

出國報告（出國類別：研習）

美國墾務局大壩安全 SEED 研習班

服務機關： 經濟部水利署
姓名職稱： 司徒美惠 副工程司
派赴國家： 美國
出國期間： 114年5月31日至6月13日
報告日期： 114年9月8日

摘要

本研習班出國期間為 114 年 5 月 31 日至 6 月 13 日，共 14 日，其中包含室內課程共 24 堂、參訪實習共 3 站。室內課程主題包含美國水庫現況、水庫安全管理制度、大壩安全事件、水庫維安計畫、檢查及監測要領、風險管理策略、地質與壩體安全、水文及地震危害度、緊急應變計畫及演練、標準作業程序及維管訓練、潛在破壞模式、更新改善案例、水庫淤積與永續等，均由壩務局技術人員講授。本報告針對研習課程內容提出日常維護管理及檢查監測、緊急應變整備工作、人員訓練與經驗傳承、研討學習工作與國際交流等面向之建議事項。參訪實習前往壩務局實驗室、Pueblo Dam（普韋布洛壩）及 Hoover Dam（胡佛壩），由第一線工作人員說明水庫維護管理工作、檢查及監測實務等。

目次

一、前言	1
(一) 臺灣水庫安全管理現況	1
(二) 美國墾務局 SEED 課程簡介	1
二、研習目的	2
三、研習過程 (含內容摘要)	2
(一) 研習行程	2
(二) 室內課程	4
課程 1：墾務局簡介 (30 分鐘, Tyler Quick)	4
課程 2：大壩安全發展史 (45 分鐘, Kent Walker)	5
課程 3：墾務局維安計畫 (45 分鐘, Matt Tracy)	8
課程 4：大壩安全事件案例 (2 小時, Amanda Dolezal)	9
課程 5：設施操作及維護 (45 分鐘, Daniel Staton)	13
課程 6：監測與評估—潛在破壞模式辨識 (2 小時, Amanda Dolezal)	15
課程 7：大壩安全風險分析及風險評估 (1.5 小時, Dom Galic)	16
課程 8：墾務局洪水風險評估方法 (45 分鐘, Mussie Tekie Beyene)	18
課程 9：地質與大壩安全 (45 分鐘, Ali Warren)	19
課程 10：大壩的儀器監測 (1.5 小時, Montana Foulke)	20
課程 11：水庫淤積、永續及大壩安全 (1.5 小時, Melissa&Jennifer)	22
課程 12：水庫的水工機械 (1 小時, Lucas Adams)	23
課程 13：地震危害度研究及通報與應變機制 (75 分鐘, Dan Levish)	24
課程 14：大壩的耐震設計及分析 (45 分鐘, David Gillette)	26
課程 15：潰壩洪水淹沒範圍模擬及災損估算 (45 分鐘, Jose Cestero)	27
課程 16：緊急應變計畫及演練 (1 小時, Ben Claggett)	29
課程 17：附屬設施檢查及評估 (1 小時, Jaron Hasenbalg)	31
課程 18：標準作業程序及維管訓練 (45 分鐘, Amanda Dolezal)	32
課程 19：混凝土壩及附屬設施更新改善 (1 小時, Jason Schneider)	34
課程 20：滲流與內部沖蝕 (2 小時, Peter Irey & Bret Lingwall)	37
課程 21：溢洪道閘門雜物堵塞問題 (45 分鐘, Melissa Shinbein)	38
課程 22：Hyatt 壩研究案例 (45 分鐘, Elizabeth Ouellette)	39
課程 23：混凝土壩檢查技術 (1 小時, Jaron Hasenb)	41
課程 24：土石壩檢查技術 (1 小時, Jaron Hasenb)	41
學員分享：臺灣大壩安全管理 (20 分鐘, 司徒美惠)	42
(三) 參訪實習	43
參訪 1：參觀墾務局實驗室 (丹佛聯邦中心)	43
參訪 2：現地模擬檢查—Pueblo Dam (普韋布洛壩)	46

參訪 3：參觀 Hoover Dam（胡佛壩）	50
四、心得及建議事項	58
（一）日常維護管理及檢查監測	58
（二）緊急應變整備工作	60
（三）人員訓練與經驗傳承	60
（四）研討學習工作與國際交流	61

附錄

附錄 1、結業證書	附-1
附錄 2、學員分享－臺灣大壩安全管理簡報	附-2
附錄 3、墾務局實驗室簡章（開放預約團體自由取用）	附-13
附錄 4、墾務局設施檢視綜合報告－土石壩（空白）	附-19
附錄 5、墾務局設施檢視綜合報告－混凝土壩（空白）	附-26

本文

一、前言

(一) 臺灣水庫安全管理現況

臺灣公告水庫共 95 座（一級 20 座、二級 26 座、三級 49 座），其主管機關為經濟部，訂有「水利建造物檢查及安全評估辦法」（110 年 10 月 5 日修正發布），規範主管機關及水利建造物興辦人應辦事項，其中包含水庫的安全檢查及評估工作。

為利興辦人可具體執行前述工作，經濟部訂有「水利建造物檢查及安全評估技術規範 蓄水與引水篇」（113 年 2 月 1 日修正生效），供各水庫管理單位據以辦理安全評估工作，再循序提請「水利建造物檢查及安全評估小組」（含蓄水與引水工作分組）審議。各水庫亦依設施特性訂有「安全維護手冊」（定期於水庫安全評估檢討修正），供各水庫管理單位據以辦理定期或不定期之例行檢查、監測及維護工作。

透過執行團隊（以工程顧問公司為主）、興辦人（水庫管理單位）、主管機關（經濟部）的分層把關及監督機制，確保水庫及附屬設施安全狀況良好，維持其各項使用標的（如供水、防洪、發電、教育及觀光等）。

(二) 美國墾務局 SEED 課程簡介

美國內政部墾務局（Bureau of Reclamation）設置目的係為處理美西地區的水資源開發及設施維運，目前負責超過 400 座水壩或送水設施的操作、維護及安全狀況。為確保內部人力具有足夠專業知識可以達成前述任務，墾務局持續辦理內部研習班，亦已招收超過 6,000 名國內及國際單位的技術與行政人員參訓。

「SEED」為「Safety Evaluation of Existing Dams」的縮寫，即「既有大壩安全評估」，本研習班以綜合指引的方式授課，課程內容提供水庫管理人員執行或強化檢查及評估作業參考，並提供增進評估技術的方法。設計授課對象為負責設計、施工、操作、維護及安全管理之水庫管理人員、主管機關、工程師、地質師及技術人員等。

本（114）年度舉辦之國際研習班為第 33 屆「Safety Evaluation of Existing Dams (SEED) Technical Seminar and Study Tour」，完整翻譯為「既有大壩安全評估（SEED）技術研討會及現勘行程」，簡化為本報告標題「美國墾務局大壩安全 SEED 研習班」。本屆研習班共有來自 10 個國家、23 位學員參與。

二、研習目的

為瞭解壑務局水庫安全評估執行現況、觀察其課程安排關注重點、蒐集室內課程及參訪實習資料，並藉由參加國際研習班機會與其他國家學員交流學習、對外介紹臺灣及臺灣的水庫安全技術發展情形等，爰編列參訓經費 1 名赴美受訓。

三、研習過程（含內容摘要）

（一）研習行程

本研習班出國期間為 114 年 5 月 31 日至 6 月 13 日，共 14 日，其中包含實際研習 10 日（含必要交通時間），以及去程（5 月 31 日及 6 月 1 日）及回程（6 月 12 日及 6 月 13 日）共 4 日國際交通時間，行程總表如表 1，室內課程（含學員分享）及參訪實習摘要說明如下，詳細內容如後「(二) 室內課程」及「(三) 參訪實習」。壑務局並於研習課程結束後，頒給各學員結業證書，詳[附錄 1](#)。

1. 室內課程共 24 堂，總時數 25.75 小時，分別由 20 位講師授課（均為壑務局內部人員）；另含學員分享共 4 場，由壑務局事前調查後安排到行程內（採自由報名制），分別由加拿大、紐西蘭、臺灣及冰島學員進行分享。
2. 參訪實習共 3 站，分別為參觀壑務局實驗室（丹佛聯邦中心）、模擬檢查 Pueblo Dam（普韋布洛壩）及參觀 Hoover Dam（胡佛壩）。

表 1、行程總表

日期	時間	行程
5/31 (六)	23:55~	桃園機場—長榮航空 ● BR16 臺灣時間 23:55~加州時間 20:55
6/1 (日)	~08:41	洛杉磯國際機場—美國聯合航空 ● UA1339 加州時間 05:22~丹佛時間 08:41 前往下榻旅館入住
6/2 (一)	08:00~08:45 08:45~09:45 09:45~10:30 10:45~11:30 12:30~14:30 14:45~15:30	● 報到&歡迎&學員介紹 (Jeff, Kyle & Angela) ● 課程 1：壑務局簡介 (Tyler) ● 課程 2：大壩安全發展史 (Kent) ● 課程 3：壑務局維安計畫 (Matt) ● 課程 4：大壩安全事件案例 (Amanda) ● 課程 5：設施操作及維護 (Daniel)

日期	時間	行程
6/3 (二)	08:00~08:25 08:30~10:45 11:00~12:30 13:30~14:15 14:15~15:00 15:00~16:00 17:30~19:00	<ul style="list-style-type: none"> ● 分享 1：加拿大/安大略電力公司 (Brent & Evan) ● 課程 6：監測與評估—潛在破壞模式辨識 (Amanda) ● 課程 7：大壩安全風險分析及風險評估 (Dom) ● 課程 8：墾務局洪水風險評估方法 (Mussie) ● 課程 9：地質與大壩安全 (Ali) ● 課程 10：大壩的儀器監測 (Montana) ● 歡迎茶會
6/4 (三)	09:00~10:30 10:45~11:45 13:00~15:45	<ul style="list-style-type: none"> ● 課程 11：水庫淤積、永續及大壩安全 (Melissa & Jennifer) ● 課程 12：水庫的水工機械 (Lucas) ● 參訪 1：參觀墾務局實驗室 (丹佛聯邦中心)
6/5 (四)	08:00~08:25 08:30~09:45 09:45~10:30 10:45~11:30 11:30~12:30 13:05~13:25 13:30~14:30 14:45~15:30 17:30~21:00	<ul style="list-style-type: none"> ● 分享 2：紐西蘭/大壩工程與大壩安全現況概述 (Matthew) ● 課程 13：地震危害度研究及通報與應變機制 (Dan) ● 課程 14：大壩的耐震設計及分析 (Dave) ● 課程 15：潰壩洪水淹沒範圍模擬及災損估算 (Jose) ● 課程 16：緊急應變計畫及演練 (Ben) ● 分享 3：臺灣/大壩安全管理 (司徒美惠) ● 課程 17：附屬設施檢查及評估 (Jaron) ● 課程 18：標準作業程序及維管訓練 (Amanda) ● 至 Angela 家用餐
6/6 (五)	08:00~08:25 08:30~09:30 09:45~11:45 12:45~13:30 13:45~14:30 14:30~15:00	<ul style="list-style-type: none"> ● 分享 4：冰島/大壩安全管理方法 (Maximillian) ● 課程 19：混凝土壩及附屬設施更新改善 (Jason) ● 課程 20：滲流與內部沖蝕 (Peter & Bret) ● 課程 21：溢洪道閘門雜物堵塞問題 (Melissa) ● 課程 22：Hyatt 壩研究案例 (Elizabeth) ● 參訪實習說明 (Angela)
6/7 (六)	08:30~13:00	● 丹佛導覽及文化參訪
6/8 (日)	10:30~15:30	交通：搭乘遊覽車從科羅拉多州丹佛市移動到科羅拉多泉市 (117 公里)
6/9 (一)	08:30~09:30 09:30~10:30	<ul style="list-style-type: none"> ● 課程 23：混凝土壩檢查技術 (Jaron) ● 課程 24：土石壩檢查技術 (Jaron)

日期	時間	行程
	10:30~11:00 13:00~15:30 15:30~18:00	● 現地模擬檢查說明 (Jaron) ● 參訪 2：現地模擬檢查—Pueblo Dam (普韋布洛壩) 交通：搭乘遊覽車從科羅拉多州科羅拉多泉市移動到丹佛市 (117 公里)
6/10 (二)	09:30~13:55	交通：搭乘美國國內航班從科羅拉多州丹佛移動到內華達州拉斯維加斯 (1205 公里)
6/11 (三)	08:30~12:45 13:30~15:30	● 參訪 3：參觀 Hoover Dam (胡佛壩) ● 結業餐會
6/12 (四)	10:35~	麥卡倫國際機場—達美航空 ● DL2922 加州時間 10:35~加州時間 13:25
6/13 (五)	~19:55	西雅圖國際機場—達美航空 ● DL0069 加州時間 6/12 16:15~臺灣時間 6/13 19:55

備註：用餐、中場休息及自由時間，以及參訪實習點位間交通時間不列入。

(二) 室內課程

水庫安全考量及檢查計畫應涵蓋各個面向，包含水文、地震、地質、電機、機械、結構，以及操作與維護、監測與巡查、緊急應變準備等。本次室內課程主題包含美國水庫現況、水庫安全管理制度、大壩安全事件、水庫維安計畫、檢查及監測要領、風險管理策略、地質與壩體安全、水文及地震危害度、緊急應變計畫及演練、標準作業程序及維管訓練、潛在破壞模式、更新改善案例、水庫淤積與永續等，均由墾務局技術人員講授，透過課堂簡報、案例分析及後續的現地模擬檢查呈現跨領域的水壩安全評估方法。以下將摘要各堂課程內容（所附圖片均截取自課程簡報）。

課程 1：墾務局簡介 (30 分鐘, Tyler Quick)

- 授課目標：介紹墾務局。
- 內容摘要：
 - 墾務局成立於 1902 年，隸屬於美國內政部，原任務為確保美國西部灌溉水源，後發展為「為美國公眾的利益，以環境和經濟上合理的方式管理、開發和保護水及相關資源」（工作範圍如圖 1），並分為 6 個區域執行。

- 墾務局為美國西部最大的水資源管理機構，亦是美國最大的供水單位及第二大的水力發電生產者。擁有 492 座大壩、總蓄水量約 3,000 億立方公尺，以及 53 座水力發電廠、總發電容量超過 1400 萬千瓦（每年為 350 萬戶家庭供電），運轉標的包含灌溉用水（支持美國 60% 的蔬菜和 25% 的水果生產）、公共給水、工業用水、發電、環境保護、遊憩及防洪。
- 墾務局當前亦面臨各項挑戰，包含基礎設施老化、人口增長與水資源需求提升、氣候變遷與乾旱、跨領域平衡等。美國 65% 以上的大壩已超過 50 年歷史（墾務局轄管水庫建成年代分布如圖 2），需要進行修復和現代化改造；美國西部乾旱日益頻繁，且部分地區（特別是亞利桑那、猶他、內華達、德州和加州等乾旱地區）人口快速增長，對現有水利設施構成巨大壓力。因此，墾務局必須在增加蓄水能力、水權、環境保育及各利益相關者的需求之間取得平衡，智慧管理稀缺水資源。

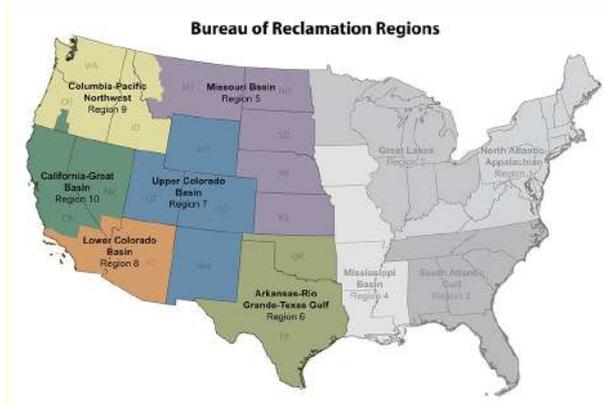


圖 1、墾務局工作範圍（彩色部分）

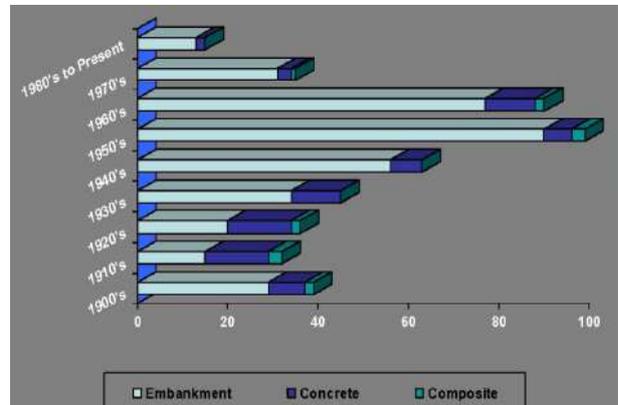


圖 2、墾務局轄管水庫建成年代分布

課程 2：大壩安全發展史（45 分鐘，Kent Walker）

- 授課目標：介紹美國水庫現況、歷史破壞事件及安全管理制度發展。
- 內容摘要：
 - 美國水壩總數超過 92,000 座，其中 69% 屬私人所有、20% 屬地方政府、5% 屬州政府、4% 屬聯邦政府、未確定的有 1%，主管機關則以各州州政府為主。以危害程度分類，有 16% 屬高危害（可能導致生命損失）、15% 屬中度危害（可能導致較嚴重的經濟財產損失）、68% 屬低危害（非常不可能導致生命損失且沒有重大經濟後果）。
 - 美國水壩管理目前面臨的挑戰主要為水壩高齡化及州級監管單位資源不足。美國多數水壩建於 1950 至 1960 年代的建設高峰期，故許多水壩已達 60-70 年高齡（即超過典型的設計壽命），也意味其係採用

較過時的設計和施工方法，目前藉由定期維護、檢查、評估及維護維持水壩功能。充足資金、足夠人力配置和有效立法是確保水壩安全不可或缺的三大要素，但絕大多數美國水壩為私人所有或由各州監管，通常缺乏聯邦政府擁有的資源及統一規範來有效維護這些水壩。

- 美國水壩安全制度的重大進步多是源於慘痛的歷史潰壩事件，部分著名案例簡述如後。(1)1874年，馬薩諸塞州的 Williamsburg Dam 土石壩（威廉斯堡壩）因經費不足、設計不良及施工不確實，發生內部沖蝕導致壩體滑動，最終砌石心牆倒塌，於建壩8年後潰壩，造成139人死亡，促使該州立法規範水壩建造。(2)1889年，由釣魚和狩獵俱樂部擁有的私人水壩 South Fork Dam 土石壩（南福克壩），因不當的改建措施（入溢洪道加網阻礙水流、降低壩頂高度增加通行空間等），導致洪水出水高不足而溢頂潰壩，造成2,209人死亡。(3)1911年，賓夕法尼亞州的 Austin Dam 混凝土壩（奧斯汀壩）因建造在不完整的岩石基礎上導致壩體滑動，於建壩2年後潰壩，造成80人死亡，促使該州建立水壩安全監管計畫。(4)1928年，加利福尼亞州的 St. Francis Dam 混凝土壩（聖弗朗西斯壩）因邊坡滑移導致壩體崩壞，於建壩後不久潰壩，造成450人死亡，促使加州水壩安全法的建立。(5)1963年，Baldwin Hills Dam 土石壩（鮑德溫山壩）因排洪不及造成基礎和壩體被水沖蝕破壞，於建壩後不久潰壩，造成5人死亡，促使加州強化水壩安全法。(6)1971年，加利福尼亞州的 Lower San Fernando Dam 土石壩（下聖費爾南多壩）因聖費爾南多地震（Mw 6.6）引發土壤液化，導致壩體失去承载力及變形（如圖3），約80,000人被撤離，所幸未造成壩體全面潰決，但成為美國水壩安全規範改革的重要案例。(7)1972年，由煤礦公司臨時堆放煤渣與尾砂建成的「尾礦壩」Buffalo Creek Dam 土石壩（水牛溪壩），因連日大雨、排水設計不良與超量堆積的煤礦尾砂導致結構失穩而潰壩，沖毀了下游16個社區，造成嚴重人命與財產損失。(8)1972年，南達科他州的 Canyon Lake Dam 土石壩（峽谷湖壩）因極端降雨造成溢洪道被漂流木與碎石堵塞，最終溢頂潰壩，造成33人死亡。(國家水壩檢查法通過)。(9)1975年，阿拉巴馬州的 Walter Bouldin Dam 土石壩（勞雷爾壩）因不明原因潰壩，造成重大財產損失，經調查後仍未釐清潰壩原因（可能為壩基發生管湧或上游壩坡滑動）(10)1976年，北卡羅來納州的 Bear Wallow Dam 土石壩（熊窩壩）因強降雨導致潰壩，造成4人死亡。(11)1976年，愛達荷州的 Teton Dam 土石壩（提頓壩）潰壩，造成11人死亡及5億美元的財產損失，是美國代表性的潰壩事件之一，促使墾務局建立大壩安全計畫（Dam Safety Program）。(12)1977年，賓夕法尼亞州的 Laurel Run Dam 土石壩（洛雷爾溪壩）因溢頂潰壩，造成40人死亡，促使聯邦與州政府加強對老舊水壩的檢查與立法規

範。(13)1977年，喬治亞州的 Kelly Barnes Dam 土石壩（凱利巴恩斯壩）因連日暴雨造成潰壩，造成 39 人死亡。(非聯邦轄管水庫檢查經費通過)。

- 1972 年，聯邦政府通過《國家水壩檢查法》(National Dam Inspection Act)，責成美國工兵團辦理全國水壩盤點和檢查（含基本資料建立），惟受限經費不足，最終只完成超過 68,000 座水壩盤點（目前已全數完成 92,000 座水壩），且有三分之一被發現不安全。1978 年，聯邦政府通過非聯邦轄管水庫檢查經費，責成工兵團辦理檢查，工兵團於 1978 至 1981 年間完成超過 9,000 座高危害水壩檢查工作。1979 年，聯邦政府發布「水壩安全聯邦指引」(Federal Guidelines for Dam Safety)，提供各水庫管理單位參考，同時推動將風險分析納入水庫安全決策（後續發展為風險告知決策），強調沒有水壩是絕對零風險的，且水壩安全需要持續的演進、檢查和更新。
- 墾務局建立大壩安全計畫 (Dam Safety Program)，流程如圖 4，以確保轄管大壩不會對公眾、公共安全、財產和環境造成不合理的風險。本計畫包含執行轄管水庫的「既有大壩安全評估」(Safety Evaluation of Existing Dams, SEED)，針對潛在危害水庫進行的「啟動水庫安全改善措施」(Initiate SOD Corrective Actions, ISCA)，以及向其他內政部轄管水庫提供諮詢的「內政部水庫安全」(DOI Dam Safety)。
- 每 8 年一次的綜合檢視 (Comprehensive Review, CR) 是「既有大壩安全評估」中最重要成果之一，多數無異常的大壩每 8 年才會執行綜合檢視。並於必要時辦理專案評估 (Issue Evaluation, IE)，另成立 4 年聚集 1 次（常態頻率，若有事件即出動）的技術反應小組 (Technical Response Team, TRT)。但當前墾務局因受限於預算和資源，實際上已將今 (2025) 年計畫執行綜合檢視的部分水壩（約 15% 相對安全的水壩）委外辦理。
- 墾務局自 1990 年代中期開始，全面於大壩安全管理中導入風險告知決策 (Risk-Informed Decision Making, RIDM)，旨在更深入地理解水壩的脆弱性及潛在風險、明確各項檢查與改善工作的優先順序（資源有限）、決策過程透明化（有助於對外溝通與跨單位合作）並提高決策品質，最終實現有效的風險降低。其中，風險的定義為「載荷（如洪水或靜態載荷）發生的機率」x「對該載荷的響應（如潰壩）機率」，x「發生後果」（如生命損失或經濟損失）。



圖 3、下聖費爾南多壩震後變形情形



圖 4、壑務局大壩安全計畫流程

課程 3：壑務局維安計畫（45 分鐘，Matt Tracy）

- 授課目標：介紹壑務局維安計畫及執行情形。
- 內容摘要：
 - 2001 年 911 事件後，壑務局參考「大壩安全計畫」模式正式建立維安計畫，並於總部設立維安管理部門，職責包含協助各水庫維安計畫研擬、提供維安資訊(如潛在風險)、維安狀況評估(圖像化控管如圖 5)、維安問題改善措施研擬及追蹤、維安預算控管及人員管理等。
 - 維安計畫以風險管理為基礎，流程包含：制定整體方針、系統化辨識設施重要性及關鍵程度、評估潛在威脅來源(含自然災害、人為破壞、老化失效等)、定期針對威脅實施風險分析(威脅 x 脆弱性 x 後果)、擬定合理的防護程序與預防性措施以降低風險、落實執行並持續追蹤、操作維護與設備汰換。
 - 壑務局轄管水庫依風險分為 4+1 級：低風險、任務等級 M1、任務等級 M2、任務等級 M3、任務等級 M4(國家關鍵基礎設施)，並依任務等級執行必要維安工作。目前壑務局有 5 座設施列為國家關鍵基礎設施。
 - 壑務局內部不設執法人員，因此維安計畫也仰賴外部維安組織的參與及協助，主要構成包含：(1)區域安全組織(Regional Security Structure)，設有區域安全官，負責各區域安全及協助執行日常任務。(2)區域特工(Regional Special Agents)，負責田野資料蒐集、刑事調查及執法支援等工作，包含反恐等特殊任務及關注關鍵設備進口來源。(3)情報支援小組(Intelligence Support Team)，與其他情報機構建立聯繫並共享情報，也負責監控及評估設施潛在威脅與脆弱性，並分析其他國家水庫遭受攻擊的經驗教訓。(4)專屬合約警衛

(Proprietary Contract Guards)，依據設施的關鍵性部署，可能由墾務局直接僱用或委託私人保全公司/執法機構。墾務局也與外部執法機構建立合作夥伴關係，定期進行設施熟悉度訓練，確保緊急情況時執法單位能快速有效地回應。

- 維安措施主要有：人員背景審查，包含員工、承包商及進入設施的人員，以了解其意圖；實體防護措施，包括入口檢查站、車輛與行人阻隔設施（如防撞柱、防爆柵欄，如圖 6）、圍籬與大門、照明與標示系統（提升辨識度與威嚇效果）、結構加強工程（如加厚牆面、防爆門窗）等；安全監控系統（Reclamation Access, Intrusion Detection, & Surveillance, RAIDS），包含出入管制（如控制室或儀控中心）、入侵偵測與全天候遠端監視系統，當觸發警報時，監控人員會判斷情況並在必要時通知執法單位。另外，近年墾務局也積極評估和應用各項新興技術，例如無人機偵測與反制（亦可用於監測與應變行動）、車牌辨識（提升場域進出控管效率）、人臉辨識（加強人員身分辨識與安全性）等。

