



# 應用 數位孿生 評估 水庫防淤 的成效

李豐佐\* / 國立中興大學土木工程學系 助理教授  
杜豫云 / 國立中興大學土木工程學系 專任助理

臺灣水庫淤積情形日益嚴重，因此臺灣各地水庫陸續建造防淤隧道，相關研究隨之興起，然而洪水期間在水庫現場進行量測具有相當的風險，因此利用二維數值模型進行模擬與評估成為重要方法，本研究利用數值模型模擬南化水庫防淤隧道之清淤成效，將模擬成果應用數位孿生概念將其無因次化後，進行不同規模洪水的南化水庫排砂效率評估，並將其應用於評估曾文水庫防淤隧道，比較不同情況下防淤隧道之排砂效率，研究分析發現當洪水規模越大時，防淤隧道之排砂效率越高，且當水流運移距離越短排砂效率也會高，在長期分析下，相對於曾文水庫的水庫壩前防淤，南化水庫之水庫中游防淤環境較利於防淤隧道進行排砂，且在 ICR (Inflow Capacity Ratio) 分析中也有相同的規則現象。

關鍵詞：數值模型、數位孿生、排砂效率

The sedimentation problem in Taiwan's reservoirs has become increasingly severe. As a result, desilting tunnels have been constructed in reservoirs across Taiwan, leading to a rise in related research. However, conducting measurements on-site during floods poses significant risks. Therefore, numerical modeling has become a crucial method for simulation and evaluation. This study employs a 2-D numerical model to simulate the sediment desilting efficiency of the desilting tunnel in Nanhua Reservoir. After digitizing the simulation results as digital twins, the study evaluates sediment desilting efficiency under different flood magnitudes and compares the efficiency of desilting tunnels under various conditions using data from Zengwen Reservoir. The analysis reveals that sediment desilting efficiency increases with flood magnitude and that shorter sediment transport distances lead to higher efficiency. Furthermore, long-term analysis indicates that the environmental conditions of Nanhua Reservoir are more favorable for sediment sluicing via the tunnel. The same findings are observed in the Inflow Capacity Ratio (ICR) analysis.

Key words: numerical model, digital twins, desilting efficiency

\* 通訊作者，fzlee@nchu.edu.tw

## 前言

臺灣地處環太平洋地震帶以及副熱帶季風氣候，頻繁地震加上每年季風與颱風所帶來的豐沛雨量常導致山區脆弱地質泥沙沖刷至下游，導致臺灣地區水庫淤積情形日益嚴重，近年來政府陸續實施各種防淤措施，防淤隧道便是其中一種，目前國內已興建防淤隧道之水庫有石門水庫（阿姆坪隧道）、曾文水庫以及南化水庫，其中曾文水庫之防淤隧道位於大壩前，南化水庫之防淤隧道則是位於水庫中間段，本研究之主要研究對象為南化水庫，透過數值模型模擬不同重現期下的南化水庫防淤隧排砂情形，並將模擬資料與曾文水庫蒐集資料進行比較，以分析不同防淤隧道位址與水庫條件對防淤隧道的排砂效率影響。

根據文獻可知，傳統上常利用水平二維數值模式進行水庫防淤隧道排砂效率之評估，譬如 Lai *et al.* [1,2]、Huang *et al.* [3]、Huang and Lee [4] 均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) [1,5], 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。Wu *et al.* [6] 亦曾利用美國墾務局泥沙及河川水利研究群所研發之 SRH-2D 模式, 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。陳湘盈 [7]、Wang *et al.* [8]、Lee and Huynh Nguyen [9] 及 Lee and Du [10], 亦曾利用 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。然而每個水庫的水文、地文與操作皆不相同, 因此常常每個水庫均需要個別演算後方能準確評估其排砂隧道防淤成效, 因此如何能將單一水庫模擬成果應用至其他水庫, 則可借鏡於數位孿生 (Digital twins) 概念, 將模擬結果無因次化, 則可用於其他評估水庫防淤的成效。

Digital twins 在洪水預測與水資源管理中應用日益廣泛, 融合深度學習與物理模型的發展趨勢明顯。Castangia 等人 [11] 利用 Transformer 架構提升洪水預測的準確性與即時性; Kabir 等人 [12] 與 Hosseiny [13] 則分別運用 CNN 與 U-NetRiver 模型, 精準模擬淹水範圍與水深。Cedillo [14] 與 Adriano [15] 進一步探索 PINN 與 CNN 結合遙測資料, 提升空間解析度與模型泛化能

