

防淤隧道空間分布不同下之防淤成效 評估

The hydraulic desilting impact of the desilting tunnel under different spatial deployments

國立中興大學土木系

研究生

杜豫云

Yu-Yun Tu

助理教授

李豐佐

Fong-Zuo Lee

摘 要

台灣每年降水主要集中於夏季，又因地形陡峭不易蓄水，降水時空分布不均，因此多建造水庫蓄水以利各種需求，但是經年累月下水庫不斷淤積，因此水庫清淤變成了近年來的重要議題，本研究旨在於研究不同空間分布之防淤隧道對於清淤效果之影響。

本研究運用 SRH-2D 模擬南化水庫在不同重現期下防淤隧道之排砂率，運用模型計算水庫中不同位置的濃度分布，並模擬防淤隧道建造於壩前之排砂效率，同時蒐集曾文水庫防淤隧道運轉事件資料以及水工試驗資料，並進行分析與比較，結果顯示不同空間分布下的防淤隧道會影響其排砂效率，且不同水庫在相同的空間分布下有不同的結果。

關鍵詞：數值模式，防淤隧道，SRH-2D

Abstract

Annual precipitation in Taiwan is concentrated in the summer. The steep terrain makes water retention difficult. Due to the uneven temporal and spatial distribution of rainfall, reservoirs have been constructed to meet water demands. However, over time, continuous sedimentation in reservoirs has become a pressing issue, making reservoir desilting an important topic in recent years. This study aims to investigate the impact of desilting tunnels with different spatial distributions on sluicing efficiency.

The numerical model SRH-2D was applied to simulate the sluicing efficiency of desilting tunnels in Nanhua Reservoir under different return periods. The model was used to compute sediment concentration distributions within the reservoir and to

simulate the sluicing efficiency of a desilting tunnel constructed near the dam. In addition, historical operational data and physical model experiment data from Zengwen Reservoir were collected to support the analysis. The results indicate that the spatial arrangement of desilting tunnels significantly affects their sluicing efficiency, and different reservoirs may yield different outcomes even under the same spatial configurations.

Keywords: Numerical model, Desilting tunnel, SRH-2D

一、前言

台灣屬於高降雨量地區，年降雨主要集中於夏季颱風與梅雨期間，且由於地形陡峭與降雨時空分布不均，因此多興建水庫以供應民生、灌溉及工業用水。然而水庫隨著時間逐漸淤積，導致有效蓄水容量逐年減少，因此，水庫防淤與清淤措施成為台灣近年來的重要議題。

本研究以南化水庫為主要研究對象，透過二維數值模式 SRH-2D 模擬不同重現期洪水事件下的排砂效果，並探討防淤隧道在不同空間分布情境下對排砂效率的影響。同時，本研究亦參考曾文水庫實際操作與水工試驗資料，以佐證數值模擬之合理性與應用性。

二、研究方法

1. 研究區域概述

南化水庫位於臺南市曾文溪上游支流後堀溪，設計水庫容量為 1 億 5000 萬立方公尺，經歷民國 98 年莫拉克颱風過後，水庫容量僅剩約 1 億立方公尺，因此興建防淤隧道於民國 110 年啟用，水庫主要結構物包含大壩、自流式溢洪道、取水口以及防淤隧道，研究範圍與水庫主要結構物如圖 1 所示：

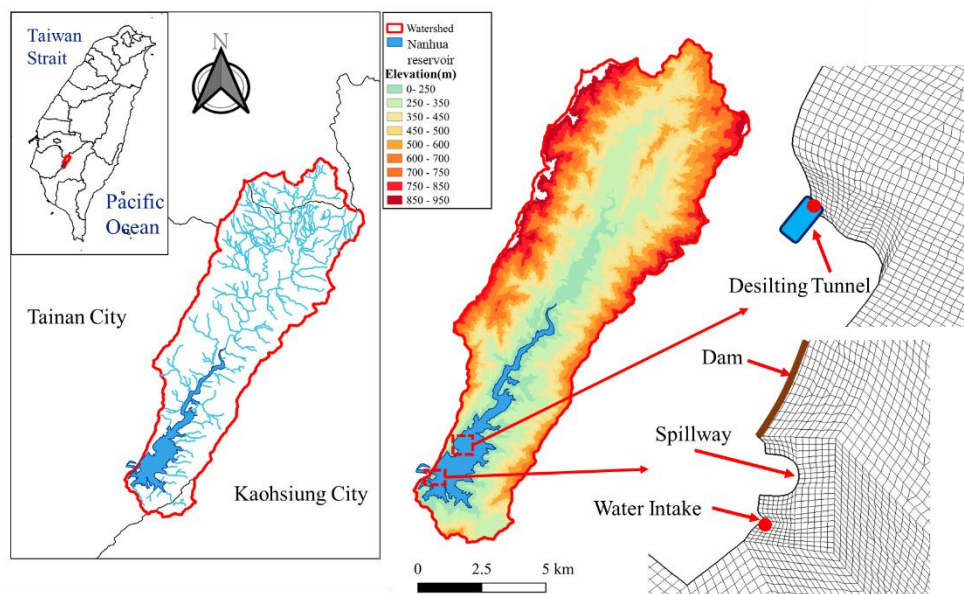


圖 1 南化水庫

2. 二維數值模式 SRH-2D

SRH-2D 為美國墾務局與台灣經濟部水利署共同開發，本研究應用其中二維層平均數值模式模擬南化水庫，根據 Lai et al. (2015)，層平均數值模式之控制方程式為：

