

出國報告（出國類別：研習、考察）

第 27 屆大壩安全評估與檢查 國際技術研習會

服務機關：經濟部水利署

姓名職稱：廖建鑫 副工程司

派赴國家：美國

出國期間：105 年 6 月 4 日至 105 年 6 月 16 日

報告日期：105 年 9 月 6 日

摘要

近年來因全球暖化、氣候變遷所產生的天然災害不斷，臺灣地處亞熱帶氣候，雨季及颱風所帶來的降雨，也較以往強度增強、延時更長，且臺灣位於環太平洋地震帶，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，因此透過水庫安全檢查等工作，及早掌握水庫安全狀況，並進一步完成必要之設施改善，實為水庫安全管理之重要工作，亦可確保水庫下游地區民眾生命財產安全。

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，並經常性舉辦大壩安全相關課程研討會，本次參加墾務局 2016 年 6 月 4 日至 16 日舉辦之「第 27 屆大壩安全評估與檢查國際技術研習會」，研習課程分為室內課程及現地參訪，主要課程內容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。現地部份則參觀克利埃勒姆壩(Cle Elum Dam)、伊斯頓分洪壩(Easton Diversion Dam)及卡奇斯壩(Kachess Dam)等，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.....	3
一、緣起.....	3
二、研習目標.....	4
貳、過程.....	6
一、行程與課程安排介紹.....	6
二、室內課程內容摘述.....	8
(一) 大壩災變事件教訓.....	8
(二) 大壩安全監測.....	21
(三) 大壩安全之風險分析評估.....	22
(四) 緊急應變設施準備.....	23
(五) 混凝土壩之現場檢查重點.....	25
(六) 土石壩之現場檢查重點.....	31
(七) 墾務局工程研究試驗室參觀.....	33
三、大壩現地參觀概述.....	36
(一) 6/13 克利埃勒姆壩及伊斯頓分洪壩現地參觀.....	36
(二) 6/14 卡奇斯壩現地參觀.....	40
參、心得及建議.....	42

壹、目的

一、緣起

近年來因大氣中二氧化碳濃度上升，導致因全球暖化、氣候變遷所產生的天然災害不斷，臺灣地處亞熱帶氣候，雨季及颱風所帶來的降雨，也較以往強度增強、延時更長，如 2009 年八八水災，因為莫拉克颱風所帶來的創紀錄雨量，造成臺灣自 1959 年八七水災以來最嚴重的水災及民眾重大生命財產損失。加上臺灣位於環太平洋地震帶，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，因此透過水庫安全檢查等工作，及早掌握水庫安全狀況，並進一步完成必要之設施改善，實為水庫安全管理之重要工作，亦可確保水庫下游地區民眾生命財產安全。

美國壑務局(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，並經常性舉辦大壩安全相關課程研討會，本次參與壑務局 2016 年 6 月 4 日至 16 日舉辦之「大壩安全評估與檢查國際技術研習會及現地考察 (Safety Evaluation of Existing Dams International Technical Seminar and Study Tour)」，研習課程包含室內課程及現地參訪，主要

課程內容包含歷史災變事件教訓、大壩檢查要領、監測重點等，並安排參觀壑務局工程研究試驗室。現地部份則參觀克利埃勒姆壩(Cle Elum Dam)、伊斯頓分洪壩(Easton Diversion Dam)及卡奇斯壩(Kachess Dam)等，了解美國壑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，並針對水庫管理人員、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。

二、研習目標

透過本次出國研習，可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，並經由室內研討包含大壩設計、施工、操作養護及實地參觀克利埃勒姆壩(Cle Elum Dam)、伊斯頓分洪壩(Easton Diversion Dam)及卡奇斯壩(Kachess Dam)等數座水壩之安全評估檢查，藉由參加研習及考察行程，實地了解美國壑務局在現地目視檢查及安全評估作法，期能改進我國目前作法或缺失，加強檢測能力，同時藉由不同因素所造成之潰壩案例分析，做為日後檢討改進

