

應用層平均數值模式推估供水水庫防淤隧道位址對排砂效率之影響

The impact of estimating desilting tunnel locations on sediment sluicing efficiency in a water supply reservoirs using an application layer average 2D model

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

因應近年極端氣候，臺灣各水庫陸續興建防淤隧道以延長水庫使用壽命，因此防淤隧道相關研究也隨之興起，而應用數值模式模擬水庫泥砂運移不僅可以省去建造模型的時間金錢成本，也能還原現場水庫情境，本研究應用層平均數值模式模擬防淤隧道於洪水事件的排砂效率，並進一步探討其位置對排砂效率之影響。

本研究運用 SRH-2D 層平均數值模式模擬南化水庫中泥砂運移的變化，以驗證過之水庫模擬參數進行較大重現期的洪水情境模擬，並在各個重要水庫設施如防淤隧道、觀測浮台、溢洪道、取水口幾處設置監測點觀察泥砂濃度稀釋程度、泥砂抵達時間，並推算防淤隧道的排砂效率，而由於南化水庫之防淤隧道位址約在水庫中間，而同樣設有防淤隧道之曾文水庫，其位址則是在壩前，因此本研究將兩者的模擬結果進行比較，分析防淤隧道建設位址對排砂效率之影響，可以作為防淤隧道在洪水事件中的操作參考，也以利於未來其他水庫建設防淤隧道之參考指標。

關鍵詞：數值模式，防淤隧道，SRH-2D

Abstract

In response to the extreme climate in recent years, reservoirs in Taiwan have been building desilting tunnels to extend their operational lifespans. Therefore, research related to desilting tunnel has also emerged. The application of numerical models to simulate sediment transport not only saves cost of building physical models, also accurately replicates the conditions of the actual reservoir. This study applies two-dimensional layer-averaged model to simulate sediment sluicing efficiency of desilting tunnel during flood events and further explores the impact of their locations on sediment sluicing efficiency.

This study uses SRH-2D to simulate the sediment transport changes in Nanhua Reservoir. The verified reservoir simulation parameters are used to simulate flood scenarios with larger return period. Monitor points were set up at various important reservoir facilities such as the desilting tunnel, measurement station, spillway, and water-intake to observe the degree of sediment concentration dilution, the arrival times of sediment, and to further estimate the sediment sluicing efficiency. Since the desilting tunnel in Nanhua Reservoir is located approximately in the middle of the reservoir, while the one in Zengwen Reservoir is located in front of the dam, this study compares the results both to analyze the impact of the desilting location on sediment sluicing efficiency. The finding can serve as an operational reference for desilting tunnel during flood event and provide guidance for constructing desilting tunnels in other reservoirs in the future.

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

一、前言

近年來極端氣候事件發生的機率越來越高，隨著強降雨的發生頻率變高，臺灣各地水庫都面臨泥砂淤積帶來的挑戰與困境，目前解決方式之一是建造防淤隧道幫助水庫提高排砂效率以減少淤積情形，而目前已經正式啟用防淤隧道的水庫分別為石門、曾文以及南化水庫，南化水庫與石門水庫防淤隧道位於水庫中間段，曾文水庫則是位於壩前，其中本研究應用數值模式模擬南化水庫並配合曾文水庫模型試驗資料進行分析。

應用數值模式模擬水庫的水理及輸砂運移，已廣泛用於防淤措施的相關研究，數值模式主要可分為水平二維、垂直二維及三維模式，各自適用的範圍及特點有所不同 (Lee et al., 2014; Nafeela, 2021)。其中，水平二維模式雖然受淺水波假設的限制，難以描述深度方向的流速與濃度變化，但因其發展相對成熟且計算時間較短，實用性較高。相比之下，垂直二維模式可提供垂直面上的流場與濃度分佈，但相對缺乏水平面上的資訊。

在水庫防淤研究中，異重流二維層平均數值模式 (2DLAM) 近年來廣泛應用於水庫防淤操作研究，如美國墾務局所開發的 SRH-2D 模式已多次應用於臺灣水庫的排砂模擬研究 (Lai, 2008; Lai et al., 2015, 2018; Huang et al., 2019)。例如，Wu et al. (2021) 利用 SRH-2D 模式探討曾文水庫空庫排砂條件下底床沖淤及排砂量的模擬分析，陳湘盈 (2020) 及南區水資源局 (2021, 2022) 亦以此模式研究了人工導槽對排砂效率的影響。此外，李豐佐等 (2023b) 及劉政其 (2023) 則針對曾文水庫的庫底導流槽進行了二維層平均模式評估，研究出水工出流泥砂濃度及排砂效率。

本研究以南化水庫為主要研究對象，將採 SRH-2D 二維數值模式進行重現期模擬，並蒐集曾文水庫相關模型資料進行數值比較，以分析防淤隧道在水庫中位址對排砂效率之影響。