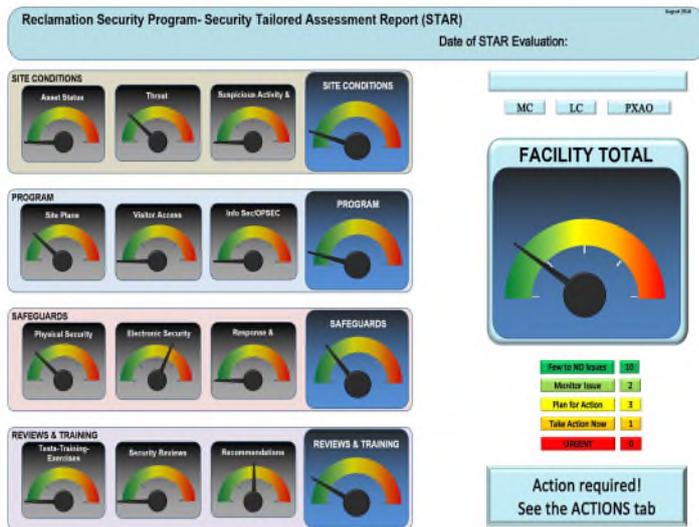


圖 5、風險圖像化控管



圖 6、車道與人行道間設置阻隔設施

課程 4：大壩安全事件案例（2 小時，Amanda Dolezal）

- 授課目標：介紹大壩安全事件及所習得經驗。
- 內容摘要：
 - 本課程共介紹 17 場大壩安全事件（非全數為破壞案例，不限於美國），包含早期（2000 年以前）的 1889 年南福克壩（South Fork Dam）、1976 年提頓壩（Teton Dam）、1965 年芬特內爾壩（Fontenelle Dam）、1925 年雪菲爾壩（Sheffield Dam）、1971 年下聖費爾南多壩（Lower

San Fernando Dam)、1999 年臺灣石岡壩、1963 年義大利瓦瓊特壩 (Vajont Dam)、1911 年奧斯汀壩 (Austin Dam)、1928 年聖法蘭西斯壩 (St. Francis Dam)、1959 年法國馬爾帕塞壩 (Malpasset Dam)、近期 (2000 年以後) 的 2004 年巴西卡馬拉壩 (Camará Dam)、2005 年陶姆索克上壩 (Taumauk Upper Dam)、2017 年奧羅維爾壩 (Oroville Dam)、2020 年中國陽朔縣大壩、2021 年印度塔波萬壩 (Tapovan Dam)、2023 年利比亞德爾納壩 (Derna Dam)、2024 年拉皮丹壩 (Rapidan Dam)。以下將摘述美國幾場重要事件進行說明。

- 1889 年南福克壩 (South Fork Dam): 大壩位於美國賓夕法尼亞州，於 1838 至 1853 年間建造的土石壩，壩高 12 公尺、蓄水量 1,520 萬立方公尺，為當時世界上很大的水庫。原標的為供水至渠道，被鐵路公司購入並閒置 16 年，後由狩獵俱樂部購入並進行了不適當的改建工作 (無工程師參與)。改建工作包含：1 為壩頂增設道路，將壩頂降低 0.9 公尺以利雙向通行，出水高度由 3 公尺縮減為 2.1 公尺。2 為避免水庫魚沖到下游，在溢洪道安裝魚網，影響排洪量能。3 封堵穿過壩體的放水管路，減少放水量能。1889 年 5 月 30 及 31 日發生大量降雨，溢洪道前的網卡滿流木無法即時清除，壩體溢頂破壞，下游地區於 10 分鐘後出現 9 至 12 公尺洪水，造成 2,209 人死亡 (為當時美國歷史最多人命損失事件)、1,600 座房屋損毀、財產損失超過 1,700 萬美元。
- 1976 年提頓壩 (Teton Dam): 大壩位於美國愛達荷州，於 1975 年 11 月完工的土石壩，壩高 93 公尺。1976 年首次蓄水並於短時間內發生潰壩事件 (潰壩徵兆及過程如圖 7): 6/3 上午在壩下游約 400 公尺處出現極小的清水湧泉 (流量約 0.006cms)，隨後在 6/5 上午 8:30 於壩右趾部處出現大量的混濁水流 (流量約 0.7cms)，上午 9:00 右岸岩盤與壩體交界處出現小量水流，上午 10:30 該流量迅速增加至 0.42cms，上午 11:00 壩體右端形成漩渦 (Whirlpool)，顯示內部結構已開始崩解，上午 11:15 混濁水流開始發生向源侵蝕，上午 11:50 形成沉陷坑 (sinkhole)，如圖 8，災害已難以挽回，最終潰壩 (洩放庫水達 3.8 億立方公尺，尖峰出流量達 28,300cms)。即使事件發生在白天且有進行廣播預警，最終仍造成 11 人死亡及下游 5 億美元的財產損失。事件後檢討潰壩原因，包含 1 易受沖蝕的壩體填料直接鋪設於節理發達且破碎的地基岩盤上，且過度仰賴灌漿作為改善地基的唯一手段；2 截水牆 (cutoff) 設計過窄且邊坡陡峭，容易產生拱效應 (arching effects)；3 水庫蓄升過快，因春季融雪量大且洩水設施尚未完工，原規劃蓄升速度為每日 0.3 公尺，實際卻達到每日 1.2 公尺；4 缺乏

瀘層保護（無法阻擋細料流失）；5 缺乏足夠的監測措施且監測表現不足。

- 其實早在 11 年前，1965 年芬特內爾壩（Fontenelle Dam）就發生了與提頓壩類似的沖蝕潰壩事件，可惜該事件並未在壩務局內部廣泛討論和分享。提頓壩事件促使壩務局建立大壩安全計畫，並進行了多項制度改革，包含首席工程師與首席地質師制度確立、建立正式的地基審查與認可流程、水庫蓄水必須經過受控規劃、初次蓄水期間進行密切監測、建立經驗教訓分享制度等。
- 1971 年下聖費爾南多壩（Lower San Fernando Dam）：大壩位於美國加利福尼亞州，於 1912 年完工、1921 年加高，壩高 43 公尺，該土石壩建在天然未固結的沖積層上，並採用水力填築法施工。1971 年聖費爾南多發生規模 6.6 地震，強震持續約 15 秒，壩基測得高達 0.6g 的加速度，地震引發土壤液化並導致壩體失去承載力及變形（地震發生前水位已較正常位低 3 公尺），上游壩坡滑動，僅剩約 0.9 公尺的壩高高於水面，險些潰壩，下游可能影響人口約 80,000 人被撤離，管理單位隨後緊急使用抽水設備降低水位。本事件也促使對於土壤液化問題的重視與研究（水力填築壩體在地震中可能因液化而失穩）。
- 2005 年陶姆索克上壩（Taumauk Upper Dam）：大壩位於美國密蘇里州，於 1960 至 1962 年間建造的土石壩（上游側混凝土鋪面），壩高 30.5 公尺、蓄水量 500 萬立方公尺，是水力發電廠的上池，與下池間有 7.6 公尺直徑、2,135 公尺長的通水隧道，在約 200 公里外遠端遙控操作（無現場目視）。持續有滲漏問題，滲漏情形為每天損失 0.6 公尺水位，於 2004 年在上游側坡面鋪設土工止水膜（Geomembrane）。原設計防浪牆頂標高約 486.8~487.4 公尺、壩頂標高約 483.7~484.3 公尺，水位告警裝置設置於防浪牆以下 0.4 公尺（極高）及 0.5 公尺（高）。2005 年 10 月管理人員發現防浪牆較低處的下游坡面有溢流沖刷痕跡，經檢視水位傳感器（由壩頂向下布設）線路彎曲，使測得水庫水位比實際低。管理人員未即重新安裝線路，2005 年 12 月 14 日溢頂破壞（如圖 9），尖峰出流量 4,248cms。經檢討，抽水作業於標高約 485.8 公尺時人工停止，但水位傳感器測值比實際低了 1.28 公尺，即實際停抽作業發生於標高約 487.08 公尺，高於最低處防浪牆。
- 2017 年奧羅維爾壩（Oroville Dam）：大壩位於美國加利福尼亞州，於 1968 年完工的土石壩，壩高 235 公尺（美國最高），於右壩座設有主溢洪道與緊急溢洪道（未鋪砌）。2017 年 2 月奧羅維爾壩主溢洪道於放流量約 1,500cms 時（遠低於大約十年前所達到的最大放流量 4,500cms），突然出現混凝土槽板破損（如圖 10），造成大規模沖蝕。

接下來幾天上游持續降雨，使水庫水位上升，並於 4 天後歷史首次超過緊急溢洪道堰頂標高，開始自由溢流。雖然緊急溢洪道實際溢流量僅約 350cms，低於其設計放流量的 4%，仍已造成下游邊坡快速淘蝕與溯源侵蝕，管理單位遂緊急撤離下游近 20 萬居民，並強行增加破損主溢洪道的放流量，以降低庫水位，最終避免了壩體潰決。此事件引起美國對老舊基礎設施的關注，並於之後進行了多年大規模的重建工程。

- 依據美國州級大壩安全官員協會 (Association of State Dam Safety Officials, ASDSO) 事故資料庫統計，於 2010~2019 年間大壩潰壩事件常見肇因依序為 1 洪水或超越設計標準的水文事件(超過 180 件)、(2~4 均約 20 件) 2 滲流或內部侵蝕、3 不明原因、4 劣化或結構不良、(5~8 均小於 10 件) 5 結構穩定性問題、6 設備或閘門故障、7 人為因素、8 其他。

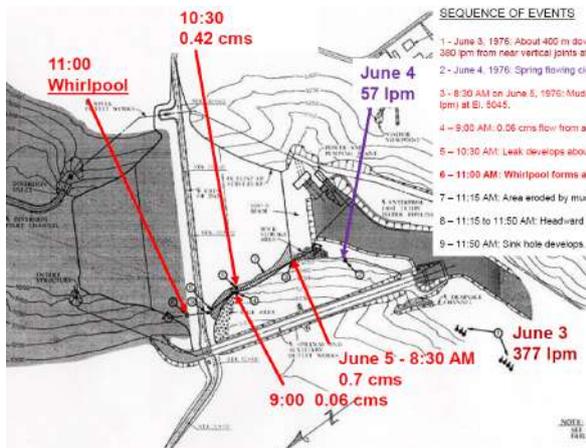


圖 7、提頓壩潰壩徵兆及過程



圖 8、提頓壩沉陷坑情形



圖 9、陶姆索克上壩溢頂破壞情形



圖 10、奧羅維爾壩主溢洪道槽體破損

課程 5：設施操作及維護（45 分鐘，Daniel Staton）

- 授課目標：介紹墾務局操作及維護計畫及內涵。
- 內容摘要：
 - 本課程旨在強調設施的「全生命週期管理」。墾務局的資產範疇涵蓋大壩、發電廠、運河、道路、橋樑、抽水站及休閒設施等，最初以「建設」為導向，然而，經過 40 多年的經驗累積，他們體認到健全的長期「維護」計畫才能使這些耗資巨大的工程持續發揮效用。故自 1948 年起逐步建立營運與維護審查計畫（Review of Operation and Maintenance Program, ROM Program），該計畫的核心原則是「預防勝於治療」（Preventive Maintenance），強調必須即早解決小問題，以避免演變為可能導致災難性後果的大問題。設施狀態與維護的相關性如圖 11。
 - 營運與維護（O&M）計畫的第一步是建立完整的資產管理框架及資產清單（Asset Inventory），明確掌握資產位置與維護責任；其次是培訓，包括對現場操作員和檢查員的培訓；再來是工作追蹤機制，建立系統記錄和追蹤所有維護項目（包括已完成和未完成的），以便為未來提供歷史記錄；最後（也非常關鍵）是資金需求溝通，有效地向決策者傳達資金需求。另外，在實務上，墾務局會將「營運」（日常、週期性任務，如計畫監測、應急響應）和「維護」（需要修復的事項）分開，並為兩者設定獨立的資金預算。
 - 墾務局將維護類型依不同需求分為八大類，並將所有維護工作皆納入系統化管理：包括預防性、預測性、排程、故障、主動式、可靠性導向、非常規及緊急維護。1 預防性維護強調及早發現並解決問題；2 預測性維護係利用先進技術和專業設備獲取更詳細的數據來指導維護決策，如利用透地雷達、熱成像或無人機等技術；3 排程維護為按時間週期進行的任務；4 故障維護為俟設備故障後才進行修復（對於可替換或有備用組件的泵浦，可以考慮這種方式，但絕不適用於溢洪道閘門等關鍵設施）；5 主動式維護係在發現某個組件的共同缺陷後，主動檢查並更換其他可能存在相同缺陷的組件；6 可靠性導向維護係在預算有限的情況下，透過全面分析來決定如何分配資源；7 非常規維護指大型專案，通常必須提早識別並納入長期預算計畫；8 緊急維護係為應對不可預見的緊急情況。
 - 例行檢查制度方面，各設施會確保由跨部門或跨地區人員定期進行外部審查，提供客觀視角，從而及時發現潛在的風險。墾務局也建立嚴格的「三層式」體系，確保設施得到持續且深入的審查：年度現場檢

查（每年一次，由非營運人員執行，聚焦潛在失效模式）、定期設施審查（每八年一次，由區域辦公室主導，進行更深入的現場與文件審查）、以及與之交替的綜合檢視（同樣每八年進行，確保每四年就有一次全面審查）。如此便能夠重新評估潛在的失效模式，並將新的氣候與水文情境納入考量，確保設施在不斷變化的環境中保持安全。

- 壟務局也強調，僅僅進行檢查是遠遠不夠的，有效的缺陷追蹤機制與建議分類才是維護體系的核心。壟務局自 1970 年代起建立資料庫，詳細記錄每一項維護建議的執行狀況並分類（分類範例如圖 12）：類別 1 為需立即處理的嚴重問題，類別 2 為預防擴大的中期問題（設定完成期限），類別 3 為建議性的改進事項（不執行也不會造成重大後果）。這一制度可讓管理單位及後續檢查人員掌握歷史脈絡，並確保重要缺陷不會被忽視，也為決策者提供了清晰的優先順序，依人力及經費安排改善期程。
- 老化基礎設施與長期規劃挑戰：許多壟務局設施已超過百年壽命，面臨老化與汰換問題，如何持續維護、重新資本化，甚至在部分情況下考慮退役，都是嚴峻挑戰。壟務局約在 10 年前奉國會指示，建立重大修復與汰換需求清單（Major Rehabilitation Replacement, MRR），並每年向國會提交（通常指成本達 10 萬美元或以上者），是爭取資金的重要溝通機制。壟務局強調向利益相關者和決策者溝通需求的重要性，不僅要規劃下一年度的預算，還要展望未來 10 年、30 年的重大專案需求。

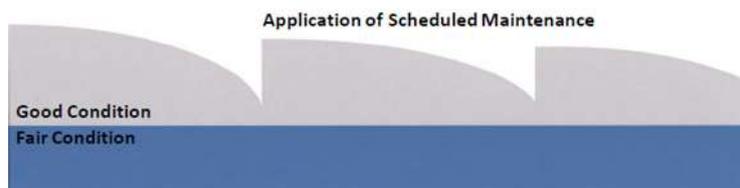


圖 11、設施狀態與維護的相關性



圖 12、缺陷與建議事項分類舉例（類別 1~類別 3）

課程 6：監測與評估—潛在破壞模式辨識（2 小時，Amanda Dolezal）

- 授課目標：介紹潛在破壞模式及對應的監測與評估工作。
- 內容摘要：
 - 壑務局對水壩破壞（Failure，亦稱失效）的定義為「可能造成人命及巨大經濟損失的不受控制洩水」，為辨識破壞情境，壑務局自 1994 年起已將執行潛在破壞模式列入常態工作，其中針對監測儀器的重點在於評估儀器的即時性（監測頻率）、有效性（失效關鍵位置及適當監測方式）、是否符合現況需求，並平衡現場風險與監測成本（檢討所需經費與效益）。
 - 壑務局的儀器監測多數已完成自動化系統傳輸，少部分仍需人工測量。然而，過多而未經有效分析的數據反而會造成困擾，因此強化篩選與有效整理、分析和利用這些數據至關重要。壑務局設有嚴格的數據管理系統，會根據過去的表现數據設定預期性能範圍與警報值，一旦數據超出正常範圍或設定之標準差，系統便會發出警示（數據驅動的決策方式）。隨著設施老化，許多早期安裝的水壓計逐漸失效，壑務局認為其安裝必須慎重考量，並經充分討論與評估，確實權衡其必要性，建議避免在大壩心層內鑽孔，以免引入新風險，可考慮於大壩下游坡面且深度適中（約 20~30 公尺）處鑽孔及設置作為替代方案。
 - 評估及分析潛在失效模式時，必須盡可能地蒐集、整合所有可用的數據，包括施工紀錄、歷史檢查報告與照片。完整的失效模式描述應包含三個關鍵部分：啟動條件、實際失效機制，以及導致災難性後果的方式（即使是機率極低但物理上可行的模式也應被納入考量）。壑務局已建有失敗案例和經驗教訓的數據庫（包含小規模事件也同等重要），以預先建立應變計畫。
 - 壑務局強調，目視檢查仍是最重要的安全保障手段，不應完全依賴儀器，儀器數據只能告訴你「發生了什麼」，但經驗豐富的檢查員能透過肉眼觀察到「狀況的變化」，才是發現潛在問題的關鍵。故現場操作人員應熟悉設施「正常」狀態，才能快速識別出異常，定期從固定位置拍攝參考照片（每年或每季）或將觀察到的情況繪製下來，有利於長期追蹤，都是很好的目視檢查輔助措施。



圖 13、沿出水管道內部沖蝕的破壞案例



圖 14、接縫處採噴漆或畫線方式監測位移

課程 7：大壩安全風險分析及風險評估（1.5 小時，Dom Galic）

- 授課目標：說明風險告知決策運作方式，風險分析及評估執行內容。
- 內容摘要：
 - 風險告知決策包含風險分析（Risk Analysis）、風險評估（Risk Assessment）及風險管理（Risk Management）3 個層面：風險分析旨在透過量化方式整合各種資訊；風險評估是解讀分析結果，服務於決策；風險管理則是更高層級的框架，涉及正式資金申請與長期計畫。為更好地平衡成本效益，讓有限資源發揮最大作用，壑務局已調整其風險管理策略為「針對單一潛在破壞模式（Potential Failure Mode, PFM）精準降低風險」。
 - 風險分析的核心是辨識和分解潛在破壞模式（PFM），並量化其發生機率。PFM 的識別應與設施的脆弱性或潛在缺陷緊密關聯，並完整描述「啟動條件、失效機制與最終後果」(How)，不應僅以「大壩失效」籠統帶過。以內部沖蝕為例，可能的事件序列包含：水位超限（啟動條件）→沖蝕啟動→滲流路徑暢通與否→沖蝕進程是否被阻止→人工干預→潰決。壑務局建議（非必要）使用事件樹（Event Tree）作為輔助工具分解失效路徑，但應注意避免範圍蔓延，目標是突出脆弱性並說明如何採取行動來解決問題，而非最大化失效機率。
 - 在機率估計方面，壑務局針對載重事件（如洪水、地震），主要依據歷史數據與超越機率曲線，而對於大壩反應和干預成功率等其他事件，則廣泛採用主觀機率估計或專家判斷（雖然這種方法常受到批評，被認為是風險決策過程的弱點）。進行主觀機率估計時，會由經驗豐富的專家參與，並鼓勵他們表達意見，而非僅充當裁判，通常會從一個「先驗機率」作為起點（一般為 0.5），再根據實際資訊（有利或不利因素）進行調整（這些估計並非用來精確預測）。壑務局將風險分析中的「不確定性」定義為「數據可能變化的範圍」，通常通過定性描述（如「分

佈很廣」)來表達輸入數據或結果的不確定性(可用區間方式呈現於事件樹，如圖 15)，認為過度量化不確定性往往無法提供更多洞察(這些數字本身就on不是精確的)，反而會導致效率遞減。

- 壑務局強調，風險分析不是用來預測大壩何時失效，也不是宣告設施「安全」，它只是一種輔助工具，因此它不能取代良好的設計(即再精密的風險分析也無法彌補設計上的致命缺陷)、健全的工程、周延的例行維護等，更不是法律責任的豁免工具。風險分析旨在將複雜的資訊以結構化的方式呈現，以將工程師的判斷量化為可分析數據的過程，其最大價值在於促進不同專家之間的討論，從而建立共識、推動行動，並為決策提供透明、客觀的論證基礎。
- 風險評估的核心是討論風險分析的結果是否可被接受，以及有無執行進一步措施的建議。壑務局目前使用風險描繪圖(risk portrayal chart)和安全論證(safety case)來輔助決策。並明確指出不採用「可容忍風險」的概念，決策並非僅依賴「風險描繪圖」上的數字或點位(落於風險矩陣哪個區間)，而是基於對設施脆弱性的全面理解(即安全論證)，將風險估計與設施的整體狀況和性能資訊相結合，形成一份支持特定決策的書面論述(避免將決策簡化為單純的數字高低)。評估風險時，除了數值及區間(考量不確定性)外，還有「信心度」(confidence)的差異，用於判斷分析結果(風險描繪圖)在獲得新資訊後「有意義地改變」的可能性，以作為進行額外調查的理由。信心度高表示即使有新資訊也不會改變分析結果，信心度低表示新資訊很可能改變分析結果。
- 水壩安全辦公室(SOD)的建議可分為三類：1 提升風險理解(如鑽探、實驗室分析)、2 降低失效風險(如矯正措施研究與設施改建)、3 監測強化。在施工風險分析中，壑務局認為量化分析容易導致不當行為的「合理化」，因此轉而應用 ALARP 原則(合理可行範圍內盡可能低，As Low As Reasonably Practicable)，在合理可行的範圍內盡可能降低風險，並尋求兼顧成本效益的改善方案。例如：規劃設計時，若能以少量額外成本解決更多潛在問題，則值得實施；綜合檢視時，鼓勵團隊思考除正式建議外的其他改善方法。
- 特殊風險主題：除較常見的潛在破壞模式(如內部沖蝕及洪水溢頂)外，本課程亦指出項特殊風險主題，包含具有正相關的潛在破壞事件(影響整體機率加總)、施工風險分析、操作因素；其中操作因素主題以啟動專案評估的 Rocky 水庫超蓄事件為例，改善措施包含增設獨立且可自動發布警報的水位計、採色彩管理不同警示程度、控制室增設大螢幕(放大水位資訊)，如圖 16。

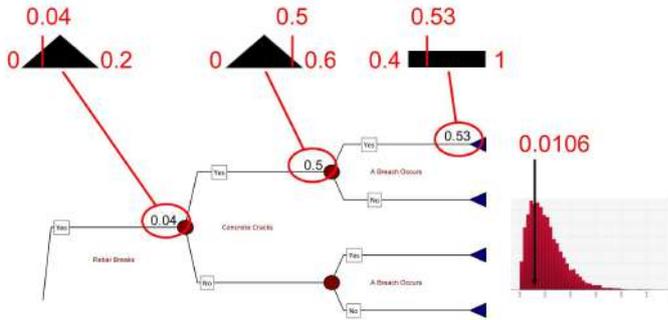


圖 15、不確定性可用區間方式呈現於事件樹



圖 16、Rocky 水庫控制室增設大螢幕

課程 8：壑務局洪水風險評估方法（45 分鐘，Mussie Tekie Beyene）

- 授課目標：說明壑務局採行的定值法及機率法洪水風險計算方式。
- 內容摘要：
 - 「洪水風險」等於「洪水災害」（年破壞機率）乘上「災損」，其中「洪水災害」又為「洪水載重」乘上「該載重下破壞機率」，並可透過定值法及機率法求得。洪水風險特別關注洪水事件發生的機率，以及該事件導致大壩破壞的機率。為了有效評估洪水災害，分析範圍必須涵蓋極端情境，甚至高達五萬年重現期，以確保對潛在風險有全面的掌握。
 - 定值法 (Deterministic Method): 旨在估計最壞情境，關注洪水規模而非機率。以求得可能最大洪水 (Probable Maximum Floods, PMF) 為目標 (核心概念)，分析成果通常為「洪水歷線圖」(如圖 17)，呈現流量隨時間變化，特別關注洪峰流量與持續時間。定值法主要包含四個關鍵步驟：1 估算可能最大降水 (PMP)，2 利用水文模型模擬降雨徑流過程，3 調整模型參數以最大化逕流量，4 運行模型得出 PMF。然而 PMF 也有局限性：高度依賴主觀假設 (特別是對 PMP 的估計)、僅關注單一事件 (無法涵蓋多個降水事件組合)、未納入融雪效應等。且即使以 PMF 進行排洪演算水庫出水高足夠，不代表該水庫無洪水溢頂風險，仍有許多其他影響因素。在極端氣候背景下，單純依賴 PMF 已逐漸不足。
 - 機率法 (Probabilistic Method): 將事件發生機率和規模同時納入考量，目標是求得機率分布，為當前水壩安全評估的主要標準。分析成果通常為「洪水災害曲線」(Flood Hazard Curve, 如圖 18)，展示洪水規模與其年超越機率 (AEP) 之間的關係，其可採逕流流量 (Streamflow Method) 或雨量 (Rainfall-based Approach) 推估。逕流流量法是壑務局標準方法，利用系統性測站數據、歷史資料和古洪水估計來建立年最大流量時間序列 (洪水來源即可包含雨和雪)，並

使用統計模型擬合，產生可延伸至 1/50,000 AEP 的災害曲線。降雨量法則假設洪水完全由降雨觸發，基於降雨頻率資料推求多組入流歷線。可能影響機率法分析成果的因子包含：外推的不確定性（缺乏足夠的歷史數據來外推至極端情況，特別是在 200~300 年以上者）、最新資料是否納入、採用過時方法或不適當假設、區域性值是否一致等。

- 壩務局的洪水風險評估已從單獨依賴 PMF 轉向全面採用機率法（可務實反映洪水風險），並將風險而非單純的規模作為決策的核心考量。在水壩設計中，壩務局通常會根據大壩的後果分類來選擇設計流量，並利用機率法來計算不同重現期的洪水規模，如此便能兼顧極端事件與常見洪水的風險分布。

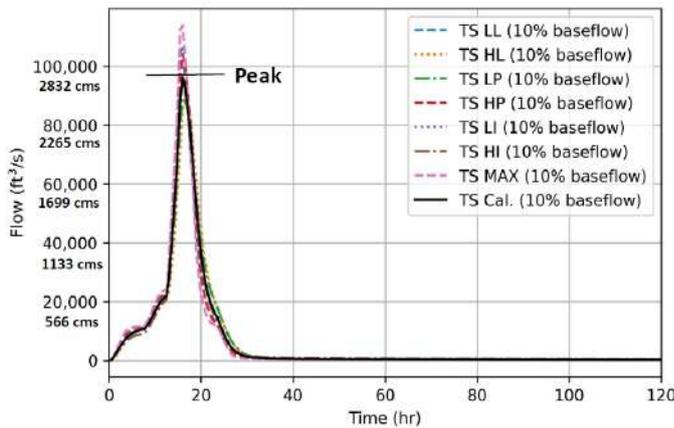


圖 17、定值法成果—洪水歷線圖

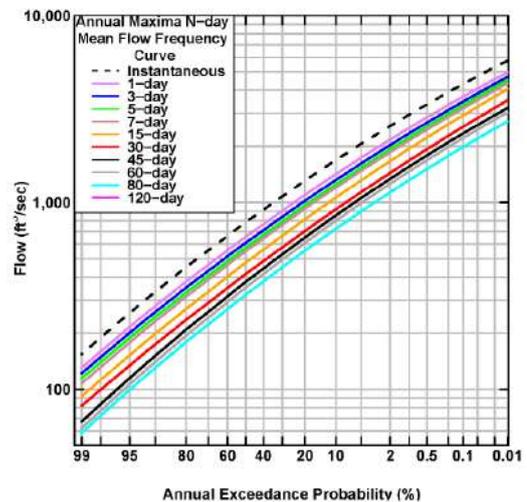


圖 18、機率法成果—洪水災害曲線

課程 9：地質與大壩安全（45 分鐘，Ali Warren）

- 授課目標：說明地質為水庫安全關鍵及地質條件與潛在破壞模式相關性。
- 內容摘要：
 - 大壩安全評估需要許多地質專家的參與，他們不單單是識別地質災害，更重要的是將複雜的地質資訊轉化為風險評估中可量化的機率。其任務包含：1 檢視、分析及摘要歷史地質資料（含地質災害），掌握區域地質的岩性、節理組、構造與侵蝕—沉積史；2 若資料不足，對現地補充調查提出建議、研擬計畫及執行（如試坑、鑽探和取樣、灌入試驗，或震測、地電阻測量等地球物理方法），以驗證和補實證據，確保所有分析都建立在堅實的基礎上；3 參加風險分析以提供團隊地質專業知識及其與潛在破壞模式相關性。

