

出國報告（出國類別：研習）

大壩修復及維護技術研習

服務機關：經濟部水利署南區水資源局

姓名職稱：歐信宏 副工程司

派赴國家：美國

出國期間：102年6月9日至102年6月21日

報告日期：102年9月6日

目錄

壹、目的.....	1
一、緣起.....	1
二、研習目標.....	1
貳、過程.....	2
一、行程與課程說明.....	2
二、課程內容摘要.....	4
(一) 從過去大壩災變事件所得到的經驗.....	4
(二) 大壩破壞模式之安全監測與評估.....	10
(三) 大壩潛在破壞模式.....	11
(四) 大壩安全風險分析與風險評估.....	15
(五) 堆填壩檢查.....	16
(六) 混凝土壩檢查.....	20
(七) 大壩安全監測儀器.....	21
(八) 操作與維護觀點及注意事項.....	22
(九) 工程研究試驗室參觀.....	24
三、大壩現地參訪摘要.....	26
(一) Boca 壩.....	26
(二) Stampede 壩.....	29
(三) Prosser Creek 壩.....	32
(四) Folsom 壩.....	35
(五) Nimbus 鮭魚繁育中心.....	42
參、心得與建議.....	43

壹、目的

一、緣起

台灣在水資源利用條件上面臨豐枯懸殊、降雨集中等問題，降雨量全年分配不均造成水資源利用上的困境，尤以南部為甚。為了解決枯旱期所面臨水資源缺乏的困境，建設水庫並貯蓄水資源利用是有效的的方法，因此，近半世紀以來在北、中、南地區均已完成多座重要水庫的興建，但水庫營運有其壽齡，加以台灣坡陡流急的地形條件，使台灣水庫遭遇比其他國家更為嚴重的淤積問題，此外近年來氣候變遷所帶來的影響逐漸為人所重視，如何使水庫能永續利用亦成為值得重視的課題。目前除了大壩及防淤設施的更新規劃外，維持水庫安全尚需仰賴相關監測及定期檢查工作，透過確實之安全評估及安全檢查，有助於及時掌握水庫安全狀況並做必要的處置。

美國墾內政部墾務局(U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, USBR)成立於1902年，為負責美國西部十七州水資源管理的聯邦機構，負責美國近480座大壩、58座水力發電廠之操作、維護及安全檢查工作，在大壩興建技術上，墾務局依其經驗並提出多項可供依循的設計標準(例如第十三號設計標準 堆填壩)，並定期舉辦國際性大壩安全評估相關研習，提供相關技術及經驗課程，俾各國從事辦理水庫安全相關業務人員參與學習，以提升相關專業能力。

本年度「大壩修復及維護技術研習」出國計畫，係參加美國墾務局於102年6月11日至18日舉辦之「大壩安全評估國際研習會暨技術考察」課程，其內容第一部份主要為室內課程講習，包含歷史災變案例事件、大壩安全檢查程序、大壩潛在破壞模式、水庫安全營運、維護、監控和應急準備等，並安排參觀墾務局工程研究試驗室。第二部份則安排現地參訪Boca壩、Stampede壩、Prosser Creek壩、Folsom壩及Nimbus鮭魚孵育中心等。

二、研習目標

本研習係由墾務局專為水庫安全檢查及評估所設計之課程，參與人員包括相關水庫設計、工務、營運維護等工程師。由墾務局具專業技術及經驗的講師於課堂上說明相關大壩安全評估課題，並安排現地參訪相關堆填壩及混凝土壩，實地了解所安排參訪之大壩更新改善過程，學習大壩安全之目視檢查與評估程序的操作方式，有助於提升在大壩檢查、安全評估專業領域上的技術能力。

本研習參加人員來自世界各地，藉由與各國參與研習學員討論及交換經驗，可了解其他國家在大壩安全及營運上之經驗，拓展大壩專業技術國際視野，俾利本署未來相關業務之推動。

貳、過程

一、行程與課程說明

本次行程係參加美國墾務局（Bureau of Reclamation）於科羅拉多州丹佛市舉辦為8天(6月11日至6月18日)之「Safety Evaluation of Existing Dam International Technical Seminar and Study Tour」(大壩安全評估國際技術研習會及參訪)課程，本署與會人員於102年6月9日由台北啟程前往丹佛。本次研習會由澳洲、加拿大、哥倫比亞、巴拿馬、南非、南韓及台灣等七個國家共十七人參與。

研習課程安排如表1，第一週(6月11日至14日)為課堂講座與並安排參觀墾務局工程研究試驗室與混凝土試驗室。第二週(6月15日至18日)為現地參訪行程，15日即前往內華達州，16日為自由行程，17日當日相繼參訪加州Boca壩、Stamper壩、Prosser Creek壩，18日參訪加州Folsom壩、Nimbus鮭魚孵育中心，並於當日結束課程。

表1 課程內容表

日期	內容	備註
6/9(日)	啟程(台北-洛杉磯)	
6/10(一)	(洛杉磯-丹佛) 報到及資料整理	
6/11(二)	1.歡迎致辭、壟務局簡介、與會者自我介紹 2.大壩安全歷史背景 3.大壩安全計畫概要 4.大壩災變教訓 5.操作維護展望與通盤考量 6.參觀壟務局工程研究試驗室	
6/12(三)	1.大壩安全監測與評估之破壞模式識別 2.大壩安全風險分析與評估 3.大壩安全之水文災變分析 4.大壩安全工作地質師之角色概述 5.混凝土壩及附屬構造之非線性有限元素分析 6.歡迎會	
6/13(四)	1.混凝土壩與附屬結構物之改善 2.大壩操作標準步驟與新進操作人員訓練 3.大壩監測設備 4.分組研討 (1)地震災害 (2)緊急應變 (3)滲流與管湧	
6/14(五)	1.附屬結構物檢查 2.機械設備之檢查維護與測試 3.混凝土壩之檢查 4.堆填壩之檢查 5.現地考察之大壩簡介 6.與會人員發表意見	
6/15(六)	現地參訪行程開始(搭機前往內華達州)	
6/16(日)	South Lake Tahoe 自由行程	
6/17(一)	1.參訪Boca壩、Stamper壩、Prosser Creek壩 2.前往加州沙加緬度	
6/18(二)	1.參訪Folsom壩 (加州)、Nimbus鮭魚孵育中心 2.研習課程結束	
6/19(三)~ 6/21(五)	回程 (沙加緬度-西雅圖-台北)	

二、課程內容摘要

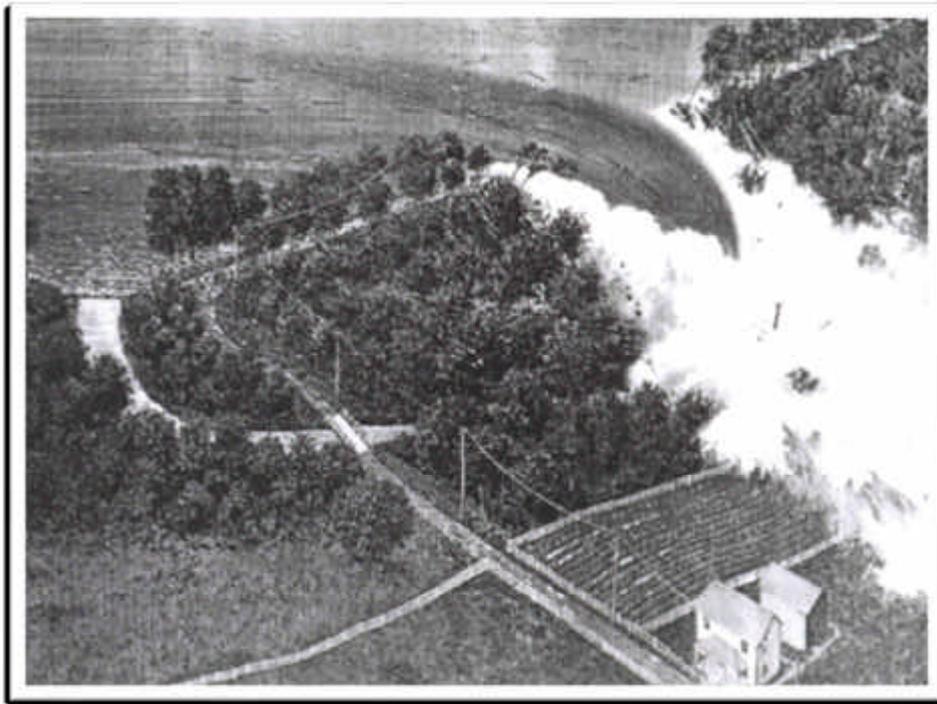
(一) 從過去大壩災變事件所得到的經驗

近代較為知名的大壩災變事件約達200件，歸納其災變原因，其中因溢頂所致比例約為30%，因壩體本身或通過基礎滲流(Seepage)或管湧(Piping)所占比例約為50%，因基礎條件或其他因素所致約占20%；由上可知壩體或基礎發生滲流、管湧而造成大壩潰壩實為災變事件之大宗。

所謂鑑往開來，在大壩安全相關課題上，綜合世界上歷年來較為知名之大壩災害，其災變後所歸納之經驗教訓，可做為未來我們執行大壩安全管理之借鏡，相關案例所得之經驗教訓簡要說明如下。

1. South Fork Dam

其潰壩原因主要為大壩溢頂所造成，當時大壩為當地漁獵俱樂部所擁有，在大壩管理與維護過程缺乏專業工程人員參與，溢洪道、排洪通道等壩體重要設施之變更及修繕，未考量工程專業因素，以致於在某極大降雨事件下造成發生大壩溢頂情況，因而造成下游極大災害。



South Fork Dam, 1889年5月31日 暴雨致使水庫水位溢頂(摘錄自墾務局簡報)

2. Teton Dam

Teton壩位於美國愛荷華州，建造過程中有關壩址基礎裂縫處理及水庫水位蓄升速率的控制等問題，加以進行水位蓄升當時，主要出水工及溢洪道閘門尚未能進行操作，忽略水庫控制設施制水位的能力，因此當壩下游面產生滲漏後，無法緊急控制水庫水位，以致災害發生。歸納本次災變所得經驗如下：

- (1) 大壩基礎裂縫應妥慎處理。
- (2) 建立多道防線以防止滲漏侵蝕。
- (3) 水庫水位之蓄升應考量水庫控制設施能力的重要性。
- (4) 設計者必須在施工期間驗證施工條件與設計條件是否相符，必要時調整設計。





Teton壩潰壩情形(摘錄自壑務局簡報)



大壩基礎岩盤裂縫(摘錄自壑務局簡報)

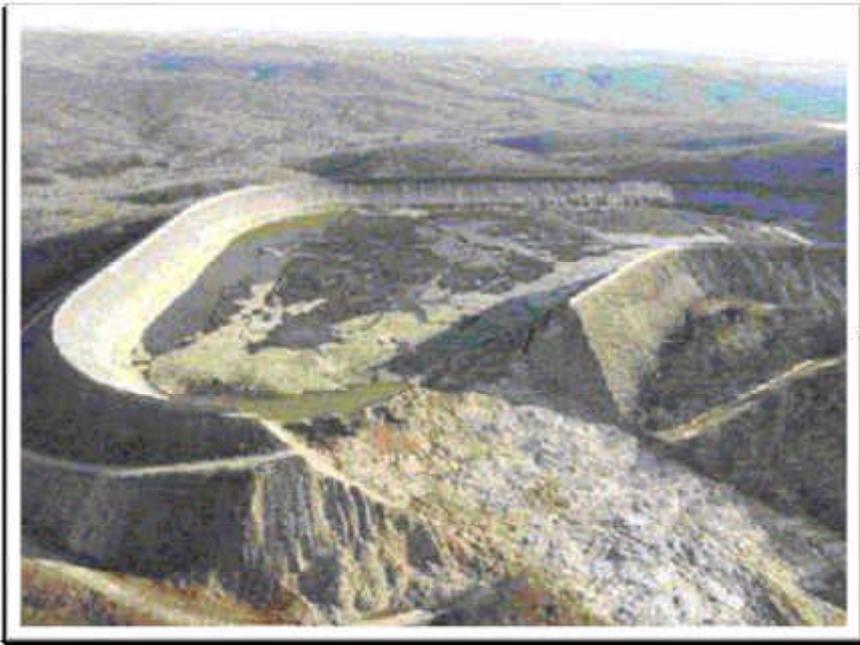
3. Taum Sauk Upper壩

本大壩建於1960年代，被視為是當代先進的建壩技術。其災變教訓如下：

- (1) 堆石材料夯實和品質控制未充分執行。
- (2) 當監測設備失準後，依賴監測器進行遠端監控將造成災難，因此確實進行監測設備的日常維護和校正工作，有助於預防災難發生。
- (3) 現場人員所提出的警訊應予重視。