$$\frac{\delta h}{\delta t} + \frac{\delta hU}{\delta x} + \frac{\delta hV}{\delta y} = e_w \sqrt{U^2 + V^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial hU}{\partial t} + \frac{\partial hUU}{\partial x} + \frac{\partial hVU}{\partial y} = \frac{\partial hT_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{xy}}{\partial y} - (RgC)h \frac{\partial Z}{\partial x} - \frac{Rg}{2} h^2 \frac{\partial C}{\partial x} - (1 + r_w) \frac{\tau_{dx}}{\rho} \quad (2)$$

$$\frac{\partial hV}{\partial t} + \frac{\partial hUV}{\partial x} + \frac{\partial hVV}{\partial y} = \frac{\partial hT_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{yy}}{\partial y} - (RgC)h \frac{\partial Z}{\partial y} - \frac{Rg}{2} h^2 \frac{\partial C}{\partial y} - (1 + r_w) \frac{\tau_{dy}}{\rho} \quad (3)$$

$$\frac{\delta hC_k}{\delta t} + \frac{\delta hUC_k}{\delta x} + \frac{\delta hVC_k}{\delta y} = \omega_k (p_k E_k - C_{bk}) \quad (4)$$

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

式中 t 為時間； x 和 y 為笛卡兒座標的 x 和 y 方向； h 為異重流厚度； U 和 V 為 x 和 y 方向上的層平均流速； T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yy} 為水深方向平均紊流與消散應力項； g 為重力加速度； τ_{dx} 與 τ_{dy} 為底床剪應力； ρ 為流體混合密度； e_w 為流體夾帶係數； C_k 為第 k 級泥砂粒徑的層平均體積濃度； Z_b 為底床高程； Z 為異重流頂端高程； γ 為底床泥砂之孔隙率； p_k 為底床第 k 級泥砂顆粒容積率； ω_k 為第 k 級泥砂顆粒沉降速度； E_k 為潛在侵蝕率； C_{bk} 為第 k 級極近底床泥砂濃度； r_w 為異重流與上層清水之間的摩擦力；總泥砂濃度 $C = \sum_k C_k$ ；異重流比重 $R = s - 1$ 其中 $s = \rho_s / \rho_a$ ， ρ_s 為泥沙密度 ρ_a 為上層清水密度。

$$E_k = 0.05 m_E \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{h \sqrt{(s-1)g/d_k}} \left[\frac{v_*^2}{(s-1)gd_k} \right]^{1.5} \quad (6)$$

式中 m_E 為用作數值校正參數之多重因子。

三、研究結果

根據 SRH-2D 模擬結果，防淤隧道於不同重現期洪水事件下表現出不同的排砂效益。模擬結果與比較如表 1 與圖 2 所示。

以下為主要觀察結果：

1. 水庫中段與壩前之濃度變化

在低重現期(如 1.1 年與 2 年)情境下，水庫中段排砂效率分別為 1.65% 與 6.95%，而壩前區域僅為 0.04% 與 0.62%，顯示較低重現期洪水事件對壩前清淤貢獻有限；當重現期提高至 100 年與 200 年，中段排砂效率分別達 25.27% 與 25.74%，壩前則提升至 6.93% 與 7.55%，顯示高洪峰流量可顯著增加整體排砂效果。

2. 不同空間分布之影響

模擬結果顯示，防淤隧道若設置於壩前區域，能有效攔截並排出部分泥沙，但其排砂率相對受限；反之，位於中段的配置在較大重現期洪水事件下具

有更佳的清淤效率。

表 1 南化水庫不同防淤隧道位置排砂效率(%)

重現期距 (年)	1.1	2	5	10	20	25	50	100	200
水庫中段	1.65	6.95	11.23	14.26	15.82	17.91	22.67	25.27	25.74
壩前	0.04	0.62	1.91	2.49	3.68	4.31	5.68	6.93	7.55

