

行政院所屬各機關因公出國人員出國報告書

# 第 27 屆「大壩安全評估與檢查 國際技術研習會」

服務機關：經濟部水利署南區水資源局

出國人員：阿公店水庫管理中心主任黃南銘

派赴國家：美國

出國期間：105 年 6 月 4 日~105 年 6 月 16 日

報告日期：105 年 8 月 30 日



## 目錄

壹、目的	1
貳、過程	2
貳.一、課程內容	3
貳.二、課程內容概要	4
(一)、墾務局組織及權責	4
(二)、大壩安全歷史背景	5
(三)、安全計畫概論	6
(四)、從大壩意外事件學習的經驗	7
(五)、由大壩安全監測、分析評估潰壩模式	14
(六)、水庫淤積與大壩安全	14
(七)、大壩監測儀器	16
(八)、內部滲漏淘刷歷史案例	17
(九)、堆填壩檢查	24
(十)、現場參訪	26
參、心得與建議	31



## 壹、目的

水庫是現代國家不可缺少的基礎建設，提供灌溉、防洪、發電、民生工業用水等重要功能，沒有水庫就沒有用水來源。尤其臺灣山坡坡度極為陡峭，南部地區降雨通常集中在夏季，若沒有水庫蓄水，台灣不可能成為 2300 萬人生存的家園。

水庫規劃、設計、興建、營運管理必須整合水文、氣象、工程、機械、電子、地質、資訊傳達等各種不同專業領域。一旦某個環節失誤，即可能造成鉅大生命財產損失，不可不小心謹慎。

美國墾務局從 1902 年成立迄今，管理西部 17 州 476 座水壩 337 座水庫以及數千公里長的渠道，有關水壩規劃、設計、經營管理之經驗放眼世界無出其右，墾務局經由研習會方式提供成功經驗讓各國工程師遵循；也不吝展示失敗經驗使工程師引以為戒。

爰此，迄 2016 年已經連續舉辦 27 屆大壩安全評估與檢查國際技術研討會，以課堂研習與現場參觀及書面資料、技術手冊，把經驗分享給各國工程師，讓水庫規劃設計、營運管理更臻完善。

## 貳、過程

美國墾務局今年辦理第 27 屆「大壩安全評估與檢查國際技術研習會」，分別來自印度 20 人、西班牙 1 人、巴拉圭 1 人、韓國 2 人、瑞典 3 人、芬蘭 1 人、迦納 3 人、中華民國 2 人等 8 個國家，共計 33 位學員參加。課程內容為 6 月 6 日至 6 月 9 日在美國科羅拉多州丹佛聯邦中心，墾務局辦公大樓里奧格蘭德室（Rio Grande room）上課研習。6 月 10 日由丹佛搭乘飛機至華盛頓州西雅圖。6 月 12 日由西雅圖至艾倫斯堡，6 月 13 日、14 日，參觀克雷艾倫壩、伊斯頓導流壩、凱奇斯壩。6 月 14 日回西雅圖頒發結業證書後解散。



墾務局辦公室



Rio Grande room

## 貳、一、課程內容

日期	地點	研習內容	備註
6月6日	丹佛聯邦中心壑務局辦公室	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 報到</li> <li>2. 致歡迎詞、學員自我介紹</li> <li>3. 壑務局簡介</li> <li>4. 大壩安全歷史背景</li> <li>5. 安全計劃概論</li> <li>6. 從大壩意外事件學習的經驗</li> <li>7. 操作維護設施概述</li> <li>8. 參觀水工試驗及混凝土圓柱試體試驗</li> </ol>	
6月7日	丹佛聯邦中心壑務局辦公室	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 由大壩安全監測、分析評估潰壩模式</li> <li>2. 大壩安全風險分析及評估</li> <li>3. 洪水風險判定</li> <li>4. 地質工程師在大壩安全的重要性概述</li> <li>5. 水庫淤積與大壩安全</li> <li>6. Johnstown 洪水紀錄片</li> </ol>	
6月8日	丹佛聯邦中心壑務局辦公室	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 混凝土壩及附屬結構物更新</li> <li>2. 操作程序及操作人員訓練</li> <li>3. 大壩監測儀器</li> <li>4. 大壩抗震設計及分析</li> <li>5. 地震災害研究</li> <li>6. 地震警告及反應</li> <li>7. 洪水淹沒模擬</li> <li>8. 緊急應變計劃練習</li> </ol>	
6月9日	丹佛聯邦中心壑務局辦公室	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 水工機械測試及維護</li> <li>2. 混凝土壩檢查</li> <li>3. 土石壩檢查</li> <li>4. 內部滲漏淘刷歷史案例</li> <li>5. 河道破壞</li> </ol>	
6月13日	華盛頓州 Kittitas	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 參觀克雷艾倫壩</li> <li>2. 參觀伊斯頓導流壩</li> </ol>	
6月14日	華盛頓州 Kittitas	參觀凱奇斯壩	

## 貳、二、課程內容概要

### (一)、墾務局組織及權責

#### 1. 墾務局組織：

墾務局局長之下設三位副局長，除了執行副局長之外，其他兩位副局長分別主管政府之間聯繫、預算及法制。墾務局主管區域劃分為五個，上科羅拉多區、下科羅拉多區、大平原區、北太平洋區、中太平洋區。



墾務局主管區域

#### 2. 權責

- a. 農業用水:提供全美 20%農民灌溉用水。
- b. 民生及工業用水:每年為 3 千 5 百萬人，提供 410 兆公升用水。
- c. 水力發電:管理 58 座發電廠，共計 194 座發電機。為 350 萬個家庭提供 400 億千瓦-小時電力。
- d. 洪水控制:每年減少數十億美元災害損失。
- e. 休閒娛樂:每年約 900 萬人次造訪 289 處風景區。
- f. 魚類及野生動物、瀕臨絕種動物保護

#### 3. 預算

每年預算 11 億美元，每年總收入 9 億 6 千 3 百萬美元。



## (二)、大壩安全歷史背景

美國有 80000 座大壩，其中標的為休閒遊憩有 35%，廢礦渣壩有 10%，公共給水有 10%，灌溉有 10%，發電有 3%，防洪有 17%，魚類野生動物池塘有 15%。大壩對下游造成災害而分析，其中 68%為低災害，14%為高災害，18%有明顯災害。大壩擁有者，58%屬私人，2%屬公共事業，17%屬地方政府，5%屬州政府，3%屬聯邦政府，未定者 15%。

大部份大壩安全由聯邦政府規範，僅少數例外。德州最近制定大壩安全法規，僅阿拉巴馬州未有大壩安全法規，立法懸而未決，密西根州未有大壩安全計畫之經費。

大壩屬聯邦政府者，自行管理風險。

大壩安全管理計畫必須要有法規、人員及經費。

1874 年威廉堡壩潰壩，造成 139 人死亡，麻薩諸塞州立法規定大壩建造。

1911 年奧斯丁壩潰壩，造成 80 人死亡，1913 年賓夕法尼亞州產生大壩安全計畫。

1928 年聖法蘭西斯壩潰壩，450 人死亡，加利法尼亞州於 1929 年建立大壩安全法。

1963 年巴德溫希爾壩潰壩，5 人死亡，加利福尼亞州於 1965 年加強大壩安全法。

1976 年聖法蘭多下池壩幾乎潰壩，8 萬人疏散。

1972 年 2 月水牛溪 (buffalo creek) 壩潰壩，125 人死亡。

1972 年 6 月峽谷湖 (canyon lake) 壩潰壩，33 人死亡。

1972 年國家大壩檢查法，授權美國陸軍工兵團建立大壩詳細目錄資料庫及檢查大壩，但僅檢查大壩詳細目錄資料庫之壩，無足夠經費檢查其他壩。

大壩詳細目錄資料庫由美國陸軍工兵團建立，開始時超過 68000 座壩，目前約 80000 座壩，標準為 壩高 > 25 ft，且庫容 > 15 acre-ft 壩高 > 6 ft，且庫容 > 50 acre-ft 有潛在損失人命

