

# 烏山頭水庫

## 舉辦潛在破壞模式分析專家會議 從被動式防禦轉為風險導向決策

張朱明

### 一、前言

烏山頭水庫自1930年竣工以來，持續為嘉南平原的農業發展提供關鍵支持。這座由八田與一技師領導台日工程團隊所完成的大壩工程，歷經百年後，近年來面對極端氣候變遷的不可預測性以及現代地質科學的新發現，傳統上基於標準的水庫安全評估方法已不足應對不確定性，亟需導入創新管理思維。

2026年3月2日至6日，嘉南管理處於烏山頭水庫舉辦了一場為期五天的「潛在破壞模式分析」(Potential Failure Mode Analysis, PFMA)專家會議。本次會議匯聚了國內水利、土木、地質、地震、水工機械等領域的知名專家，以及黎明工程顧問公司的技術團隊，並由國際知名壩工專家孫一鴻博士<sup>[註]</sup>主持。這不僅是一場技術層面的審查，更顯示水庫管理模式從過去的被動式防禦，轉向風險導向的決策機制，將有限資源精確配置於關鍵弱點，確保這座百年水庫能以更穩健的姿態，邁向其下一個百年。

### 二、關於PFMA技術架構與核心科學

#### 1. PFMA技術架構

PFMA (Potential Failure Mode Analysis) 為美國近年來水庫安全評估所採行之主流方法，其核心理念在於結合機率風險評估與專家專業判斷的系統性方法。非採用傳統之制式規範，轉向以「模擬演練」之思維模式。此方法優點在於預先識別可能導致水庫失效之潛在路徑，進而查找水庫之脆弱環節，並據此規劃應變措施，以預防水庫重大事故發生。

- 從「局部結構」轉向「系統路徑」：傳統安全評估側重於閘門、壩體等單一構件之性能評估；PFMA則將水庫視為一有機系統，不再以是構件是否符合規範為關注點，而是此構件若失效，將如何引發連鎖反應，最終導致潰壩之可能性？據以識別導致水庫失效之管理策略。
- 識別隱藏風險：歷史資料顯示，諸多潰壩災難往往源自於微小缺陷之組合。此次透過跨領域專家之腦力激盪，模擬各種極端情境，以期發掘監測儀器盲點之外的潛在風險。如壩體內部之滲流管湧疑慮，或極端氣候條件下之人為應變誤差等。

[註] 關於孫一鴻博士介紹，詳見文末附錄「人物側寫」

- 賦予數據風險生命力：在PFMA之腦力激盪過程中，監測數據被轉化為具備可預見性之「風險分析圖」，使水庫管理單位能在事故前進行預警，而非僅於事故發生後進行溯源分析。

### 三、跨領域協作的決策機制

PFMA之執行成功須仰賴跨領域專家與水庫管理人員共同參與。本次會議組成蜂巢式結構核心團隊，腦力激盪，共同聚焦於特定失效情境之討論：

- 壩工專家：分析大壩穩定性、沉陷、滲流等穩定性，並引導會議討論。
- 土木/水利專家：負責評估壩體材料強度、結構形式、極端氣候情境及溢洪道洩洪能力。
- 水庫管理者/營運單位：提供長年操作經驗、歷史監測數據及事件，以及事件敏銳觀察。

- 地質/地震專家：評估壩址之地質條件及大壩之耐震能力。

### 四、PFMA 系統化執行流程與識別風險分級

#### 1. 系統化執行流程

PFMA 遵循六項流程：資料蒐集、建立 PFMA 清單、工作坊勘查、專家系統性討論、失效模式排序（Ranking），及針對確認之核心議題，依據發生機率與後果嚴重性，研擬具體處置措施，確保大壩之營運安全。執行過程如下：

- 資料蒐集與分析：蒐集大壩原始設計文件、施工記錄、歷年監測數據及歷史災害紀錄等相關資料。
- 建立潛在破壞模式清單：列舉最有可能導致大壩失效之模式，例如滲流引致之管湧、溢洪道容量不足、大壩坡面失穩等。





## PFMA執行流程

- PFMA 工作坊：成員進行實地勘查與專業討論。
- 專家系統性討論：邀請專家針對各潛在破壞模式之發生機率與潛在後果進行深入探討。
- 失效模式排序：依據風險水平，對各破壞模式進行排序，以識別高風險之「核心議題」。
- 擬定處置措施：針對高風險議題，提出包括監測系統改善、工程維護方案或操作策略調整等風險降低措施。