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，於民國 82 年完工，設計水庫容量則為 1 億 5000 萬立方公尺，在經歷許多降雨事件過後水庫不斷淤積，截至民國 98 年莫拉克颱風過後，水庫容量僅剩約 1 億立方公尺，因此計畫興建防淤隧道並於民國 110 年啟用，本研究範圍以上游關山 9 號橋作為水庫入流邊界，下游則以溢洪道以及防淤隧道作為出流邊界，防淤隧道位置約在測量斷面編號 R10，另外在水庫的測量斷面 R3 以及 R13 分別設有浮台監測泥沙濃度變化，其代號分別為 H03 以及 H13，水庫位置以及研究範圍如圖 1 所示：

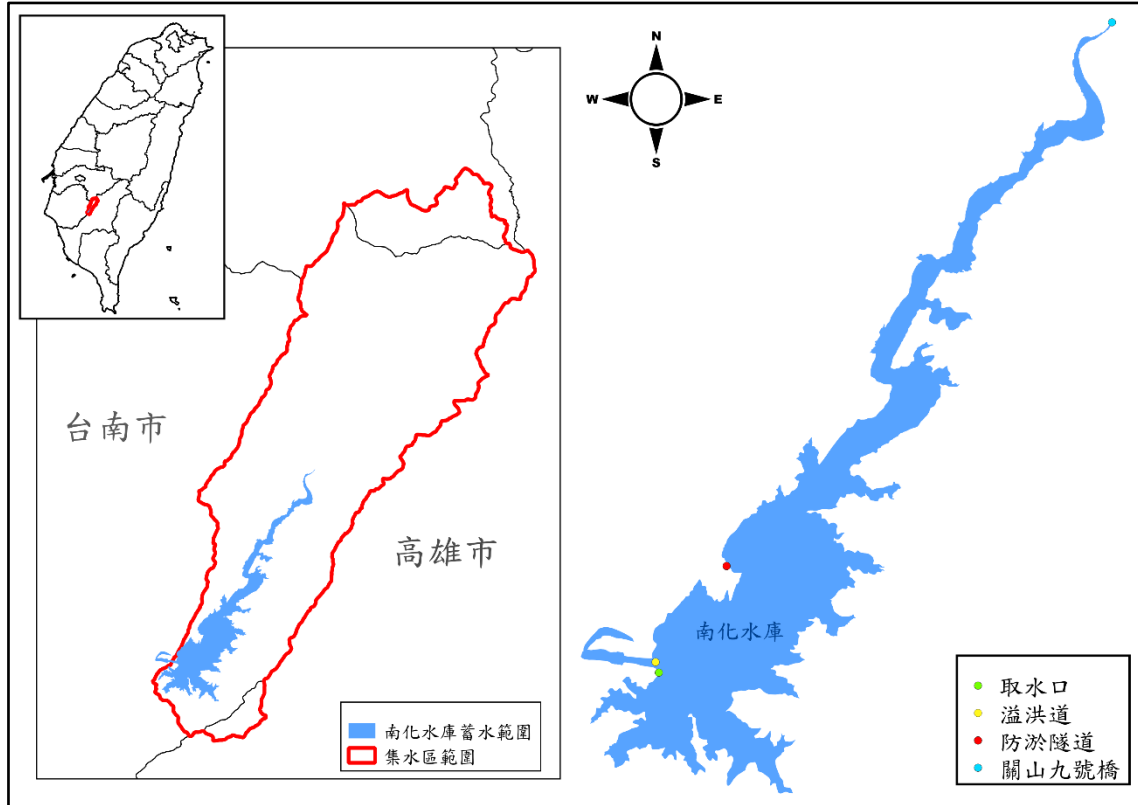


圖 1 南化水庫位置及研究範圍

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：

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

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

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

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

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

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。

3. 檢定驗證案例與重現期洪水

本研究採用民國 110 年盧碧颱風作為檢定驗證案例，降水資料採 8 月 4 日 0 時至 8 月 8 日 24 時共計 120 小時資料，其各測站及邊界流量歷線如圖 2 所示，泥沙資料則採用自來水公司 112-113 年南化水庫運轉決策支援及泥沙運移監測報告(臺灣自來水公司第六管理處, 2024)，將單位轉換成每秒立方公尺後如式(7)，並且配合關山九號橋、H03、H13、溢洪道、取水口的泥沙監測資料進行檢定驗證，得出之模擬參數如表 1。