Taum Sauk Upper壩，潰壩前照片

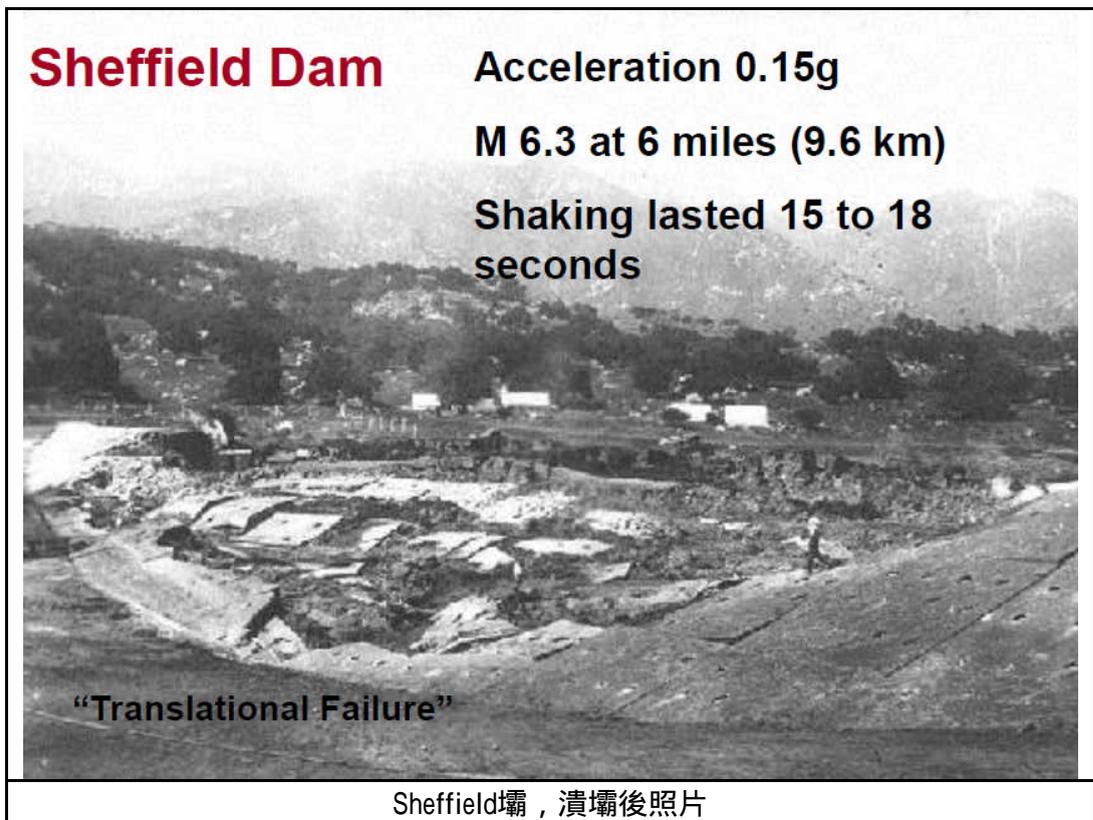


Taum Sauk Upper壩，潰壩後照片

4. Sheffield Dam

Sheffield壩潰壩的原因是地震所造成的液化現象，是目前所知少數因地震力致土壤液化而失敗的案例之一，本案例所得之經驗如下：

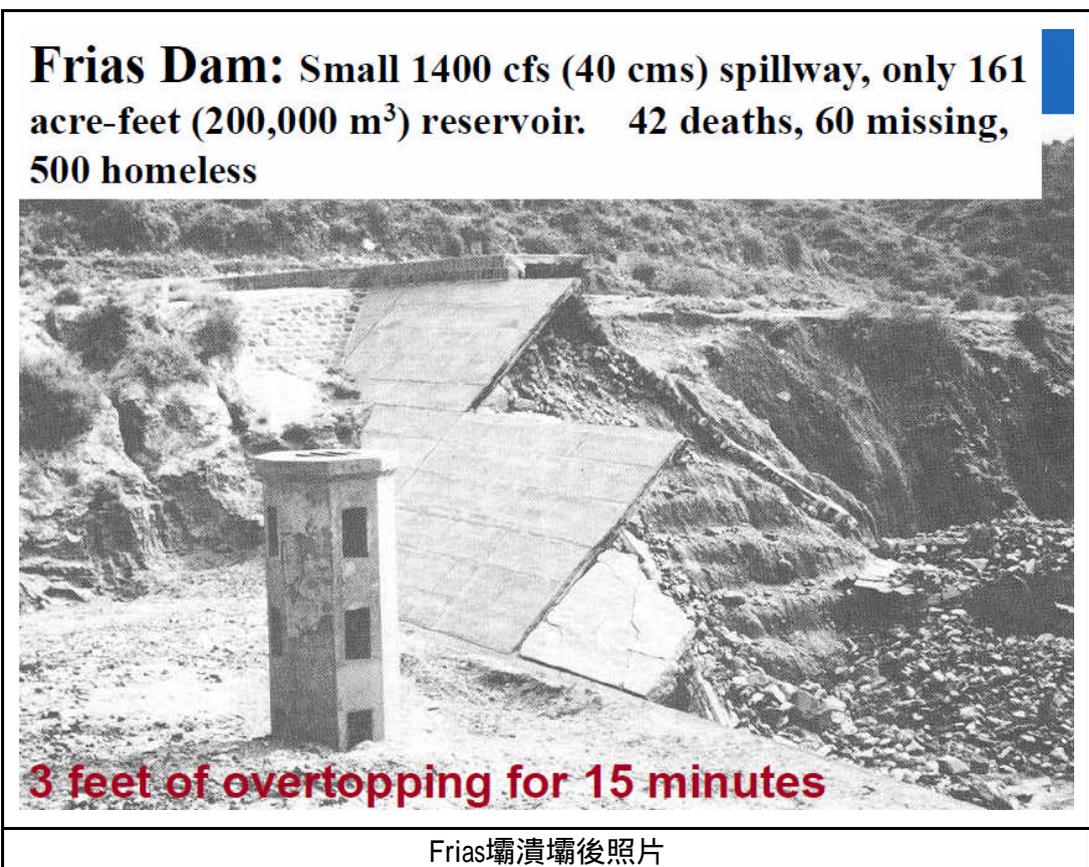
- (1) 評估因地震所致土體強度降低是複雜的科學和工程問題，具有內在的不確定性，尤其是變形量估算問題。
- (2) 目前美國許多水壩的興建均在發現地震可能產生土壤液化議題之前，這也使得有些水壩面臨地震破壞的風險。
- (3) 通過研究這些地震所致潰壩案例，大部分在目前新的工具及技術下均可克服。



5. Frias Dam

Frias 壩位於阿根廷，是小型壩溢頂所致災變，並造成下游42人死亡、60人失蹤。本案例所得經驗如下：

- (1) 即使是小水壩，仍可能造成慘重的死傷和災害。
- (2) 如同地震因素，可能最大洪水的風險和危害是難以精確評估。
- (3) 溢頂造成潰壩可能在極短的時間內發生，即使有混凝土面板加強，也無法減低溢頂破壞發生機率。
- (4) 統計分析上極罕見的暴雨是確實可能發生的。



(二) 大壩破壞模式之安全監測與評估

依據美國壑務局自90年代起針對大壩破壞模式評估及監測的經驗，注意到了在大壩監測工作上幾個問題，包括：1、監測儀器及程序未依當前需求定期調整；2、日常目視檢查工作不被重視；3、預期的監測性能應該加以定義；4、各項程序互為獨立，無法契合。因此壑務局推動表現參數程序(Performance Parameters Process)，期望在兼顧效能及效率下進行大壩安全評估與監測工作。

表現參數程序主要分為三項進程，針對三項進程與其方法概述如下：

1. 評估最為可能的大壩破壞模式

大壩安全監測與評估之目標在防止大壩破壞或潰壩，使得下游遭受重大災難及損失。為達此目標，最為有效的方式是藉由蒐集大壩相關資訊進行評估，例如壩址條件、大壩設計條件、相關紀錄及現有對潰壩模式的認識。因此，第一步，應確認以下相關資訊：

- (1) 確認大壩破壞後可能造成之損失，如下游民眾的傷亡、經濟損失。
- (2) 評估大壩現地相關條件：
 - I. 現地的地質條件。
 - II. 大壩之設計。
 - III. 壩施工方法和記錄。
 - IV. 營運操作之歷史紀錄（包含儀器紀錄與目視檢查紀錄）。
 - V. 可能遭遇之地震和洪水條件。
 - VI. 最新的大壩安全分析與評估工作成果。
- (3) 潛在破壞模式的說明，包含發生條件、破壞機制。
 - I. 發生條件
 - 洪水或地震因素。
 - 水庫水位過高。
 - 結構老化或劣化。
 - 操作錯誤或故障。
 - II. 破壞機制
 - 滲流通過基礎並造成大壩心層管湧。
 - 下游邊坡的侵蝕。
 - 壩座邊坡或岩體滑動造成之結構破壞。
 - 土石壩溢頂。

2. 針對可能大壩破壞模式之關鍵參數進行監控

應留心大壩破壞模式之相關線索，包含已可供研判較明確大壩破壞模式之關鍵證據或仍屬於大壩可能破壞模式之預警資訊，並掌握監測數據與現地相關性，如監測數據係於何處監測所得、如何監測、監測頻率等問題，更應依據監測結果決定何項關鍵參數應持續監測，而哪些參數需保留、新增或暫停觀測，如此方能在降低大壩風險與有效監測之花費上取得平衡。

3. 預期的監測數據合理範圍

監測資料成果可分為監測儀器之紀錄及現場工作人員常規目視檢查工作；例如儀器紀錄水壓值與庫區水位之相關性，依據長年觀測成果，通常可以研判監測數據之合理性，甚至歸納出監測數據之合理範圍；但另一方面，不若儀器監測數據可以明確定義其合理數值，目視檢查及觀測之成果則仰賴長久累積之現場經驗與知識。

(三) 大壩潛在破壞模式

大壩可能於正常操作狀況及極端條件負荷下發生破壞。

1. 正常操作狀況下:

- (1) 土石壩 因滲流造成破壞。
- (2) 混凝土壩 因大壩基礎條件所造成破壞。
- (3) 閘門故障。

2. 極端條件負荷狀況下

- (1) 土石壩 因洪水造成大壩破壞。
- (2) 土石壩 因地震造成大壩破壞。
- (3) 混凝土壩 因洪水造成大壩破壞。
- (4) 混凝土壩 因地震造成大壩破壞。

一般大壩破壞模式大致分為六種，說明如下:

1. 堆填壩發生管湧或壩體內心層材料侵蝕

依據至目前為止的歷史經驗，堆填壩所面臨最大的威脅並非是因地震或極端洪水條件，其最大的安全威脅是管湧或心層材料的侵蝕。當前大壩設計及施工技

術，已能充分防止此類破壞模式。

為了避免此類破壞模式的發生，必須審視並注意以下問題：

- (1) 大壩心層材料填築於基礎岩盤上時，應注意基礎岩盤所有岩盤開口、裂縫是否均已進行灌漿或其他妥善封閉措施？這將可避免心層材料沿基礎裂縫流失。
- (2) 大壩心層材料置於基礎岩盤上時，基岩表面應進行適當清除和鑲補混凝土，以提供良好的接觸面。這將減少心層材料發生不均勻沉陷的風險。
- (3) 大壩心層材料直接置於覆蓋表土時，在必要的地方應設置足夠厚度的濾層材料，並檢核其過濾能力，以防止滲流路徑沿覆蓋表土發生並造成心層材料流失。
- (4) 堆填壩內部，沿心層材料下游側應依照當前濾層標準設置濾層材料。
- (5) 規劃適當的滲流過濾路徑。