大壩詳細目錄資料庫包含大壩基本資料。

1975 年瓦特包爾丁壩潰壩，無人死亡，但明顯財產損失。

1976 年 2 月貝爾瓦勒壩潰壩，4 人死亡。

1976 年 6 月提堂壩潰壩，11 人死亡，5 億美元財產損害，美國墾務局隨後建立大壩安全計畫。

1977 年 11 月凱莉巴耐壩潰壩，39 人死亡，導致美國陸軍工兵團檢查所有壩及聯邦大壩安全準則建立。

國會於 1972 年法案中撥款美國陸軍工兵團檢查所有非屬聯邦所有壩，在 1978 至 81 年檢查超過 9000 座高災害壩，計畫幫助很多州建立或改善其大壩安全計畫。

1979 年聯邦大壩安全準則，準則之目標在加強全國大壩安全，提昇一致性及廣泛之實務。聯邦大壩安全準則提出壩址調查、設計、施工、操作與維護，及緊急應變等規範。

聯邦大壩安全準則認為沒有壩能夠建造成完全「安全失敗」，由於未能完全了解

未確定因素有：

1. 大自然破壞力量及大壩對大自然力量之反應。
2. 材料之行為
3. 施工時不確定因素

目標在使壩盡可能安全，但意味著有最大合理努力之限制。1979 年美國卡特總統發布設立「聯邦緊急管理局」(FEMA)，整合聯邦政府減災及緊急應變工作，包含潰壩。「聯邦緊急管理局」負責幫助聯邦單位及州之大壩安全計畫，資助大壩安全訓練及提供壩所有者有關大壩安全之資訊。

### (三)、安全計畫概論

墾務局監管 480 座壩 337 個水庫，總容量  $245 \times 10^6$  英畝-英呎(約 3 百億立方公尺)，提供 3 千萬人用水及 1 千萬英畝農田灌溉。53 座水力電廠，發電容量 400 億千瓦-小時，提供 900 萬人使用之電力。289 個娛樂觀光景點，每年有 9 千萬參觀人次。其它還包含數千英里長的運河、渠道、管路等等。

大壩安全風險函數包含 3 個項目，分別是威脅(Threat)、弱點(Vulnerability)、結果(Consequences)。

$Risk = Threat * Vulnerability * Consequences$

分別就 3 個因數給于相關數值。

威脅(Threat)的內容包含：

1. 蓄意破壞、偷竊
2. 網路駭客攻擊
3. 內部威脅
4. 國內、外恐怖攻擊

如何防範風險：

1. 設施安全：界定優先的順序、風險評估、安全措施改進。
2. 人員管理：首先思考甚麼人可以接觸機密等級，人員背景調查、人員出入管制卡。
3. 資訊安全：界定接觸機密等級、釐清誰需要知道甚麼訊息，儲存資訊的程序、傳送資訊的程序。

## (四)從大壩意外事件學習的經驗

### (四). 1. 內部滲流管湧

#### 1. Teton dam 潰壩

為墾務局在近代設計的大壩，壩高 93 公尺，1975 年 11 月完工，1976 年 6 月首次蓄水後潰壩。在 6 月 5 日上午 7 點，在壩趾有一處泥濘的滲漏點，滲漏量約每秒 710 公升。上午 10 點 30 分壩體坍塌高度約壩高 2/3，中午 12 點坍塌孔到達壩頂，下午 6 點，水庫蓄水全部流光。最大潰壩流量 30000cms，潰壩總流量 3 億立方公尺。一共造成 11 人死亡，5 億美損失。

可能潰壩機制：

- 右壩座節理未經灌漿處理，直接以土石回填，因此從滲流貫穿基礎接觸面破碎帶。
- 計畫蓄水率每天 0.3 公尺，實際蓄水率每天 1.2 公尺。
- 深入岩盤的 key trench 太窄，導致滲流直接貫穿。
- 沒有濾層保護。
- 過度信賴灌漿。
- 蓄水期間沒有完善的監測系統。
- 沒有立即放空水庫

學習經驗

- 在破碎地帶，只靠單排隔幕灌漿，不能有效控制滲漏。
- 應設置濾層保護心層。
- 負責設計的工程師，在施工期間應該頻繁親臨現場。



右壩座坍塌



潰壩

## 2. Fontenelle Dam

1964 年完工，壩高 29 公尺長 1.6 公里。1965 年首次蓄水後幾乎潰壩。1964 年夏天開始蓄水後，在壩下游約 2000 英尺處發現滲漏。因為滲漏距離大壩很遠，認為沒有危險，所以繼續提高水位，滲流量繼續增加。1965 年 9 月差 0.6 公尺就滿水位，此時滲流量約每秒 1980 公升，立即以塊石回填滲漏處。9 月 6 日壩頂坍塌 6 公尺，持續進行坍塌位置填補，並以每天 1.2 公尺降低水位，滲漏量亦隨水位降低而減少。

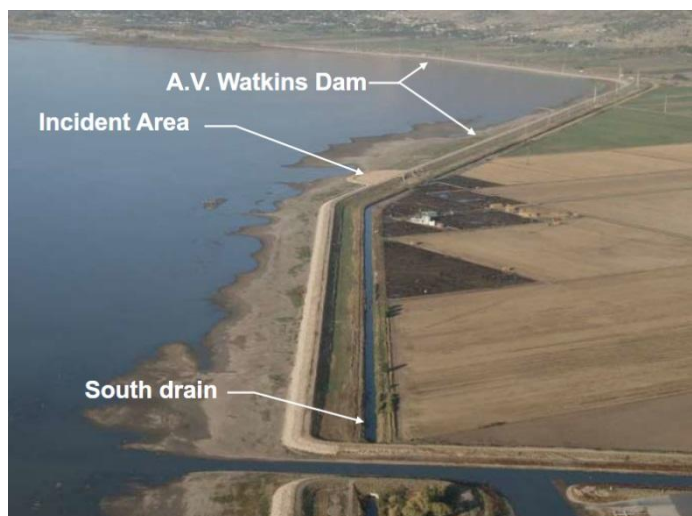
學習經驗

- 大壩基礎破碎岩盤、裂縫必須嚴謹處理。
- 水庫緊急洩降水位的能力必須嚴密評估。
- 潰壩經驗分享



## 2. A. V. Watkins Dam

建造於 1964 年，是一座 U 型堆填壩，全長大約 23 公里，出現意外的區域壩高大約 7 公尺到 11 公尺，庫容 215000 英畝-呎。



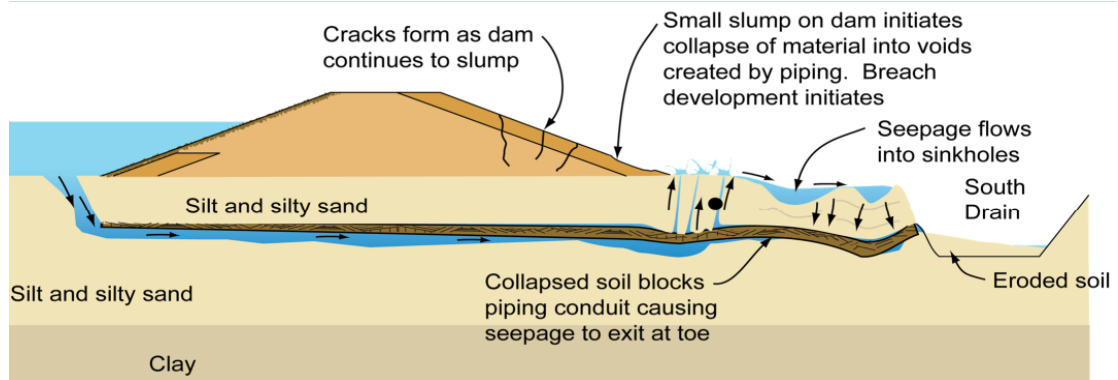
平面位置



壩趾沙湧



2006 年 11 月壩趾附近發現數處沙湧，直徑約 1.5 公尺沉陷孔，大壩下游邊坡坍塌。位於 sta. 639 處，滲漏量每秒 30-60 公升，當時接近滿水位，水位因滲漏下降 0.5 公尺，滲漏點入口水頭損失 2.6 公尺。



