

出國報告（出國類別：研習）

大壩修復及維護技術研習

服務機關：經濟部水利署

姓名職稱：潘禎哲 科長

派赴國家：美國

出國期間：101年8月18日至101年8月30日

報告日期：101年10月30日

摘要

近年由於氣候變遷致極端降雨事件頻繁平凡，降雨時間集中，強度較以往更甚，且台灣位處環太平洋地震帶，致水庫需不斷承受超大降雨與地震之考驗，恐造成水庫壩體及相關附屬設施之潛在危害，因此透過安全評估及安全檢查等工作，及早掌握水庫安全狀況，並進一部完成必要之設施改善與因應策略，以維持水庫營運操作，確保水庫下游地區民眾生命財產安全，實為水庫安全管理之重要工作。

美國墾務局(U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, USBR)負責美國 400 座以上水壩之操作、維護及結構安全檢查工作，並經常性舉辦大壩安全相關課程研討會。本次「大壩修復及維護技術研習」出國計畫主要為參加美國墾務局於 101 年 8 月 20 日至 27 日舉辦之「大壩安全評估國際研習會暨技術考察」課程，其內容第一部份主要為室內課程，包含歷史災變事件教訓、大壩檢查要領、監測重點等，並安排參觀墾務局工程研究試驗室。第二部份則安排赴 Green Mountain 壩、Granby 壩及 Hoover 壩等，以現場案例說明大壩安全檢查重點。透過室內課程及大壩現地考察，了解美國墾務局於大壩檢查及安全評估等工作之辦理情形及水庫維護管理重點。

目 次

壹、目的.....	1
一、緣起.....	1
二、研習目標.....	1
貳、過程.....	3
一、行程與課程安排介紹.....	3
二、室內課程內容.....	4
(一) 大壩毀壞事件教訓.....	5
(二) 工程研究試驗室參觀.....	15
(三) 大壩安全監測.....	18
(四) 大壩安全之風險分析評估.....	19
(五) 緊急應變設施準備評估.....	20
(六) 大壩長期操作人員訓練.....	21
(七) 混凝土壩之現場檢查重點.....	22
(八) 土石壩之現場檢查重點.....	26
三、大壩現地參觀概述.....	30
(一) Green Mountain 壩考察.....	30
(二) Granby 壩考察.....	33
(三) Hoover 壩考察.....	37
參、心得及建議.....	42

壹、目的

一、緣起

近年由於氣候變遷致極端降雨事件頻繁平凡，降雨時間集中，強度較以往更甚，且台灣位處環太平洋地震帶，致水庫需不斷承受超大降雨與地震之考驗，恐造成水庫壩體及相關附屬設施之潛在危害，因此透過安全評估及安全檢查等工作，及早掌握水庫安全狀況，並進一部完成必要之設施改善與因應策略，以維持水庫營運操作，確保水庫下游地區民眾生命財產安全，實為水庫安全管理之重要工作。

美國墾務局（USBR）負責美國 400 座以上水壩之操作、維護及結構安全檢查工作，為提升國內、外專業人員相關技術與經驗交流，訂於 101 年 8 月 20 日至 8 月 27 日於美國科羅拉多州丹佛市舉辦「大壩安全評估國際研習會暨技術考察(Safety Evaluation of Existing Dams International Technical Seminar and Study Tour)」。該課程安排內容係針對水庫管理人員、技術人員、工程師及地質學者設計，對現有大壩之安全檢查與評估之作法，提供相關技術及經驗課程，並配合現地參訪學習，可提供機會提升辦理水庫安全管理相關業務專業能力。

經濟部水利署對於水庫安全評估管理及相關技術提升與人員培訓相當重視，歷年於水資源作業基金項下均編列「大壩修復及維護技術研習」出國計畫，該出國計畫本次奉核定參加美國墾務局舉辦之「大壩安全評估國際研習會暨技術考察」課程。

二、研習目標

研習會係為使出國人員瞭解水庫安全評估與檢查技術，透過國際交流分享專業經驗，並經由室內相關大壩安全評估課程及現地考察數座水壩之安全評估檢查作業模式，其中包含土石壩及混凝土壩等壩型，藉由參加研習會議及考察行程，實地了解美國墾務局在現地目視檢查及安全評估作法，藉以改進目前作法或缺失，加強檢測能力，同時觀摩美國墾務局在現地目視檢查及安全評估實務作法，與各國參訓代表及專家們交換經驗與心得，加強推展國際事務聯繫，俾利本署未來相關業務之推動。

貳、過程

一、行程與課程安排介紹

本次行程係參加美國墾務局（Bureau of Reclamation）於科羅拉多州丹佛市舉辦為期 10 天（8 月 15 日至 8 月 24 日）之「大壩安全評估與目視檢查國際技術研習會及現地考察」研討會暨數座水壩之現地參觀行程，本署與會人員自 100 年 8 月 18 日由台北啟程前往丹佛，研習課程開始當天，安排與會者簡單自我介紹。本次研習會由加拿大、巴西、巴拿馬、韓國、馬來西亞、斯里蘭卡、以色列、迦納及台灣等 9 個國家共 17 人參與，透過與會者自我介紹，初步得知各與會者之職業、工作內容、學經歷及專長等，有助於後續相互切磋及經驗交流，與會者自我介紹結束後，研討會正式進入研習課程。

研習課程安排如表 2.1，第 1 周（8/20~8/23）主要安排室內研習課程，8/24 安排參觀科羅拉多州 Green Mountain，Granby 壩，8/27 參觀內華達州 Hoover 壩。

日期	時間	內容
8/18(六)	全天	啟程(台北—舊金山)
8/19(日)	全天	墾務局報到及資料整理(舊金山—丹佛)
8/20(一)	上午	與會者自我介紹及墾務局簡介 大壩安全評估歷史背景 大壩設施安全計畫概述 大壩管理維護與展望
	下午	大壩災變事件經驗 參觀墾務局工程研究試驗室與混凝土圓柱體試驗
8/21(二)	上午	安全監測及評估之大壩破壞模式識別