之依據。本次研習除學習美國墾務局在現地目視檢查及安全評估實務最新作法，並可與各國參訓代表及專家、學者們交換經驗與心得，以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(6 月 6 日至 6 月 14 日) 之「大壩安全評估與檢查國際技術研習會及現地考察(Safety Evaluation of Existing Dams International Technical Seminar and Study Tour)」研討會與水壩現地參觀行程，本署參加人員自 105 年 6 月 4 日由桃園國際機場啟程前往丹佛。本次研習會有巴西、迦納、瑞典、芬蘭、巴拉圭、西班牙、印度、韓國及臺灣等 9 個國家共 33 人參與，研習課程由各國參加者簡單自我介紹開始，研習課程安排如表 2.1，6 月 6 日至 6 月 9 日為室內研習，6 月 10 日至 6 月 14 日為現地參訪。

日期	時間	內容
6/4(六)	全天	啟程(桃園－舊金山)
6/5(日)	全天	轉機至科羅拉多州丹佛(舊金山－丹佛)
6/6(一)	上午	與會者自我介紹 墾務局簡介 大壩安全歷史與展望 大壩災變事件教訓
	下午	操作與維護工作展望 團體合照 水工試驗室參觀及混凝土圓柱測試

6/7(二)	上午	大壩安全監測及評估失敗模式識別 大壩安全之風險分析評估
	下午	大壩安全之水文風險分析 地質學者在大壩安全工作之重要角色概述
6/8(三)	上午	混凝土壩與附屬結構物之更新改造 大壩操作 SOP 及人員訓練 壩體監測儀器
	下午	大壩之地震設計與分析 大壩安全之地震風險研究 地震注意事項與反應 洪泛模式分析 緊急應變設施評估
6/9(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 土石壩之檢查
	下午	滲流與內部沖蝕之研討 壩體隧道損毀探討
6/10(五)	全天	搭機前往華盛頓州西雅圖(丹佛－西雅圖)
6/11(六)	全天	水利及文化考察(西雅圖)
6/12(日)	全天	前往華盛頓州埃倫斯堡(西雅圖－埃倫斯堡)
6/13(一)	全天	參訪克利埃勒姆壩及伊斯頓分洪壩(埃倫斯堡)
6/14(二)	全天	參訪卡奇斯壩(埃倫斯堡－西雅圖)
6/15(三) ~6/16(四)	全天	課程結束及回程(西雅圖－桃園)



於丹佛墾務局研習課程上課情形

二、室內課程內容摘述

本次美國墾務局（Bureau of Reclamation）所安排 6 月 6 日至 6 月 9 日室內課程，主要針對大壩安全評估與檢查之相關領域，引用墾務局所提供研習講義及相關參考資料，摘述如下：

（一）大壩災變事件教訓

依據西元 1900 年至 1983 年統計結果，美國超過 50 英尺(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。

