



水庫安全管理 數位化整合之 應用與展望

楊慶宗* / 中興工程顧問股份有限公司水利工程部 技術經理

楊朝敏 / 中興工程顧問股份有限公司水利工程部 工程師

金士凱 / 中興工程顧問股份有限公司水利工程部 工程師

施祖涵 / 中興工程顧問股份有限公司結構工程部 工程師

隨著數位轉型及智慧化技術的快速發展，水庫安全管理模式正由傳統的人工監測逐步轉向整合式數位化管理。水庫為國家關鍵基礎設施，其安全穩定運作關係民眾生命財產及社會永續發展。然而現行水庫監測系統多為分散架構，資料整合度不足，不易即時掌握壩體安全風險。為因應極端氣候與地震頻仍之挑戰，推動管理數位化與智慧化為水庫管理重要發展方向。

本文以翡翠水庫為例，探討水庫安全管理數位化整合之架構與應用成果。包含導入失效模式之水庫安全風險管理、應用人工智慧演算法（如類神經網路）進行異常偵測與管理值訂定，並結合三維地形模型，建置水庫數位孿生系統，達成即時監控、視覺化呈現及自動通報之功能，可有效提升資料處理效率與決策精準度。人工智慧亦可應用於水庫入流量預報，支援颱風期間的防洪運轉決策。資訊整合平台亦支援報表自動產製，減輕行政負擔，促進管理自動化。

展望未來，水庫數位孿生系統可持續擴充至附屬構造物、排洪設施、發電與人員安全管理，並結合無人機與 AI 影像分析技術，以建立更全面的監控機制。同時，若能整合淤積測量、集水區環境監測，將可形成更完整的智慧水庫管理體系。

關鍵詞：安全風險管理、數位孿生、人工智慧、風險分析

前言

水庫可提供穩定供水的水源，乃水資源領域之國家關鍵基礎設施之一，其安全與穩定運作對民眾生命財產、國家安全和社會穩定至關重要。水庫興建之初即依各水庫特性設置客製化安全監測系統，並依水利建造物檢查及安全評估辦法，辦理定期、不定期之檢查及安全評估工作。

檢查工作於每年 1 月底前完成前 1 年之定期檢查結果彙整，安全評估則視災害潛勢及水庫規模區分為

一級水庫 5 年（如翡翠水庫、石門水庫），二、三級水庫 8 年辦理一次安全評估。安全監測系統之觀測紀錄則於評估水庫安全與否中扮演著重要的角色，惟現行作業多無法即時追蹤水庫安全狀態。

水庫營運管理除安全外，尚有供水、防洪、水質、淤積 … 等等課題，近年來水庫管理單位鑑於過往部分管理作業尚未數位化、監測系統零散，為提升管理效能，遂有建立能自動彙整各項監測數據進行即時分析及滿足管理業務需求之數位化整合資訊系統之需求。

茲以已完成監測系統自動化整合，並導入人工智

* 通訊作者，chris@mail.sinotech.com.tw

慧技術，應用於水庫安全管理之翡翠水庫智慧管理平台為案例，探討水庫安全管理數位化整合之之技術架構與實務應用。

安全風險管理

近年來鑒於極端氣候及地震事件仍頻，國際壩工界於蓄水建造物之安全管理實務上，已逐漸從風險之角度來管理蓄水建造物之安全，其主要作法為透過詳盡之失效模式分析得到建造物之失效模式及其發展過程，辨識出「可能」導致大壩失效之態樣。即關鍵失效模式，進而就失效模式發展過程之各階段，逐一探討其可能出現異常之物理量及徵兆。進而應用大數據、人工智慧演算法（如類神經技術等）及統計方法，針對監測儀器之測讀數據，研擬最適分析方法、訂定管理值、建立趨勢研判法則、異常行為成因研判。

以翡翠水庫為例，結合了加拿大 FMECA 及美國 PFMA 法，辨識出可能破壞 / 失效模式，再依據其發展過程之起始條件及發展過程中各環節事件之肇因或表現行為，根據這些肇因或表現行為擬定出各潛在破壞模式，於各發展階段之關鍵重點監測儀器，同時研訂各監測儀器之預警值、警戒值等不同級別的監測管理

