲流量堰	4 處	4 處	0 處	0 處	W1、W2、W3、W4	-	
6.壩體表面測量點	57 點	57 點	0 點	0 點	SU1-SU10、H1-H12、T1-T5、SD1-SD10、C1-C9、A1-A8、AP1-AP3	-	
7.溢洪道基礎水壓計	8 只	4 只	4 只	0 只	SWP1、SWP2、SWP4、SWP7	SWP3、SWP5、SWP6、SWP8	
8.落水池右護岸沉陷點	8 點	8 點	0 點	0 點	SRS-1-SRS-8	-	
9.地震儀	3 組	3 組	0 組	0 組	壩頂、壩底、自由場	-	
10.自計式水位觀測井	9 處	9 處	0 處	0 處	IM2、IM6A-1、IM6C、IM7A、IM7B、IM10、IM11、ID6、ID7	-	

表 3.2.2 各管理時期之監測週期表

壩型類		混凝土壩					堆填壩		備註
		重力、空體重力			拱壩		均質型	分區型表面隔離型	
		50m 以下	50m 以上 10m 以下	100m 以上	30m 以下	30m 以上			
滲水量	第一期	一次/日							
	第二期	一次/週							
	第三期	一次/月							
變位	第一期	一次/週	一次/日	一次/週	一次/日	一次/週	30m 以上拱壩及混凝土壩，如無顯著之變位時，可省略第三期之監測。高度 70m 以下之堆填壩，於第三期後可半年測一次，堆填壩之上游坡可俟當水位降低時辦理。		
	第二期	一次/月	一次/週	一次/月	一次/週	一次/月			
	第三期	一次/季	一次/月	一次/季	一次/月	一次/季			
上頂力	第一期	一次/週			—	一次/週	—	滲水量少，上頂力小者，可省略第三期之監測。	
	第二期	一次/月			—	一次/月	—		
	第三期	一次/季			—	一次/季	—		
浸潤線	第一期	—				一次/週	—		
	第二期	—				一次/月	—		
	第三期	—				一次/季	—		

註：第一期：初次蓄水期，初次開始蓄水至首滿庫水所規定期間，或所經過之一定期間。
 第二期：漸穩期，初次蓄水後至壩及水庫構造物之舉動趨於穩定狀態之期間。
 第三期：穩定期，經過漸穩期，壩及水庫構造物之各項舉動已達規律之正常穩定狀態後。

表 3.2.3 各監測項目警戒值訂定原則

監測項目	警戒值說明
壩基水壓	係依據歷年觀測資料之統計結果訂定各基礎水壓計之警戒包絡線
壩體水壓	滲層與下游殼層：3.0t/m ² 心層區：觀測資料及穩態滲流狀態理論值大者為警戒值 上游殼層：依據歷年觀測資料訂定警戒包絡線
壩體土壓	心層區之應力警戒值藉由水力破壞模式來決定。 殼層之應力警戒值由長期觀測資料之迴歸結果訂定。
壩體沉陷	壩頂最大垂直變位量(0.01 倍壩高)作為沉陷觀測警戒值；差異沉陷則視差異沉陷量與測點水平距離之比值大於 0.7%為警戒值。
水平變位	0.2%
傾斜變位	孔口累積變位量 10mm/30 天
滲流量測	利用無降雨時之庫水位與滲流量測值之關係
溢洪道基礎水壓	以歷年觀測之不同庫水位與水壓關係訂定警戒包絡線

3.3 監測成果

(一)壓力計

1.壩基水壓

由長期觀測記錄顯示，壩基各水壓計的總水頭測值長期以來均隨水庫水位起伏，越靠近上游側者總水頭越高，其起伏越明顯；越下游側者總水頭越低，其起伏略有時間延遲 (Time lag) 且越平緩，由其變化趨勢研判，其總水頭穩定僅隨水庫水位些微起伏，符合其位於下游區應有之行為。觀測結果如圖 3.3.1 所示。