以下依破壞模式介紹相關案例及所得到之教訓：

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。

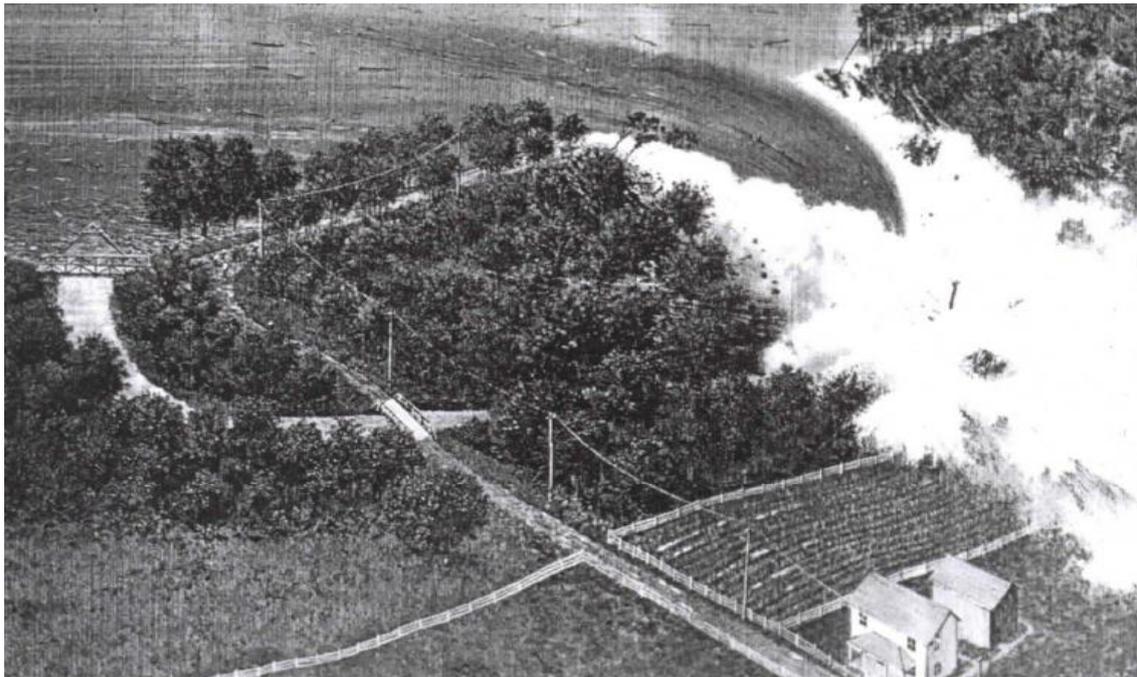
災變過程：1889 年 5 月 30 至 31 日發生一場暴風雨，水庫達到滿水位開始洩洪，非常多漂流木及垃圾移動到溢洪道前致溢洪道無法及時排除而堵塞，管理單位曾企圖清除溢洪道之雜物，但未成功，水位持續上升，最後終於溢頂，隨後大壩沖蝕毀壞，洪水波浪達 9 至 12 公尺高，潰壩洪水流過下游溪谷後溢淹 Johnstown 與其他較小社區。洪水水流大約在 10 分鐘內橫掃 Johnstown，造成極大的災害，共計超過 2,200 人喪生，為美國歷史上重大

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，為一混凝土面版土石壩。

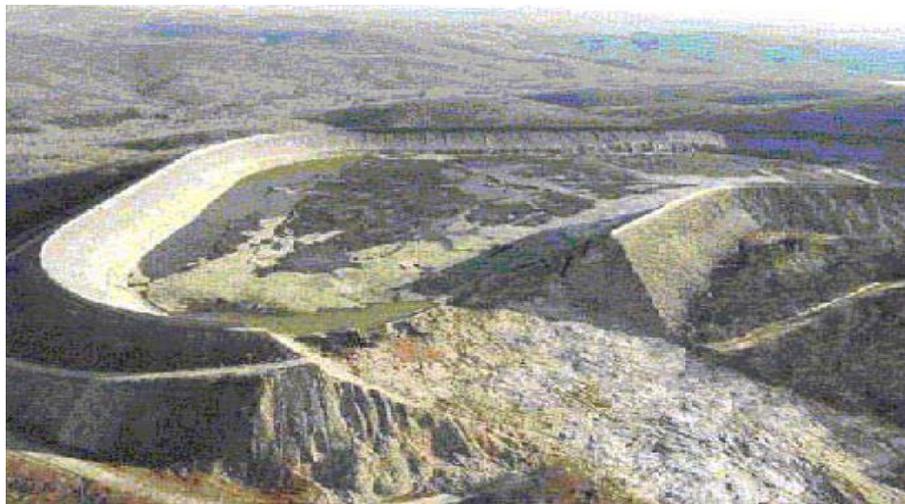
災變過程：2005 年 12 月 14 日，Taum Sauk Upper Reservoir 壩發生溢頂破壞，在早上 5 時 15 分時於壩體西北端造成一處 183 公尺潰口，庫水大約在 30 分鐘內流失，所造成的洪水估計尖峰出流量達 4,250cms，水流通過 Johnson Shut-ins State 公園，值得慶幸是當時為 12 月，並無人在該處露營，惟仍造成公園管理人員、太太及 3 位年幼小孩被水流帶至離家 400 公尺處，所幸全部生還。