**大壩滲漏剖面圖**

水壩管理機構立即在大壩下游滲漏處回填碎石，在上游滲漏入口回填塊石、碎石。



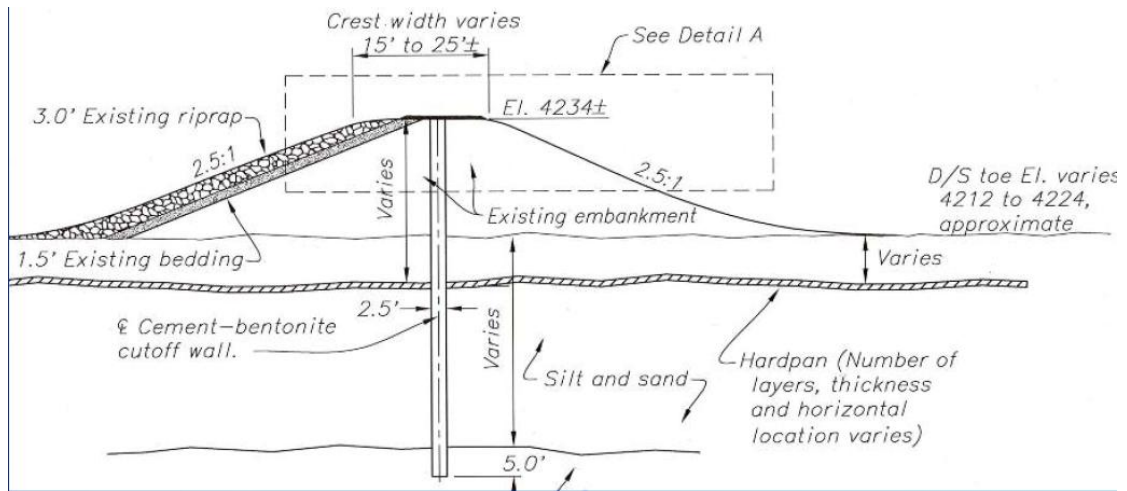
**上游回填塊石殼層**



**下游回填碎石**

## 修復方式

1. 大壩上游原有塊石上方，再增加 3 英尺厚塊石殼層。
2. 大壩心層加設截水牆，截水牆寬 2.5 英尺灌注皂土-水泥漿，貫穿沉積砂層深入岩盤至少 5 英尺。截水牆深度至少 60 英尺，全長 8 公里。

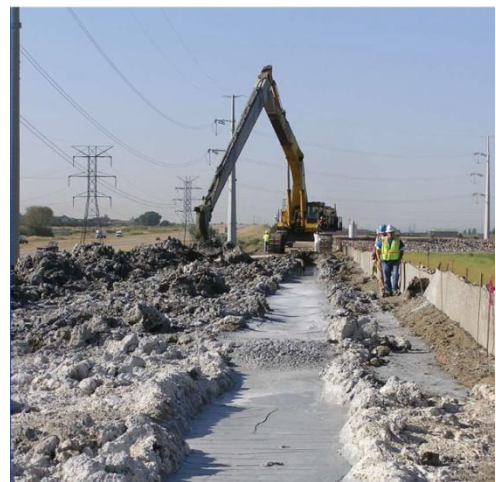


修復剖面圖

依據壑務局設計手冊第 16 章每立方碼 cement-bentonite 配比為 100 磅水+300 磅水泥+6 磅皂土



截水牆平面圖



截水牆施工照片

## 學習經驗

1. 營運很久的舊壩表現正常，並不代表後續營運表現正常。
2. 動物穴未處理。
3. 由於壩長 23 公里，大部份乘車執行現場檢查。

## (四). 2. 壩頂溢流

### 1. South Fork Dam

1853 年建造，壩高 21 公尺容量 1 千 5 百萬立方公尺，在 19 世紀是世界最大的壩，1889 年 5 月 30 暴風雨發生因壩頂溢流潰壩。

潰壩原因

- 因為經濟原因，溢洪道設置魚柵攔魚，魚柵塞滿垃圾雜物。
- 封堵出水工
- 出水高度不足

### 2. Taum Sauk Upper Reservoir Dam

1962 年興建，壩高 28 公尺容量 536 萬立方公尺，堆填壩表面鋪混凝土，是抽蓄電廠上池。

控制中心距離現場約 200 公里遠，因水位計訊號故障，持續抽水導致壩頂溢流而潰壩。

學習經驗

- 壩體夯壓不確實，而且缺乏細粒料，導致不均勻沉陷。
- 僅依賴遠端遙控，缺乏現場直接目視確認，是災難的開端。



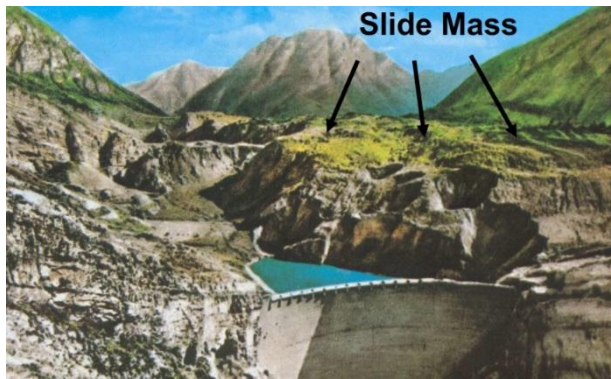
### 3. Vaiont Dam

在義大利北部為混凝土拱壩，壩高 260 公尺建造於 1950 年代。1960 年開始觀察到大壩上游左岸附近邊坡，以每天 20 公分速率滑動。1963 年 10 月 9 日，該處邊坡約有 2 億 7 千萬立方公尺土石，以時速 110 公里崩坍。崩坍邊坡填滿大壩上游 1 英里庫區，土方高度約 300 公尺，這一切發生在 15-30 秒內。湧浪超過壩頂 100 公尺，洪水摧毀經過路線的一切事務，造成 2600 人死亡。

學習經驗

- 大壩附近地質特徵，應是大壩設計及安全評估需要審慎考慮的因素。
- 水庫水位升降會造成邊坡不穩定。當水壩附近出現巨大土體有滑動趨勢，應該停止蓄水，直到邊坡穩定。





Vaiont Dam 潰壩前

### (四). 3. 地震

#### 1. Lower San Fernando Dam

建造於 1912 年為水力堆填壩，壩高 43 公尺，庫容 2500 萬立方公尺。1971 年芮氏規模 6.6 地震，壩址離震央 14 公里，基礎測得最大加速度 0.6g，主要滑動發生在上游坡面，造成大壩幾英尺之缺口，同時出水工塔因邊坡滑動而嚴重受損。