然而如果以上這些問題經過審視，並無規劃相關措施或這些設計並不明確，那麼必須透過相關安全監測以解決可能潛在的潰壩機制與風險；如果滿足下列其中之一或多個條件，則潛在安全危脅之嚴重性可能較為降低：

- (1) 大壩心層材料具有顯著的塑性，如此心層便較不容易發生侵蝕。
- (2) 在關注重點區域，並無高水力梯度現象。
- (3) 如果大壩心層材料發生侵蝕，但滲流量低，那麼將有較為充裕的時間，針對大壩安全問題採取必要的措施。
- (4) 如果滲流之出滲點並未出現夾帶大壩內部材料情形，且夾帶的材料也可因濾層被阻擋於內部，那麼這樣的破壞模式其威脅性是可被控制的。

2. 混凝土壩基礎失敗

歷史經驗證明混凝土壩的潛在破壞模式主要肇因於壩基的承載力不足。混凝土重力壩需要有適當的岩盤基礎支撐，至於拱壩其左右壩座須能承載大壩高負重，基礎承載力不佳可能導致混凝土壩失敗。

為充分了解此類潛在破壞模式可能的破壞行為，可以透過建立常規的大壩安全監測。重點監控如下：

- (1) 這類破壞模式，由目視檢查即可提供大壩結構安全疑慮之直接證據。橫向裂縫或新的壩體開裂偏移（非與溫度相關的），將是首要關注之現象。
- (2) 相關儀器監測數據也可提供直接的證據。迥異於過去的大壩沉陷、變形行為，

或於接縫處監測結構相對移動結果不同於歷史趨勢，將是值得關注的。

- (3) 大壩基礎上水壓的改變，將增加這種破壞模式發展的可能性。

3. 堆填壩洪水溢頂

本類破壞模式大致循以下方式：

- (1) 洪水溢頂沖刷壩頂和下游坡面。
- (2) 水位雖低於壩頂，但於風形成湧浪而造成對壩體之沖蝕。顯然地，在此情形下，壩頂施設柏油路封面和壩下游面施設拋石護坡將會減少這種破壞風險。
- (3) 庫區水位雖低於壩頂，但卻高於大壩心層頂部，此時滲流透過心層上之透水材料，造成心層材料的侵蝕，最終將導致潰壩。
- (4) 溢洪道（或出水工）的高出流量導致消能池與洩槽結構的破壞，並向上游沖蝕破壞壩體。
- (5) 高出流量並未適當地沿溢洪道(或出水工)流出並遠離壩趾，反而向上游側沖蝕直到潰壩。
- (6) 高流量通過溢洪道（或出水工）因穴蝕或其他不規則的流動模式而對結構造成損害。
- (7) 高流量經溢洪道可能越過洩槽或消能池側牆，因而沖蝕鄰近壩基材料。
- (8) 向上溯源侵蝕並危及壩體。

4. 堆填壩因地震產生的破壞

- (1) 由於地震的晃動導致大壩及基礎在一處或多處的變形，發生壩頂降低並溢頂的情況。依據變形的情況及當時水庫水位，大壩溢頂情況如果發生將迅速導致潰壩。
- (2) 由於地震的晃動（或斷層位移）使壩或基礎變形，產生橫向裂縫導致滲流侵蝕，這種狀況有可能迅速導致潰壩。但如果滲流量不高或大壩心層材料具顯著而適當塑性，那可能需要一段較長的時間才會導致潰壩；如果大壩心層下游側適當布置濾層，心層材料具自愈性，那麼潰壩的風險將顯著降低。

5. 混凝土壩因洪水造成的破壞

混凝土壩壩頂溢流涉及的安全議題，主要是因高流量對大壩與基礎接觸面的沖蝕。這種侵蝕可能破壞大壩基礎支撐與結構強度，並導致潰壩。

洪水發生期間，可能值得擔憂的是高流量條件下對溢洪道或出水工的潛在損害。穴蝕造成的損害通常是主要考慮因素，但高流量對在出水口的沖蝕也值得關注。溢洪道或出水口在高流量情況下，比預期更大的溢流深度及較預期為長的溢

流期間可能會導致重大損害度。災害的發生也有可能是因為排洪隧道（溢洪道或出水工）的損壞，並直接威脅大壩的結構完整性，這樣的潛在破壞模式，可能對大壩壩座/基礎造成負面影響。

洪水之後，應該徹底的檢查大壩及壩址，應徹底檢視現場所有的儀器相關數據。如果有有任何可以判斷的沉陷點或測量點，應即時測量大壩是否有變形的跡象。如果情況容許，應於洪災後進行現場航測，比較洪災前後地形變化。

6. 混凝土壩因地震造成的破壞

- (1) 地震搖動可能使基礎產生滑動。其破壞的方式可能是在不穩定的極端荷重下發生，也有可能是在穩定的靜態加載條件下發生。
- (2) 地震搖動導致壩體局部高剪應力和減少混凝土壩體正常應力。
- (3) 地震搖晃的結果在壩體高張應力，並導致壩體發生嚴重開裂。在極端的情況下，開裂是足以使壩的一部分（通常是上的中央部）的滑動和破壞。

針對混凝土壩因地震發生破壞的例行監測，一般比較地震前的基礎數據可提供足夠的資訊：（a）重點監測的參數與混凝土壩基礎失敗破壞模式相同（b）大壩結構發生開裂偏移（c）接縫的偏移，（d）壩頂沉陷點觀測或其他測量點觀測數據，及（e）其他可能的變形監測儀器的數據，在重大地震的晃動後，應該徹底地檢查大壩，並應及時閱讀所有相關的儀器資料。

(四) 大壩安全風險分析與風險評估

壩務局統計目前該局管轄中的水庫，有371座面臨安全威脅的高壩，其中，這些水壩中超過50%的水庫已營運50年，最舊的已經營運超過100年，許多大壩所面臨的洪災和地震條件已越來越嚴峻，大壩下游的居住人口也越來越多，這些都是大壩在營運後面臨的安全風險，並且應視需要提出相關改善建議。

1. 透過風險分析處理大壩安全議題，其目的如下：

- (1) 對於導致大壩失敗的因素有更好的認識。
- (2) 對於改善工程可以提供量化的數據判斷。
- (3) 對於相關改善措施提供指標以評判和者須優先進行。

2. 大壩安全風險分析的步驟如下：

(1) 確定大壩破壞模式：

此步驟在風險分析過程中最為關鍵，如果針對大壩潛在破壞模式評估錯誤，則其風險分析的價值將無法彰顯，另外潛在破壞模式亦可能會隨時間而改變，例如大壩結構隨時間老化、新的負荷條件，大壩下游人口數變化等等。

(2) 確定所關注的負荷條件及發生頻率。

此項應全面檢視負荷條件，而不只是僅限於極端負荷條件，此外洪水頻率分析、地震危險性分析資料應經由專家進行評估。

(3) 評估破壞的可能性。

(4) 評估可能造成生命財產損失。

人命損失會隨著時間、大壩下游人口數的增加及可預警時間而變化，尤其在人口密集的大城市，涉及疏散計畫是否具有效率、居民機動性等，其損失更為難以估計。另外經濟損失部分包括下游的結構損害、基礎設施的損失、大壩重置成本等。

(5) 計算風險，並確認其不確定性。

(6) 檢驗所得之結論。

(7) 針對個案狀況並提出改善建議。

(五) 堆填壩檢查

1. 堆填壩主要壩型種類

- (1) 均質壩。
- (2) 分區型堆填壩。
- (3) 堆石壩。

2. 檢查重點位置

- (1) 基礎與壩座。
- (2) 上游及下游坡面。
- (3) 壩頂。

3. 一般檢查考量重點

- (1) 有系統地檢查土石壩壩頂、上下游坡面之所有表面及周邊位置。
- (2) 如果是由一組人員來進行檢查，應針對檢查區域展開進行，或沿某一特徵線進行檢查。
- (3) 檢查應於不同水庫水位情況下分別進行。

4. 堆填壩檢查技巧

- (1) 沿著大壩坡面及壩頂的定期檢查，檢查員應環顧四周各個方向，從不同的角度觀察大壩表面，檢查大壩表面是否平整。
- (2) 此外，從遠處觀看坡面也可能發現一些異常，如路基表面不平整、植被的微妙變化。基於以下原因，大壩與壩座接觸的地方，應仔細檢查：
 - I. 因為這些地區很容易受到地表逕流侵蝕；
 - II. 滲流經常出現在大壩與壩座接觸之處。
- (3) 檢查壩軸線、上下游壩肩線，檢查員應從多角度觀察線型之變化。

5. 檢查行動

- (1) 將檢查情形拍照紀錄。
- (2) 記錄發現問題之處之位置和方向。
- (3) 量測或計算檢查之成果，如尺寸、流量等。
- (4) 與之前檢查結果進行比較分析。

6. 堆填壩主要缺陷

(1) 滲流

如果觀察到異常滲流情形，必須對該處進行持續監測，並記錄下列事項：

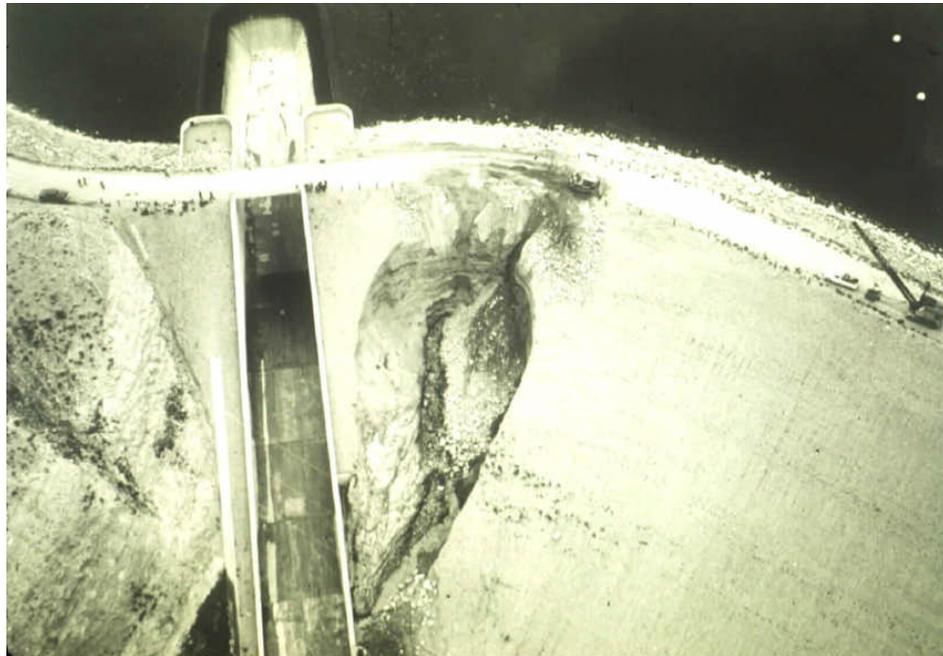
- I. 所有滲漏出口位置應詳細描述紀錄。
- II. 滲流量及水質情況是否清澈。
- III. 檢查最近之降雨紀錄，分析降雨對滲流量之影響。
- IV. 檢查當時之水庫水位。

如果觀察到砂湧現象發生：

- I. 應該拍照並記錄發生的位置。
- II. 應予以注意滲流水質清澈度。如果在滲流流出處周圍有任何沉積錐，應該記錄下來。
- III. 滲流流速應隨相應的水庫水位予以測量或紀錄。不過因為砂湧處通常在水面下，滲流流速可能難以確定。

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

- I. 進行檢查前應檢視設計圖說，以了解趾部排水出口位置。
- II. 測量趾部排水流量。
- III. 比較過去水庫在不同水位對應趾部排水流量之資料，如果在相同水位情形下，量測到趾部排水流量有異常提高情形，必須進行進一步調查。



Fontenelle Dam因滲流造成的破壞(摘錄自墾務局簡報資料)

(2) 裂縫

另一種潛在的嚴重缺陷是裂縫，裂縫發生的位置可能在壩頂或大壩坡面。

I. 縱向裂縫(平行壩軸裂縫)

可能之成因如下:

- 分區材料不均勻沉陷。
- 過度沉陷產生的橫向張力。
- 不穩定的坡度，可能出現弧形破壞。

II. 橫向裂縫(垂直壩軸裂縫)

橫向裂縫如果延伸到大壩心層，且裂縫位於水庫水位以下將可能形成穿過心層的集中滲流路徑。橫向裂縫通常出現在壩頂，橋墩附近，在U形或梯形的山谷。其成因如下:

- (i) 可壓縮性的大壩材料填築於陡峭或不規則的岩石壩座上。
- (ii) 在大壩基礎上填築可壓縮性材料。

III. 乾縮裂縫

乾縮裂縫通常無固定形式，有時為類似蜂巢圖形，一般而言常於壩頂或下游坡面出現。乾縮裂縫的形成常發生於大壩由高塑性黏土築成，且在炎熱乾燥的氣候伴隨著長時間水庫空庫之合併情況下。

發現裂縫時，應進行以下的檢查作為：

- (i) 拍照並記錄裂縫位置、深度、長度、寬度及裂縫分布形式。
- (ii) 加強監測裂縫的變化，並隨時注意情況是否惡化。
- (iii) 研判裂縫可能的成因。

(3) 不穩定之邊坡滑動：包含淺層滑動及深層滑動。

淺層滑動:

- I. 大壩上游側之淺層滑動常起因於過陡的邊坡，因水庫水位急洩降造成滑動。在上游坡面之淺層滑動不易直接威脅到大壩的完整性。然而可能導致滑動土石封堵輸水構造的進口或導致更進一步的深層滑動。
- II. 大壩下游面之淺層滑動常起因於過陡的邊坡，邊坡滑動將造成土石壩材料強度降低，並可能造成滲水之不利影響。

III. 若觀察到壩體有淺層滑動情形，檢查者應採取行動如下：

- (i) 拍照且記錄滑動面位置。
- (ii) 測量且記錄滑動面延伸之位移量。
- (iii) 尋找附近是否有其他裂縫產生，尤其是滑動面上方坡面。
- (iv) 檢查滑動面附近是否發現滲流產生。
- (v) 對滑動區域持續監測是否有惡化趨勢。

深層滑動:

I. 深層滑動對大壩安全有嚴重的影響，其主要特性如下

- (i) 趾部有隆起現象。
- (ii) 趾部有弧形裂縫產生。

II. 若發現可能有深層滑動跡象，應採取檢查行動如下：

- (i) 持續觀察可能造成深層滑動的裂縫區域。
- (ii) 建議進行調查以確定規模及造成的原因。
- (iii) 建議降低水庫水位並限制水庫蓄水量。

(4) 沉陷(Depressions)或形成沉孔(Sinkhole)

雖然沉陷的發生，在大多數案例中並不代表有立即性的危險，但卻是可能形成嚴重災害的前期指標。其影響如下：

I. 在大壩或基礎發生沉陷，將降低出水高度，代表如遭遇較大洪水事件，可能造成溢頂。

II. 庫水湧浪造成上游坡面侵蝕，以致細粒料被帶出造成拋石沉陷

III. 壩體發生管湧及內部侵蝕，隨後並造成上層材料的坍塌

IV. 發生沉陷時，應採取的檢查行動如下：

- (i) 局部沉陷發生時，應拍照紀錄沉陷位置、尺寸、深度及延伸範圍等；如果可能影響出水高，應進行壩頂高程進行測量。
- (ii) 探查底部是否有流動的水路，管湧及壩體內部材料被攜出將導致沉孔的發生。
- (iii) 經常觀測沉陷的深度及範圍是否擴大並惡化。

(5) 維護問題：

大壩維護措施主要在保護及維持一個水庫的運作，維護程度不足或被忽略雖然可能不會造成立即危險，但卻可能使上述缺陷惡化並威脅大壩安全。維護問題包括大壩坡面植被是否適當、壩頂及坡面保護是否足夠、地表逕流沖蝕問題、植生根系深度、是否存在動物洞穴影響大壩結構安全等。

(六) 混凝土壩檢查

1. 混凝土壩的缺陷

(1) 混凝土強度及耐久性不足

混凝土強度或耐久性影響大壩承受外加荷載及抵抗各種侵蝕的能力。混凝土強度及耐久性主要受到以下因素影響：

I. 凍融作用

II. 硫酸鹽的影響

水因凍融發生膨脹和收縮的結果，凍融將造成混凝土的開裂和表面劣化，在1942年之前興建的混凝土壩並沒有將凍融作用納入考量。

III. 鹼骨材效應

IV. 混凝土結構強度不佳，這可能是設計與施工品質的問題

(2) 基礎或壩座強度、穩定性和水密性不佳。

(3) 因設計負荷條件與實際不同、操作不當或溢洪道不當改建造成大壩穩定性不佳。

(4) 通過混凝土壩體的滲漏量過多造成壩體承受過大的壓力。

2. 現地檢查重點

(1) 壩基與壩座

壩基與壩墩的區域往往是最難以檢查，陡峭的壩墩可以使用雙筒望遠鏡協助檢查。檢查的重點，包括基礎是否發生位移、是否發生滲水。如果滲流現象已發生，應針對基礎及壩座進行調查管湧的可能性。

(2) 上游及下游壩面

檢查上下游壩面是否有任何位移現象，下游滲漏區域應進行調查以確認滲漏水的來源，並針對壩面檢查是否有因氣候、化學或物理性質造成的鰓免劣化。

(3) 廊道（包括儀器和溝渠）

檢查廊道結構是否有裂縫伴隨滲水情況，相關監測儀器數據成果與歷史紀錄比對，以確定是否有不安全的變化或異常趨勢發生。

(4) 壩頂：位移、差異沉陷、風化、物理或化學性影響等問題最容易從壩頂區域查覺。

（七）大壩安全監測程序

大壩安全監測程序包含兩種方法，其一為例行性目視檢查工作，其二為透過大壩監測儀器監測資料及紀錄等；其中目視檢查工作難以判斷大壩、基礎或壩座內部行為，因此透過設置相關儀器進行監測大壩監測工作，兩項互為配合才能確保大壩安全。

完善的監測計畫及程序有下列優點：

1. 瞭解大壩實際安全性能

儀器可提供相關重要數據，例如是否有沉陷、變形，通過心層或大壩基礎後水壓消散情形、穿過大壩或基礎的實際滲流量等。

2. 對潛在問題提供警訊

必須針對關鍵參數進行監測，以針對潛在問題提供適當資訊。

3. 確認問題所在

4. 驗證大壩各項行為符合預期

5. 可供以評估相關改善措施

6. 相關資料可提供進行研究

一個有效的監測計畫及程序，符合以下特點：

1. 符合現地的監測計畫及程序

(1) 監測計畫及程序經過完善規劃。

(2) 監測儀器須被正確安裝。

(3) 所提供資訊符合預期。

2. 監測儀器有正確的讀取及維護方式

(1) 按監測程序執行各項工作。

(2) 監測資料能迅速精準的傳送。

(3) 能迅速而有效地進行數據回顧。

(4) 監測資料定期進行深入分析。

3. 監測計畫及程序應保證予以落實
 - (1) 監測人員經足夠的訓練。
 - (2) 良好的溝通和團隊合作。
 - (3) 持續監測。

此外，設置監測儀器可協助管理者節省許多時間去探查大壩內部之潛在問題，並避免既有設施存在問題進一步惡化，監測儀器之選擇上考量如下：

1. 適當的監測範圍、精度及敏感度。
2. 長時間使用的可靠度。
3. 儀器盡可能簡單，避免複雜。
4. 可抵抗外在環境之破壞。
5. 不須過度維護。
6. 低成本。
7. 施工技術亦須納入考量。

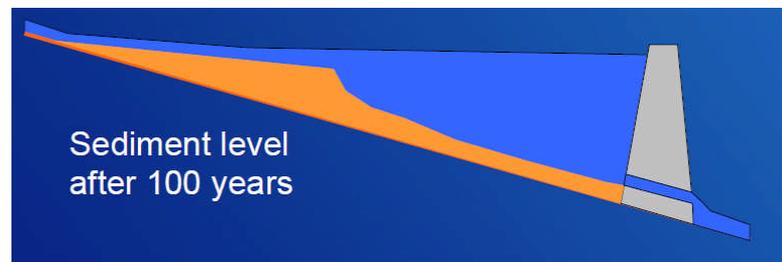
(八) 操作與維護觀點及注意事項

1. 操作與維護與大壩安全的關聯性
 - (1) 一般而言，操作與維護的作法和程序都與大壩結構元件的正常磨損和損壞有相關性。
 - (2) 隨著時間推進，結構元件的老化最終將須進行修復或更新。
 - (3) 如果操作維護程序被忽略或程序不夠完整，可能會迅速演變為影響大壩安全的問題。

2. 設施老化問題

- (1) 隨著水庫營運時間的增加，代表維護成本也隨之增加。
- (2) 當達到或超過預期的使用壽命，便需決定何時需要更換某些元件或設備。
- (3) 老化程度端視操作和維護程序執行程度。
- (4) 水庫泥沙淤積。

依據壑務局作法，大壩出水工之取水口高程是以預估營運一百年後淤積高程設計，然而依據美國實際營運結果，發現約在營運四十年後，多數水庫於取水口淤積高程已超過百分之五十。