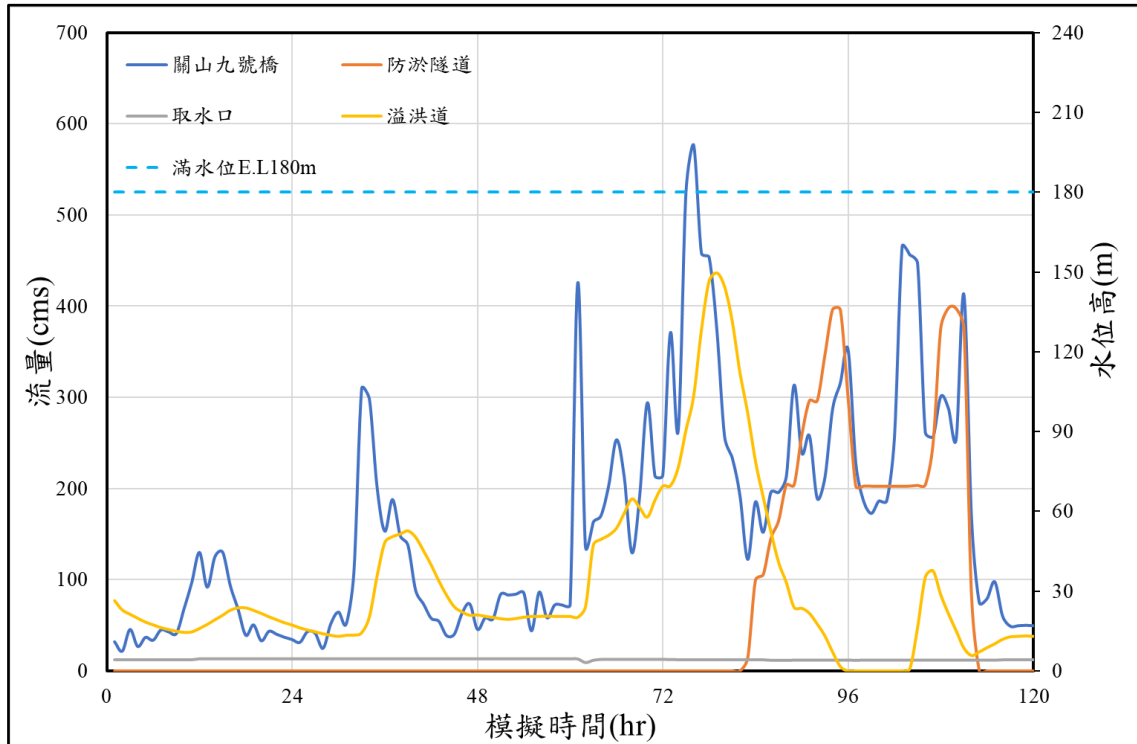


圖 2 盧碧颱風各測站及邊界流量歷線

$$Q_s = 0.00005 Q^{1.8903} \quad (7)$$

式中 Q 為水流流量(m^3/s)； Q_s 為泥沙入流量(m^3/s)

表 1 檢定驗證參數

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		0 (default)
Constant Manning Coefficient		0.01

而重現期洪水則是依據水利署曾文溪水系曾文溪治理規劃報告(經濟部水利署, 2014)，本研究參考其中南化水庫測站之降雨延時以及無因次單位歷線法推估之洪峰流量值，整理出南化水庫重現期之流量歷線，如圖 3 所示，並配合檢定驗證之參數以及回歸關係式做為重現期洪水的模擬條件。

