

水庫防淤隧道之操作策略與效益評估

OPERATION STRATEGIES AND BENEFIT EVALUATION OF THE RESERVOIR DESILTING TUNNEL

逢甲大學
水利工程與資源保育學系
碩士

王政為
Zhang-Wei Wang

逢甲大學
水利工程與資源保育學系
大學生

張恩齊
En-Chi Chang

逢甲大學
水利工程與資源保育學系
副教授

黃振家*
Cheng-Chia Huang

摘要

本研究旨在探討石門水庫阿姆坪防淤隧道啟用後，對於庫區泥砂運移與整體排砂效率之影響。研究利用二維數值模式 (SRH-2D) 建立模型，並以杜鵑與梅姬颱風事件進行參數檢定與驗證，結果顯示模式能合理重現庫區泥砂運移行為。為評估最佳操作策略，本研究依據流量控制與排砂優先順序，規劃入出平衡、總量替代、節水優化與極限排砂等四類操作策略。模擬結果顯示，優先開啟阿姆坪隧道能有效延緩高濃度泥砂傳輸至壩前之時間，並降低下游尖峰濃度。在效益評估方面，極限排砂方案雖具備最高總排砂量，卻伴隨大量水資源消耗；反之，節水優化方案在顯著降低總出流量條件下，其水砂比仍可達 1.27，顯示在維持高排砂效率同時兼具水資源蓄存效益。研究成果證實採取節水優化策略，可優化水庫防淤與水資源永續利用。

關鍵詞：石門水庫、阿姆坪防淤隧道、二維數值模式、水力排砂、水砂比。

* 通訊作者，逢甲大學水利工程與資源保育學系副教授
407102 台中市西屯區文華路 100 號，cchiahuang@fcu.edu.tw

OPERATION STRATEGIES AND BENEFIT EVALUATION OF THE RESERVOIR DESILTING TUNNEL

Zhang-Wei Wang
Feng Chia University
Department of Water
Resources Engineering and
Conservation

En-Chi Chang
Feng Chia University
Department of Water
Resources Engineering and
Conservation

Cheng-Chia Huang*
Feng Chia University
Department of Water
Resources Engineering and
Conservation

ABSTRACT

This study examines the effect of the newly operational Amuping Desilting Tunnel at Shimen Reservoir on overall desilting efficiency. A two-dimensional numerical model, SRH-2D, is established and calibrated using data from Typhoons Dujuan and Megi. The results confirm that the model reasonably reproduces sediment transport behaviors in the reservoir. To evaluate optimal operation strategies, four strategies were designed based on flow control and venting priority: Inflow-Outflow Balance, Volume Substitution, Water Saving, and Max Desilting. Simulation results indicate that prioritizing the Amuping Tunnel delays the arrival of high-concentration sediment at the dam front and reduces downstream peak concentration. Regarding efficiency, the Max-Desilting strategy achieved the highest sediment discharge but consumed excessive water. Conversely, the Water-Saving strategy significantly reduced total outflow, achieving a Water-Sediment Ratio of 1.27, which demonstrates high desilting efficiency with water conservation benefits. The findings confirm that the Water-Saving strategy optimizes both reservoir desilting and sustainable water resource utilization.

Keywords: Shimen reservoir, Amuping desilting tunnel, SRH-2D, Hydraulic desilting, Water-sediment ratio.

Wang, Z.W., Chang, E.C., & Huang, C.C.* (2026). "Operation Strategies and Benefit Evaluation of the Reservoir Desilting Tunnel." *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 72(2), 46-61.

[https://doi.org/10.29974/JTAE.202606_72\(2\).0004](https://doi.org/10.29974/JTAE.202606_72(2).0004)

一、前言

水庫容量已從工程維護議題演變為對全球水資源永續發展構成顯著威脅的關鍵挑戰，隨著氣候變遷造成超量降雨事件頻傳，集水區大量土砂流入水庫造成水庫壽命縮短之趨勢更趨明顯 (Chen *et al.*, 2019; Minocha & Hossain, 2024; Wisser *et al.*, 2013)。近期的全球性研究顯示，水庫淤積為造成全球水資源儲存能力下降的主因。Li *et al.* (2023) 研究顯示全球水庫仍在繼續新建，但實際庫容仍在持續下降，隨著預測徑流減少和用水需求增加，水庫建設效益遞減現象將持續到未來。Dethier *et al.* (2022) 研究顯示在北半球因大規模的水壩建設攔截自集水區向下運移的泥砂，導致全球輸往海洋的泥砂通量相較於水壩建設前下降了 49%。Perera *et al.* (2023) 估算 150 個國家的 47,403 座大型水壩到目前為止已損失其設計庫容的 13% 至 19%，到 2050 年之損失庫容可能達 26%。Liu *et al.* (2025) 認為雖然水壩是造成下游泥砂通量顯著下降的主要原因，水庫淤積不僅嚴重縮短使用壽命，也增加潰壩和泥砂相關災害的風險，故應對水庫進行清淤，並探討將淤積物作為砂石資源利用的可行性。

已有許多研究者針對台灣集水區產砂及泥砂運動機制進行研究，研究內容顯示集水區產砂量體及熱點可被合理推估，並作為後續減砂入庫工程佈置之參考依據 (Chen *et al.*, 2018; Chiu *et al.*, 2019; Liou *et al.*, 2022)，然而，若要確保水資源永續發展，管理策略仍需從集水區管理，轉變為更具整合性的複合式防淤框架。Chamoun *et al.* (2016) 指出水庫泥砂淤積不僅會降低庫容，亦會影響底孔與發電進口水口運作。未來應以減少水庫淤積及維持庫容為主要目標。持續發展多樣化的防淤策略。Lee *et al.* (2022) 認為泥砂管理是水庫永續發展的關鍵因素，研究中針對庫容流入比和庫容泥沙比兩個指標來評估各時期應用不同清淤技術的可行性。Huang (2024) 提出的「四階段生命週期評估法」旨在根據水庫在其生命週期的不同階段，系統性地選擇最佳的管理策略組合。在具體技術層面，研究重點已從高成本的機械清淤，轉向更具永續性的水力排砂技術。Sun *et al.* (2024) 運用先進的三維計算流體動力學模型，精細模擬了當排砂口已被泥沙覆蓋時的水力沖刷啟動機制，為實際工程操作提供了重要的參考依據。為進一步提升排砂效率，Lee & Huynh Nguyen (2024) 提出一種創新的工程設計，即在庫底開挖「人工導流槽」，將水庫異重流藉由導流槽快速引導至出口，進一步提升排砂效率。Anari *et al.* (2023) 認為

採取永續性的水庫防淤策略會比零方案更具經濟效益，若能在水庫建成後的十年內即進行防淤操作，會是最具經濟效益的時間點。

承上，利用水力排砂進行水庫防淤為可行策略，因此了解水庫內泥沙運移機制為極其重要的關鍵。Cesare *et al.* (2001) 探討高含砂水流進入水庫中所形成的特殊異重流流況，透過現地量測、模型試驗與數值模擬進行研究，證實異重流在水庫淤積中扮演關鍵角色，對理解與管理水庫泥砂問題具有重要價值。Hsu *et al.* (2017) 針對颱風事件下水庫生異重流的影響因子進行分析，透過水槽試驗建立經驗公式並驗證濃度變化之影響，最終解釋相似規模降雨事件下形成不同異重流濃度之差異關係，可用於水庫防淤操作參考之依據。Lee *et al.* (2017) 探討異重流對庫容減少與排砂操作的影響，透過經驗公式與現地資料推估異重流潛入點位置。研究成果顯示，若利用降雨徑流預測搭配異重流動態變化推估可藉由防淤操作提升排砂效率，對水資源永續利用具有實際應用價值。本研究提出以 DIKW 層級為核心概念的評估架構，Jhong *et al.* (2021) 利用數值模式模擬水庫泥砂濃度，並結合 SVM 與 MOGA 建立輸砂預測模型。成果顯示，靠近入口及壩前低層監測點的資料最具代表性，此研究不僅提升泥砂濃度預測準確性，也可作為颱風時期水庫閘門操作之參考依據。

綜合上述內容，利用數值模式探討泥砂濃度動態變化並做為水力排砂操作之參考依據為可行方向，Lai *et al.* (2015) 採用層平均二維模式，並以石門水庫水工模型為比較依據檢驗模式，模擬成果顯示 SRH-2D 可合理模擬水庫中異重流運移情形。Huang *et al.* (2019) 將 SRH-2D 應用於現地案例，利用實際颱風檢驗異重流運移速度、到達時間及濃度變化並取得合理成果，證明所建立模型能夠合理推估水庫異重流之動態變化。因此，本研究希望可以建立數值模式，並利用石門水庫既有 6 個出水工，搭配甫於 2022 軒嵐諾颱風進行首次操作之阿姆坪防淤隧道 (Wang *et al.*, 2018; 謝東洲等, 2019; 陳佾鳴與鄭瑞府, 2022) 進行水力排砂操作之研究。因此，本研究選取曾進行防淤操作的真實颱風案例檢驗模式功能，並加入阿姆坪防淤隧道作為虛擬操作案例，了解阿姆坪防淤隧道加入歷史颱風操作是否具備效益。可作為未來防淤操作之參考。