- (5) 老化造成運轉效率

降低。

(6) 相關設計規範之更新，老舊設施也必須更新改善。

3. 維護措施的種類

(1) 預防性維護:指按計畫進行定期檢查、調整，更換零件等，墾務局認為維護措施應以本項為首要。

(2) 預測性維護:通常以先進的設備進行檢查或測試，以決定維護需求。

(3) 定期性維護。

(4) 故障維護。

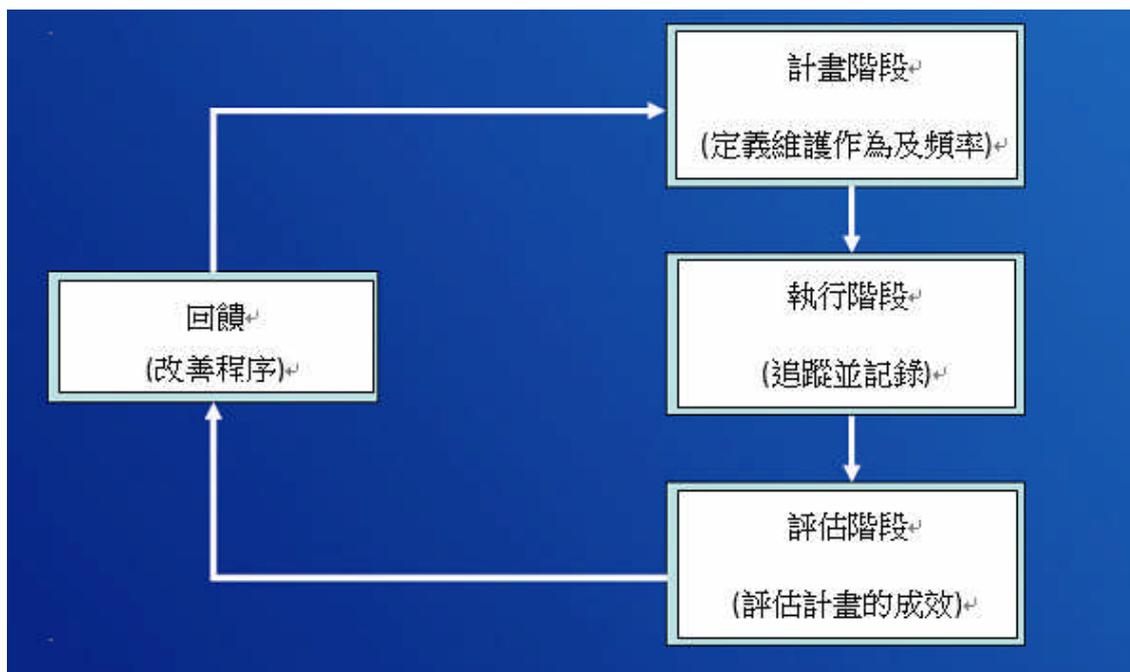
(5) 積極主動維護:結合全面品管原則，以確定大壩安全問題根本所在。

(6) 可靠性維護:以最合乎邏輯及最具效益的方式，結合預測性維護、故障維護、預防性維護、預測性維護的一種維護理念。

(7) 非經常性維護:依據實際需要，且屬於一般正常性以外的維護作業。

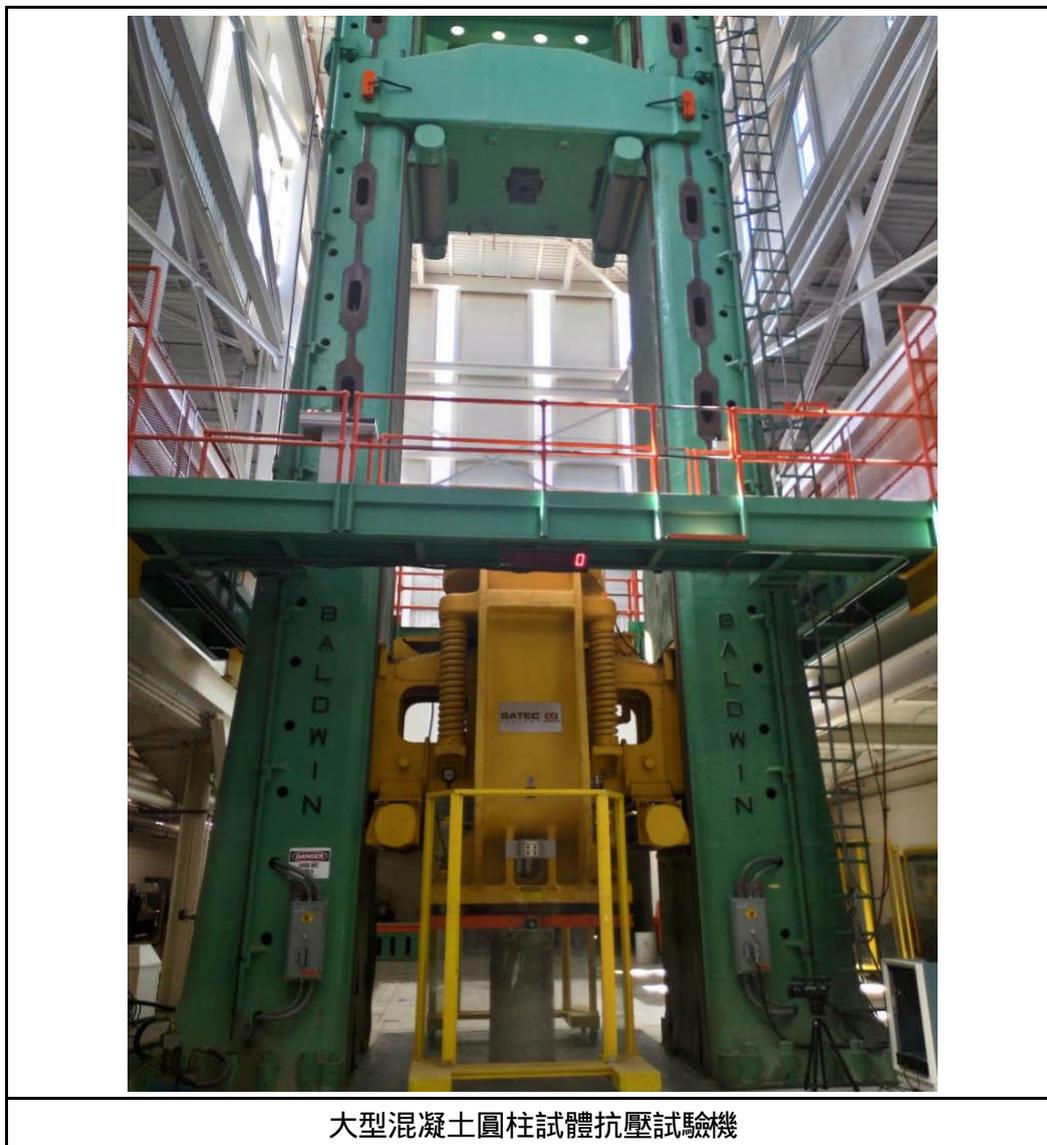
(8) 緊急維護:居高優先性，以緊急恢復功能為目的。

4. 維護管理程序的規劃



(九) 工程研究試驗室參觀

墾務局工程研究試驗室主要從事水工結構物模型試驗分析，6 月11 日下午參訪該試驗室，試驗室工作人員就現場相關試驗藉由展示海報與動畫或紀錄影片播放方式等進行導覽解說，現場並進行大型混凝土圓柱抗壓試驗。





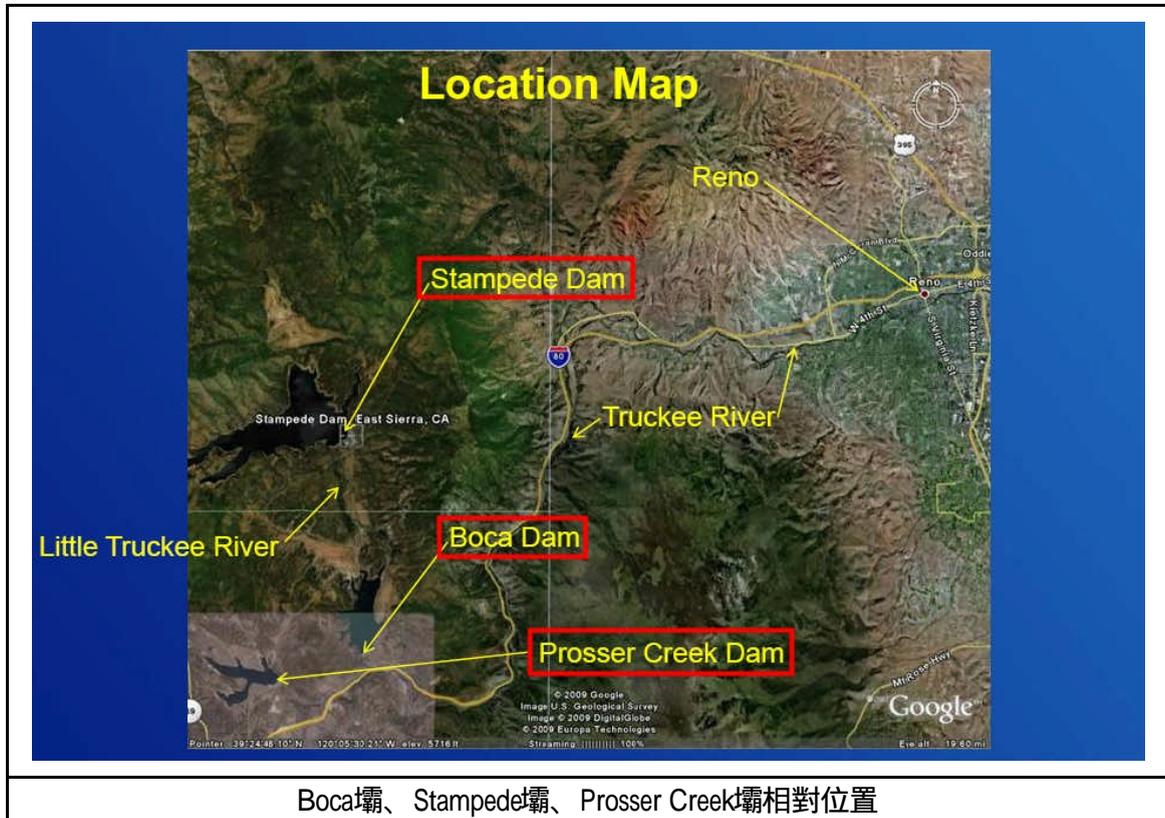
墾務局解說Folsom 壩新增第二溢洪道水工模型試驗



魚道水工模型試驗

三、大壩現地參訪摘要

6月17日至18日為現地參訪行程，墾務局安排參訪四個水庫，其位置在加州北部，17日分別參訪位於內華達州與加州交界處的Boca壩、Stampede壩、Prosser Creek壩，18日參訪加州州府所在地沙加緬度(Sacramento)附近的Folsom壩、Nimbus鮭魚孵育中心。



(一) Boca 壩

1. 基本資料

壩高:116呎

壩長:1,629呎

庫容:40,901英畝-呎

集水面積:36平方英哩

淹沒面積:977英畝

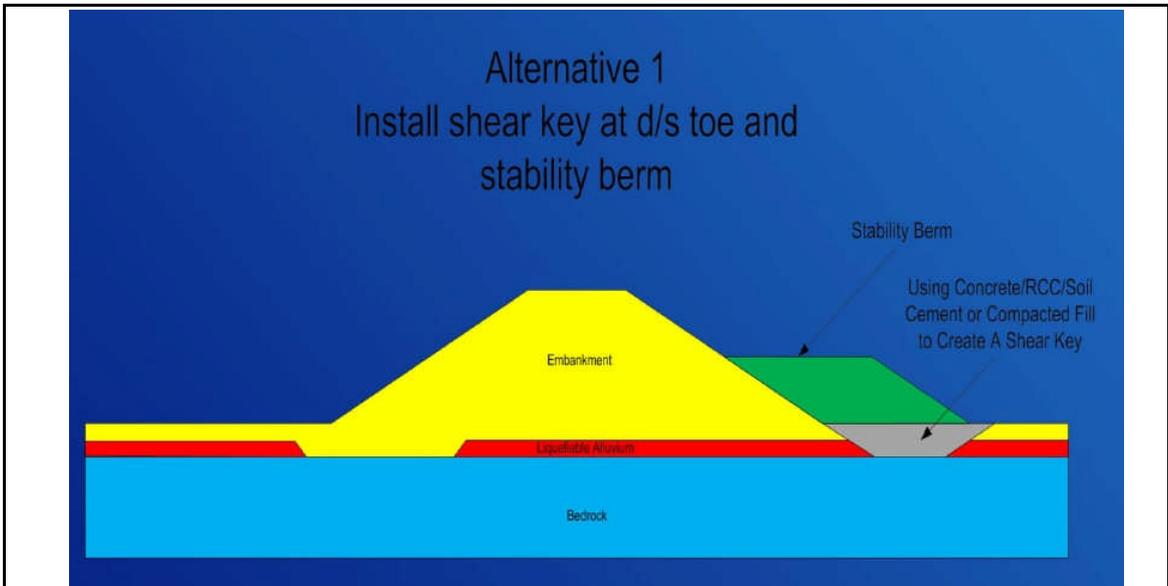
Boca 壩為一分區堆填壩，1939 年興建完成，營運迄今已超過70年。



Boca壩俯瞰圖(摘錄自壅務局簡報)

2. 大壩安全問題

Boca壩因其基礎上近10呎厚的飽和沖積層，經進行地震及大壩變形分析，發現大壩遭遇地震時存在土壤液化及變形風險，壩體變形將影響出水高，並導致溢頂潰壩。因此針對此安全威脅提出改善方案，改善方法為於大壩下游趾部進行填方，並以混凝土置換趾部沖積層，以提高大壩穩定性。



Boca壩改善工程示意圖(摘錄自壅務局簡報)