學習經驗：水力堆填壩在地震時容易發生液化。



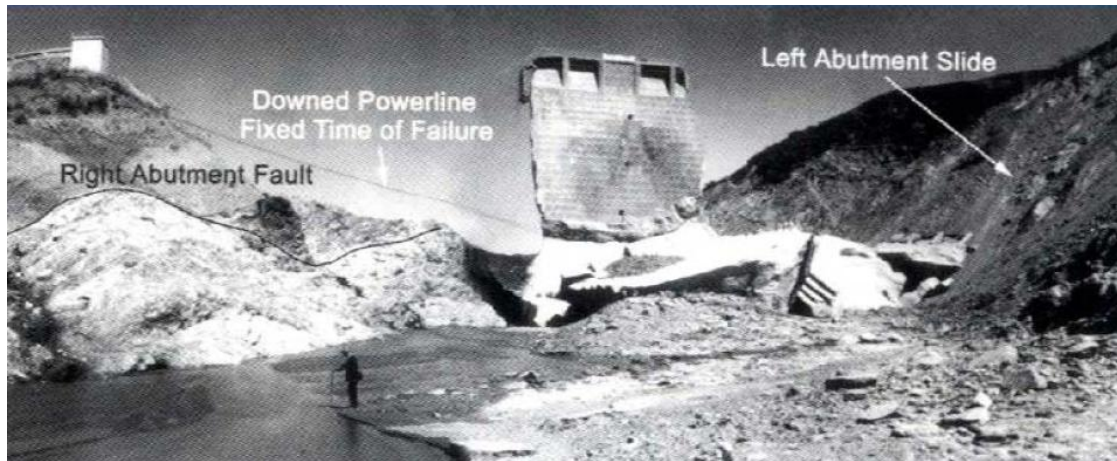
Lower San Fernando Dam



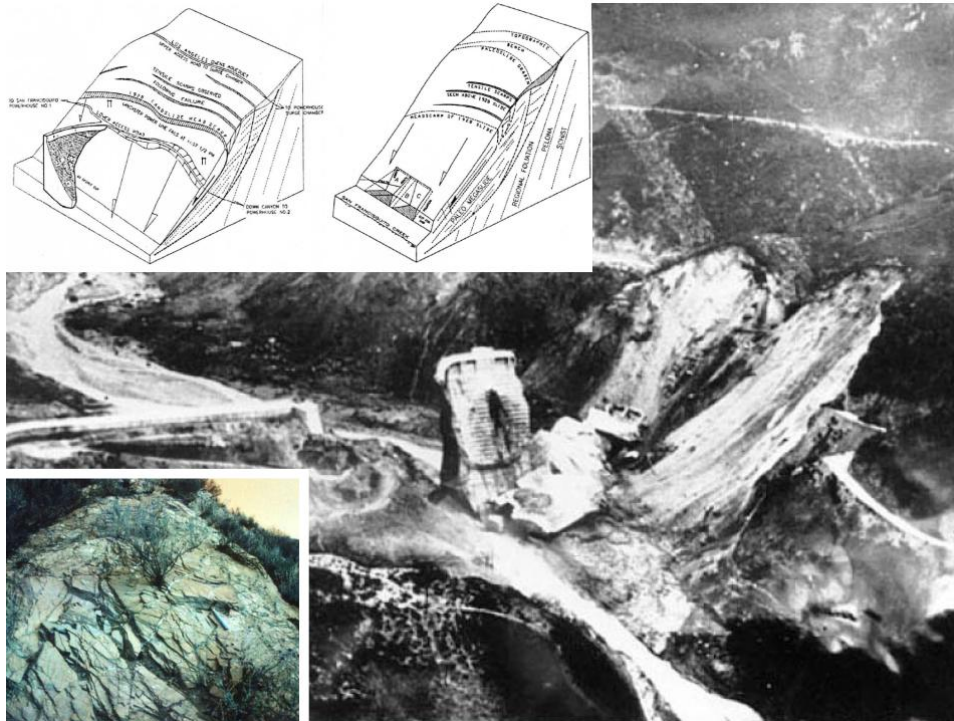
#### (四).4 基礎破壞

##### 1. St. Francis Dam

興建於1926年混凝土重力拱壩，壩高59公尺庫容4700萬立方公尺。沒有設伸縮縫，沒有排水廊道，基礎沒有壓力灌漿，左壩座為順向坡。大壩底部沒有加寬，任意提升壩高6公尺。1928年3月12日接近滿水位時，突然潰壩，70分鐘內洩光庫容。



St. Francis Dam 潰壩



左壩座邊坡滑動

## (五)、由大壩安全監測、分析評估潰壩模式

### 1. 最大可能潛在破壞模式

#### a. 分析現有資訊

壩址地質、大壩設計條件、大壩建築方法及查閱施工紀錄、監測數值、現行地震及洪水外力、分析撤離工作。

#### b. 潛在破壞模式

心層管湧路徑通過大壩基礎、大壩下游邊坡或壩頂淘空、壩座邊坡滑動。

#### c. 潰壩實際發生情況

大壩內部滲漏、洪水溢頂、壩座邊坡滑動導致混凝土結構物開裂或破壞。

### 2. 識別關鍵參數

### 3. 識別預期與非預期的後果

### 4. 破壞模式

#### a. 堆填壩管湧或地下淘空

#### b. 混凝土壩基礎破壞

#### c. 洪水溢頂導致土石壩波壞

#### d. 地震

#### e. 洪水淘空基礎導致混凝土壩破壞

### 5. 監測計畫

#### a. 現場工作人員規律性以目視檢查

#### b. 規律性以儀器監測

#### c. 定期邀請專家檢查

#### d. 地震或洪水檢查

## (六)、水庫淤積與大壩安全

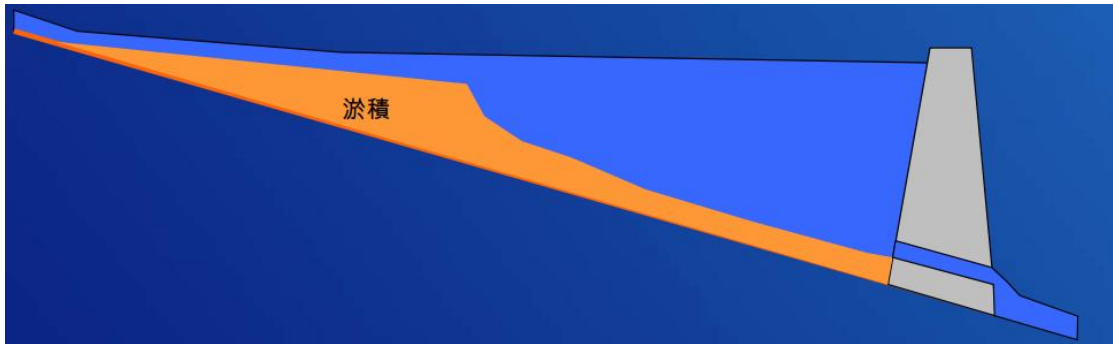
沒有水庫淤積管理，水庫無法長期提供重多國家利益。淤積使水庫壽命提早結束，並產生除役的鉅量成本。後代子孫須承受這些成本，並被迫在費用昂貴的地區開發新水源。因為人口增加，需水量提高，但是水庫蓄水量卻因淤積而減少。在一些地區，氣候變化可能導致水文條件劇烈變化。乾早期間降低供水的可靠性，更頻繁洪水將加快水庫沉積速率，這也更加減少水庫的可靠性。蓄水量損失和可靠性降低，將使某些地區產生惡性循環，可能連續數年乾旱，使這些地區氣候變化的影響加劇。

### (一)、淤積逐漸成為水庫經營管理的主要問題：

1. 如果忽視淤積，將影響大壩安全。淤積會降低洪水蓄存容量，提升洪水演算起使水位，因而造成出水高度不足而溢頂。
2. 淤積阻塞出水工，使緊急洩洪量不足，影響大壩安全。
3. 使出水工、溢洪道嚴重磨損。
4. 增加混凝土壩、混凝土水工構造物外力。

(二)、對淤積問題仍有認知不清及誤解:

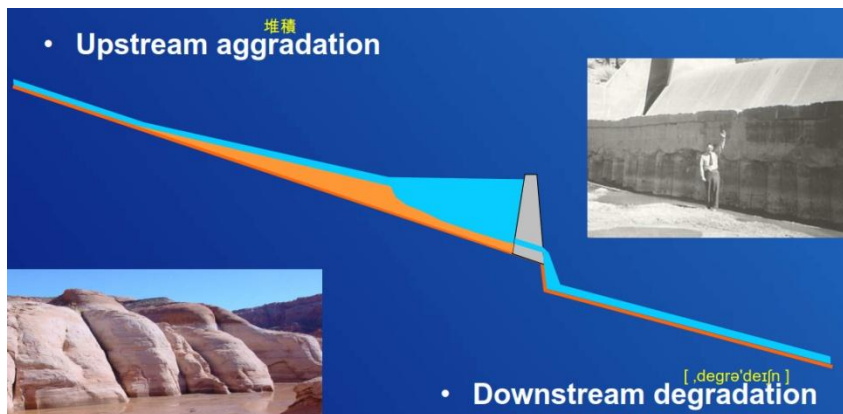
1. 誤以為淤積只會產生在水庫某些區域，實際上水庫淤積是全面性的。



2. 誤認淤積速率是固定的，實際上淤積速率劇烈變化。

3. 誤認水庫可以一直使用到庫容淤滿，其實只要取水工、出水工出入口淤滿，就喪失水庫功能。

4. 誤認淤積只會在水庫造成衝擊，其實淤積將使水庫上游填高，下游淘深。



5. 誤認淤積都是汙染物。所有河川都有運送沉積物的能力，經過檢驗上游淤積三角洲，並未發現汙染。

(三)水庫永續利用方案

1. 集水區治理。

2. 繞庫排沙。

3. 異重流、水力排沙。

4. 抽砂。

5. 機械清淤。

6. 研究發展水庫除役計畫。

## (七)、大壩監測儀器

大壩安全監測分為兩大部分，分別是目視調查與儀器監測兩種。這兩種監測方式必須密切配合，互補其優缺點。

設置儀器監測的優點為：

1. 協助瞭解大壩實際行為。
2. 對潛在問題發出警訊。
3. 協助確認問題。
4. 證明大壩實際行為與預期相符。
5. 評估補救措施效益。
6. 協助研究。

ASCE/USSD 研究美國 1980 年以前，77 座土石壩潰壩原因，整理資料如下表：

破壞模式	Percentage of failures	percentage of prevented
內部管湧洩空	44%	44%
溢頂	23%	3%
洪水沖刷	18%	16%
下游邊坡破壞	7%	7%
其他(位移、閘門破壞、老化等)	9%	1%
合計	100%	71%

由上表統計資料，內部管湧洩空是大壩破壞模式最主要原因，而監測儀器針對預防大壩內部管湧洩空最有效。

監測儀器種類分為 4 大類

1. 監測水壓力:水壓計、上舉壓力計
2. 監測土壓力:土壓力計
3. 混凝土行為:應力、應變計、溫度計
4. 沉陷位移:傾斜儀、沉陷觀測點、裂縫量測尺
5. 滲漏:量水堰、攜帶式濁度計

堆填壩監測儀器如下表

物理量	種類	裝設位置	目的與功能
水壓力	水壓計	壩體、基礎	量測孔隙水壓或基礎上舉壓力
土壓力	土壓計	壩體	監測壩體內不應力分布
變位	水平變位計	壩體與壩基交接處	監測壩體與壩基鑲接情形，研判是否異常變位
	表面觀測點	壩面	觀測壩體外部變形量
	傾斜儀觀測井	壩體	觀測壩體內部變形量
邊坡		觀測大壩邊坡穩定性	
加速度	地震儀	自由場、壩體、壩頂	分析壩體動態反應
滲流量	量水堰	壩體濾層截流出口	觀測排水廊道、下游滲流量

依照感應器原理，目前使用的監測儀器種類如下表：

感應器種類	原理	應用	精確度	故障率
振弦式	振弦的共振頻率受到弦的張力及應變影響	水壓計、土壓計、變位計、傾斜儀	高	普通
電阻式	藉由量測其電阻變化，即可求得其應變量及其衍生的物理量	應力計、應變計	高	對接點品質要求高
氣壓式	利用氣平衡原理量測感應器端的壓力值	水壓計、土壓計	普通，不容易自動監測	低
光纖式	偵測利用光波長及頻率變化，再將光信號轉換成數位訊號或電壓值的量測儀器	水壓計、土壓計、溫度計、應力、應變計	極高	光纖很脆弱施工不易，尚未普遍應用

老舊堆填壩通常會遭遇監測儀器故障問題，監測儀器深埋壩體內部，若再鑽孔重新設置，反而影響大壩安全。滲漏是堆填壩主要問題，因此量水堰流量觀測是大壩內部滲漏行為的總體表現。另外壩體沉陷、裂縫是壩體內部應力行為的體現。因此必須依靠大壩管理人員經常性、規律性親臨現場目視檢查或以人工量測。或以測量儀器及衛星監測大壩沉陷、位移點。

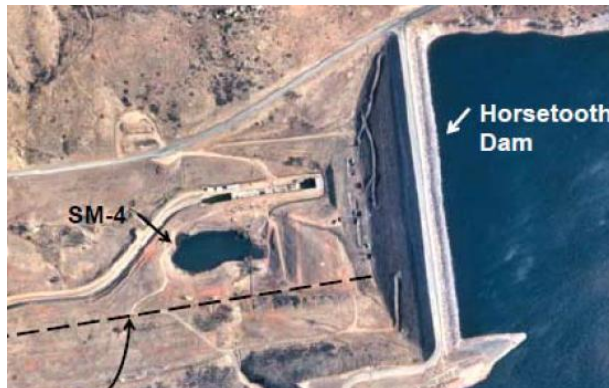


## (八)、內部滲漏淘刷歷史案例

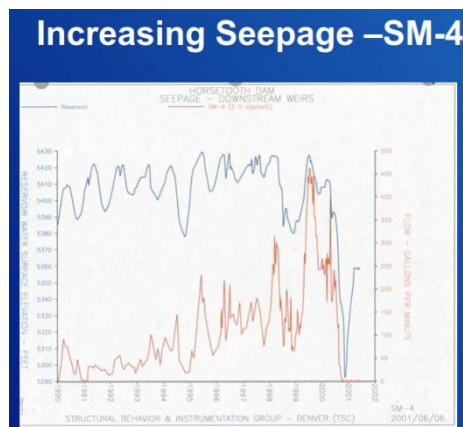
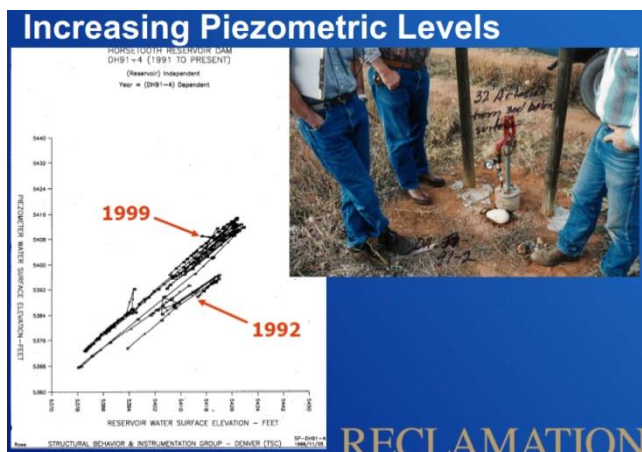
### 1. Horsetooth Reservoir Dams(總共 4 座壩)

#### 1-1. 變異情況

##### a. 壩址下游發現沉陷孔



##### c. 地下水位上升



#### 1-2. 資料蒐集

##### a. 地質調查:

因為地層含石灰岩(karstic 卡斯特熔岩)，幾千年來逐漸溶解，使覆蓋層坍塌形成孔洞。似乎因為水庫水位洩降而造成坍塌孔洞。





#### 1.4 補救措施

- a. 回填灌漿
- b. 混凝土蓋
- c. 地工織布
- d. 覆蓋黏土



回填灌漿



混凝土覆蓋



黏土覆蓋及地工織布



## 2. Deer Flat Dam - Upper Embankment

Lowell 湖在 1906 年建造上、中、下三座堆填壩。大壩基礎沒有設防止滲流的鍵槽，基礎沒有特別處理，長期基礎滲流。只有下壩出水工渠道設有濾層，上壩出水工渠道沒有濾層。