- 常見的地質災害與評估重點：1 滑坡，需識別機制與邊界條件，如意大利瓦揚特壩（Vaiont Dam）滑坡情形如圖 19；2 喀斯特地質（Karst Geology），關注溶蝕通道與節理連通；3 混凝土與基礎災害，注意節理交會弱化情形，如法國馬爾帕塞壩（Malpasset Dam）的破壞模式，說明了未被發現的節理塊體可能帶來災難性的後果，如圖 20；4 滲漏與內部沖蝕，長期監測關鍵指標；5 土壤液化，常超出常規鑽探判識能力，需高度專業判斷與不確定性管理。
- 有效傳達地質資訊的方法：1 避免資訊過載，聚焦關鍵脆弱性與決策所需要點。2 利用視覺化工具，如以剖面圖與平面圖呈現調查點、層位連續性與地下變化。3 強化跨域合作，地質輸入需支撐水文、地震分析與 PFMA 的假設，讓團隊在同一空間座標與同一證據基礎上討論，可快速指認潛在失效模式與資料缺口。



圖 19、瓦揚特壩滑坡事件

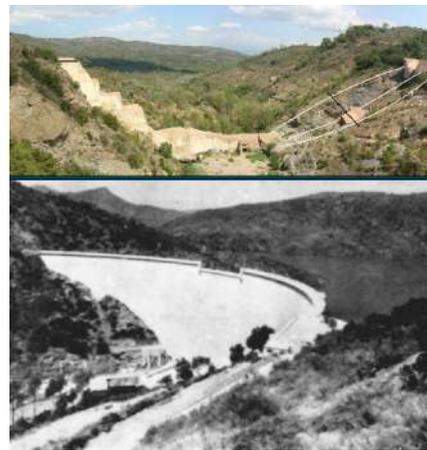


圖 20、馬爾帕塞壩節理弱化破壞

課程 10：大壩的儀器監測（1.5 小時，Montana Foulke）

- 授課目標：介紹壩體監測儀器種類及監測資料分析方法。
- 內容摘要：
 - 水庫安全監測包含目視檢查與儀器監測，兩者相輔相成。目視檢查的優點在於能迅速提供故障跡象，透過標準化檢查表確保一致性，缺點是只能提供定性的表面資訊，無法判斷潛在問題的發展或與破壞模式的關聯。儀器監測則能提供定量數據，了解水庫的實際性能，確認其行為是否符合預期，在異常趨勢出現時及早發出警報，並支援劣化評估計畫。
 - 安裝儀器進行定量監測在水庫各階段（含設計、施工、初次蓄水、長期觀測、緊急狀況等）均有幫助。監測頻率依據 5 個條件擇定：監測

目的、壩體型式、監測種類、壩體年齡及水庫操作情形。例如水庫水位達歷史新高時，監測頻率需增加。本課程主要介紹了水壓、滲流與變形監測，依序說明如下。

- 在各類監測中，水壓監測至關重要，它能評估灌漿帷幕和濾層的有效性，監測型式包含水壓計、觀測井及上頂力觀測系統。目前壑務局主要採用振動鋼弦式孔隙水壓計(vibrating wire instrumentation)，其具備耐用、免電池與長期穩定的優點。數據分析方面，壑務局強調使用散佈圖(如圖 21)會比單純的時間趨勢圖更能有效判斷水庫水位與水壓之間的實際響應關係，並能設定效能參數，一旦數據超出範圍便可視為問題的警示。
- 滲流監測是另一個重要的指標，可透過堰板或流量槽等工具進行監測，並利用散佈圖來分析其與水庫水位的關係，提供潛在內部沖蝕過程的重要線索。安裝滲流監測儀器時，需確保入流緩慢且為亞臨界流，並使用擋板平滑水流，避免湍流影響，並應防止沉積物在堰板後堆積，導致測量精度顯著降低。變形監測(包含位移與沉陷)則可透過觀測點、傾斜儀(測量橫向位移)、伸張儀(可在不同深度測量兩點間的相對位移)、擺線儀(監測壩頂位置變化)等方式掌握壩體與地基變形，提供季節性或長期趨勢判斷。
- 儀器自動化測讀(如圖 22)可解決人工測讀困難、即時或高頻率資料需求、現場遙遠等情況，但通常經費較高，規劃時應考量成本效益、系統簡便性、故障時手動讀取備用方案、電源供應、現場通訊、遠端遙測選項、系統安全性、外部供應商信譽、維護計畫與預算、退役成本、校準要求等。自動化監測並應與定期人工測讀校驗並行，避免數據遺失或誤判造成的風險。
- 監測結果檢視及分析，依據監測計畫辦理，其內容應包含監測方法及頻率、性能限制(performance limits)的設定、應對超出限制數據的程序、資料建檔(數據庫管理和儲存，如雲端伺服器)等；資料品質應於現場確認，並定期由工程技術人員深入檢視及分析監測結果。

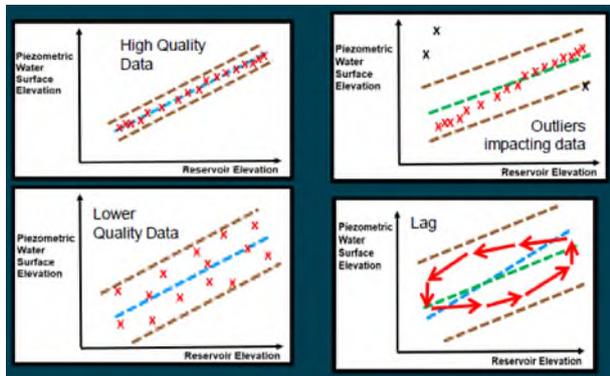


圖 21、水壓計數據分析採散佈圖繪製



圖 22、儀器自動化測讀架構

課程 11：水庫淤積、永續及大壩安全 (1.5 小時, Melissa & Jennifer)

- 授課目標：說明水庫淤積狀況、嚴重性及處理措施。
- 內容摘要：
 - 水庫淤積速率受地質條件、流域事件性災害（如颱風、野火、大洪水）及水庫設計規模影響，而大型水庫通常具有極高的「攔沙效率」。水庫淤積的負面影響包含：有效庫容喪失、防洪能力下降、操作靈活性下降、功能性喪失（當淤積面上升到取水口位置時水庫功能即受影響）、出水設施受損、引發土壤液化、下游河道下刷及生態惡化，甚至影響河口三角洲的長期穩定。忽視淤積問題未即早處理，將導致後續更多花費，並不斷增加災害風險。
 - 監測是淤積管理的第一步，本課程介紹的監測方法包括：多音束聲納測量、無人機與光達技術繪製地形圖、衛星影像分析、泥沙通量測量、岩心取樣分析，以及洪水事件下的懸浮沉積物連續監測。壟務局認為水庫應從過去的「設計壽命思維」轉向「永續利用」，並提出多種淤積管理策略（如圖 23）：上游流域治理及攔沙設施（減緩泥沙入庫）、將泥沙直接送至下游的繞庫排沙（bypass sediment）、陸挖與機械疏浚（成本高昂）、洪水期間的水力排沙（透過低高程的出水口排放沿庫底移動的泥沙）、操作性沖刷（sluicing）。
 - 壟務局約 300 座水庫中僅有 55% 進行過淤積測量，且許多數據已超過 40 年，為應對大量水庫監測數據過時的問題，壟務局進行了關於庫容損失預測的研究，並建立一個成本低廉且簡單的預測模型及水庫網絡資料庫（連結美國 9 萬多座水庫，為美國首次將數千座小型水庫納入評估），如圖 24，能夠追蹤串聯整個流域的泥沙移動，並結合泥沙產量模型與測量資料進行校準，每年動態調整攔沙效率。研究結果顯示，美國的庫容損失約為 6~10%，遠低於先前研究的 16~26%。另外，美國

總淤積量約有 20%發生於小型水庫，這些水庫多為私人所有，缺乏有效的泥沙管理資源。

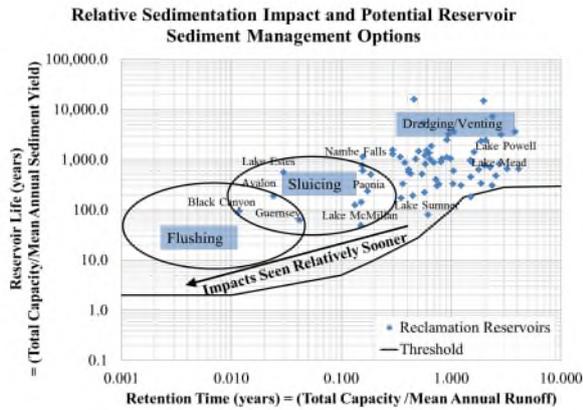


圖 23、多種淤積管理策略

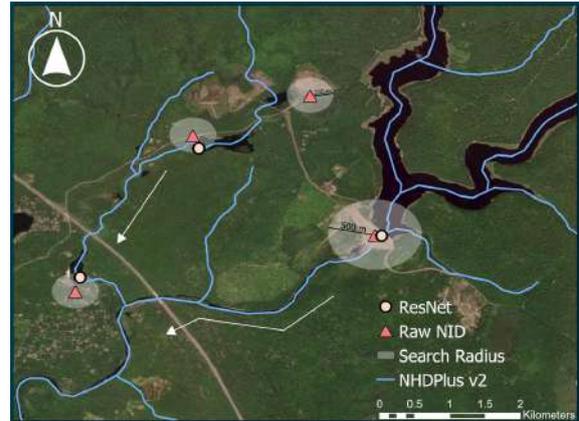


圖 24、庫容損失預測模型

課程 12：水庫的水工機械（1 小時，Lucas Adams）

- 授課目標：說明水工機械（閘與閘）種類、檢查要領及破壞案例。
- 內容摘要：
 - 水工機械可阻擋或調節水流，並概分為閘門(Valves)及閘門(Gates)，其根本區別為：閘門主要用來控制水流通過管道，其閘片在操作時會留在水流之中，以控制流量；而閘門的活動葉片則會移出水流路徑。
 - 閘門類型包含：球閘 (Ball Valve/ Spherical Valve)、蝶閘 (Butterfly Valve，低成本，常用於維護或緊急關斷)、能精確控制水流的旋轉錐閘 (Rotary Cone Valve，適用於極端流速與壓力)、柱塞閘 (Plunger Valve，應用廣泛)；錐塞閘 (Plug Valve)、先導式截止閘 (Pilot-Operated Globe Valve，液壓操作，具減壓與抗氣蝕設計)、空氣閘 (Air/Vacuum Valve)、固定錐閘 (Fixed-Cone Valve，已取代針閘成為新型自由出水閘，針閘 Needle Valve 因成本與耐久問題已不再使用)、中空射流閘 (Hollow-Jet Valve)、管閘 (Tube Valve)、套筒閘 (Sleeve Valve)、水力發電機進水閘 (Hydropower Turbine Inlet Valves) 等。
 - 閘門類型包含：適合堰頂控制的倒伏閘門 (Bascule Gate)、鼓形閘門 (Drum Gate)；環形閘門 (Ring Gate)、奧伯邁耶閘門 (Obermeyer Gate，倒伏閘與充氣橡皮袋的組合)、弧形閘門 (Radial/Tainter Gate，最常見，廣泛應用於溢洪道與出水工)、輓式閘/卷閘 (Roller Gate，整個閘門本體是圓筒狀，在水流上形成「滾動式過水」，用於大型水道與船閘)、斯托尼閘門 (Stoney Gate，現代固定輪閘門的前身)、固定

輪閘門 (Fixed-Wheel Gate, 因結構穩定被廣泛使用)、滾輪支承閘門 / 捲揚閘門 (Roller-Mounted Gate, 平面閘門, 利用滾輪來承載重量和減少摩擦)、聯結閘門 (Tractor Gate)、環形密封閘門 (Ring-Seal Gate)、附環閘門 (Ring-Follower Gate)、有蓋滑動閘門 (Bonneted Slide Gate, 常見於出水工, 藉由液壓升降操作, 適用中等水頭)、射流閘門 (Jet-Flow Gate, 用於低流量系統, 具緊急保護功能)、鋸刀閘門 (Knife Gate) 等。不同閘門設計兼顧了水力性能、密封可靠性與施工維護的便利性。

- 閘與閘的檢查及維護重點：確認設備聯結是否對位；穴蝕（由壓力差引起）與腐蝕（如焊接縫隙腐蝕）的辨別、修復與預防（導致設備老化的兩大元兇）；沉積物與碎屑的清理；洩漏監測與潤滑保養（潤滑對軸承壽命與設備可靠性至關重要，軸承失效原因分析如圖 25）；鋼索的專業檢查與維護（尤其注意水線處腐蝕問題），其檢查重點與缺失類別如圖 26。
- 閘與閘的測試及操作規範：可分為無水測試/功能性測試（平衡水頭）及有水測試/性能測試（不平衡水頭），目的為確認現況、及早發現問題、排除放水通道阻礙。並強調全行程檢查不僅能確認設備的完整功能，還有助於清除積聚的污垢和沉積物，並保持活動表面的清潔，降低隱患。依據壅務局指導原則，溢洪道閘門應每年進行一次全行程平衡測試，壓力鋼管閘門應每 10 年進行一次全關閉測試，而出水閘門與閘門至少每 4 年進行一次測試。

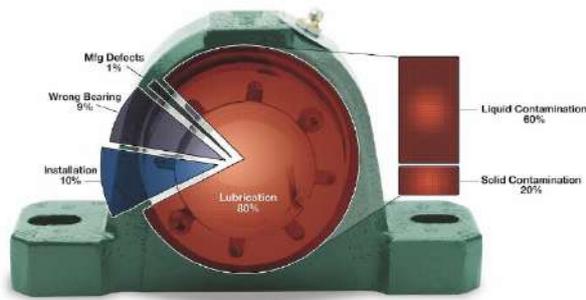


圖 25、軸承失效原因分析



圖 26、鋼索檢查重點與缺失類別

課程 13：地震危害度研究及通報與應變機制（75 分鐘，Dan Levish）

- 授課目標：介紹地震危害度分析方法及地震監測及通報情形。
- 內容摘要：

- 墾務局轄管水庫主要分佈在美國西部 17 個州，許多壩址與地震活動區高度重合（這並非巧合，因為這些地質環境往往也提供了適合建造水壩的條件），地震危害研究因此成為大壩安全管理的關鍵議題。機率式地震危害度分析（Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA）即為確定特定地動（通常是加速度）在一定時間內被超越的機率，其成果為「年發生機率曲線」（如圖 27），旨在提供風險分析所需的機率性地震載荷，以用於風險告知決策。然而，PSHA 仍有應用限制：結果會隨時間和假設更新而變動（墾務局通常每八年於綜合檢視時進行更新）；模型不確定性（需加入安全係數，不可過度依賴絕對數值）；過去幾十年中，未能準確預測各地區最大歷史地震，主要原因為數據不足、斷層或隱沒帶未經充分研究或對其行為理解不足。
- PSHA 執行流程：1 辨識震源（含斷層、隱沒帶、背景地震活動、變形區等地震目錄）；2 震源特徵化，確認斷層幾何形狀（位置、長度、傾角、深度）、運動方向、滑動速率、分段情況等，並建立多種破裂情境；3 估算地震發生機率及可能的最大地震規模，主要利用古地震資料（透過挖溝探勘等方式重建歷史地震）和歷史地震數據，對於無法識別斷層的背景地震活動，則使用歷史地震的發生率來評估；4 評估場址效應（由地質調查獲得），並建立地動預測方程式，模擬能量從來源到場址的傳播（衰減式）；5 產出危害度曲線（Hazard Curve），即 PSHA，並分解分析量化不同震源的影響；6 發展地震歷時（即加速度隨時間變化的實際記錄），以用於 FLAC、SHAKE 等動態分析模型（大壩安定分析）。
- 地震監測之目的包含快速應變與長期風險管理。墾務局透過安裝強震儀，能夠在地震發生後幾分鐘內即時獲得數據並觸發警報，警報內容包含震源、震級與壩體加速度，並與警戒值比較，以決定是否啟動應變程序。監測點位應包含參考地動（如自由場、下孔及基礎等）及結構地動（壩頂、壩座、壩趾及廊道等），如圖 28。並將監測結果與危害度分析結果進行比對，驗正結構反應及設計，增加對地震危害度的整體瞭解。另外，墾務局也關注誘發性地震（Induced Seismicity），如德州與奧克拉荷馬州的廢水注入活動雖多數不致影響大壩，但仍納入監測範圍。

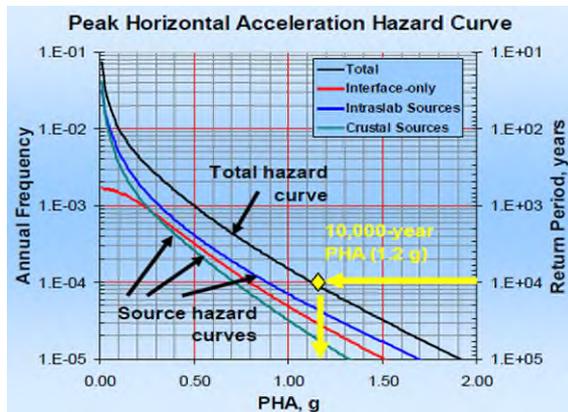


圖 27、機率式地震危害度分析成果

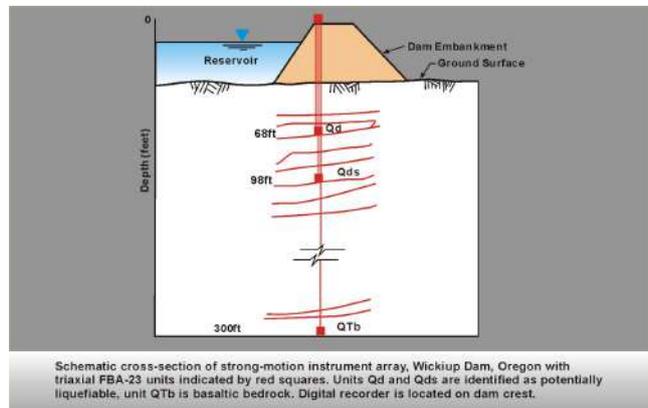


圖 28、垂項監測分布示意

課程 14：大壩的耐震設計及分析（45 分鐘，David Gillette）

- 授課目標：介紹土石壩及混凝土壩地震危害項目及分析方法。
- 內容摘要：
 - 大多數土石壩與混凝土壩在地震中表現普遍良好，即使在強震下也鮮少沉陷超過 1%。壩務局針對地震災害分析與評估方法的核心理念是從簡易分析開始，若有潛在問題，再進行更詳細且昂貴的分析，以確保資源的有效利用。另外，壩務局特別強調，土壤液化 (Liquefaction) 是土石壩最主要的潛在問題，當飽和鬆散砂土因地震搖動而使孔隙水壓急劇升高時，將導致土壤剪力強度喪失，使壩基或壩體如液體般失效，例如出現砂湧 (Sand Boil) 現象即可能表示發生土壤液化。
 - 土石壩地震分析項目包含：動態反應、液化潛勢、震後安定性、壩體變形情形、裂縫及管湧潛勢等。液化潛勢常用的工具(提供量化數據)包括標準貫入試驗 (Standard Penetration Test, SPT)、圓錐貫入試驗 (Cone Penetration Test, CPT)，以及剪力波速量測，其中 CPT 因可判斷土壤行為類型而最為廣泛使用。安定性分析可以選擇傳統的邊坡穩定分析或更為嚴謹的有限元素/差分建模。混凝土壩地震分析項目包含：基礎交界及穩定性(基岩節理)、仿靜態分析(滑動及傾覆)、裂縫與動態反應差異 (特別是在截面變化處) 等。
 - 新建混凝土壩設計原則 (如圖 29)：設計良好尺寸、移除基礎中已風化或破碎的岩層、設計排水及灌漿控制上頂力、壩體及壩座加入錨錠等。新建土石壩設計原則 (如圖 30)：移除或處理基礎中的潛在液化材料、壩體採適當分區設計 (厚的心層、濾層及過度區)、保留充足出水高度、上游設計砂礫層 (阻斷裂縫及滲水)、壩基整形 (減少裂縫產生機率) 等。針對較困難的既有水庫補強，壩務局建議土石壩可在壩趾處移除並置換鬆散材料、原地基加密 (如振動錘擊或石柱工法)、水

泥固結加強基層等；混凝土壩則可透過疊合或鑽設預力錨栓來提升其抗震能力，溢洪道牆也可透過錨固補強。

- 地震分析的最終目的是掌握潛在弱點，並為補強設計與應變決策提供依據，但由於大型地震事件發生頻率有限，水庫抗震工程的實證資料仍不足，許多結論必須依賴模型推估，導致結果的不確定性相對較高，因此必須保持謹慎，透過保守設計（如更寬濾層或更平緩邊坡）來因應潛在風險，並建立頻繁且獨立的專家審查制度，以確保設計與補強方案具備足夠的安全係數。

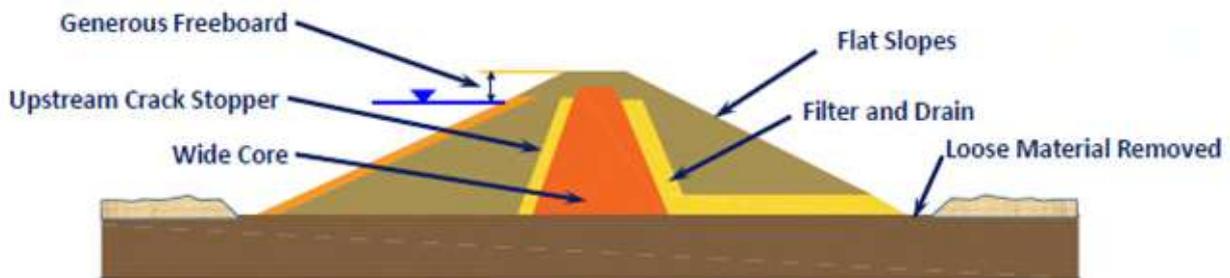


圖 29、新建土石壩設計參考斷面

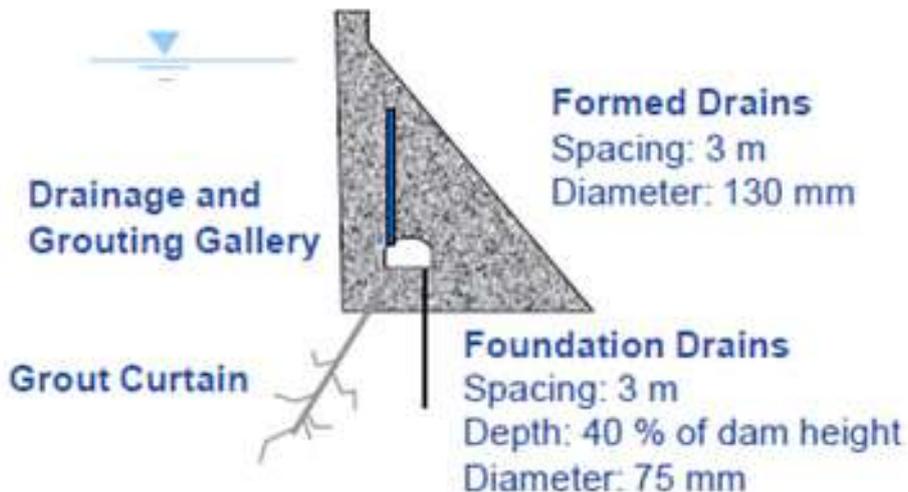


圖 30、新建混凝土壩設計參考斷面

課程 15：潰壩洪水淹沒範圍模擬及災損估算（45 分鐘，Jose Cestero）

- 授課目標：介紹潰壩水文及水理分析、淹水範圍計算及災損評估方法。
- 內容摘要：
 - 潰壩模擬分析的主要目的不僅是評估生命損失，更重要的是為緊急計畫和疏散作業提供科學依據。潰壩災損包含人命及經濟損失（關鍵設

施)、環境影響、文化資源破壞與衝擊等，但墾務局以風險管理基礎及災害防救角度切入，災損評估僅考量人命損失。後果分析的第一步是潰壩洪水演算，以獲得洪水深度、流速、洪水強度（通常以深度乘以流速衡量）、洪水到達時間、洪水淹沒範圍、受影響區域的人口分佈及其疏散路徑等資訊。

- 潰壩出流模型分為三類：1 經驗公式法 (Empirical Equations)，主要基於水庫規模和壩體幾何型式，可得尖峰出流及尖峰發生時間點，簡單快速但難反映在地特性；2 數值模型法 (Numerical models)，假設潰口會隨時間變化，透過設定最終潰口形狀及完潰時間（以材料與歷史案例經驗決定），生成潰壩出流歷線；3 物理模型法，主要用於混凝土壩，基於實際實驗數據，考慮不同材料（如岩石、植被、覆蓋土層）的行為，能夠更精確地模擬侵蝕過程。潰決參數放大到水庫實際尺度時常有不確定性，因此會進行「敏感性分析」以評估潰決參數的影響，並採用「隨機分析」(如蒙特卡洛模擬)來考慮潰決參數的範圍。
- 下游河道演算：可採一維 (One-dimensional, 1D) 或二維 (Two-dimensional, 2D) 方式計算，分析結果比較如圖 31。一維分析需給定主流線及沿線橫斷面，計算時假設水流在各斷面等速均勻流動，分析結果套入地理資訊系統產出河道水流範圍；優點為分析快速、對長河川有效，缺點為未能準確反映橫向流速變化（假設橫斷面上所有水力要素均勻分佈）、高度依賴於河道中心線的定義等。二維分析以地表（主控分析精確度）為模擬基礎，水流可沿流向 (X) 及其水平垂直向 (Y) 移動；優點為對寬廣洪泛區與複雜流況者（非單一中心線）更準確、可獲得每個網格流動資料（如深度、速度及流量等）、分析結果可直接套入地理資訊系統展示等，缺點為分析時間長、受分析設備能力限制、數據量龐大等。地形資料品質決定可信度：LiDAR 最佳，其次為攝影測量與雷達；解析度與重採樣會顯著影響結果，建議就地形特性選擇網格尺度。
- 淹沒區域圖資（範例如圖 32）：包含潰壩情境、模擬方式、最大淹沒範圍、最大淹沒水深、洪水強度、前緣傳播時間（洪水波前位置及抵達時間）、重要點位的尖峰流量（或流量歷線）及到達時間。並應納入緊急應變計畫 (EAP)，提供下游單位規劃疏散與資源配置。二維模型能提供更精細的洪水強度分佈，顯示高強度洪水集中在河道中，而遠離河道時強度會顯著降低。
- 災損評估：分析災損（死亡率）的關鍵因子為洪水強度 (Flood Intensity) 及預警時間 (Warning Time)，其中洪水強度以洪水深度 (Depth) 與洪水速度 (Velocity) 的乘積 (DV) 表示，預警時間則相