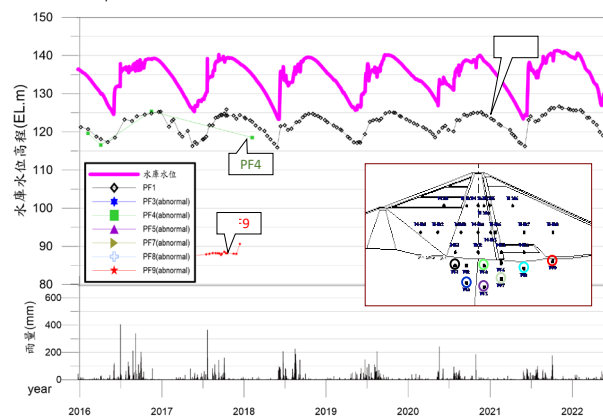


圖 3.3.1 壩基水壓計總水頭歷時變化圖

2.壩體水壓

由歷年觀測成果得知：上游殼層受水庫水位的影響明顯，故總水頭測值大致隨水庫水位變化趨勢起伏，屬正常合理行為；心層偏下游側水壓總水頭僅些微隨庫水位變化趨勢起伏，且略有時間延遲，顯示大壩心層擋水效能正常；下游殼層測值穩定無隨水庫水位趨勢變化的異常起伏。觀測結果如圖 3.3.2 所示。

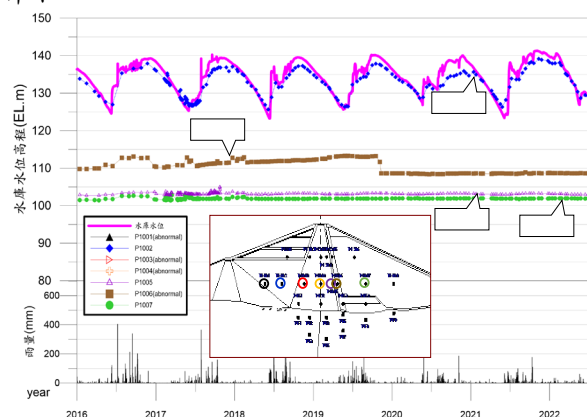


圖 3.3.2 壩體水壓計總水頭歷時變化圖

3.壩體土壓

由歷時測值變化可知，位於心層內之土壓計測值均隨庫水位變化趨勢有些微起伏，研判為庫水壓加載所導致的壩體應力反應，

應屬正常行為。至於下游殼層內土壓計測值均穩定無異常變化。觀測結果如圖 3.3.3 所示。

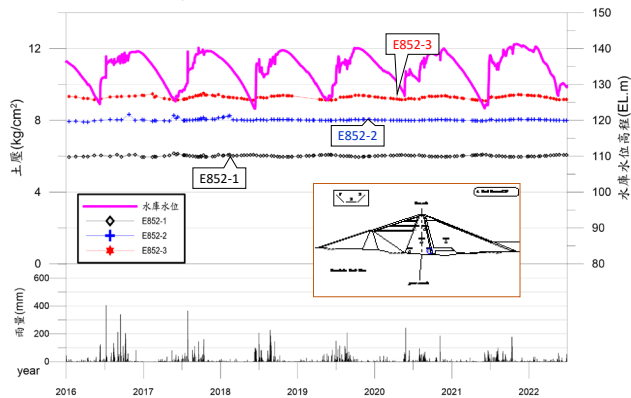


圖 3.3.3 壩體土壓計測值歷時變化圖

4. 溢洪道基礎水壓

由歷年測得總水頭分布大致由上游向下游遞減，總水頭歷時變化大致受庫水位影響而略有起伏，並無異常水壓發展。觀測結果如圖 3.3.4 所示。

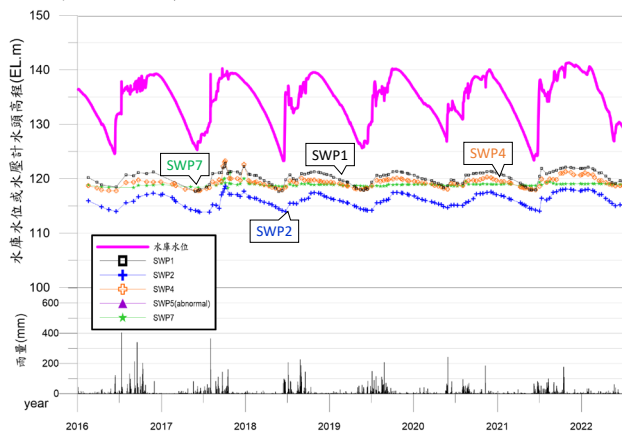


圖 3.3.4 溢洪道基礎水壓計測值歷時變化圖

(二) 變位

1. 壩體沉陷

無異常的壩體滑坡變位情形。

2. 壩體水平變位

近年來所觀測得應變量均無進一步發展，且累積應變量約在 0.15% 內，均小於第三次安全評估所訂定的應變 0.2%，顯示壩體應無異常或不均勻之縱向變位發展。觀測結果如圖 3.3.5 所示。