災變原因：壩體內部填築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：土石壩未充分夯實，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，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。

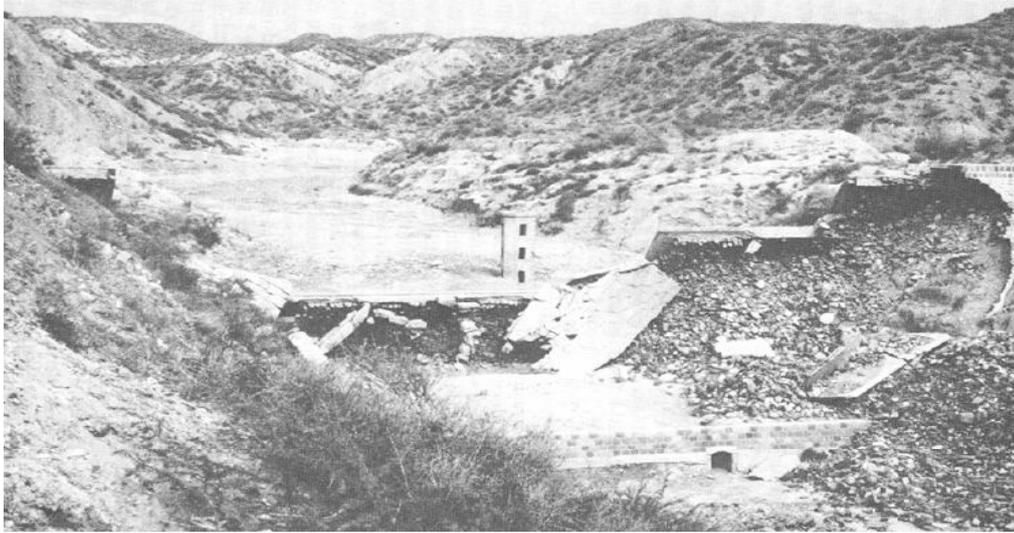
災變原因：水庫蓄水容量及溢洪道排洪能力不足以應付洪水，導致洪水溢頂。

災變教訓：

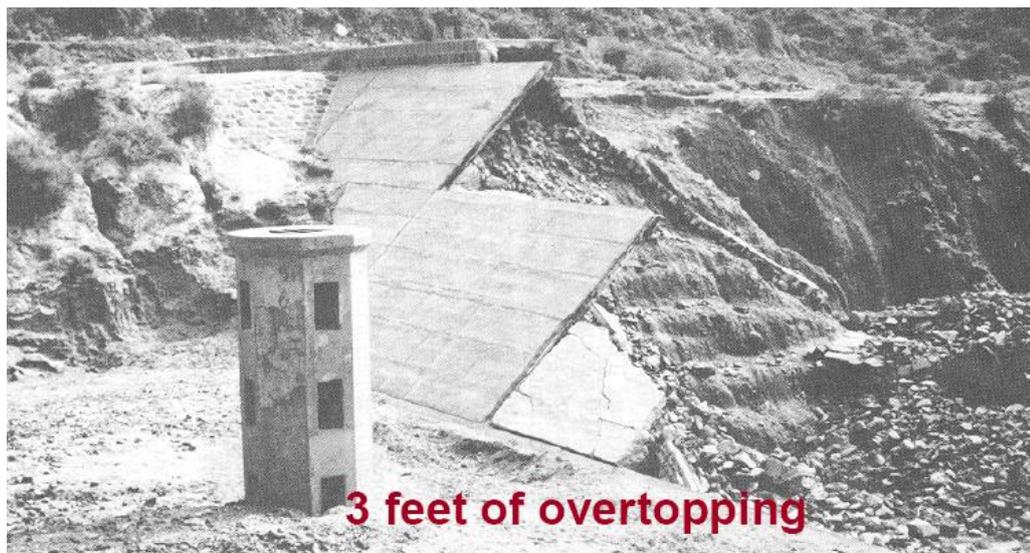
- a. 即使較小的壩發生毀壞，也能造成重大傷亡。
- b. 潛在可能發生的洪水風險計算，如同地震一樣，無法達到非常精確。
- c. 溢頂後可能於極短時間內潰壩，即使有混凝土面