二、研究區域

石門水庫是北台灣主要水庫之一，為同時肩負防

洪、灌溉、給水、發電的多功能水庫。石門水庫位於大漢溪上，橫跨大溪區、龍潭區、復興區三行政區，石集水區及石門水庫相對位置如圖 1 所示。自民國 53 年運轉至今已達 60 年。水庫壩頂標高為 252.2 m，滿水位標高為 245.0 m，集水區面積為 763.4 km²，設計總庫容及設計有效庫容分別為 3.09 億與 2.51 億 m³ (<https://web.wra.gov.tw/shihmen/>)。

石門水庫由壩高 133.1 公尺之石門大壩攔阻大漢溪水而成，主要放水設施包含溢洪道、排洪隧道、石門大圳、發電進水口、排砂隧道、永久河道放水口以及 2022 年首次啟用的阿姆坪防淤隧道。水庫相關出水工資訊如圖 2 所示。

- (1) 溢洪道：設置於右側山脊的鞍部，主要功能是排放大壩上游的洪水，確保水庫安全運作。此設施為水庫中最大的排洪系統，採用閘門控制溢流堰加陡槽的型式設計。
- (2) 石門大圳：位於左壩座，屬於直立塔形的結構物，取水口高程 193.55 m，設計取水量 18.4 m³/s。主要負責為南桃園地勢較高地區的石門水利會灌溉區提供灌溉及公共用水，並與桃園大圳協力分擔整個桃園地區的供水工作。
- (3) 排洪隧道：位於溢洪道上游約 600 m 處，設有兩

條平行隧道，中心線間距為 30 公尺。此設施是水庫第二大排洪系統，每條隧道的設計排洪量為 1,200 m³/s，最大排洪量達 2,400 m³/s。

- (4) 發電進水口：設計有效水頭為 84 m，雙機組同時運轉時最大發電流量可達 68.8 m³/s，發電用水取自斜依式取水塔左側的進水口，透過壓力鋼管引水，經不對稱型分歧管分流後導入兩條管線，分別供應至兩部發電機組進行發電，發電後的尾水則排入後池。
- (5) 排砂隧道：是由原本第 2 號發電鋼管改建而成，主要功能是在颱風或洪水期間排放含砂量高的異重流，以維持水庫蓄水與發電效能。此隧道設計流量為 300 m³/s，具備高效率的排砂能力，有效提升水庫在極端氣候下的運作穩定性與安全性。
- (6) 永久河道放水口：設置於排砂隧道右側，其進水口中心線標高為 169.5 m，是水庫中高程最低的洩水設施。此設施的主要功能是在水庫正常運作期間，若發電機組因維修或停機無法運轉時，仍能持續洩放蓄水，穩定供應桃園大圳及下游灌區的灌溉用水。此外，在颱風季節也可配合防洪需求，有效排放水庫蓄水，提升整體調度彈性與安全性。
- (7) 阿姆坪防淤隧道：主要目的為提升石門水庫的防

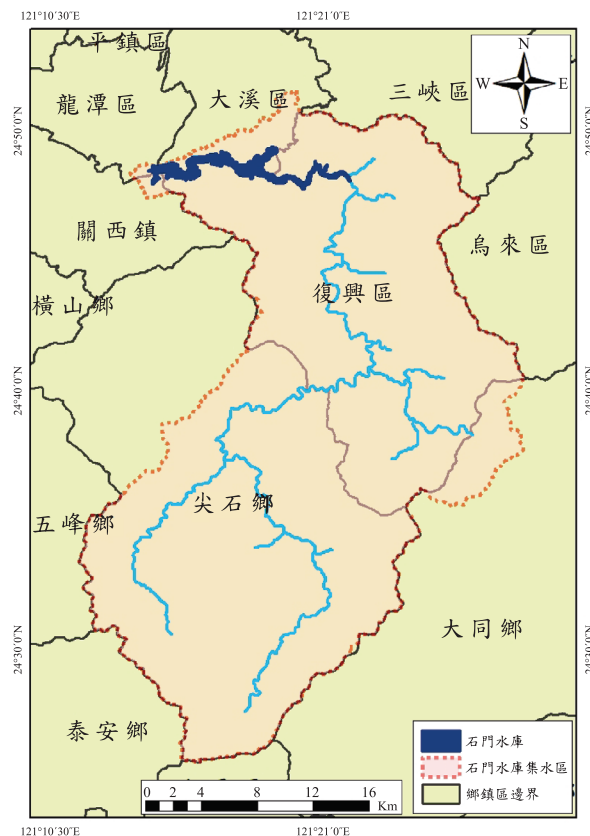
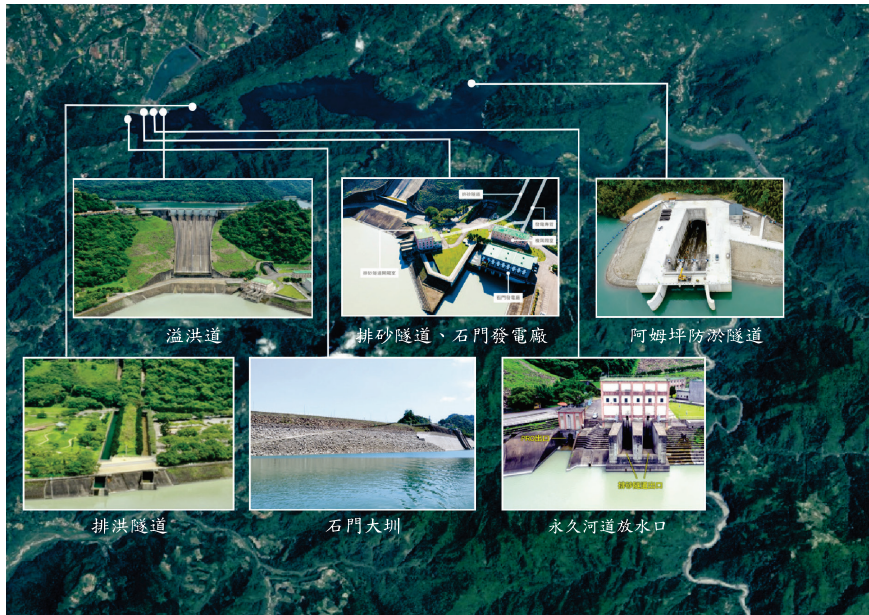


圖 1 石門水庫相對位置圖



參考資料: <https://web.wra.gov.tw/shimen/>

圖 2 石門水庫各出水工相對位置圖

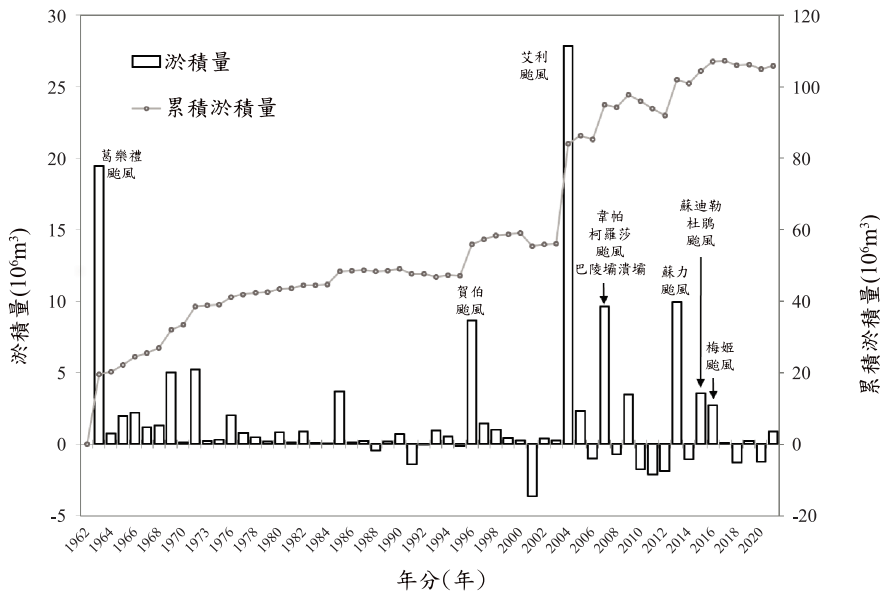


圖 3 石門水庫淤積現況圖

淤與排洪效能，主隧道全長約 3,702 m，在平時運轉時，會透過抽泥船將水庫底部的淤積物抽取後，經由隧道內設置的輸泥管輸送至出口端。出口處設有分選設備，可將泥砂進行分類處理，部分泥砂資源得以再利用。至於可冲刷的淤料，則在颱風或洪水期間，利用水力排砂方式直接排入下游河道並出海，有效減少庫區淤積，提升水庫的蓄水與排洪效能。