沿大壩進行解說



Boca壩溢洪道

(二) Stampede 壩

1. 基本資料

壩高 239ft

壩長1,511ft

庫容280,210 acre-feet

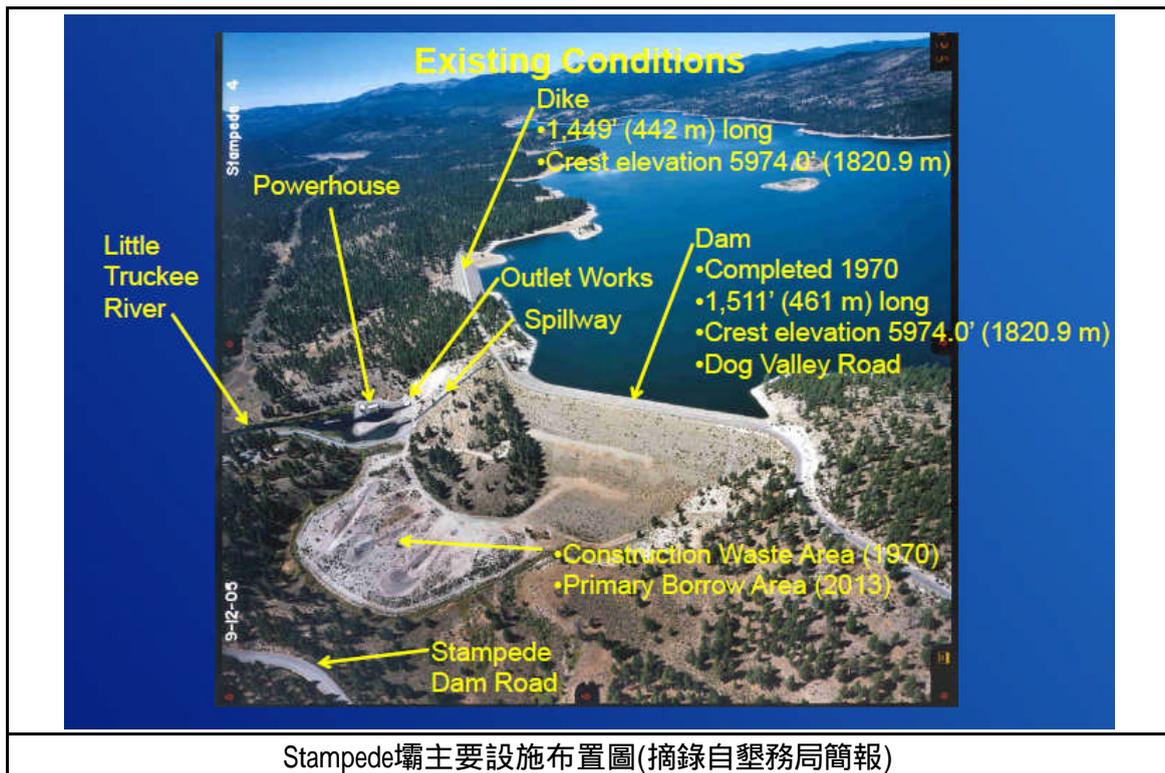
集水面積136.0 sq mi

淹沒面積 3,340 acres

Stampede 壩為分區堆填壩，1966年開始興建，於1970年建造完成。

2. 大壩安全問題

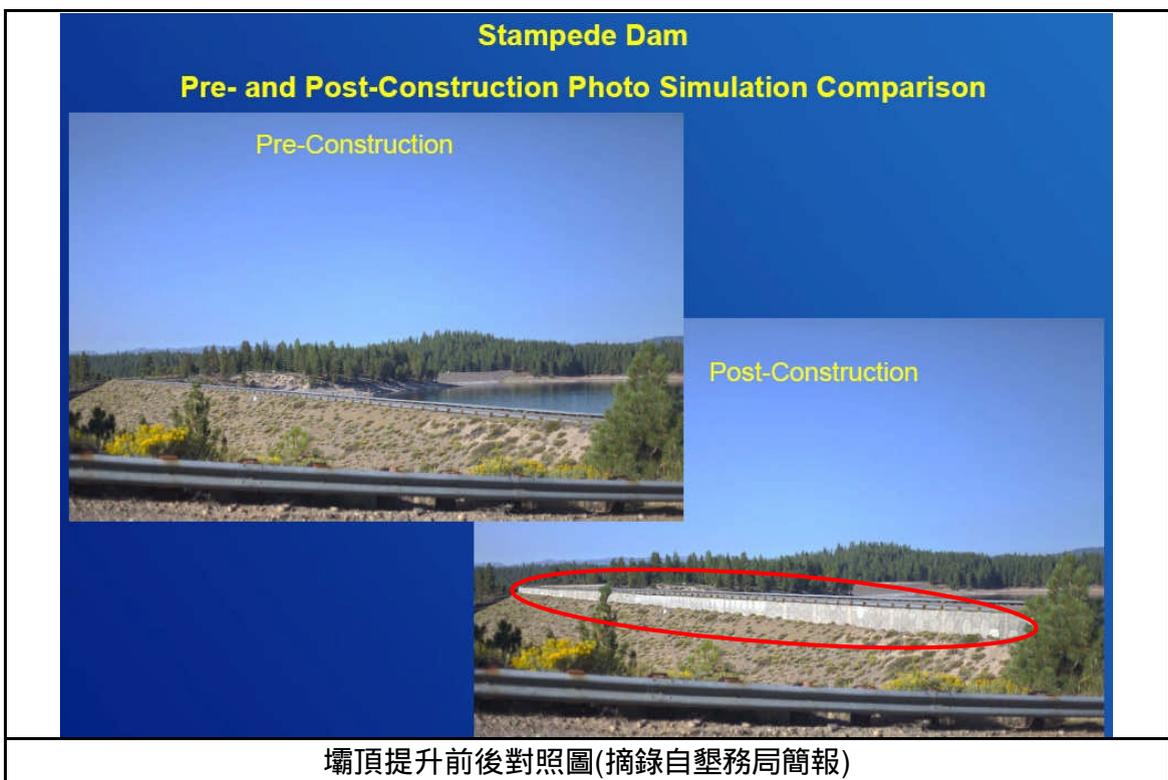
Stampede壩所存在安全風險，主要為極端洪水事件將造成溢頂，除導致 Stampede壩潰壩外，無法控制之流出庫水並將造成下游Boca壩亦隨之面臨潰壩風險，風險已逾越墾務局公共安全保護原則，爰針對大壩結構進行改善。改善工程內容包括壩頂提升、溢洪道堰頂提昇及橋樑改建等。

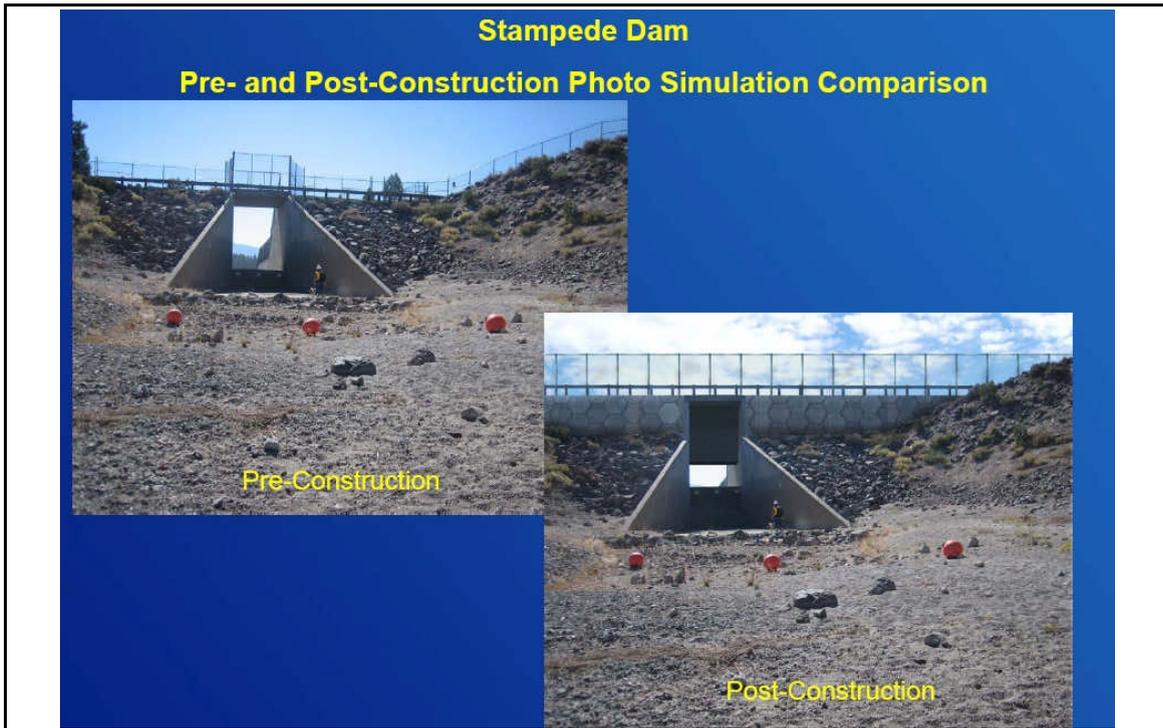


Stampede壩主要設施布置圖(摘錄自墾務局簡報)

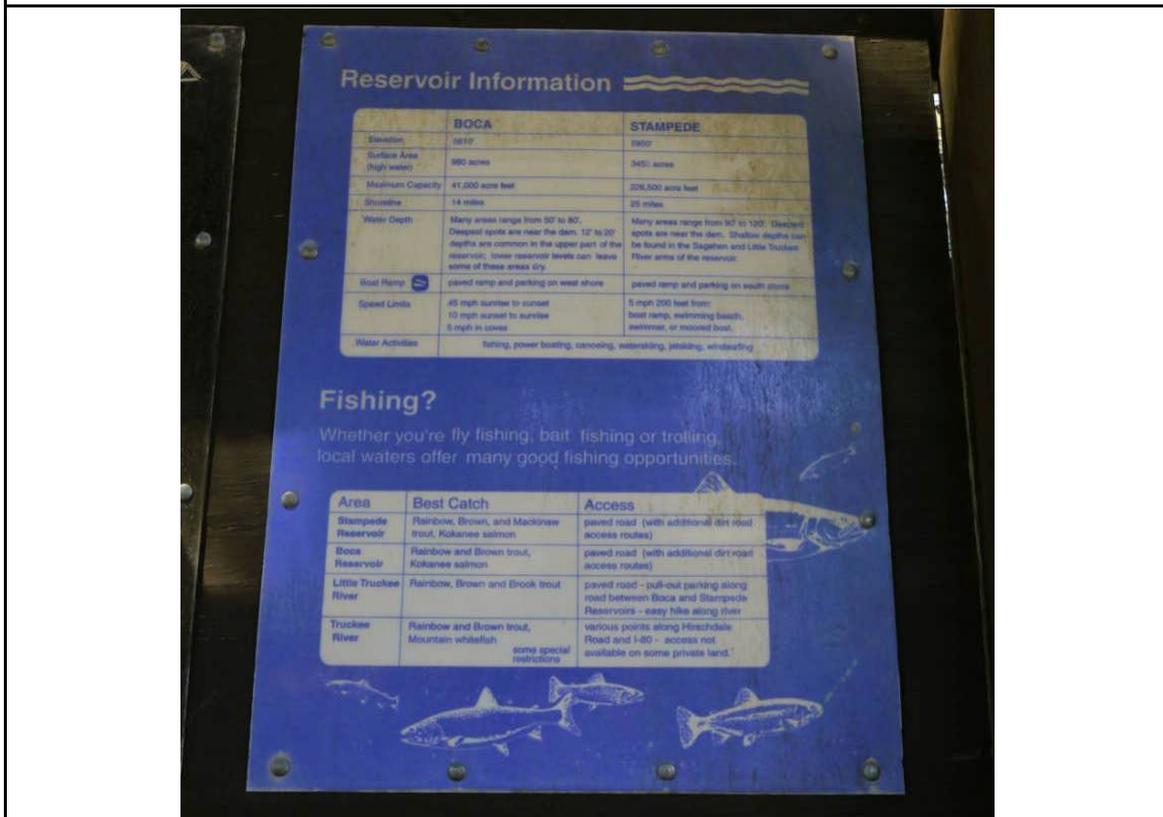
3. 施工過程中的限制條件

- (1) 冬季不進行施工(11月1日至3月31日)。
- (2) 工期兩個季節。
- (3) 開挖後，壩體內部曝露時間不得超過24小時。
- (4) 施工期壩頂道路封閉。
- (5) 壩頂道路封閉前須完成替代道路改道。
- (6) 考量本水庫具休憩功能，週末及假日不進行施工。
- (7) 不影響水庫運轉。
- (8) 避免影響鄰近棲息禿鷹。
- (9) 工地進出採許可證管制。





溢洪道堰頂提昇及橋樑改建前後對照圖(摘錄自墾務局簡報)



立於Stampede壩旁的告示牌，揭示Boca壩、Stampede壩均具有釣魚、滑水等休憩功能(摘錄自墾務局簡報)