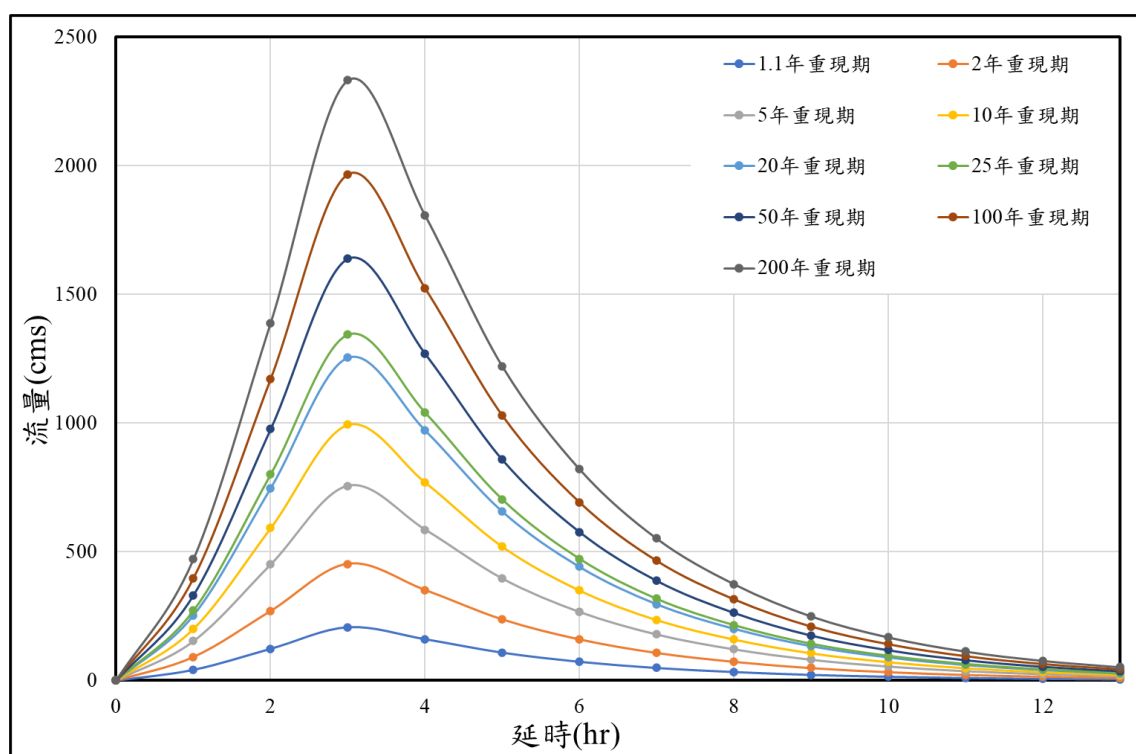


圖 3 南化水庫重現期流量歷線

4. 曾文水庫模擬資料結果

本研究參考水利規劃試驗所之曾文水庫防淤隧道全域水工模型試驗報告(經濟部水利署水利規劃試驗所, 2018)中模型模擬之結果進行比較，採用比較情境如表 2 所示

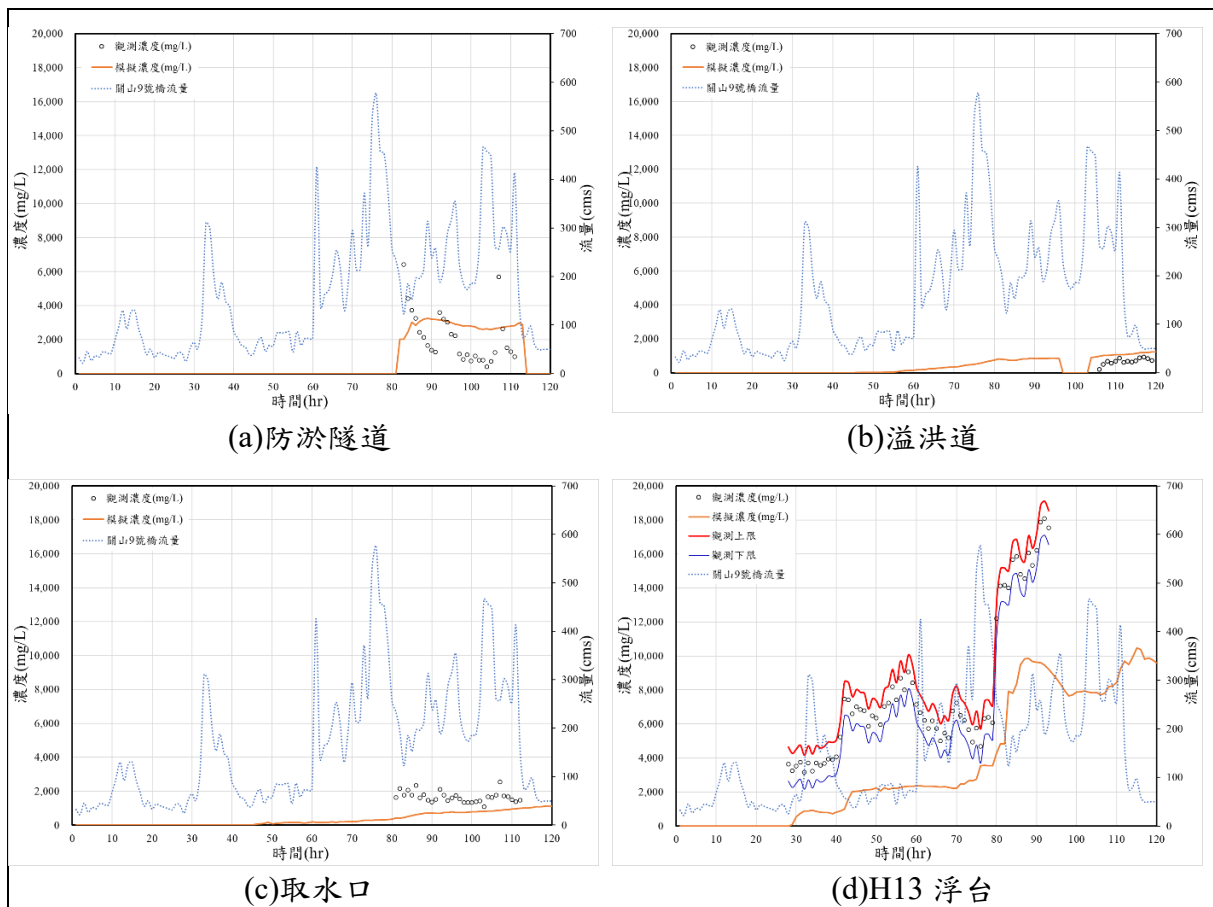
表 2 曾文水庫模型模擬情境

模擬情境	入砂量(ton)		入流量(m ³)	
	設計	實際	設計	實際
莫拉克 1	64,454,137	62,125,002	1,141,099,798	1,137,828,395
莫拉克 2	80,750,262	77,806,136	1,141,099,798	1,139,365,794
海棠	11,763,112	11,801,806	486,918,000	493,104,759
海棠低砂量	11,116,972	10,106,792	435,666,150	439,166,748
0609	6,607,953	6,904,158	338,766,888	342,251,809
0609 低濃度	6,607,953	5,240,996	338,766,888	337,767,176
定量流 1	9,720,000	9,551,987	324,000,000	323,195,966
定量流 2	11,340,000	11,533,523	378,000,000	378,730,476