值。藉由這些監測儀器測讀數據之異常偵測，發掘潛在失效模式之肇生及發展，再據以建立自動分析、視覺化呈現及主動通報服務。

圖 1 為翡翠水庫潛在破壞模式發生風險自動化分析成果，可展示關鍵儀器監測值變化情形，當監測值超過預警值或警戒值的儀器數量，大於 1 顯示黃色燈號，大於 2 顯示橙色燈號，供管理單位參考。

管理值訂定

異常偵測可運用安全監測數據，透過分析及判釋從中擷取出所隱含之訊息，藉以偵測出異常發生之徵兆進行預警及處置。分析與判釋之過程中，可借助各種之繪圖類型協助展示數據變化特性，再借助監測管理值及變化趨勢研判準則等辨識是否出現異常徵兆。

監測管理值可作為監測數據比較及研判建造物安全狀態之基準，實務上包含預警值及警戒值二級，可協助現場人員及預警系統立即辨識建造物之安全狀態，並瞭解是否已發生異常狀況。一般而言，各監測項目監測管理值之訂定或檢討可利用歷年數據迴歸統計分析、歷時變化趨勢、理論界限、設計條件、數值分析、物理量內涵及邊界條件等方式加以訂定。

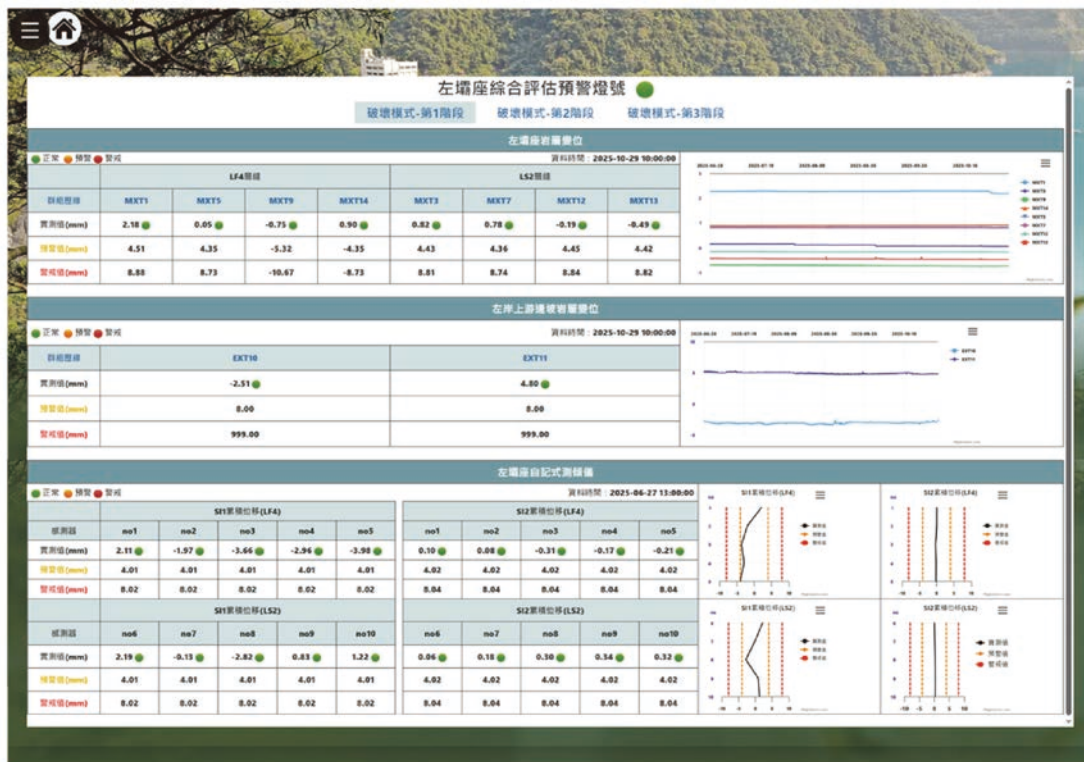


圖 1 翡翠水庫潛在破壞模式發生風險分析成果

其中，主要量測拱壩壩頂水平變位的擺線儀，由於擺線儀與環境因素（水位、氣溫）具有明顯之連動關係，翡翠水庫導入人工智慧技術，透過類神經網路模型建立大壩變位預測模型，再依預測成果來做為擺線儀之管理值。除可作為潛在失效模式之關聯儀器異常偵測外，亦可搭配相關資訊予以視覺化呈現（圖 2）。