日期	時間	內容
		大壩安全之風險分析與評估 大壩安全之水文災變分析
	下午	地質學者在大壩安全工作之角色概述 混凝土壩及附屬構造之非線性有限元素分析
8/22(三)	上午	混凝土壩與附屬結構物之改造 大壩操作步驟及操作人員訓練 大壩監測
	下午	地震災變研究 地震設計與分析 強地動監測
8/23(四)	上午	附屬結構物檢查 機械設備之檢查與測試 混凝土壩之檢查重點 堆填壩之檢查重點
	下午	現地考察之大壩說明 與會人員發表意見
8/24(五)	上午	考察 GREEN MOUNTAIN 壩
	下午	考察 GRANBY MOUNTAIN 壩
8/25(六)	全天	資料整理
8/26(日)	全天	搭機前往內華達州拉斯維加斯
8/27(一)	全天	考察 Hoover 壩
8/28(二)~ 8/30(四)	全天	研習課程結束、資料整理及回程(拉斯維加斯—舊金山—台北)

二、室內課程內容

8 月 20~24 為室內課程，茲將重點內容彙整摘述如下：



研習課程上課情形(丹佛墾務局)

(一)大壩毀壞事件教訓

依據西元 1900 年至 1983 年統計結果，美國超過 50 英呎(約 15 公尺)之水壩，潰壩比例如下：

- 1.1900—1930：600 座壩有 27 座壩毀壞(比例為 1/22)
- 2.1930—1960：1050 座壩有 3 座壩毀壞(比例為 1/350)
- 3.1960—1983：3137 座壩有 2 座壩毀壞(比例為 1/1568)

由上述數據可知對於大壩建造安全性已越來越受重視，以上統計結果另顯示，大壩破壞模式有 1/3 為溢頂造成、1/3 為壩體或壩基滲漏管湧造成、1/3 為基礎不佳或其他因素造成。以下介紹相關歷史災變案例及所得之教訓：

- 1.溢頂破壞：

(1)South Fork 壩

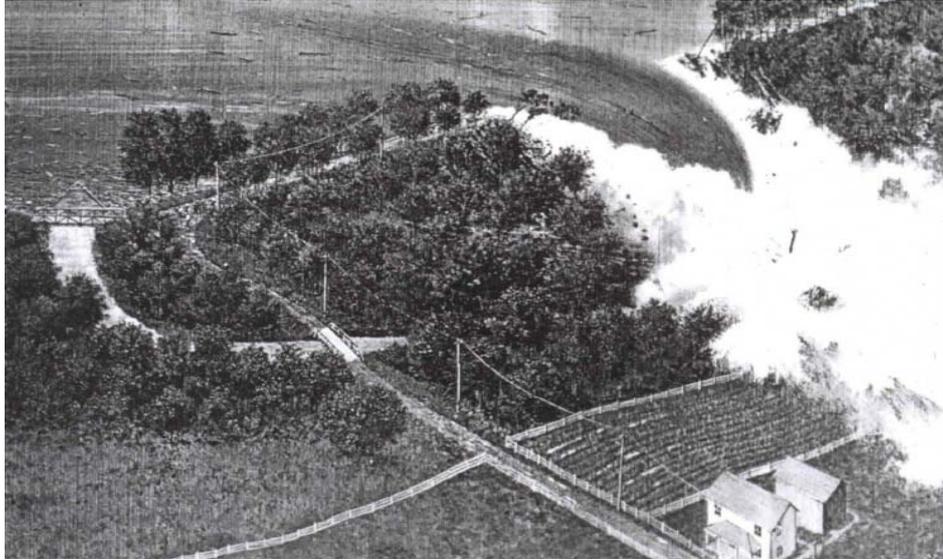
South Fork 壩位於美國 Pennsylvania 州 Johnstown，為一座土石壩，其壩體跨越 Conemaugh 河，當初建造目的為提供從 Johnstown 至 Pittsburg 之運河運輸使用。

災變過程：1889 年 5 月 30 至 31 日發生一場暴風雨，水庫達到滿水位開始洩洪，非常多漂流木及垃圾移動到溢洪道前致溢洪道無法及時排除而堵塞，管理單位曾企圖清除溢洪道之雜物，但未成功，水位持續上升，最後終於溢頂，隨後大壩沖蝕毀壞，洪水波浪達 9 至 12 公尺高，潰壩洪水流過下游溪谷後溢淹 Johnstown 與其他較小社區。洪水水流大約在 10 分鐘內橫掃 Johnstown，造成極大的災害，共計超過 2,200 人喪生，為美國歷史上重大災難事件。

災變原因：最直接的原因為壩無法負荷入流洪水，而出水工關閉及溢洪道阻塞為無法及時排除水流之主因。

災變教訓：

- a.大壩設計、修復及操作缺乏專業工程技術，將導致嚴重後果。
- b.未事先認知溢洪道可能阻塞導致溢頂，無法及時因應改善。



South Fork 壩溢頂情形



South Fork 壩潰壩後下游災損情形

(2) Taum Sauk Upper Reservoir 壩

Taum Sauk Upper Reservoir 壩位於 Missouri 州 St.Louis 西南邊 200 公里處，大壩於 1960 年至 1963 年建造完成，為一腎臟型混凝土面版填石壩。

災變過程：2005 年 12 月 14 日，Taum Sauk Upper Reservoir 壩發生溢頂破壞，在早上 5 時 15 分時於壩體西北端造成一處 183 公尺潰口，庫水大約在 30

分鐘內流失，所造成的洪水估計尖峰出流量達4,250cms，水流通過Johnson Shut-ins State公園，值得慶幸是當時為12月，並無人在該處露營，惟仍造成公園管理人員、太太及3位年幼小孩被水流帶至離家400公尺處，所幸全部生還。

災變原因：壩體內部填石建造方式未充分夯實，導致堆填較為疏鬆，造成差異沉陷，導致局部溢頂現象產生。

災變教訓：填石壩未充分夯實，可能導致嚴重差異沉陷後果。



Taum Sauk Upper Reservoir 壩潰壩前照片



Taum Sauk Upper Reservoir 壩潰壩後照片

(3)Frias 壩

Frias 壩位於阿根廷中部 Mendoza 附近，位於首都 Buenos Aires 以西約 1,000 公里的 Andean foothills 處，於 1940 年代建造，壩高 15 公尺，壩頂長 62 公尺，壩體上游面與下游面坡度均為 1：1，為一均質填石壩，上游側則有 0.3 公尺厚之鋼筋混凝土面版，下游側為砂漿砌石面版，壩頂以相似之砂漿砌石方式施築，蓄水量為 20 萬立方公尺。溢洪道設計排洪量為 40cms，相當於最大紀錄洪水量。