0609 為民國 95 年 6 月 9 日之降雨事件；定量流 1 試驗條件為流量每秒 3,000 立方公尺、濃度 30,000ppm、起始水位 EL.220 公尺；定量流 2 試驗條件為流量每秒 3,000 立方公尺、濃度 30,000ppm、起始水位 EL.190 公尺。

三、初步研究結果

本研究選用民國 110 年盧碧颱風作為檢定驗證事件，採用表 1 中模擬參數以及圖 2 流量歷線作為邊界條件設定進行檢定驗證模擬，檢定結果如圖 4 所示：



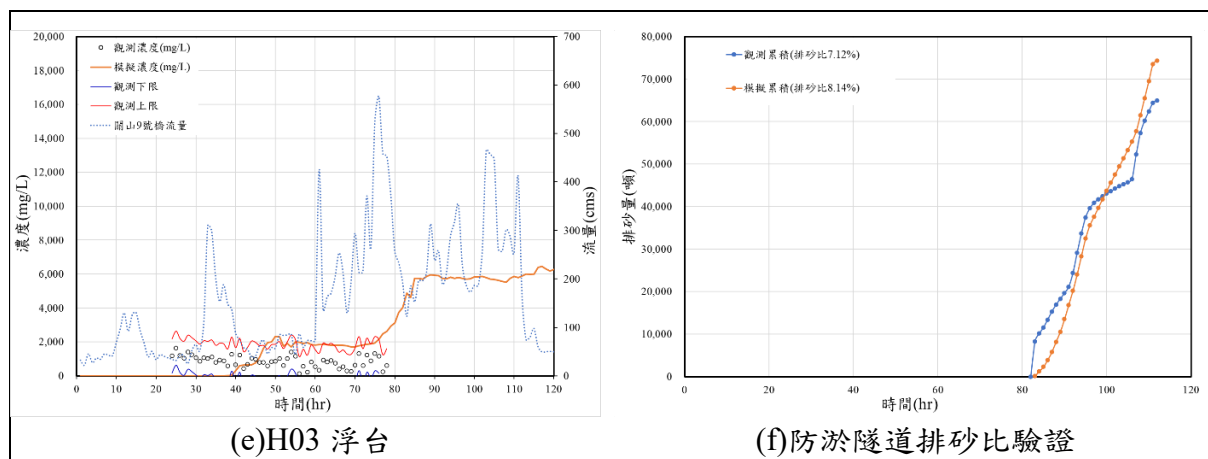


圖 4 盧碧颱風檢定驗證結果

觀察圖 4，(a)防淤隧道可以發現濃度數值上升的時間點相近(第 80-90 小時之間)，濃度的數值範圍也與觀測值相近，而(b)溢洪道在後段時間(第 104-120 小時)模擬數值變化與實際觀測的趨勢相似，在(d)H13 浮台也可以觀察到數值變化趨勢相同的現象，且由表 5(f)可見防淤隧道實際量測的排砂比約為 7.12%，數值模擬的排砂比則約為 8.14%，兩者誤差僅 1.02%，代表表 1 中模擬參數在模擬南化水庫排砂效率時可以獲得與實際量測相近的結果。

進行模式的檢定驗證後，採用相同模擬參數進行 9 種不同的重現期模擬，並將模擬結果分別整理出各個出流邊界以及監測站點的濃度變化，並且將防淤隧道資料計算出排砂量如表 3 所示，可以發現隨著重現期距越大，入砂量隨著流量增加，同時防淤隧道排砂量也會跟著顯著提升。

表 3 南化水庫不同重現期防淤隧道排砂效率

重現期距 (年)	入砂總量 (10 ³ ton)	防淤隧道排砂量 (10 ³ ton)	防淤隧道排砂比 (%)	初始水位 (m)
1.1	15.09	0.00	0.01%	EL.180 (滿水位)
2	66.64	0.01	0.01%	
5	174.94	0.41	0.23%	
10	293.03	3.10	1.06%	
20	454.31	9.70	2.14%	
25	517.11	11.87	2.29%	
50	752.44	31.71	4.21%	
100	1,062.30	65.49	6.16%	
200	1,465.61	120.90	8.25%	