力。Jamali [16] 與 Deng [17] 則結合資料驅動與物理模型, 提高模擬速度與精度, 驗證於三峽水庫。Karim [18] 與 Patro [19] 指出, 儘管 ML/DL 模型具即時性與準確性優勢, 但仍受限於資料庫標準化與地區性差異。最後, Lukas [20] 與 Honek [21] 關注水庫泥沙淤積問題, 運用 MLP-ANN 與 RUSLE 等方法預測淤積趨勢, 反映氣候變遷對水資源永續性的挑戰。整體而言, Digital twins 正逐步朝向整合多源資料與模型互補發展, 助力洪水防災與資源管理決策。

## 研究區域

### 研究區域概述

南化水庫位於台南市後堀溪, 完工日期為民國 82 年, 水源不僅來自本身後堀溪還有高屏溪支流旗山溪的甲仙堰越域引水, 如圖 1 所示, 水庫設計容量為 1 億 5,805 萬立方米, 滿水位標高 180 公尺, 壩頂標高 187.5 公尺, 溢洪道形式為無閘門控制 U 型溢流堰, 堰頂標高 180 公尺, 自民國 98 年莫拉克颱風導致南化水庫壩前淤積面達 EL.152.5 公尺, 淤積情況十分嚴重, 而截至民國 101 年 10 月南化水庫之有效蓄水量約為 9,943 萬立方公尺, 僅剩原始設計容量之 63%, 因此於民國 100 年起計畫興建南化水庫防洪防淤設施, 於民國 104 年正式動工興建防淤隧道, 並於民國 110 年啟用。

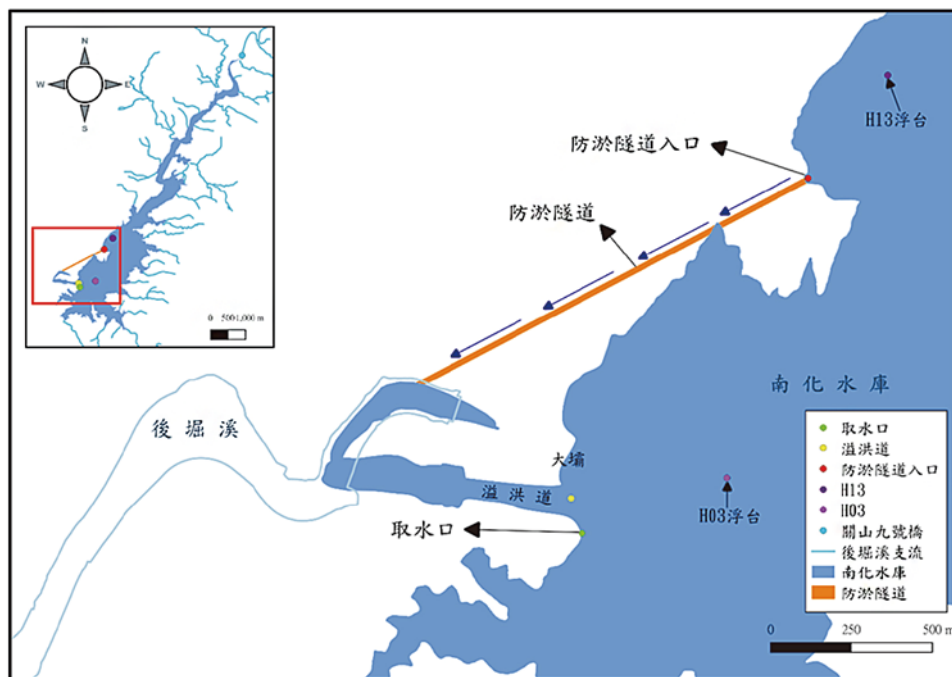


圖 1 甲仙堰越域引水位置圖

## 研究方法

本研究採用二維數值模型進行南化水庫沖淤模擬，採用民國 110 年盧碧颱風以及 113 年凱米颱風與模型試驗之卡玫基颱風與 25 年重現期試驗進行模式之檢驗證，確認模式設定與網格大小之準確性與模式穩定性，再整理出南化水庫各重現期之流量歷線並以固定之操作模式進行模擬，再蒐集曾文水庫之資料以及應用數位孿生的方式進行比較，分析兩者資料並觀察差異，以觀察不同水庫防淤條件對防淤隧道之影響。

