

應用庫底沖刷槽導流牆減緩水庫淤積之研究

STUDY ON THE APPLICATION OF FLUSHING CHANNEL WITH GUIDE WALL TO REDUCE SEDIMENTATION IN A RESERVOIR

國立中興大學
土木工程學系
助理教授

李 豐 佐
Fong-Zuo Lee

國立臺灣大學
水工試驗所研究助理暨
環境工程學研究所
碩士生

劉 政 其
Cheng-Chi Liu

國立臺灣大學
水工試驗所研究員暨
生物環境系統工程學系
兼任教授

賴 進 松*
Jihn-Sung Lai

國立臺灣大學
環境工程學研究所
教授

關 蓓 德
Pei-Te Chiueh

摘 要

為探討應用沖刷槽導流牆設置對於減緩水庫淤積效應及壩前出工排砂效率之影響，本研究以 Surface Water Modeling System (SMS) 及二維水理泥砂數值模式 (SRH-2D)，建置阿公店溪上游水庫模型，並納入考量庫區沖刷槽導流牆設置前後之數值地形，設計不同出流水位之水文模擬情境案例，以動床模式模擬阿公店水庫庫區中水砂運移及於溢洪管出流之情形，以及出流泥砂濃度變化。本研究以重現期 $Q_{1.11}$ 作為本研究之模擬水文情境，進行庫底沖刷槽導流牆減緩水庫淤積之研究，但在阿公店水庫有無具備沖刷槽導流牆且在起始水位 EL.28 m 及 EL.30 m 情境下，兩種起始水位排出渾水濃度差異並不明顯，低水位之排砂效益略高於高水位 0.71 % 至 2.82 % 之間，但出流泥砂濃度尖峰值均可達 2 萬 mg/L 以上，且排砂效率均可達 60 % 以上，因此，在沖刷槽北側或是南北側皆佈置導流牆後，溢洪管排砂效率分別平均可提升約 13 % 及 17.5 %。由此可見，利用佈置導流牆方式所建置之沖刷槽，可提升阿公店水庫約 13 % 以上之排砂效率。然而設置沖刷槽導流牆後，由於主要入流泥砂濃度可集中於沖刷槽內，因此雖然溢洪管出流泥砂濃度有升高之趨勢，亦導致沖刷槽內有淤積潛勢，因此建議每年的機械清淤可優先針對沖刷槽內淤砂進行清除，可增進汛期時水力排砂之防淤成效。

關鍵詞：導流牆、排砂效率、二維水理泥砂數值模式。

* 國立臺灣大學水工試驗所研究員暨生物環境系統工程學系兼任教授
10617 台北市羅斯福路四段 1 號 · jslai525@ntu.edu.tw

STUDY ON THE APPLICATION OF FLUSHING CHANNEL WITH GUIDE WALL TO REDUCE SEDIMENTATION IN A RESERVOIR

Fong-Zuo Lee

Department of Civil
Engineering, National
Chung Hsing
University

Cheng-Chi Liu

Hydrotech Research
Institute and Graduate
Institute of
Environmental
Engineering, National
Taiwan University

Jihn-Sung Lai*

Hydrotech Research
Institute and
Department of
Bioenvironmental
Systems Engineering,
National Taiwan
University

Pei-Te Chiueh

Graduate Institute of
Environmental
Engineering, National
Taiwan University

ABSTRACT

This study investigates the effects of implementing a flushing channel with guiding walls on reducing reservoir sedimentation and improving the desilting efficiency of sediment removal in front of the dam. This study built an Agongdian Reservoir model using the Surface Water Modeling System (SMS) and the two-dimensional hydraulic and sediment transport model (SRH-2D). The numerical terrain before and after the installation of the guiding wall was considered in the hydrological simulation scenarios with different outflow water levels. The dynamic bed model was used to simulate the sediment transport in the reservoir and the sediment concentration changes at the outlet spillway. The study used the $Q_{1.11}$ return period as the hydrological simulation scenario to study the effectiveness of the guiding wall. However, the differences in sediment concentration at the outlet spillway for the EL.28 m and EL.30 m initial water level scenarios were insignificant, and the desilting efficiency at the low water level was slightly higher than that at the high-water level, ranging from 0.71 % to 2.82 %. The peak sediment concentration at the outlet spillway exceeded 20,000 mg/L, and the desilting efficiency reached more than 60 %. Therefore, after installing the guiding wall on the north or south sides, the desilting efficiency of the spillway could be increased by an average of approximately 13 % and 17.5 %, respectively. However, after installing the guiding wall, the sediment concentration of the main inflow could be concentrated in the flushing channel, which led to an increasing trend of sediment concentration at the outlet spillway and posed the potential for sediment accumulation in the flushing channel. Therefore, it is recommended to prioritize the mechanical dredging of the sediment in the flushing channel every year to enhance the effectiveness of hydraulic sediment removal during flood season.

Keywords: Guiding wall, Desilting efficiency, Two-dimensional hydraulic and sediment transport model.

Lee, F.Z., Liu, C.C., Lai, J.S.*, & Chiueh, P.T. (2023). "Study on the Application of Flushing Channel with Guide Wall to Reduce Sedimentation in a Reservoir." *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 69(2), 11-21.
[https://doi.org/10.29974/JTAE.202306_69\(2\).0002](https://doi.org/10.29974/JTAE.202306_69(2).0002)

一、前言

全世界水庫大多面臨嚴重淤積問題，可蓄水利用之水庫有效庫容已日益減少，因此，水庫永續利用需藉由水砂經營管理策略來推動，水庫防淤管理策略，則主要為水庫泥砂淤積提供較為可行的解決方式，然而評估水庫防淤管理策略則需要了解入庫及出庫水砂量、現有水工構造物的防淤功能、水庫營運標的，以及水庫防淤管理策略的種類與方法。尤其在台灣的夏季期間，颱風豪雨事件頻頻發生，常造成水庫集水區大量崩塌與沖蝕，致使高濃度泥砂沖刷入庫，水庫泥砂淤積嚴重的問題逐漸影響地區供水穩定。水庫淤積的問題並不是只在庫區本身，而是涵蓋了整個流域河川生態系統的問題。因此，若要全面且根本的處理水庫淤積問題，泥砂管理策略的範圍必須包含從上游集水區、庫區、水庫下游及沿河到下游出海口的排放。在庫區上游的問題核心集中於如何減少集水區泥砂入庫量，相關的策略如邊坡水土保持、攔砂壩的興建；庫區的問題核心在於如何利用防淤設施有效的排除或減少入庫泥砂、降低水庫淤積及確保穩定供水功能 (Kondolf *et al.*, 2014)，可行的策略主要分為水力排砂以及機械清淤等二方面，然而，其中又以在汛期時，利於防洪多餘之水量進行水力排砂為最具備經濟效益之方式，因此，如何掌握颱風豪雨時期進行水力排砂，為水庫防淤操作重要課題。