石門水庫建設委員會 (1955) 中推估的年平均淤積量僅為 0.79 百萬 m^3 ，經歷 1953 年葛樂禮颱風 (淤

積 19.47 百萬 m^3)、1996 賀伯颱風 (淤積 8.67 百萬 m^3)、2004 艾利颱風 (淤積 27.88 百萬 m^3) 及其餘年份大小不等的颱風侵襲後，聯合大地工程顧問股份有限公司 (2015) 報告中說明為維持水庫永續發展已將每年清除目標設定為 3.53 百萬 m^3 。換言之，水庫平均淤積量已從原始設計增加近 4.5 倍。由測量資料可知，石門水庫在 2023 年之整體淤積量已達 104.90 百萬 m^3 ，累積淤積率為 33.94%。綜合上述數據可了解，石門水庫之運轉年限已非初期所評估般樂觀。石門水庫歷年淤積如圖 3 所示。

三、研究方法

3.1 數值模式

本研究將利用 SRH2D 求解水庫異重流問題 (Lai *et al.*, 2015)。相關的控制方程式如式 (1)。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = e_w U_D \dots\dots\dots(1)$$

h 為異重流厚度； t 為時間； x 和 y 為笛卡爾座標系中的 x 軸和 y 軸方向； u 和 v 為平均速度在 x 和 y 方向的分量； U_D 為平均速度定義為； e_w 為無因次捲水係數。動量方程如式 (2) 和 (3) 所示。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu u}{\partial x} + \frac{\partial hv u}{\partial y} \\ &= \frac{\partial h T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h T_{xy}}{\partial y} - (RgC_t)h \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{Rg}{2} h^2 \frac{\partial C_t}{\partial x} - (1 + \gamma_w) \frac{\tau_x}{\rho} \end{aligned} \dots\dots\dots(2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hvv}{\partial y} \\ &= \frac{\partial h T_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial h T_{yy}}{\partial y} - (RgC_t)h \frac{\partial z}{\partial y} - \frac{Rg}{2} h^2 \frac{\partial C_t}{\partial y} - (1 + \gamma_w) \frac{\tau_y}{\rho} \end{aligned} \dots\dots\dots(3)$$

在上述方程中， T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yy} 是擴散項； $R = \rho_D / \rho_w - 1$ 是含砂水體之比重； ρ_D 是泥砂密度； ρ_w 是環境水的密度； z 是流動的頂部高度； γ_w 是上層環境水與底部渾水流之間的摩擦力； ρ 是混合密度； τ_x 和 τ_y 是床面剪應力在 x 和 y 方向上的分量。

式 (4) 和式 (5) 分別為異重流的非平衡輸砂方程式以及河床高程變化方程式。這些方程式基於質量守恆定律，表達如下：

$$\frac{\partial h C_k}{\partial t} + \frac{\partial h u C_k}{\partial x} + \frac{\partial h v C_k}{\partial y} = v_k (p_k E_k - C_{bk}) \dots\dots\dots(4)$$

$$(1 - \gamma) \frac{\partial Z_b}{\partial t} = - \sum_k v_k (p_k E_k - C_{bk}) \dots\dots\dots(5)$$

在上述公式中，右側包含了侵蝕和沉積項，其中 v_k 為第 k 類泥砂粒徑的沉降速度； p_k 為第 k 類泥砂粒徑的體積分數； E_k 為侵蝕速率潛能； C_{bk} 為第 k 類粒徑在近床區域的濃度； γ 為床面泥砂的孔隙率； Z_b 為床面

高程。

最後，本論文的主題圍繞在從現有的開門和兩條隧道釋放的泥砂總量。相關參數可由式 (6) 和 (7) 定義。

$$\begin{aligned} S_{R_C} &= Q_C \cdot SC_C \\ S_{R_A} &= Q_A \cdot SC_A \end{aligned} \dots\dots\dots(6)$$

$$\sum_{t=1}^n S_{R_T} = \frac{(S_{R_C} + S_{R_A}) \cdot t}{S_{I_T}} \dots\dots\dots(7)$$

其中， SC_C 、 SC_A 分別是既有出水工與阿姆坪防淤隧道的出流濃度； Q_C 、 Q_A 為對應流量； S_{R_C} 、 S_{R_A} 是對應既有出水工及阿姆坪防淤隧道在單位時間內的出流泥砂量體； S_{I_T} 是總入流泥砂量體 (m^3)，而 S_{R_T} 是總出流泥砂量體 (m^3)。

3.2 模擬案例

本研究採用杜鵑颱風作為檢定案例，梅姬颱風則為驗證案例，在應用案例部分，為探討阿姆坪防淤隧道與既有出水工之聯合操作效益，本研究以杜鵑颱風歷線為基礎，依據總出流量限制與排砂優先順序之不同考量，規劃四大類操作策略 (共計 8 個操作方案)，詳如表 1 與圖 4 所示。各策略之設計邏輯說明如下：

- (1) 入出平衡方案：此策略旨在維持水庫水位穩定，模擬在異重流抵達阿姆坪防淤隧道入口時，開啟防淤隧道以輔助排洪，並控制總出流量等於總入流量
 - (a) 方案 Case 1.a：異重流到達阿姆坪防淤隧道入口位置後，阿姆坪防淤隧道開啟 $600 m^3/s$ ，直到總入流量等於總出流量後關閉，其他設施保持原操作紀錄。
 - (b) 方案 Case 1.b：異重流到達阿姆坪防淤隧道入口位置後，阿姆坪防淤隧道開啟一半放流量 ($300 m^3/s$)，直到總入流量等於總出流量後關閉，其他設施保持原操作紀錄。與 Case 1.a 相比，總出流量一致但阿姆坪防淤隧道開啟持續時間較長。
- (2) 總量替代方案：此策略控制總出流量與原歷史操作紀錄一致，但改變出水工組合。操作邏輯為優先使用阿姆坪防淤隧道排砂，並相應減少溢洪道或排洪隧道之洩洪量。此策略用於評估在不改變總洩洪量的前提下，單純改變排砂路徑的效益。
 - (a) 方案 Case 2.a：異重流到達阿姆坪防淤隧道入口位置後，阿姆坪防淤隧道開啟 $600 m^3/s$ (第 20 小

時至第 50 小時)，開啟 300 m³/s 第 51 小時至第 72 小時，溢洪道從第 23 小時後關閉，排洪隧道從第 18 小時後關閉，其他設施保持原操作紀錄。
 (b) 方案 Case 2.b：異重流到達阿姆坪防淤隧道入口位置後，阿姆坪防淤隧道開啟 600 m³/s (第 20 小

時至第 44 小時) 共 25 小時，溢洪道從第 28 小時後關閉；排洪隧道從第 24 小時後關閉，其他設施保持原操作紀錄。與 Case 2.a 相比，延長溢洪道及排洪隧道開啟時間。

表 1 杜鵑颱風 8 個不同的水庫操作方案

功能性名稱	控制出流量條件	操作方案	總入流量 (10 ⁴ m ³)	總出流量 (10 ⁴ m ³)
入出平衡方案 (Case 1)	總入流量等於總出流量	Case 1.a	19600.12	19551.85
		Case 1.b		
總量替代方案 (Case 2)	總出流量=原操作總出流量	Case 2.a		16528.00
		Case 2.b		
節水優化方案 (Case 3)	總出流量<原操作總出流量(省水)	Case 3.a		14583.75
		Case 3.b		
極限排砂方案 (Case 4)	不限制總出流量	Case 4.a		27975.85
		Case 4.b		