## 2. PFMA 識別風險分級

PFMA 的成功關鍵在於跨領域知識的深度整合與對話，而非僅限於公式計算。

本次會議不僅匯聚了國內土木、地質、地震及水工機械領域的頂尖專家，更引入了極為寶貴的水庫管理智慧資產，一群長期駐守現場、熟悉水庫運作特性的第一線人員。透過專家們的技術指導與現場管理人員的實務經驗深度對談，這種結合「理論數據」與「長期現場觀察」的對話，能補足監測圖表的盲點，期找出水庫可能潛藏的破壞因子。

### (1) 系統化的破壞模式分類：

於 PFMA 框架下，所有潛在的破壞模式均依據其影響程度與發生機率，劃分為四類危害模式。此分類能有效協助管理單位釐清事件的輕重緩急，確保資源能精準投入識別出的關鍵弱點上。

潛在破壞模式分類表

類別	分類定義	說明與對策
第一類	重點潛在破壞模式	影響程度最大，需嚴密監控發生機率，並優先檢討應變對策。
第二類	列入考慮，但非急迫	急迫性較低，但需觀察客觀條件變化。一旦觸發條件形成，即轉列為重點模式。
第三類	現有資訊不足，尚難分類	目前相關資料不足以研判影響程度，需進一步辦理補充調查（如補充鑽探或儀控監測）。
第四類	已排除的破壞模式	發生機率極低，或已有數據證實不具備破壞可能性，予以排除。

(2)表決機制背後的意涵：

本次會議所採用的表決機制，其核心價值不僅止於「少數服從多數」的程序原則，而是一套結合機率風險觀念與專家專業判斷的方法，採極大化成員專業價值的嚴謹方法。每位參與者在投票後，均須發表闡述選擇該類別的緣由與思維邏輯。

(3)具體量化的風險評估指標：

透過此投票機制，將專家們專業判斷轉化為具體且可量化的風險評估指標。藉由現場管理人員對大壩滲水異常、地震後異狀的敏銳觀察與精準掌握，同時結合專家學者對地震歷時曲線、水文數據、壩體組成材料等方面的專業解讀，兩者相互印證、協同分析，進而討論出僅憑監測圖表難以察覺的細節，確保所有潛在風險均能被全面識別，無一遺漏。

## 五、PFMA會議實作成果

本次會議之核心價值在於針對烏山頭水庫之獨特條件，將過往可能存在之潛在風險，進行深入實證探討。有助於釐清大壩潛在失效模

式，使管理決策回歸科學理性之探討。

### 1. 三大關鍵議題實證分析：

- 自然溢洪道底板錯動上舉之風險：借鑒2013年仁義潭水庫及2017年美國奧羅維爾水庫（Lake Oroville）溢洪道破壞案例，評估烏山頭水庫溢洪道底板在高上揚水壓下對水庫安全及水資源利用之潛在影響。
- 半水力淤填工法（Semi-Hydraulic Fill）土石壩液化之挑戰：考量百年前施工技術，烏山頭水庫採用半水力淤填工法築壩，其特殊壩體構造內部存在細泥層。依據竣工圖說，專家團隊與水庫管理人員深入探究在強震情境下，此特殊構造之液化潛勢及其導致壩坡失效的可能性。
- 六甲斷層可能延伸路徑之威脅：近年地質調查成果，公布鄰近六甲斷層之存在，本次會議中演練模擬斷層活動可能導致壩體受損、送水隧道震毀或舊送水鋼管或放水設施受阻失效的情境，提供管理單位據以優化緊急應變計畫。