對複雜，含上游告警、下游接收、下游決策、實施措施（如撤離）等階段所需時間。評估方法可分經驗公式及數值模擬，經驗公式可參考墾務局 DSO-99-06 表件及災損評估方法文件（Reclamation Consequences Estimation Methodology, RCEM），數值模擬可使用美國工兵團 LifeSim 模式（結合建物、人口與道路網，模擬預警、疏散與行為反應），能處理日夜情境與建物受損，但資料與運算需求較高。

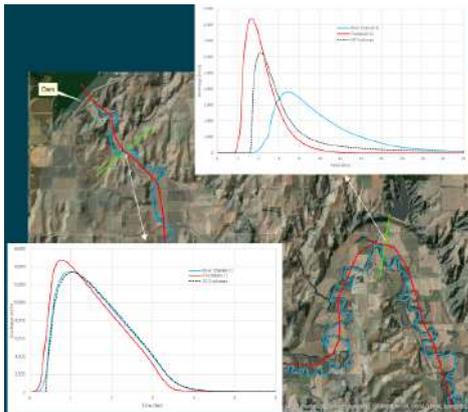


圖 31、一維及二維分析結果比較

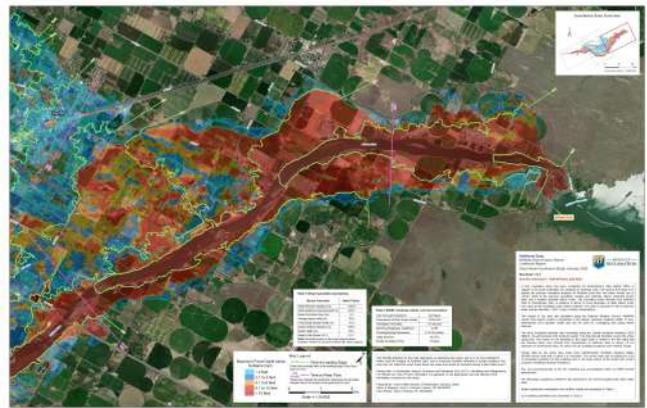


圖 32、淹沒區域圖資範例

課程 16：緊急應變計畫及演練（1 小時，Ben Claggett）

- 授課目標：明確水庫對下游地方形成的洪災風險不可避免，說明緊急應變管理、計畫及演練內涵，及其執行步驟及原則。
- 內容摘要：
 - 所有水庫均需制定緊急應變計畫（Emergency Action Plan, EAP），主要目標是通知下游單位（但疏散民眾是下游單位的職責，非水庫管理單位的權限）與採取干預行動以防止潰壩，旨在降低公共風險與保護生命，而非僅為符合政策要求。墾務局強調小型壩亦可致命，因為人們往往低估其威脅，且即使水庫未完全潰決，高流量洩洪也可能觸發疏散工作。
 - 緊急應變管理（Emergency Management）流程應包括危害分析、書面計畫制定、人員培訓、演練、持續改進。危害涵蓋地震、洪水、人為因素、設施老化、恐怖行動等，並可考慮潰壩或需要高流量洩洪（即使水庫本身無虞）等不同情境，且須跳脫「不會發生在我這裡」的樂觀偏誤。
 - EAP 是一份書面文件，針對各設施量身定制，其應包含偵測異常（Detect）、事故應變（Respond）和終止事件（Terminate）三個階段的詳細流程，為水庫管理單位和操作人員提供具體的指示和程序，確

保所有參與應變的人員都清楚自己的職責。其主要工具包括：核對清單 (Checklists)，為每個角色提供具體任務，如圖 35；應變等級決策矩陣 (Response Level Decision Matrix)，將事件類型與緊急等級匹配，如圖 34；通知圖表 (Notification Charts)，明確通知對象和聯繫方式，墾務局建議通知方式以電話聯繫為主 (且需回呼確認)，並輔以群眾警報系統；淹沒範圍圖，幫助下游單位判讀受災範圍與疏散需求。故 EAP 應設計成使用者友善、精簡有效，而非過於冗長的文書。

- 水庫的「干預措施」會由 EAP 提供戰術框架，但實際技術處置須由專業工程團隊在事件指揮系統 (ICS) 下決策，並形成事件行動計畫 (IAP)。下游警消單位通常較為熟悉 ICS，而水庫管理單位較少實戰，需透過聯合演練銜接。兩方常見的摩擦點在通知時機與角色分工，建議事前協議觸發條件、建立聯合小組與共通語彙，確保訊息一致與行動同步。墾務局採用緊急等級分類系統來溝通事件的嚴重性，分為內部警報與必須疏散的四級緊急等級 (等級 1 潛在威脅，通知下游單位準備；等級 2 情況嚴重，不確定能否緩解，下游需準備疏散；等級 3 下游必須開始疏散；等級 4 水庫已潰壩)，各等級的觸發條件 (例如高流量或水庫水位達到溢洪道頂) 亦需要與下游單位協商並校準。管轄權角色與職責如圖 33。
- 緊急應變演練：目的是評估機構能力 (如通訊、事故管理)、驗證 EAP 的有效性、加強跨機構合作、讓人員練習其角色職責，並找出經驗教訓。可分為討論型演練 (如研討會、桌面演練) 和操作型演練 (如功能性演練、全面演練)，如圖 36。執程序包含演練籌備團隊建立、設計主題 (腳本)、演練、評量演練狀況、撰寫檢討報告，並形成改進清單與追蹤機制，以確保問題得到解決並不斷優化 EAP。

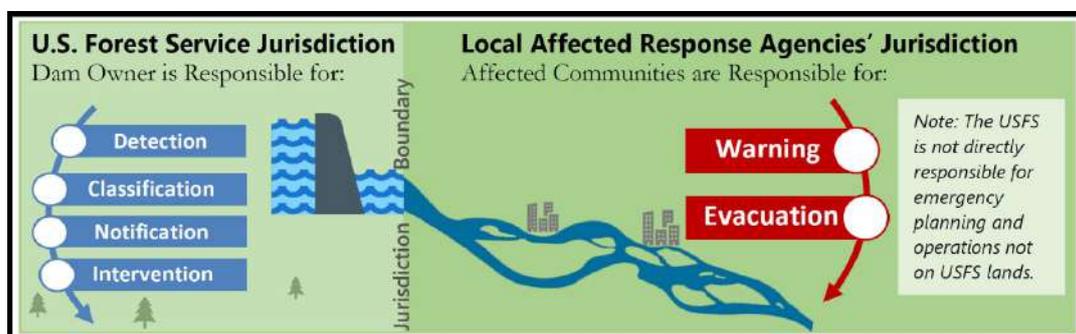


圖 33、管轄權角色與職責

RESPONSE LEVEL DECISION MATRIX

(Providing Hazard Damages Only)

Generic Dam	Internal Alert	Response Level 1	Response Level 2	Response Level 3	Response Level 4
INITIATING CONDITION Initiating Condition Descriptors • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts	• An internal condition has developed. • Some personnel notification. • Internal notification only. • Internal notification only. • Dam Safety Office Alerts	• Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts	• Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts	• Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts	• Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts
INTERNAL ALERT Internal Alert Descriptors • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts	• The reservoir water surface level has reached elevation 750.0 feet. • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts	• The reservoir is expected to reach or exceed elevation 750.0 feet within 24 hours, including hydrologic forecasts. Forecast the potential for increased or decreased inflow into the reservoir. • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts	• Water level is expected to reach or exceed 750.0 feet within 24 hours, including hydrologic forecasts. Forecast the potential for increased or decreased inflow into the reservoir. • Water is rising through the emergency spillway (250 cfs). • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts	• Water level is expected to reach or exceed 750.0 feet, AND water/hydrologic forecasts indicate the potential for increased or decreased inflow into the reservoir. • Water has reached the crest of the dam (500 feet), or high winds are causing the water to reach the crest due to wave action. • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts	• Water from the reservoir is flowing over the crest of the dam (500 feet). • The dam embankment has been breached and/or eroding away. • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts
INTERNAL ALERT AND STRUCTURES Internal Alert and Structures Descriptors • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts	• New or unusual conditions associated with the dam, or structures, including depressions, wrinkles, cracks, or increased minor cracks. • Significant increase in seepage flow, release, or leaks observed, or is occurring, anywhere on the dam embankment or its structure (investigation and monitoring only, if not required). • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts	• Evidence of internal erosion is confirmed in spillway/outlet pipe due to indication of stress to structural integrity. • New or rapidly growing sandbars, settlements, shrinkage, or depressions near or adjacent to the outlet pipe, spillway or anywhere on or near the dam. • Significant increase in seepage flow, release, or leaks observed, or is occurring, anywhere on the dam embankment or its structure being transferred by seepage flows. • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts	• Rapidly developing seepage, embankment piping, outlet settlement, or depression, sandbars, or any cracks, near or adjacent the outlet pipe or anywhere on or near the dam with seepage flow being transferred by seepage flows. • Seepage areas with muddy water discharge. • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts	• Dam failure is imminent. • Life threatening flooding is or may occur. • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts	• Dam failure is occurring or has occurred. • Life threatening flooding is occurring. • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts
EMBANKMENT BREACH AND INSTABILITY Embankment Breach and Instability Descriptors • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts	• Changes in seepage, jumps, scours, or cracks (longitudinal or transverse) are observed on the dam's embankment surfaces. • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts	• Minor cracks in or near longitudinal or transverse cracks, joint settlements, gaps, displacement, movement, deformation, slumping, heaving, heaving or deflection movement anywhere on or within the dam, abutments, foundation, spillway, or outlet pipe. • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts	• Moderate to moderate and moderate to severe cracks, joint settlements, gaps, displacement, movement, deformation, slumping, heaving or deflection movement anywhere on or within the dam, abutments, foundation, spillway, outlet pipe. • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts	• Dam failure is imminent. • Life threatening flooding is or may occur. • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts	• Dam failure is occurring or has occurred. • Life threatening flooding is occurring. • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts • Dam Safety Office Alerts

Incident Type e.g. seepage

Initiating Condition e.g. Seepage areas with muddy discharge

圖 34、應變等級決策矩陣

Expected Actions Checklist	Agency Superintendent				Supervisor
	Internal Alert	RL 1	RL 2	RL 3/4	
1) Ensure that an Incident Commander has been designated for the incident.					
2) Ensure Incident Commander has completed all associated expected actions, especially: a. Ensuring a Response Level is determined and updated according to the incident circumstances. b. Ensuring notifications are being made as shown on the Notification Chart. c. The Expected Actions Checklists are being completed by the corresponding responsible personnel.					
3) Support development of press release. (Must correspond with the NWS media release.)					
4) Request status reports on conditions at the dam as needed.					
5) If appropriate, proceed to (or remain at) the designated Command Post.					
7) Ensure that all personnel have been evacuated from below the dam when conditions indicate the need. Talk to Incident Commander.					
8) When appropriate, verify location of all on-duty staff (employee accountability).					
9) Notify Regional Dam Safety Coordinator at termination of a RL1 incident or declaration of a Response Level 2 or greater.					
Documentation Requirements (Agency Administrator): 10) Record all calls, actions and activities on the KCS-214 form-Activities Log to ensure complete record of the incident and decisions made.					

圖 35、預期行動檢查清單

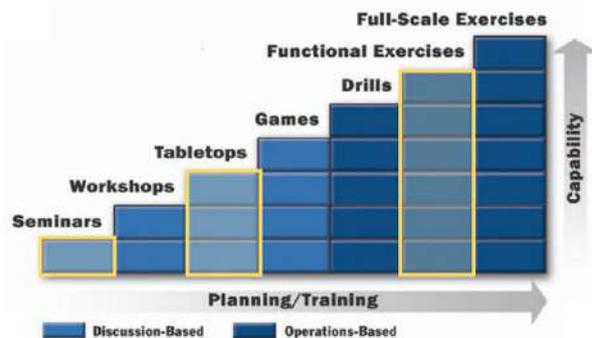


圖 36、2 種進行方式及 7 種不同演練強度

課程 17：附屬設施檢查及評估 (1 小時, Jaron Hasenbalg)

- 授課目標：說明附屬設施種類、潛在破壞模式及破壞案例。
- 內容摘要：
 - 附屬設施包含溢洪道、進水塔、出水工、導水管線及渠道、發電設施等，其核心任務在於安全調節水庫的蓄水量，定期檢查不僅是為了辨識水庫弱點（安全缺陷）及精進操作程序（如避免誤操作等），更是為了評估結構物應對各種挑戰的能力，包括安全洩洪、水庫洩降、抵抗

地震及承受靜態載重等。每一次的檢查報告都是一份重要的歷史文件，作為未來問題追溯的參考，幫助管理單位掌握結構狀況的演變。

- 水力問題（多數破壞案例主要原因）主要分為：1 排洪能力不足，例如溢頂造成結構沖刷、無法有效洩降水庫；2 流道阻塞，例如碎屑或淤泥堆積、人為加裝閘板、落石阻擋閘門（如圖 37）；3 水流沖刷破壞，例如穴蝕（cavitation，如圖 38）、沖蝕、球磨效應（指石塊或碎屑在水流作用下反覆碰撞、研磨造成結構損傷）、上頂力破壞（hydraulic jacking，高壓水流進入裂縫或接縫，將混凝土或結構塊體頂開造成錯位）。
- 結構與材料問題主要分為：1 結構位移或變形，例如結構差異位移或傾斜、裂縫與分離、地基支撐不足及沉陷；2 材料劣化（混凝土、金屬、土石），例如混凝土鹼骨材反應（Alkali-Silica Reaction, ASR）和凍融破壞、金屬腐蝕、內部沖蝕（Internal Erosion，如 Bellaire 壩因濾層失效導致材料流失）。
- 操作與管理問題包括機械或電氣設備故障、操作手冊不完整或說明不足，以及人員缺乏訓練等情況。這些因素在緊急狀況下特別危險，可能延誤反應時間，甚至加劇損壞後果。



圖 37、Horse Mesa 壩閘門遭落石阻擋失效



圖 38、Folsom 壩出水工穴蝕情形

課程 18：標準作業程序及維管訓練（45 分鐘，Amanda Dolezal）

- 授課目標：說明壑務局標準作業程序及維管人員訓練情形。
- 內容摘要：
 - 標準作業程序（Standing Operating Procedures, SOP）：旨在提供清晰、簡潔的步驟，以確保設施在正常與緊急情況下均能安全、有效運作。其組成包含引言（修訂紀錄、縮寫、目錄）、緊急應變計畫（EAP，主要內涵如圖 39）、基本資訊（設施定位、職責分配、儀器校正或變

更紀錄)、機械與電氣(操作與維護步驟、安全作業細節)、結構行為監測(監測儀器圖片及描述)、水庫操作(設計洪水、徑流路線、蓄水歷線圖、洪水操作標準)等。內容須定期滾動更新(建議每年至少更新一次),以確保內容與現場實際情況相符。

- 水庫操作員訓練:包含課堂訓練和現場訓練,透過雙軌模式的訓練結合理論知識與實際操作,確保操作員充分理解並能應用 SOP 和緊急應變措施,以應對各種現場情況。為了方便操作員在現場參考,會提供一本小巧的訓練筆記本,包含設施性能資訊和儀器位置,以便在現場隨時查閱。培訓師也會透過情境演練(如水庫中出現漩渦、排水口有沉積物堆積等)來確認操作員的應變步驟。訓練結束後,培訓師會簽署並驗證培訓記錄,存檔以證明操作員已接受相關訓練。
- 課堂訓練至少每四年一次,旨在促進知識的傳播,會根據當前主要議題調整內容(如植被控制),並邀請經驗豐富的專業人士分享知識經驗與失敗案例,也鼓勵跨單位學員間的交流討論,通常為期兩天,有時會包含現場參觀,課程內容範例如圖 41。現場訓練則為每年例行,要求所有操作員與替補人員參加,課程分為室內和室外兩部分。室內部分(通常為 2~4 小時)會由培訓師詳細審查 SOP(包括工程數據、機械設備與結構行為、操作流程等)、大壩安全監測計畫、緊急應變計畫,並使用風險描繪圖(risk portrayal chart, 如圖 42)來總結和評估設施的潛在破壞模式。室外部分則著重於實際檢查,要求學員親自檢視監測系統(含練習讀數,以強化辨識異常趨勢的敏感度)、操作設備(如排洪閘門)、特定問題(如滲水區域標記等, 如圖 40)。
- 現場操作與監測實務:壩務局強調操作日誌(Operating Log Book)是現場不可或缺的法律紀錄,其應完整記錄所有正常操作、緊急應變、維護工作和設備測試等。安全監測計畫亦應列出目視檢查和儀器監測的具體要求,包含儀器名稱和監測注意事項,確保所有人員遵循相同程序。透過嚴謹的日誌與監測機制,能保障設施狀態透明,並提供未來檢討與改進的依據。



圖 39、緊急應變管理主要內涵



圖 40、滲水區域標記

Wednesday, December 10	
noon - 1:00	Registration
1:00 - 1:15	Opening Remarks
1:15 - 1:40	Types of Dams
1:40 - 1:45	<i>stretch break</i>
1:45 - 2:40	Performance Monitoring
2:40 - 2:55	<i>break</i>
2:55 - 3:55	Geology and Dam Safety
3:55 - 4:10	<i>break</i>
4:10 - 5:00	Instrumentation Monitoring and Maintenance
Thursday, December 11	
7:30 - 8:10	Inspection and Testing of Mechanical Equipment
8:10 - 8:25	<i>break</i>
8:25 - 9:15	Standing Operating Procedures
9:15 - 9:30	<i>break</i>
9:30 - 9:45	Operating Logbook
9:45 - 9:50	<i>stretch break</i>
9:50 - 10:50	Emergency Management
10:50 - 11:05	<i>break</i>
11:05 - 11:45	Safety
11:45 - 12:45	<i>lunch</i>
12:45 - 1:45	Confined Spaces
1:45 - 2:00	<i>break</i>
2:00 - 3:00	Dam Safety Perspectives
3:00 - 3:15	<i>break</i>
3:15 - 4:30	Security
4:30 - 4:45	Closing Remarks and Distribution of Certificates

圖 41、課堂訓練內容範例

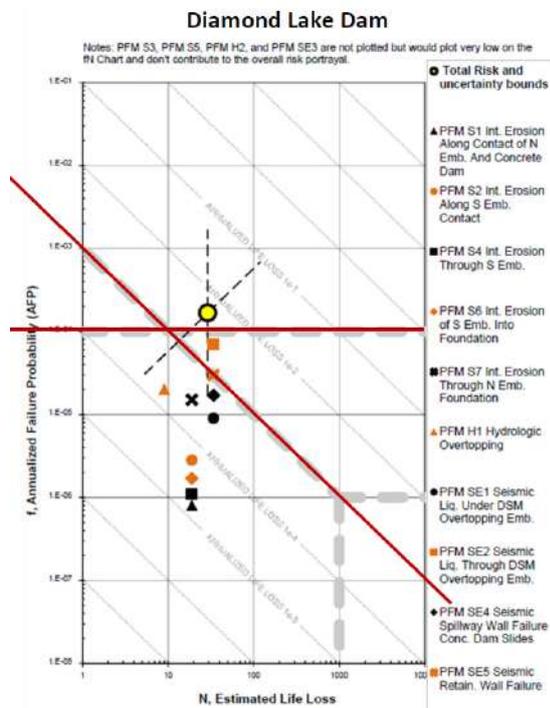


圖 42、風險描繪圖

課程 19：混凝土壩及附屬設施更新改善（1 小時，Jason Schneider）

- 授課目標：說明出水工及溢洪道更新改善主因及案例。
- 內容摘要：
 - 出水工：常見缺陷包含穴蝕、不規則流況、管路腐蝕或破裂、閘閥無法啟閉、導水管沿線或管內的內部沖蝕等。更新改善方法建議：1 有關穴蝕和不規則流況，「便宜又簡單」的解決方案是在混凝土襯砌管道中安裝進氣槽（air slots），透過改變水流狀態來消除氣泡形成的可能性，另一種方法是在控制閘門下游安裝進氣管（air pipes）；2 有關管路腐蝕，墾務局採用「管中管」(pipe-in-pipe) 或「套管」(tube-

in-tube) 的方式 (如圖 43), 將較小直徑的新管道 (如 PVC、HDPE 或鋼管) 插入原有的大直徑管道中, 然後灌漿填充, 雖然會略微降低洩洪能力, 但能有效地讓廢棄的管路重新投入使用。; 3 有關閘閥無法啟閉, 則應更換閘門及控制設備, 必要時甚至需要排空水庫進行出水管的全面新建及更換。另外, 壑務局也提到部分閘門 (如滑動閘門和球閥閘門) 通常更容易發生穴蝕現象。

- 溢洪道: 常見缺陷包含穴蝕、上頂力破壞、向源侵蝕、排洪能量不足、結構性問題 (因新的地震研究導致地震安全性不足) 等。更新改善案例: 1 McPhee 壩 (土石壩) 溢洪道洩槽因混凝土表面平整度不足造成穴蝕破壞, 壑務局以水工物理模型分析流況後, 於洩槽中段約三分之二處增設了約 3 英尺高的補氣坡道 (Aeration ramp retro-fit, 如圖 45); 2 Echo 壩 (土石壩) 建於 1931 年, 因年代久遠與設計不足, 存在顯著的地震與水文風險, 故進行壩頂、溢洪道上部洩槽及側牆的重建 (如圖 44), 並加強基礎灌漿以防滑坡、採用新型低收縮混凝土減少開裂、翻新及加固舊閘門, 壑務局還首次應用 Heat Catcher Pin 作為閘門系統的安全裝置, 其設計理念是當閘門發生意外情況 (如鋼索或液壓系統故障) 而開始快速下落時, 特殊設計的銷 (pin) 會與閘門軌道或支撐結構接觸 (閘門處於正常運作狀態時, 這些銷不會與閘門接觸) 並產生制動力, 來減緩甚至停止閘門的移動, 防止閘門因自重而無控制地下降, 造成災難性的後果。
- 混凝土壩: 常見缺陷包含溢頂風險、地震不穩定性 (壩基水平滑動風險) 等。更新改善案例: 1 Gibson 壩 (混凝土壩) 於 1964 年 6 月發生洪水溢頂事件 (最大溢頂水深約 1 公尺, 溢頂持續時間約 20 小時), 造成壩基與壩座嚴重侵蝕, 事件後, 為加固左右壩座, 採取易沖刷材料移除、錨固岩石 (rock bolting)、增設鋼筋混凝土鋪面保護等改善工程, 並於壩頂新建女兒牆、增設破水補氣柱 (aeration piers) 以於溢頂發生時減少壩體沖刷, 更新改善後如圖 46; 2 Pueblo 壩 (混凝土壩, 兩側為土石壩翼壩) 因基礎中存在軟弱頁岩與煤層, 導致溢洪道支墩 (spillway buttress) 存在滑動與傾倒風險 (如圖 47), 解決方案為在消能池內新設碾壓混凝土扶壁 (RCC plug) 來阻斷壩體基礎的潛在滑動面 (如圖 48), 並在大規模澆築時引入控制措施 (鋼製「射流槽」) 避免裂縫。



圖 43、Parmelee 壩出水工採用管中管改善



圖 44、Echo 壩頂部改建情形

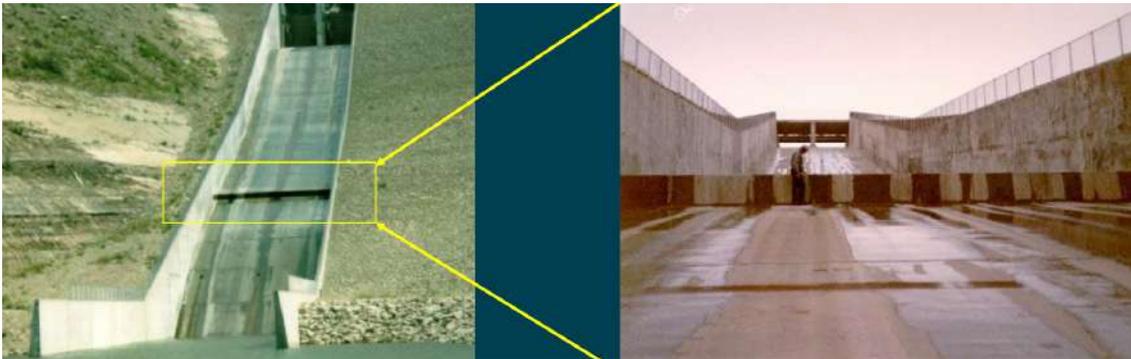
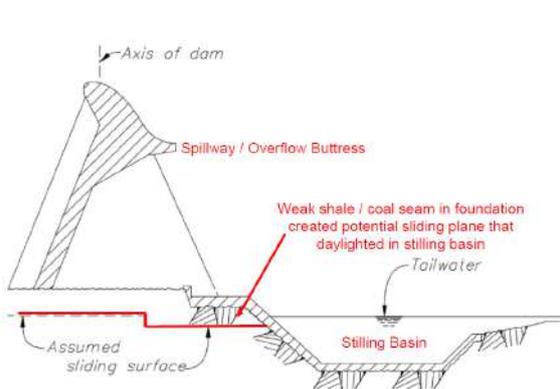