水庫數位孿生

水庫安全監測設備主要包括應變計、無應力應變計、應力計、溫度計、測縫計、裂縫計、擺線儀、傾斜儀、照準系統、地震儀、岩盤伸縮儀、地下水水位

計、排水孔、滲水量測定堰、測傾孔、水位觀測井、地表沉陷觀測點、排水廊道量水堰等等，主要分布於大壩、壩座及其周圍邊坡，儀器數量則高達數百個。過去多依儀器類別分別標示於平面圖上，管理上並不掌握異常發生位置。

近年水庫管理單位已逐步建立大壩 3D 模型，並將監測儀器嵌入模型中，結合周邊實測地形、即時監測資料形成虛實融合之水庫數位分身，當數值達到警戒值時，資訊視窗及場景中儀器物件將標誌警告訊息，讓管理者可於平台上掌握最新之水庫安全狀態，並可進一步查詢監測數值變化歷程，圖 3 為翡翠水庫數位孿生建置成果。

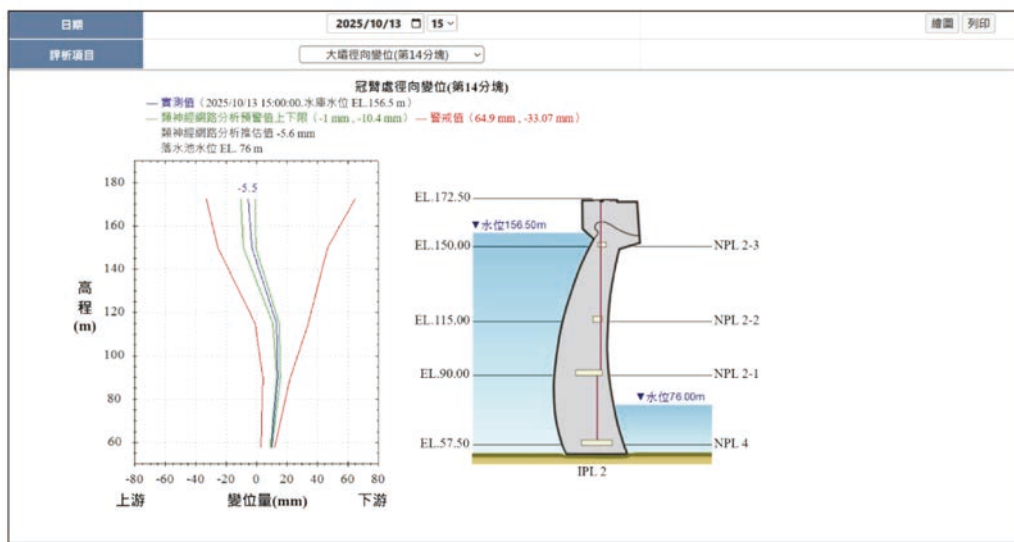


圖 2 翡翠水庫大壩徑向變位分析成果展示畫面

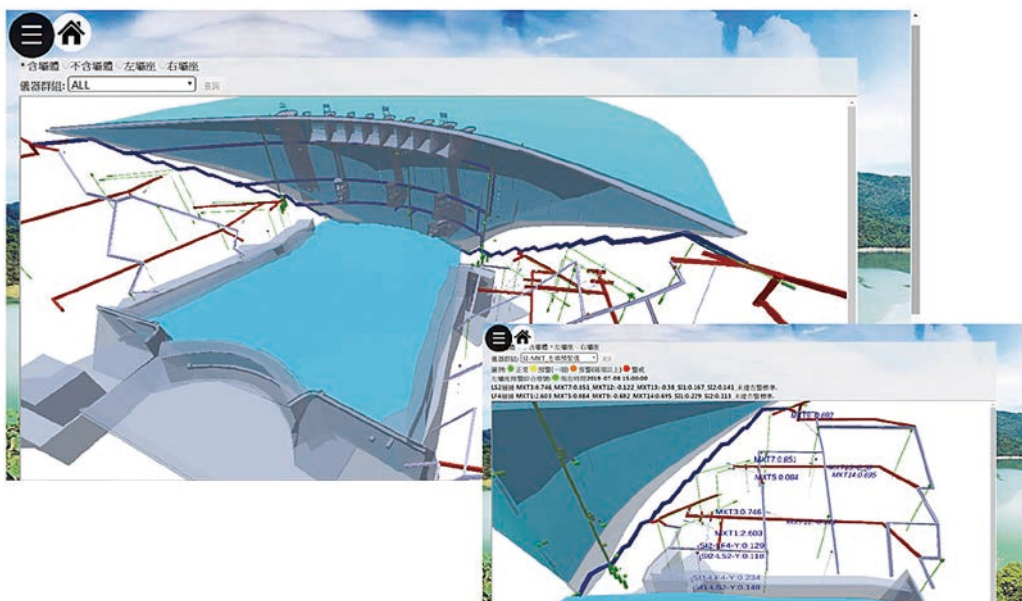


圖 3 翡翠水庫數位孿生建置成果

洪水預報

水庫安全風險除構造物之安全外，颱風期間的洪水操作亦為重要課題，水庫管理單位多會參考中央氣象署之降雨預報來預估颱風侵襲期間未來 72 小時之入流量，作為排洪操作之參考。近年隨著氣候變遷影響日趨明顯，為考量集水區降雨分布不均、不同降雨型態（梅雨、東北季風）及小規模颱風等情境，而有延長降雨預報之需求，期能爭取更多應變時間與提高水庫運用效益。

翡翠水庫管理局為精進水庫入流量預報，結合不同的降雨預報產品應用人工智慧技術將入流量預報延長至未來 10 天（圖 4）。前 5 天（1 ~ 120 小時）之逐時入流量，作為智慧決策系統颱風操作模擬之情境之一，經水庫洪水演算後提供防洪運轉之決策參考資訊（圖 5），以利增加防洪、發電效益，10 天期之流量預報則可作為供水操作之參考 [1-4]。