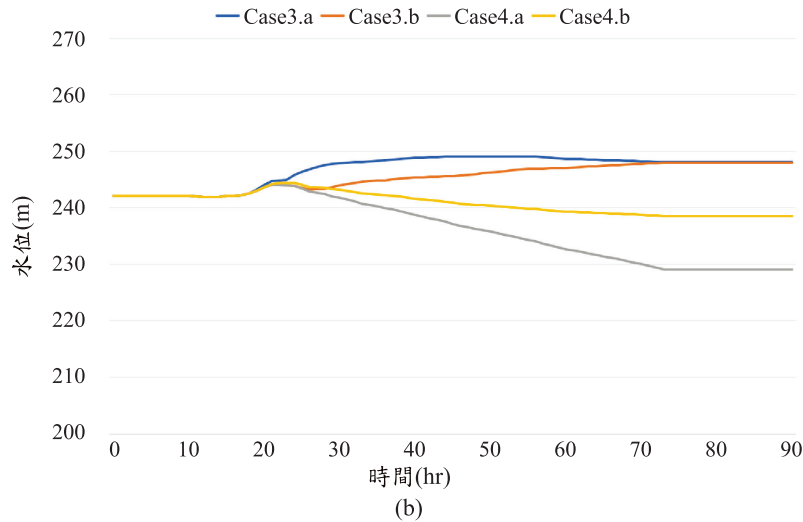
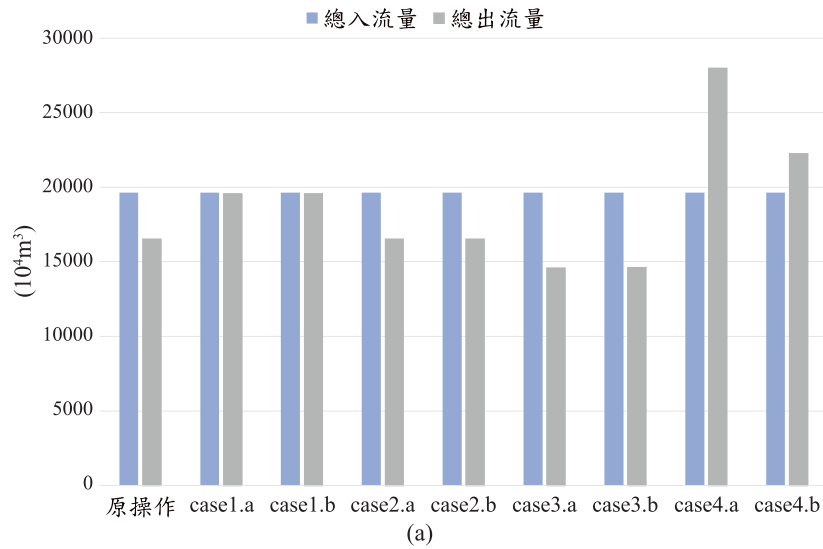


圖 4 (a) 虛擬案例出入流比較圖；(b) Case3.a、3.b、4.a 及 4.b 水位變化圖

- (3) 節水優化方案：此策略以水資源存蓄為核心目標。在開啟阿姆坪防淤隧道進行排砂的同時，大幅減少溢洪道與排洪隧道之開啟時間，使總出流量低於原操作紀錄。此策略旨在探討是否能以較少的水量消耗，達成同等甚至更佳的排砂效率（高水砂比）。
- (a) 方案 Case 3.a：異重流到達阿姆坪防淤隧道入口位置後，阿姆坪防淤隧道開啟 $600 \text{ m}^3/\text{s}$ (第 20 小時至第 32 小時，開啟 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ ，第 33 小時至第 72 小時)，共計開啟 53 小時。溢洪道第 23 小時後關閉，排洪隧道從第 18 小時後關閉，其他設施保持原操作紀錄。
- (b) 方案 Case 3.b：異重流到達阿姆坪防淤隧道入口位置後，阿姆坪防淤隧道開啟 $600 \text{ m}^3/\text{s}$ (第 20 小時至第 26 小時，開啟 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ ，第 27 小時至第 44 小時)，共計開啟 25 小時。溢洪道從第 28 小時後關閉。排洪隧道從第 24 小時後關閉，其他設施保持原操作紀錄。與 Case 3.a 相比，延長溢洪道及排洪隧道開啟時間。
- (4) 極限排砂方案此策略不限制總出流量，旨在探討阿姆坪防淤隧道在理論最大操作量下，對庫區泥砂運移的極限影響。此方案可能導致水庫蓄水量降低，但可作為排砂潛能之物理極限參考。
- (a) 方案 Case 4.a：異重流到達阿姆坪防淤隧道入口位置後，阿姆坪防淤隧道開啟 $600 \text{ m}^3/\text{s}$ ，直到模擬結束，其他設施保持原操作紀錄。
- (b) 方案 Case 4.b：異重流到達阿姆坪防淤隧道入口位置後，阿姆坪防淤隧道開啟 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ ，直到模擬結束，其他設施保持原操作紀錄。

3.3 模式建立

二維模型使用 SMS (Surface-water Modeling System) 繪製石門庫區模擬網格，採用初始地形為 2014 年底石門水庫測量資料。本研究主要探討排砂情況及效率，因此壩前各出口周遭之網格分布較為密集，以求更細緻的模擬泥砂運動現象。整體網格配置以結構型網格為主，總網格數為 9770。網格配置如圖 5(a) 所示。模型之入流邊界位於羅浮。出流邊界共計 7 個，包含溢洪道、排洪隧道、排砂隧道、發電出水口、永久河道放水口、石門大圳與阿姆坪防淤隧道，各出流邊界位置及地形高程如圖 5(b) 所示。

四、成果分析

4.1 檢定驗證案例

為驗證 SRH-2D 模式於水庫泥砂排放模擬之準確性，本研究以杜鵑與梅姬兩場颱風事件進行模擬。依據出水工高程分佈，將壩前設施劃分為上層（溢洪道、排洪隧道、石門大圳）與下層（發電進水口、排砂隧道、永久河道放水口）兩大系統，並針對其逐時排砂歷程線進行模擬與實測之比對分析。上述之逐時排砂歷程線繪製方式乃採用各出水工加總而得，舉例而言：上層即為溢洪道、排洪隧道與石門大圳單位時間內排砂量體加總；下層之繪製原則亦然。

圖 6 呈現杜鵑颱風期間上層出水工之排砂歷程線對

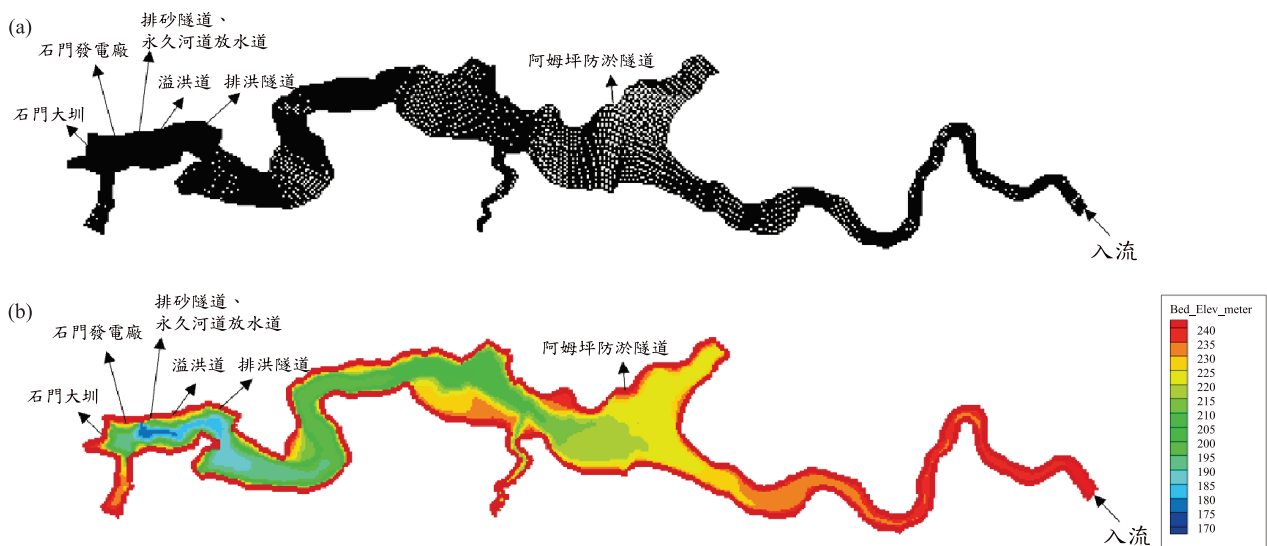


圖 5 (a)網格配置圖；(b)地形高程圖

比。結果顯示，模擬結果與實測資料之變化趨勢高度吻合。在量化指標方面，實測最大排砂量約為 $1.23 \text{ m}^3/\text{s}$ ，而模擬峰值約 $1.16 \text{ m}^3/\text{s}$ ，兩者數值相當接近，顯示模式能夠適切模擬尖峰時期上層出水工之排砂行為。圖 7 為杜鵑颱風事件期間，石門水庫下層出水工之模擬與實測排砂量歷線比較。模擬成果顯示，在漲水段具備一致性，且尖峰發生時間亦非常接近。雖模擬峰值（約 $2.40 \text{ m}^3/\text{s}$ ）略低於實測最大值（約 $2.75 \text{ m}^3/\text{s}$ ），但整體濃度變化皆能合理重現。

圖 8 呈現梅姬颱風期間上層出水工之排砂歷線比較。成果顯示模擬與實測之排砂行為在前 40 小時皆

維持低檔，隨後於第 42 小時左右開始攀升。然而實測資料在第 48 小時出現高達 $5.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 的尖峰值，導致模擬峰值（約 $3.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ）在數值上較為低估。但觀察整體實測趨勢，模擬結果仍能捕捉排砂濃度的起漲時機與主要排放區間之濃度變化。圖 9 為梅姬颱風期間下層出水工之排砂量比較，以尖峰排砂濃度而言，實測峰值約為 $3.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ，而對應時間的模擬值則略為低估。然而，在第 60 至 85 小時的退水段，模擬結果呈現高估現象。儘管如此，此一高估特性在工程應用上屬於保守估計，對於評估排砂操作之濃度變化趨勢仍具參考價值。