災變過程：

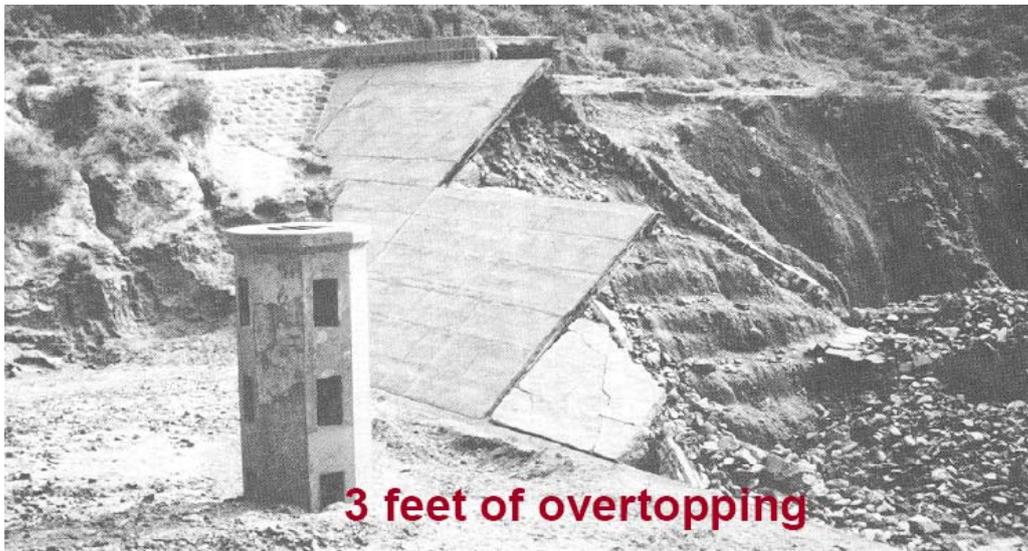
1970 年 1 月 4 日，暴雨造成 Frias 河水位暴漲，水庫蓄水容量及溢洪道排洪能力不足以應付洪水，約 1 公尺高洪水溢頂 15 分鐘後終致潰壩，潰壩後釋放 2 公尺高的混濁洪水通過下游 Mendoza 城，最終造成 42 人死亡及 60 人失蹤。

災變教訓：

- a.即使較小的壩發生毀壞，也能造成重大傷亡。
- b.潛在可能發生的洪水風險計算，如同地震一樣，無法達到非常精確。
- c.溢頂後可能於極短時間內潰壩，即使有混凝土面版加強，也無法減低溢頂破壞發生機率。
- d.統計上罕見之降雨情形仍可能會發生。
- e.潰壩 3 年後，已在原址附近建造一座新的土石壩，並減緩上下游坡度為 3.5：1 與 3：1，也將溢洪道排洪量加大 10 倍至 390cms，蓄水量也提高至 230 萬立方公尺，以應付未來可能面臨的降雨。



Frias 壩潰壩後照片



Frias 壩潰口處照片

2. 管湧破壞

(1) Fontenelle 壩

Fontenelle 壩位於懷俄明州 (Wyoming) 西部 Green 河，於 1964 年建造完成，壩高 39 公尺，壩長超過 1.6 公里，為一座土石壩。大壩建造期間，在溢洪道入口區域發現一些接縫開裂及裂縫，這些裂縫角度朝向壩座下游面發展，為了避免滲流，沿著溢

洪道入口區域進行了灌漿處理，並增設不透水層。

災變情形：

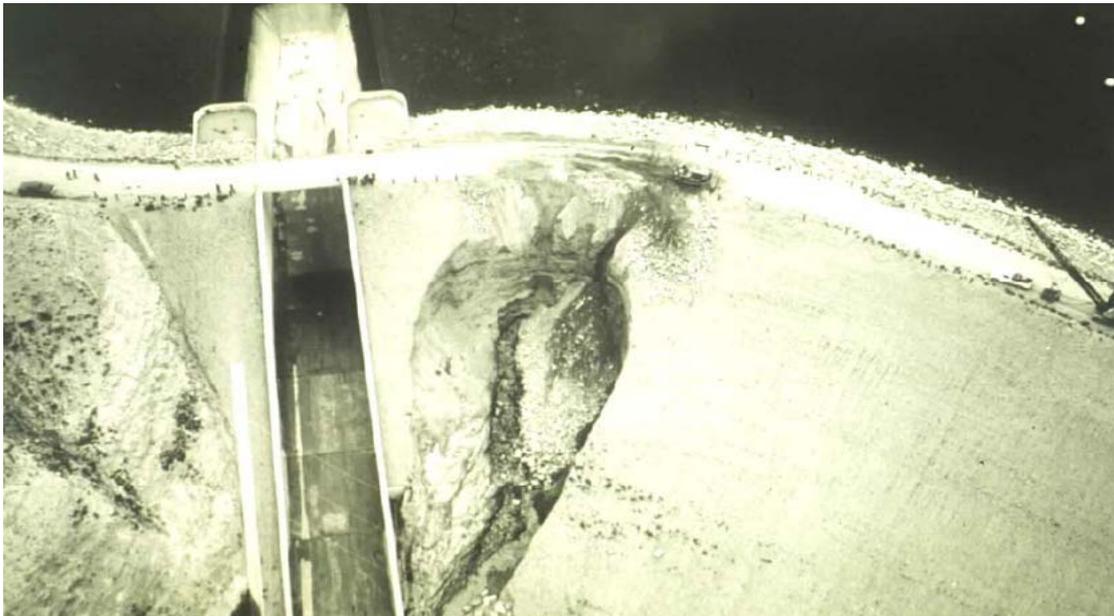
在 1964 年夏季水庫初次蓄水，當水位達 15 公尺深時，大壩下游側 600 公尺處發生滲流，便停止進一步蓄水，直到滲流穩定值約 170 公升/秒，且滲流位置離下游面還有一段距離，故當時並不認為具有進一步危害，並於後續持續蓄升水位。蓄升水位後，滲流區域滲水持續增加，並發現鄰近右壩墩溢洪道出水管附近出現新的滲水點，隨後在左壩墩下游 910 公尺處亦發現滲水點。隔年夏季，降雨量較以往高，水庫水位僅差 0.6 公尺就達滿水位，溢洪道開始操作，在此高水位情形下，滲流量約 1,980 公升/秒。1965 年 9 月 3 日早晨，大壩壩體下游面靠近右壩墩位置出現一處濕潤點，中午時，滲水由濕潤點處開始流出，開始形成侵蝕與泥坑，當日晚上，該處滲流量已增加至 140 公升/秒。隔天早上，滲流水增加至 590 公升/秒，超過 7,600 立方公尺的壩體材料已經被帶出壩體下游坡面。在此同時，出水工出口被圍堰阻擋，正辦理修復中。當時立即移除圍堰以使用出水工降低水位，並對滲漏位置坑洞進行填補處理。9 月 5 日早上，滲水量沒有進一步增加，滲水孔洞填補似乎止住了壩體進一步侵蝕，然由於填補孔洞造成水流由更高高程位置滲出。9 月 6 日早上，壩頂突然發生 6 公尺直徑範圍的坍塌，坍塌高度達到 9 公尺，此時壩座交界岩盤已經出露，此時水沿岩盤裂縫滲出，後續進行坍塌填補後已沒有進一步坍塌，蓄水位開始以每天 1.2 公尺速率降低，滲