資訊整合與視覺化

水庫的管理除設施安全（含防洪操作）外，尚有供水、發電、水質、集水區保育、水文觀測等諸多面向，

各項管理資訊早期多依其辦理方式分散建立及保存。隨著資訊技術發展將水庫管理上之各項資訊進行數位化整合，除可便於資料查詢及協助例行管理業務（如各式報表產製）提高管理效率外，亦可藉由資料視覺化呈現，讓管理者更便利、更直觀的監控、掌握水庫最新狀況。

圖 6 為水庫管理資訊視覺化應用案例，(a) 整合管理單位自建、中央氣象署雨量站，搭配空間資訊顯示即時降雨資訊；(b) 綜整水庫上下游河川水位，搭配空間資訊顯示流域水情；(c) 介接即時水門啟閉資訊，據以計算放水量並搭配圖形展示；(d) 整合不同位置、深度水質自動監測資料，動態產製濁度變化歷程。

行政作業支援

水庫營運管理之各項資料數位化整合後，除提供安全風險辨識、通報、展示外，於行政作業上可自動產製各式報表，成為多功能管理平台。舉凡安全監測各儀器之月報、年報，營運管理之日、旬、月、年報，颱風操作紀錄，氣象水文、水質及淤積等相關報表，均可由管理系統自動化產出，減輕管理工作負擔。

此外，目視檢查工作亦為水庫安全管理之一環，透過電子表單協助現場巡檢作業之紀錄，將人工填表作業數位化並進一步建立歷次成果查詢、統計（圖 7）。

結語與展望

本文以翡翠水庫為例，探討水庫安全管理於數位轉型下之整合架構與實務應用，透過系統化資料整合、人工智慧演算法、風險分析方法及 3D 數位孿生技術之導入，所建立之具即時監控、視覺化展示與自動預警功能之智慧管理平台，可有效提升管理工作效率與準確性，可供後續其他水庫參考。