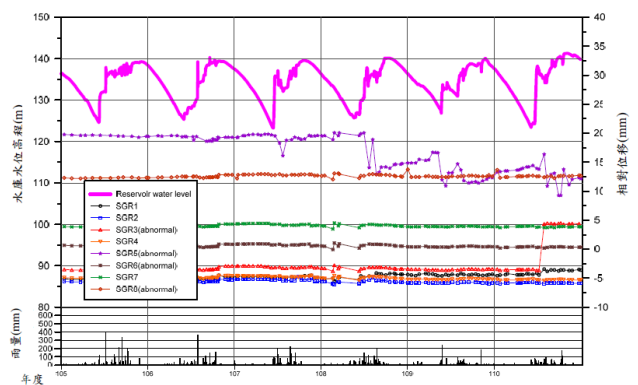


圖 3.3.5 壩體水平變位計測值歷時變化圖

3. 壩面沉陷

壩頂累積沉陷量約 0.64~28.35 公分，約為各點壩體填築厚度之 0.02~0.80%，且與各點之填築厚度相關，屬合理現象。由目前沉陷量比率判斷，沉陷量均不及填築厚度的 1% 之經驗限值，各相鄰測點的差異沉陷量不大，應不致有因過大沉陷或差異沉陷導致壩體發生裂縫之情形。觀測結果如圖 3.3.6 所示。

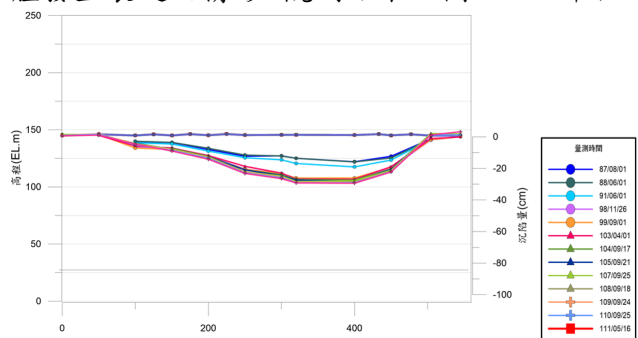


圖 3.3.6 壩頂表面沉陷變化圖

(三) 滲流量

W1 之水量主要受降雨的影響，而旱季期間流量隨庫水位下降而逐漸減少，屬正常行為；W2 之水量受降雨的影響明顯，於降雨過後量水堰水量即大量增加，由於壩體的構造並沒有阻絕降雨水流入量水堰的機制，故降雨後水量增加的情形屬正常行為；W3、W4 之水量受降雨的影響明顯，無降雨期間未超越第三次安全評估所訂定之警戒值。觀測成果如圖 3.3.7 所示。