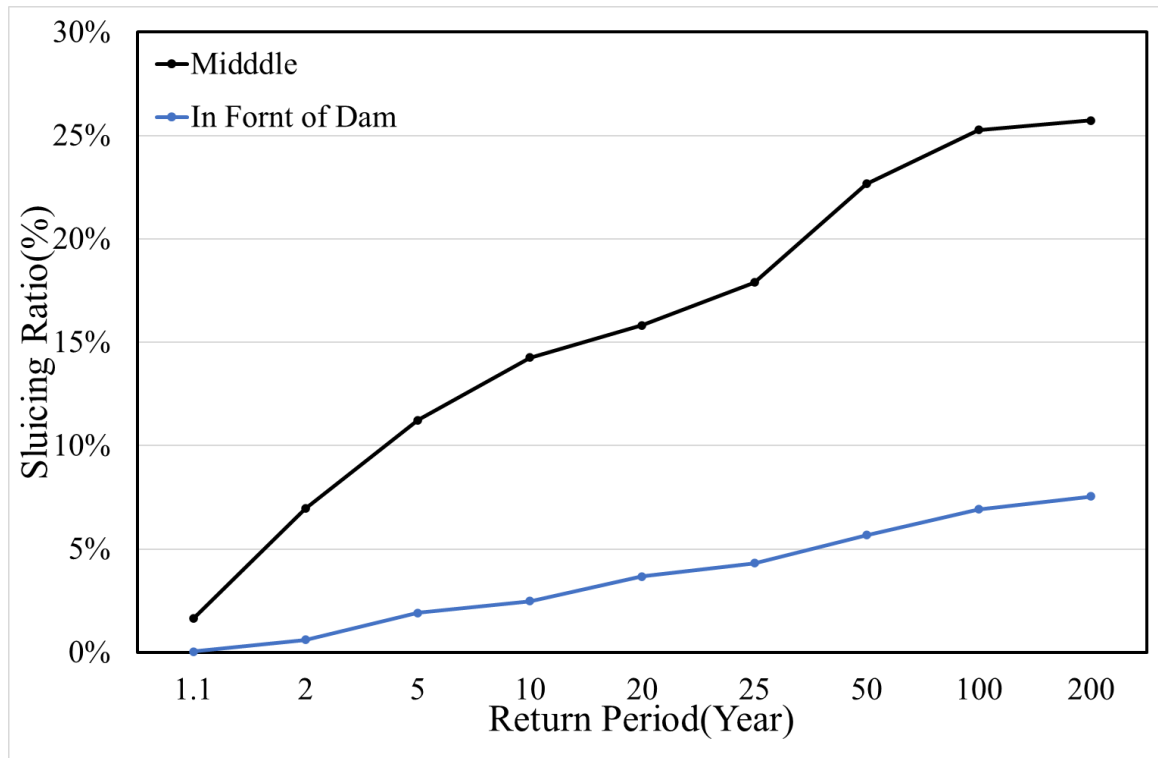


圖 2 南化水庫不同防淤隧道位置排砂效率

四、結論與建議

本研究透過二維數值模式 SRH-2D 分析南化水庫防淤隧道在不同空間分布下之排砂成效，歸納以下結論：

1. 防淤隧道能有效提升排砂效率，特別是在高重現期洪水事件下，排砂率有明顯的提升。
2. 空間分布為影響排砂效率的關鍵因素，相較於將防淤隧道設置於壩前，中段配置在大洪水下表現更佳。
3. 建議未來規劃新設或改善既有防淤隧道時，應考量洪水特性、地形條件與異重流，並搭配長期監測與模擬驗證，以達最佳防淤成效。

參考文獻

1. Chen, S. Y. (2020). Applying the two-dimensional (2D) layer-averaged turbidity current model to estimate outlet sediment concentration and desilting efficiency in the Zengwen Reservoir. *Master's Thesis*.

2. 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.
3. Lai Yong, G. (2010). Two-Dimensional Depth-Averaged Flow Modeling with an Unstructured Hybrid Mesh. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(1), 12-23.
4. Lai, Y. G., Huang, J. C., & Wu, K. W. (2015). Reservoir Turbidity Current Modeling with a Two-Dimensional Layer-Averaged Model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(12). 04015029
5. Lee, F. Z., & Du, Y. Y., 2025. Desilting efficiency assessment under four hydraulic sediment prevention operations. *Water Resources Management*, DOI: 10.1007/s11269-025-04161-2.
6. Lee, F. Z., Lai, J. S., Tan, Y. C. and Sung, C. C. (2014). "Turbid density current venting through reservoir outlets," *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 18, No. 2, pp. 694-705.
7. Liu, C.C., (2023). *Influences of the Reservoir Desiltation on the Risk of Water Supply Operation*. Master Thesis, Graduate Institute of Environmental Engineering, College of Engineering, National Taiwan University. (In Chinese)
8. Nafeela Imtiyaz., (2021). *Impact of Dredged Guiding Channel on the Desilting Efficiency of Reservoir Outlets* . Master Thesis, Graduate Institute of Environmental Engineering, College of Engineering, National Taiwan University. (In Chinese)
9. Wu, C. W., Chou, Frederick N.-F., and Lee, F. Z. 2021. 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, issue 4: 2063-2087
10. 南區水資源分署(2022),「111年防汛整合與曾文水庫防洪排砂運轉決策支援」總報告。
11. 經濟部水利署。(2014)。曾文溪水系曾文溪治理規劃檢討。
12. 經濟部水利署水利規劃試驗所。(2018)。曾文水庫防淤隧道全域水工模型試驗-第二階段成果報告。
13. 臺灣自來水公司第六區管理處。(2021)。110年度南化水庫淤積測量-成果報告書。
14. 臺灣自來水公司第六區管理處。(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。