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。

災變過程：

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(第 1 天)早晨，大壩

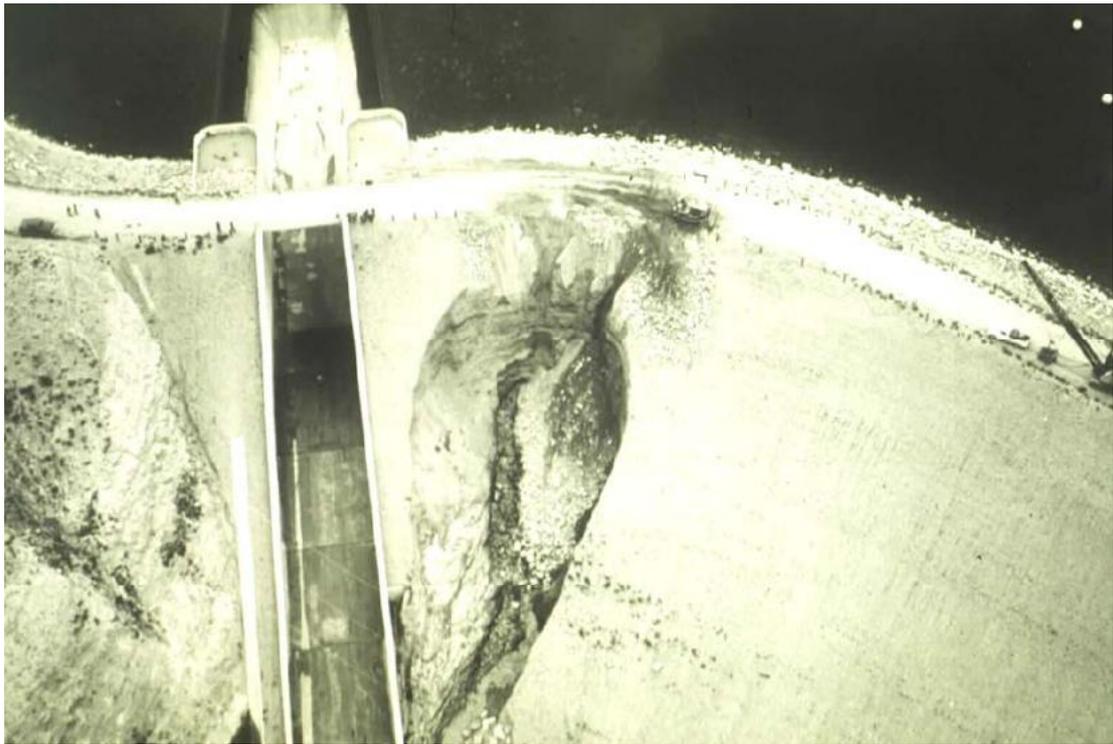
壩體下游面靠近右壩墩位置出現一處濕潤點，中午時，滲水由濕潤點處開始流出，開始形成侵蝕與泥坑，當日晚上，該處滲流量已增加至 140 公升/秒。隔天(第 2 天)早上，滲流水增加至 590 公升/秒，超過 7,600 立方公尺的壩體材料已經被帶出壩體下游坡面。在此同時，出水工出口被圍堰阻擋辦理修復中，當時立即移除圍堰以使用出水工降低水位，並對滲漏位置坑洞進行填補處理。第三天早上，滲水量沒有進一步增加，滲水孔洞填補似乎止住了壩體進一步侵蝕，然由於填補孔洞造成水流由更高高程位置滲出。第四天早上，壩頂突然發生 6 公尺直徑範圍的坍塌，坍塌高度達到 9 公尺，此時壩座交界岩盤已經出露，此時水沿岩盤裂縫滲出，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