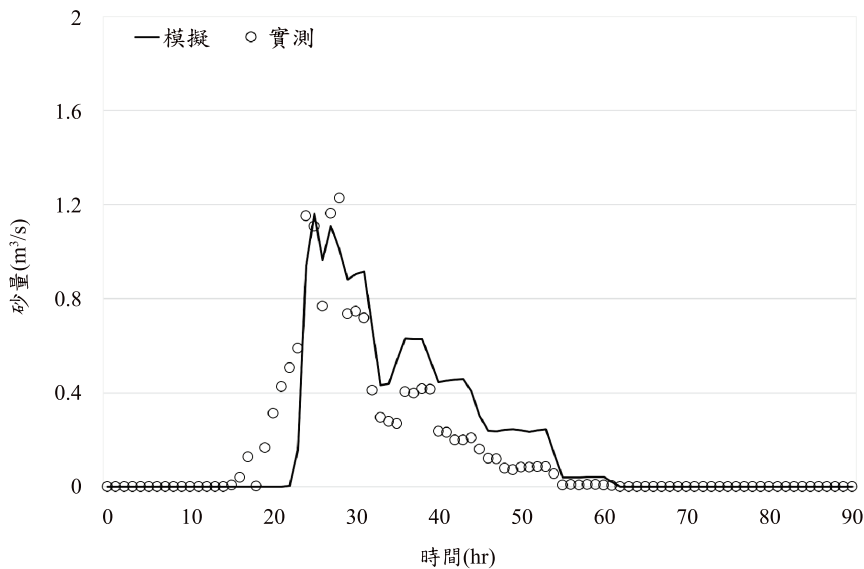


圖 6 杜鵑颱風上層出水工模擬與實測排砂量比較圖

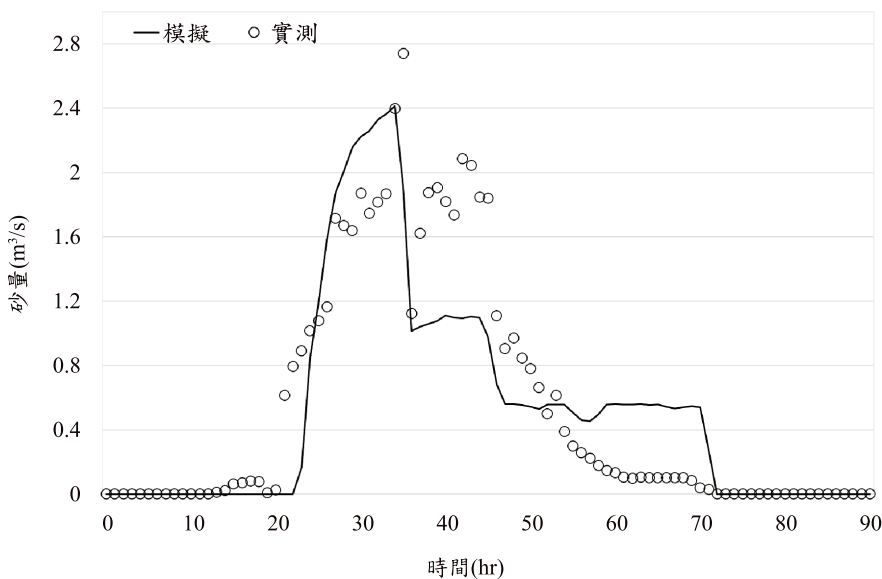


圖 7 杜鵑颱風下層出水工模擬與實測排砂量比較圖

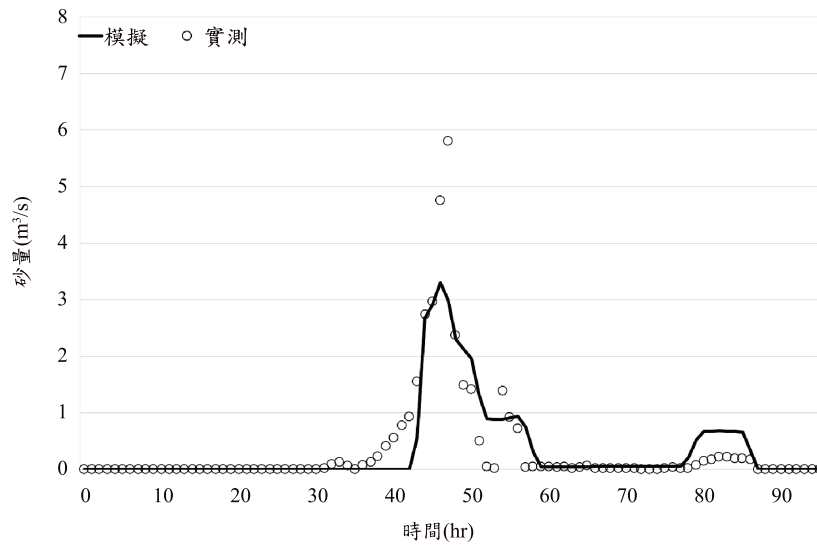


圖 8 梅姬颱風上層出水工模擬與實測排砂量比較圖

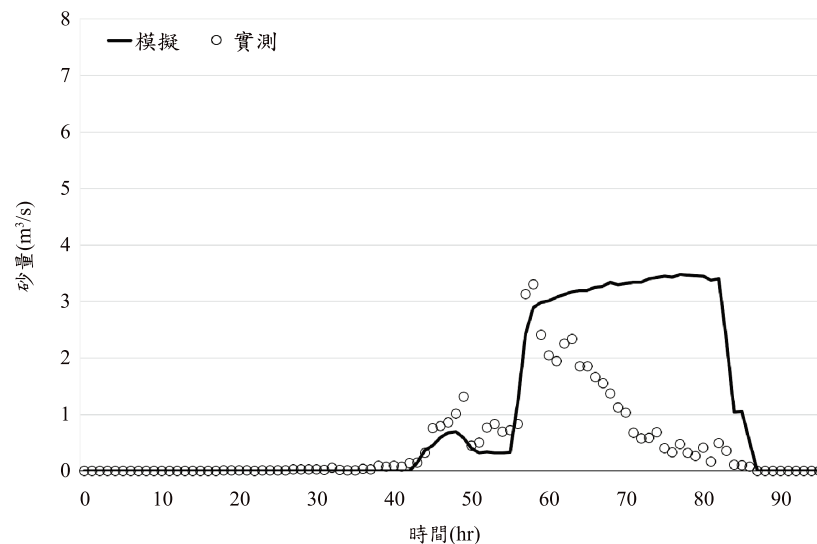


圖 9 梅姬颱風下層出水工模擬與實測排砂量比較圖

綜合上述，SRH-2D 模式在杜鵑颱風案例中，無論是上層或下層出水工，其排砂歷線之變化趨勢與尖峰排砂量體皆與實測資料吻合。而在梅姬颱風驗證案例中，雖下層出水工在退水段的表現略差，但模式對於關鍵的尖峰排砂量體仍能合理掌握。本研究之核心目的在於評估不同操作策略下的泥砂排放總量與相對效益，上述檢驗結果證實本研究所建立模式已具備足夠之物理代表性與模擬穩定性，可作為後續阿姆坪防淤隧道虛擬操作方案之評估基礎。

4.2 虛擬案例應用

本研究加入阿姆坪防淤隧道，針對不同排砂方案

之總排砂量與各排放口砂量變化進行比較，探討阿姆坪防淤隧道開啟是否對周圍泥砂濃度造成影響。

圖 10 顯示模擬第 24 與第 26 小時阿姆坪防淤隧道周圍泥砂濃度之平面分布變化，分別對應於阿姆坪防淤隧道開啟後第 4 小時與第 6 小時之狀態。在第 24 小時可觀察到原始操作情境（未開啟阿姆坪防淤隧道）中，阿姆坪防淤隧道周圍高濃度區域（濃度大於 3000 ppm）的範圍明顯較其他各操作方案更廣。反觀開啟防淤隧道之方案（如 Case 1 與 Case 4 系列操作），高濃度核心範圍顯著縮小。進一步比較流量差異可發現，採取全開 600 m³/s 之方案（Case 1.a、4.a），其削減高濃度水體之效果優於半開 300 m³/s 之方案（Case 1.b、4.b），顯示較大的操作流量能產生更強的局部排

砂能力，降低本體濃度。

至第 26 小時，操作策略對縱向濃度變化的影響趨於顯著。在原始操作中，頭部濃度 (>2700 ppm) 已通過彎道並向下游推進。然而，在 Case 1 與 Case 4 系列中，由於阿姆坪防淤隧道的持續排砂造成泥砂動量略微減弱，其頭部高濃度運移狀態相較於原始操作產生遞延現象。上述現象說明，優先開啟阿姆坪防淤隧道不僅能直接排出泥砂，更能有效減緩高濃度異重流抵壩時間，為水庫防淤操作爭取更多應變時間。