圖 45、McPhee 壩溢洪道增設起跳補氣設施

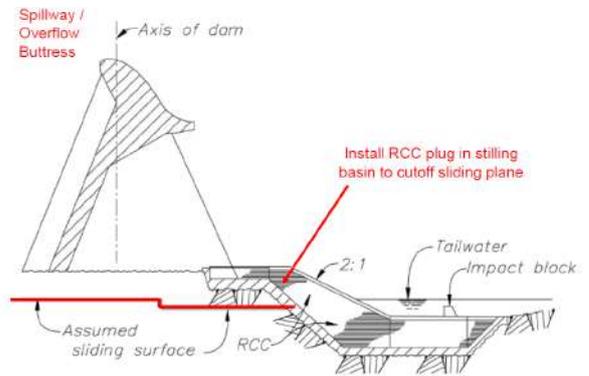


圖 46、Gibson 壩更新改善：壩座加固、壩頂增設女兒牆及破水補氣柱



BUTTRESS 10-14

圖 47、Pueblo 壩基礎弱面（更新改善前）



BUTTRESS 10-14

圖 48、Pueblo 壩 RCC 扶壁（更新改善後）

課程 20：滲流與內部沖蝕（2 小時，Peter Irely & Bret Lingwall）

- 授課目標：瞭解內部沖蝕機制及潛在破壞模式，並透過案例分享汲取經驗。
- 內容摘要：
 - 內部沖蝕的「症狀」（觀察到的現象）可能表現為滲漏、砂湧或地表坑洞，但其「根本原因」往往是設計缺陷、材料不適或施工不良（相同症狀可能由不同根本原因造成）。若僅處理症狀而不矯正根本原因，問題只會反覆出現甚至惡化。內部沖蝕是水庫破壞的主因之一（壟務局轄管水庫共有 97 個內部沖蝕事件，如圖 49），其關鍵挑戰包含：1 其發展無壟齡限制，許多壟體在營運數十年後仍可能因內部沖蝕而潰壟（約有一半的失效發生在營運五年後）；2 初期徵兆不明顯（評估困難），可能緩慢累積多年才突然失控（達到臨界點後破壞速度加劇且不易控制），因此於早期正確研判及干預至關重要，強調「預防重於治療」。
 - 壟務局將內部沖蝕分為四種主要機制，幫助工程師在面對現場症狀時，能夠系統化地追溯其背後的根本原因，做出更精準的判斷：1 沖刷（Scour），水流沿著既有缺陷（如裂縫或高滲透層）將土壤顆粒帶走，案例如 Teton 壟（提頓壟），其典型症狀是新出現的滲漏；2 向源侵蝕（Backward Erosion Piping, BEP），由下游出口逆向發展形成內部管道，典型症狀是砂湧；3 內部潛移（Internal Migration），土壤顆粒被帶走後內部形成空洞，最終導致地表塌陷形成坑洞，案例如 Red Willow 壟；4 內部不穩定（Internal Instability），細顆粒被帶走，粗顆粒殘留導致滲流速度增加，常見於寬級配土壤。
 - 內部沖蝕潛在發展位置包含（如圖 50）：1 穿越性結構物（如管道、溢洪道），剛性結構與周圍土體之間的應力集中（材料性質不同）與施工壓實不良（結構物周邊夯實不易），容易產生裂縫和縫隙，成為沖蝕路徑，為減少此類破壞，壟務局訂有底層穿越性結構物設計規範，鋼管及兩側趾部應以混凝土包覆，並排除以截水環（Cutoff Collars）為阻水方案；2 基礎與壟座接觸面，天然地質與人工壟體的介面通常是滲漏的薄弱環節；3 低塑性土壤（ $PI < 7$ ）與石膏等溶蝕性地質。
 - 應變與減災策略：設計上，水庫應具備多層次防滲系統（如不透水心牆、截水牆、排水系統）來降低風險，穿越性結構物應採混凝土包覆以便檢查；檢查與監測上，應成立技術反應小組（Technical Response Team, TRT），成員須熟悉壟體歷史、地質、設計和施工記錄，並定期檢視潛在破壞模式及監測結果，以利於異狀出現時辦理緊急應變工作，

另外，近年遙測技術（如多光譜影像）也逐漸展現監測潛力；應變通報上，發現異狀時的通報重點為滲漏位置、該處檢查頻率、滲水是否混濁、流量是否增加、水庫水位及歷程、水庫操作情形、監測儀器數值、近期天氣等，以進行初期評估，並對現場進行流量監測與影像記錄，另應同步審查地質報告、設計與歷史資料，以綜合判斷根本原因。

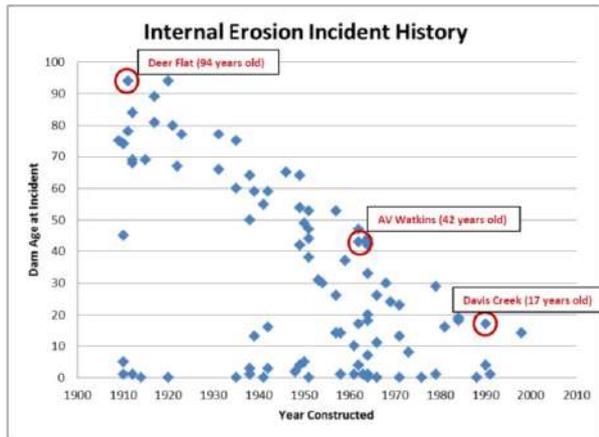


圖 49、壩務局內部沖蝕事件分布情形

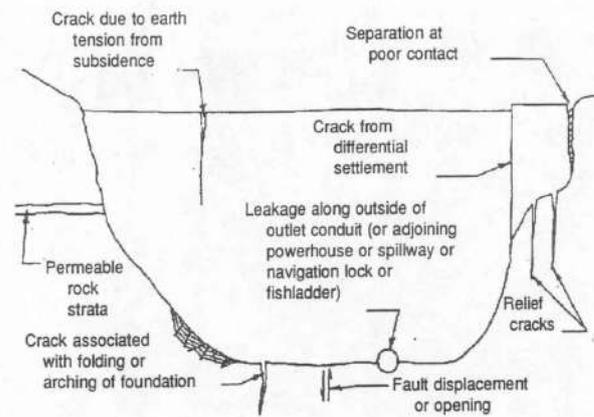


圖 50、內部沖蝕潛在發展位置

課程 21：溢洪道閘門雜物堵塞問題（45 分鐘，Melissa Shinbein）

- 授課目標：說明溢洪道雜物影響與防範策略，並分享物理模型研究成果。
- 內容摘要：
 - 本課程聚焦於溢洪道雜物對大壩安全與操作的影響，這是一個長期且持續存在的問題，其影響範圍涵蓋水庫操作及結構安全，歷史案例顯示，雜物曾直接導致閘門失效、壩座沖毀甚至潰壩。雜物來源廣泛，包括天然樹木、洪水夾帶的船隻與露營車等都市雜物、森林火災後枯木、病蟲害導致的大規模死亡林木，以及山體滑坡帶來的木石。壩務局強調預防是應對雜物問題的首要策略，未來計畫對因雜物問題而失效的水庫進行評估，並開發預防雜物問題的解決方案，例如測試新的鼓式閘門（drum gates），並研究如何最有效地阻止雜物成為一個問題。
 - 壩務局為深入了解雜物問題，進行了長達八年的物理模型研究。該研究於水工實驗室進行，採用可替換不同溢洪道類型的壓克力箱體模型（耗資約 150 萬美元），以提升成本效益。研究主要目標是檢視雜物對水面高程、洩洪能力及閘門操作彈性的影響。測試對象包括閘門式溢洪道（如圖 51）和喇叭形溢洪道（如圖 52），雜物則包含天然木材與光滑木銷。模擬情境包括「平衡測試」—在穩定入流下逐步加入雜物觀察堆積，以及「模擬洪水」—再現洪水過程中雜物隨洪峰大量進

入的情況。為了量化雜物的影響，研究引入了「閘門指數」(gate index) 來標準化不同尺寸閘門的數據（閘門指數 1 表示無阻礙、0 表示完全堵塞），將影響與水庫水頭而非實際幾何形狀相關聯。

- 研究成果發現：閘門式溢洪道的洩洪能力最多可降低 82%，當試圖維持精確的閘門開啟度（例如 30%或 50%）時，雜物經常會卡在閘門下方，但若能有操作彈性，例如保持較低的水庫水位和較小的閘門開啟度，則可以有效應對部分問題；喇叭形溢洪道則面臨更大挑戰，一旦雜物進入，幾乎無法控制，會卡在豎井或彎頭處，不論堰流（weir flow）或管流（pipe flow）模式均受影響。在 Tolt 壩的測試中，曾出現一個有趣但不可控的現象：在特定設計下，一個巨大的漩渦會形成，這個漩渦有兩種可能結果：要麼將所有雜物吸入並幫助排出，要麼將雜物全部困在出口處加劇堵塞，導致洩洪能力大幅下降。這表示設計上的細微調整可能導致不可預測的結果。



圖 51、閘門式溢洪道模型（Olympus 壩）



圖 52、喇叭形溢洪道模型（Tolt 壩）

課程 22：Hyatt 壩研究案例（45 分鐘，Elizabeth Ouellette）

- 授課目標：說明 Hyatt 壩更新改善歷程。
- 內容摘要：
 - Hyatt 壩位於美國奧勒岡州西南部，由 Talent Irrigation District 於 1922 年建造，並於 1950 年代移交墾務局管理。Hyatt 壩屬於均質土石壩，設有上游截水溝與下游排水溝。本課程旨在分享 Hyatt 壩依循墾務局風險管理流程，逐步完成滲流問題調查、風險分析、臨時措施、最終補救設計與施工過程等更新改善工作。
 - 問題發現與風險評估：早在 1970 年代 Hyatt 壩就觀測到滲漏，但多為清水滲漏，直到 1980 年代和 2000 年才陸續出現滲流異常情形（包括滲流量驟增或新滲漏點形成）。2009 年情況惡化，引起全面關注。

2010 年進行趾部排水管攝影與地質鑽探以蒐集資料(因原始建設文件極度匱乏,僅有少量手寫報告和四張設計圖),發現基礎存在厚約 5 公分的潮濕砂層,且玄武岩基岩破碎嚴重,其破裂高度與水庫水位高度一致,顯示問題的根本原因為基礎缺陷或心牆滲漏。基於初步調查結果,墾務局進行了風險分析,主要的潛在破壞模式為內部沖蝕,潛在發展位置(如圖 53)包含潮濕砂層或壩基與心牆的接觸面,且可能在非極端荷載的常態條件下隨時發生,因此啟動「高度優先」的專案評估(Issue Evaluation, IE)。

- 臨時性風險控制與初步措施：為爭取時間進行改善設計(原始文件和數據的缺乏讓設計團隊舉步維艱)和施工,墾務局採取了數項臨時措施以降低風險。首先,限制水庫放水量並加強日常監測(當水位達到特定高度便進行每日監測);其次,於趾部滲流區填設砂石以穩定出口區域。這些措施有效維持了結構穩定性,監測數據顯示在臨時措施下未出現惡化情況。
- 2011~2016 年墾務局進行改善措施研究(Corrective Action Study, CAS)與設計,提出改善方案及風險調降措施,核心目標是建立下游濾層和排水系統,以防止基礎材料內部沖蝕並收集滲流,解決方案包括更換舊有趾部排水管、採用具濾水功能的新管材、對破碎玄武岩基礎進行灌漿,並改善濾材規格。2017 年辦理更新改善工程(橫剖面如圖 54),為期六個月,需在冬季前完成,且輸水設施必須持續運作以維持灌溉供應。施工挑戰包含:於堅硬玄武岩中鑽孔進行排水工作困難、基岩表面比預期更為複雜需額外灌漿處理、濾料品質未能完全符合規範、承包商在切割擋土結構時誤挖位置,以及現場新發現潮濕砂層,需即時延伸濾層設計。施工完成後,Hyatt 壩於 2017 年 11 月開始恢復蓄水(數年後才完全滿溢),初期每日監測,後逐步轉為例行性監測,均未出現異常。墾務局於 2018 年再次進行風險評估,確認潰壩風險已大幅降低,監測結果顯示,孔隙水壓計等儀器讀數皆符合預期,水庫運作良好。

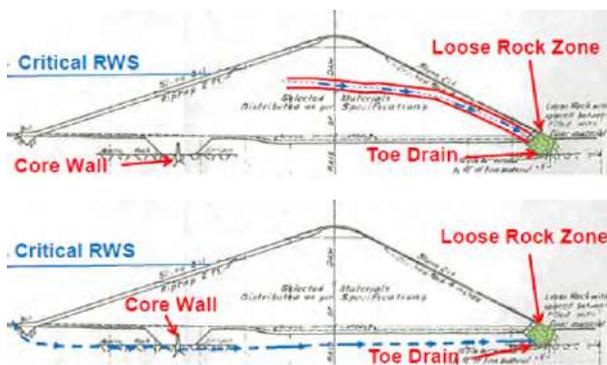


圖 53、潛在破壞模式與發展位置示意圖

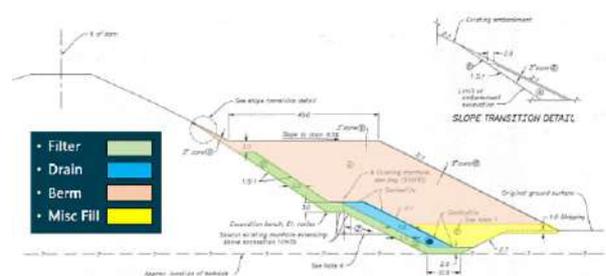


圖 54、更新改善工程橫剖面圖

課程 23：混凝土壩檢查技術（1 小時，Jaron Hasenb）

- 授課目標：介紹混凝土壩型式、檢查位置及要領。
- 內容摘要：
 - 混凝土壩的主要型式有重力壩（Gravity Dam）、拱壩（Arch Dam）、扶壁壩（Buttress Dam）、複合壩（Composite Dam），其中複合壩為組合混凝土及土石壩等不同壩型的壩體。混凝土壩主要檢查位置包含基礎和壩座、上下游壩面、壩體內部廊道、壩頂。常見問題包含混凝土材料（如裂縫及穴蝕等）、差異變位、基礎及回填料、滲流、排水等。
 - 裂縫是混凝土壩重要的觀察指標，新的裂縫尤其需要特別注意，其檢查重點包含仔細記錄並判斷裂縫新舊、是否持續擴大，以及它們可能預示的潛在問題。差異變位也需要關注，檢查時可以放置參考物以便更加清晰地觀察裂縫或位移的尺寸變化，或者可以觀察壩體周圍的牆壁和扶手，亦是識別結構位移的關鍵方法。對於監測壩體內部狀況而言，廊道提供了一個安全且受控的環境，並進行必要的維護工作，它們的存在對壩體的長期健康和安全管理至關重要。



圖 55、混凝土耐久性的主要改良歷程

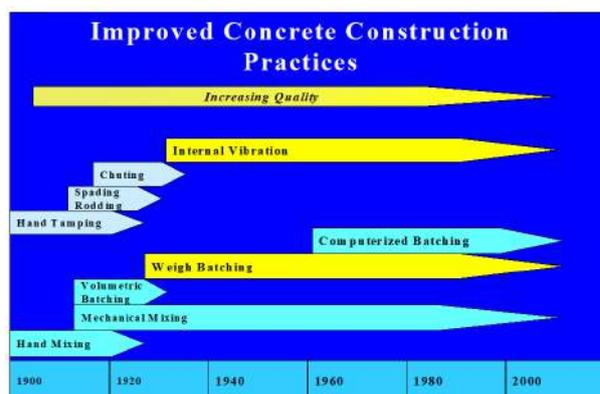


圖 56、混凝土施工技術改良

課程 24：土石壩檢查技術（1 小時，Jaron Hasenb）

- 授課目標：介紹土石壩型式、檢查位置及要領。
- 內容摘要：
 - 土石壩主要檢查位置包含基礎和壩座（重點為接觸位置）、上下游壩面、壩頂。採用系統的檢查方式，如平行壩軸或 Z 字型檢查線（如圖 59），以查看全部的壩面及周圍區域，檢查時間應包含不同水庫水位狀態，並以科技（如相機）協助建立檢查資料，以讀者視角製作檢查紀錄，如圖 57。

- 土石壩常見問題（如圖 58）包含壩頂裂縫及局部沉陷、壩體植生及動物挖掘、壩體及壩座交界處滲流、壩面局部陷落、壩趾下游砂湧、出水工沖蝕淘刷、附屬設施混凝土損壞、沿穿越性結構物管湧、壩基穩定性失效。壑務局也提到，通常觀察壩體是否出現茂盛的「嗜水型」植被（如香蒲）也可作為滲流指標（如圖 60）。

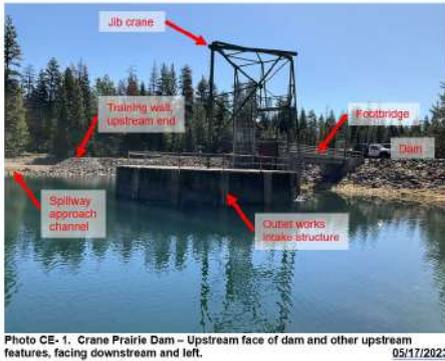


圖 57、以讀者視角製作檢查紀錄

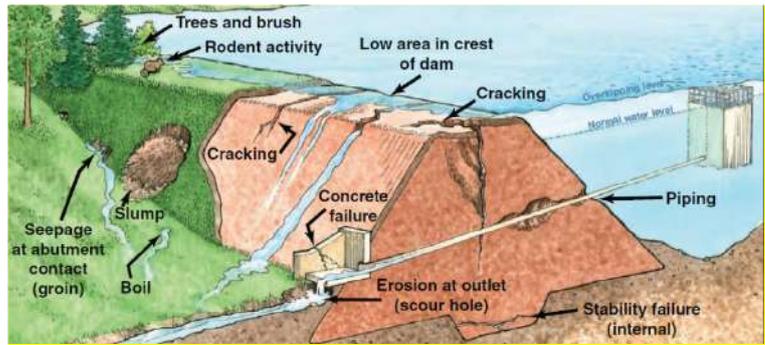


圖 58、土石壩常見問題



圖 59、Z 字型檢查線



圖 60、觀察壩體嗜水型植被作為滲流指標

學員分享：臺灣大壩安全管理（20 分鐘，司徒美惠）

- 分享目標：向其他學員介紹臺灣、水利署及水庫管理作為。
- 內容摘要（簡報詳附錄 2）：
 - 介紹臺灣基本資訊（地理環境、氣候型態、人口規模）、水利署核心任務與近年工作重點（新興水資源開發、珍珠串計畫、多元清淤）、水庫現況與運用標的、水資源挑戰與水庫重要性（地震及颱風頻繁）等。
 - 概述臺灣水庫安全管理制度（架構包含安全評估、安全檢查及監測、例行性維護與操作）、安全評估執行流程（含啟動時機）及辦理內容、安全檢查及監測執行方法（訂定安全維護手冊、定期與不定期檢監測）等。

- 以曾文水庫的檢查及操作實務為例，說明設施現況（基本資訊、蓄水量與排洪能力、供水供電效益）、檢監測範圍及項目（土建結構、水工機電、周邊環境）、監測系統（儀器位置與數量、監測頻率、告警措施）、地震應變作為與滲流行為監測（以 2025 大埔地震為例）、防洪操作策略暨整備與預報工作（以 2024 凱米颱風為例）等。

（三）參訪實習

參訪 1：參觀墾務局實驗室（丹佛聯邦中心）

本次參訪的墾務局實驗室，位於丹佛聯邦中心，整體園區及實驗室皆有嚴格門禁管制，需預約並逐一換證方能進入。墾務局人員帶我們參訪了多個實驗室，並由各實驗室的成員簡要說明目前執行中的工作項目。

- 水工實驗室：水工實驗室創立於 1930 年，其服務項目包含水工物理及數值模型、水理分析與現地水文量測等，主要針對已發現水理問題的既有水工結構，為水庫管理單位提供實驗結果及建議改善方案，簡章如附錄 3。實驗室擁有挑高空間可建置物理模型，並設有截水及排水設施，實驗用水採循環利用。實驗室成員介紹了 4 組水工模型，包括下游魚類洄游設施（juvenile fish passage facility）的設計與物理模型測試、壩基或消能渠襯砌因水力抬升（Hydraulic jacking）導致破壞的研究（以 Oroville 壩溢洪道事件為例）、以 1:32 縮尺模型模擬 Glen Canyon 壩下游的尾水沉積與沖刷行為（如圖 61）、模擬低壓環境研究穴蝕（cavitation）對結構的影響並測試抗穴蝕消能塊設計（如圖 62）。



圖 61、模擬 Glen Canyon 壩尾水沉積行為



圖 62、測試抗穴蝕消能塊設計成果

- 地工實驗室：四大類核心服務包含土壤力學實驗、岩石力學實驗、現地調查及試驗，以及土壤與岩石相關研究。主要服務對象為墾務局轄管設施，協助評估設計、施工及研究所需的材料性質，並可至現地執行地球物理調

查。現地調查之土壤岩芯樣品（如圖 63）會封裝儲存，並清楚標示來源、採樣點與深度，以用於材料性質試驗、沉積物分析或地基研究。



圖 63、土壤岩芯樣品與封裝情形

- 混凝土實驗室：主要工作是評估混凝土狀況及進行結構試驗。實驗室提供多元服務，包含施工材料建議、協助研擬修補計畫、客制化試驗及設備製作，以及狀況評估等。攜回的混凝土試體會先儲存於大型保濕室，再依排定行程取出進行試驗。實驗室配有 Baldwin 大型載重試驗機（如圖 64），高度達數層樓，主要用於對混凝土、鋼材或結構件進行壓縮與強度試驗，是水庫材料研究與結構安全的重要設備。



圖 64、Baldwin 大型載重試驗機

- 生態實驗室：主要聚焦於入侵性貽貝(斑馬貽貝及斑驢貽貝)問題的研究。這些貽貝約在 30 年前入侵美國，目前已散布至南亞利桑那州及加州地區的許多水庫，主要傳遞媒介被認為是遊客四處旅遊攜帶的私人小型船舶。入侵性貽貝會附著在水管、閘門及其他設施上，使水力發電廠的維護成本增加，甚至可能造成設備停機進而導致無預期停電。除了對基礎設施的危害，這些貽貝還會破壞當地的生態系統，影響漁業和水質，並對公共遊憩活動帶來負面衝擊。墾務局於 2008 年啟動入侵性貽貝早期檢測計畫，主要透過兩種技術來檢測貽貝：聚合酶鏈式反應 (PCR) 與顯微鏡分析。PCR 是一種分子生物學方法，可從水體樣本中檢測貽貝的 DNA，即使是數量極少的貽貝幼蟲也能被偵測出來。實驗室人員也會搭配使用顯微鏡，直接觀察和辨識水體樣本中的貽貝幼蟲。早期檢測對於應對入侵性貽貝至關重要，因為一旦發現貽貝幼蟲，就可以立即採取應變及控制措施，避免其在水庫中大規模繁殖，並進一步擴散至其他水體。目前墾務局的檢測範圍已涵蓋了美國西部 17 個州的 652 個水體，並以每年約 1,500 樣品的速度持續進行。實驗室人員提到曾有螺旋槳僅下水 11 個月就被貽貝覆蓋並失效，並展示了遭貽貝長滿而堵塞的管路，實驗室人員也強調入侵一旦發生，幾乎難以挽回 (繁殖速度極快)。



圖 65、入侵性貽貝早期檢測計畫說明海報

參訪 2：現地模擬檢查—Pueblo Dam（普韋布洛壩）

Pueblo 壩（普韋布洛壩）於 1975 年完工，位於科羅拉多州南部、阿肯色河流域（Arkansas River Basin）上游，距離普韋布洛市西南方約 10 公里處，大壩位置如圖 66、照片如圖 67。興建目的係為科羅拉多州東部地區提供補充水源，運用標的包含灌溉用水、工業及民生用水、防洪、水力發電及遊憩等。因基礎中存在軟弱頁岩與煤層，於風險評估中指出溢洪道支墩存在滑動與傾倒風險，爰於 2000 年左右由墾務局進行補強改善工程，在消能池內新設碾壓混凝土扶壁（RCC plug）以切斷潛在滑動面，提升基礎穩定性。

- 基本數據：複合壩，由中間的混凝土段（扶壁壩）及兩側的土石壩翼壩組成，壩高約 76 公尺、壩頂長約 3,118 公尺。滿水位標高約 1,493 公尺，總蓄水量約 4.4 億立方公尺（其中防洪空間約 1.15 億立方公尺），集水區面積約 12,137 平方公里。溢洪道（自由溢流式）設計排洪量約每秒 5,422 立方公尺，至今尚未使用過，另設有多個出水設施（合計最大出流量約每秒 340 立方公尺），包括灌溉渠、南側出水工、北側出水工（連接一座 8 百萬瓦的水力發電廠及兩座泵站）、河道放水道等，發電廠由私人承包商營運，不屬於墾務局所有。
- 水庫管理：水庫及其周邊土地的所有權與營運管理單位均為墾務局東科羅拉多區辦事處，另會與陸軍工程兵團（Army Corps of Engineers）合作，共同管理水庫的防洪空間。科羅拉多州公園與野生動物管理局則透過合約負責管理水庫周邊的土地、娛樂活動及執法工作。
- 現地檢查：
 - 檢查人員應依據「墾務局設施檢視綜合報告」（土石壩、混凝土壩）逐項確認並填列檢查結果，空白表單如附錄 4 及附錄 5。為將檢查情形紀錄於系統以利後續歸檔，檢查人員亦配有平板隨身攜帶（如圖 79）。
 - 現地模擬檢查由墾務局人員帶隊領勘，並依序檢查：混凝土壩及溢洪道下游側（仰視）、落水池及下游河道、土石壩下游側壩面（Z 字型檢查線）、壩體趾部周邊及量水堰、混凝土壩廊道、河道放水道閘室、北側出水工閘室、河道放水道出水口、土石壩壩頂（實體圍欄管制進出）、土石壩上游側壩面、混凝土壩壩頂及溢洪道（俯視）。
 - 領勘人員說明：檢查頻率分為年度檢查（快速的初步檢查）、週期性設施審查（每四年一次，更深入的檢查）、綜合檢視（每八年一次，由 10 人以上的工程師團隊花費數天對整個水庫進行）等 3 種層級。普韋布洛壩由於建造時的品質控制不佳，過去檢查發現壩體存在滲漏情形，尤其在混凝土部分的層縫之間（如圖 74，未徹底清理各層之間的介面

所致)，此外，壩體的骨料和水本身含有高量的鈣，導致了鈣化現象。數年前，墾務局辦理改善工程，旨在密封上游側的接縫，成功將壩體內部的滲漏量減少約 50%。然而，由於上游趾部存在碎石護坡（rip rap），故某些區域未能完全密封。目前所有主要的潛在破壞模式都集中在翼壩部分，因此該區域裝設了大量的監測儀器，包括傾斜儀、觀測井，和用於測量壩體變形的儀器。

- 模擬檢查情形（如圖 68 及圖 69）：土石壩下游側壩面有觀察到局部材料凸起現象、部分遭水流沖刷路徑及坑洞，另外因其檢查範圍廣大且需人工步行，經洽領勘人員表示，他們通常會每年分區輪流檢查。土石壩的內部滲流會經由趾部排水溝集中到壩體趾部的集水井與量水堰，並同時監測是否有土沙流出，以確認是否存在材料侵蝕問題。混凝土壩內部廊道及閘室環境良好，照明、緊急電話配置、管線整理及標示（如圖 70 及圖 71）均有維護完善並落實。有關土石壩與混凝土壩交界面是否出現滲水情形，經洽領勘人員表示，當初建壩時有做止水處理，故目前均未發現相關跡象，狀況穩定（如圖 75）。河道放水水道設有固定錐閘，當發電廠不運行時，可直接向河道排放約每秒 28 立方公尺的水量，作為基流量（如圖 72）。混凝土壩壩頂設有監測接縫狀況的儀器（如圖 77），溢洪道上亦設有稜鏡以長期監測結構位移，並於定期檢查時進行維護。