將重現期距以 10 年重現期與 100 年重現期作為較小以及較大之代表，並繪製出防淤隧道濃度值達尖峰時刻之濃度與速度向量圖，整理如圖 5 所示：

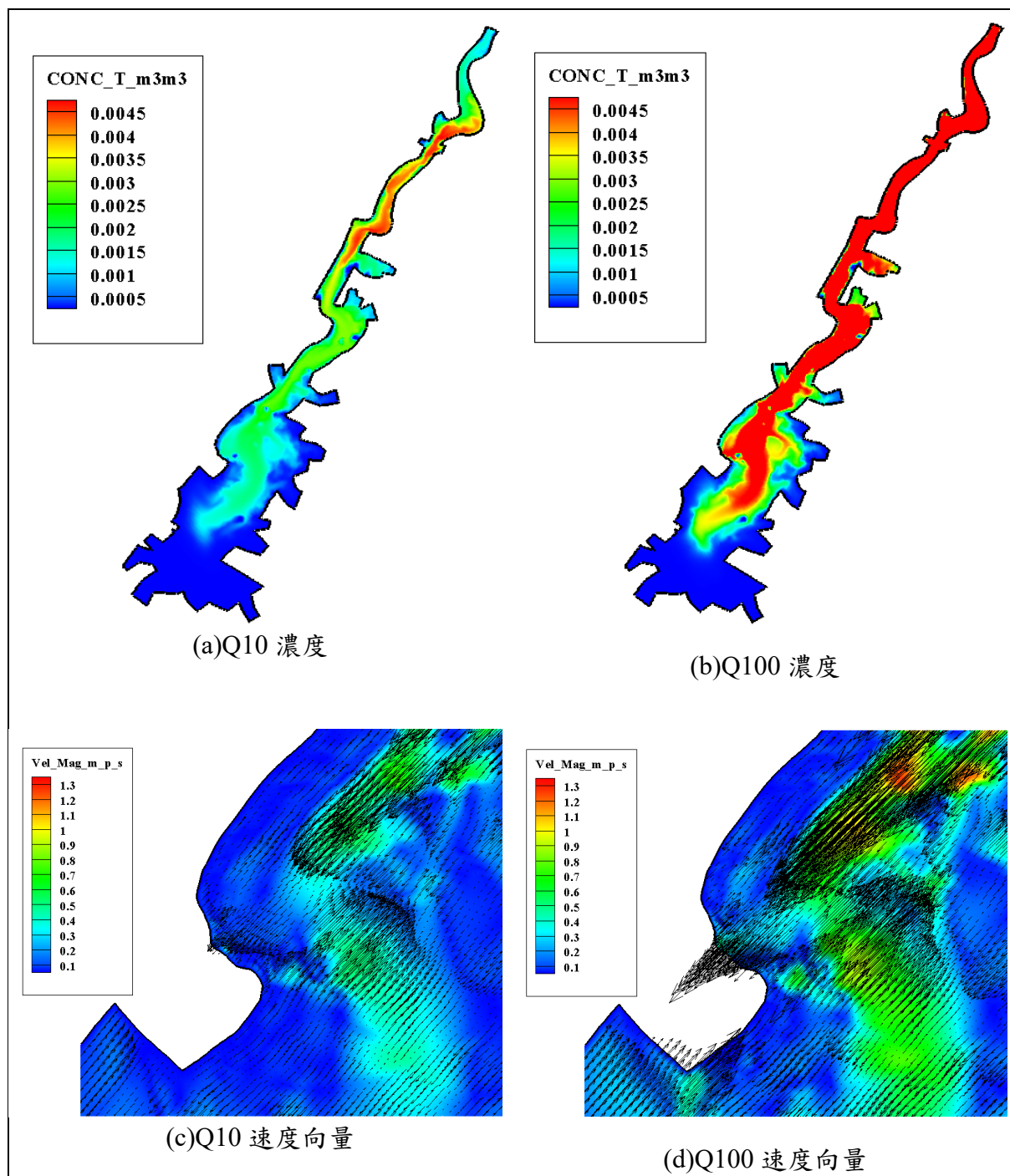


圖 5 南化水庫較小與較大重現期濃度與速度圖

將各出流邊界之最高濃度進行比較如表 4 所示，濃度折減比例為出流邊界之最高濃度與入流尖峰濃度之比例，發現水庫異重流自入流邊界運行至防淤隧道前有明顯折減的現象，即使是最大的 200 年重現期距期洪水，異重流運行至防淤隧道前僅剩原本尖峰濃度的 23.6%；而溢洪道之模擬濃度皆為 0，推測因異重流主要運行於水庫底部，而南化水庫溢洪道形式為自由溢流堰，其模擬地形高程為 EL.180 公尺，因此排出流量主要為上層清水。

表 4 泥砂濃度折減比例

重現期距	入流尖峰	防淤隧道(ppm)/濃度折減	取水口(ppm)/濃度折減	溢洪道
------	------	----------------	---------------	-----

(年)	(ppm)	比例(%)		比例(%)		(ppm)
1.1	7,750.68	202.24	2.6%	23.38	0.3%	0
2	15,601.76	868.06	5.6%	208.77	1.3%	0
5	24,634.28	4,449.63	18.1%	598.18	2.4%	0
10	31,440.37	3,836.61	12.2%	1,054.74	3.4%	0
20	38,673.16	5,730.05	14.8%	1,676.04	4.3%	0
25	41,109.47	6,462.51	15.7%	1,939.57	4.7%	0
50	49,064.94	9,028.03	18.4%	2,773.44	5.7%	0
100	57,727.73	12,252.32	21.2%	3,900.64	6.8%	0
200	67,183.21	15,851.28	23.6%	5,267.33	7.8%	0