為更明確了解各操作方案對庫區泥砂濃度變化的影響，本研究於模型中阿姆坪防淤隧道下游增設一處監測點。依據該監測點的模擬結果，繪製第 20 至第 35 小時之逐時濃度變化曲線如圖 11 所示。由圖 11 (a) 可觀察到，原始操作與 Case 4.a、4.b 濃度皆在第 20 至 23 小時間迅速上升至尖峰，其中原始操作的尖峰濃度與整體濃度皆明顯高於方案 4.a 與 4.b。而在兩種出流

量設定中，由於 Case 4.b 之防淤隧道出流量 (300 m³/s) 小於 Case 4.a (600 m³/s)，較少的砂量從阿姆坪防淤隧道排出，其整體濃度亦略高於 Case 4.a。在圖 11(b) 中，原始操作與 Case 2.a、2.b 亦呈現相似趨勢，即原始操作的尖峰濃度與整體濃度均顯著較高。然而，Case 2.a 與 2.b 在第 20 至 29 小時間的濃度變化趨勢相近，但自第 30 小時起，Case 2.b 之泥砂濃度低於 Case 2.a。其原因在於 Case 2.b 於第 10 至 27 小時間開啟壩前溢洪道與排洪隧道的時間較長、總出流量亦較大，並且入流邊界泥砂濃度逐漸降低，導致高濃度水流更早通過監測點並移往壩前。綜合上述分析可知，操作條件(如排砂時機、出流量與閘門組合)對下游泥砂濃度的逐時變化具有顯著影響。適當的防淤隧道操作時機與出流量調整，不僅能改變高濃度泥砂運動至壩前的時間，也可降低下游泥砂濃度峰值，達到有效排砂與降低水庫淤積風險的目的。

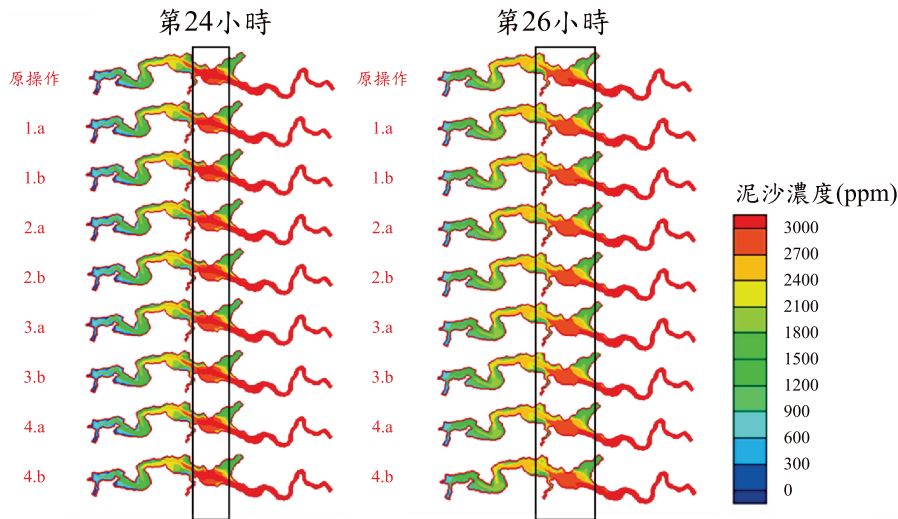


圖 10 阿姆坪防淤隧道周圍泥砂濃度平面變化圖

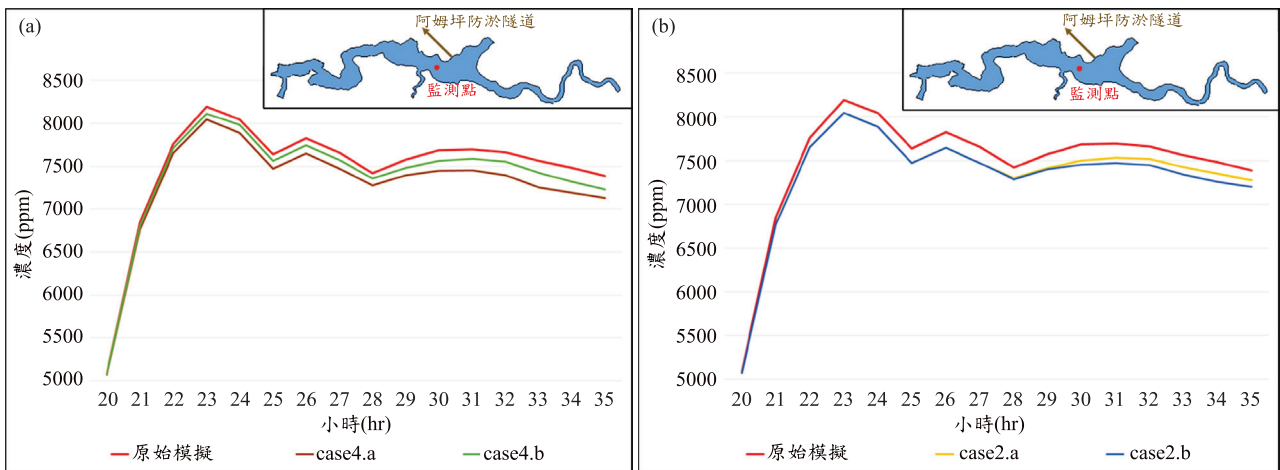


圖 11 第 20~35 小時監測點濃度變化圖

表 2 與圖 12 分別呈現各虛擬操作方案之出庫總排砂量與各出水口泥砂分佈情形。由結果可知，在 Case 1.a 與 1.b 中，總排砂量分別為 26.819 與 26.912 萬 m³，顯示相較於阿姆坪防淤隧道短時間全開 (Case 1.a)，採取半開並延長操作時間 (Case 1.b) 可略微提升排砂效率。整體而言，各方案中以 Case 4.a 的排砂成效最佳，總排砂量達 36.679 萬 m³。進一步分析不同出水口之泥砂排放模擬結果可發現，於 Case 2.a 與 2.b 中，雖總出流量與原始操作條件相同，但其總排砂量分別提高約 5.39 萬與 1.73 萬 m³，顯示在優先啟用

阿姆坪防淤隧道的情況下，操作策略的調整確實可顯著提升排砂效益。另一方面，Case 3.a 與 3.b 採降低總出流量之操作策略，仍能維持相對高之排砂成效，總排砂量分別為 26.273 與 22.703 萬 m³。即使在出流總量低於原始條件的情況下，其排砂效能仍接近甚至超越原始操作情境。另外值得注意的是，在 Case 2.a 與 3.a 中，溢洪道與排洪隧道的排砂量皆趨近於零，其可能原因為此兩出口開啟的時間異重流模擬尚未到達壩前出口位置，致使其未能參與有效排砂。此現象亦可證明掌握異重流到達時機之重要性。

表 2 模擬案例列表

	颱風事件	尖峰時雨量 (mm)	入庫尖峰流量 (m ³ /s)	入庫水量 (10 ⁴ m ³)	出庫水量 (10 ⁴ m ³)	入庫砂量 (10 ⁴ m ³)	出庫砂量 (10 ⁴ m ³)
歷史颱風	2016 梅姬	46.2	4267.62	24860.02	25612.59	132.46	60.54
	2015 杜鵑	39.4	3802.49	19600.12	16527.85	69.44	23.41
虛擬操作	Case 1.a	39.4	3802.49	19600.12	19551.85	69.44	26.82
	Case 1.b	39.4	3802.49	19600.12	19551.85	69.44	26.91
	Case 2.a	39.4	3802.49	19600.12	16527.75	69.44	28.80
	Case 2.b	39.4	3802.49	19600.12	16527.75	69.44	25.14
	Case 3.a	39.4	3802.49	19600.12	14583.75	69.44	26.27
	Case 3.b	39.4	3802.49	19600.12	14620.36	69.44	22.70
	Case 4.a	39.4	3802.49	19600.12	27975.85	69.44	36.68
	Case 4.b	39.4	3802.49	19600.12	22251.85	69.44	30.26