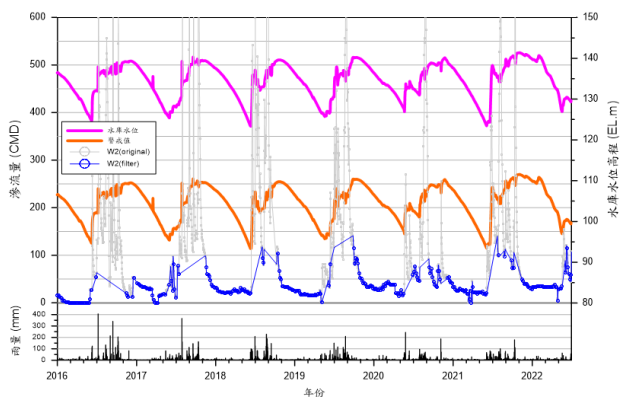


圖 3.3.7 量水堰 W2 觀測滲流量歷時變化圖

(四)地震

由歷史紀錄比對中央氣象局地震資料得知其記讀功能正常。觀測結果如圖 3.3.8 所示。

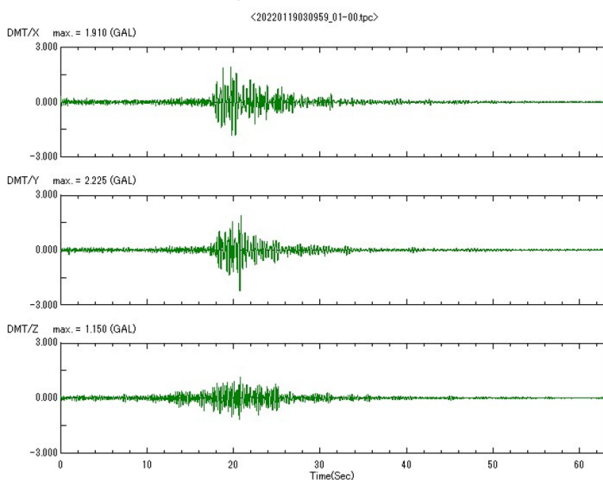


圖 3.3.8 地震壩頂測站加速度歷時曲線圖

(五)鄰近邊坡變位及地下水位

1.右山脊邊坡

由測傾管之觀測結果顯示，本邊坡目前並無進一步位移發展，惟局部區域於強降雨過後，仍有些微變位發展，汛期時加強觀察邊坡之發展。另由水位觀測井觀測結果得知，地下水位於枯水期時持續緩慢下降，於較大降雨事件後即明顯上升，並緩慢消散，顯示本區因岩盤透水性低地下水位消散緩慢。觀測結果如圖 3.3.9 所示。

2.右岸 C 線道路邊坡

左岸 C 線道路邊坡近年監測成果發現，此邊坡除淺層些微沉陷側移外，整體尚屬穩定。根據以往觀察，當發生大豪雨事件後側移之可能性較高，目前 C 線道路邊坡未有進一步發展，仍於汛期加強觀測是否有進一步發展。

(六)135 平台

自 103 年起至 111 年每月持續觀察記錄溼

潤狀態繪製溼潤狀態與庫水位及降雨之歷時變化關係，顯示該處溼潤狀態與降雨較為相關，研判應為雨後殘留水所致，並非壩體異常滲水所致，對壩體安全並無影響，135 平台旁表面濕潤紀錄歷時變化如圖 3.3.10 所示。

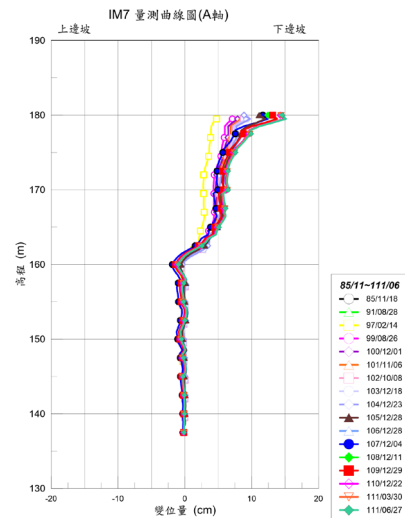


圖 3.3.9 測傾管監測結果圖

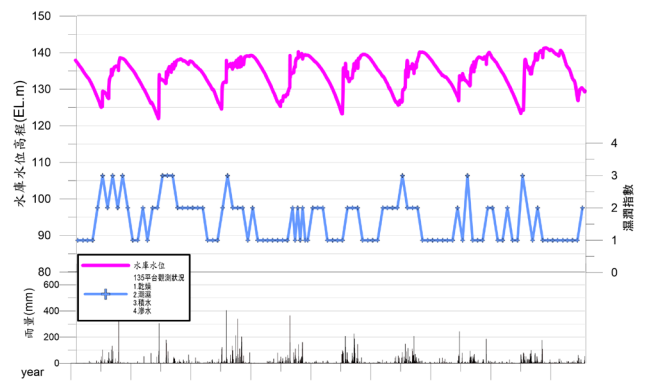


圖 3.3.10 135 平台旁溝面濕潤紀錄歷時變化

四、現場檢查

4.1 大壩

由於無法檢查壩體內部情形，故現場檢查時就壩體表面之上游坡面、下游坡面、壩頂道路、壩座及壩趾等部位進行檢視。

上游坡面主要功能在於保護壩體免受水庫蓄水之波浪侵蝕，檢查應注意水面以上坡面是否發生裂縫、滑動、凸起、下陷等現象；下游坡面除上述現象外，特別注意是否發生滲水現象，滲水經常發生之地點以下游坡面及壩趾地區為主，另外在壩座與壩體的交接面，因牡丹水庫築壩時期填土夯實不易緣故，土壤密度及水密性均較壩體部分為差，此處也易發生滲水現象，現場檢查列為檢查重點，檢查照片如圖 4.1.1 所示。