漏點也開始降低滲水量直到完全停止滲漏。

災變原因：滲流透過壩墩交界從下游面流出為主因，顯然壩墩灌漿處理沒有發揮效果。首先，岩隙裂縫之沉積及可溶性材料可能影響灌漿效果，此外，在陡峭的壩墩很難達到適當的灌漿效果，因為須使用低壓灌漿以避免造成基礎位移。

災變教訓：

- a. 土石壩採黏土材料可以抵抗滲流造成之侵蝕情形。
- b. 滲流水體積大小與壩墩岩盤裂縫大小有關。
- c. 基礎處理是非常重要的。
- d. 水庫應設置緊急出水設施，能夠迅速降低水位。
- e. 在災變未發生前所顯露異常情形，若未完整調查且進行充分討論研擬對策，可能造成後續更大災害。



Fontenelle 壩破壞情形



Fontenelle 壩頂坍塌破壞情形(照片下方為工作人員)

(2)Teton 壩

Teton 壩位於美國愛達荷州(Idaho)東部 Teton 河谷上，由美國墾務局設計，於 1975 年建造完成，為分區式中央心層滾壓土石壩，壩高 93 公尺。大壩完成後原本預計以每天 0.3 公尺速度蓄水，但由於未預期的暴雨及主要的出水設施未完成施工，無法有效控制水位蓄升速率，水位以將近每天 1.2 公尺速率蓄升，在 1976 年 6 月接近滿水位。

災變情形：

1976 年 6 月 5 日早上 7 時許，發現大壩下游坡趾處滲水，上午 7 時 30 分，滲流水有混濁情形且滲流量增加至 710 公升/秒，上午 10 時 30 分，下游壩面滲漏出口延伸至壩墩交接面，隨即發佈下游地區警報。上午 11 時 30 分，大壩下游面淘刷出一個大坑洞，隨後 30 分鐘內，由於坑洞不斷湧水淘刷，造成坑洞接近壩頂，約 11 點 55 分，壩頂崩毀，很快的整個壩高全部崩毀，至當日晚上 6 時，庫水幾乎

洩光，將近 3.08 億立方公尺蓄水以尖峰流量達 28,300 立方公尺/秒的速度排出。造成下游地區 11 人喪生及超過 5 億美元的經濟損失。

災變教訓：

- a. 基礎處理非常重要，需建立多道防線防範管湧。
- b. 水庫設施需能夠有效控制水位蓄升速率。
- c. 設計工程師必須於大壩建造各階段赴現地瞭解現地條件並作出適當調整。
- d. 工程設計上之濾層可排出滲水，並適當保護心層。



Teton 壩初期管湧情形



Teton 壩破壞程度持續擴大



Teton 壩潰壩情形

(二)工程研究試驗室參觀

8月20日下午參觀墾務局工程研究試驗室，配合現場各項試驗海報展示或電腦模擬動畫，由實驗室人員引導解說，並現場示範大型混凝土圓柱體抗壓試驗。



水工模型試驗一階梯式跌水消能



水工模型試驗－溢洪道設計



水工模型試驗－潰壩



大型混凝土抗壓試驗設備



現場示範圓柱混凝土抗壓試驗

(三)大壩安全監測

大壩安全管理有兩項例行性工作可瞭解大壩安全情況，包含例行性安全檢查機制及例行性蒐集與分析大壩監測資料等，因此設置必要的監測儀器並蒐集與分析監測資料對大壩安全而言非常重要，大壩監測優點如下：

- 1.協助瞭解大壩安全情形
- 2.對潛在問題提出警戒
- 3.透過監測資料可解釋可能存在之問題
- 4.各項預期情況的驗證
- 5.協助評估改善既有缺陷方法
- 6.協助研究

此外，設置監測儀器可協助管理者節省許多時間去

探查大壩內部之潛在問題，並避免既有設施存在問題進一步惡化，監測儀器之選擇上考量如下：

- 1.足夠的精度
- 2.可提供長時間使用
- 3.可抵抗外在環境之破壞
- 4.維護上之便利性
- 5.低成本
- 6.能提供所需監測資料之前提下儘可能簡單，避免過度複雜。

大壩監測儀器主要種類如下：

- 1.水壓監測
- 2.土壓監測
- 3.變形監測
- 4.滲流監測

有效之監測儀器計畫元素：

- 1.監測儀器之配置需有良好的設計
- 2.監測儀器需有良好安裝
- 3.監測儀器需有合適的讀取及維護方式
- 4.監測資料需要快速且精確的傳送
- 5.深入分析監測資料之方法
- 6.對監測人員實施必要的教育訓練
- 7.良好的溝通與討論機制
- 8.持續高度的警覺性

(四)大壩安全之風險分析評估

壑務局有 371 座較高風險的壩，其中超過 50% 壩已經建造超過 50 年以上，甚至有部分已經超過 100 年以上。由於近年來洪水與地震事件日益頻繁，大壩下游側

人口亦逐漸成長，造成潰壩風險及災損程度大幅增加。大壩安全風險分析為大壩安全評估之工作之一，透過風險評估了解大壩潛在可能之破壞模式，以提供排定設施改善優先順序之決策參考，典型的大壩安全風險分析步驟如下：

1. 確認破壞模式
2. 決定所考量載重之頻率
3. 計算破壞可能性
4. 計算潛在可能之生命損失
5. 估算風險及辨識不確定性
6. 作出結論
7. 提出建議

(五) 緊急應變設施準備評估

緊急應變設施完善程度與對應緊急事件的應變能力息息相關，緊急設施準備係為了減少特殊事件災害所造成的生命及財產損失。緊急設施準備主要因下游生命財產損失風險程度分級：低度、中度及高度風險等有所差異，惟通常考量下列項目：