## 數值模式 (SRH-2D)

本研究應用 SRH-2D 二維層平均數值模式 (Two-Dimension layer-averaged model, 2DLAM) 模擬南化水庫內渾水流，2DLAM 控制方程式包含渾水流混合之質量與動量守恆定律、泥沙運移與動床方程式，並考慮清水、渾水流、底床之間的交互作用，基於有限體積法求解進行渾水流模擬 [4,10,22-24]。

## 數值模式建置與驗證

### 網格編制

本研究採用 SMS (Surface-water Modeling System) 進行網格編制，並採用結構型網格，考量到水工結構物大小以及編制網格之合理性，參考 Hung *et al.* [22] 模擬水庫渾水運移特性所建議之值，防淤隧道及大壩、取水口附近之網格大小約為 10 公尺左右，整體網格大小平均約 20 公尺，總網格數為 19,456 個。

本研究以民國 113 年凱米颱風、民國 110 年盧碧颱風以及水工模型之卡玫基與 25 年重現期洪水作為檢驗證事件，將設定之模擬參數透過模擬值與真實情況進行比較，並修正模擬參數以達到最符合南化水庫現況之參數。其中凱米颱風採用民國 113 年 7 月 24 日至 7 月 28

日共計 120 小時之資料，主要比較防淤隧道之排砂量以及泥沙濃度變化，民國 110 年盧碧颱風則採用資料自民國 110 年 8 月 4 日至 8 月 8 日共計 120 小時，而卡玫基颱風以及 25 年重現期洪水情境，則採用來自於南化水庫防淤隧道工程計畫中的水工模型試驗報告 [25]，卡玫基颱風試驗洪峰值為 2,540 m<sup>3</sup>/s，試驗規劃將洪成區分為六個時段，入流量分別為 600 m<sup>3</sup>/s、2,540 m<sup>3</sup>/s、1,300 m<sup>3</sup>/s、600 m<sup>3</sup>/s、425 m<sup>3</sup>/s、以及 50 m<sup>3</sup>/s。25 年重現期試驗洪峰值為 1,659 m<sup>3</sup>/s，試驗規劃將洪成區分為八個時段，入流量分別為 425 m<sup>3</sup>/s、900 m<sup>3</sup>/s、1,300 m<sup>3</sup>/s、1,618 m<sup>3</sup>/s、1,300 m<sup>3</sup>/s、900 m<sup>3</sup>/s、425 m<sup>3</sup>/s 以及 50 m<sup>3</sup>/s，綜合以上四場模式模擬之檢驗證，數值模型在水工模型試驗模擬時在濃度變化以及排砂量上都有相當的準確程度，甚至誤差可以達到 2.4%，而在實際颱風事件模擬時雖不如水工模型試驗一般誤差較小，但是在濃度分布上模擬值範圍不超過實際量測值之範圍，且在預估排砂量之誤差約 ±14%，還是具有相當的準確程度，檢驗證參數如表 1 所列。

### 重現期模擬邊界條件

參考水利署曾文溪水系曾文溪治理規劃報告 [26]，建議採用無因次單位歷線法推估洪峰流量值及降雨延時 48 小時雨型分布，進行轉換後得出南化水庫重現期流量歷線，如圖 2 所示。此外，根據南化水庫防洪防淤操作規則以滿水位為優先考量，因此初始條件設定為滿水位，並優先由防淤隧道將超出庫容之流量排出，一旦超出流量大於防淤隧到設計最大流量 1,000 m<sup>3</sup>/s，多餘之流量再由溢洪道排出，以此做為防淤隧道操作設定進行每一場重現期之模擬，另外，入流濃度參考 112 年南化水庫運轉決策支援及泥沙運移監測報告 [27] 中的回歸公式 (如圖 3 所示)。