(三) Prosser Creek 壩

1. 基本資料

壩高165.6呎

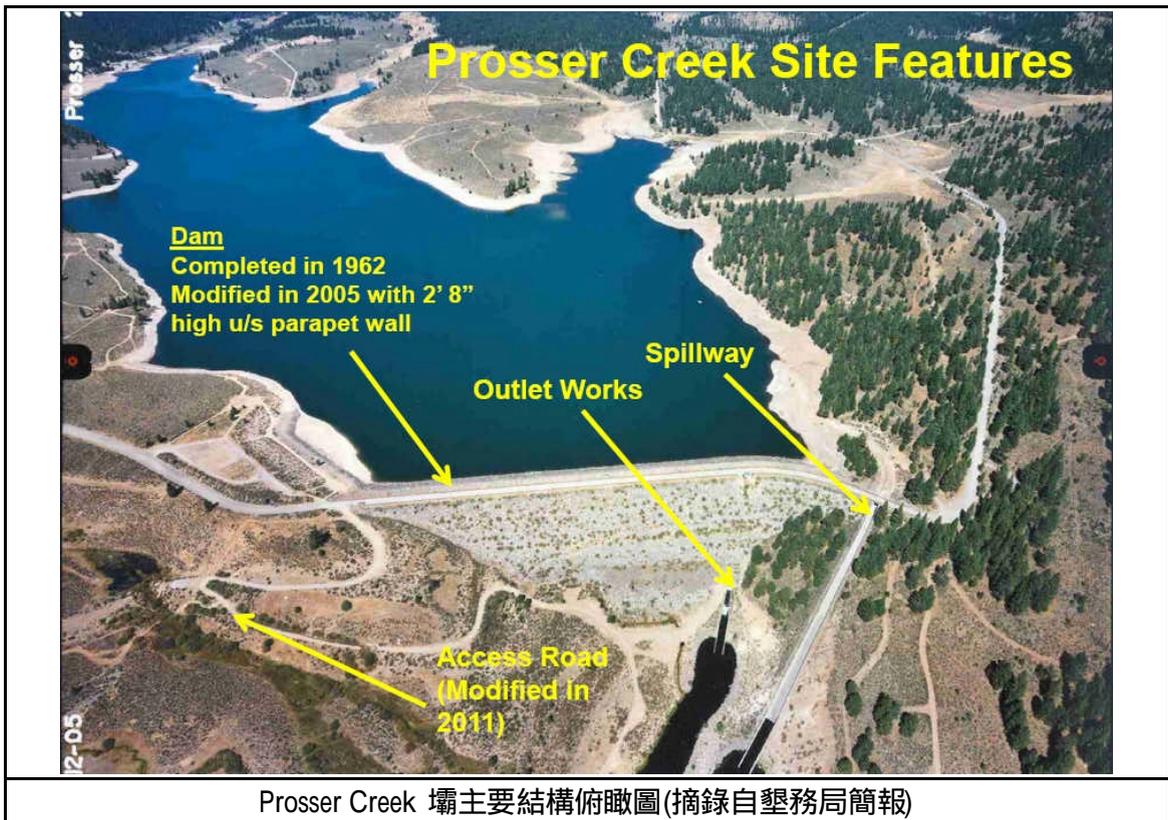
壩長1,830呎

庫容 29,840 英畝-呎

集水面積50 平方英哩

淹沒面積 734 英畝

Prosser Creek 壩為分區堆填壩，1959 年開始興建於1962 年興建完成。



2. 過去大壩安全檢查已發現的問題

- (1) 大壩上游壩體與壩座接觸地方的植被
- (2) 溢洪道洩槽周遭發生落石與土方崩落
- (3) 閘門需要重新塗裝和洩漏問題
- (4) 溢洪道底板發生破損
- (5) 有關維護管理標準作業流程需更新

(6) 滲流的監測

3. 現場模擬檢查

由墾務局引導學員進行大壩目視檢查過程，摘述如下：

- (1) 從壩頂開始目視檢查壩頂道路是否平整，線型是否有異常扭曲。
- (2) 檢視溢洪道洩槽側牆線型，確認是否有相對位移產生。
- (3) 沿壩頂到出水工閘室爬攀爬扶梯，下至約40 公尺深閘門室，介紹閘門作用及日常維護。
- (4) 沿溢洪道洩槽旁徒步至壩體下游側，檢查現場滲流量水堰情形，並說明植被處理原則。



壩下游坡面及壩頂操控室，沿操控室可降至壩體下方閘閥室



大壩下游坡面滲流點



Prosser Creek 壩趾部所設蒐集滲流水之量水堰

(四) Folsom 壩

1. 基本資料

壩高 340 呎(104公尺)
壩長 1,400呎(427公尺)
壩設置8道閘門，其中3座為緊急閘門
庫容 1,120,000英畝-呎
集水面積1,875平方英哩
淹沒面積 1,1930 英畝

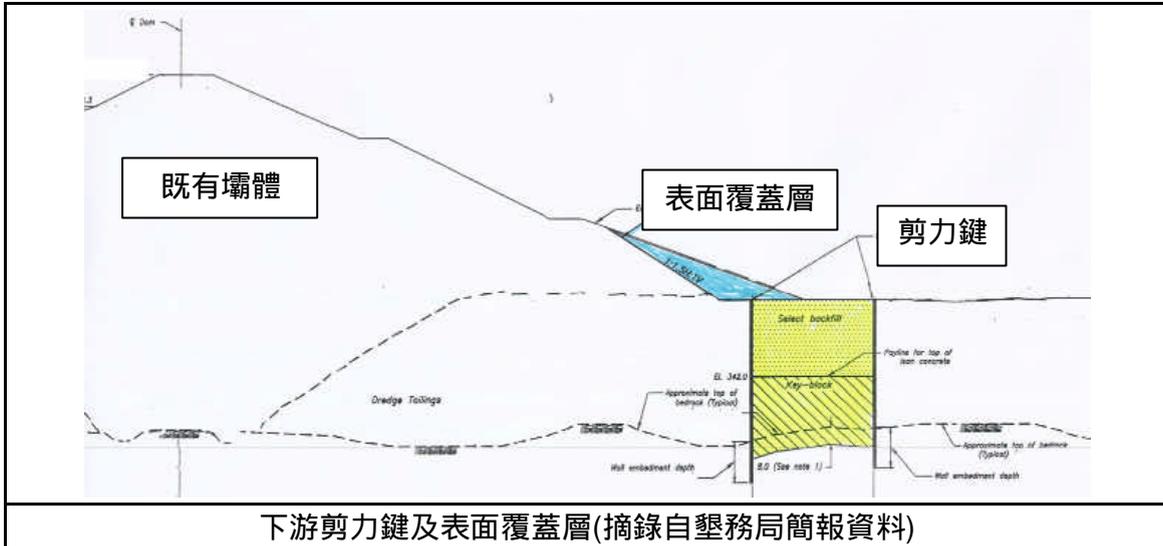
Folsom 壩是混凝土重力壩，約在北加州沙加緬度(Sacramento)東北方25 英里（40 公里），由美國陸軍工兵團(USACE)於1948 年開始興建，1956年興建完成並交由墾務局營運管理。本壩在墾務局營運下兼具農業灌溉、供水、魚類和野生動物生態、水力發電、航運和娛樂用途。



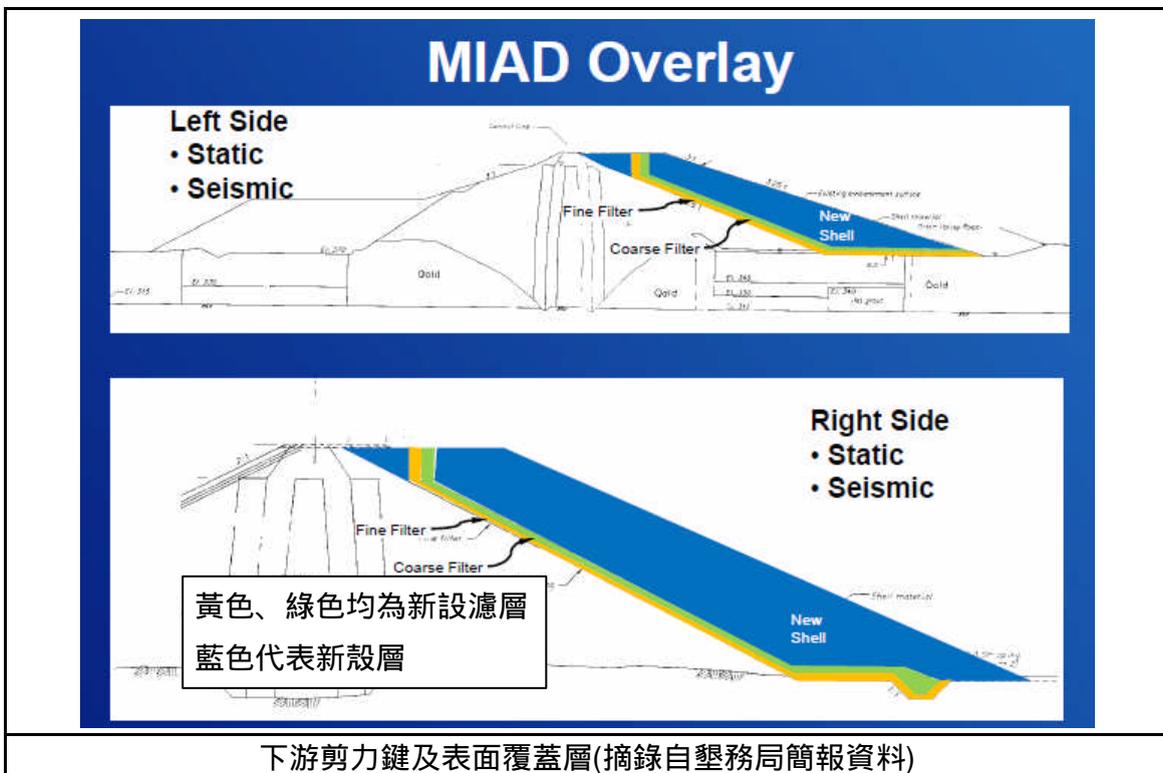
2. 水庫更新改善工程

(1) Mormon Island輔助壩更新改善工程

- I. 施作下游剪力鍵(Key Block)及表面覆蓋層(Overlay)
解決下游基礎在地震時所面臨土壤液化風險。



- II. 下游濾層及排水管路改善施工
以克服管湧及內部侵蝕風險。



(2) 地震造成溢洪道閘門損壞

- I. 溢洪道閘門組成改建。
- II. 因防洪需求，閘門更新改善工作只能在每年之4月1日至10月31日間進行。



閘門損壞照片(摘錄自墾務局簡報資料)

Modified spillway gates



New trunnion hub installed



New self-lubricating bushing installed



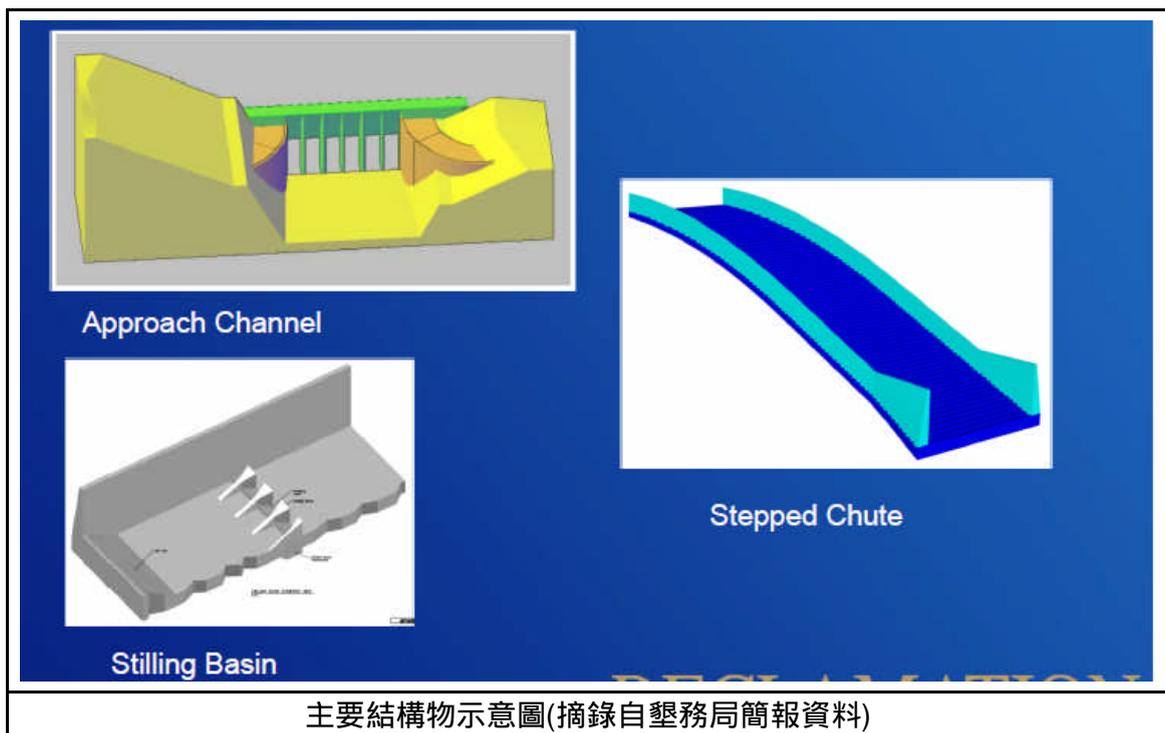
施工照片(摘錄自墾務局簡報資料)