1. 現地交通條件：不僅包含現地操作人員在各種惡劣環境下進入大壩進行機電設備操作，還包含緊急情形下確保各種修復設備材料之運送通道，可降低大壩破壞之災害。
2. 安全管制機制：避免有心人士破壞相關設備。
3. 現地常規：包含緊急管理原本所需具備之相關事項：
 - (1) 標準作業程序：包含各項操作維護工作之相關手冊、準則。
 - (2) 緊急應變計畫：發生地震、洪水事件致結構或設備安

全產生問題時之處理方式。

- (3)操作維護日誌：內容須包含大壩各項操作維護紀錄，設施檢查與觀察到之異常狀況均應詳實記錄。
- (4)操作維護訓練：對大壩管理人員之操作維護訓練非常重要，可確保操作人員了解如何操作維護及對緊急狀況做出應變。
- (5)緊急應變設備：適當之緊急應變設備需包含：
 - a.通訊系統：合適的通訊系統需在緊急及不利情況下發揮作用，須提供負責緊急操作之人員或團隊所需之通訊服務。
 - b.警報系統：大壩需有機電設備之警報系統以使在現地或遠處之員工對發生不利事件有所警覺。
 - c.輔助的電力系統：當主要的電力系統於特殊事件遭受破壞時，輔助的電力系統必須發揮作用。
 - d.遠端操作設備：係指在大壩現地以外地點操作設備能力，如操作溢洪道閘門等。
 - e.水位急洩降設施：通常在一緊急事件當中，為確保大壩安全，在最短時間內洩降水位是非常重要的，一般須具備高程較低的出水設施。

當大壩可能破壞時，緊急應變設施及緊急應變計畫運作相當重要，身為水庫管理者，平時就應檢討所管水庫發生緊急狀況之應變設備是否可發揮功能，管理人員是否可依據相關應變計畫進行妥適的應變作為，透過平時的準備、檢討與演練，才可於災害真正發生時降低生命與財產的損失。

(六)大壩長期操作人員訓練

為確保大壩操作維護工作之安全性，美國墾務局負

責美國西部 17 個州之水資源管理，並負責超過 400 座水壩之操作、維護與大壩安全管理。對水庫管理人員之訓練方式，主要分為室內課程講授與現地操作訓練等。其中室內課程教學，至少每 3 年舉辦 1 次，現地操作訓練至少每 6 年 1 次，受訓對象以大壩管理操作者與其代理人為主，對於新進的管理人員，則參加下一次的訓練課程。

室內訓練課程主要之課程主題如下：

1. 以往大壩破壞與操作上之事故教訓
2. 管理人員的職責與義務
3. 水庫入流量的預測
4. 緊急應變處置
5. 職業安全
6. 大壩維護技術
7. 設施檢查要領
8. 監測儀器判讀要領
9. 各式維護檢查表單

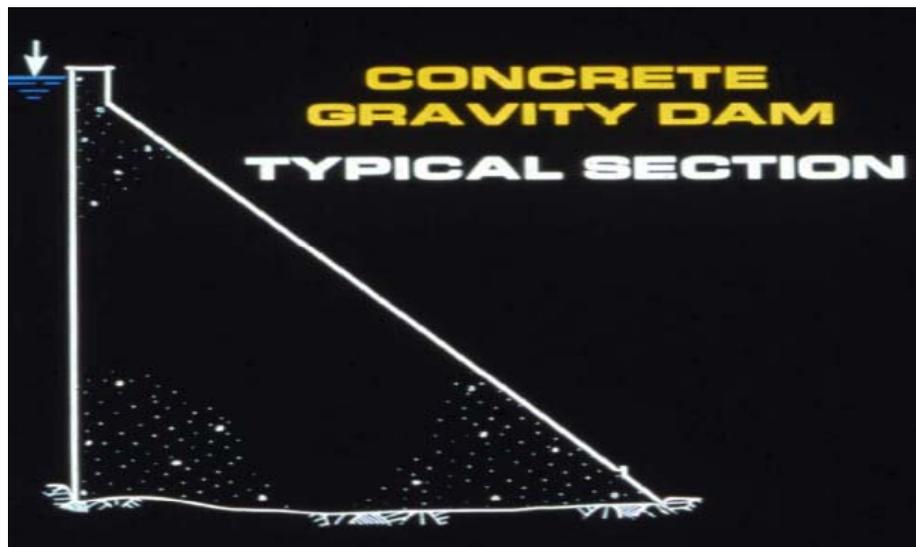
現地操作訓練，對象亦以大壩管理操作者與其代理人為主，現地解說需完整操作每一道閘門及執行潤滑保養等維護工作。並透過現場討論，瞭解大壩安全維護管理可能存在之潛在問題與應注意事項。完成訓練課程後，後續會有每年的測驗以瞭解管理人員是否具備所需之管理技能。

(七) 混凝土壩之現場檢查重點

1. 混凝土壩之主要形式可分為重力壩、拱壩、扶壁壩與等三類，摘述如下：

(1) 重力壩

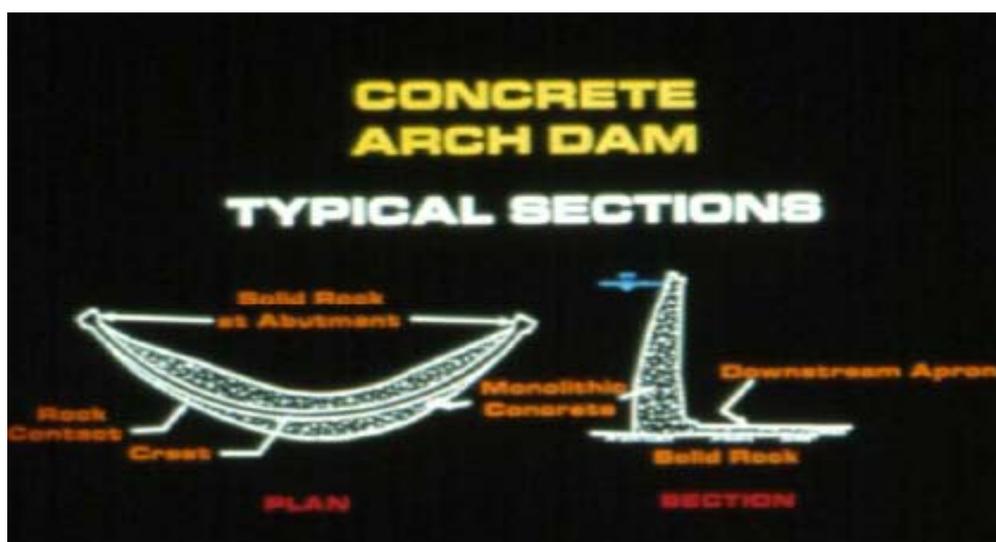
不穩定之潛在因子為沿著基礎之滑動、上舉力及壩體裂縫所造成之不利影響等，其中垂直上舉力可能與基礎寬度大及壩體與壩基接觸面積太大有關，垂直上舉力及蓄水區水壓形成之水平推力可能造成壩身延下游壩趾處或沿壩體裂縫位置傾倒。由於壩體斷面較厚，壩表面之混凝土劣化，對整體穩定性之影響程度，較薄拱壩為小。