表 1 檢驗證參數

Parameter		Value
Time step(s)		0.1
Turbulence Model		PARA (Parabolic)
Turbulence parameter for the PARA Model (0.05-1.0)		0.7
Sediment Transport Capacity Equation		EH (Engelund-Hansen)
Adaptation Coefficients for Suspended Load	Deposition parameter	0.5
	Erosion parameter	1.0
Bedload Adaptation Length		default
Constant Manning Coefficient		0.01
Initial Condition		Full W.S.E = 180m

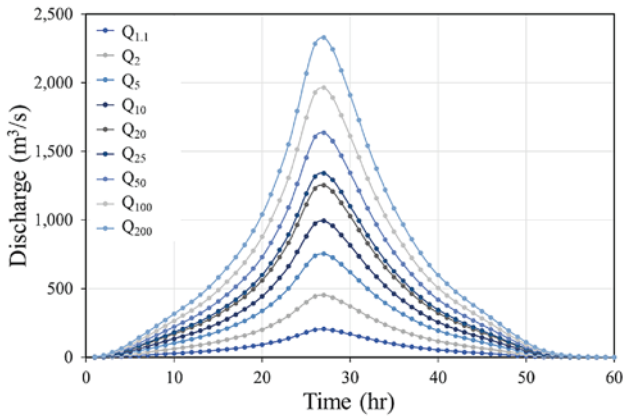


圖 2 南化水庫各重現期流量歷線

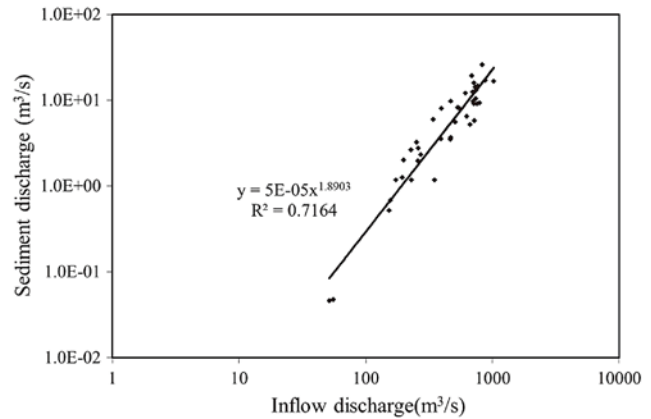


圖 3 南化水庫關山九號橋入流量與入砂量關係

## 模擬成果分析

### 入庫渾水泥砂運移模擬

圖 4 為當南化水庫防淤隧道達到最高峰濃度時，整體南化水庫之濃度分布，可以發現隨重現期距增加，整體濃度分布也隨之增加，運移至下游的泥砂也有明顯增加的現象。在濃度變化的分析，本研究將入流尖峰濃度設為 100%，並且將出水口位置與上游邊界距

離除以上下之間游距離換算成百分比比例，將不同出流邊界之濃度進行換算分析，可以發現當重現期距減小時，在相同的出流邊界，也就是相同的運移距離下濃度折減的情況就越明顯，表示在相同的運移距離下，當入流流量越大時，濃度折減的情況相對不明顯，可以排出較大量的泥砂（如圖 5 所示）。