水庫營運管理之各項資料數位化整合後，經資料分析結合 3D 模型建立數

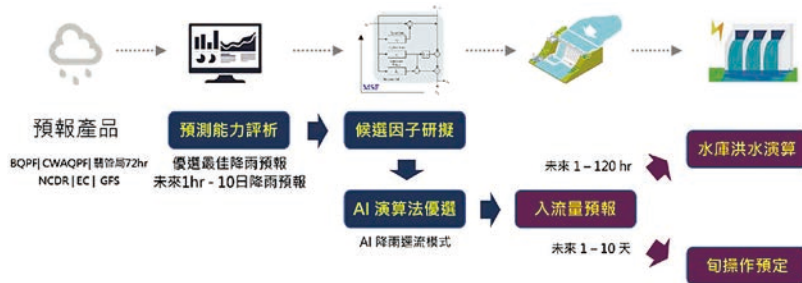


圖 4 翡翠水庫入流量預報架構



圖 5 翡翠水庫智慧管理系統颱風操作介面



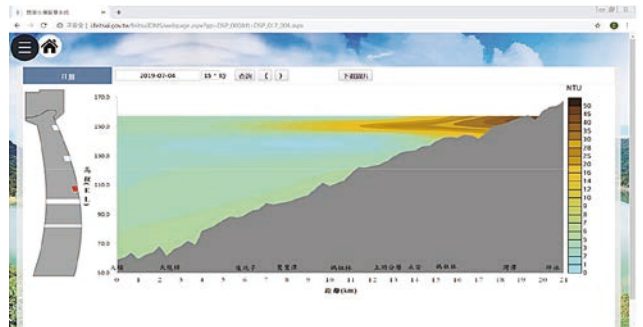
(a) 水庫集水區降雨分布



(b) 水庫上下游河川水位

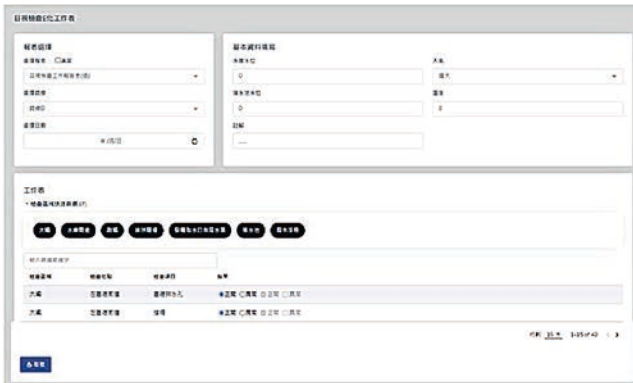


(c) 水門啟閉即時資訊

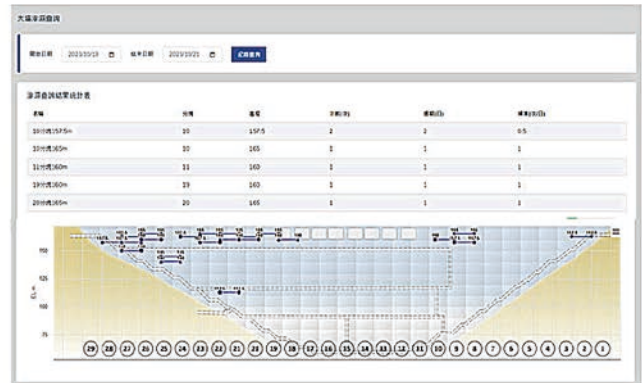


(d) 庫區水質濁度剖面

圖 6 水庫管理資訊視覺化應用案例



(a) 目視檢查電子表單



(b) 目視檢查成果統計展示

圖 7 翡翠水庫目視檢查數位化成果

位孿生系統視覺化安全管理資訊，現階段因模型係基於安全管理資訊可視化之需求所建置，模型範圍可予以擴大及細緻化，如取出水工、排洪設施、電廠、廊道、閘閘等附屬構造物建立，並可進一步建立完整通訊網絡，形成涵蓋安全、運轉與維護之全域模型。結合行動通訊與感測技術，建立現地檢查人員位置與生理狀況監控機制，同時顯示於數位孿生系統上，提升現場作業安全管理層級。

構造物模型結合地理資訊時，如壩址地形、蓄水範圍之水下地形解析度不足，會有無法緊密結合的狀況，若能將歷次淤積測資料予以整合，除能使數位孿生系統更貼近於實際外，蓄水範圍淤積、清淤成果之

空間及量體變化，亦可於系統上展現與進一步分析。

此外，無人機應用日漸普遍，可應用於水庫壩面裂縫監測、排洪設施巡檢及蓄水範圍高崩塌潛勢區之追蹤，拍攝結果再透過 AI 進行異常分析，減輕現地檢查之工作負擔及降低公安風險。

參考文獻

1. 台北翡翠水庫管理局 (2016)「105 年度翡翠大壩安全風險鑑別與控管之研究總結報告」。
2. 台北翡翠水庫管理局 (2017)「106 年翡翠水庫智慧決策系統建置」。
3. 台北翡翠水庫管理局 (2023)「翡翠水庫第六次整體安全檢查與評估－智慧決策系統功能擴充－新增竣工及邊坡檢查資料查詢功能專題研析報告」。
4. 台北翡翠水庫管理局 (2025)「翡翠水庫 AI 降雨逕流模式 2.0」。