圖 4.1.1 大壩上游坡面檢查照片

大壩下游坡面靠近 EL.135m 平台山脊附近與水平排水溝交接處表面易濕潤，其植物生長較為茂盛；經歷年資料研判濕潤係殘留雨水所致，非壩體漏水之行為，故不致影響壩體安全，仍定期進行現場檢查並記錄，如圖 4.1.2。



圖 4.1.2 135 平台濕潤點檢查照片

為釐清 135 平台下方之原山脊岩盤狀況及其與噴凝土結構開裂之關聯性，111 年辦理地層波速檢測，藉由震波之波速變化評估 135 平台各區域之混凝土弱化程度、結構破裂或應力集中等狀況及位置，現場施工如圖 4.1.3 所示。



圖 4.1.3 135 平台波速測量現場作業照片

壩頂道路位於壩體最頂部，目視檢查時以下陷、裂縫等現象為主。而壩頂護欄與混凝土結構亦須觀察有無異常變化，現場檢查照片如圖 4.1.4。



圖 4.1.4 壩頂道路檢查照片

壩座之功能在於提供壩體穩定之側向支撐，檢查重點在於邊坡有無發生滲水與不穩定等現象。檢查方法除了於壩座附近目視檢查外，亦可從上、下游或壩頂方向遠距離觀察壩座有無異常現象，現場檢查如圖 4.1.5。



圖 4.1.5 壩座檢查照片

4.2 溢洪道(含透地雷達)及落水池

溢洪道構成材料與壩體不同，屬鋼筋混凝土結構物，而鋼筋混凝土常見問題常為施工時造成之乾縮裂縫、澆置冷縫、鋼筋外露及蜂窩孔洞等現象，檢查重點為檢視結構物表面裂縫、孔洞、穴蝕、磨耗剝落及混凝土老化等，其中裂縫容易造成表面水滲入混凝土內部與鋼筋發生氧化而造成鋼筋鏽蝕，而老化問題除目視檢查外，另經非破壞檢測其強度可得知情況，溢洪道檢查如圖 4.2.1。



圖 4.2.1 溢洪道洩槽檢查照片

鑒於溢洪道結構物底部淘空狀況可能引發安全性問題，故採用透地雷達檢測技術來探測溢洪道底部之狀況。111 年檢測之異狀成果與前次(106 年)結果相比，其缺失差異甚小，溢洪道下之既有鋼筋經評估屬完整良好，人員現場檢測照片如圖 4.2.2。



圖 4.2.2 溢洪道透地雷達檢測現場作業照片

落水池檢查除目視檢查外，配合管理中心抽水作業辦理既有混凝土構造物地形測量(採 1/200 之測量標準，以空拍正射影像、RTK 測量儀器及水準儀等進行量測)及地質複查，落水池正射影像與地質圖套疊如圖 4.2.3。



圖 4.2.3 落水池正射影像與地質圖套疊

4.3 取排水設施

取出水工應維持整體結構之完整，方能確保閘門正常操作公共用水及河道放水，目視檢查重點含斜依式取水塔結構及水工機械混凝土固定基座有無錯動、變形、裂縫、白華及鋼筋裸露等，亦檢查進水口閘閥室內部混凝土結構是否正常，現場檢查結果如圖 4.3.1。



圖 4.3.1 取排水設施現場檢查照片

4.4 壩基廊道

牡丹水庫築壩時為增加大壩基礎之阻水效果，在壩體右壩座、左壩座與溢洪道基礎下方設有灌漿廊道，分別為 RG-1、LG-1 及 LG-2。為增加 EL.135m 平台山脊與溢洪道左山脊之穩定性，設有排水廊道 LD-1 及 LD-2 與 LG-1 及 LG-2 連接，並於排水廊道出口處分別設至量水堰 W3 及 W4 以監測壩座之滲流量，另為觀測壩趾滲流量，設有壩趾滲流量觀測廊道，現場檢查照片如圖 4.4.1。