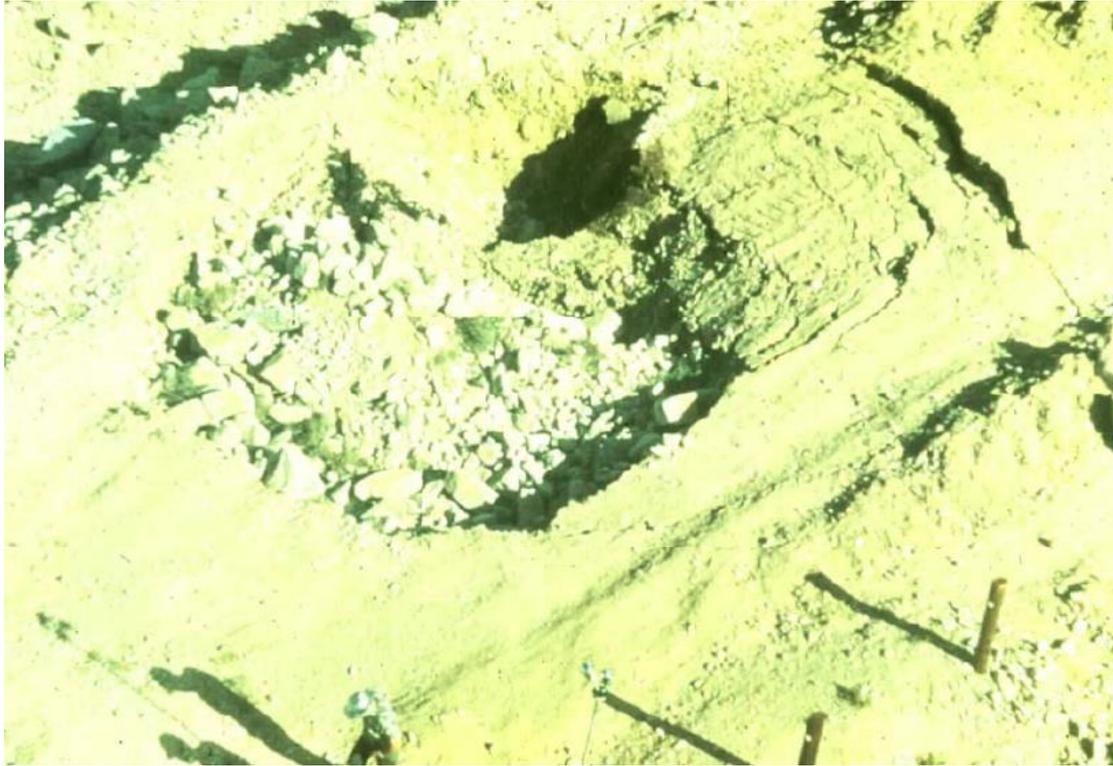
造成基礎位移。

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。

災變過程：

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。

災變原因：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，超過原預計蓄水速度 4 倍，水庫在 1976 年 6 月已接近滿水位，無法即時阻止管湧情況持續惡化。

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) 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

(三) 大壩安全之風險分析評估

墾務局有 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

(四) 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。

（五）土石壩之現場檢查

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、檢查注意事項

- (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、檢查流程

- (1) 將檢查情形拍照紀錄。
- (2) 對重要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、土石壩可能發生之破壞

(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。

(六) 混凝土壩之現場檢查

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。

(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。

(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，蓄水壓力透過面版傳遞至扶壁版再傳遞至基礎。

2、混凝土壩之可能缺陷：

- (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、混凝土壩須加強檢查位置：

- (1) 基礎與壩座。
 - a. 位移之徵兆：是否發現裂縫、沉陷及異常位移等。
 - b. 混凝土是否有局部碎裂現象。
 - c. 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。
 - d. 是否有伴隨滲漏之水平裂縫。