(3) 聯邦合作計畫(JFP) 由墾務局及美國陸軍工兵團合作進行輔助溢洪道興建。

本計畫係由墾務局出資並進行工程設計，後續交由美國陸軍工兵團施工。輔助溢洪道興建目的係為通過重現期距為200年的設計洪水。

新建輔助溢洪道構造包括：

- I. 溢洪道設置6座弧形控制閘門
- II. 混凝土溢洪道採階梯式洩槽設計
- III. 消能池設置緩衝墩型式





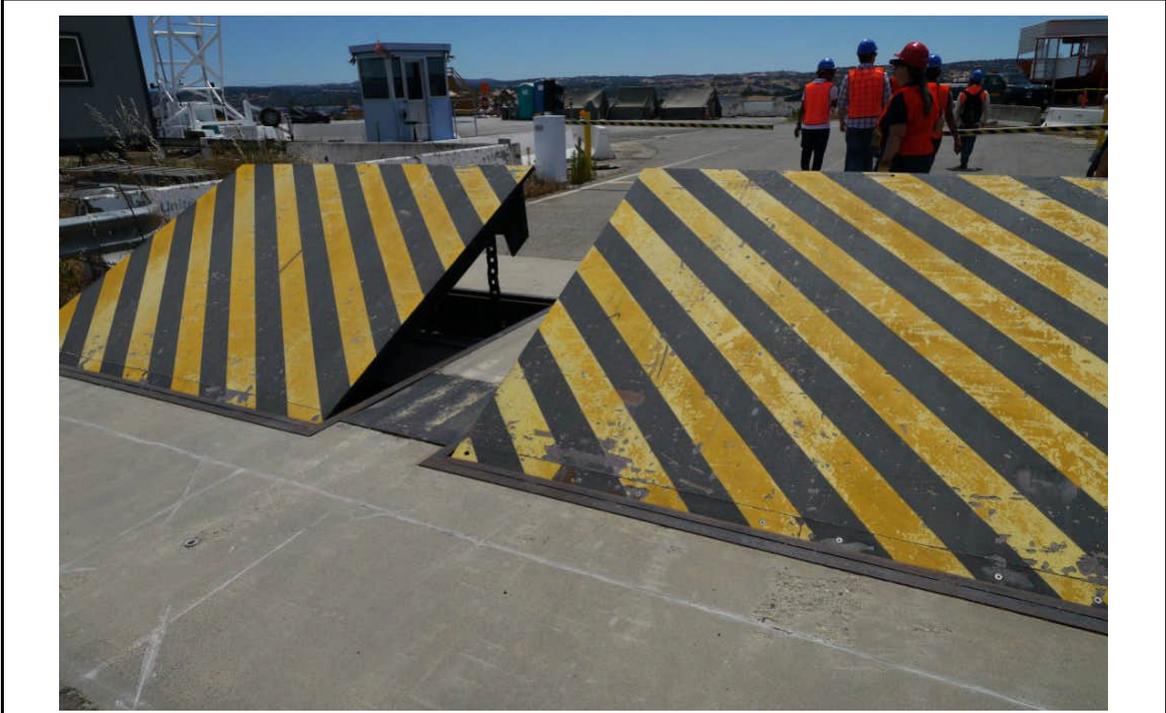
壩頂操控室，結構左上標記陸軍工兵團標誌(興建)，右下為墾務局(營運管理)



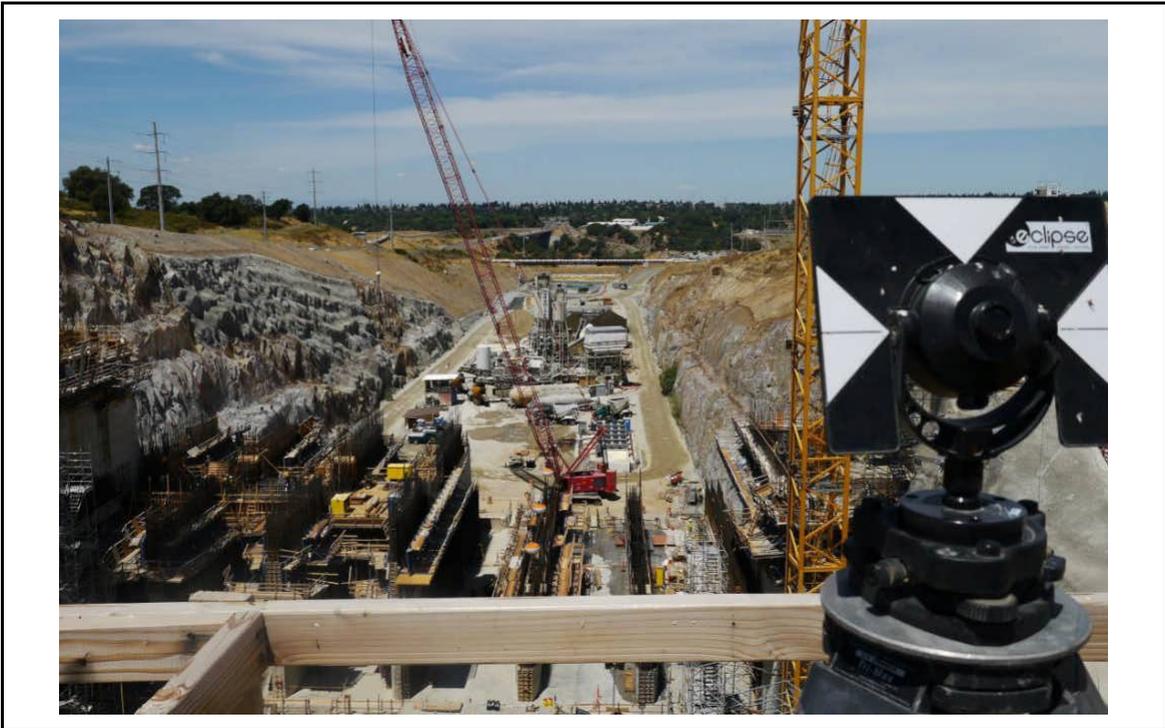
進水口前方水面設置護欄避免浮木或船舶靠近



壩頂道路兩側護欄接縫設置標記，研判是否發生相對位移



壩頂管制設施



輔助溢洪道施工現場



壩下游消能池及右側發電廠

(五) Nimbus 鮭魚孵育中心

Nimbus鮭魚孵育中心位於Nimbus壩下游左岸，約在Folsom 壩下游約7公里。上述兩水庫興建後阻隔鮭魚迴游路線，影響鮭魚生態，鮭魚是棕熊重要食物來源，也是美國魚業、釣魚活動重要漁產，因此興建孵育中心並設置魚道引導進入本孵育場，據估計每年可野放40000尾鮭魚及43000尾鱒魚，本孵育中心並提供做為環境教育及生態參觀場所。

此外因鮭魚喜愛於河床淺灘之礫石間產卵，水庫興建後阻斷上游礫石補充，為了營造鮭魚喜愛的生態環境，並由水庫上游搬運礫石到此河段鋪於河床，經由觀測，棲息環境營造效果良好。



左岸魚道引導鮭魚進入孵育中心



墾務局人員解說本河段以上游礫石補充，營造棲地環境的過程及成果

參、心得與建議

一、 落實大壩安全檢查工作方可確保民眾生命財產無虞

依據美國壑務局相關潰壩及事故統計分析資料，約三分之一事故發生於營運初期五年內，例如 Teton 壩及 Fontenelle 壩均於初次蓄水期間發生潰壩，因此大壩完工後初次蓄水及營運初期尤須謹慎；然而水庫安全工作不可一日鬆懈，台灣多數水庫已營運超過三十年，受限於台灣地小人稠、天災頻仍等基本條件，諸如下游居住人口集中、台灣地處地震帶、面臨颱風暴雨等，再加重維持水庫安全的重要性，因此落實大壩安全檢查工作方可確保民眾生命財產無虞。

二、 美國壑務局透過大壩安全風險分析與風險評估方法，以在有限的預算下確認辦理改善工程之優先順序，亦可提供本國參考

美國壑務局肩負美國西部十七州水資源管理重任，並負責四百座以上水庫營運管理維護，目前估計有 371 座高壩面臨安全威脅，其中超過百分之五十的水庫已營運五十年，最舊的已經營運超過一百年。歷經多次潰壩及災變事件，美國政府在 1972 年責成美國陸軍工兵團負責清查美國境內大壩並建立基本資料，在 1979 年頒布聯邦大壩安全指導方針(Federal Guidelines for Dam Safety)，壑務局並建立大壩安全風險分析方法以(一)評估結構安全，(二)對大壩安全及缺陷有更佳的了解，(三)基於公共安全提供決策依據，(四)在有限資源下評估改善措施的優先順序；本國亦訂有水利建造物檢查及安全評估相關辦法及規範，其目的均在對水庫安全評估提供明確可供依循的準則，以確保水庫營運安全。美國壑務局透過大壩安全風險分析與風險評估方法，以在有限的預算下確認辦理改善工程之優先順序，亦可提供本國參考。

三、 可以預見未來水庫相關更新改善工程亦是營運管理上的重要工作

美國 Folsom 壩自 1956 年完工迄今約 56 年，經重新檢討負荷條件，為確保在該洪水、地震負荷條件下維持大壩安全，爰進行相關更新改善工作，包括新建輔助溢洪道等。本國曾文水庫曾辦理大壩心層加高及附屬設施改善，目前因應台灣地質、氣候條件所造成之水庫淤積問題，曾文、南化水庫亦正辦理相關排淤設施新建及改建。為達水庫永續利用、水庫延壽及維持水庫安全的目標，必須適時檢

討水庫負荷條件並研擬相關必要措施，可以預見未來台灣水庫相關更新改善工程亦是水庫營運管理上的重要工作。

四、 面臨監測儀器年久失效，儀器更新改善工作如涉及壩體開挖應審查評估

大壩安全檢查工作之目的係為早期發現威脅大壩安全因素所呈現之相關跡象，包括現地目視檢查工作及監測判讀相關資料兩項，上述工作之落實除了目視檢查需依靠現場人員的經驗外，尚須建立完善的監測程序、加強儀器的維護及人員的專業訓練等，透過監測資料收集及分析，可協助及時發現壩體及附屬設施異常情形，並採行必要處置。然而大壩監測儀器在歷經長期使用後，多數儀器均可能面臨失效問題，部分儀器因設置於大壩內部難以替換更新，依據墾務局專業人員經驗及意見，因水庫經長期營運已建立大量數據，現場人員亦累積長期經驗，可依場累積的操作經驗及其他仍可運作儀器所得數據，研判大壩行為是否異常，因此並不建議貿然進行儀器替換更新反而影響壩體結構穩定。

五、 新建水庫計畫因公眾或非政府組織意見而停建或擱置，是已開發國家共同的問題。

台灣目前新建水庫計畫均因環境保護、在地居民反對等問題而擱置，據與其他國家人員互動所得，例如南韓新建水庫計畫目前亦因此停擺；但據與會南非人員表示，該國並不存在此問題，即使某新建水庫計畫遭在地居民反對，該國仍可研議於其他合適土地及人口居住較不密集地方興建水庫。顯見新建水庫計畫因公眾或非政府組織意見而停建或擱置，是已開發國家共同的問題。