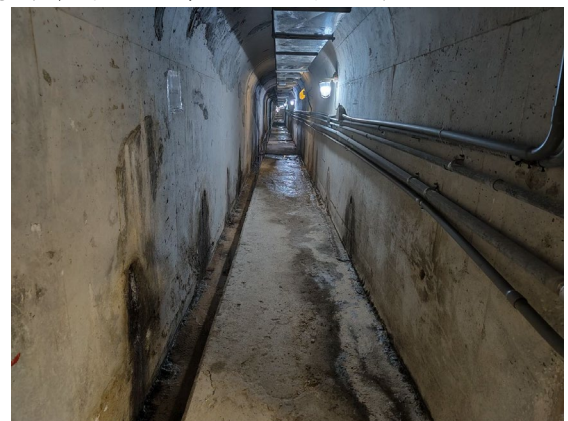


圖 4.4.1 廊道現場檢查照片

4.5 壩區邊坡

壩區邊坡工作主要以目視檢查為主，針對前期有定位記錄或之地表或結構物變形、張裂、錯動、沉陷、變位等現象進行檢查有無擴張或是新增裂縫，以下就壩區主要兩個

邊坡進行說明：

1. 左岸 C 線道路邊坡

C 線邊坡調查工作主要著重於已紀錄之裂隙現況，並調查有無新增裂隙，以了解是否持續發生破壞。經由長期觀測的結果，C 線道路之破壞應仍持續發生，而觀察新增之裂隙數量與破壞之規模已較前期趨緩，現場照片如圖 4.5.1，C 線道路調查成果如圖 4.5.2。

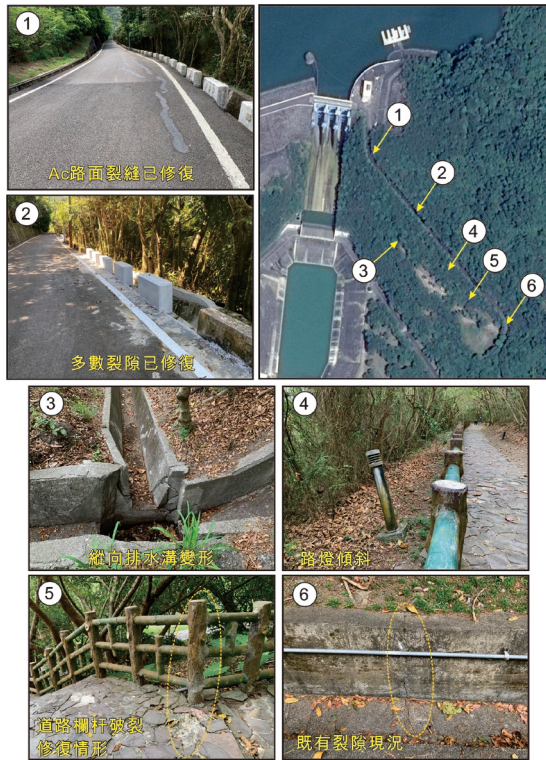


圖 4.5.1 C 線邊坡現場檢查照片

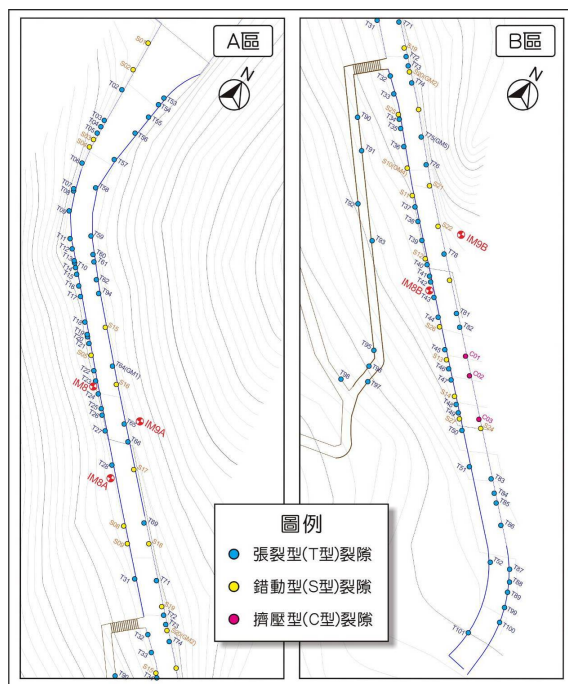


圖 4.5.2 C 線邊坡道路裂縫調查成果

2. 右山脊邊坡

右山脊邊坡調查工作與歷年之檢查檢果比對無明顯變化，目前邊坡尚屬穩定，現場檢查照片如圖 4.5.3、圖 4.5.4。



圖 4.5.3 右山脊邊坡現場檢查照片(1/2)