濃度折減比例=出流邊界尖峰濃度/入流尖峰濃度*100%

本研究參考水利規劃試驗所之曾文水庫防淤隧道全域水工模型試驗報告(經濟部水利署水利規劃試驗所, 2018)，將其中有進行防淤隧道排砂操作之模擬情境整理如表 5 所示，在相同事件中，比如莫拉克、海棠、0609 豪雨事件，同樣的初始水位與入流條件下，入砂總量提高排砂效率也會相對提高，而在相同入流條件下，不同的初始水位也會影響排砂效率，以定量流 1 與定量流 2 觀察可以發現當水庫初始水位變低時，防淤隧道之排砂效率會提高。

表 5 曾文水庫模型試驗排砂效率

模擬情境	入砂總量 (10 ³ ton)	防淤隧道排砂 量 (10 ³ ton)	防淤隧道排砂 比 (%)	修正排砂 比 (%)	初始水位 (m)
莫拉克 1	62,125.00	14,182.17	22.83%	19.85%	195
莫拉克 2	77,806.14	17,922.95	23.04%	20.03%	195
海棠	11,801.81	798.04	6.76%	5.88%	224
海棠低砂量	10,106.79	672.29	6.65%	5.78%	224
0609	6,904.16	347.94	5.04%	4.38%	204
0609 低濃度	5,241.00	180.35	3.44%	2.99%	204
定量流 1	9,551.99	700.92	7.34%	6.38%	220
定量流 2	11,533.52	882.05	7.65%	6.65%	190

因試驗入流砂量僅施放懸浮載，假設推移載為懸浮載 15%，因此修正排砂比=排砂量/(入砂量*1.15)

四、結論與建議

從初步結果可以觀察得知以下幾點會影響水庫排砂效率

1. 入流流量：同樣的初始水位條件下，重現期距越大，入流流量越大，防淤隧道的排砂比也會隨著流量增加。
2. 入流濃度/總入砂量：同樣的初始水位條件下，入流濃度越高代表入砂總量也越多，防淤隧道的排砂比也會增加。

3. 初始水位：在同樣的入流流量、濃度條件下，隨著初始水位的降低，防淤隧道排砂比也會增加。

綜合以上觀察結果，本研究決定採用相近的水庫初始水位狀態進行比較，南化水庫之數值模擬採用初始水位為正常滿水位 EL.180m，而表 5 事件發生當時曾文水庫正常滿水位為 EL.227m (2018 年後已調升至 230m)，將較低水位情境去除後採用模擬情境為海棠颱風、海棠颱風低砂量、0609、0609 低濃度以及定量流 1 進行數據分析。

而本研究欲探討防淤隧道位址與排砂效率之關係，南化水庫之防淤隧道位址約在水庫中間段，根據 110 年南化水庫淤積測量報告書(臺灣自來水公司第六區管理處，2021)，防淤隧道約在斷面編號 R10，換算防淤隧道距離上游邊界關山 9 號橋約 10,532 公尺，南化水庫滿水位庫容量約為 8,935.1 萬立方公尺，而曾文水庫防淤隧道位址則是在壩前，根據歷年淤積測量資料換算距離上游邊界約 15,095 公尺，將數據整理出如表 6 所示：

表 6 南化水庫重現期模擬與曾文水庫模型比較

	入流總量 (m ³)	防淤隧道排砂比 (%)	SCR	
重現期	南化水庫 運移長度：10,532m 庫容量：8,935.1 萬 m ³			
	1.1	3,060,204.49	0.01%	0.03
2	6,714,623.44	0.01%	0.08	
5	11,215,798.00	0.23%	0.13	
10	14,751,374.06	1.06%	0.17	
20	18,613,768.08	2.14%	0.21	
25	19,935,895.26	2.29%	0.22	
50	24,318,226.93	4.21%	0.27	
100	29,190,785.54	6.16%	0.33	
200	34,612,992.52	8.25%	0.39	
	曾文水庫 運移長度：15,095m			
案例	入流總量 (m ³)	防淤隧道排砂比 (%)	庫容量 (10 ⁴ m ³)	SCR
海棠	493,104,759.00	6.76%	48,279	1.02
海棠低砂量	439,166,748.00	6.65%	48,279	0.91
609	342,251,809.00	5.04%	49,507	0.69
0609 低濃度	337,767,176.00	3.44%	49,507	0.68
定量流 1	323,195,966.00	7.34%	48,279	0.67

表中 SCR(Storage Capacity Ratio)流量入庫比=入流總量/水庫容量，因為水庫容量不同，在比較不同洪水事件流量所帶來的影響時不易判斷尺度，因此將流量與庫容無