上壩出水工渠道長 52m，斷面 1.3m\*1.8m，原設計是壓力管路，流量 2cms。



Deer Flat Dam 上、中、下三座壩位置

### 2-1. 變異情況

- a. 1983 年很清楚看到渠道施工縫滲漏。
- b. 2001 年增加新裂縫，滲漏水夾帶泥沙。



Photo 19. Deer Flat Dams - Deer Flat Caldwell Canal outlet-works conduit, looking toward the downstream end. Note the seepage at the sides of the conduit. 3-18-86

### 渠道滲漏情況



### 滲漏夾帶泥沙

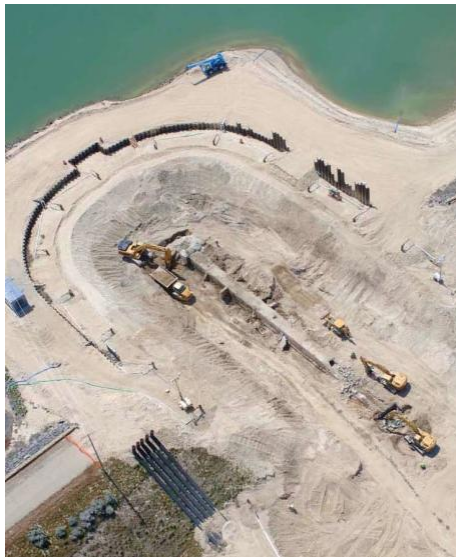
- c. 渠道內地面孔洞有些超過 0.14m
- d. 大壩表面發現濕潤區域
- e. 渠道滿管時，滲透進入壩體；空管時水庫蓄水滲入渠道內。

## 2-2. 補救方案

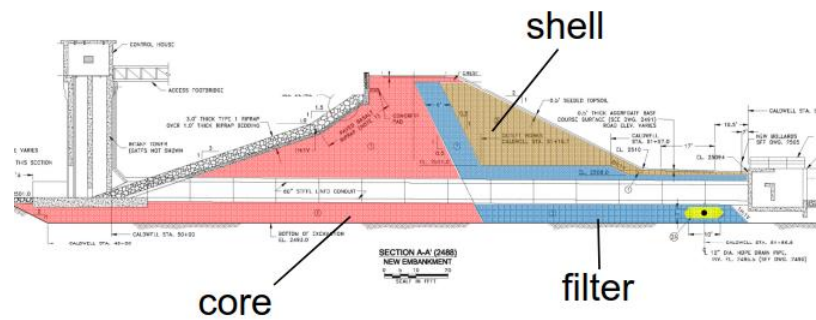
- 在取水工進水口附近施打圍堰回填土方，形成施工區域。
- 開挖壩堤重新回填新材料。
- 重新製作導水渠道。



進水口工作區回填



既有壩堤開挖



大壩回填新材料



更新導水渠道

### 3. 內部滲漏淘刷的統計數字

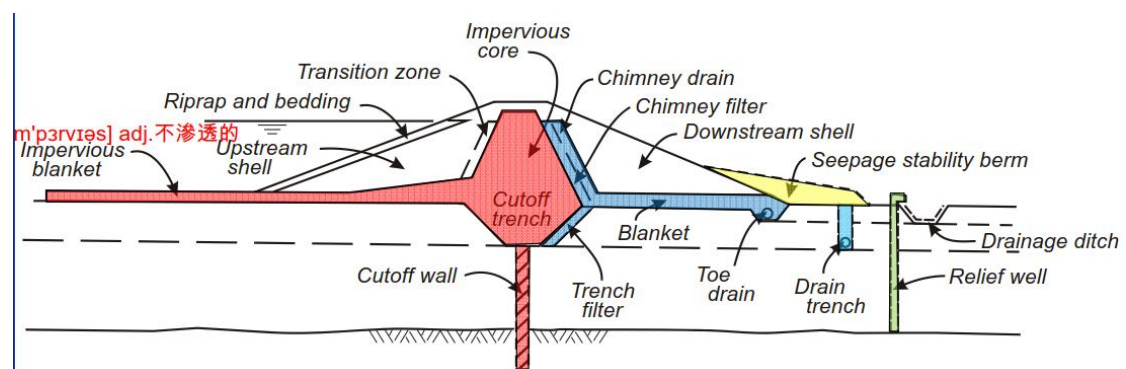
根據研究發現，防止內部滲漏是大壩安全最重要的工作。已知各種潰壩模式，其中滲漏管湧佔 46.9%。而發生滲漏意外或潰壩事件的時間，有 50%發生在建壩完工後 5 年內。更驚人的數據是，33%的意外或潰壩事件發生在首次蓄水。(詳下表)

Mode of Failure	% Total Failures (where mode of failure known)	% Failures pre 1950	% Failures post 1950
Overtopping	34.2 %	36.2 %	32.2 %
Spillway/gate (appurtenant works)	12.8 %	17.2 %	8.5 %
Piping through embankment	32.5 %	29.3 %	35.5 %
Piping from embankment into foundation	1.7 %	0 %	3.4 %
Piping through foundation	15.4 %	15.5 %	15.3 %
Downstream slide	3.4 %	6.9 %	0 %
Upstream slide	0.9 %	0 %	1.7 %
Earthquake	1.7 %	0 %	3.4 %
Totals (3)	102.6 %	105.1 %	100 %
Total overtopping and appurtenant works	48.4 %	53.4 %	40.7 %
Total piping	46.9 %	43.1 %	54.2 %
Total slides	5.5 %	6.9 %	1.6 %
Total no. of embankment dam failures (exc. During construction)	124	61	63
Total embankment dam years operation (up to 1986)	300,400	71,000	229,400
Annual probability of failure	$4.1 \times 10^{-4}$	$8.6 \times 10^{-4}$	$2.7 \times 10^{-4}$

Timing of Incident/Failure	All Incidents and Failures	Only Failures
During first filling	33 percent	50 percent
During first 5 years of operation	50 percent	60 percent
After 5 years of operation	50 percent	40 percent

### 4. 預防滲漏的元素

- 4-1. 大壩上游延長不透水覆蓋層，以增加滲流路徑。
- 4-2. 大壩基礎灌漿，以減少甚流穿透基礎。
- 4-3. 大壩基礎下方設置截水牆
- 4-4. 壩趾排水
- 4-5. 大壩下游設置覆蓋層，以抵消滲流上舉壓力。
- 4-6. 大壩下游設置濾層，抽水井





## 5. 導水渠道穿越壩堤改進方案

大壩規劃設計時，應該盡量避免導水渠道穿越壩堤，渠道最好繞過壩堤從堅實岩盤穿越。USBR(1987)：「When a conduit is selected for a waterway through an earth or a rockfill embankment , cutoff collars well not be selected as a seepage control measure」。