混凝土重力壩斷面圖

(2) 拱壩

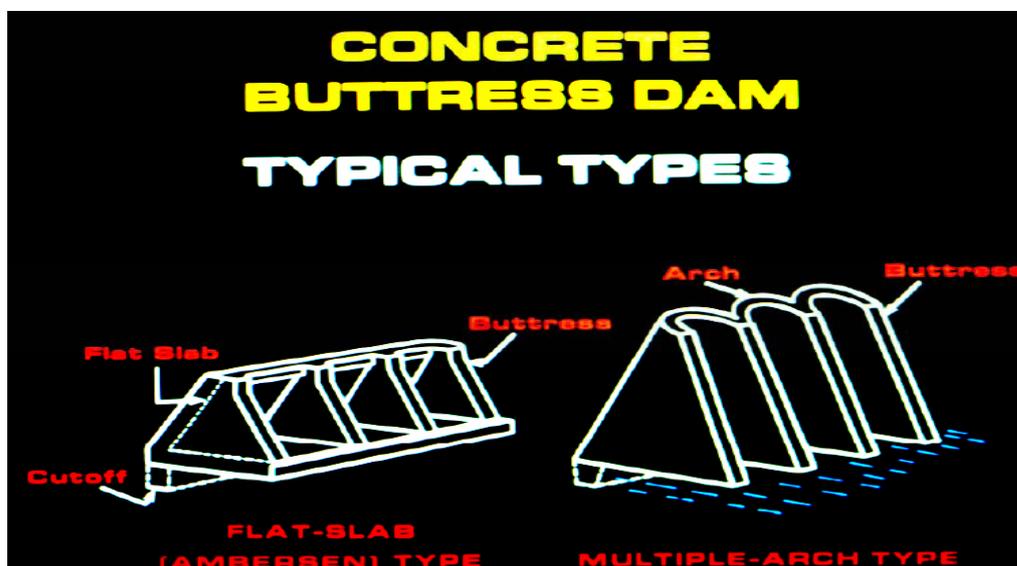
因其斷面厚度較薄、接觸面積小，上舉力之影響較混凝土重力壩為小，較薄之厚度造成滲流路徑縮短，混凝土表面劣化影響程度亦比厚斷面之混凝土重力壩影響為大。



混凝土拱壩斷面示意圖

(3) 扶壁壩

相對較薄平面或弧形面版由一系列的扶壁板支撐連結，上游蓄水壓力透過面版傳遞至扶壁版再傳遞至基礎。



扶壁壩斷面示意圖

2. 混凝土壩之主要可能缺陷：

- (1) 混凝土強度及耐久性降低。
- (2) 壩基強度、耐久性、水密性降低。

- (3)壩身滲漏。
- 3.混凝土壩須特別加強檢查位置：
 - (1)基礎與壩座。
 - (2)壩體上游及下游壩面。
 - (3)廊道。
 - (4)壩頂。
- 4.壩基及壩座檢查重點：
 - (1)位移之徵兆：是否發現裂縫、沉陷及異常位移等。
 - (2)混凝土是否有局部碎裂現象。
 - (3)在相同蓄水高程下，滲漏量是否有增加之趨勢，以研判基礎是否有弱化趨勢。
 - (4)是否有伴隨滲漏之水平裂縫。
 - (5)混凝土壩安全檢查應於高蓄水位與低蓄水位情況下分別安排，以利比對。
- 5.上游及下游壩面檢查重點：
 - (1)是否有裂縫。
 - (2)因凍融造成表面混凝土剝落或惡化。
- 6.廊道檢查需注意重點：
 - (1)是否有裂縫、尤其是伴隨著滲水之裂縫、異常位移及滲水量增加情形。
 - (2)廊道內監測儀器判讀非常重要，如上頂壓力計、變位計、擺線儀等，每一次監測結果均要與之前監測結果比對，以發現是否有不利之發展趨勢。
- 7.壩頂檢查重點：
 - (1)需檢查壩頂是否有裂縫出現，並研判深度及是否有往上游或下游壩面延伸之跡象。
 - (2)壩頂各點有無異常之差異沉陷及橫向位移。

(3)混凝土有無碎裂或其他劣化情形。

(八)土石壩之現場檢查重點

1.檢查重點位置

- (1)基礎與壩座、
- (2)上游及下游坡面。
- (3)壩頂。

2.一般檢查考量

- (1)要詳細觀察土石壩壩頂、上下游坡面之所有表面及周邊位置。
- (2)整組檢查人員之檢查區域應展開，使檢查範圍擴大。
- (3)檢查應於不同水庫水位情況下分別進行。

3.檢查行動進行

- (1)將檢查情形拍照紀錄。
- (2)對重要之檢查結果標示位置與利用繪圖等方式描述現況。
- (3)透過量測與計算方式量化檢查結果，如尺寸、流量等。
- (4)與之前檢查結果進行比較分析。

4.土石壩之主要缺陷

(1)滲漏：

- a.如果觀察到異常滲漏情形，必須對該處進行持續監測，並詳細記錄下列事項：
 - (a)所有滲漏出口位置應詳細描述紀錄。
 - (b)滲漏水量及水質情況是否清澈。
 - (c)檢查當時之降雨情形紀錄。
 - (d)檢查當時之水庫水位。
- b.為調查滲漏水來源，有時會於壩體上游面採用染劑，並於下游滲漏處觀察滲漏水，以確認滲漏水