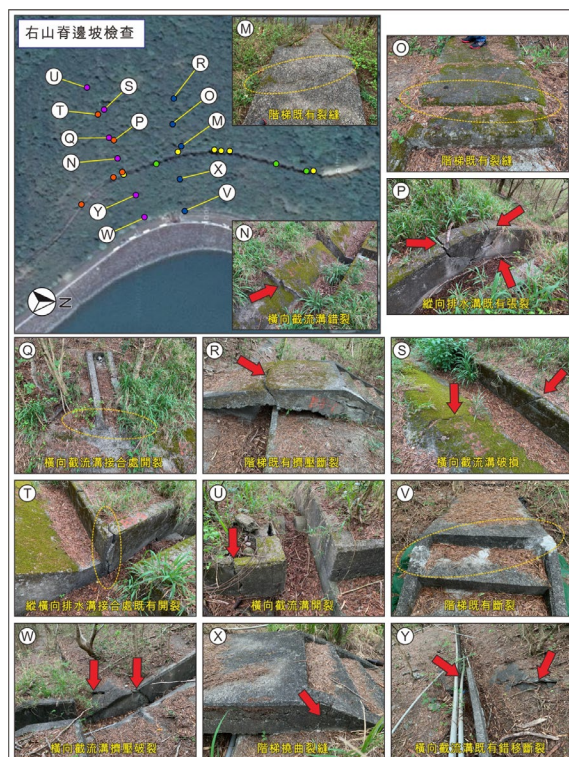


圖 4.5.4 右山脊邊坡現場檢查照片(2/2)

4.6 集水區上游崩塌地調查

安全檢查監測每年於汛期前安排至牡丹水庫上游河道及集水區崩塌地現勘進行紀

錄，由汝仍溪源頭處溯溪而下，直至牡丹水庫周邊，步行約 7 小時，沿途崩塌處定位並記錄，並與歷年之崩塌紀錄進行比對，藉以了解上游是否有新增大型崩塌場域及既有崩塌地現況變化；111 年現勘軌跡與檢查結果如圖 4.6.1、圖 4.6.2 所示。