水力排砂中又以空庫排砂為最有效益之水庫防淤操作，進行空庫排砂期間，庫區水流近似於河道，且因明渠流冲刷的緣故，在水庫空庫排砂過程之後期，在庫區之庫底通常會形成一主深槽 (韓, 2003)。而此主深槽位置及寬度取決於流量、流速、水庫水位、排砂孔高程與型式以及泥砂於庫區之淤積型態等，而庫區泥砂淤積型態與泥砂於庫區運移行為有關，且為一水平二維課題。根據文獻所載，Ellison and Turner (1959) 首先提出層平均二維模式的概念，將其應用於水庫泥砂運移之研究。Hsieh and Yang (2003) 及 Hung *et al.* (2009) 則提出 RESED2D 模式，以正交曲線標進行黏性與非黏性泥砂的二維傳輸模擬，並應用隱式差分運算、耦合與迭代法分析質量守恆方程式，並以此模擬阿公店水庫的清淤效率。李等 (2018a, 2018b, 2018c) 曾利用二維水理動床數值模式 (SRH-2D)，進行丁壩附近水理動床模擬、橋墩冲刷深度堆估及用以建構橋墩冲刷模擬分析操作系統。Lai *et al.* (2015, 2018) 及 Huang *et al.* (2019) 曾

利用美國墾務局泥砂及河川水利研究群 (Sedimentation and River Hydraulics Group) 所發展之異重流二維層平均數值模式 (Two-Dimension layer-averaged model, 2DLAM) (Lai, 2008; Lai *et al.*, 2015)，模擬臺灣石門水庫之異重流運移情形，並指出二維層平均數值模式 (2DLAM) 可用於了解渾水流於水庫中的二維運移特性。李等 (2021) 為探討不同攔河堰型式對於河道防洪及輸砂之影響，同樣以二維數值模式 (SRH-2D) 建置新店溪碧潭堰上下游河段模型，納入考量全固定堰、全倒伏堰及複合堰等攔河堰改建型式，並設計常流況與 200 年重現期洪水之水文情境進行模擬分析。利用 Wu *et al.* (2021) 亦曾利用美國墾務局泥砂及河川水利研究群所研發之 SRH-2D 模式 (Lai, 2010)，探討曾文水庫空庫排砂條件下，水庫底床沖淤及排砂量推估之模擬分析。陳等 (2017) 則應用所發展之平面二維底床沖淤演變模式，配合地文性土壤沖淤模式演算，以及入庫逕流歷線及懸浮載濃度歷線做為邊界條件，進行阿公店水庫空庫防淤操作過程庫區泥砂運移行為及底床沖淤演變之模擬，進而分析泥砂於庫區內沖淤形態。陳湘盈 (2020)、Wang *et al.* (2020) 及南區水資源局 (2022)，亦利用 SRH-2D 模式模擬曾文水庫及阿公店水庫具備導流槽條件下，對於水庫防淤排砂效率之影響分析。

因此，由上述文獻回顧可知，近年來研究水庫泥砂運移可參考美國墾務局泥砂及河川水利研究群所研發之 SRH-2D 模式，且台灣實施空庫排砂操作之水庫以阿公店水庫為主，因此，本研究應用冲刷槽導流牆減緩水庫淤積之研究，以上述所提之數值模式及阿公店水庫為主要研究對象。

二、研究區域概述

阿公店水庫壩址位於旺萊溪與濁水溪匯流處 (如圖 1 所示)，壩頂標高為 42 公尺，滿水位標高為 35.50 公尺，最高洪水位標高為 40 公尺，總蓄水容量為 4,500 萬立方公尺，係以防洪為主並兼具灌溉與給水標的之多目標水庫。阿公店水庫因應集水區來砂來水特性，每年 9 月 11 日至次年 5 月 31 日止為「蓄水利用期」，蓄水調節供應家用及公共給水、農業用水、工業用水。自每年 6 月 1 日至 9 月 10 日止為「空庫防淤期」，採低水位操作 (EL.31 m 到 32 m)，經由豎井溢洪管或取出水工放空庫水以達防洪、防淤或沉積物處理需要。

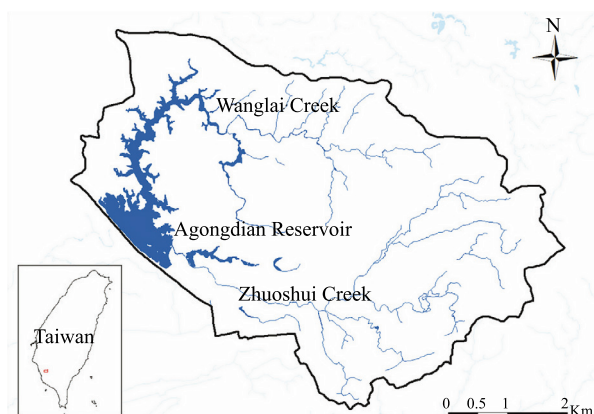


圖 1 阿公店水庫集水區

近年因南部水資源需求增加，阿公店水庫在空庫防淤期亦需穩定供水，故研擬本水庫在低水操作期間，因應濁水溪、旺萊溪約 7:3 的來砂特性，如何運用適當的操作策略、工法或設施，以期同時達到空庫防淤期每日提升供水能力及檢討因應氣候變遷水文條件改變之狀況精進防淤操作條件與水源運用最佳模式，為維持本水庫空庫防淤目標。

阿公店水庫更新改善時考慮到排洪設施位置特性，規劃以溢洪管進行空庫排砂排洪操作，自更新改善後，水庫中間逐漸出現一條由濁水溪來水冲刷而出的溝槽，南水局於 108 年起沿此溝槽擴大開挖，形成人工深槽藉此排砂，經近幾年觀察發現排砂效益良好，如今已成為空庫排砂的重要流路。依規劃構想將水庫分隔為旺萊溪庫區及濁水溪庫區，本研究提出依既有深槽邊界布置分隔堤，在空庫期間可將濁水溪中低流量時之來砂導入深槽內，降低泥砂在庫區內擴散沉澱機會，分隔堤設置為深槽北側導流牆高程 32 公尺，在分隔堤有南側束制情境中，設定深槽南側導流牆自水庫入流斷面處至約 0K+670 處之高程為 32 公尺或 30 公尺，自 0K+670 處至溢洪管處為高程 30 公尺，出流處於溢洪管兩側設置高程 32 公尺的堤牆（如圖 2 所示）。

三、研究方法與原理

3.1 SRH-2D 模式簡述

二維水理輸砂模式 (Sedimentation and River Hydraulics–Two-Dimensional, SRH-2D) 為水利署水利規劃試驗所委託美國墾務局針對臺灣河川所研發之數值模式 (Lai, 2008)，SRH-2D 具穩定之二維演算