是否來自於庫水，惟使用染劑觀察時間取決於滲漏水穿越壩體或壩基之不同滲漏路徑。

c.倘若觀察滲漏水伴隨細粒料沉積，須特別加強紀錄位置及細粒料流出速度，但一般而言，細粒料帶出之速度較不易量測。

d.很多土石壩含有趾部排水設施，能將壩體及壩基之滲流水集中排除。因此進行現地檢查須注意下列事項：

(a)應檢視設計圖說，以了解趾部排水出口位置。

(b)量測趾部排水流率，最簡易的方式就是將流出水以管路將其收集在一已知體積的容器內，再量測容器充滿水的時間，據以計算流率。

(c)以往不同水庫水位對應趾部排水流率之資料應預先檢視，倘於相同水庫水位情形下觀察到趾部排水流率有異常提高情形，可能須進行進一步調查。

(d)土石壩的現地檢查中，滲漏水的流率及水質的混濁度需要詳實量測並進行比較分析，倘若有異常滲漏情形產生，則必須進行進一步監測調查，並採取適當措施，以避免情形惡化。

(2)裂縫：土石壩壩頂或壩面可能產生裂縫，裂縫主要可區分縱向裂縫、橫向裂縫及乾縮裂縫等，分述如下：

a.縱向裂縫為平行於壩軸之裂縫，可能之成因如下：

(a)大壩填築材料之不均勻沉陷。

(b)不穩定之潛在滑動面已經開始形成，此種形況下可能出現弧形裂縫。

(c)地震造成。

- b. 橫向裂縫為垂直於壩軸之裂縫，可能之成因如下：
 - (a) 可壓縮性之築壩材料座落於陡峭或不規則壩座上。
 - (b) 地震造成。
 - c. 乾縮裂縫係由築壩土壤材料乾縮造成，裂縫形式通常無固定，或有時為類似蜂巢圖形，一般而言常於壩頂或下游坡面出現。
 - d. 就上述裂縫而言，橫向裂縫可能提供土石壩之滲流管道，當裂縫之深度達到蓄水面以下時，會加速壩體材料之侵蝕，甚至最後破裂導致潰壩，應特別注意。
 - e. 檢查者發現裂縫應注意下列事項：
 - (a) 拍照並記錄裂縫位置、深度、長度、寬度及裂縫分布形式。
 - (b) 加強監測裂縫的變化。
 - (c) 研判裂縫可能的成因，並採取適當的修復措施。
 - (d) 倘裂縫深度低於蓄水位，應適當調降水位。
- (3) 不穩定之邊坡滑動：包含淺層滑動及深層滑動，分述如下：
- a. 大壩上游面之淺層滑動通常起因於過陡的邊坡，因水庫水位急洩降造成滑動。土石壩上游面之淺層滑動並不會對壩體之完整性造成立即性之危害，但可能造成取水口阻塞，或導致更進一步的深層滑動。
 - b. 大壩下游面之淺層滑動常起因於過陡的邊坡，邊坡滑動將造成土石壩材料強度降低，可能造成滲水之不利影響。

- c.若觀察到壩體有淺層滑動情形，檢查者應採取行動如下：
 - (a)拍照且記錄滑動面位置。
 - (b)測量且記錄滑動面延伸之長度及位移量。
 - (c)觀察附近是否有裂縫產生，尤其是往上坡面產生之裂縫，可能有再次滑動可能。
 - (d)檢查滑動面附近是否發現滲水情形。
 - (e)對滑動區域持續監測是否有惡化趨勢。
 - d.深層滑動不論是產生於壩體上游面或下游面，對壩體安全均有極為不利影響，一般而言，深層滑動發生後，主要靠降低蓄水位或排水來避免大壩可能造成之破壞。
 - e.深層滑動主要初期現象為趾部有隆起現象，或有弧形裂縫產生，若發現有深層滑動跡象，檢查者應採取行動如下：
 - (a)持續觀察裂縫或並進一步監測滑動面發展情形，並研擬補強改善措施。
 - (b)尚未完成改善前，應維持較低蓄水位。
- (4)沉孔：為土石壩表面出現凹陷之處，主要包含沉陷與坍孔兩類，分述如下：
- a.土石壩沉陷可能造成出水高的損失。
 - b.庫水持續作用下造成上游坡面侵蝕，以致細粒料被帶出造成拋石沉陷
 - c.當沉陷較大內部細料流失時，有可能形成坍孔。
 - d.檢查者的行動如下
 - (a)局部沉陷發生時，應拍照紀錄沉陷位置、尺寸、深度及延伸範圍等。

(b)探查底部是否具有較深的孔洞形成，及探查孔洞深度。

(c)持續加強觀測確保情形未惡化，並提出合適的改善對策。

三、大壩現地參觀概述

(一)Green Mountain 壩考察

8月24日上午行程為參觀Green Mountain壩，該壩為土壩，位於科羅拉多州KREMMLING東南方約21公里之藍河(Blue River)河道上，藍河惟科羅拉多河之支流。Green Mountain壩為科羅拉多大湯瑪森計畫(Colorado-Big Thompson Project)之一，該壩由美國墾務局於1938~1942年建造完成，壩高為94公尺，壩頂長350公尺，蓄水量為1.9億立方公尺，於大壩左壩座設置溢洪道，由3個弧形閘門控制流量。壩下游側之電廠設置2單元發電機組，總發電量為21.6百萬瓦。



Green Mountain 壩下游壩面



Green Mountain 壩上游側



Green Mountain 壩溢洪道弧形閘門開啟關閉測試照片



Green Mountain 溢洪道、靜水池及發電廠



現場管理人員解說 Green Mountain 壩安全檢查
評估項目與作業流程

(二)Granby 壩考察

8 月 24 日下午行程為參觀 Granby 壩，Granby 壩座落於科羅拉多河上，位於科羅拉多州 Granby 東北方約 9 公里，如同 Green Mountain 壩，該壩亦為科羅拉多大湯瑪森計畫之一，該壩為土壩，由美國墾務局於 1941~1950 建造完成，壩頂長度為 262 公尺，壩高為 91 公尺，另外，設置有長度共 3,877 公尺之圍堤(壩)，形成 Granby 水庫，集水面積 810 平方公里，蓄水量為 6.66 億立方公尺，為大湯瑪森計畫中最大的一座水庫，其攔蓄科羅拉多河水及抽取下游 Willow 溪水至水庫內蓄存，以為計畫用水所需，該水庫並無配置發電設施。溢洪道鄰近左壩座，由既有岩盤開挖而成，設計流量 330CMS。