因次化再進行數值比較，無因次化後發現兩水庫事件 SCR 數值相差較大，因此將兩水庫之 SCR 與排砂比進行線性回歸如圖 6 所示。

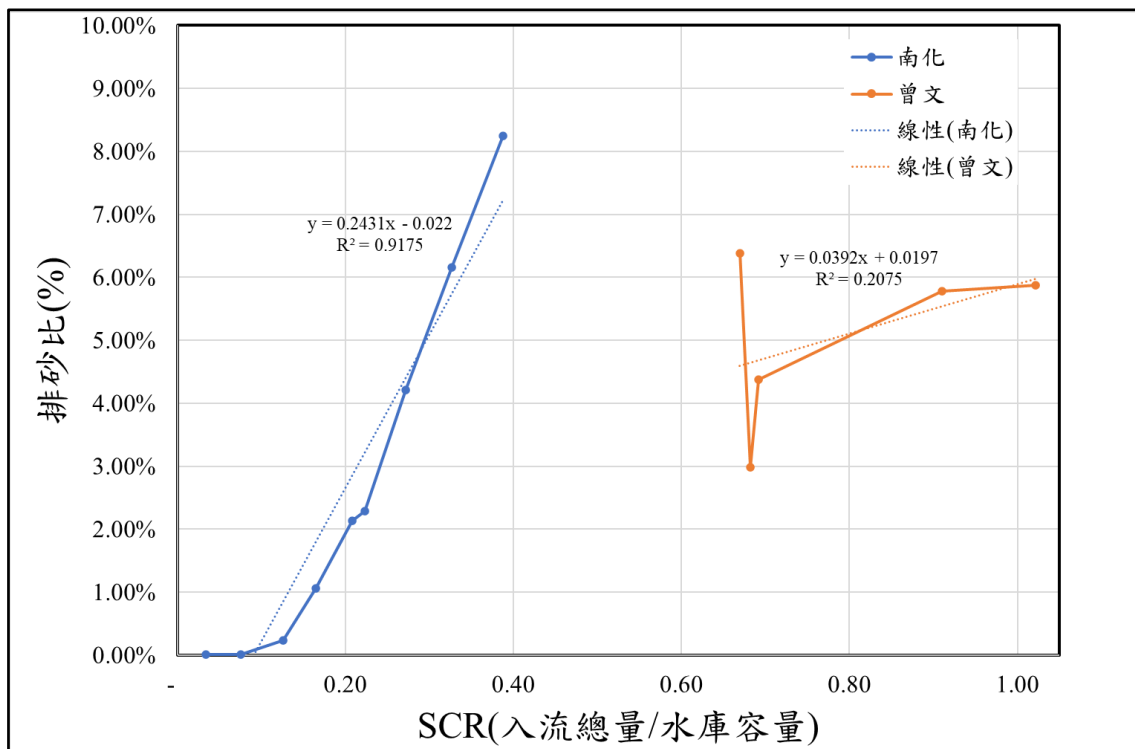


圖 6 無因次化後線性回歸分析

若依照前述觀察之現象，理論上 SCR 越高表示入流總量越高，排砂量也會隨之增加，在回歸圖表上南化以及曾文都符合此現象，而兩水庫不同之處在於南化水庫趨勢比曾文水庫來的更加明顯，表示南化水庫增加 SCR 所提升的排砂比會比曾文水庫更加顯著，本研究推測因為南化水庫中異重流的運移距離較短，在濃度折減比例變更高之前之前就可以將泥沙排出，因此可以提升較高之排砂比，反之曾文水庫中異重流運移的長度約是南化水庫的 1.4 倍，在抵達防淤隧道前泥砂濃度折減比例會更高，且由於曾文水庫庫容較大(曾文水庫現有效容量約為南化水庫 5.7 倍)，因此其在同樣泥砂入流條件下，庫區泥砂濃度折減比例曾文水庫將高於南化水庫，亦即南化水庫的排砂防淤條件優於曾文水庫。

從初步結果至回歸資料分析，本研究推測防淤隧道位址與排砂效率有一定關聯性，惟因曾文水庫之資料較少，建議進行曾文水庫重現期洪水模擬或是進行曾文水庫滿水位模型試驗，進一步分析防淤隧道位址對排砂效率之實際影響。

參考文獻

1. 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.
2. Lai Yong, G. (2010). Two-Dimensional Depth-Averaged Flow Modeling with an Unstructured Hybrid Mesh. Journal of Hydraulic Engineering, 136(1), 12-23.

3. 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
4. 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.
5. Nafeela Imtiyaz。2021。水庫抽泥浚渫對排砂設施其排砂效率影響之模擬分析。碩士論文。台北：國立臺灣大學土木工程學研究所
6. 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
7. 李豐佐、劉政其、賴進松、闕蓓德，(2023b)，「應用庫底沖刷槽導流牆減緩水庫淤積之研究」，*農業工程學報*，第 69 卷，第 2 期，第 11 - 21 頁。
8. 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。
9. 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研究所，碩士論文。
10. 經濟部水利署。(2014)。曾文溪水系曾文溪治理規劃檢討。
11. 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。
12. 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。
13. 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。
14. 劉政其(2023)，「水庫防淤操作對供水營運風險影響之研究」，碩士論文。台北：國立臺灣大學環境工程學研究所。