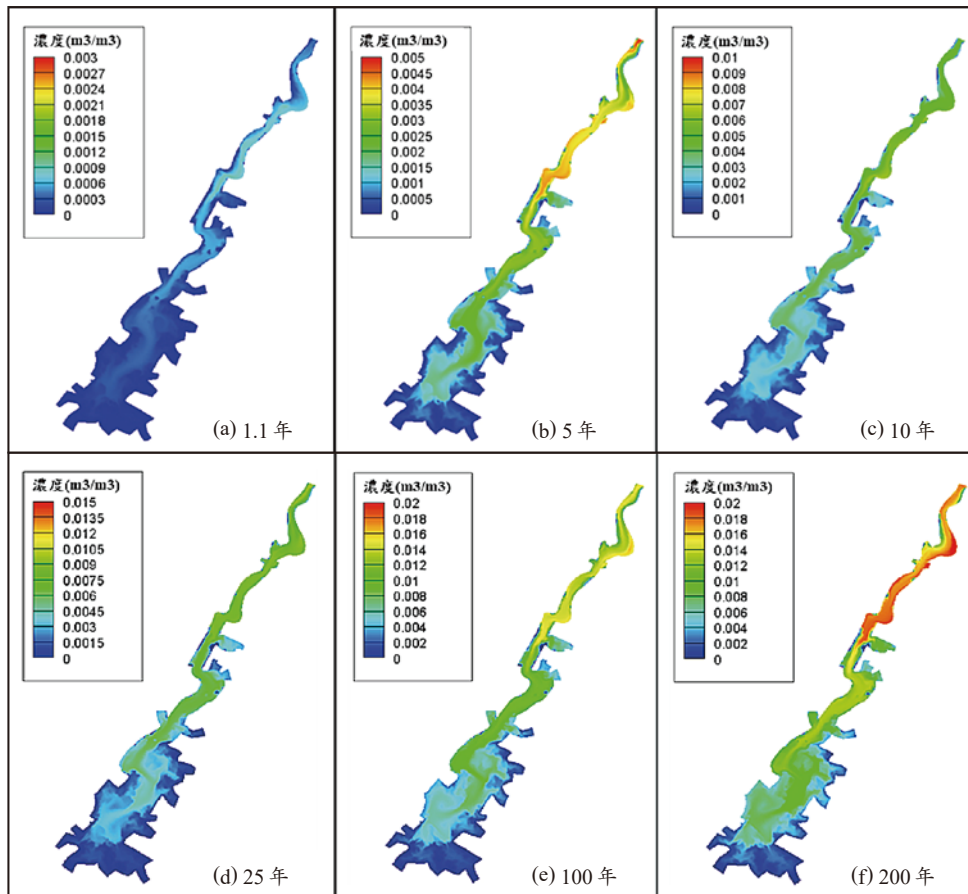


圖 4 不同重現期下南化水庫達尖峰濃度之濃度分佈

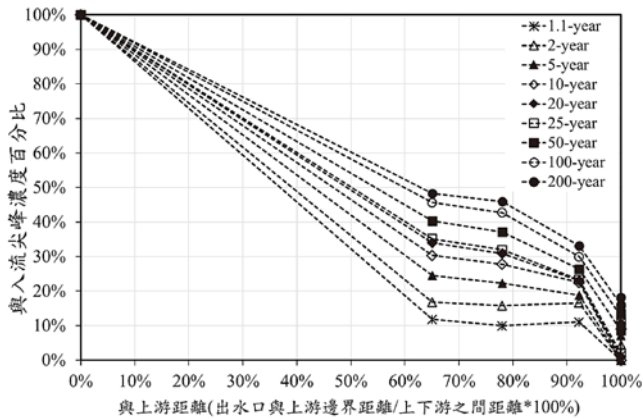


圖 5 南化水庫重現期濃度折減變化

### 無因次化分析

傳統模擬的方法僅能觀察單一水庫在特定事件，若要比較不同水庫之間差異，往往會因為水庫庫容或是地區不同之差異無法在同樣的尺度下比較，如圖 6 所示：

以數位孿生為概念，本研究將所模擬之南化水庫重現期資料與蒐集之曾文水庫資料無因次化的方式將水庫特性數位化後並進行比較與分析，圖 7 中縱軸排砂效率為排砂量 / 總入砂量 × 100%，橫軸 ICR (Inflow Capacity Ratio)， $ICR = \text{入流總量} / \text{水庫初始蓄水量}$ ，縱軸為排砂效率，可發現數位化後兩座水庫的資料即可在相同的尺度下比較，從圖中資料我們可以發現兩座水庫都呈現正比的趨勢，表示排砂效率會隨著 ICR 值上升而增加，代表水庫在高入流量以及低初始庫容時可以達到較高的排砂效率，且在相同的 ICR 下，南化水庫之排砂效率明顯高於曾文水庫，表示南化水庫具有較佳的防淤隧道排砂環境。

### 結論

本研究結合南化水庫重現期模擬並蒐集曾文水庫資料分析不同情況下水庫之排砂效率變化，透過重現期模擬的結果發現，防淤隧道之排砂比隨重現期距越大越高，在相同的運移距離下，當入流流量越大時，可以排出較大量的泥砂。在無數位化分析中，借用數位孿生之概念，將傳統模擬之南化水庫資料數位化，與曾文水庫資料進行分析與比較後發現，以曾文與南化水庫現階段情況，南化水庫具有較佳之防淤隧道排砂環境，在質量守恆分析中，長期分析下發現南化水庫隨時間淤積，庫容量減少的情況下會逐漸移動至適用防淤隧道做為防淤策略的區域，而曾文水庫之庫容量較大仍停留於適用上游管理的區域，因此相較之下南化水庫採用防淤隧道可以達到較高的排砂效率，與無因次化分析結果互相呼應。