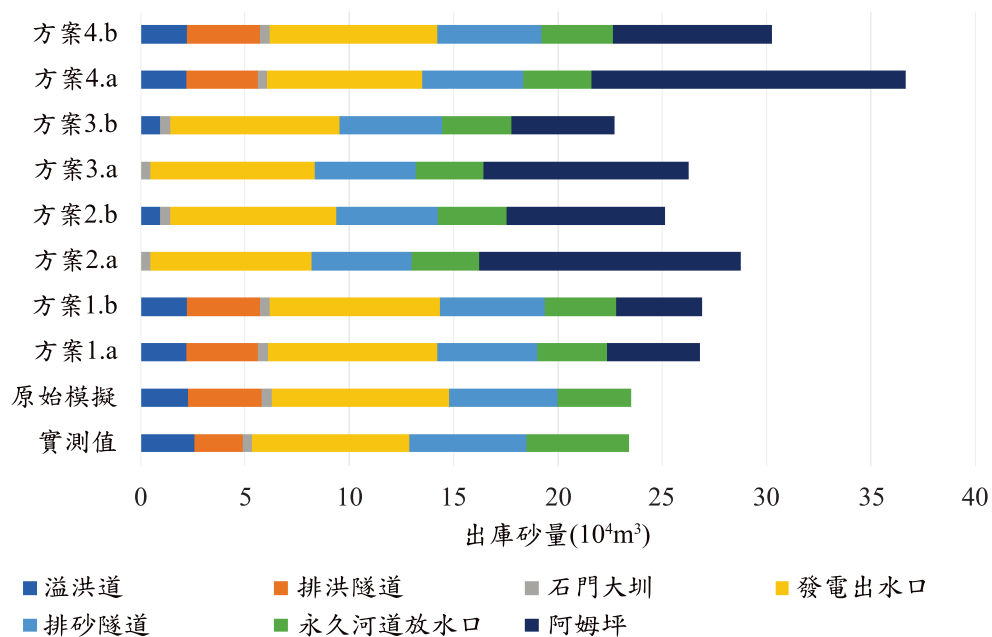


圖 12 虛擬案例各出水口之砂量比較圖

4.3 案例效益分析

本研究綜合考量總排砂量、水資源利用效率及經濟效益，對四類操作策略進行綜合評估。

根據圖 13 與表 3 之模擬結果顯示，各操作方案之排砂成效皆優於實測值 (23.41 萬 m³)，顯示阿姆坪防淤隧道之運作確實能提升整體排砂率。其中，極限排砂方案 (Case 4.a) 採取全程全開操作，其總排砂量達 36.68 萬 m³ 為所有方案中最高者，較實測值增加約 13.27 萬 m³。這表明若不計水資源成本，持續開啟防淤隧道確能達到物理上之排砂極限。

為探討單位水量的排砂產能，本研究引入水砂比指標 (以實測值為基準 1.00)。由表 3 及圖 14 可知，極限排砂方案 (Case 4.a) 雖排砂量最大，但伴隨較大出流量 (約 2.79 億 m³)，導致其水砂比僅 0.93，顯示其排砂效率實則低於原始操作。反觀節水優化方案 (Case 3.a)，其策略為優先開啟阿姆坪防淤隧道並提早關閉溢洪道。結果顯示，該方案在總出流量顯著低於原操作 (僅 1.45 億 m³) 的前提下，仍能維持 26.27 萬 m³ 的高

排砂量。其水砂比可達 1.27，為所有方案中最佳。此結果證實 Case 3.a 能以最少的水資源消耗，換取最高的泥砂排放效率。

表 4 將各方案之增量排砂體積，以傳統機械清淤成本 (500 元/m³) 換算為等值經濟效益。若僅視清淤成本節省金額，Case 4.a 之效益高達 6,634 萬元，顯著高於其他方案。然而，水庫操作必須權衡水資源之機會成本。Case 4.a 相較於 Case 3.a 多耗損了約 1.34 億 m³ 的水資源，若考量枯水期之農業休耕補償或水資源調度成本，其水資源價值流失恐遠高於節省之清淤費用。相對地，Case 3.a 之等值疏濬效益約為 1,431 萬元，雖帳面金額較低，但其係在省水條件下達成。綜合考量台灣豐枯懸殊之水文特性，節水優化方案 (Case 3.a) 透過精準調度達成高效率排砂與水資源存蓄之雙重目標，為兼具經濟性與永續性之較佳操作策略。整體而言，各方案在排砂效率與水資源耗用之間展現不同取舍，可作為後續操作方案優選與調度評估之參考依據。

表 3 各操作情境出庫水量、砂量與水砂比例比較列表

	出庫水量 (10 ⁴ m ³)	出庫砂量 (10 ⁴ m ³)	水砂比例
實測值	16527.85	23.41	1
Case 1.a	19551.85	26.82	0.97
Case 1.b	19551.85	26.91	0.97
Case 2.a	16527.75	28.80	1.23
Case 2.b	16528.36	25.14	1.07
Case 3.a	14583.75	26.27	1.27
Case 3.b	14620.36	22.70	1.10
Case 4.a	27975.85	36.68	0.93
Case 4.b	22251.85	30.26	0.96

水砂比公式：(該方案出庫砂量/實測值出庫砂量) / (該方案出庫水量/實測值出庫水量)

表 4 實測案例與各方案經濟效益比較

操作	總排砂量 (10 ⁴ m ³)	與實測值相差值 (10 ⁴ m ³)	增量排砂體積 (m ³)	傳統疏濬等價成本 (百萬台幣)
實測值	23.41	-	-	-
Case 1.a	26.82	3.41	34085.953	17.043
Case 1.b	26.91	3.50	35022.194	17.511
Case 2.a	28.80	5.39	53853.213	26.927
Case 2.b	25.14	1.73	17330.942	8.665
Case 3.a	26.27	2.86	28632.901	14.316
Case 3.b	22.70	-0.71	-7075.9503	-
Case 4.a	36.68	13.27	132690.871	66.345
Case 4.b	30.26	6.85	68505.060	34.253

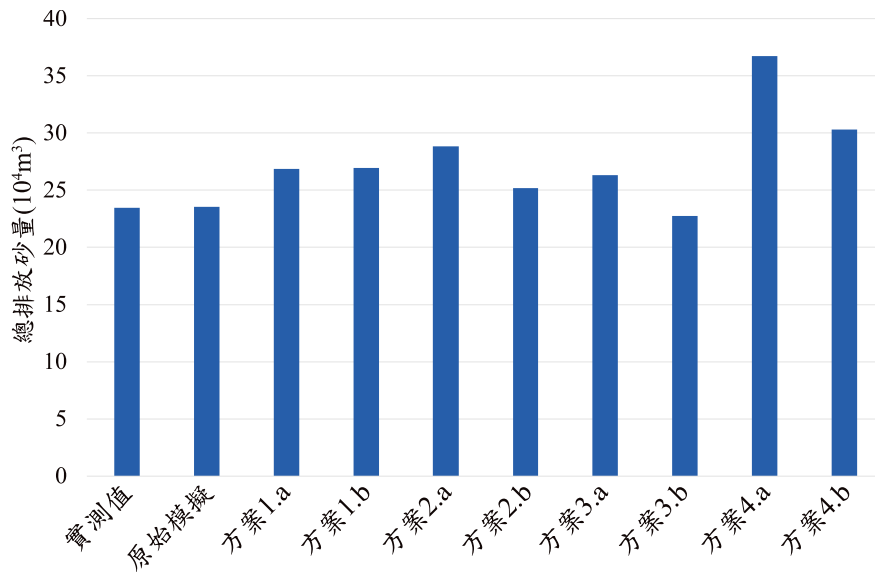


圖 13 虛擬操作排砂量總和圖

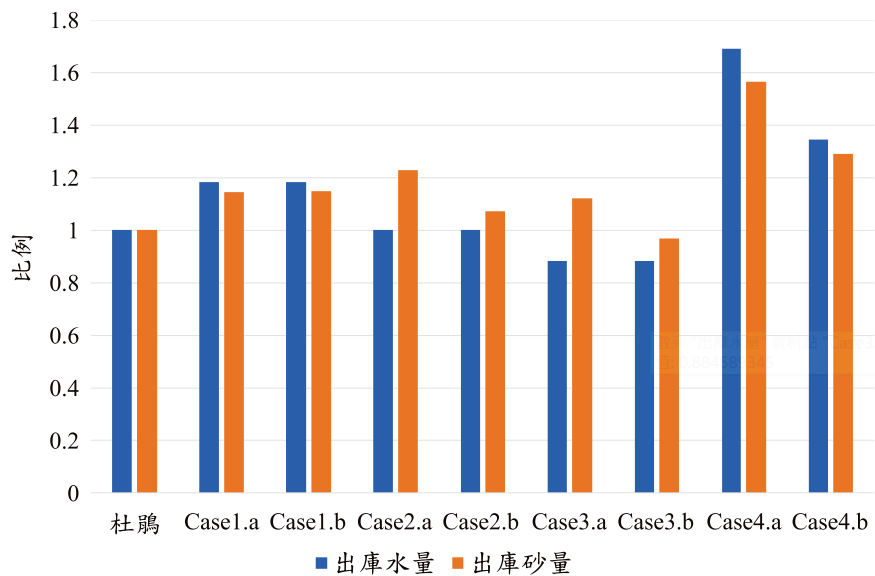


圖 14 各操作情境水砂比例比較圖

五、結論與建議

5.1 結論

本研究利用 SRH-2D 二維數值模式，針對石門水庫阿姆坪防淤隧道啟用後之異重流運移機制與操作策略進行模擬評估。經由杜鵑與梅姬颱風之檢定驗證，並綜合分析「入出平衡、總量替代、節水優化與極限排砂」等四類操作策略之效益，獲得主要結論如下：