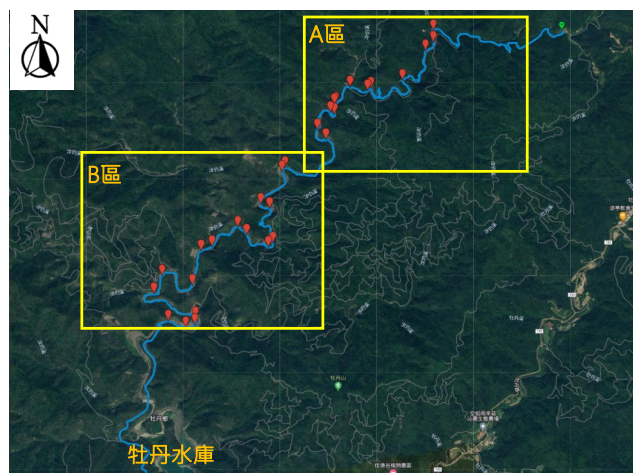


圖 4.6.1 上游河道集水區崩塌地現勘軌跡圖

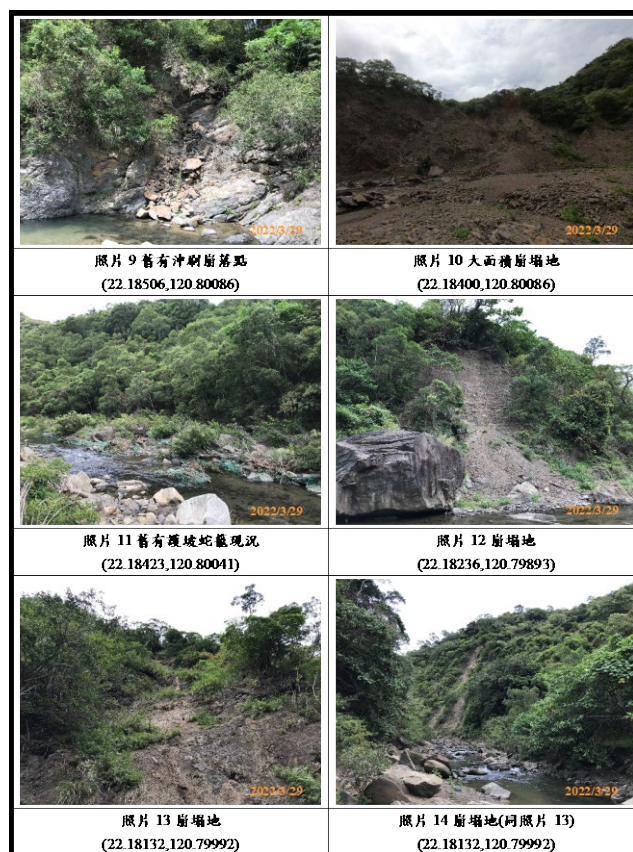


圖 4.6.2 上游河道集水區崩塌地現勘軌跡圖

五、結論

1. 牡丹水庫供應屏東南端十五鄉鎮之一般用水、核三廠、墾丁國家公園、特種營區、船舶及五里亭機場等處之公共用水，以及恆春地區之旱作灌溉用水，為一多功能水庫，故針對水庫之完整性之安全檢查監測則十分重要。
2. 有鑑於土石壩水庫常見之破壞型態(裂縫、淺層滑動、下陷及滲水)，現場檢查依據不同的項目而有對應的項目須檢查，如裂縫是否惡化、裂縫之物理特徵、大壩表面有無可見之晨線或位移現象、有無下陷或為大型沉穴、有無滲水...等，須依有系統之路檢是壩體表面及周圍區域，任何情況均須照相存檔，並用簡圖標明清楚觀察方向及位置，量測與估計數值紀錄，並與前次檢查報告做比對。
3. 大壩現有之監測儀器如：壓力計(壩基水壓計、壩體水土壓計、溢洪道基礎水壓計)、變位觀測(測傾管、水平變位計、沉陷點)、滲流量觀測、地震觀測及壩區週邊邊坡地下水為觀測，皆依據牡丹水庫安全維護手冊所訂定之規範進行監測資料蒐集，目前監測資料皆於安全維護手冊所訂定監測值以內。
4. 配合水庫智慧營運與管理系統可以即時且連續紀錄所需之監測資料如壩頂裂縫變化、W2量水堰資料、壩區邊坡地下水位高層變化、及水庫即時水情資料，配合現場巡視檢查，可有效縮小監測之死角，並可加速了解牡丹水庫即時之現況，有效掌握牡丹水庫之變化與安全性。

六、參考文獻

1. 台灣省水利局南部水資源開發工程處(巨廷工程顧問股份有限公司, 1995年11月), 「牡丹水庫蓄水前安全複核計畫」。
2. 經濟部水利署南區水資源局(2003年5月), 「牡丹水庫第一次定期安全評估」
3. 經濟部水利署南區水資源局(2010年12月), 「牡丹水庫第二次定期安全評估」
4. 經濟部水利署南區水資源局(2016年11月), 「牡丹水庫第三次定期安全評估」
5. 經濟部水利署南區水資源局(2020年12月), 「牡丹水庫安全維護手冊」

- 6..經濟部水利署南區水資源局(黎明工程顧問股份有限公司，2018年1月)，「106年度牡丹水庫大壩安全檢查及監測資料研判分析委託技術服務」
- 7.經濟部水利署南區水資源局(寰正工程技術顧問有限公司，2019年1月)，「107年度牡丹水庫大壩安全檢查及監測資料研判分析委託技術服務」
- 8.經濟部水利署南區水資源局(寰正工程技術顧問有限公司，2020年1月)，「108年度牡丹水庫大壩安全檢查及監測資料研判分析委託技術服務」
- 9.經濟部水利署南區水資源局(寰正工程技術顧問有限公司，2021年1月)，「109年度牡丹水庫大壩安全檢查及監測資料研判分析委託技術服務」
- 10.經濟部水利署南區水資源局(寰正工程技術顧問有限公司，2022年1月)，「110年度牡丹水庫大壩安全檢查及監測資料研判分析委託技術服務」