因為渠道附近無法夯實而且防滲板(cutoff collars)阻礙夯實，渠道周圍將形成滲流路徑造成滲漏。

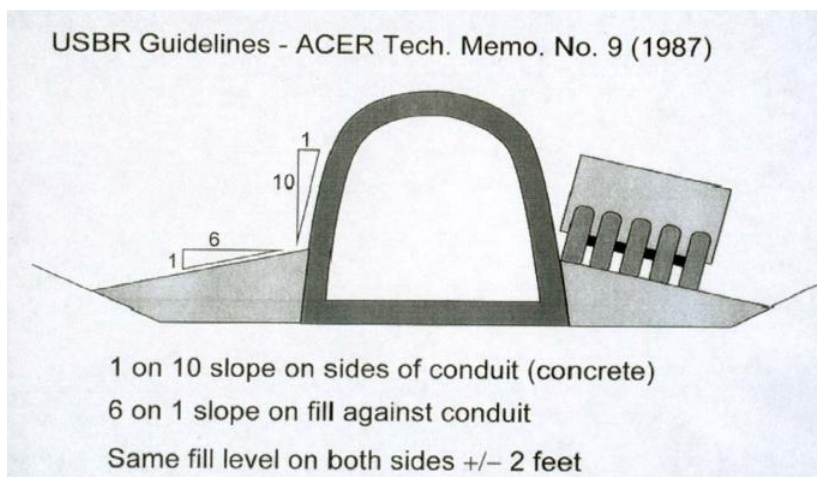


Anita Dam 渠道施工



渠道出水口滲漏

根據墾務局技術指導方針，渠道穿越壩堤應在渠道外圍設置馬蹄形混凝土圍阻體，鋼管設於圍阻體中間。(詳下圖)



利用圍阻體幾何形狀達到夯實目的，實際應用詳 page22 更新導水渠道圖。

## (九)、堆填壩檢查

### 1. 檢查技巧

檢查的目的是為了找出潛在地影響大壩安全的因素。因此，綜觀壩堤整個表面區域。再以系統性的搜尋植被、邊坡狀況，一般的方法是沿著壩軸，規律的搜尋 3 至 10 公尺區域範圍，直到整個表面都檢查一次。檢查員視線在上游或下游邊坡，以多個角度檢查是否有凸起或凹陷。

檢查員應攜帶雙筒望遠鏡或長焦距鏡頭，因為望遠鏡及長焦鏡頭會壓縮景物，會比較清楚顯示坡面不平整處。

最重要的是壩體與壩座交接面檢查，因為這個區域會有地面逕流沖刷。如果壩座接觸面處理不當，交界面通常會出現滲流。

### 2. 檢查重點

#### a. 滲流

紀錄滲流位置、滲流速率、滲流與大壩水位關聯性。如果發現滲流夾帶泥沙，必須拍照記錄位置。如果滲出口有堆積物，也應該被詳細記錄。除了測量滲流的流速，應該對滲流濁度進行觀察評估，必要時對滲漏水取樣進行水質分析。如果對滲漏情況有疑問，應該增加檢查頻率。

#### b. 裂縫：縱向裂縫、橫向裂縫、乾縮裂縫

##### 縱向裂縫：

是沿著壩軸方向產生裂縫。發生縱向裂縫原因如下

- (a)大壩不同回填材料，發生不均勻沉陷。
- (b)大壩產生張力或側向材料分離剝落。
- (c)大壩邊坡不穩定可能產生滑動。

雨水從縱向裂縫入滲，會降低材料強度，並產生滑動面。

##### 橫向裂縫：

是垂直壩軸方向的裂縫，發生原因是材料不均勻沉陷。如果橫向裂縫深入心層，會形成貫穿心層的滲流路徑，極有可能造成潰壩。

##### 乾縮裂縫：

乾縮裂縫發生在高溫曝曬導致材料脫水，乾縮裂縫通常發生在下游側，是不規則的蜂巢式圖案。當天氣很熱氣候過於乾燥，而且水庫長期在低水位時會產生乾縮裂縫。如果回填高塑性土壤，也很可能產生乾縮裂縫。乾縮裂縫會形成大壩表面沖蝕溝。

#### (a)不穩定：邊坡滑動、深層基礎滑動

##### 上游側邊坡滑動

上游側邊坡滑動對大壩安全影響較小，但是上游邊坡滑動會阻塞取水構造物。

##### (b)下游側邊坡滑動

因為滲流或表面逕流沖刷，導致材料含水量過飽和或負載增加，導致邊坡不穩定。

### **3. 凹地**

形成原因為沉陷、淘刷、滲流或管湧。

### **4. 不適當的植被**

過度植被以及深根植物都是有害大壩安全。

過度植被阻礙安全檢查視線，危機隱藏在植被中。植被成為穴居動物棲息地，穴居動物可能引起管湧。

大壩拋石邊坡不應該有植被，如果拋石邊坡出現植被，可能引起位移滑動。

邊坡有深根的喬木、大樹，在颱風中可能被吹倒，樹穴將引起管湧形成滲流路徑。

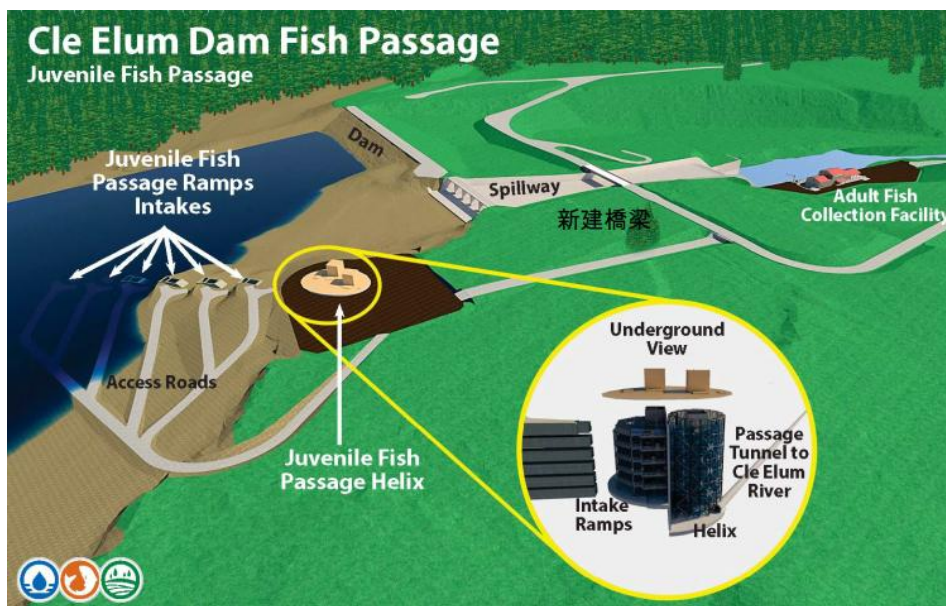
大樹枯死後，腐爛的根系造成管湧路徑。大型植被即使是健康的根系可能會造成提供滲流通道的威脅。這些滲流通道最終導致內部侵蝕，威脅堤防的完整性。

## (十)、現場參訪

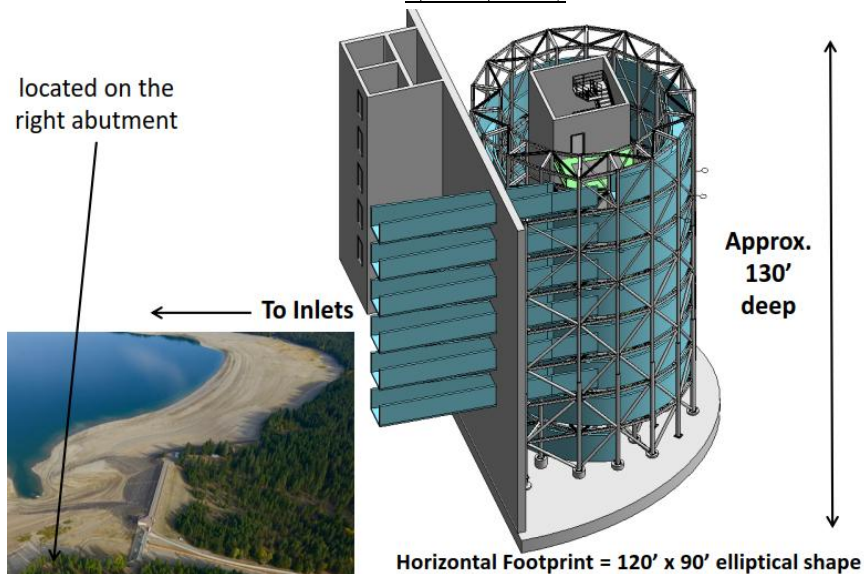
### (十). 1. Cle Elum Dam

Cle Elum Dam 位於 Cle Elum 河，壩高 165 英尺，因為大壩阻礙鮭魚、Sockeye 魚洄游問題，當地居民抗議十年，因此墾務局推動本計畫，計畫內容從上游到下游包含 6 個不同高程的進水口、連接進水口 6 條水平入口渠道、螺旋式魚道、一條出口渠道、道路、橋梁、成魚篩選設施、攔河堰等總經費約 4 億美元。幼魚依照水庫水位，從右壩座 6 個進水口進入建螺旋式魚道，讓幼魚從上游越過大壩到下游。水庫下游設置小型攔河堰，誘導成魚進入蒐集設施(collection facility)，成魚篩選、蒐集完成後以卡車載運到水庫上游產卵區域放流。