e.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。

(2) 壩體上游及下游壩面。

(3) 廊道。

a.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。

b.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。

(4) 壩頂。

a.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。

b.壩頂各點有無異常之差異沉陷及橫向位移。

c.混凝土有無碎裂或其他劣化情形。

(七) 工程研究試驗室參觀

6月6日下午參觀墾務局水工研究試驗室，由實驗室人員引導並進行現場解說，對於實驗室內各項水工模型試驗精細程度及大型混凝土抗壓試驗設備留下深刻印象。



參觀工程研究試驗室解說情形



水工模型試驗解說情形



混凝土試體於蒸氣室養護情形



大型混凝土抗壓試驗設備

三、大壩現地參觀概述

(一) 6/13 克利埃勒姆壩及伊斯頓分洪壩現地參觀

6月13日安排現地參觀行程第一站為參觀克利埃勒姆壩(Cle Elum Dam)，克利埃勒姆壩為土石壩，位於華盛頓州克雷愛隆姆河之上，是一個由天然湖泊加以興建壩體而成一個水庫，蓄水體積 5.4 億立方公尺，壩高為 50.3 公尺，壩體填築材料計 1,078,800 立方公尺，於 1977-1979 年針對溢洪道的部分進行了改善更新。



於壩頂工作站進行基本資料解說



壩頂解說照片



溢洪道閘門控制設備



溢洪道採取圓弧式閘門

參觀行程第二站為參觀伊斯頓分洪壩(Easton Diversion Dam)，位於伊斯頓，華盛頓附近的亞基馬河，是一座混凝土重力壩，壩高 20 公尺，使用約 4,434 立方公尺之混凝土。為了減少鮭魚溯河產卵時的阻礙，興建有魚梯供鮭魚洄游。



壩體外觀



Z 字型洄游魚道

(二) 6/14 卡奇斯壩現地參觀

6 月 14 日行程為參觀卡奇斯壩(Kachess Dam)，位於伊斯頓西北部約 3.2 公里的卡奇斯(Kachess)河，壩高 35 公尺與填築材料約 152,910 立方公尺，也是在一個天然湖泊的末端建築而成，蓄水量 2.95 億立方公尺。溢洪道約是 877 公尺，由一個 360 公尺明渠連接到 425 米 2.7 公尺直徑隧道，最後再接由 92 公尺明渠到河道。



卡奇斯壩壩及取水塔



溢洪道及控制閘門



現場示範壩體檢查

參、心得及建議

- 一、人類藉由修築壩體以達到蓄水、取水灌溉等目的已有多
年歷史，藉由本次研習可瞭解，壩體的破壞通常是有跡
可循地，可能是微小的滲漏、壩體坡面的潮濕、輕微的
壩體變形或是初期的管湧等，但是如果這些微小的變
化，將可能進一步導致嚴重的潰壩事件，嚴重影響下游
居民的生命財產安全。
- 二、因為潰壩災害發生前皆有跡象可循，所以不可忽視現地
檢查工作及監測資料蒐集判讀之重要性，如何建立一套
檢查機制並確實落實，實為確保水庫安全之最重要工
作。如果能於發現初期，進行進一步處置，是可以避免
事態持續發展成潰壩危害。
- 三、配合水工模型試驗、電腦分析模擬、精確之設計及計算，
可以大幅提高水庫安全，但仍無法 100%確保未來不會
發生潰壩，所以針對潰壩所可能造成大壩下游地區之警
報及避難措施，應預先研擬演練，以因應潰壩可能造成
之危害，並將損失降到最低。
- 四、美國自 911 之後，對於防範恐怖攻擊的意識大幅提高，

經研究水庫確實可能成為恐怖攻擊的目標，因此美方對於水庫操作管理已提高恐攻風險意識並加入防恐的必要措施，本次課程中亦安排了專門人員進行防恐措施的說明。以本次參訪為例，即便是由美國墾務局所安排之參觀，當進入水庫機房或是操作室時，仍是不允許拍照攝影地。臺灣雖然發生恐攻的風險目前雖然不高，但在全球化的趨勢之下，就水庫管理操作，仍應適時提高警覺。

五、大壩安全管理人員之教育訓練非常重要，尤其第一線管理人員應接受訓練，以具備研判大壩現地檢查結果及分析監測資料之基本能力，避免潛在危險已存在而不自知。