(1) 數值模式之適用性：檢定與驗證結果顯示，SRH-2D 模式能有效掌握颱風期間水庫不同出水工之排砂

量體。對於評估不同操作方案之相對排砂效益，模式具備足夠之物理代表性與可靠度。

(2) 阿姆坪防淤隧道之排砂機制：模擬結果證實，優先開啟阿姆坪防淤隧道可改變庫區流場與濃度分佈。相較於未開啟情境，阿姆坪防淤隧道之運作能有效攔截中上游高濃度水體，延緩高濃度水流傳輸至壩前之時間，並降低下游出水口之尖峰濃度，有助於減緩庫區整體淤積率。

(3) 操作策略效益評估：極限排砂方案 (Case 4) 雖然能達成最大的總排砂量，但需持續全開洩放，導致大量水資源流失，屬高耗水之操作模式。節水優化方案 (Case 3) 則透過控制阿姆坪防淤隧道與溢洪

道的操作時機，讓總出流量較原操作減少情況下，仍能維持優異的排砂成效。顯示該策略能在極大化排砂效率的同時，兼顧水資源蓄存效益。

5.2 建議

基於本研究結果與限制，針對未來工程操作與學術研究提出以下建議：

- (1) 三維數值模式之應用：鑑於二維模式在模擬異重流垂直分層之物理限制，未來研究可嘗試建立三維異重流模式。藉由解析垂直流速剖面，更精確地模擬異重流運動機制，以提供更精準的閘門啟閉時機參考。
- (2) 實務操作建議：本研究基於最大化排砂之理念設計出水工啟閉時機，並未考量水庫防洪操作，未來研究可加以考量水庫操作規則進行設計，以求更完整呈現真實面貌。
- (3) 水資源經濟價值納入：現行效益評估多偏重於節省之清淤工程成本。建議後續研究引入水資源價格或缺水風險成本，建立包含水價與砂價的綜合效益函數，以更全面地評估極端氣候下排水排砂的真實經濟價值。

參考文獻

1. Anari, R., Gaston, T. L., Randle, T. J., & Hotchkiss, R. H. (2023). New Economic Paradigm for Sustainable Reservoir Sediment Management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 149(2), 04022078.
2. Cesare, G. D., Schleiss, A., & Hermann, F. (2001). Impact of Turbidity Currents on Reservoir Sedimentation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(1), pp.6-16. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2001\)127:1\(6\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:1(6)).
3. Chamoun, S., De Cesare, G., & Schleiss, A. J. (2016). Managing Reservoir Sedimentation by Venting Turbidity Currents: A Review. *International Journal of Sediment Research*, 31(3), pp.195-204. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2016.06.001>.
4. Chen, C.-W., Oguchi, T., Hayakawa, Y. S., Saito, H., Chen, H., Lin, G.-W., Wei, L.-W., & Chao, Y.-C. (2018). Sediment Yield During Typhoon Events in Relation to Landslides, Rainfall, and Catchment Areas in Taiwan. *Geomorphology*, 303, pp.540-548. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.11.007>.
5. Chen, C.-W., Tung, Y.-S., Liou, J.-J., Li, H.-C., Cheng, C.-T., Chen, Y.-M., & Oguchi, T. (2019). Assessing Landslide Characteristics in a Changing Climate in Northern Taiwan. *CATENA*, 175, pp.263-277. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.023>.
6. Chiu, Y.-J., Lee, H.-Y., Wang, T.-L., Yu, J., Lin, Y.-T., & Yuan, Y. (2019). Modeling Sediment Yields and Stream Stability Due to Sediment-Related Disaster in Shihmen Reservoir Watershed in Taiwan. *Water*, 11(2), 332. <https://doi.org/10.3390/w11020332>.
7. Dethier, E. N., Renshaw, C. E., & Magilligan, F. J. (2022). Rapid Changes to Global River Suspended Sediment Flux by Humans. *Science*, 376(6600), pp.1447-1452. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001241](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001241).
8. Hsu, S. M., Tseng, C. M., & Lin, C. C. (2017). Antecedent Bottom Conditions of Reservoirs as Key Factors for High Turbidity in Muddy Water Caused by Storm Rainfall. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(1), 05016006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001241](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001241).
9. Huang, C.-C. (2024). Navigating Reservoir Deposition Challenges: Evaluation of Reservoir Desilting Strategy Through a 4-stage Life Cycle Assessment Approach. *Water Resources Management*, 38(10), pp.3937-3952. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02832-4>.
10. Huang, C.-C., Lai, Y. G., Lai, J.-S., & Tan, Y.-C. (2019). Field and Numerical Modeling Study of Turbidity Current in Shimen Reservoir During Typhoon Events. *Journal of Hydraulic Engineering*, 145(5), 05019003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001590](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001590).
11. Jhong, B.-C., Fang, H.-T., & Huang, C.-C. (2021). Assessment of Effective Monitoring Sites in a Reservoir Watershed by Support Vector Machine Coupled with Multi-Objective Genetic Algorithm for Sediment Flux Prediction During Typhoons. *Water Resources Management*, 35(8), pp.2387-2408. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02832-4>.
12. Lai, Y. G., Huang, J., & Wu, K. (2015). Reservoir Turbidity Current Modeling with a Two-dimensional Layer-averaged Model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(12), 04015029.
13. Lee, F.-Z., & Huynh Nguyen, N. L. (2024). Application of Artificial Countermeasures to Enhance Desilting Efficiency in a Reservoir Under Normal and Extreme Events. *Journal of Water and Climate Change*, 15(6), pp.2648-2664.

14. Lee, F.-Z., Lai, J.-S., Chen, P.-A., Lin, G.-F., Lee, H.-Y., Wu, C.-H., & Tan, Y.-C. (2017). Investigation on Plunge Point Location and Turbidity Current Movement in the Shihmen Reservoir. *Proceedings of the 2nd International Workshop on Sediment Bypass Tunnels*, pp.1-9.
15. Lee, F.-Z., Lai, J.-S., & Sumi, T. (2022). Reservoir Sediment Management and Downstream River Impacts for Sustainable Water Resources—Case Study of Shihmen Reservoir. *Water*, 14(3), 479. <https://doi.org/10.3390/w14030479>.
16. Li, Y., Zhao, G., Allen, G. H., & Gao, H. (2023). Diminishing Storage Returns of Reservoir Construction. *Nature Communications*, 14(1), 3203. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38843-5>.
17. Liou, Y.-A., Nguyen, Q.-V., Hoang, D.-V., & Tran, D.-P. (2022). Prediction of Soil Erosion and Sediment Transport in a Mountainous Basin of Taiwan. *Progress in Earth and Planetary Science*, 9(1), 52.
18. Liu, H., Guo, C., Xiao, L., Liu, P., Du, J., & Yi, Y. (2025). Estimating Over Thousands of Reservoirs Sedimentation and Effects on Sediment Flux Through a Newly Proposed Sediment Transport Model. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 19(1), 2521825.
19. Minocha, S., & Hossain, F. (2024). GRILSS: Opening the Gateway to Global Reservoir Sedimentation Data Curation. *Earth System Science Data Discussions*, pp.1-23. <https://doi.org/10.5194/essd-2024-470>.
20. Perera, D., Williams, S., & Smakhtin, V. (2023). Present and Future Losses of Storage in Large Reservoirs Due to Sedimentation: A Country-Wise Global Assessment. *Sustainability*, 15(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/su15010219>.
21. Sun, Y., Li, J., Cao, Z., Liu, J., Xu, H., & Borthwick, A. G. (2024). Modelling Reservoir Sediment Flushing Through a Bottom Tunnel with an Initially Covered Intake. *Applied Mathematical Modelling*, 125, pp.425-443.
22. Wang, H.-W., Kondolf, M., Tullos, D., & Kuo, W.-C. (2018). Sediment Management in Taiwan's Reservoirs and Barriers to Implementation. *Water*, 10(8), 1034. <https://doi.org/10.3390/w10081034>.
23. Wisser, D., Frohling, S., Hagen, S., & Bierkens, M. F. P. (2013). Beyond Peak Reservoir Storage? A Global Estimate of Declining Water Storage Capacity in Large Reservoirs. *Water Resources Research*, 49(9), pp.5732-5739. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20452>.
24. 石門水庫建設委員會。(1955)。「石門水庫工程定案計劃報告。」經濟部石門水庫設計委員會。
25. 聯合大地工程顧問股份有限公司。(2015)。「石門水庫阿姆坪防淤隧道可行性規劃總報告。」
26. 謝東洲、蕭逸華、陳麒文、李欣輯、趙益群、葉克家。(2019)。氣候變遷下淡水河主河道防洪及沖淤探討。中國土木水利工程學刊。31 卷 4 期。 [https://doi.org/10.6652/JoCICHE.201906_31\(4\).0004](https://doi.org/10.6652/JoCICHE.201906_31(4).0004).
27. 陳俯鳴與鄭瑞府。(2022)。「石門水庫阿姆坪防淤隧道啟用水力排砂。」營建知訊。476 期。

收稿日期：民國 114 年 12 月 08 日

修改日期：民國 115 年 01 月 13 日

接受日期：民國 115 年 01 月 29 日