本計畫預算高達 4 億美元，因為鮭魚具有龐大經濟利益，而且能創造工作機會，雖然經費龐大，經成本效益分析仍有推動之價值。



平面佈置圖



螺旋式魚道





溢洪道現場照片



壑務局現場說明



閘門及臨時性魚道



(十). 2. Easton Diversion Dam

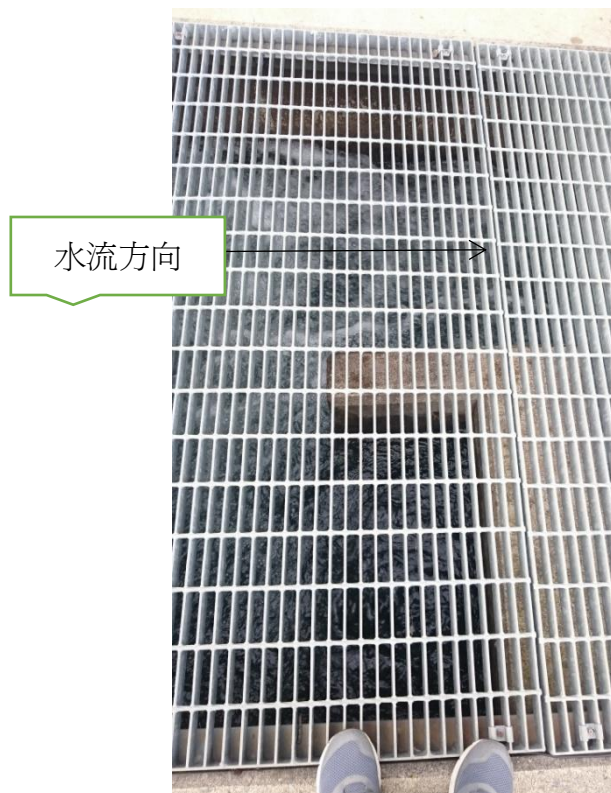
位於 Yakima 河，壩高 66 英尺，為減少溯河性魚類死亡，在大壩左岸興建魚梯。



導流堰溢流口及魚梯



魚梯全景



魚梯詳圖

(大約每隔 1.5 公尺，設一擾流墩，減少水流對魚類衝擊)

## (十). 2. Kachess Dam

土石堆填壩位於 Kachess 河，壩高 115 英尺，建於天然湖泊的最低處，湖泊容量增加為 295 萬立方公尺。墾務局安排本區域為模擬大壩安全檢查。



壩頂鋪設碎石級配，表面平整



以長焦距鏡頭檢視上游拋石邊坡



下游拋石邊坡及水位計





以長焦距鏡頭檢視下游邊坡



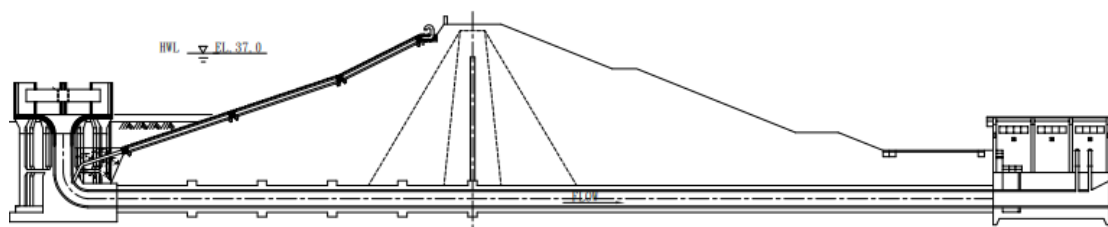
水庫管理房

### 參、心得與建議

(一)、由滲漏的歷史案例，Deer Flat Dam 因導水渠道裂縫滲漏，而開挖壩體重新興建導水管路，並回填新濾層。阿公店水庫取出水工結構類似 Deer Flat Dam，溢洪管、灌溉管等導水管路穿越壩堤，惟導水渠道材質大壩回填材料及大壩心層，阿公店水庫與 Deer Flat Dam 不同。

	導水渠道	心層
阿公店水庫	鋼筋混凝土結構鋼管內襯	黏土及 50 公分厚鋼筋混凝土牆
Deer Flat Dam	鋼筋混凝土	黏土

阿公店水庫經每年定期安全檢查，導水渠道附近滲流壓力尚在正常範圍。



阿公店水庫主壩斷面

(二)、根據 A. V. Watkins Dam 經驗，發生滲流穿越壩堤時，其緊急處置方式為在下游回填碎石，增加濾層厚度，以免細粒徑回填材料被滲水淘刷。並在上游回填細粒徑壤土，最外圍包覆塊石殼層。因此堆填壩水庫管理單位最好預先儲備防汛材料，以備不時之需。防汛材料建議如下：消波塊、碎石級配、大粒徑塊石。以阿公店水庫為例，已事先備妥消波塊，並在每年緊急搶修開口合約編列碎石級配、塊石單價及數量，若經判斷為緊急狀況，通知廠商進場施作緊急措施，以免擴大滲漏情況。

(三)、美國水庫通常具備休閒遊憩功能，台灣因土地稀少人口密集，為維護水質因此集水區開發受到限制，導致民眾對興建新水庫計畫多抱持反對態度。若水庫興建之初，即一併考量生活汙水蒐集、處理、排放系統，沿著蓄水範圍事先規劃興建汙水管路，有限度開放觀光或許可以減少反對聲浪。新建水庫或蓄水湖對地方說明，建議應加強觀光功能宣導，製作動畫勾勒美好願景。例如阿公店水庫位於燕巢市區，水庫周圍居民聚落處，設置 5 個生態池淨化生活廢水以維護水質。平常不禁止市民入區，晨昏時候很多居民入區散步、運動，欣賞湖光山色，水庫與市民共生共榮。

(四)、螺旋是類似槓桿高效率的機械概念，日常生活廣為運用，例如螺絲、螺旋槳。根據墾務局提供螺旋式魚道示意圖，概略計算可得每一迴圈約下降 18 英尺，每一迴圈長度約 163 英尺，斜率約 11%。換算成普通斜坡式魚道，等斜率 11% 下降 130 英尺(壩高)，水平長度需要 1183 英尺。

螺旋式魚道的好處是坡度相對和緩、占地較小、輸送過程非常平順。缺點是在水庫上游深開挖必須克服地下水、土壤壓力問題，甚至在施工過程需降低水庫水位，因此施工難度頗高，造價高昂。

台灣河川平常流量極少，降雨後水流湍急，地面逕流對河岸、河床沖刷非常嚴重。以前河川管理單位設置大量攔沙壩，以目前社會氛圍，反對興建攔沙壩甚至拆壩之議，時有所聞。早年興建之攔沙壩目前大部分已淤滿，攔沙壩僅高於河床數公尺，因此若在壩前興建小型固床工，穩固既有河床土石以免流入水庫。在大壩與固床工之間，興建斜坡式魚梯。魚梯坡度相對緩和且施工難度低，並彰顯管理單位對生態環境重視。



全體學員合照