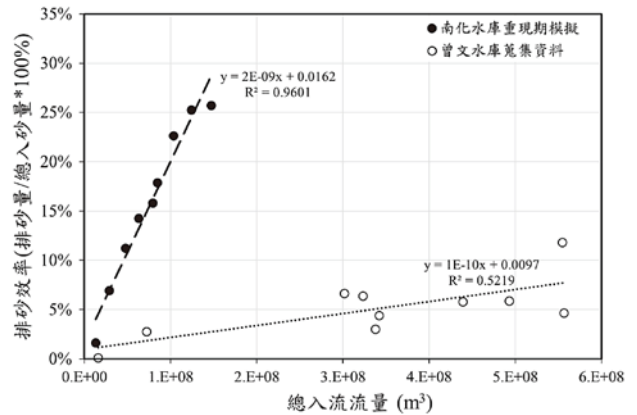


圖 6 總入流量分析

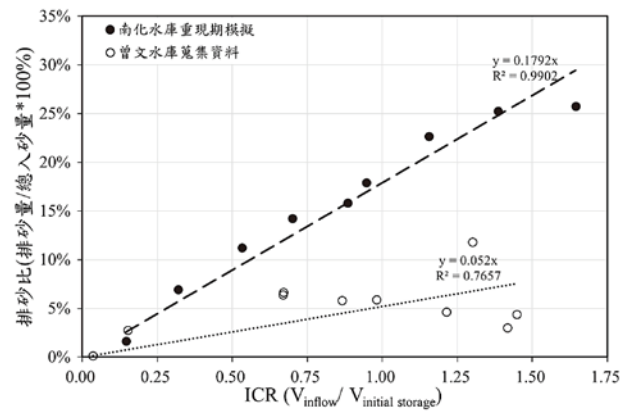


圖 7 ICR 分析

### 參考文獻

- Lai, Y.G., Huang, J.C., and Wu, K.W. (2015). Reservoir Turbidity Current Modeling with a Two-Dimensional Layer-Averaged Model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(12). [https://doi.org/Artnt0401502910.1061/\(Asce\)Hy.1943-7900.0001041](https://doi.org/Artnt0401502910.1061/(Asce)Hy.1943-7900.0001041)
- Lai, Y.G. and Wu, K. (2018). A numerical modeling study of sediment bypass tunnels at shihmen reservoir, Taiwan. *Int. J. Hydrol*, 2, 72-81.
- Huang, C.-C., Lai, Y. G., Lai, J.-S., and 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.
- Huang, C.-C. and Lee, F.-Z. (2025). Real time response strategy for reservoir storage maintenance and desiltation operations. *Scientific Reports*, 15(1), 14983.
- Lai, Y.G. (2008). SRH-2D version 2: Theory and User's Manual. Sedimentation and River Hydraulics—Two-Dimensional River Flow Modeling, US Department of Interior, Bureau of Reclamation, November.
- Wu, C.-W., Chou, F. N.-F., and Lee, F.-Z. (2020). 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 Discussions*, 2020, 1-62.
- 陳湘盈 (2020), 「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」, 國立臺灣大學生物環境系統工程學系學位論文。
- Wang, H.-W., Tsai, B.-S., Hwang, C., Chen, G.-W., and Kuo, W.-C. (2020). Efficiency of the drawdown flushing and partition desilting of a reservoir in Taiwan. *Water*, 12(8), 2166.
- Lee, F.-Z. and 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*, jwc2024632.