## 2. 成果分享：

- 溢洪道底板錯動上舉之風險共識排除：針對歷來各界高度關注之溢洪道底板上舉風險，本次評估經調閱原始設計資料與施工紀錄，並深度分析溢洪道所在位置的地層構造與地質條件；同時針對極端洪水情境下進行模擬底板錯動上揚風險。經跨領域專家與現地管理人員深度研商，共識認為此風險在實際發生之機率極低，且不具破壞性，故將此風險歸類為第四類「已排除模式」。此一科學實證結論，不僅精確回應各界疑慮，更確保資源能精準投入於具威脅性之安全管理項目。
- 協助資源集中於關鍵弱點，精準配置經費與人力：PFMA會議目標不僅產出報告，更在於啟動更精準管理行動，掌握關鍵風險熱點。鑑於水庫管理單位過往已投入相當多資源於溢洪道底板之改善與相關監測，本次會議建議於溢洪道右牆鄰近吊橋旁停車場再增設水位計一處，並整合現有水井資料，做系統化審視。此措施代表管理單位將預算與人力精確配置於安全管理之關鍵點位，未來不再盲目佈點。
- 傳承守護智慧安全基因，保障烏山頭水庫世代安全：水庫管理是一場與時間的競賽。此次會議全程錄音錄影建檔，試著將第一線資深管理人員長期累積之寶貴經驗，及跨領域專家對談智慧，收錄轉化為數位化安全基因檔案。此舉不僅確保管理技術與守護智慧不因人員退休、更迭而流失，得以世代延續智慧傳承。

## 六、結語

水庫導入 PFMA 後續展望：

1. 嘉南管理處依據經濟部規定，烏山頭水庫安全評估首次導入PFMA，並與國際間水庫大壩管理模式接軌。為期一週的會議雖已落幕，但產出的成果將成為烏山頭水庫未來運行的核心指南。
2. PFMA 的精髓在於「共識」，強調每一位成員的觀察都是整體結構的一部分，缺一不可。評估結果是經由跨領域專家共同支撐而成的，而非單一學科的片面結論，大幅提升安全評估報告在專家審查會中的說服力。
3. 面對氣候變遷，災害頻繁年代，透過此技術掌握水庫安全關鍵因素，將有限資源投注於改善關鍵弱點，極大化改善效益，以持續守護嘉南平原下一個百年的長治久安。

## ※附錄：人物側寫

孫一鴻博士 (Dr. Joseph I. Sun) 專業背景橫跨學術研究與大規模工程實務，特別是在高壩的地震危害評估與風險管理領域具有權威地位。

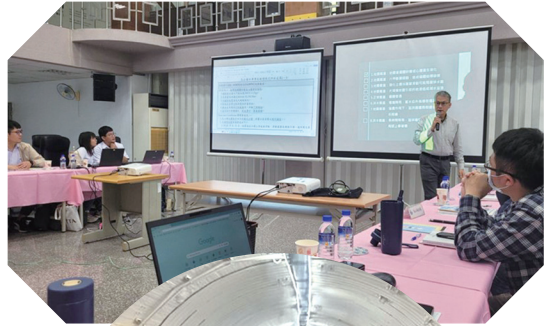
### 學經歷摘要介紹：

1. 教育背景
  - 加州大學柏克萊分校 (University of California, Berkeley)  
大地工程學 博士，1989
2. 重要大壩抗震工程與安全評估
  - PG&E 首席地質工程師：孫博士長期擔任太平洋瓦電公司 (PG&E) 的首席地質工程師，負責管理大壩的靜態與

動態分析、設計、地震工程加固及地面運動評估。

- Crane Valley Dam 抗震加固計畫：擔任計畫的首席工程師，負責這項總造價達 1.3 億美元的重大加固工程。其工作涵蓋地質調查、地面運動與風險評估、抗震設計、施工監督，以及執行聯邦能源監管委員會（FERC）要求的 Part 12 潛在失效模式分析（PFMA）。
- 3. 參與制定美國聯邦監管指南（FERC）
  - 編寫技術指南：作為地震工程與機率地震危害分析（PSHA）專家，孫博士受邀編寫《FERC 風險告知決策指南》（Risk Informed Decision Making Guidelines）
- 4. 對台灣水利與交通建設的貢獻
  - 為經濟部水利署撰寫多項技術指南，包括：《新設與既有水庫大壩安全評估程序》、《水庫大壩緊急應變計畫發展指南》《大壩操作標準發展指南》。
  - 擔任曾文水庫技術顧問，指導地震安全性評估，並應用先進的非破壞性檢測方法（SASW）測量剪力波速度。
  - 主持南化水庫加高工程的地震分析及美濃水庫的可行性研究。
  - 參與台灣高鐵高架工程的基礎設計與地震評估。

（作者現任職於嘉南管理處）



左下 PFMA工作坊全體參與人員  
 右1 孫博士主持PFMA會議  
 右2 PFMA現勘舊送水鋼管  
 右3 PFMA現勘大壩培厚工程滲漏水觀測點  
 右4 PFMA現勘大壩培厚工程施工  
 右5 PFMA現勘溢洪道底板現況