現場管理人員解說 Granby 壩安全檢查評估項目與作業流程



Granby 壩下游壩面



Granby 壩上游側



Granby 壩溢洪道



Granby 壩壩頂



Granby 壩豎井電梯直通 70 公尺下之取出水工閘室

(三)Hoover 壩考察

8月27日行程為參觀胡佛壩(Hoover Dam)，該壩位於科羅拉多河東南方約35英里拉斯維加斯之黑峽谷，大壩右岸為內華達州、左岸為亞利桑納州，於1931年由第三十一任總統赫伯特·胡佛為化解美國大蕭條以來的困境及加速西南部地區的繁榮，動工5000人興建。1935年9月30日由富蘭克林·德拉諾·羅斯福總統主持竣工儀式。水電工程自1936年竣工發電。建成之時為當時世界上最大的混凝土結構和發電設施。壩建成後形成米德湖，該湖為西半球最大人工湖，湖區有6個碼頭，景緻優美，已成為美國人遊艇、滑水、釣魚、露營度假聖地。

胡佛水壩在1931年3月11日開工，首席工程師是法蘭克·高爾，水壩經費由政府資助，因此他必須在政府限定時間之內完工，否則將會面臨一大筆罰款。在他們建造水壩前，必須先開闢一條通往峽谷的道路，以運送物資。由於當時正處於經濟大蕭條時期，失業人數大增，因此為水壩的建造提供了一群數量可觀的廉價勞工。在建造水壩之前，必須先把科羅拉多河分流，但河流兩旁滿佈懸崖，因此惟一方法是在峽谷兩邊鑽挖爆破，開闢四條分流隧道，然而開闢分流隧道的工人生活和工作環境每況愈下，令許多工人對高爾越來越不滿，甚至策劃罷工，1931年8月7日，工人正式罷工，當時仍有大量有資格取代他們的失業人士，因此工人是冒一個很大的風險，甚至有機會失去工作。高爾選擇開除罷工的工人，然後重新招聘。1932年，分流工程成功，開始建壩，政府給予的限期為4年半，時間雖多，但高爾欲提早完工，以獲得大筆獎金。1935年，水壩提早了兩

年完工，而高爾亦獲得一筆獎金。胡佛水壩工程浩大，建設工程中有 112 名工人因各種事故失去性命。

胡佛壩壩體為一混凝土厚拱結構，壩高 221.4 公尺，壩頂長度為 379.2 公尺，寬度為 14 公尺。大壩由 260 萬立方公尺混凝土澆注而成，包含相關附屬設施，其混凝土澆注總量為 333 萬立方公尺。大壩設施尚包括 4 座取水塔，塔高 120 公尺，頂端直徑 19.2 公尺，每一取水塔連接一壓力鋼管至電廠。

電廠位於胡佛壩底部，設置 17 部發電機，裝機容量 135 萬 KW，每年產生 2,080 兆瓦時，足夠 150 萬人使用，為內華達州、亞利桑那州、加州三地的主要供電來源之一。大壩兩岸各設一座溢洪道，溢洪道總容量 11,330 立方公尺/秒，一共洩洪過兩次，一次是試用，而另一次才是正式洩洪。水庫建造後提供拉斯維加斯、洛杉磯、聖地牙哥、鳳凰城及內華達州、亞利桑那州、加州等地居民商業及民生用水。



Hoover 壩下游壩面



Hoover 壩橫跨亞利桑納與內華達州



Hoover 壩壩頂



Hoover 壩取水塔



Hoover 壩下游電廠



Hoover 壩電廠內部發電機組

參、心得及建議

- 一、美國大大小小水庫中，以休閒、野生動物(漁類)與控制洪水等為目的之水庫即占約 70%，以灌溉及供水為目的之水庫不及 20%，其餘 10% 為以發電等為目的之水庫。而就水庫擁有者而言，屬於政府者僅占約 30%，屬於私人者約 70%，與本國之差異很大。
- 二、研習過程經由與各國參與人員互動，全部 17 個學員中，政府機關與私人顧問公司各占一半，除本國外，其餘國家之學員認為他們的水庫營運重點在於經濟考量，也就是水力發電規模與能量，如同參訪胡佛水壩營運，其開發成本在營運 50 年內即回收，之後持續發電供水，更進一步發展觀光，創造更多營收。
- 三、透過大壩安全風險評估作業，分析大壩潛在可能之破壞模式與影響，提出相對因應方案之資訊，可提供決策者排定大壩設施改善優先順序參考。
- 四、現地檢查工作及監測資料與判讀為預防潰壩災害之根本，因此，第一線管理人員依循檢查機制並落實各項作業程序，係確保水庫安全之最重要工作。此外，透過監測資料收集及分析，可協助監測人員及時發覺壩體及附屬設施異常情形，並進行進一步處置，以避免可能之潰壩危害。
- 五、大壩工程設計標準基於歷史統計資料與經驗，於成本效益考量之下，不存在有零風險之設計，在加上施工品質控制不確定性，並無法百分之百確保水庫不會發生潰壩，因此，面對氣候變遷，極端水文事件發生之可能性，預防潰壩及採取因應對策是必需的，例如水庫改造以增加水庫排

洪能力，不讓水位溢過壩頂；而假設潰壩發生，下游地區之警報及避難措施須有計畫，並應預先研擬演練，以將損失降到最低。

六、潰壩較易發生於大壩完工後蓄水初期，因此大壩完工後初次蓄水階段須特別加強檢查及監測作業，尤其是土石壩，應對蓄水方式採分階段辦理，每蓄升一階段即須辦理一段時間之監測，確保各項監測及檢查結果無異常情形後，再辦理下一階段的蓄升，若蓄升階段於檢查或監測結果有異常情形，則必須以調降水位方式，先降低水庫處於高水位之風險，並詳細調查異常原因予以改善，以確保後續蓄升階段安全性。本國興建中之湖山水庫為中央心層分區土石壩，即將於 2015 年完工蓄水，其水位蓄升計畫、蓄水前安全複核及相關監測與檢查均需審慎評估與執行。

七、當水庫大壩監測發生有異常狀況，常需透過檢視之前的資料，以研判發生問題可能之原因，因此，有關水庫設計、施工及後續營運維護階段之各項圖說、照片、檢查及監測資料等文件必須保存完整。