圖 66、普韋布洛壩位置圖（Google Map）



圖 67、普韋布洛壩照片（墾務局網站）



圖 68、現地檢查情形（土石壩下游壩面）



圖 69、現地檢查情形（混凝土壩廊道）



圖 70、管線標示情形



圖 71、河道放水道閘室環境



圖 72、河道放水道出水口（放水中）



圖 73、落水池及下游河道現況

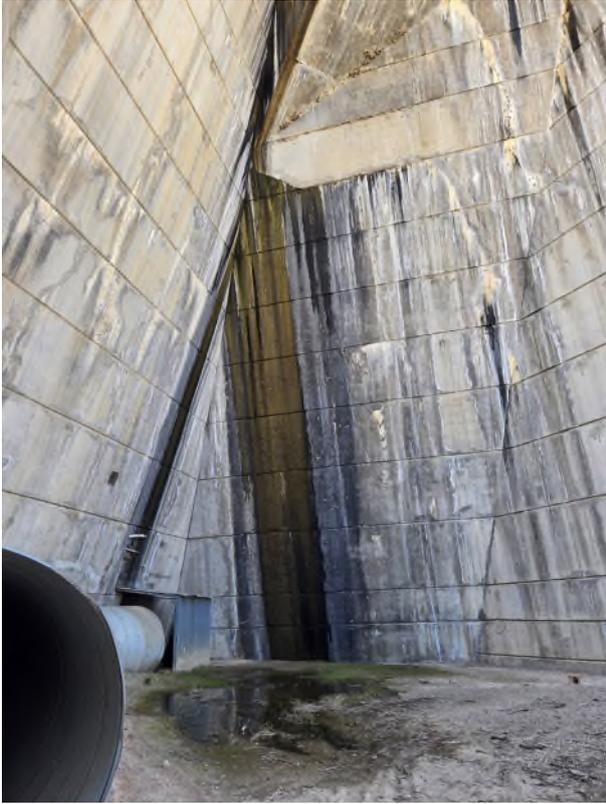


圖 74、混凝土壩層縫滲水情形



圖 75、土石壩與混凝土壩交界面

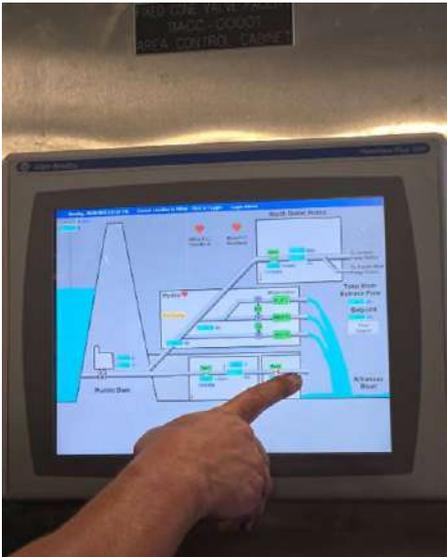


圖 76、北側出水工監控畫面



圖 77、混凝土壩接縫處變位監測（需人工量測）



圖 78、混凝土壩壩頂及溢洪道



圖 79、檢查人員配有平板紀錄檢查情形

參訪 3：參觀 Hoover Dam（胡佛壩）

Hoover 壩（胡佛壩）於 1936 年完工，位於下科羅拉多區（Lower Colorado Region），距離拉斯維加斯東南方約 56 公里處，攔蓄的水庫稱為米德湖（Lake Mead），大壩位置如圖 80、照片如圖 81。水庫由墾務局營運管理及維護，興建目的係為提供水資源管理及發電服務，電力主要供應拉斯維加斯、加州、亞利桑那州，內華達州則佔少部分。胡佛壩為國際觀光景點，設有警衛哨進行檢查，遊客可以上線預約或現場購票參加導覽。

- 基本數據：混凝土厚拱壩，壩高約 221 公尺、壩頂長約 379 公尺、壩頂寬約 13.7 公尺（壩基寬約 201.2 公尺）。壩頂高程標高約 375.5 公尺，蓄水量約 357 億立方公尺，集水區面積約 43.5 萬平方公里。溢洪道（閘門控制式）位於大壩兩側，設計排洪量約每秒 7,641 立方公尺。出水工放水流量約每秒 1,477 立方公尺。靜發電量 32.5 億 kWh。
- 本次研習班安排遊客無法參加的特別導覽行程：
 - 胡佛壩設施配置平面圖如圖 103，本次參觀路線包含：胡佛壩歷史展示館、壩頂（說明取水塔、溢洪道等）、水力發電廠（如圖 98，說明水輪機組及電廠相關設備）、壩座內廊道（出口處如圖 101）、下游側出水工（說明各類放水設施）、胡佛壩大橋下方、壩體下方廊道、壩體下游側平台（說明壩面檢查方式）。

- 胡佛壩歷史展示館：胡佛壩的建設歷時五年（1931~1936），耗費巨大資源並動員超過 2 萬名工人（如圖 84），創造了當時世界最大的人造水庫。其工程方法（如分塊澆築、冷卻管線、跨峽谷纜車系統）成為後續大型水庫工程的典範（建壩施工示意模型如圖 87）。這座大壩不僅象徵美國西南部水資源與電力開發的里程碑，也見證了 20 世紀初工程技術與人力的結合。
- 胡佛壩的混凝土澆築是當時最艱鉅的挑戰之一。由於沙漠高溫，若澆築成單一整體方塊，混凝土需要超過 100 年才能完全散熱，因此設計者將壩體分割為 215 個交錯排列的方塊（如圖 89）。施工時鋪設約 241 公里的鋼管，並利用科羅拉多河水經冷卻廠降溫後通過管線以帶走水化熱，確保混凝土不會因高溫而龜裂。這種「分塊澆築、管道冷卻」方法是胡佛壩成功的關鍵之一。
- 由於施工地形險峻，施工材料必須依靠跨越峽谷的纜車系統運輸（如圖 86 及圖 90）。當時設計了多條移動式纜車，可承載多達 20 噸的混凝土與建材，將材料精確送達施工位置。部分固定式纜塔在完工後仍被保留，用於後續維護作業，最大承重達 150 噸。此外，固定式吊機也輔助搬運大型構件。這些創新運輸系統大幅提升了效率，縮短了施工工期。
- 水庫相關設施解說：經洽引導人員表示，目前水庫水位自 1990 年代以來持續下降，已處於歷史低點，而溢洪道（如圖 93 及圖 94）啟用至今僅於 1941 年（首次蓄水測試時）和 1983 年（洪水期間）使用過兩次，其堰頂上設有鼓形閘門，拉起時便能再增加蓄水量（如圖 96）。大壩上游側左右岸共有 4 個取水口（如圖 95），可將水從（依上下游排列）發電出水口、排水設施出水口、導水隧道出水口（建壩時的導水隧道於水庫落成後即轉為溢洪道使用）排入下游河道（如圖 104），後兩者可不經過發電機組，其中兩岸排水設施出水口原設計左右岸各 6 孔（如圖 100），經重新檢算水文條件，靠近大壩的 4 孔不需再使用已進行封堵，以減少壓力鋼管所需維護經費（輸水鋼管如圖 102）。混凝土拱壩下游壩面（如圖 99）每年會進行 4~5 次的定期目視檢查，由檢察人員拉繩索從壩頂下降方式進行並透過攝影記錄進行評估，壟務局引導人員也表示，未來計畫將採用無人機進行全面掃描，以更精確地監測壩體微小的變化。發電廠共有八層樓高，辦公室和營運單位也設於其中，右岸電廠機組共 8 組、左岸電廠機組共 9 組（水輪機單元剖面圖如圖 97），滿載運轉時，可產生 2080 百萬瓦的電力，然而，由於水庫水位低及部分機組維修，目前發電量約為 1000~1100 百萬瓦。下游側胡佛壩大橋（又稱 Mike O'Callaghan-Pat Tillman Memorial Bridge）於 2010 年通車，比下方河道高出 270 公尺。



圖 80、胡佛壩位置圖 (Google Map)



圖 81、胡佛壩照片 (墾務局網站)



圖 82、庫區內依地形建置的高壓電塔

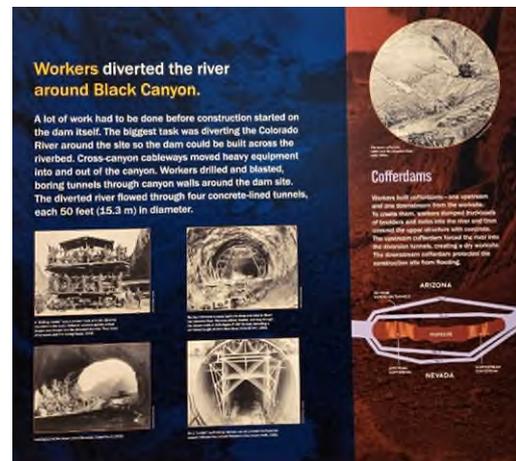


圖 83、導水隧道施工及圍堰情形



圖 84、胡佛壩耗費巨大資源及人力



圖 85、壩體下游測放水設施

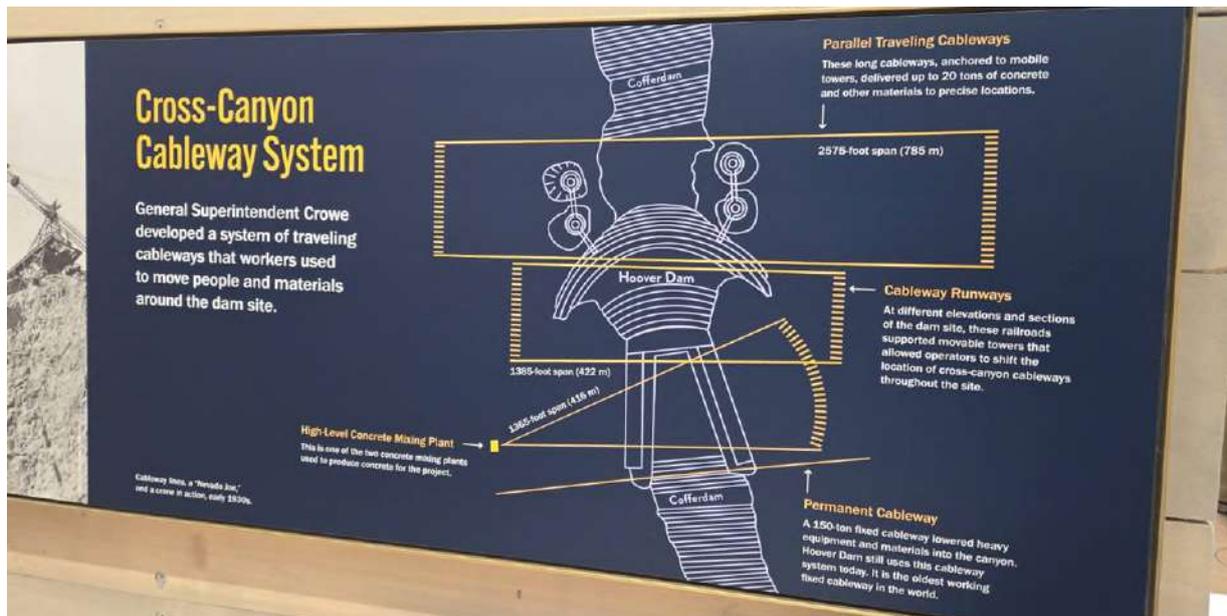


圖 86、建壩施工纜車系統說明（部分纜塔於完工後仍保留並用於維護作業）



圖 87、建壩施工示意模型



圖 88、混凝土澆築設備



圖 89、壩體混凝土分塊澆築說明



圖 90、固定式纜塔及跨越峽谷的施工纜車



圖 91、建壩施工情形示意圖（鑿孔作業）



圖 92、建壩施工情形示意圖（纜車）



圖 93、溢洪道堰頂及鼓形閘門



圖 94、溢洪道隧道進水口結構

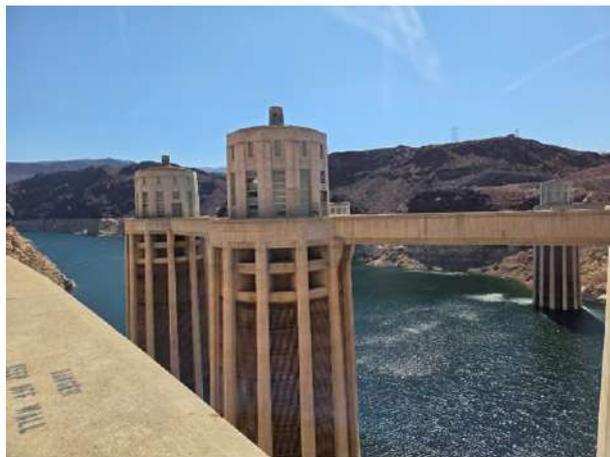


圖 95、上游側取水塔共 4 座（含攔污柵）



圖 96、溢洪道鼓形閘門說明

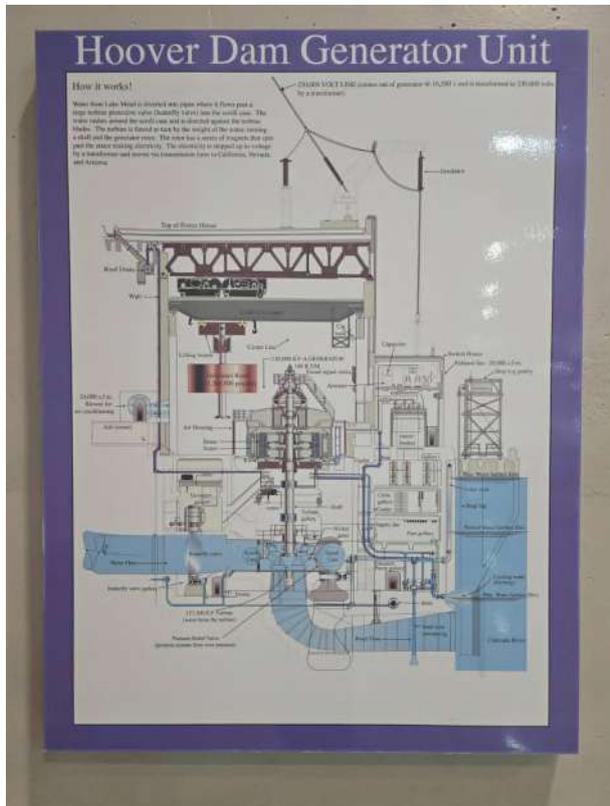


圖 97、水輪機單元剖面圖

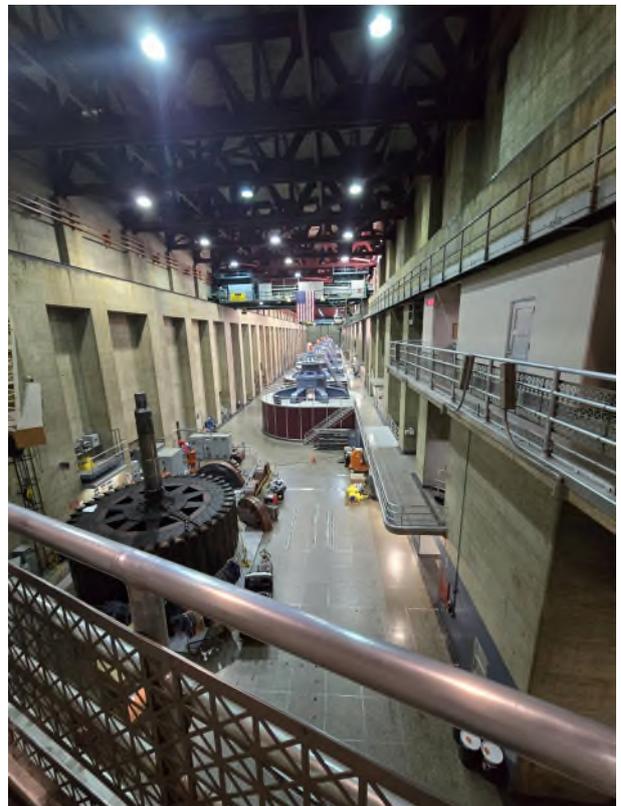


圖 98、水力發電廠內部情形



圖 99、壩體下游側壩面



圖 100、排水設施出水口



圖 101、壩座廊道出口（無襯砌）

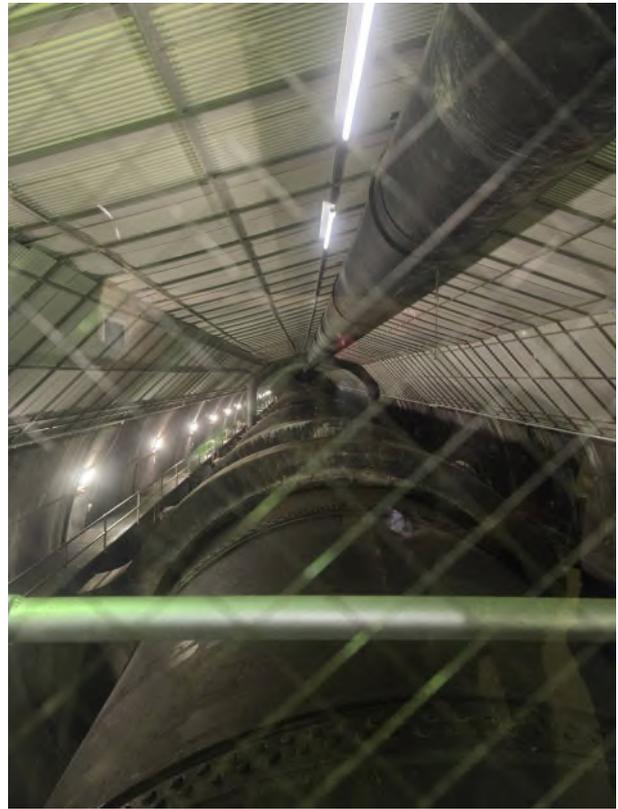


圖 102、壩座輸水管線維護情形



圖 103、胡佛壩設施配置平面圖

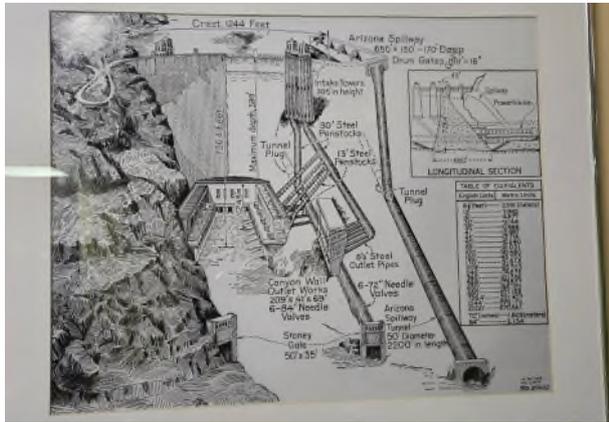


圖 104、壩座輸水管線透視示意圖



圖 105、電廠內緊急逃生出口告知看板

四、心得及建議事項

國內水庫安全管理課題自民國 70 年開始受到重視，目前公告之水庫多已執行安全評估及安全檢查機制多年，並持續依相關規定維護、運轉水庫設施，主管機關與水庫管理單位亦熟稔相關流程，管理制度已趨近成熟穩定。本次受派前往美國「壩務局大壩安全 SEED 研習班」，深入瞭解壩務局水庫安全評估執行現況，並實地參訪第一線水庫管理工作場域，實屬難得，透過研習經驗也體認到臺灣水庫安全管理工作已經辦理的非常紮實。雖受限於地形、氣候條件，國內水庫規模較小且外力危害頻繁，卻也因此使得各水庫受到更為精緻地管理，在某些領域上（如清淤、洪水預警）甚至可能多過美國目前的管理作為，值得向國際分享工作成果。即使如此，國內制度仍有許多不足、應持續精進之處，以下將分別從不同面向提出建議事項。

（一）針對日常維護管理及檢查監測部分。

首先，壩務局多由內部人員直接辦理設施的操作維護與檢查監測，因此制定有「標準作業程序」提示工作步驟及作業細節，及說明與記錄監測儀器詳細資料，而國內水庫管理單位囿於人手不足及專業需求考量，多委託外部單位執行第一線工作，管理人員則退居「審查」的角色。目前國內水庫已具備「安全維護手冊」、「水庫運用要點及水門操作規定」、「緊急應變計畫」等書面資料，建議水庫管理單位可（委請執行團隊）再針對安全監測系統訂定作業手冊，納入監測儀器說明及照片、儀器校正或變更紀錄沿革，以供建檔管理，並應定期辦理更新。而機械及電氣設備部分亦應全面檢視（機關或執行廠商）是否已訂定相關操作與維護標準。

第二，監測實務建議。本次研習中，壩務局於 Echo 壩（土石壩）案例提及「Heat Catcher Pin」這個首次應用的閘門系統安全裝置，可以

被動預防閘門發生意外而無法控制地下降之情況，建議國內水庫管理單位也針對此類閘門風險及預防方法進行研討。另外，墾務局也提及水壓監測及滲流監測資料建議使用「散佈圖」進行數據分析，更能有效判斷其與水庫水位的實際響應關係，並依此設定警戒值。監測工作對水庫安全管理至關重要，建議管理單位比照墾務局建立監測數據管理系統（建議可含人工量測項目，如位移觀測點、傾斜管等），並以數值化輸入（非紙本文件掃描成電子檔形式）、圖像化呈現之原則管理，除可將資料歷史完整留存，亦能根據過去的表现數據律定警戒值（墾務局做法）。也建議將數據超限的應變機制及下一步作為（如加強監測頻率）落實研擬並納入「安全維護手冊」。

第三，國內水庫近年已效仿美國導入風險管理制度，建議針對「風險分析」、「風險評估」等概念加強宣導，提升水庫安全相關參與人員（機關管理人員、執行廠商）對「風險告知決策」內涵的正確理解，避免落入僅追求分析數字高低的簡化評估（墾務局特別強調），進而演變成逃避對「風險」進行討論的氛圍（例如對風險分析預設可接受結果）。另外，潛在破壞模式辨識及風險評估成果應能持續反饋到水庫的補充調查規劃（如鑽探、實驗室分析等），使管理單位逐年提升對水庫及風險的全面理解，建議可視國內制度特性檢討相關可行作法、工作流程及預算規畫方式（並非一定要在定期安全評估辦理）。水庫管理單位應著重於風險管理的正面意義，將其視為對外溝通、尋求資金的工具（例如墾務局建立重大修復與汰換需求清單，以向國會爭取預算），並延伸管理工作視野，展望未來 5 年、10 年的重大專案需求。

第四，水庫安全管理重點工作包含安全資料之建檔，惟水庫自規劃、設計、施工階段至運轉維護期間之安全資料歷經不斷累加而無比龐大，目前水庫管理單位多僅以紙本文件掃描成電子檔案後保存於電腦資料夾為主，相關管理人員通常包含數名，導致資料分散多處，且無閱覽或編輯權限設定功能，另外資料夾樹狀結構分層收納，又無相關編目可供檢索，容易造成資料完善性不足及管理效率低落等問題。建議國內可從主管機關（經濟部）高度，以安全評估「溯及全生命週期」之理念，建置數位化管理系統（資料庫），並由各水庫管理單位依規定項目負責重要安全資料（如水庫更新改善及修復補強等施工紀錄、歷年的安全檢查監測報告等）之上傳、更新及維護，以完整呈現水庫管理沿革，且系統上可將水庫基本資料特徵化（如壩高、庫容，及危害等級、關鍵等級等分類），以便往後資料篩選及統計分析作業。另外，也建議學習墾務局以數位化管理系統建立缺陷追蹤機制，詳細記錄每一項（包括已完成和未完成）改善工作的執行狀況並分類（嚴重且急迫、限期改善以預防惡化、建議可改進），以利管理單位及後續檢查人員掌握與追溯歷史脈絡，並確保重

要缺陷不會被忽視，也為決策者提供清晰的優先順序，依人力及經費安排改善期程。

（二）針對緊急應變整備工作部分。

首先，落實末端的潰壩演練是所有的第一步，逃避風險並不會使風險降低。建議國內水庫先從試辦高司演練開始，邀集下游相關單位一同參與及審視。應變情境也並非一定要潰壩，預防性撤離（如水庫本身無虞，惟需因應緊急情況的高流量洩洪）也足以達到「通知下游單位執行疏散」、「採取干預行動以防止潰壩」的兩大目標，不僅能幫助水庫管理單位評估自身緊急應變量能、驗證緊急應變計畫之有效性、強化與下游單位的聯繫、全盤檢視應變流程是否符合實務，更可以提高下游單位風險意識，並讓所有參與應變的單位都清楚其角色職責。

第二，墾務局強調，疏散民眾是下游單位的職責，非水庫管理單位的權限，但管理單位應採用緊急等級來與下游單位溝通事件的嚴重性（如墾務局分為等級 1 的潛在威脅~等級 4 的水庫已潰壩），並務必與下游單位共同討論及協商各等級的觸發條件，例如當水庫水位已達溢洪道頂部（觸發條件），則通知下游單位水庫已進入等級 1 的應變階段（等級 1：潛在威脅，通知下游單位準備疏散）。建議國內水庫可參考上開機制，律定緊急等級分類與觸發條件，並納入緊急應變手冊。另外，也建議各水庫管理單位再確實與下游單位共同盤點避難點位是否符合情境需要（如建物高度是否足夠、避難時間是否足夠、建物可容納人數是否足夠）。

第三，建議各水庫緊急應變手冊參考墾務局作法，將核對清單（律定每個角色的具體任務）及應變等級決策矩陣（將事件類型與緊急等級匹配）等重要工具納入辦理。緊急應變手冊應設計成使用者友善、精簡有效，而非過於冗長的文書，且能為水庫管理單位提供具體的指示和程序。水庫「干預措施」的處置原則亦建議納入緊急應變手冊說明，墾務局提及，因水庫管理單位對於「事件行動計畫」較不熟悉，建議可與相關警消單位聯合演練。另外，因維安專業並非水庫工程師擅長領域，目前國內水庫維安組織及管理制度仍稍嫌不足（針對關鍵等級高者），建議可邀請相關執法單位或其他關鍵基礎設施管理單位協助檢視及提供建議。

（三）針對人員訓練與經驗傳承部分。

建議水庫管理單位加強落實人員培訓工作，雖然國內管理人員多已退居「審查」的角色，但為確保人員具備督導委外廠商的能力，應比照墾務局理論知識（課堂訓練）與實際操作（現場訓練）的雙軌訓練模式進行，並要求水庫管理中心所有人員均須參加（屬例行事務而非只上一

次課，建議可採調訓方式），提升人員對水庫的了解及辨識異狀的敏銳度，並充分理解相關緊急應變措施。

承上，課堂訓練建議每 3~4 年辦理一次，主要聚焦水庫安全管理實務（如設施操作及維護、安全檢查及監測、大壩安全事件案例、潛在破壞模式、風險分析及風險評估、地質與耐震設計、緊急應變計畫等），並可將當下最新研究發現、實務經驗或技術方法納入課程規劃（如無人機檢查），課堂訓練旨在促進知識的傳遞，以及跨單位人員間的交流討論；現場訓練建議每年辦理，主要帶領受訓人員判讀監測數據及實地走訪設施執行模擬檢查，前往現地前可先安排於室內說明該次檢查設施的基本資料，並檢視近年監測數據表現情形，接著實地檢查則著重於「親自」目視檢查，建議可配發受訓人員該水庫實際的安全檢查表，以貼近實務辦理情形。現場訓練可每年擇不同水庫辦理，各單位人員透過參訪其他設施進而回頭審視並參考借鑒，達到促進水庫管理單位橫向交流之目的。

（四）針對研討學習工作與國際交流部分。

首先，墾務局當前面臨之挑戰均與國內相似，建議持續透過「臺美水資源發展技術支援協議」交流共同難題，例如老壩的更新改善、既有水庫矯正措施及補強工法、大壩安全事件臨時性風險控制措施、庫區及河川的泥沙運移行為、地震下的大壩行為表現、溢洪道閘門雜物堵塞問題等。並建議盤點多年交流成果，蒐集整理全球（主要為美國及國內）大壩安全事件，並整理成冊，提供各水庫管理單位參考學習，以逐步建立經驗教訓分享制度（墾務局已建有失敗案例和經驗教訓的數據庫）。