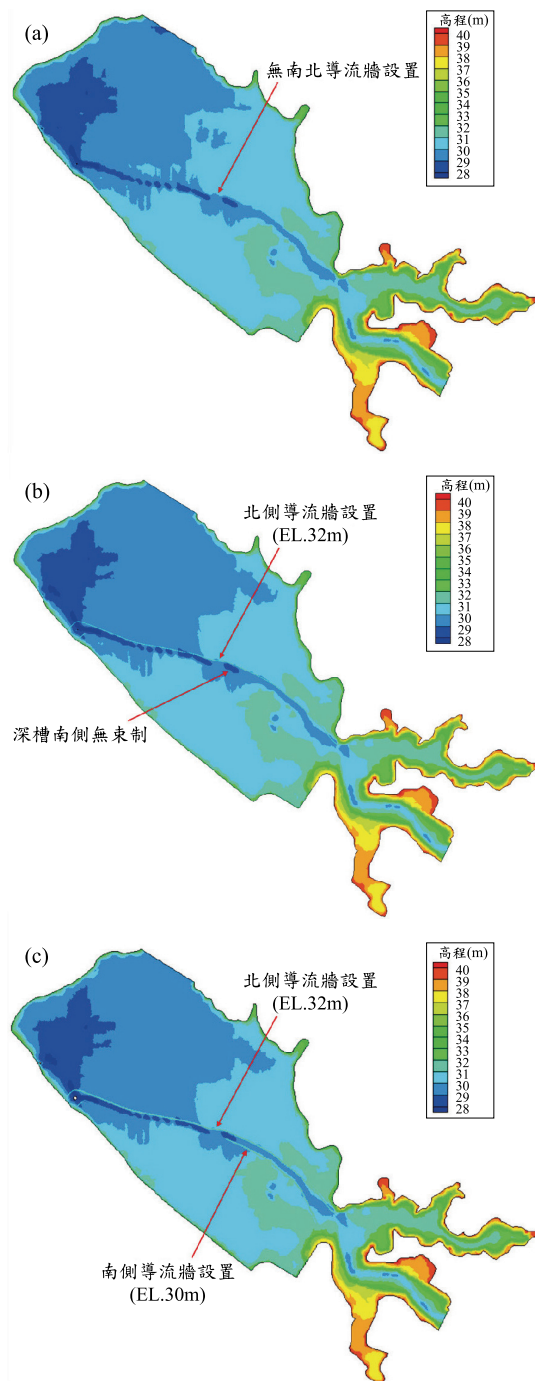


圖 2 阿公店水庫庫區設置導流牆 (a) 無設置、(b) 北側導流牆設置、(c) 南北側導流牆設置

功能，已成功應用於臺灣淡水河、新店溪、大甲溪、濁水溪及北港溪等流域，因此本研究選用 SRH-2D 模式執行應用庫底冲刷槽導流牆減緩水庫淤積之研究。

SRH-2D 係由流域水理輸砂模式 (Sedimentation and River Hydraulics – Watershed, SRH-W) 演進而

來，可計算二維動態的波動方程式，即水深方向平均的 de-Venant 方程式，除由 SRH-W 改進部份演算特性及功能，亦著重於河川的二維建模。就建模能力而言 SRH-2D 可以與現有的模型結合，例如 RMA-2 (U.S. Army Corps of Engineers, 1996) 及 MIKE 21 (Danish Hydraulic Institute, 1996) 等，SRH-2D 在網格建置的要求上相當有彈性，結構網格、非結構網格及混合網格皆可使用，其水流控制方程式如下所示：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU}{\partial x} + \frac{\partial hV}{\partial y} = 0 \quad \text{.....(1)}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial hU}{\partial t} + \frac{\partial hUU}{\partial x} + \frac{\partial hVU}{\partial y} \\ &= \frac{\partial hT_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{xy}}{\partial y} - gh \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + D_{xx} + D_{xy} \end{aligned} \quad \text{.....(2)}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial hV}{\partial t} + \frac{\partial hUV}{\partial x} + \frac{\partial hVV}{\partial y} \\ &= \frac{\partial hT_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{yy}}{\partial y} - gh \frac{\partial z}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + D_{yx} + D_{yy} \end{aligned} \quad \text{.....(3)}$$

式中 t 為時間； h 為水深； U 為 x 方向之水深平均流速分量； V 為 y 方向之水深平均流速分量 g 為重力加速度； T_{xx} , T_{yy} 為水深平均紊流應力； D_{xx} , D_{xy} , D_{yx} , D_{yy} 為水深平均延散項； z_b 為底床高程； ρ 為密度； τ_{bx} , τ_{by} 為底床剪應力。

為能使阿公店水庫庫區模擬能適切反映底床沖淤現象，本研究二維模式採用動床模式計算，動床沖淤之一般沖刷主要源自於推移載與懸浮載之河床粒料傳輸，而 Parker 公式較適合使用於由粗粒料與細粒料所共同組成之河道，因此 SRH-2D 動床模擬以及一般沖刷深度之計算採用 Parker (1990) 之推移載公式，SRH-2D 動床模擬中對於泥砂粒徑為第 k 類之傳輸方程式表示如下：

$$\begin{aligned} & \frac{q_{t,k}^* g(s-1)}{(\tau_b / \rho)^{1.5}} \\ &= \frac{Y_g \left[4\pi(d_k/2)^3 / 3 \right] / \rho_o g(s-1)}{(\tau_b / \rho)^{1.5}} \quad \text{.....(4)} \\ &= P_{ak} G(\phi_k); \quad \phi_i = \frac{\theta_k}{\theta_r} \left(\frac{d_k}{d_{50}} \right)^\alpha \end{aligned}$$

$$G = \begin{cases} 11.933(1 - 0.853/\phi_i)^{4.5} & \phi_i > 1.59 \\ 0.00218 \exp[14.2(\phi_i - 1) - 9.28(\phi_i - 1)^2] & 1.0 \leq \phi_i \leq 1.59 \\ 0.00218 \phi_i^{14.2} & \phi_i < 1.0 \end{cases} \quad \text{.....(5)}$$

$q_{t,k}^*$ 為單位寬輸砂量； g 為重力加速度； $s = \rho_s / \rho - 1$ ； ρ 與 ρ_s 為水與泥砂之密度； Y_g 為一般沖刷單位寬； ρ_o 為土壤孔細率； P_{ak} 為 k 類泥砂粒徑在床面之容積率； τ_b 為河床剪應力； $\theta_k = \tau_b / [\rho g(s-1)d_k]$ 代表 k 類泥砂之 Shield 參數； θ_r 為 Shield 參數，數值範圍為 0.03 ~ 0.08； d_k 為 k 類泥砂直徑； d_{50} 為底床混合粒料之中值粒徑； α 為曝露因子，數值範圍為 0.2 ~ 0.9；本研究 θ_r 及 α 值採用模式預設值分別為 0.04 和 0.65。

3.2 邊界條件概述 (含上下游邊界條件及粒徑說明) 及模式檢定驗證

本研究二維水理輸砂數值模式之模擬範圍涵蓋整體阿公店水庫庫區，使用 SMS 13.0 版 (Surface-water Modeling System) 建置 SRH-2D 執行二維模擬所需之網格檔案，上游邊界係自水庫入流斷面沿濁水溪向上游延伸約 600 公尺處，入流寬度約 100 公尺，於水庫入流斷面處設置一長 124 公尺及寬 10 公尺之固床工區域，下游邊界於庫區沿右副壩壩體約 0K + 220 和 0K + 440 處分別設置灌溉管及溢洪管 2 處出水工，灌溉管 (豎管式) 設計取水量為 15 cms，管徑為 1.5 公尺，溢洪管 (喇叭口豎管式) 設計排洪量為 85 cms，管徑為 2.8 公尺。數值高程地形 (DEM) 資料採用阿公店水庫 2020 年地形量測成果，設定上游網格密度約 10 ~ 15 公尺，庫區網格密度約 5 ~ 10 公尺，深槽網格密度約 2 ~ 2.5 公尺，內插地形分析採用反距離加權 (Inverse distance weight) 方法將 DEM 資料內插至每個網格單元中，本研究建置之阿公店水庫二維網格及布置如圖 3 所示。

上游入流之流量與輸砂率定曲線，則採用經濟部水利署南區水資源局 109 年「阿公店水庫空庫防淤泥砂觀測及防洪運轉決策」報告中泥砂運移分析成果，濁水溪和旺來溪流量分別採用白嶺箱涵和斗姥廟水文站之流量與輸砂率定曲線，流量 Q 和輸砂量 Q_s 單位皆為 cms，流量與輸砂量關係式如下：

$$\text{白嶺箱涵水文站：} Q_s = 0.0022 \times Q^{1.456} \quad \text{.....(6)}$$

$$\text{斗姥廟水文站：} Q_s = 0.0007 \times Q^{1.0437} \quad \text{.....(7)}$$

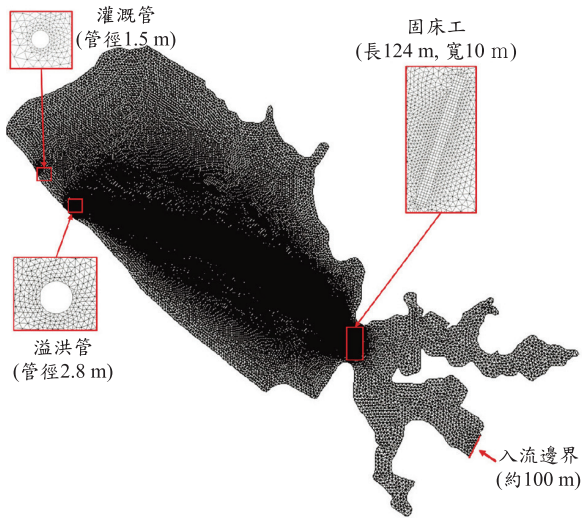


圖 3 阿公店水庫二維模擬網格

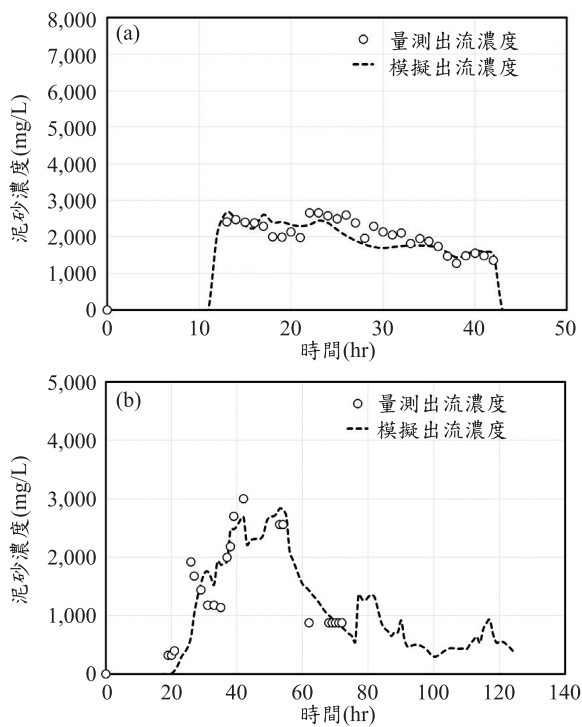


圖 4 阿公店水庫現況庫區泥砂濃度檢定驗證案例 (a) 2010 凡那比颱風、(b) 2017 泰利颱風

完成阿公店水庫現況庫區二維模式建置後，本研究進行阿公店水庫歷史颱風事件檢定驗證，檢定驗證事件採用 2010 年凡那比（經濟部水利署，2020）和 2017 年泰利颱風事件，以實測出流濃度採樣作為模式檢定驗證之依據。由歷史颱風事件一件檢定驗證求得適用於本研究阿公店水庫之二維模式輸砂與水理參數，其中泥砂傳輸方程式採用 Parker (1990) 公式，庫區中值粒徑 (D_{50}) = 0.039 mm，時間間隔 (Δt) = 1.0 (hr)，曼寧值 (n) = 0.020，沉積係數 = 0.25，沖刷係數 = 1.0，調適長度 (L) = 1.e-6。出流泥砂濃度檢定及驗證成果如圖 4 所示，其中模式檢定案例（凡那比）所模擬出流濃度之均方根誤差 (RMSE) 為 282.45 ppm，而驗證案例（泰利）所模擬出流濃度之 RMSE 值為 439.38 ppm，由圖可知模擬泥砂濃度雖量值與實測雖有差異，但整體變化趨勢大致實與測值相符。

四、研究結果與分析

本研究針對阿公店水庫現況地形及沖刷槽導流牆設置地形規劃模擬情境案例，案例 1 地形為 2022 年 9 月現地量測資料；案例 2 地形為沖刷槽北側設置 EL.32 m 之導流牆，南側無束制；案例 3 地形為沖刷槽北側設置 EL.32 m 之導流牆，南側自庫區入流處至 0K+670 m 處、自 0K+670 m 處至溢洪管處分別設置 EL.32 m 和 EL.30 m 之導流牆。上游邊界濁水溪和旺來溪入流量，考量最大排砂效益應與可空庫排砂情境及防淤延時相關，因此入流水文情境各規劃模擬案例均為 1.11 年重現期距 ($Q_{1.11}$) 流量歷線，總延時為 29 小時，下游邊界為壩前溢洪管出流管口處設定出流水位，而為了探討不同起始水位影響排砂效率，因此在 $Q_{1.11}$ 情境之溢洪管出流起始水位分別設定 EL.28 m 和 EL.30 m 兩種，本研究規劃之模擬情境案例如表 1 所示，其中濁水溪尖峰入流量為 47 m^3/s ，旺萊溪尖峰入流量為 81 m^3/s 。

表 1 阿公店水庫二維模擬情境案例比較 (針對 $Q_{1.11}$)

模擬情境	沖刷槽導流牆布置	濁水溪 入流量 peak (m^3/s)	旺萊溪 入流量 peak (m^3/s)	溢洪管 出流起始水位 (m)
案例 1-1	無沖刷槽導流牆	47	81	30
案例 1-2		47	81	28
案例 2-1	沖刷槽北側佈置導流牆	47	81	30
案例 2-2		47	81	28
案例 3-1	沖刷槽南北側皆佈置導流牆	47	81	30
案例 3-2		47	81	28

表 2 出流泥砂量及排砂效率比

模擬情境	最大出流泥砂濃度 (mg/L)	累積出流泥砂量 (萬噸)	排砂效率 (%)	排砂效率差異 (%)	排砂效率增加率 (%)
案例 1-1	21,348	17.11	62.33	0.71	-
案例 1-2	24,749	17.31	63.04		-
案例 2-1	26,121	20.41	74.33	2.82	12.00
案例 2-2	26,211	21.18	77.15		14.11
案例 3-1	26,224	21.87	79.66	1.01	17.33
案例 3-2	26,252	22.15	80.67		17.63

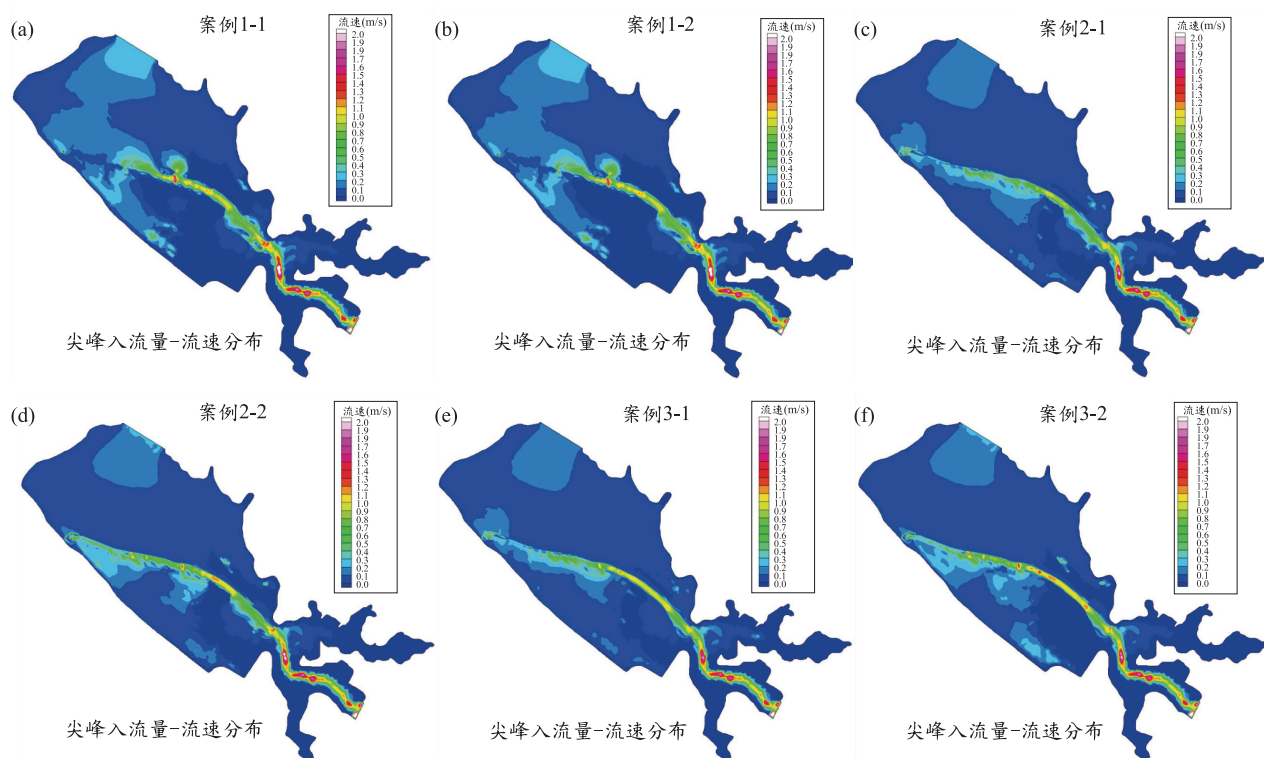


圖 5 尖峰入流量時庫區流速分布 (a) 無沖刷槽導流牆案例 1-1、(b) 無沖刷槽導流牆案例 1-2、(c) 沖刷槽北側佈置導流牆案例 2-1、(d) 沖刷槽北側佈置導流牆案例 2-2、(e) 沖刷槽南北側皆佈置導流牆案例 3-1、(f) 沖刷槽南北側皆佈置導流牆案例 3-2

本研究於阿公店水庫二維數值模式中監測入出流邊界之流量、輸砂量和濃度歷線，彙整各模擬情境案例累積入流、出流泥砂量、最大出流泥砂濃度及排砂效率比如表 2 所列。由表 2 排砂效率比計算結果可知，在不同溢洪管出流水位 ($Q_{1.11}$) 情境下，低水位 (EL.28 m) 排砂效率略高於高水位 (EL.30 m) 之排砂效率，排砂效率比增加幅度 (排砂效率差異 (%)) 約為 0.71 %~2.82 %之間，但無設置沖刷槽導流牆之差異變化並不明顯，同樣地，最大出流泥砂濃度亦無明顯變化，最大出流泥砂濃度約介於 21,348 mg/L 及 26,252 mg/L 之間，但仍呈現具備沖刷槽導流牆後，最大出流泥砂濃度有略為增加的趨勢，因此由累積

出流泥砂量及排砂效率值，可看出具備沖刷槽導流牆後，排砂效率約可提升 12 %至 17.63 %之間，且沖刷槽南北側皆佈置導流牆略優於沖刷槽北側佈置導流牆。

本研究阿公店水庫於 $Q_{1.11}$ 年重現期入流量、起始水位 EL.30 m 及 EL.28 m 條件下之二維模擬成果圖 5 ~ 圖 8 所示。由尖峰入流量時刻流速、泥砂濃度、剪應力分布模擬成果 (圖 5 ~ 圖 7) 可知，無沖刷槽導流牆設置的情形下 (案例 1-1、1-2)，濁水溪入庫渾水易漫流擴散至庫區北側；有沖刷槽導流牆設置 (北側 EL.32 m 導流牆、南側無束制) 的情形下 (案例 2-1、2-2) 可有效將濁水溪入庫渾水集中於

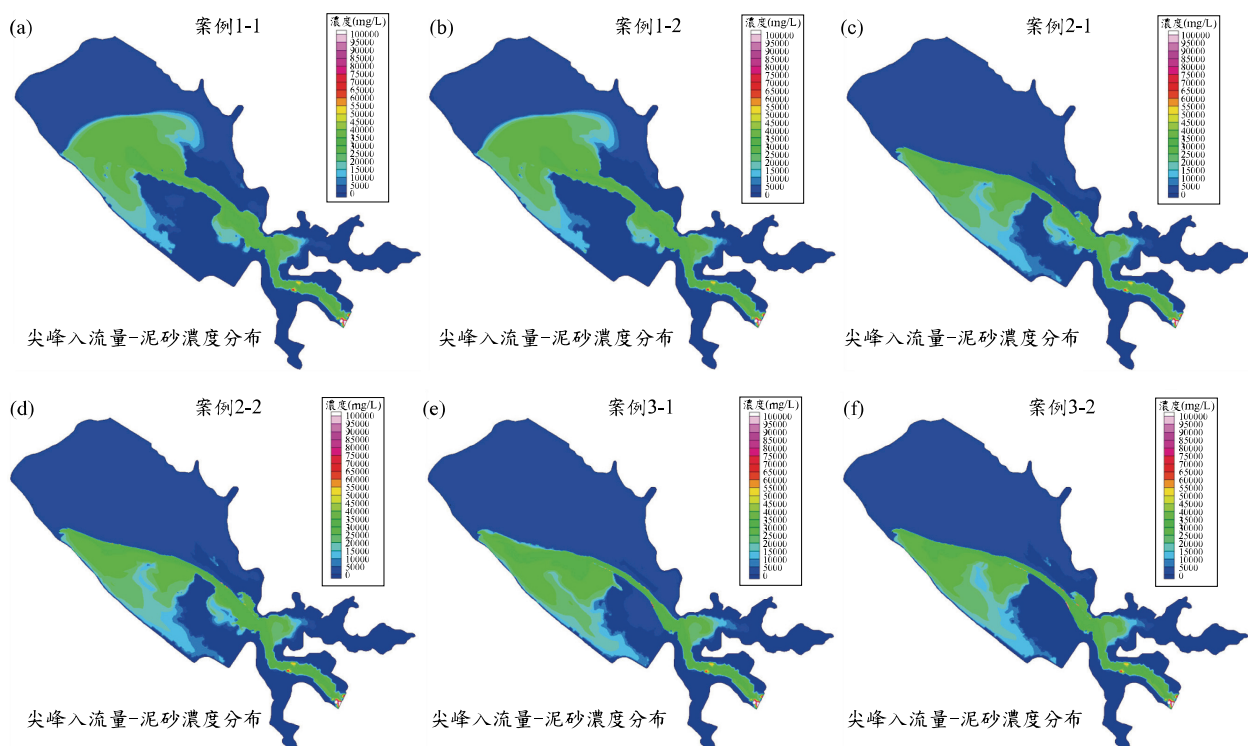


圖 6 尖峰入流量時庫區濃度分布 (a) 無冲刷槽導流牆案例 1-1、(b) 無冲刷槽導流牆案例 1-2、(c) 冲刷槽北側佈置導流牆案例 2-1、(d) 冲刷槽北側佈置導流牆案例 2-2、(e) 冲刷槽南北側皆佈置導流牆案例 3-1、(f) 冲刷槽南北側皆佈置導流牆案例 3-2

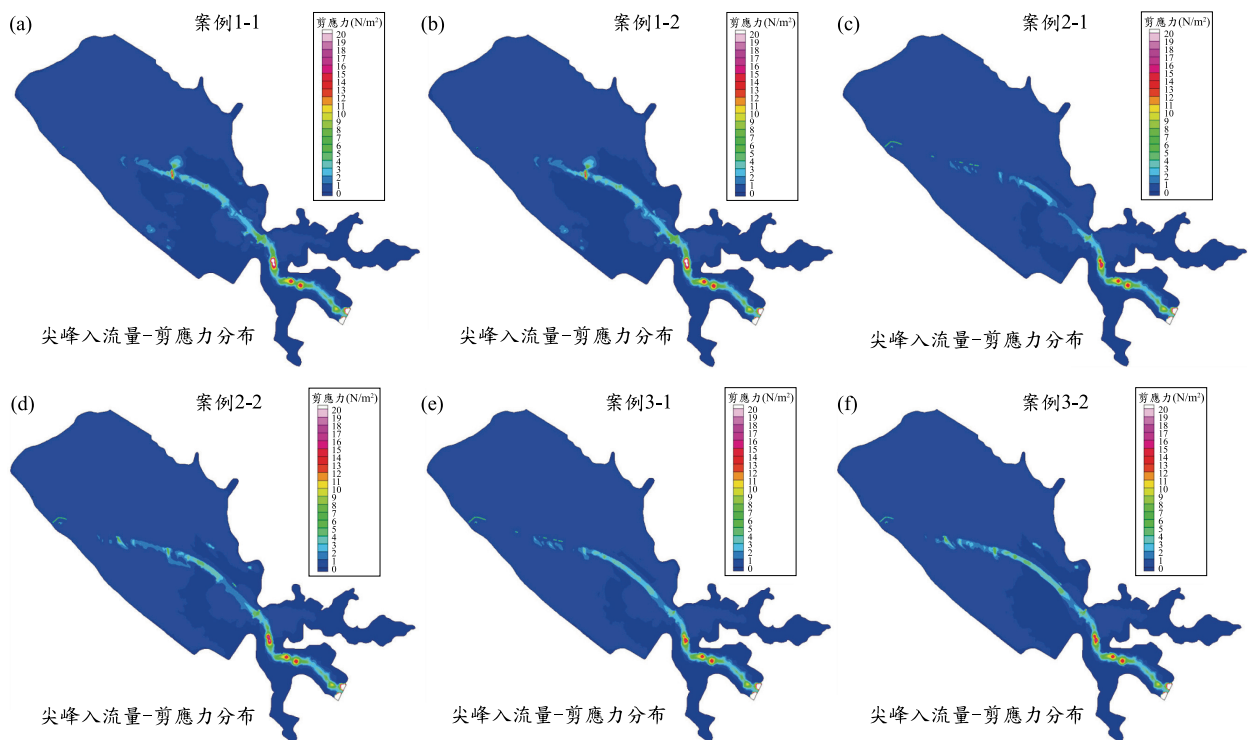


圖 7 尖峰入流量時庫區剪力分布 (a) 無冲刷槽導流牆案例 1-1、(b) 無冲刷槽導流牆案例 1-2、(c) 冲刷槽北側佈置導流牆案例 2-1、(d) 冲刷槽北側佈置導流牆案例 2-2、(e) 冲刷槽南北側皆佈置導流牆案例 3-1、(f) 冲刷槽南北側皆佈置導流牆案例 3-2

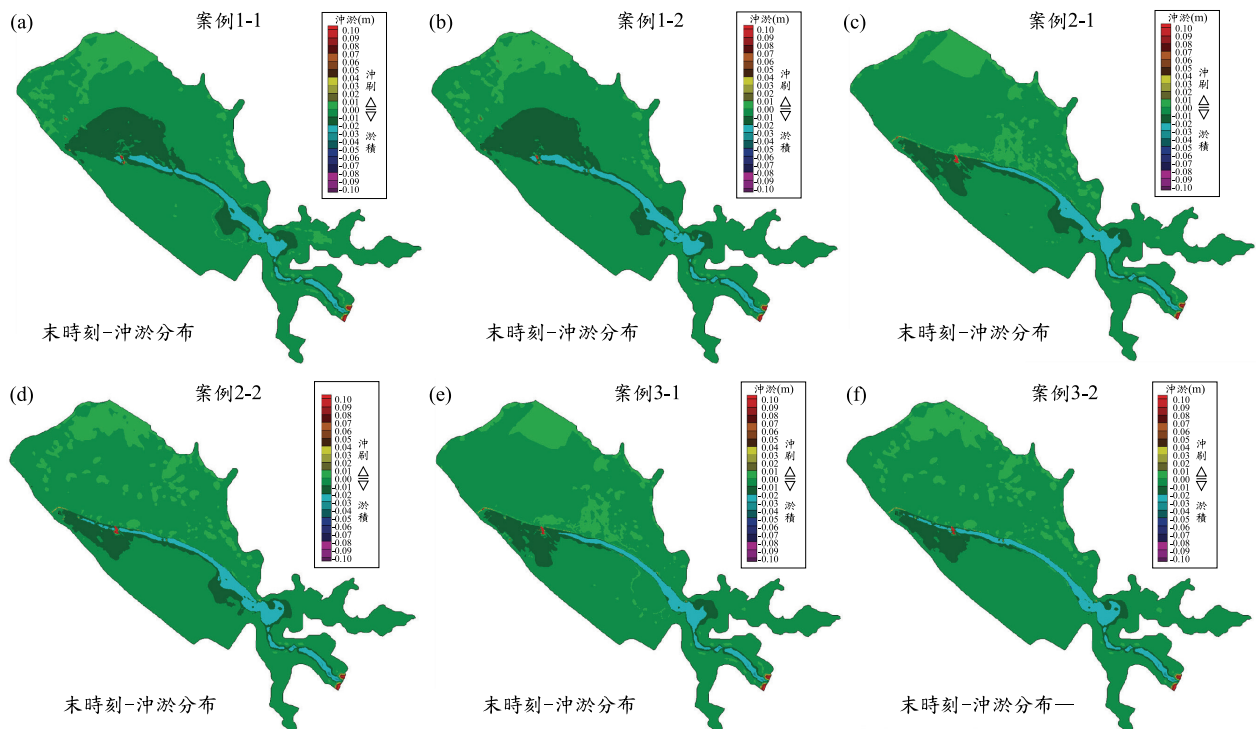


圖 8 模擬結束後庫區底床沖淤分布 (a) 無沖刷槽導流牆案例 1-1、(b) 無沖刷槽導流牆案例 1-2、(c) 沖刷槽北側佈置導流牆案例 2-1、(d) 沖刷槽北側佈置導流牆案例 2-2、(e) 沖刷槽南北側皆佈置導流牆案例 3-1、(f) 沖刷槽南北側皆佈置導流牆案例 3-2

沖刷槽區域內；沖刷槽南側增設導流牆的情形下 (案例 3-1、3-2)，南側 EL.32 m 導流牆 (入流處至 0K + 670 m) 可將渾水集中於沖刷槽，但仍有部分渾水自南側 EL.30 m 導流牆 (0K + 670 m 至溢洪管) 漫流至庫區南側。

由末時刻淤積分布模擬成果 (圖 8) 可知，無沖刷槽導流牆設置之起始水位 EL.30 m (案例 1-1) 和 EL.28 m (案例 1-2) 情境下，庫區北側部分區域皆有明顯淤積情形；有沖刷槽導流牆設置 (北側 EL.32 m 導流牆、南側無束制) 之起始水位 EL.30 m (案例 2-1) 和 EL.28 m (案例 2-2) 情境下，沖刷槽北側的淤積分布情況較案例 1 有所改善；沖刷槽南側增設導流牆之起始水位 EL.30 m (案例 3-1) 和 EL.28 m (案例 3-2) 情境下，入流處至 0K + 670 m 段南側淤積分布較案例 2 有改善情形，但主要沖淤位置仍集中於沖刷槽內。

就不同起始水位條件而言，高起始水位情境 (EL.30 m) 之流速、泥砂濃度、剪應力、沖淤分布與低起始水位 (EL.28 m) 情境相似，但低起始水位之出流最大出流濃度略低於高起始水位情境，且高起始水位之排砂效率略優於低起始水位情境；就有無和不同沖刷導流牆設置而言，與現況 (案例 1) 相

比，有沖刷槽設置導流牆 (案例 2) 可較有效將入流泥砂集中於深槽往溢洪管方向出流，亦使溢洪管出流泥砂濃度提高，但南側無束制會使渾水運移至溢洪管之整體成效降低，而在南側有束制下 (案例 3) 主要淤積區域則可集中於沖刷槽內，且南側 EL.32 m 導流牆段 (入流處至 0K + 670 m) 集中濁水流入渾水成效較佳，本研究二維模擬成果可作為後續維護清淤優先處理位置之參考。

五、結論

本研究以 SMS (Surface Water Modeling System) 建置阿公店溪上游阿公店水庫模型，以探討應用沖刷槽設置對於減緩水庫淤積效應及壩前出水排砂效率之影響。研究納入考量庫區沖刷槽設置前後之數值地形，並設計不同重現期下入庫流量及出流水位之水文模擬情境案例。以二維動床模式 (SRH-2D) 模擬阿公店水庫庫區中水砂運移及於溢洪管出流之情形，模擬有無沖刷槽導流牆情境時庫區之渾水流運移及出流泥砂濃度變化。

考量在溢洪管設計流量內、相對較少的起始庫

容稀釋入流渾水濃度的程度較低，以及因空庫時間長短的影響下，為探討不同起始水位對排砂效率之影響，本研究以 1.11 年重現期 ($Q_{1.11}$) 水文模擬情境為研究主軸，以起始水位 EL.28 m 及 EL.30 m 情境進行庫底沖刷槽減緩水庫淤積之研究，模擬結果顯示在有無具備沖刷槽導流牆情形下，兩種起始水位排出渾水濃度差異並不明顯，低水位之排砂效益略高於高水位 0.71 % 至 2.82 % 之間，但出流泥砂濃度尖峰值均可達 2 萬 mg/L 以上，且排砂效率均可達 60 % 以上，最高可達約 80 % 左右，因此，在沖刷槽北側或是南北側皆佈置導流牆後，溢洪管排砂效率分別平均可提升約 13 % 及 17.5 %。由此可見，利用佈置導流牆方式所建置之沖刷槽，可提升阿公店水庫約 13 % 以上之排砂效率。此外，若入庫流量或泥砂量增加，泥砂落淤可能會導致淤積程度加劇，故有無沖刷槽導流牆設置於不同重現期洪水流量下之排砂效率可作為後續研究的探討重點。

然而設置沖刷槽導流牆後，由於主要入流泥砂濃度可集中於沖刷槽內，導致溢洪管出流泥砂濃度有升高之趨勢，沖刷槽內亦有淤積潛勢，經模擬分析在低流量 ($Q_{1.11}$) 低水位 (EL.28 m) 時溢洪管出流排砂效果顯著，本研究兩種沖刷槽導流牆設置皆可有效提升排砂效率，其中北和南側皆設置導流牆具最佳排砂效率，故本研究初步建議每年的機械清淤可優先針對沖刷槽內淤砂進行清除，可增進汛期時水力排砂之防淤成效，然而導流牆施工方式、經濟效益評估或是其他重現期水文情境之影響，則需於未來透過研究作進一步分析評估。

誌謝

本研究承蒙科技部計畫編號 MOST 111-2221-E-002-062 之經費補助，以及經濟部水利署南區水資源局及黎明工程顧問股份有限公司所提供之經費補助、沖刷槽設計、水庫水文、防汛與泥砂濃度觀測資料等，以及國立臺灣大學水工試驗所提供人力及設備支援，使本研究得以完成，謹致謝忱。

參考文獻

1. Danish Hydraulic Institute “MIKE21 Hydrodynamic Module Users Guide and Reference Manual,” Treviso, Pa, USA (1996).
2. Ellison, T. H., and Turner, J. S., “Turbulent Entrainment in Stratified Flow,” *Journal of Fluid Mechanics*, 6, 423-448(1959).
3. Hsieh T. Y., and Yang J. C., “Investigation on the Suitability of Two-dimensional Depth-averaged Models for Bend-flow Simulation,” *J. Hydraulic Eng.*, 102(9), 1327-1342(2003).
4. Huang, C. C., Lai, Y. G., Lai, J. S., and Tan, Y. C., “Field and Numerical Modeling Study of Turbidity Current in Shimen Reservoir During Typhoon Events,” *Journal of Hydraulic Engineering* 145(5), 05019003(2019).
5. Hung, M. C., Hsieh, T. Y., Wu, C. H. and Yang, J. C., “Two-dimensional Nonequilibrium Noncohesive and Cohesive Sediment Transport Model,” *J. Hydraul. Eng.*, 135(5), 369-382(2009).
6. Kondolf, M., Gao, Y., Annandale, G.W., Morris, G.L., Jiang, E., Zhang, J., Cao, Y., Carling, P., Fu, K., Guo, Q., Hotchkiss, R., Peteuil, C., Sumi, T., Wang, H.W., Wang, Z., Wei, Z., Wu, B., Wu, C., and Yang, C.T., “Sustainable Sediment Management in Reservoirs and Regulated Rivers: Experiences from Five Continents,” *Earth's Future*, 1-25 (2014).
7. Lai, Y. G., “Two-Dimensional Depth-Averaged Flow Modeling with an Unstructured Hybrid Mesh,” *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(1), 12–23 (2010).
8. Lai, Y. G., and Wu, K. W., “A Numerical Modeling Study of Sediment Bypass Tunnels at Shihmen Reservoir, Taiwan,” *Int. J. Hydro* 2, 72-81 (2018).
9. Lai, Yong G., “SRH-2D version 2: Theory and User's Manual,” U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Technical Service Center Denver, Colorado (2008).
10. Lai, Yong G., Huang, Jianchun and Wu, Kuowei., “Reservoir Turbidity Current Modeling with a Two-dimensional Layer-averaged Model,” *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(12), (2015).
11. Parker, G., “Surface-based Bed Load Transport Relation for Gravel Rivers,” *J. Hydraulic Research*, 28(4), 417-436 (1990).
12. U. S. Army Corps of Engineers “Users' Guide to RMA2-Version 4.3,” Waterway Experiment Station, Hydraulic Laboratory, Vicksburg, USA (1996).
13. Wang, H. W., Tsai, B. S., Hwang, C., and Chen, G. W., “Efficiency of the Drawdown Flushing and Partition

- Desilting of a Reservoir in Taiwan,” *Water*, 12, 2166; doi:10.3390/w12082166(2020).
14. Wu, C. W., Chou, Frederick N.-F., and Lee, F. Z., “Minimizing the Impact of Vacating Instream Storage of a Multi-reservoir System: A Tradeoff Study of Water Supply and Empty Flushing,” *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(4), 2063-2087(2021).
 15. 水利規劃試驗所, 「水庫防淤管理與技術應用」, 經濟部水利署, 2020。
 16. 李豐佐、黃茂松、劉政其、宋德仁、劉桂南、闕蓓德, 「應用二維數值模式分析攔河堰型式影響河道防洪及輸砂之研究」, 農業工程學報, 67(2), 56-67, 2021。
 17. 李豐佐、賴進松、林詠彬、張國鎮、黃振家、李柏翰、古孟晃、劉小勤, 「橋墩冲刷深度之數值模擬與推估-以濁水溪名竹大橋為例」, 臺灣水利, 66(3), 57-69, 2018a。
 18. 李豐佐、賴進松、林詠彬、張國鎮、劉小勤、黃振家、林永峻、張正春、林清富、王勝德, 「應用動床模式建構橋墩冲刷模擬分析操作系統」, 農業工程學報, 64(4), 58-75, 2018b。
 19. 李豐佐、賴進松、韓仁毓、張文鎰、楊淑媛、郭文達, 「影像分析技術辨識丁壩變動結合水理動床模擬分析之研究應用」, 臺灣水利, 66(4), 18-32, 2018c。
 20. 南區水資源局, 「阿公店水庫清淤策略檢討暨提升水源利用方案規劃」, 經濟部水利署, 2022。
 21. 陳金諾、蔡智恆、黃智聰、鄭仁嶽, 「空庫排砂之水庫泥砂運移型態分析」, 臺灣水利, 65(1), 26-38, 2017。
 22. 陳湘盈, 「應用異重流二維層平均數值模式分析曾文水庫出水工之出流泥砂濃度及排砂效率」, 碩士論文, 國立臺灣大學生物環境系統工程學研究所, 2020。
 23. 韓其為, 「水庫淤積」, 科學出版社, 2003。
- 收稿日期：民國 112 年 04 月 07 日
修改日期：民國 112 年 05 月 04 日
接受日期：民國 112 年 05 月 16 日