10. Lee, F.-Z. and Du, Y.-Y. (2025). Desilting efficiency assessment under four hydraulic sediment prevention operations. *Water Resources Management*, 1-22.
11. Castangia, M., Grajales, L.M.M., Aliberti, A., Rossi, C., Macii, A., Macii, E., and Patti, E. (2023). Transformer neural networks for interpretable flood forecasting. *Environmental Modelling & Software*, 160, 105581.
12. Kabir, S., Patidar, S., Xia, X., Liang, Q., Neal, J., and Pender, G. (2020). A deep convolutional neural network model for rapid prediction of fluvial flood inundation. *Journal of Hydrology*, 590, 125481.
13. Hosseiny, H. (2021). A deep learning model for predicting river flood depth and extent. *Environmental Modelling & Software*, 145, 105186.
14. Cedillo, S., Núñez, A.-G., Sánchez-Cordero, E., Timbe, L., Samaniego, E., and Alvarado, A. (2022). Physics-Informed Neural Network water surface predictability for 1D steady-state open channel cases with different flow types and complex bed profile shapes. *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*, 9(1), 10.
15. Adriano, B., Yokoya, N., Yamanoi, K., and Oishi, S. (2022). Predicting Flood Inundation Depth Based-on Machine Learning and Numerical Simulation. *CEUR Workshop Proceedings*.
16. Jamali, B., Haghghat, E., Ignjatovic, A., Leitão, J.P., and Deletic, A. (2021). Machine learning for accelerating 2D flood models: Potential and challenges. *Hydrological Processes*, 35(4), e14064.
17. Deng, S., Xia, J., Chen, Y., Zhou, M., Zhou, Y., and Wang, Z. (2024). Integrated modelling of flow-sediment transport and power generation in the Three Gorges Reservoir. *Science of The Total Environment*, 921, 170983.
18. Karim, F., Armin, M.A., Ahmedt-Aristizabal, D., Tytsen-Smith, L., and Petersson, L. (2023). A review of hydrodynamic and machine learning approaches for flood inundation modeling. *Water*, 15(3), 566.
19. Patro, E.R., De Michele, C., Granata, G., and Biagini, C. (2022). Assessment of current reservoir sedimentation rate and storage capacity loss: An Italian overview. *Journal of environmental management*, 320, 115826.
20. Lukas, P., Melesse, A.M., and Kenea, T.T. (2024). Predicting reservoir sedimentation using multilayer perceptron-artificial neural network model with measured and forecasted hydrometeorological data in Gibe-III reservoir, Omo-Gibe River basin, Ethiopia. *Journal of environmental management*, 359, 121018.
21. Honek, D., Michalková, M.Š., Smetanová, A., Sočuvka, V., Velísková, Y., Karásek, P., Konečná, J., Némětová, Z., and Danáčová, M. (2020). Estimating sedimentation rates in small reservoirs-Suitable approaches for local municipalities in central Europe. *Journal of environmental management*, 261, 109958.
22. Hung, C.C., Lai, J.S., and Huang, C.C. (2022). An efficient and economic desilting strategy for reservoir sustainable development under the extreme flooding threaten [Article]. *Journal of Water and Climate Change*, 13(3), 1257-1274. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.353>
23. Huang, C.-C. (2024). Navigating Reservoir Deposition Challenges: Evaluation of Reservoir Desilting Strategy Through a 4-Stage Life Cycle Assessment Approach. *Water Resources Management*, 1-16.
24. Lee, F.-Z., Lai, J.-S., and Sumi, T. (2022). Reservoir sediment management and downstream river impacts for sustainable water resources—case study of shihmen reservoir. *Water*, 14(3), 479.
25. 台灣自來水股份有限公司 (2013), 「南化水庫防淤隧道工程計畫—基本設計檢討及施工監造」, 水工模型試驗報告。
26. 經濟部水利署 (2014), 「曾文溪水系曾文溪治理規劃檢討」。
27. 臺灣自來水公司第六管理處 (2024), 「112-113 年南化水庫運轉決策支援及泥沙運移監測—112 年度報告」。


**亞新工程顧問股份有限公司**  
**MOH AND ASSOCIATES, INC.**

台北 | 台中 | 高雄 | 仰光 | 曼谷 | 新加坡 | 香港 | 北京

運輸工程 | 大地工程 | 數位工程 | 結構工程 | 環水工程 | 專案及施工管理 | 建築、都市計劃、景觀及室內設計 | 機電工程







Tel: (886-2) 2696-1555    Fax: (886-2) 2696-1166    Website: [www.maaconsultants.com](http://www.maaconsultants.com)    E-mail: [maagroup@maaconsultants.com](mailto:maagroup@maaconsultants.com)