第二，建議國內水庫積極重視內部沖蝕之破壞模式。內部沖蝕是全球水庫破壞的主因之一，其嚴重之處在於初期徵兆不明顯，評估及辨識困難，卻可能再緩慢累積多年後突然失控，且無論新壩或老壩均有機會發生。因此早期正確研判及干預至關重要，建議國內針對高危害水庫進行內部沖蝕之風險分析與風險評估，確實盤點墾務局提出之四種機制（沖刷、向源侵蝕、內部潛移、內部不穩定）是否有發展可能（及潛在發展位置）。另外，近年國內為因應極端氣候，採取水資源優先之高水位蓄水政策，是否會產生相關影響，亦應審慎評估。內部沖蝕一旦啟動，發展速度極快（可能在 3 天內變成無法控制的局面），建議水庫管理單位將內部沖蝕事件納入常態應變情境整備及演練，並備有相關物資整備計畫，以最大化降低危害。

最後，建議水庫管理單位應編列經費加強對水庫安全知識的研討學習工作，尤其著重與臺灣在地議題關聯性高的主題，包含內部沖蝕、土壤液化（尤其針對水力填築壩體）、其他地質危害（如滑坡及節理）、滲流數據於汛期時排除雨量之計算方法、大壩破壞出流模型等，並提升物

理模型研究之辦理經驗。國內外之環境及技術不斷在變化與進步，水庫安全管理亦應與時俱進，就既有陳規及傳統方法檢討精進，以提升管理效能，達水庫安全、防災避災之終極目標。

附錄 1、結業證書

Certificate of Completion

presented to

Sih Tu, Mei-Huei

International Affairs Office

Safety Evaluation of Existing Dams International Technical
Seminar and Study Tour

June 2-11, 2025



— BUREAU OF —
RECLAMATION

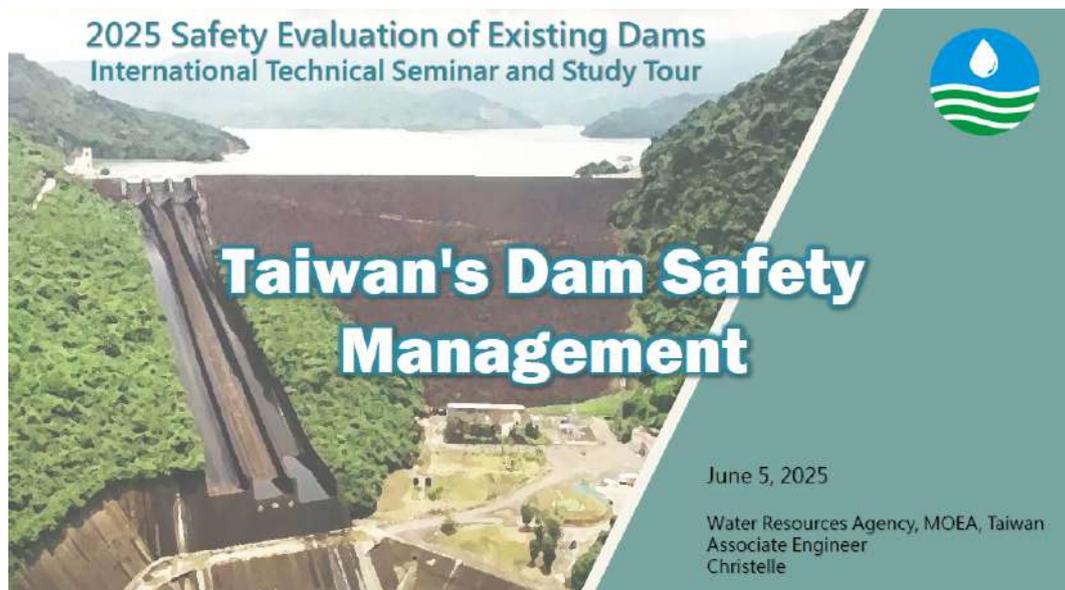
U.S. Department of the Interior

Jeffrey Morris
Jeffrey Morris, Program Manager
Native American and International Affairs Office

June 11, 2025

Date

附錄 2、學員分享—臺灣大壩安全管理簡報



Outline

- ① **Introduction**
 - Taiwan & WRA
 - Dams & Challenges
- ② **Overview of Taiwan's Dam Safety Management Legislations**
 - Evaluation / Inspection & Monitoring / Operation & Maintenance
- ③ **Zengwen Reservoir: Inspection and Operational Practices**
 - 2025 Dapu Earthquake
 - 2024 Typhoon Gaemi

1



1

Introduction

Feitsui Reservoir (Jadeite / Emerald)

2

Getting to Know Taiwan



2/3 Mountains!

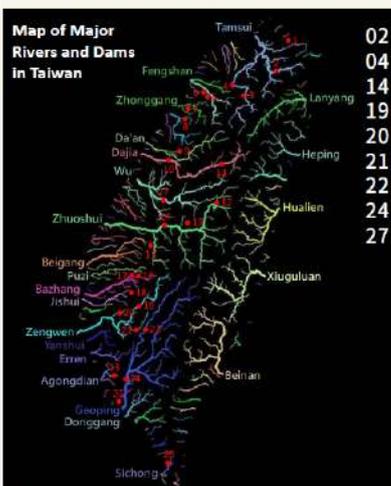
Subtropical Island

23.5°N

Area: 36,197 km²
 Highest Point: 3,952m
 Population: 23million
 Climate: Tropical Marine
 Precipitation: 2,500mm
 Temperature: 18~30°C

3

Dams in Taiwan



- 02 Feitsui Reservoir
- 04 Shihmen Reservoir (WRA)
- 14 Jiji Weir (WRA)
- 19 Zengwen Reservoir (WRA)
- 20 Wushantou Reservoir
- 21 Nanhua Reservoir
- 22 Jiaxian Weir (WRA)
- 24 Gaoping River Weir (WRA)
- 27 Niaozuitan Artificial Lake (WRA)
(the newest one)

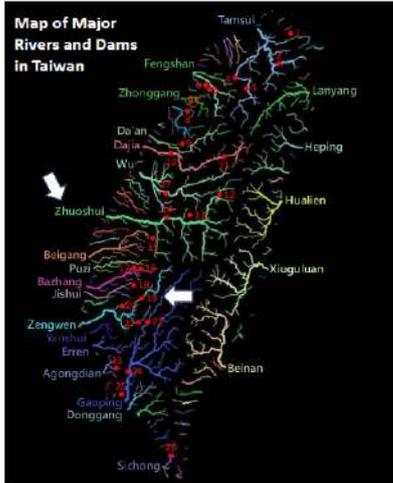
A total of 95
 5 Main Administrators
 12 of 95 managed by WRA

Main island	Outlying island	
66	29	
Main reservoir	Power generation	Irrigation
27	16	12

96% of all capacity
 8 of 27 by WRA

4

Dams in Taiwan



- Longest River: **Zhuoshui** – 186 km
- Largest Reservoir: **Zengwen** – 2024 effective capacity nearly 500 million m³ (2% of Hoover Dam)

Key Facts:

Reservoirs are concentrated in western Taiwan, where the downstream population density is high!

Estimated Impact of a Dam Failure at Zengwen Reservoir

- Households: ~280,000
- Population: ~790,000
- Industrial & Commercial: NT\$512 billion
- Agricultural: NT\$8.6 billion
- Fisheries: NT\$114 million

5

Water Resources Agency (WRA)

Ministry of Economic Affairs in Taiwan
MOEA

Core Missions

- 1 Ensure Stable Water Supply
- 2 Enhance Flood Resilience
- 3 Disaster Prevention and Emergency Response
- 4 Sustainable Reservoir Management

Recent efforts have been directed toward...

For Water Supply

- 1 Alternative water resources: reclaimed water, desalinated seawater, and subsurface flow
- 2 Strengthen backup and dispatch systems: **"Pearl Chain Plan"**

For Reservoir Sustainability

Diversified sediment removal strategies:

- 1 Mechanical Excavation
- 2 Barge Transport & Dredging
- 3 Hydraulic Desilting Tunnels

A leading water conservancy organization

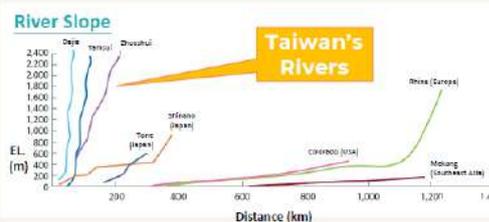
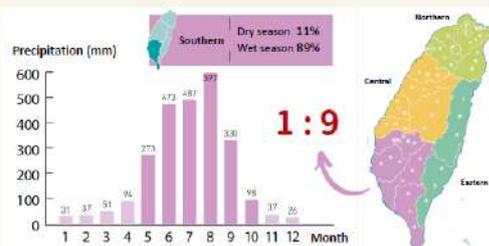
6

Why Multiple Reservoirs Matter

- Rainfall is unevenly distributed across seasons and regions
- Rivers are short and steep
- High population density

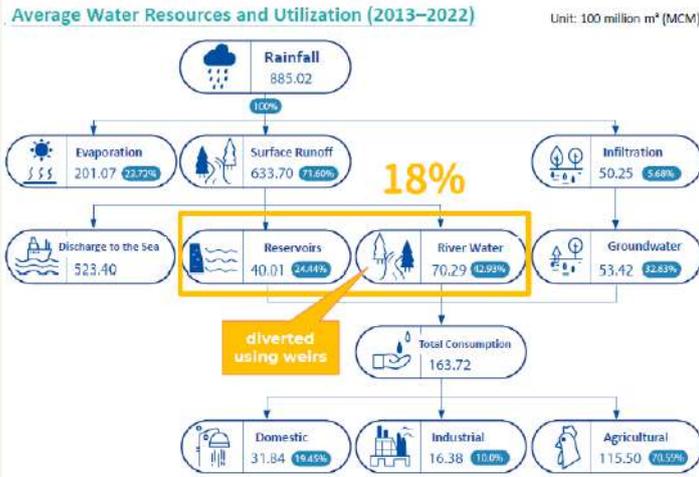


Per capita annual water availability is only one-fifth of the global average



7

Why Multiple Reservoirs Matter



- Seasonal water regulation: Storing in wet, Supplying in dry **also used for Flood Mitigation**
- The reliable operation of reservoirs and weirs is crucial for societal stability and economic development



Challenge: Frequent Earthquakes and Typhoons

2004 Typhoon Aere 1
A large amount of sediment and driftwood flowed into the reservoir, leading to a sudden spike in raw water turbidity.

1999 Chi-Chi 921 Earthquake 2
The dam body suffered structural damage due to differential uplift caused by inconsistent raising.

2009 Typhoon Morakot 3
The inflow once approached the originally designed PMF. Also, the intake trash rack was blocked by driftwood and debris, which impeded normal water release operations.

2007 Typhoon Wipha 4
The right abutment foundation was eroded, and 60 meters of the right dam body were washed out, ultimately leading to a dam breach.

Uplifted by 9m 2 3

Muddy Lake 1

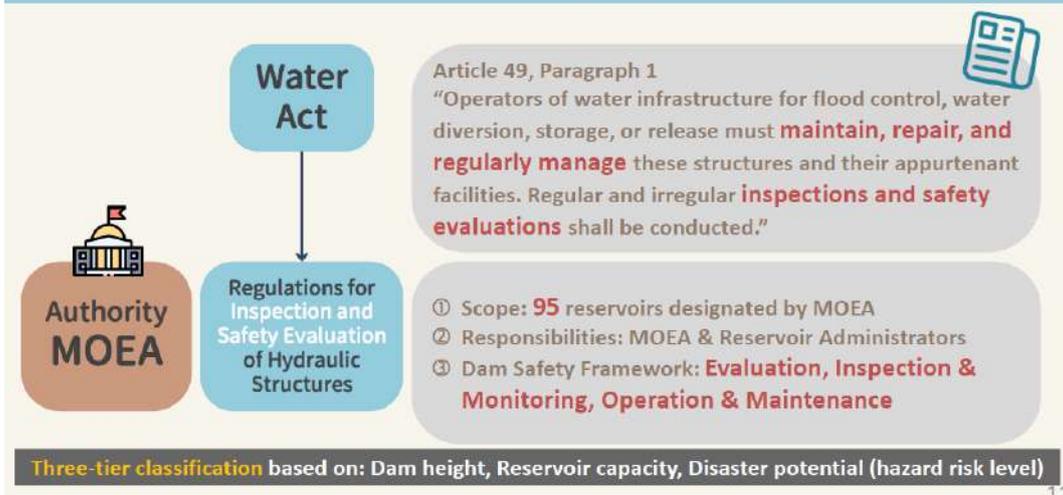
Driftwood 3

Taoyuan was out of water for **18 days**

How can dam safety be ensured?

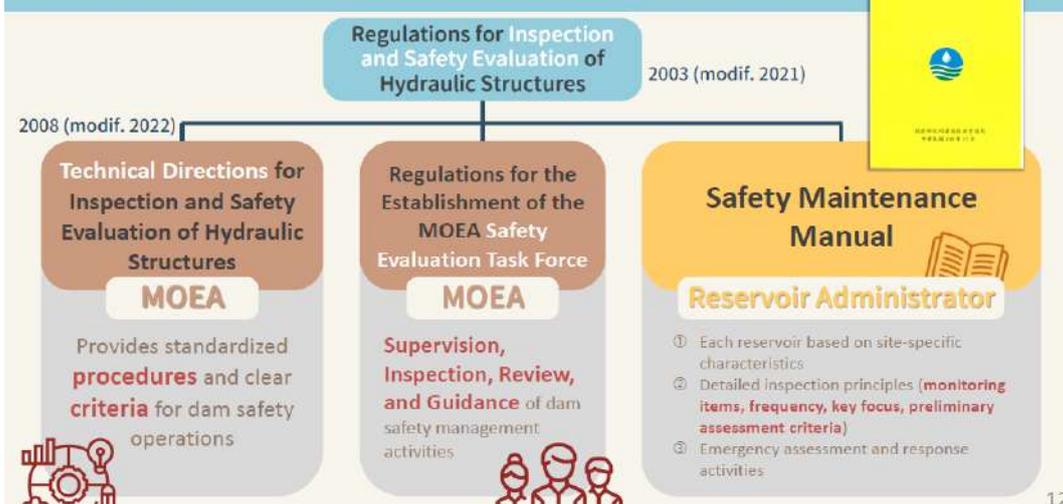


Legal Framework



11

Responsibilities

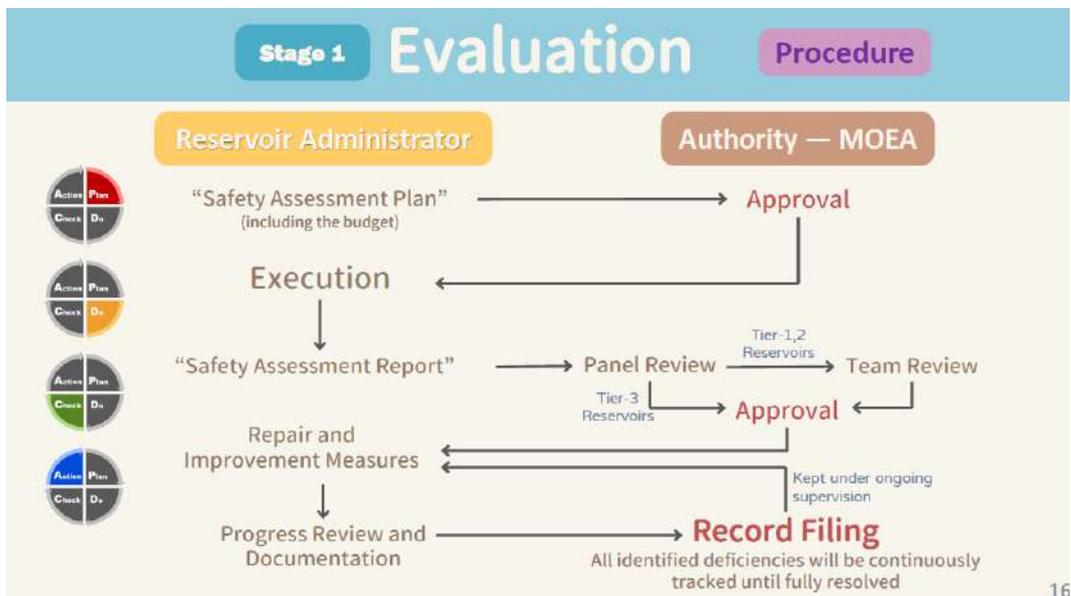
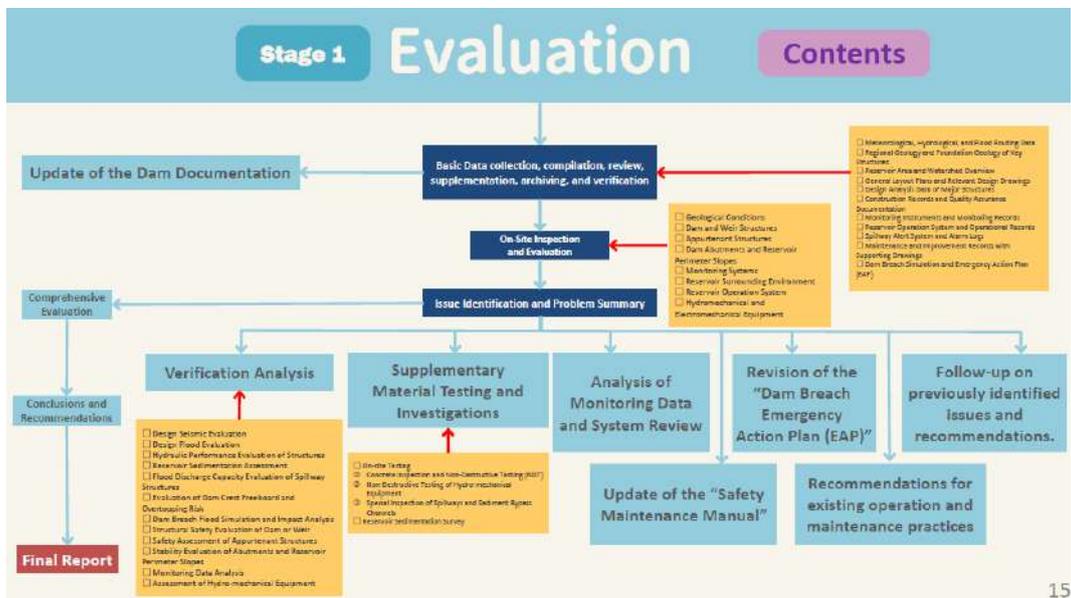
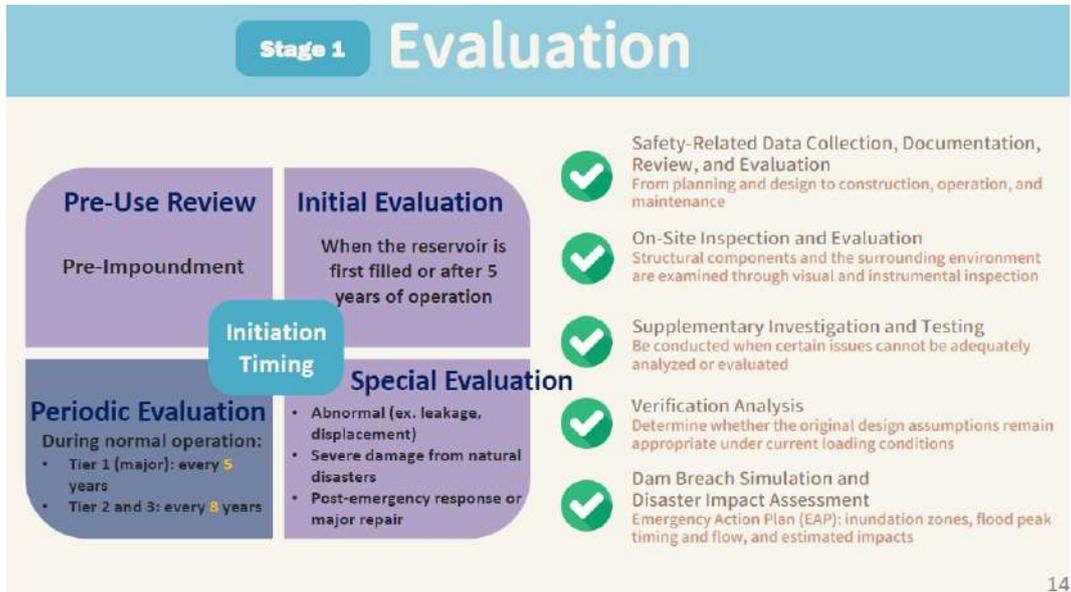


12

Dam Safety Framework



13



Stage 2

Inspection & Monitoring



Safety Maintenance Manual

Periodic Inspections

(at defined intervals)

Regular Inspections
Pre- and Post-Flood Season

Results from the previous year shall be submitted to the MOEA by the end of January each year

Special Inspections

(event-based)

Immediately conducted following earthquakes, floods, extreme rainfall, or other incidents exceeding specified thresholds

Results shall be submitted to the MOEA within 10 days after the event

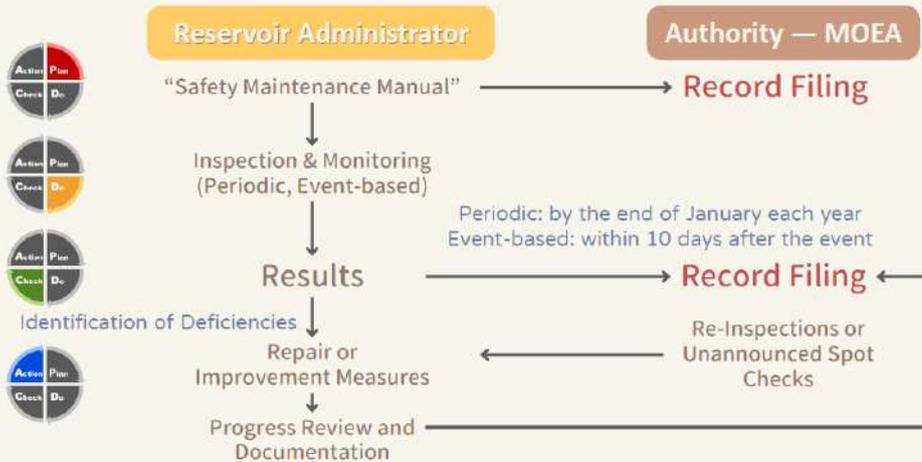
Trigger: Earthquake - Seismic Intensity ≥ 4 at the dam toe; Flood - Based on the facility peak discharge; Rainfall - 500mm per day

17

Stage 2

Inspection & Monitoring

Procedure



18

Stage 3

Operation & Maintenance



All safety-related work follows the Safety Maintenance Manual

- Reservoir Operating Regulations
- Hydraulic Equipment Operating Regulations
- Electromechanical Equipment Maintenance Manual
- Flood Discharge Warning System Manual
- CCTV Surveillance System Maintenance Manual...etc



Inspection and maintenance shall follow set frequencies, with all records properly documented.

19

3

Zengwen Reservoir : Inspection and Operational Practices

20

Zengwen Reservoir



Outlet	Discharge
Spillway	11,345 CMS
PRO	180 CMS
Power Tunnel	56 CMS
Desilting Tunnel	1,070 CMS
Total	12,651 CMS



- Commissioned in 1973
- Catchment area 481 km²
- Water area 18.93 km²
- Dam height 134 m
- Crest length 400 m
- EC 492 Mm³ (2024)
- Water supply: 730M tons/yr
- Annual generation: 200M kWh

Main Components



21

Scope of Inspection & Monitoring

Landslide Area

Desilting Tunnel

Intake

Dam

Spillway

Vibration Sensors

Rebar Stress Gauge

Concrete Strain Gauges

Tiltmeter

Seismometers

Piezometers, Earth Pressure Cells

Displacement and Settlement Observation Points

Trash Racks, Gates, and Hoisting Mechanisms

Penstocks and Valves

Diesel Generators

Electromechanical Equipment

Turbidity Meters

Flow Measuring Weir

Hydropower Plant

Stilling Basin

Mountain Drainage Tunnel

Slope / Hillside

Inclinometer Observation Wells

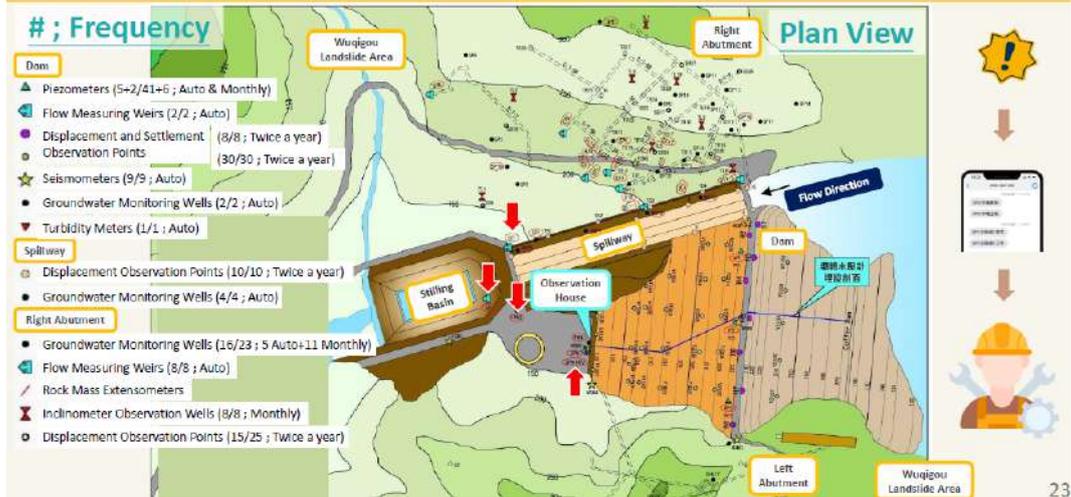
Rock Mass Extensometers

Groundwater Monitoring Wells

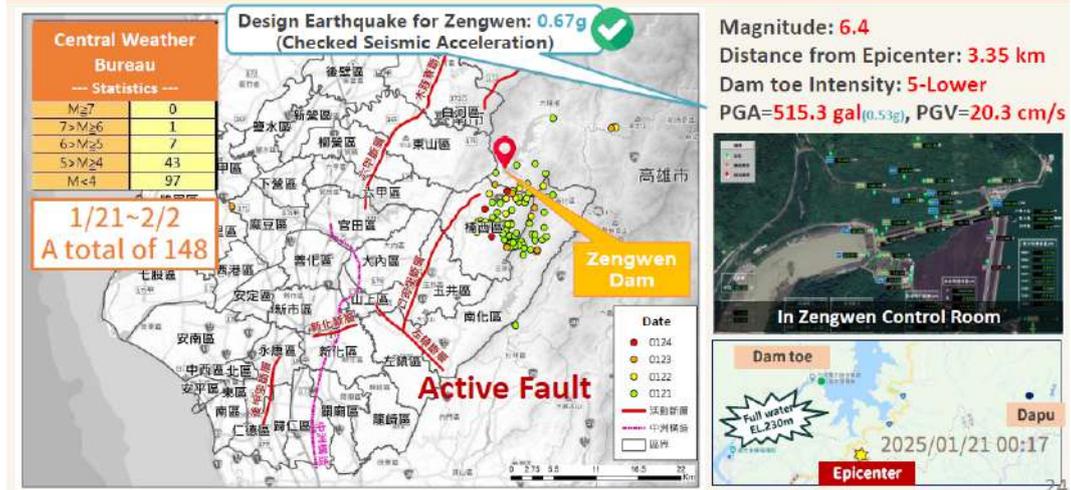
Surrounding areas, Hydraulic machinery, Operational systems, Routine maintenance activities, Repair Works, Safety-related data and records...

22

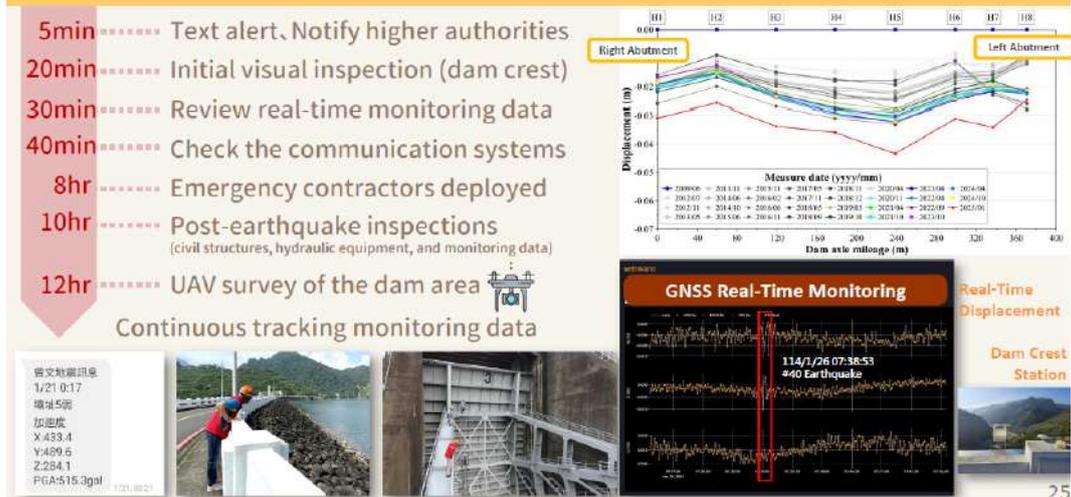
Monitoring Instrumentation



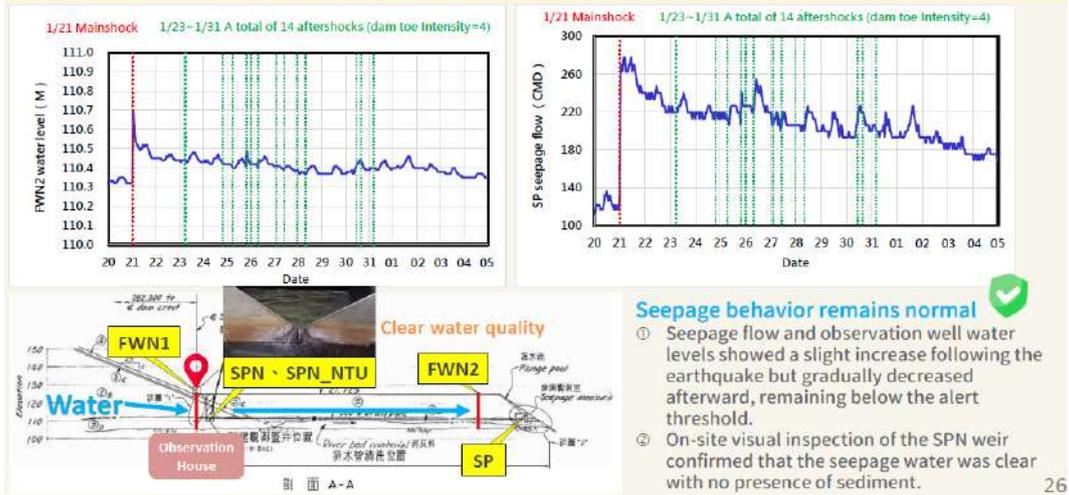
2025 Dapu Earthquake



Earthquake Response

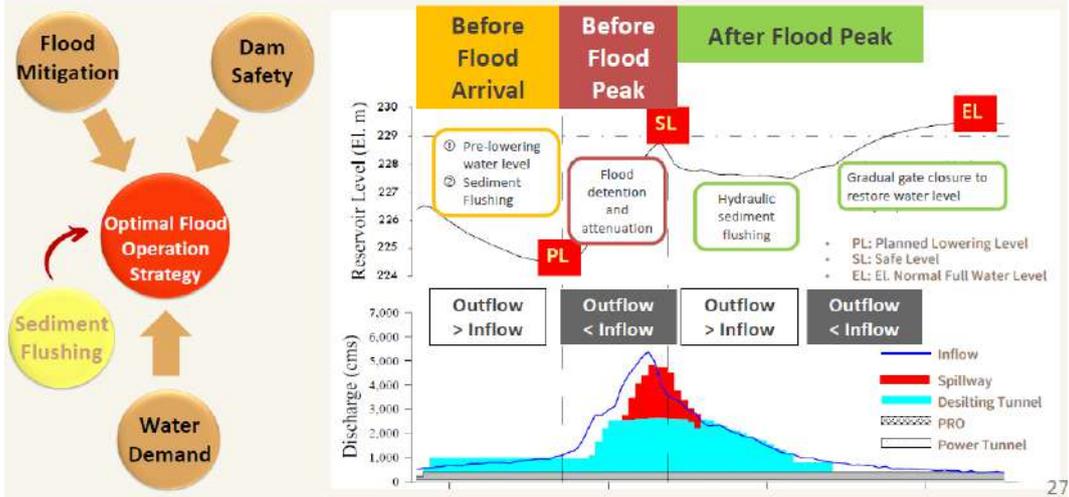


Seepage Behavior Assessment



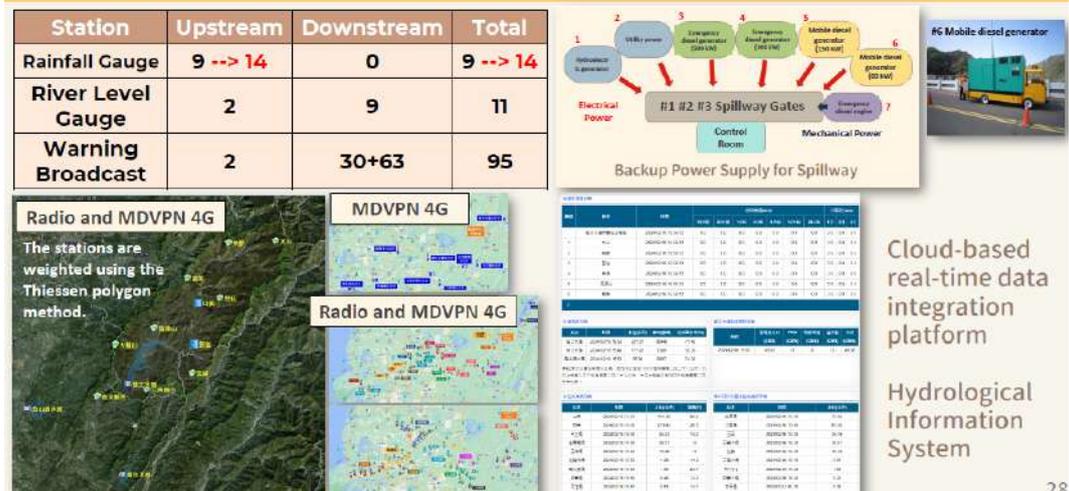
26

Flood Operation Strategy



27

Flood Preparedness

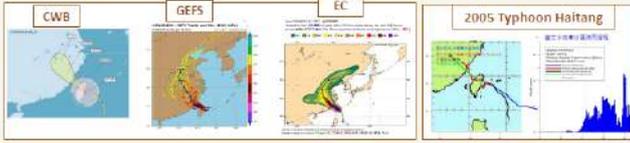


28

2024 Typhoon Gaemi

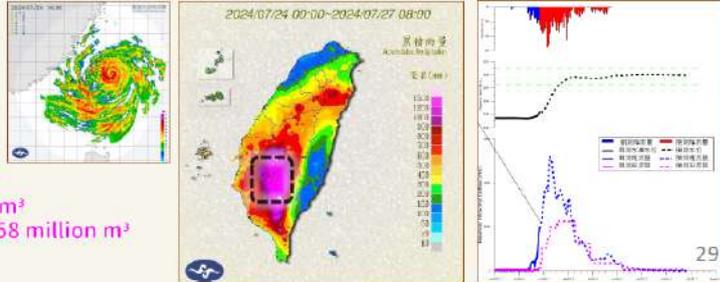
Commissioned Expert Team

1. Typhoon path forecasting and comparison with historical tracks (referencing the rainfall patterns)
2. Rainfall forecast
3. Operation strategy recommendations



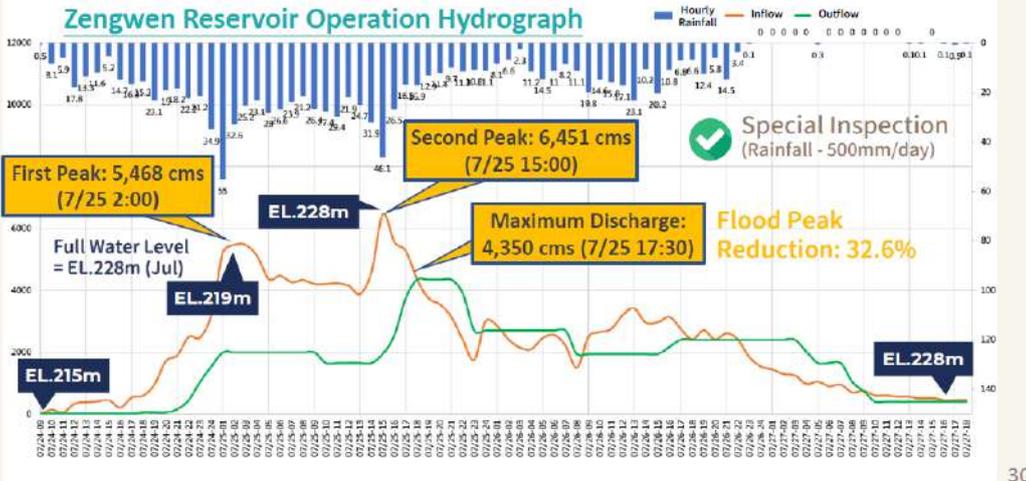
2024/07/24 ~ 07/27

Cumulative Rainfall: 1,068mm
 Total Inflow: 727.41 million m³
 Total Outflow: 523.94 million m³
 Sediment Flushing: 5.76 million m³
 Hydraulic Sediment Flushing: 2.58 million m³



Typhoon Response

Zengwen Reservoir Operation Hydrograph



2025 Safety Evaluation of Existing Dams
 International Technical Seminar and Study Tour



THANK YOU FOR
 YOUR ATTENTION

謝謝大家



Zengwen Reservoir

附錄 3、墾務局實驗室簡章

U.S. Department of the Interior
Bureau of Reclamation
Technical Service Center

Hydraulic Investigations and Laboratory Services



The Hydraulic Investigations & Laboratory Services group applies physical hydraulic modeling, computational fluid dynamics modeling, hydraulic analysis, and field measurements expertise to the solution of water resources, hydraulics, and fluid mechanics problems. We operate the Bureau of Reclamation's world-recognized Hydraulics Laboratory with a history of developing state-of-the-art hydraulic engineering technologies since 1930. Hydraulic engineers address site-specific needs and conduct applied engineering research studies for Reclamation and other organizations, including Federal, State, and local governments, private entities, and international clients.

Services

Physical Hydraulic Modeling

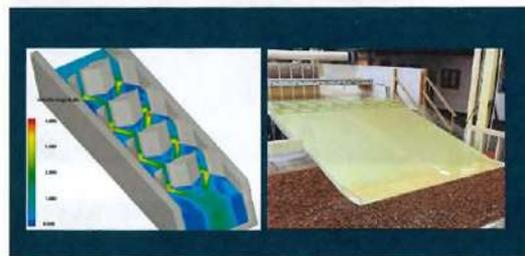
- Scale models of hydraulic structures, hydromechanical equipment, and rivers and channels with fixed and movable beds simulate prototype flow conditions in our 54,000 square foot indoor laboratory facility.
- Complex flow behaviors are measured and visualized to evaluate and improve hydraulic performance.
- Flow capacities up to 60 ft³/s and 600 ft of pressure head are available, with fixed and variable-slope flumes, a low-ambient pressure chamber, and advanced data acquisition equipment and instrumentation.

Computational Fluid Dynamics Modeling

- Computational fluid dynamics models complement physical modeling.
- Flow properties that are difficult to physically measure may be evaluated numerically.

Field Measurements and Testing

- Scanning sonar for underwater imaging
- Open channel and closed conduit discharge and velocity measurements
- Pressure (dynamic and steady state)
- Stress and vibration in mechanical components of hydraulic machinery
- Air demand of hydraulic equipment



Website: www.usbr.gov/tsc/tscorganization/8500.html

Publications: www.usbr.gov/tsc/techreferences/hydraulics_lab/reportsdb/reportsearchall.cfm

Computer Software: www.usbr.gov/tsc/techreferences/computer%20software/compsoft.html



Hydraulic Investigations and Laboratory Services

Areas of Work

Hydraulic Structures & Equipment – Spillways, stepped spillways, stilling basins, pumps and turbines, gates and valves, canal structures, intakes and diversions, cavitation impacts.

Environmental Hydraulics – River restoration, fish passage, fish protection, reservoir selective withdrawal, habitat improvements, reservoir density current measurements, acoustic imaging, total dissolved gas abatement, river sediment flushing, dam removal, reservoir and river sedimentation related to hydraulic structures.



Dam Safety – Spillway uplift, high-capacity spillways (labyrinth weirs, fuse plug embankments), dam overtopping protection, spillway erosion modeling, dam foundation erosion modeling, embankment breach modeling, emergency gate closure testing, debris impacts.

Water Conservation – Canal automation and operations, water measurement technology and field evaluations, remote flow monitoring and control systems, software tools for design and calibration of water measurement structures (e.g., flumes, weirs, gates).

Offered Training

- ❖ Modern Methods in Canal Operation & Control using hands-on 5-pool laboratory model canal system
- ❖ Basic Principles & Developments in Flow Measurements
- ❖ Water Management Workshop

Software

Coanda-Effect Screen Performance | SpillwayPro
USBRWeir | WinADV | WinFlume | WinGate

Contact Information

Manager: Connie Svoboda, P.E.

csvoboda@usbr.gov

office: (303) 445-2152

cell: (303) 524-0285

Website: www.usbr.gov/tsc/tscorganization/8500.html

Publications: www.usbr.gov/tsc/techreferences/hydraulics_lab/reportsdb/reportsearchall.cfm

Computer Software: www.usbr.gov/tsc/techreferences/computer%20software/comsoft.html

GEOTECHNICAL LABORATORY AND FIELD SUPPORT

The Technical Service Center's Geotechnical Laboratory and Field Support (GLFS) group has personnel that are experts on the various geotechnical materials that compose Reclamation's infrastructure. GLFS is divided into four main disciplines:

- Soil Mechanics Laboratory
- Rock Mechanics Laboratory
- Field Testing/Site Investigation
- Research

Services offered: We provide a wide variety of services related to the soil and rock materials used for Reclamation structures. These include both laboratory and field investigations of the engineering properties of soil and rock, in-situ soil and rock testing, as well as groundwater investigations. Specialized equipment and capabilities include advanced soil and rock shear strength testing, cyclic strength testing, internal erosion testing, filter material cementation and compatibility (CEF) testing, and rock-concrete interface testing. We also offer contract testing for geological petrography, providing assistance in evaluating materials and in solving problems related to design, construction, and research.

Many of our staff hold advanced degrees, professional engineer registrations, and certifications. Staff are also highly active in professional societies such as USSD, ASDSO, ASTM, AEG, and ARMA.

Technical training offered by GLFS: Earth School and Water Management Workshop hands-on sessions. Customized training programs are available as needed.



Geotechnical Laboratory and Field Support
 Denver Federal Center
 P.O. Box 25007 (86-68550)
 Denver, CO 80225-0007
<http://www.usbr.gov/tsc/tscorganization/8500.html>

GLFS Group Manager:
 Bobby Rinehart, Ph.D., P.E.
 303-445-2395, rinehart@usbr.gov

Discipline Leads:

Rick Bearce, Ph.D., P.E. (Rock Lab Coordination)
 303-445-2387, rbearce@usbr.gov

Carolyn Bocovich, Ph.D. (Research Coordination)
 303-445-2338, cbocovich@usbr.gov

Tyler Chatfield, P.E. (Field Testing and
 Soils Lab Coordination)
 303-445-2371, tchatfield@usbr.gov

Evan Lindenbach, P.E., P.G. (Technical Specialist)
 303-445-2336, elindenbach@usbr.gov

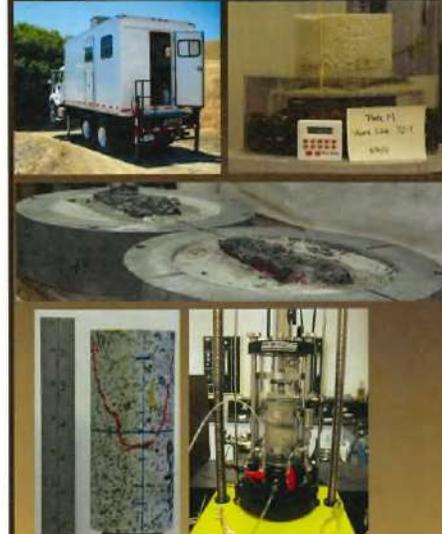


Please contact us for more information!



— BUREAU OF —
RECLAMATION

GEOTECHNICAL



— BUREAU OF —
RECLAMATION

**GEOTECHNICAL
 LABORATORY &
 FIELD
 SUPPORT**

Rock Lab Testing

- Physical and Index Properties including bulk density, specific gravity, porosity and absorption
- Ultrasonic Pulse Velocity (pre, during and post-test)
- Direct Shear (7-inch and 12-inch diameter rings)
- Fracture Shear and Normal Stiffness
- Fracture Toughness
- Triaxial Shear
- Indirect Splitting Tensile Strength
- Uniaxial Compressive Strength (static and cyclic loading)
- Point Load Test
- Tilt Table
- Slake Durability
- Rock Swell Testing
- Drillability/ excavatability Tests
- Rock Permeability
- Petrographic Analysis



Construction Materials/ Construction Support Testing

- SB, CB, and SCB mix design & QA testing
- Soil cement mix design, slope protection and engineering properties evaluation
- Rip rap quality and durability evaluation
 - Filter sand and drain gravel durability and cementation testing
 - Filter compatibility testing
 - In-situ field density testing (sand cones and large ring density)



Soils Lab Testing

Index Testing: Full range of soil physical property and compaction tests.

Static Testing:

- 1D Consolidation & Swell (Incremental load and Constant Rate of Strain)
- Direct Shear (up to 12" specimens)
- Triaxial Shear (stress path systems, SHANSEP Parameters)
- Direct Simple Shear
- Ring Shear (Fully softened and residual strength)

Dynamic Testing:

- Cyclic Direct Simple Shear
- Cyclic Triaxial Shear
- Load and displacement control up to 5 Hz
- Bender Element testing to get shear wave velocity and G_{max}

Hydraulic Testing:

- Permeability (constant and falling head tests, flow pump testing)
- Dispersion/Erosion potential
 - Internal Erosion Permeameter



Hyrum Project, Hyrum Dam Direct Simple Shear (DSS)



Custom and non-standard testing is available upon request.

Site Investigation Support

- Cone Penetration Testing
- SPT Energy Measurement/Calibration
- Field Vane Shear Testing
- Rock Borehole Dilatometer Testing
- Aquifer Characterization and Dewatering Tests
- 3D Geologic Data Visualization



Geotechnical Research

- Filter performance and cementation potential
- Geophysical techniques to monitor embankment cracking and internal erosion
- Constant Normal Stiffness direct shear testing of rock and concrete
- Internal erosion permeameter
- Heat as a tracer for canal seepage
- Cyclic behavior of fine grained transition soils
- Affect of vane size and geometry on Field Vane Shear strength
- Abrasivity potential of reservoir sediment



Earth School

GLFS delivers a 3-day course providing students with the tools necessary to determine visual soil classifications in the field. Emphasizes hands-on instruction and practice with a variety of soils and lectures on problem soils and construction.

Materials & Corrosion Laboratory (MCL)

The Materials & Corrosion Laboratory (MCL) offers expertise in engineering materials selection and corrosion control. MCL personnel are experts in the various materials and techniques Reclamation uses to build and maintain its structures as well as environmental compliance strategies. Individual subgroups include:

- Protective Coatings
- Corrosion and Cathodic Protection
- Geosynthetic and Polymeric Materials
- Composite Materials
- Environmental Compliance and Management

MCL Services

The laboratory houses extensive testing capabilities for assessing the interaction of a material with its service environment. We provide a wide variety of services including:

- Troubleshooting construction problems
- Specification preparation and review
- Material submittal approvals
- Onsite inspection and other field services
- Expertise in state-of-the-art construction materials and practices
- Research on material problems
- Technical training: "Corrosion and Coatings School" and "Webinar Series"

Technical Background

MCL staff are experts in a variety of engineering disciplines including: Chemical, Civil, Mechanical, Metallurgical, Corrosion, Materials, Ceramic, and Polymer Science. Many of our staff hold advanced degrees, professional engineer registrations, and certifications from various professional societies including NACE and SSPC.

Special Capabilities

Staff are trained in Rope Access (SPRAT) and SCUBA dive techniques to provide safe, efficient, and cost effective means for inspection or repair of otherwise inaccessible features.

Corrosion Lab



Coatings Lab



Geosynthetics Lab



Please contact us for more information!

Materials & Corrosion Lab Group Manager:

Jessica Torrey, Ph.D., P.E.

jtorrey@usbr.gov

303-445-2376

Denver Federal Center
Building 56, 1400 Wing
P.O. Box 25007 (86-68540)
Denver, CO 80225



— BUREAU OF —
RECLAMATION



— BUREAU OF —
RECLAMATION

Materials & Corrosion Laboratory



U.S. Department of the Interior

MCL Training Offerings

Corrosion School

This 3-day course hosted in Denver, CO, familiarizes participants with issues relating to corrosion of metals and corrosion protection. Discussions include: how corrosion occurs, methods to minimize and prevent corrosion on our infrastructure, protective coatings, cathodic protection (CP), new technologies, and inspection and repair techniques relating to maintenance and repair of infrastructure.



Cathodic Protection

Basic Training

MCL also offers corrosion and CP training classes delivered on-site at locations throughout Reclamation's regions. Over two days, MCL staff instruct participants in basic CP testing and corrosion inspection. Training is hands-on using on-site infrastructure with in-service protective coatings and CP systems.



Corrosion Webinar Series

The Corrosion Webinar Series began in 2013 and now includes three webinars per year on topics including coatings, cathodic protection, hazardous materials, and geosynthetics. Webinars are recorded and posted to the Technical Service Center training website.

In addition to these offerings, customized training programs at your facility are also available upon request.

Protective Coatings

- Coatings selection and specifications
- Construction support, quality assurance inspections, and submittal review
- Testing of coating performance and in-house surface preparation and application
- Field coating condition assessment, maintenance planning, and small repairs
- Coatings for zebra/quagga mussel control



Corrosion and Cathodic Protection

- Cathodic protection system design, specifications, and small-scale installations
- Construction support and submittal review
- Corrosion-related field inspections of pipelines, tanks, gates, trash racks, etc.
- Materials selection for metals and non-metals
- Field testing and troubleshooting of cathodic protection systems
- Standardized (ASTM) and specialized test capabilities



Geosynthetic & Polymeric Materials

- Material design and specifications for geosynthetics (geo-membranes, -textiles, -grids, -composites, -nets, -cells, -foams, GCL's), waterstops, and elastomeric sealants
 - Plastic pipe
 - Construction QA testing, O&M support
- Applied research to evaluate material economics, maintenance practices, and design
- Standardized and specialized composite materials testing for pipelines, tanks, gates, and non-metallic alternatives for miscellaneous components (grates, rails, etc.)



Environmental Compliance and Management

- Hazardous materials design specifications
- Construction management support
- Environmental compliance audit programs, management systems, and assessments and impacts
- Waste minimization and pollution prevention plans
- Facility surveys for hazardous materials
- Phase I and Phase II environmental site assessments (property transfers)



附錄 5、壑務局設施檢視綜合報告—混凝土壑（空白）

BUREAU OF RECLAMATION
COMPREHENSIVE FACILITY REVIEW EXAMINATION
REPORT FORM - CONCRETE DAM

DAM NAME: _____

EXAMINATION DATE: _____

GENERAL INFORMATION:

Who owns and operates the facility?

What offices are responsible for providing oversight of the operation of the facility?

Other general information:

OPERATING STATUS AND CONDITIONS DURING THE EXAMINATION:

Reservoir elevation(s) during the examination: _____

Maximum allowable reservoir elevation: _____

Releases during the examination:

Spillway: _____

Outlet works: _____

Other outlets: _____

Weather on the day(s) of the examination? _____

Recent precipitation at the dam site?

SIGNIFICANT EVENTS SINCE THE LAST EXAMINATION:

Describe any earthquakes, flooding, major modifications/construction, major repairs, incidents, operating restrictions:

**BUREAU OF RECLAMATION
COMPREHENSIVE FACILITY REVIEW EXAMINATION
REPORT FORM - MECHANICAL FEATURES**

FEATURE	YES	NO	PHOTO NO.	NOTES AND REFERENCES TO NOTES BELOW
1 SPILLWAY - Mechanical features				
a. Can spillway gates be operated full range under full reservoir head?				
b. Are gates regularly exercised according to Reclamation requirements?				
c. Were gates exercised during the examination? Under balanced or unbalanced loading? Did the gates operate satisfactorily?				
d. Is there backup power to operate the spillway gates? Reliability of regular power?				
e. Is the backup power tested regularly? How often? Under load?				
f. Was the backup power tested during the examination? Tested under load? Did the backup power perform satisfactorily?				
g. Are there any problems or concerns regarding the reliability of the backup power?				
h. Can spillway gates be operated remotely? By who?				
i. Any problems or concerns regarding the remote operating capability of the dam?				
j. Does the SOP have adequate operating and maintenance instructions? Are the instructions understood?				
k. Corrosion or other damage?				
l. Inadequate protective coating?				
m. Inadequate lubrication?				
n. Gate leakage?				
o. Other deficiencies?				

NOTES:

FEATURE	YES	NO	PHOTO NO.	NOTES AND REFERENCES TO NOTES BELOW
2 OUTLET WORKS - Mechanical features				
a. Can outlet works gates be operated full range under full reservoir head? Under balanced and unbalanced loading?				
b. Are gates regularly exercised according to Reclamation requirements? Under balanced and unbalanced loading?				
c. Were gates exercised during the examination? Guard gates and regulating gates? Under balanced or unbalanced loading? Did the gates operate satisfactorily?				
d. Are there limitations to the reservoir evacuation capability of the dam (e.g., the intake structure is clogged with debris, an outlet works gate is out of service for repairs)?				
e. Is there backup power to operate the outlet works gates? Reliability of regular power?				
f. Is the backup power tested regularly? How often? Under load?				
g. Was the backup power tested during the examination? Tested under load? Did the backup power perform satisfactorily?				
h. Are there any problems or concerns regarding the reliability of the backup power?				
i. Can the outlet works be operated remotely? By who? Any problems or concerns regarding the remote operating capability of the dam?				
j. Does the SOP have adequate operating and maintenance instructions? Are the instructions understood and followed by dam operating personnel?				
k. Corrosion or cavitation damage?				
l. Inadequate protective coating?				
m. Inadequate lubrication?				
n. Gate leakage?				
o. Other deficiencies?				

NOTES:
