

防淤隧道排砂效率的動床試驗分析

Investigating Sediment Desilting Efficiency of Desilting Tunnel Under Mobile Bed Condition Using Physical Modeling

李豐佐
FONG-ZUO LEE
國立中興大學土木工程學系
助理教授

賴進松*
JIHN-SUNG LAI
國立臺灣大學水工試驗所
研究員

涂秀錦
HSIU-CHIN TU
台灣電力公司營建處
副處長

廖哲民
CHE-MIN LIAO
中興工程顧問股份有限公司
技術經理

陳秀娟
HSIU-CHUAN CHEN
中興工程顧問股份有限公司
計畫主任

ABSTRACT

The Wushe Reservoir, located in Ren'ai Township, Nantou County, was completed in the 48th year. It stands at a height of 114 meters with a total length of 205 meters and a full water level elevation of 1,005 meters. Its main facilities include a dam, spillway, inlet and outlet, and sediment flushing tunnel. As of 2021, the reservoir's sedimentation rate is approximately 75.22%, with sediment accumulation reaching an elevation of 977.52 meters in front of the dam. In response to sedimentation, the construction of sediment desilting tunnels is crucial, considering sediment desilting efficiency, construction feasibility, and long-term operation. This study utilized a 1/40 scale model to simulate the influence of hydrological changes on sediment desilting efficiency. Experiment scenarios encompassed Q_2 , Q_{10} , and Q_{50} flood situations, with an initial water level set at 1,002 meters, investigating the sediment desilting efficiency of the desilting tunnel under different hydrological conditions. Results indicated sediment desilting efficiencies of approximately 17.54% for Q_2 , 26.09% for Q_{10} , and 33.96% for Q_{50} . Sediment erosion in the reservoir mainly occurred on the right bank, with decreasing differences in sediment concentration between the left and right banks as inflow decreased. Sediment deposition within the reservoir began as inflow reduced, but the impact of hydrological conditions led to shorter sediment transport times and reduced dilution of inflowing turbid water by initial clear water in the reservoir. Maximum erosion depth within the bed-load laying area was approximately 2 meters, and the influence of the flow field at the entrance of the desilting tunnel extended to about 40 meters. Overall, after the construction of the desilting tunnel, the reservoir's sediment desilting efficiency ranged from 17.54% to 40.63%, with a total sediment desilting volume of approximately 9.52 to 126.26 ten thousand tons.

Keywords: Desilting tunnel, Hydrological condition, Desilting efficiency.

* 通訊作者，國立臺灣大學水工試驗所研究員，台北市106羅斯福路四段一號，jslai525@ntu.edu.tw

摘要

霧社水庫位於南投縣仁愛鄉，於48年完工，壩高114公尺，壩頂總長205公尺，滿水位高程EL. 1,005公尺，主要設施有大壩、溢洪道、放水口、進水口、排洪隧道等，至2021年，水庫淤積率約為75.22%，壩前淤積高程EL. 977.52公尺。為因應防淤，防淤隧道建設至關重要，需考量排砂效益、施工可行性及長期運營。本研究以1/40等比模型模擬水文變化對排砂效率影響，試驗情境包括 Q_2 、 Q_{10} 、 Q_{50} 洪水情境，初始水位設定為1,002公尺，探討不同水文情境下防淤隧道排砂效率。試驗成果顯示 Q_2 排砂效率約17.54%， Q_{10} 約26.09%， Q_{50} 約33.96%。庫區沖刷行為主要集中於右岸，且隨入流減少，左右岸泥砂濃度差異減小，庫區泥砂開始落淤，但受入流流量逐漸增加影響，泥砂運移時間縮短，入庫渾水受庫區初始清水稀釋之影響亦隨之變小。動床鋪設範圍內沖刷深度最大約2公尺，防淤隧道入口流場影響沖淤範圍約40公尺。綜合試驗結果，防淤隧道興建後，水庫整體排砂效率介於17.54%至40.63%之間，總排砂量約9.52至126.26萬噸。

關鍵詞：防淤隧道，水文情境，排砂效率。

一、前言

目前，水資源管理面臨著重大挑戰，即由於淤積導致水庫蓄水量減少，這對於緩解未來的水資源匱乏問題至關重要[1-3]。在水庫運營中，需要規劃適當的防淤措施來維持水庫的蓄水量[4-6]。考慮到現場水庫的高建設成本，必須在現場工程項目進行之前進行仔細評估，考慮到其規模，過去的研究已利用數值模型進行相關評估[7, 8]，根據文獻顯示，1-D、2-D和3-D數值模型亦已開發用於水砂模擬，以估算入庫泥砂之渾水運移現象，包括異重流、底床沖淤、懸浮質沉積模擬、出水口泥砂排放等[9-15]。隨著高速運算電腦軟硬體的進步，數值模式演算理論技術，由比較簡化的一維問題逐步發展到解答處理複雜的二維及三維水理輸砂問題。雖然對距離長範圍大的沖淤變化模擬，一維數值模式以其計算時間短、人力經費較少的優點，與水工模型相比較則具有適用性。然而因為過度簡化，其對垂向之水砂運移現象無法完整呈現。對於範圍較小的局部區域而言，雖然二維或三維沖淤模擬，可獲得複雜地形及邊界條件的水砂運動規律，但水利工程中常存在水工構造物設施，二維或三維數值模式目前也尚未能完全正確的掌握其周圍之水理輸砂現象，因此仍需結合水工模型試驗結果來比較分析。水工模型被廣泛用於研究水利工程中的設計和操作問題，該方法利用縮小比例的模型來複製水和泥砂在各種自然流系統中的運輸過程，如水

庫[16]。

而部分學者亦透過模型實驗來探討水庫水砂運移之特性，並針對水庫淤砂型式、出口設施位置、高程和排砂效率有關的各個議題[17-19]。然而物理模型常用的模型比尺主要用於模擬水庫中粗顆粒泥砂的運輸。然而，不同的泥砂傳輸機制可能無法同時模擬沉積和沖蝕機制。此外，由於水庫中細顆粒沉積物具有黏滯特性，因此在物理模型中往往無法充分模擬其運輸行為，特別是當模型的比例尺過大時。水利規劃分署[20]指出，物理模型中水理特性的主要限制之一是由於用於實現原型和模型之間流動相似性的比例尺的影響。縮小模型的比例(水平比例/垂直比例)應小於6。Lu *et al.*[21]證明了縮小模型的幾何尺度可以扭曲或不扭曲，並且他們研究了扭曲對河床變形的影響。Abderrezzak *et al.*[22]研究了縮小模型的尺度效應對河床侵蝕的影響，他們得出結論，由於Shields數的相似性關係，底床泥砂被沖蝕的體積可能被低估。Huang *et al.*[23]利用了扭曲比例為十的物理模型研究了水庫沉積的長期變化。Sawadogo *et al.*[24]則使用了碎桃核作為試驗用砂，模擬了水庫中的底層出水口周圍動床泥砂的沖刷歷程。Teixeira *et al.*[18]提出了一種利用橡膠顆粒材料模擬粗顆粒泥砂傳輸的方法，並將其應用於四種扭曲比例尺模型中。儘管如此，不等比模型及過大的扭曲比例，則容易造成出水口或防淤隧道入口周圍流場的失真，進而影響防淤隧道入口處的底床沖淤，因此為了避免上

述不等比及扭曲比例過大造成模型試驗成果的限制，大部分學者採用等比模型，進行水庫水砂運移之特性研究，包含Lai and Chang[25]根據凝聚性沉積物泥砂啟動的動態相似性，進行了動床物理模型，以研究水庫中的水力淤砂排除和橫向侵蝕。Mefford and Gill[26]利用模型試驗評估了受蜿蜒河道影響的淺水渠道中的棲息地改變。Ho *et al.*[27]利用不等比模型，探討取水口周圍的鹽度分布。Armanini *et al.*[28]利用不等比模型試驗研究了防波堤對意大利波河航道條件的影響。Bieri *et al.*[29]利用不等比模型對瑞士一水電廠進行了案例研究。Moran *et al.*[30]利用不等比的物理模型研究了萊茵河的沉積物傳輸策略，通過基於物理模型的方法，了解水力淤砂排除方法中的沉積模式和淤沙效率。Camnasio *et al.*[31]利用物理模型研究了淺矩形水庫長寬比對流速場的影響，進而影響沉積物運移。Alhasan *et al.*[32]比較了文獻中，從守恆方程獲得的總固體泥砂排放量和在物理模型中觀察到的總固體泥砂排放量。正如Huang *et al.*[23]試驗中亦提到，泥砂沉積對台灣地區水庫構成了重大挑戰，特別是在集集地震後；為了解泥砂沉積運動並評估長期泥砂沉積的演變，對霧社水庫進行了一個不等比物理模型，該研究提出了對Brune[33]方法的修改，以預測水庫的剩餘壽命。Beckers *et al.*[34]引入了一種實驗方法來探討有黏性的水庫沉積物，使用灌入式沉積物採樣器，從水庫底床中提取了沉積泥砂，分析不同深度所淤積的泥砂特性，並通過不同的泥砂粒徑組合，進行了相關淤積行為的研究。Chamoun *et al.*[17]利用水槽研究了隧道通氣的時間和持續時間，得出適當更有效的隧道通氣位置，應在排放濁流出口上游約300米處開始。根據Moldenhauer-Roth *et al.*[35]關於弗勒德和楔狀相似性的考慮，物理模型比尺介於1/10至1/40之間，可較為適當應用於研究入庫泥砂運移，以及沉降特性之研究。Huang *et al.*[36]利用1/50等比縮尺模型，進行繞庫排砂物理模型建模，進行了完整的水工模型試驗，提供了粗顆粒泥砂的詳細實驗設置和結果。李豐佐等人[19]則根據模型相似定律，以不等比模型探討Q2水文情境與防淤操作下，探討霧社水庫防淤隧道進口水口底檻高程與排砂效率之影響關係。

因此，根據上述文獻回顧，本研究以等比模型作為主要依據，探討水庫防淤操作下的水理及輸砂特性，並透過不同水文情境的試驗，探討霧社水庫新建防淤隧道在動床情境下的防淤效益，除了可提供霧社水庫在水力防淤上的操作參考，亦可了解等比模型對於水庫防淤模擬課題的學術理論背景。

二、研究區域及模型相似率

2.1 霧社水庫基本資料

霧社水庫(如圖1所示)位於南投縣仁愛鄉濁水溪上游支流霧社溪河谷中。水庫於民國48年興建完成，其壩體為一混凝土拱型重力壩，高度為114公尺，壩頂總長205公尺，滿水位高程為EL. 1,005公尺。主要設施包括大壩、壩頂溢洪道(溢頂標高998.87公尺， $Q = 850 \text{ m}^3/\text{s}$)、永久河道放水口(中心標高927.65公尺， $Q = 87 \text{ m}^3/\text{s}$)、發電進口水口(#1、#2發電機組入口底標高938.48公尺，設計流量 $24 \text{ m}^3/\text{s}$ ；#4發電機組入口底標高966公尺，設計流量 $22 \text{ m}^3/\text{s}$)、排洪隧道(入口底標高989.73公尺， $Q = 1,670 \text{ m}^3/\text{s}$)等。水庫的集水區面積為219平方公里，2020年實測水庫有效蓄水量為3,753萬立方公尺，壩前淤積高程約為EL. 977.52公尺，至2024年1月統計總容量淤積率約為80.70%(台灣電力公司，2024)，因此霧社水庫泥砂淤積情形相當嚴重，總容量淤積率約有4/5的容量已被泥砂覆蓋，故屬於高淤積水庫。

台灣電力公司[37, 38]已分別於2010年及2017年，進行「霧社水庫淤積改善可行性研究」及「萬大發電廠#1、#2機組進口水口前淤積改善導水隧道改造為排砂可行性研究」模型試驗，以等比1/50模型探討繞庫通砂、滯洪排砂及導水隧道改建為防淤隧道等情境進行試驗，可見霧社水庫之重要性。然而霧社水庫作為濁水溪日月潭發電系統之調節庫容，影響集集攔河堰枯水期水源，至2021年統計總容量淤積率約為75.22%[39]，因此霧社水庫泥砂淤積情形相當嚴重，總容量淤積率約有3/4的容量已被泥砂覆蓋，故屬於高淤積水庫，幾乎快呈現淤滿狀態，而水庫的淤積問題將造成其標的運用的影響，然

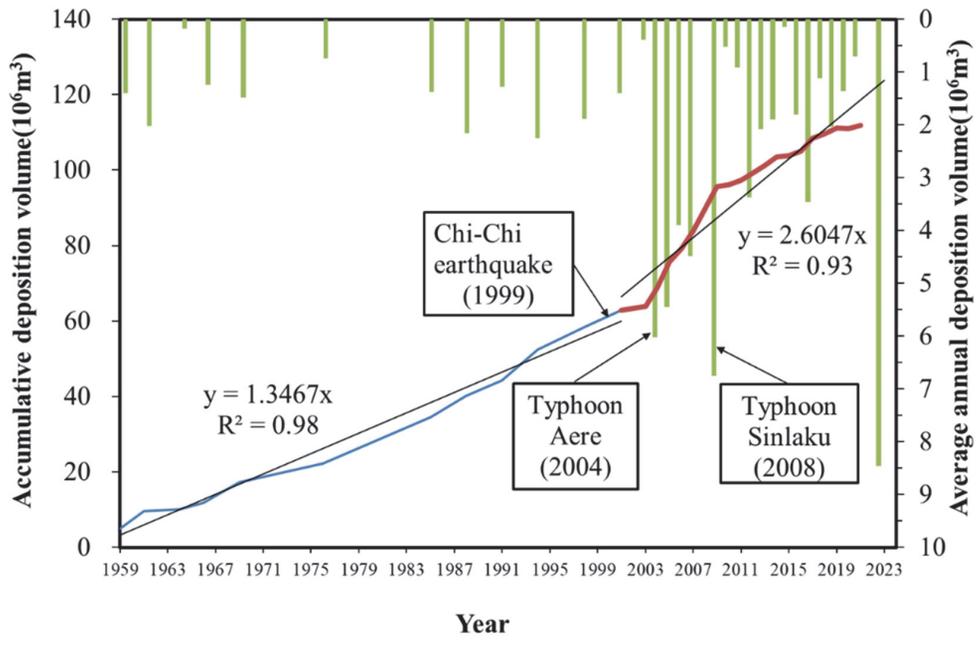
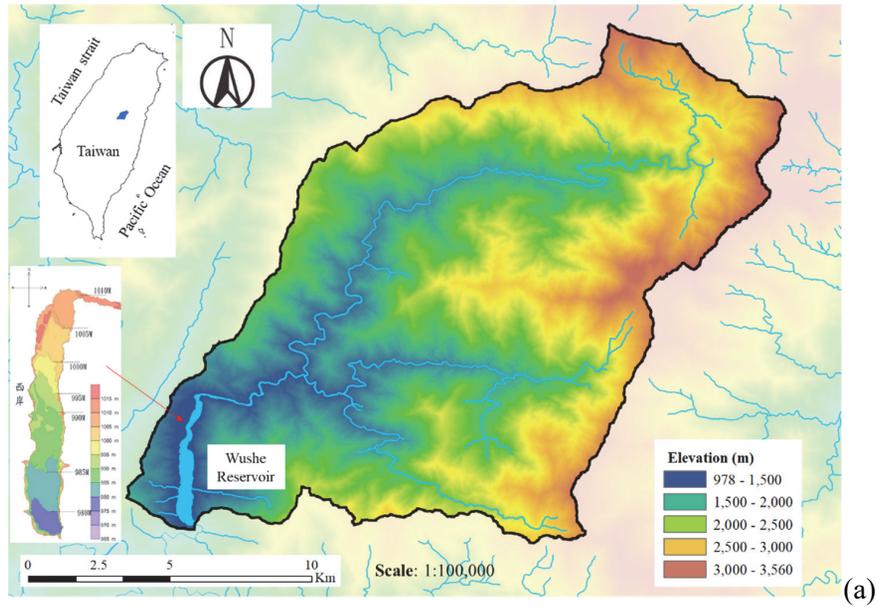


圖1 霧社水庫 (a)集水區範圍及地理位置(modified from李豐佐等人[19]) (b)歷年淤積量變化

而現況石門、曾文、南化水庫現況均已完成防淤隧道之興建且運轉中，而霧社水庫防淤隧道已進入招標階段，預計116年完工，此外，行政院於109年11月30日亦核定「霧社水庫防淤工程計畫」，規劃辦理霧社水庫防淤隧道工程、河道放淤工程及松林堰專管工程等，計畫完成後可增加水庫排淤能力每年75萬立方公尺及河道放淤

減淤量每年60萬立方公尺，並增加水庫排洪能力每秒530 m³/s。隧道進水口段為寬5.8公尺×高8公尺雙孔箱涵，閘門室段為長29.35公尺、寬10公尺、高36.5公尺之長方形地下結構，全長282公尺，坡度1.5%，分為漸變段與標準段。出水口段全長90公尺，矩形明渠斷面(斷面寬7公尺，側牆高度由6公尺至11.95公尺)，終點設置一跳

厚，出口高程EL. 893.9公尺。落水池為現地下挖成，表面設有混凝土保護，底部高程EL. 870公尺，底寬15公尺至25公尺，全長115公尺。

2.2 模型相似率

本水工模型比尺採用1/40，模型比尺以相似理論為基礎，模型相似率必須同時滿足水流動力相似及泥砂動力相似性，考慮到細顆粒沉積物的物理運移現象主要由沉降速度主導，我們採用斯托克斯(Stokes' Law)定律推導了物理模型的顆粒尺寸，而水力參數則通過質量守恆和福祿數(Froude number)進行分析。以下就利用試驗泥砂之水流動力相似及泥砂動力相似進行等比模型比尺說明：

(一) 水流動力相似

幾何比尺包含 λ_l 及 λ_h ，其中 λ 為原型對模型之比值、 L 為幾何水平長度、 H 為垂直方向水深。利用原型與模型水流福祿數相同，可得流速比尺 $\lambda_H = \lambda_L^{1/3}$ 、水流時間比尺 $\lambda_T = \lambda_L^{2/3}$ 及流量比尺 $\lambda_Q = \lambda_L^2$ 。

(二) 泥砂動力相似

1. 懸浮質輸砂及沉降相似

利用三維垂直擴散方程式可推導泥砂沉降的模型相似律，其方程式為：

$$\frac{\partial s}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(us) - \frac{\partial}{\partial y}(vs) - \frac{\partial}{\partial z}(ws) + \frac{\partial}{\partial z}(\omega s) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\varepsilon_{sx} \frac{\partial s}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\varepsilon_{sy} \frac{\partial s}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\varepsilon_{sz} \frac{\partial s}{\partial z}\right) \quad (1)$$

式中 ω 屬顆粒沉降速度， ε_{sx} 、 ε_{sy} 、 ε_{sz} 屬泥砂擴散係數， u 、 v 、 w 為 x 、 y 、 z 方向之水流流速分量。在不等比模型情況下：

$$\lambda_x = \lambda_y \lambda_L, \lambda_z = \lambda_h \\ \lambda_u = \lambda_v, \lambda_w = \frac{\lambda_h}{\lambda_L} \lambda_u \quad (2)$$

其中 λ_x 、 λ_y 、 λ_z 為 x 、 y 、 z 方向幾何比尺， λ_u 、 λ_v 、 λ_w 為 x 、 y 、 z 方向流速比尺， λ_h 為水深比尺， λ_L 為長度比尺。由擴散方程式各項因次相同可得以下之比尺關係：

$$\frac{\lambda_\omega \lambda_s}{\lambda_h} \Big/ \frac{\lambda_s}{\lambda_l} = \frac{\lambda_\omega \lambda_l}{\lambda_h} = 1 \quad (3)$$

$$\frac{\lambda_\omega \lambda_s}{\lambda_h} \Big/ \frac{\lambda_u \lambda_s}{\lambda_L} = \frac{\lambda_\omega \lambda_L}{\lambda_u \lambda_h} = 1 \quad (4)$$

$$\frac{\lambda_{\varepsilon_{sx}} \lambda_s}{\lambda_L^2} \Big/ \frac{\lambda_\omega \lambda_s}{\lambda_h} = \frac{\lambda_{\varepsilon_{sx}} \lambda_h}{\lambda_L^2 \lambda_\omega} = 1 \quad (5)$$

$$\frac{\lambda_{\varepsilon_{sy}} \lambda_s}{\lambda_L^2} \Big/ \frac{\lambda_\omega \lambda_s}{\lambda_h} = \frac{\lambda_{\varepsilon_{sy}} \lambda_h}{\lambda_L^2 \lambda_\omega} = 1 \quad (6)$$

$$\frac{\lambda_{\varepsilon_{sz}} \lambda_s}{\lambda_h^2} \Big/ \frac{\lambda_\omega \lambda_s}{\lambda_h} = \frac{\lambda_{\varepsilon_{sz}}}{\lambda_h \lambda_\omega} = 1 \quad (7)$$

式中， λ_l 為時間比尺， λ_s 為濃度比尺， $\lambda_{\varepsilon_{sx}}$ 、 $\lambda_{\varepsilon_{sy}}$ 、 $\lambda_{\varepsilon_{sz}}$ 為 x 、 y 、 z 方向泥砂擴散係數比尺， λ_u 、 λ_v 、 λ_w 為 x 、 y 、 z 方向流速比尺， λ_ω 為沉降速度比尺。將式(2)代入上式可得：

$$\frac{\lambda_{\varepsilon_{sx}}}{\lambda_u \lambda_L} = \frac{\lambda_{\varepsilon_{sy}}}{\lambda_v \lambda_L} = \frac{\lambda_{\varepsilon_{sz}}}{\lambda_w \lambda_h} = 1 \quad (8)$$

又因為水深方向泥砂擴散係數可以水流紊流黏滯係數表示，即：

$$\varepsilon_{sz} \approx \lambda u_* \left(1 - \frac{z}{h}\right) z \quad (9)$$

式中 u_* 為剪力速度， λ 為係數。所以 $\lambda_{\varepsilon_{sz}} = \lambda_x \lambda_{u_*} \lambda_h$ ，令 $\lambda_x = 1$ ，則可得：

$$\lambda_{\varepsilon_{sx}} = \lambda_{\varepsilon_{sy}}, \lambda_{\varepsilon_{sz}} = \left(\frac{\lambda_h}{\lambda_L}\right)^2 \lambda_{\varepsilon_{sx}} \quad (10)$$

因 $\lambda_{\varepsilon_{sz}} = \lambda_\omega \lambda_h$ 與 $\lambda_{\varepsilon_{sz}} = \lambda_u \lambda_h$ 合併後可得 $\lambda_\omega = \lambda_{u_*}$ ，因此模型比尺要滿足：

$$\frac{\lambda_u \lambda_h}{\lambda_\omega \lambda_L} = 1 \quad (11)$$

$$\frac{\lambda_{u_*}}{\lambda_\omega} = 1 \quad (12)$$

但是對於不等比模型來說，上兩式不可能同時成立。由上式得知沉降速度縮尺為：

$$\lambda_\omega = \frac{\lambda_h}{\lambda_L} \lambda_u \quad (13)$$

然而按水流阻力公式 $\lambda_u = \lambda_{u_*} / \lambda_f^{1/2}$ 及 $\lambda_\omega = \lambda_{u_*}$ 關係，並將 $\lambda_f = \lambda_h / \lambda_L$ 代入可得：

$$\lambda_\omega = \left(\frac{\lambda_h}{\lambda_L}\right)^{1/2} \lambda_u \quad (14)$$

如此可知上兩式之條件不可能同時滿足。

在動床模型試驗時，原型中含砂量沿垂線分佈的正確模擬若能反應在模型中，則可建立紊流擴散與重力沈降相似的比尺關係，即泥砂沈降相似問題，應確定縱向流速與泥砂沈速關係。若同時考量水流福祿數相似律，可得下列比尺關係：

$$\lambda_{\omega} = \lambda_{u_*} \left(\frac{\lambda_h}{\lambda_L} \right)^{1/2} \quad \lambda_{u_*} = \left(\frac{\lambda_h}{\lambda_L} \right)^{1/2} \quad \lambda_h^{1/2} = \frac{\lambda_h}{\lambda_L^{1/2}} \quad (15)$$

若想以等比模型建造，又想縮小泥砂沉降速率，可考慮用Stokes' law來縮小試驗用砂粒徑，Stokes' law常用於計算單顆粒沉降速度，因此可用於描述泥砂顆粒之沉降特性，或是進行泥砂粒徑之縮比計算，以1/40模型為例，模型水流流速為原型流速1/40^{1/2}，其中Stokes' law公式為：

$$\omega = \frac{(s-1)gd^2}{18\nu} \quad (16)$$

$d'/d = w^{(1/2)} = 40^{1/4} = 2.51$ ，若以壩前0.015 mm泥砂粒徑，則需以0.006 mm泥砂作為模型砂，然而縮小後之泥砂仍以粉土及黏土特性為主且縮比不大，故本計畫仍採用霧社水庫壩前原型砂(0.015 mm)作為試驗入流用砂，若無法取得原型砂方採用粒徑及比重等泥砂參數相同之高嶺土(d_{50} 為0.015 mm)，但由於所採用泥砂粒徑較大，因此排砂效率試驗成果應較為保守。

2. 輸砂相似

河段之輸砂率，模型必須與原型相似。由懸砂擴散方程式之邊界條件：

$$\varepsilon_{sz} = \frac{\partial S}{\partial z} \Big|_{z=0} = -\omega S_{b_*} \quad (17)$$

S_{b_*} 為床面飽和含砂量。上式表示由於含砂量梯度而引起的泥砂向上擴散量等於飽和挾砂情況下，由於重力作用而引起的泥砂向下沈降量。由此邊界條件可得比尺關係式為：

$$\frac{\lambda_{\varepsilon sz} \lambda_{sb}}{\lambda_{\omega} \lambda_h \lambda_{sb_*}} = 1 \quad (18)$$

式中， λ_{sb} 、 λ_{sb_*} 為床面含砂量及床面飽和含砂量比尺。考量上節擴散方程式推得的關係式 $\lambda_{\varepsilon sz} = \lambda_h \lambda_w$ 則可得：

$$\frac{\lambda_{sb}}{\lambda_{sb_*}} = 1 \quad (19)$$

在含砂量及流速沿垂線分佈與原型相似下，可得：

$$\frac{\lambda_s}{\lambda_{sb_*}} = 1 \quad (20)$$

λ_s 為單位體積含砂量， λ_{sb_*} 為飽和單位體積含砂量。引進武漢輸砂公式，懸移質挾砂能力之水流挾砂力公式，如下式：

$$S_* = \frac{\rho_s}{8C_1 \frac{\rho_s - \rho}{\rho}} (f_0 - f_s) \frac{V^3}{gR\omega} \quad (21)$$

ρ_s 為泥砂密度， ρ 為水流密度， f_0 、 f_s 為水面及底床坡度， R 為水力半徑， C_1 為係數。若考量 $\lambda_{C_1} = 1$ ， $\lambda_{f_s} = \lambda_{f_0}$ ， $\lambda_R = \lambda_h$ (λ_{f_0} 、 λ_{f_s} 為水面及底床坡度比尺， λ_R 為水力半徑比尺)，所以：

$$\lambda_s = \lambda_{S_*} = \frac{\lambda_{\rho_s}}{\lambda_{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right)}} \cdot \lambda_f \cdot \frac{\lambda_u^3}{\lambda_R \lambda_{\omega}} \quad (22)$$

式中， $\lambda_f = \lambda_h / \lambda_L$ 、 $\lambda_u = \lambda_h^{1/2}$ ， $\lambda_R = \lambda_h$ 採懸移相似 $\lambda_u \lambda_h / \lambda_{\omega} \lambda_L = 1$ 及福祿數相似。由上式可得：

$$\lambda_s = \lambda_{S_*} = \frac{\lambda_{\rho_s}}{\lambda_{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right)}} = \lambda_{\rho_s} \lambda_{\Delta} \quad (23)$$

$$\lambda_s = \lambda_{S_*} = 1 \quad (24)$$

3. 河床變形相似

河床變形連續方程式如下式所示：

$$\frac{\partial(QS)}{\partial x} + \rho_s B \frac{\partial Z_b}{\partial t} = 0 \quad (25)$$

式中 Q 為流量， Z_b 為底床高程， B 為河寬，可得河床變形比尺關係式：

$$\frac{\lambda_Q \lambda_s \lambda_t}{\lambda_L^2 \lambda_{\rho_s} \lambda_h} = 1 \quad (26)$$

λ_t 為河床變形時間比尺。因 $\lambda_Q = \lambda_L \lambda_h^{1/2}$ 代入上式可得：

$$\lambda_t = \frac{\lambda_{\rho_s}}{\lambda_s} \cdot \frac{\lambda_L}{\lambda_h^{1/2}} \quad (27)$$

若試驗採用原型砂相同比重泥砂 $\lambda_{\rho_s} = 1$ 則水流與泥砂運移的時間比尺才會一致，因此本研究依據此一相關性進行模型試驗之時間縮比。

4. 沖刷相似

若水庫庫區淤積物一般含有相當比尺的黏性細泥砂，由於黏結力在黏性淤泥的沖刷過程中起著極為重要的作用。而黏結力隨淤積物乾密度的增大而迅速增大，由王兆印等之研究得到黏性淤泥乾密度 ρ_d 與臨界沖刷流速 u_c 之經驗關係如下：

$$u_c = a\rho_d^b \quad (28)$$

式中 u_c 以m/s計； ρ_d 以g/cm³計； a 、 b 係數利用水槽試驗求之。沖刷相似要求臨界沖刷流速比尺 λ_{u_c} 與流速比尺 λ_u 相等由上式可以推出：

$$\lambda_{\rho_d} = \lambda_{u_c}^{1/b} = \lambda_u^{1/b} = \lambda_h^{1/2b} \quad (29)$$

式中 λ_{ρ_d} 屬淤泥乾密度比尺， λ_{u_c} 屬臨界沖刷流速比尺。根據文獻張與賴^[40]大埔水庫(d_{50} 介於0.008~0.03 mm)係數 a 與 b 分別為0.74與1.52；根據賴^[41]阿公店水庫(d_{50} 約為0.006 mm)之係數 a 與 b 則分別為1.65與1.96，因此若以霧社水庫庫區泥砂粒徑 d_{50} 介於0.015~0.04 mm之間，則係數 a 與 b 分別採用大埔水庫之研究成果0.74與1.52較為適當。因此本研究依據此一關係式進行庫區底床動床泥砂乾密度之調整。

三、模型試驗規劃

本研究主要針對水文情境改變對於防淤隧道排砂效率之影響研究，且考量霧社水庫發電及蓄水利用主要以高水位為主，因此試驗情境之起始水位皆以1,002公尺為初始水位，此外，考量霧社水庫主要防洪及防淤操作皆以溢洪道及新設之防淤隧道為主，因此本研究之出水工操作以溢洪

道及新設之防淤隧道為主，各水文重現期及出水工啟閉規劃如表1所列。

在本研究中，我們採用了基於相似性的概念進行了1/40比例縮尺模型實驗。然而，本研究的重點是利用壩址上的新防淤隧道來排除細顆粒沉積物。然而，由於本研究中的實驗空間限制和經費考慮，我們大約考慮了水庫面積的四分之一來評估模型試驗的可信度和代表性，如圖2所示。整體所需場地範圍則依據模型率換算後寬度約40公尺、長度約45公尺，共計約1,800平方公尺。出水口設置則包含排洪隧道、發電取水口、防淤隧道及溢洪道。

本研究試驗範圍內考量主要庫區底床沖淤位置，以同樣試驗泥砂粒徑(0.015 mm)進行動床鋪設，鋪設厚度約為3公尺，相當於模型鋪設厚度為7.5 cm，且規劃斷面0K+500m (#6)及斷面0K+200m (#3)進行分層泥砂濃度採樣，了解不同水文情境下的垂向與左右岸泥砂濃度分布，以及0K+50m了解極端水文情境下底床的沖淤變化，此外，亦規劃進行溢洪道及防淤隧道的出流泥砂濃度量測，了解其排砂效率的變化及總量，整體規劃如圖3所示。

由於本模型試驗主要集中於壩前1 km範圍內，因此使用的泥砂主要以懸浮質泥砂粒徑。底床泥砂粒徑參考了台灣電力公司^[37]於2010年所進行的「霧社水庫淤積改善計畫可行性研究」中的粒徑調查。模型試驗範圍內的泥砂主要為顆粒粉土及黏土，而根據2020年霧社水庫淤積測量成果報告^[39]，淤積三角洲已達到壩前500公尺，且估計在116年時，壩前淤積面高程為EL. 986.8公尺，淤積三角洲已達到壩址。然而，由於近年來底床泥砂採樣及粒徑分析資料未更新，因此在本研究試驗中，我們使用了2010年報告中的泥砂粒徑進行推估。底床泥砂的鋪設取自距離壩址2公里和4公里的泥砂粒徑 d_{50} 平均值。然而，即

表1 模型試驗水文情境及出水工規劃

組別	起始水位(公尺)	入流量尖峰(m ³ /s)	出水工		
			溢洪道	排洪隧道	防淤隧道
Q ₂ 滯洪	1,002	530	-	-	開啟
Q ₁₀ 滯洪		1,063	開啟	-	開啟
Q ₅₀ 滯洪		1,529	開啟	-	開啟

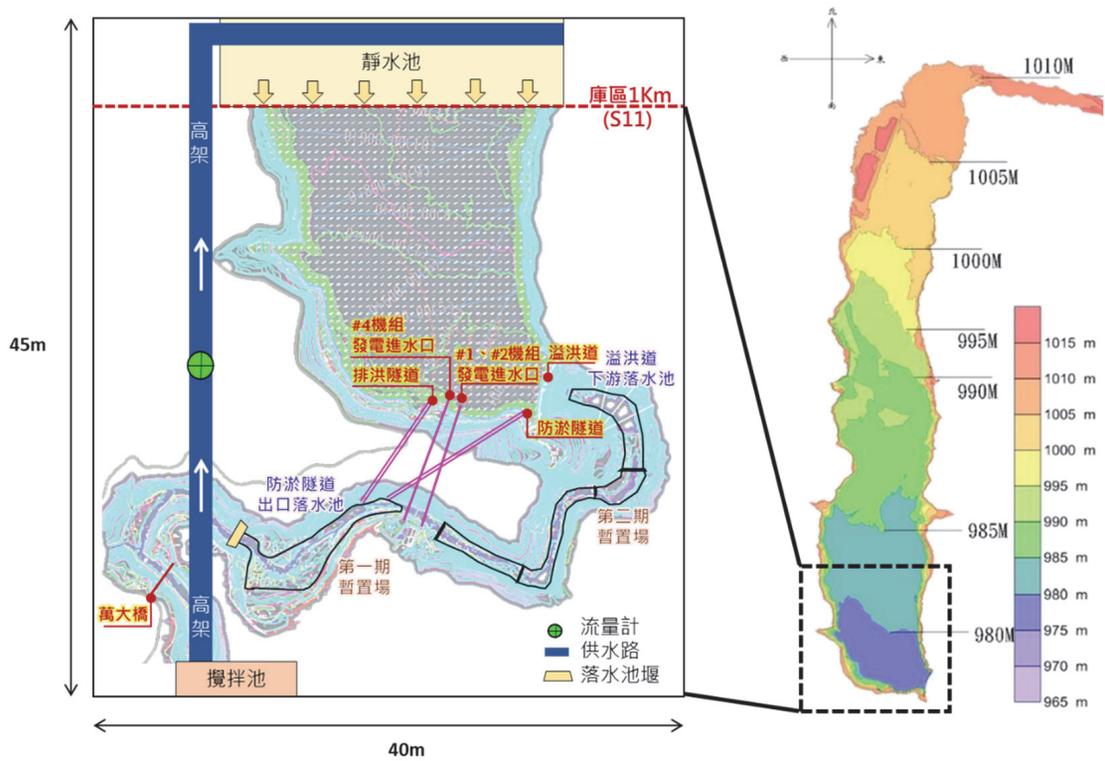


圖2 水工模型試驗平面佈置圖

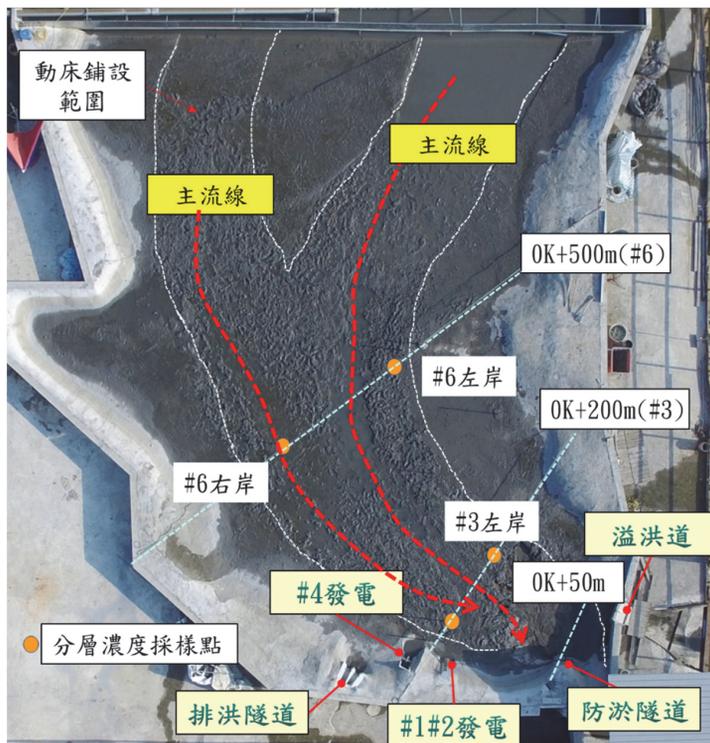


圖3 模型試驗水文情境及出水工規劃

使將粒徑泥砂縮比後，仍然大於#200號篩(0.074 mm)，無法進一步細化，因此我們仍然使用庫區 0.015 mm 的粒徑進行底床的鋪設。雖然採用的泥砂粒徑大於理論縮比值，導致沉降速度較理論值更大，且試驗中防淤隧道的排砂率可能偏低，但即便存在些許差異，仍然屬於保守估計的範圍內。

本研究根據台灣電力公司[37, 38]年執行的「霧社水庫淤積改善計畫可行性研究」和2017年「萬大發電廠#1、#2機組進水口前淤積改善-導水隧道改造為排砂可行性研究」，採用了入流量與泥砂量之相關性來推估入庫泥砂濃度，這一方法適用於全庫區試驗模擬，並可作為不同比例尺水工模型的上游邊界條件，然而全庫區水工模型試驗所需要之人力與物力皆十分龐大，在考量經費與場地之限制條件下，水工模型試驗的上游邊界選取含砂水流相對均勻發展的穩流段(距離壩址約1 km上游處)，邊界條件可以通過數值模擬經由模式驗證後來獲得，並提供該處含砂水流的條件，包括分層含砂濃度資料，以及根據濃度

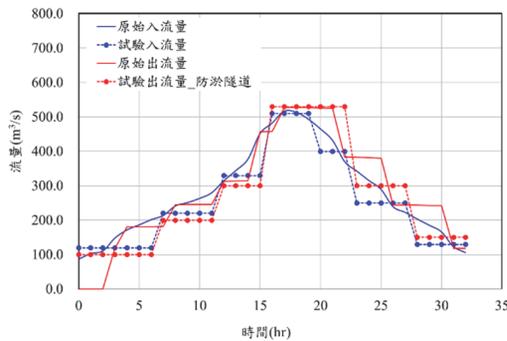
分層厚度混合清水和濁水之入流，因此本研究參考台灣電力公司[42]「霧社水庫防淤工程規劃設計」之三維數值模擬成果以及李豐佐等人^[19]之不等比模型試驗成果，給定本研究之上游入流水砂邊界條件。

(一)試驗組別 Q_2 滯洪

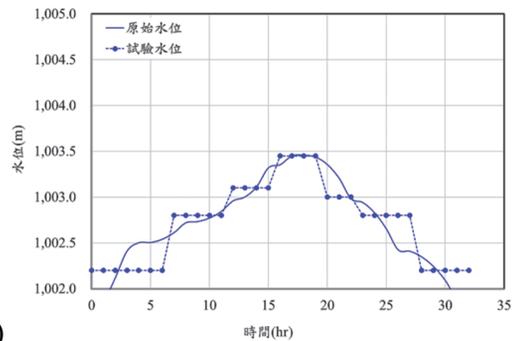
本研究 Q_2 滯洪試驗初步以水庫起始水位高程EL.1002公尺，操作防淤隧道閘門，依照 Q_2 滯洪流量歷線及入流濃度歷線，於庫區動床區域鋪設淤泥，探討 Q_2 滯洪排砂時，庫區各斷面之垂向與縱向水砂變化，以及防淤隧道排砂濃度變化及排砂效率。圖4為 Q_2 滯洪試驗之入、出流量歷程及水位歷程，總歷時約為32小時。

(二)試驗組別 Q_{10} 滯洪

本研究 Q_{10} 滯洪試驗初步以水庫起始水位高程EL.1002公尺，操作防淤隧道及溢洪道閘門，依照 Q_{10} 滯洪流量歷線及入流濃度歷線，於庫區動床區域鋪設淤泥，探討 Q_{10} 滯洪排砂時，防淤隧道及溢洪道排砂濃度變化及排砂效率。圖5為 Q_{10} 滯洪試驗之入、出流量歷程及水位歷程，總

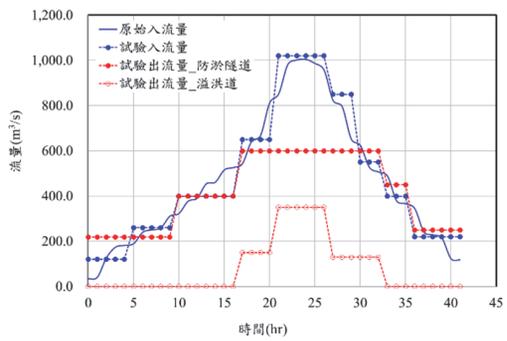


(a)

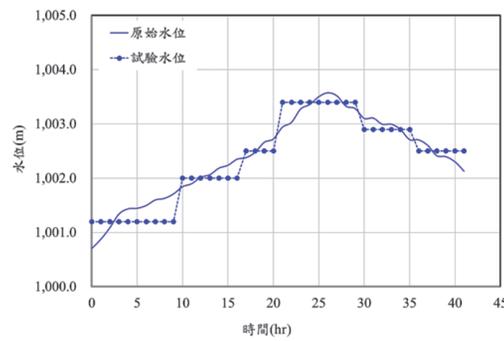


(b)

圖4 Q_2 滯洪試驗(a)入流量、出流量歷程及(b)試驗水位歷程



(a)



(b)

圖5 Q_{10} 滯洪試驗(a)入流量、出流量歷程及(b)試驗水位歷程

歷時約為41小時。

(三)試驗組別 Q_{50} 滯洪

本研究 Q_{50} 滯洪試驗初步以水庫起始水位高程EL.1002公尺，考量霧社水庫操作排洪隧道時仍有震動過大之疑慮，因此同 Q_{10} 滯洪試驗，僅操作防淤隧道及溢洪道閘門，依照 Q_{50} 滯洪流量歷線及入流濃度歷線，於庫區動床區域鋪設淤泥，探討 Q_{50} 滯洪排砂時，庫區各斷面之垂向與縱向水砂變化，底床各斷面之沖淤變化，以及防淤隧道及溢洪道排砂濃度變化及排砂效率。圖6為 Q_{50} 滯洪試驗之入、出流量歷程及水位歷程，總歷時約為45小時。

四、模型試驗成果

本研究 Q_2 滯洪試驗在庫區0k+200(#3斷面)及庫區0k+500(#6斷面)泥砂濃度於不同高程之變化如圖7所示，可知隨著入流量及泥砂濃度增加，兩斷面之泥砂濃度亦隨增加，且在尖峰入流量

發生前後，0k+200及0k+500右岸濃度皆大於左岸，可見由於庫區地形因素影響，流量越大，流場越偏右岸，且底層泥砂濃度略大於接近水面之值，但隨著入流量及泥砂濃度減少，則左右岸的泥砂濃度差異亦隨之變小，且庫區泥砂開始落淤。而試驗之原始與入流濃度及試驗時防淤隧道出流濃度歷程如圖8(a)所示，統計試驗入砂量、防淤隧道排砂量則如圖8(b)所示，由圖可知出流泥砂濃度的變化與入流泥砂濃度變化一致，主要由於本試驗上游僅距離壩址1 km，因此泥砂運移的時間短，受到庫區初始清水的稀釋也少，經過26小時後，累積之出流泥砂總量趨於一個定值，與台灣電力公司[42]「霧社水庫防淤工程規劃設計」之三維數值模擬成果比較後可知，試驗之防淤隧道(17.54%)及數值模擬(18.60%)出砂量相近，排砂效率差異約為-1.06%。

圖9則為 Q_{10} 滯洪試驗入流及防淤隧道、溢洪道出流泥砂濃度，以及 Q_{10} 滯洪試驗入砂量及防淤隧道、溢洪道出砂量，由試驗結果可知溢洪

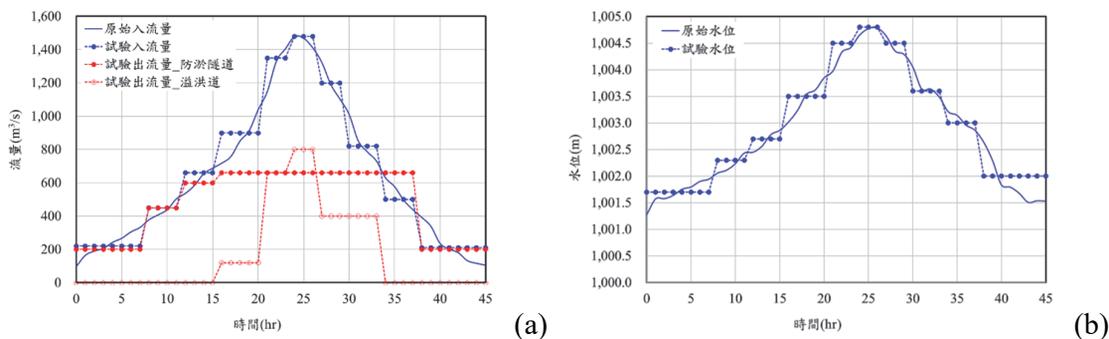


圖6 Q_{50} 滯洪試驗(a)入流量、出流量歷程及(b)試驗水位歷程

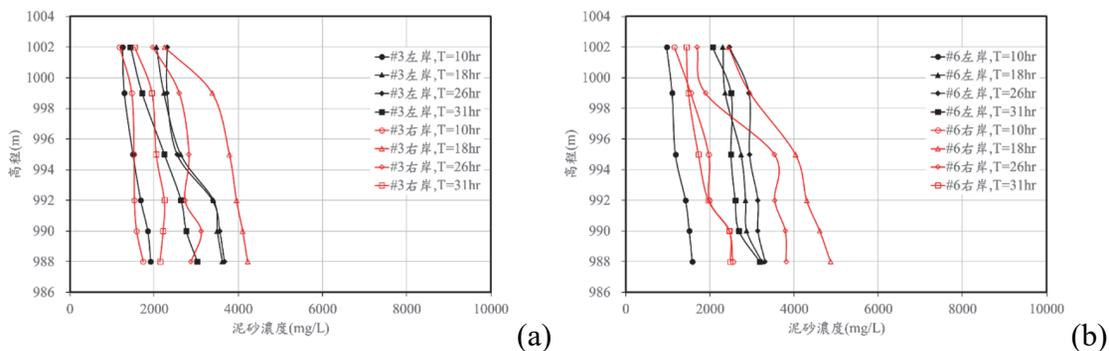


圖7 Q_2 滯洪試驗庫區(a) 0k+200 (b) 0k+500泥砂濃度

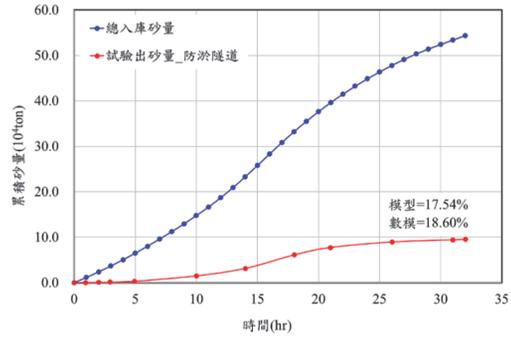
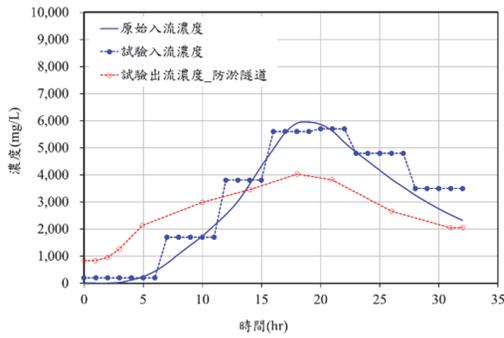


圖8 Q₂ 滯洪試驗(a)出水工泥砂濃度(b)入砂量及防淤隧道出砂量

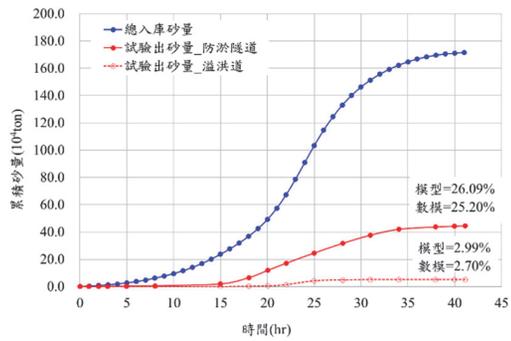
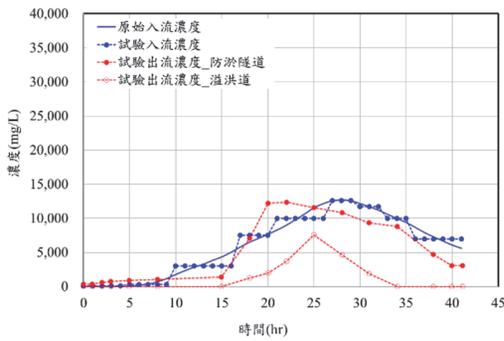


圖9 Q₁₀ 滯洪試驗(a)出水工泥砂濃度(b)入砂量及防淤隧道出砂量

道出流泥砂濃度的變化與入流泥砂濃度變化趨勢大致一致，但防淤隧道出流尖峰濃度則提早反應，可見底層之泥砂濃度運移速度較快且流場反應與Q₂ 滯洪試驗相似，主要流場與泥砂濃度靠右側運移，因此入口高程位於底床附近之防淤隧道，相對於溢洪道提早反映泥砂到達之現象，此外，由於Q₁₀ 滯洪試驗入流量及入砂量皆大於Q₂ 滯洪試驗，因此泥砂運移的時間更短，受到庫區初始清水的稀釋更少，因此，防淤隧道的尖峰出流泥砂濃度接近入流泥砂濃度，但因為高濃度泥砂比較靠近水庫底層運移，因此溢洪道出流泥砂濃度較低，而累積之出流泥砂總量經過34小時後，亦趨於一個定值，與台灣電力公司^[42]「霧社水庫防淤工程規劃設計」之三維數值模擬成果比較後可知，試驗之防淤隧道(26.09%)及數值模擬(25.20%)出砂量相近，排砂效率差異約為0.89%；試驗之溢洪道(2.99%)及數值模擬(2.70%)出砂量亦相近，排砂效率差異約為0.29%。

Q₅₀ 滯洪試驗則屬於接近2008年辛樂克颱風間霧社水庫所遭遇之最大水文事件，在庫區0k+200(#3斷面)及庫區0k+500(#6斷面)泥砂濃度於不同高程之變化如圖10所示，可知同樣隨著入流量及泥砂濃度增加，兩斷面之泥砂濃度亦隨之增加，且在尖峰入流量發生前後，0k+200及0k+500右岸濃度皆大於左岸，且0k+200此一現象大於0k+500，可見流況越靠近大壩各出水工附近區域，由於庫區地形因素影響，流量越大，流場越偏右岸，且底層泥砂濃度大於接近水面之值，但隨著入流量及泥砂濃度減少，則左右岸的泥砂濃度差異亦隨之變小，且庫區泥砂開始落淤，但落淤的速度比Q₂ 滯洪試驗要較為緩慢。

而試驗之原始與入流濃度及試驗時防淤隧道出流濃度歷程如圖11(a)所示，統計試驗入砂量、防淤隧道排砂量則如圖11(b)所示，由圖可知防淤隧道與溢洪道之出流泥砂濃度的變化與入流泥砂濃度變化皆一致，主要由於本試驗上游僅距離壩址1 km，且入流量與泥砂濃度皆比Q₂ 及

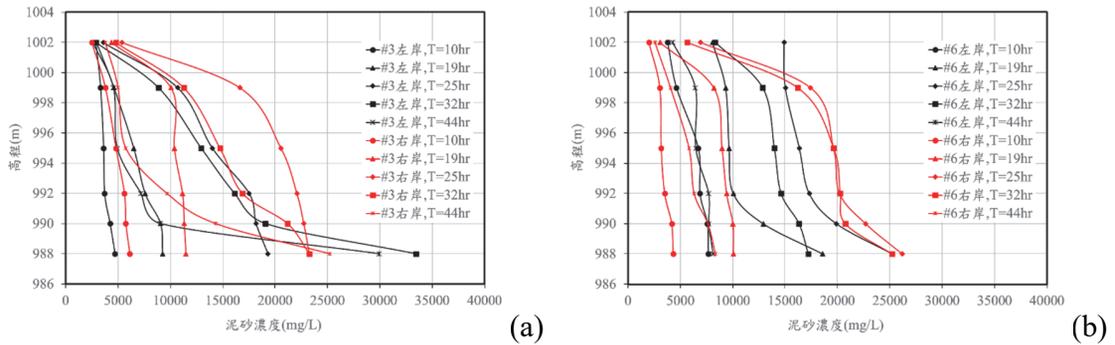


圖10 Q₅₀滯洪試驗庫區(a) 0k+200 (b) 0k+500泥砂濃度

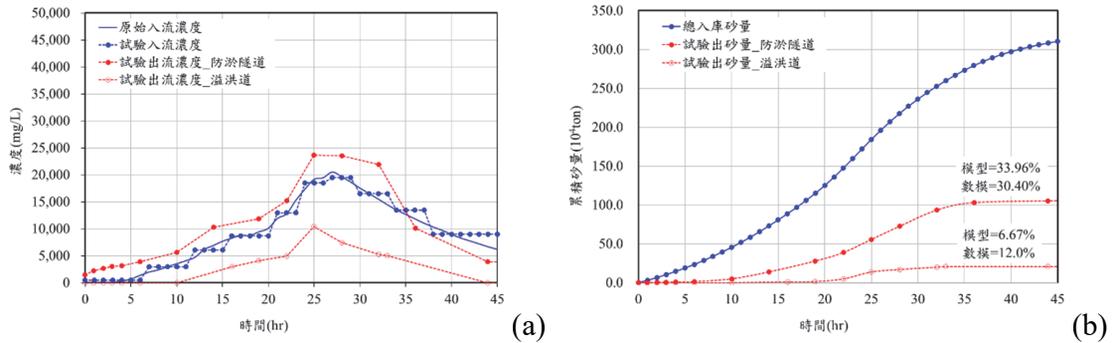


圖11 Q₅₀滯洪試驗(a)出水工泥砂濃度(b)入砂量及防淤隧道出砂量

Q₁₀滯洪試驗要來的大，因此泥砂運移的時間更短，受到庫區初始清水的稀釋更少，約經過35小時後，累積之出流泥砂總量開始趨於一個定值，與台灣電力公司[42]「霧社水庫防淤工程規劃設計」之三維數值模擬成果比較後可知，試驗之防淤隧道(33.96%)及數值模擬(30.40%)出砂量相近，排砂效率差異約為3.56%；試驗之溢洪道(6.67%)及數值模擬(12.0%)出砂量亦相近，排砂效率差異約為-5.33%。

圖12則為Q₂及Q₅₀滯洪庫區斷面0k+50、0k+200 (#3)及0k+500 (#6)量測成果，由圖可看出越上游動床鋪設範圍內於試驗後沖刷行為越不明顯。但Q₂及Q₅₀滯洪試驗主要沖淤區域相似且皆為靠右岸，與庫區0k+200 (#3)及0k+500 (#6)兩斷面左右岸泥砂濃度分布成果相似，由於庫區地形與出水工位置因素影響，主流場偏右岸，因此泥砂濃度分布與底床主要沖淤位置皆偏右岸，由圖可看出於動床鋪設範圍內於試驗後沖刷深度約為2公尺左右，然而靠近防淤隧道入口附近時，

0k+50左岸有淤積趨勢，而右岸有沖刷趨勢，可見防淤隧道入口流場影響沖淤範圍，約為40公尺左右。

本研究全動床試驗流量包含2年(Q₂)重現期距洪水、10年(Q₁₀)重現期距洪水，以及50年(Q₅₀)重現期距洪水，將上述三組試驗流量對應歷史颱風事件入流量歷線或常態分佈流量歷線進行變量流試驗，並以適當水庫排洪操作配置各排洪及放水設施出流條件，以探討防淤隧道排砂效率，此外，由於發電及蓄水考量，霧社水庫主要操作現階段以高水位為主，因此上述三種重現期試驗情境之起始水庫水位皆設定為1,002公尺，試驗成果綜整於表2中，根據Q₂滯洪試驗結果顯示，試驗之防淤隧道(17.54%)及數值模擬(18.60%)出砂量相近，總排砂效率差異約為-1.06%。Q₁₀滯洪試驗試驗之防淤隧道(26.09%)及數值模擬(25.20%)出砂量相近，排砂效率差異約為0.89%；試驗之溢洪道(2.99%)及數值模擬(2.70%)出砂量亦相近，排砂效率

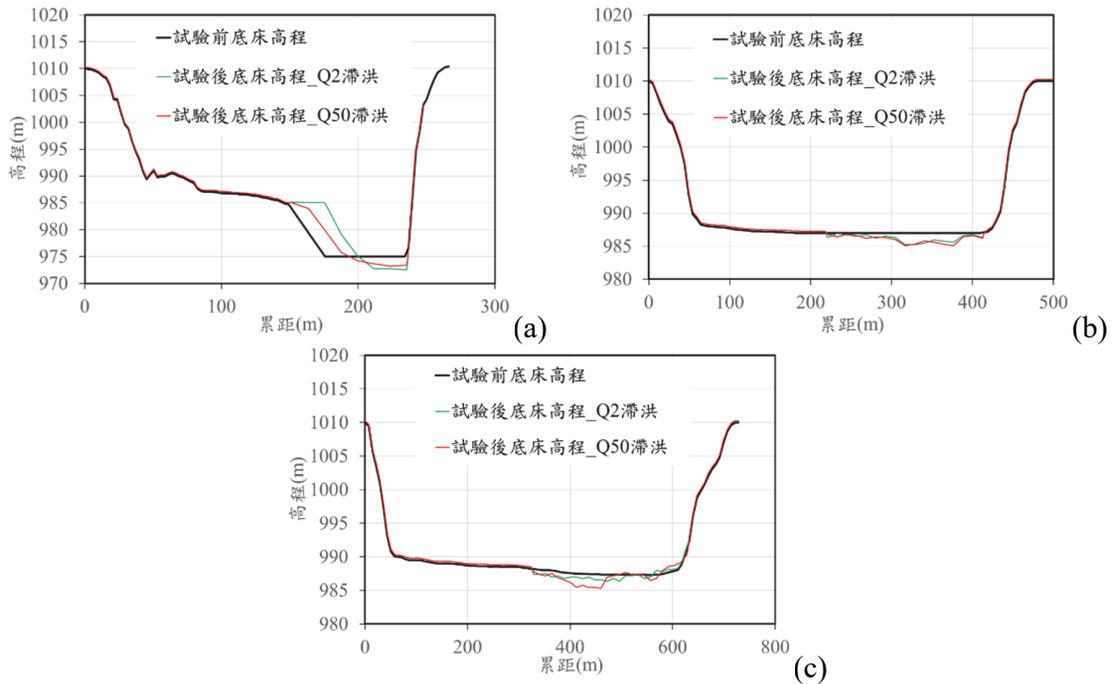


圖12 Q₂及Q₅₀滯洪庫區斷面(a) 0k+50 (b) 0k+200 (#3) (c) 0k+500 (#6)量測成果

表2 防淤隧道及溢洪道排砂效率

組別	排砂效率(%)							
	溢洪道		排洪隧道	防淤隧道		總共		
	試驗	模擬	-	試驗	模擬	試驗	模擬	差異 (試驗-模擬)
Q ₂ 滯洪	-		-	17.54	18.60	17.54	18.60	-1.06
Q ₁₀ 滯洪	2.99	2.70	-	26.09	25.20	29.08	27.90	1.18
Q ₅₀ 滯洪	6.67	12.0	-	33.96	30.40	40.63	42.40	-1.77

差異約為0.29%，總排砂效率差異約為1.18%。Q₅₀滯洪試驗成果顯示，防淤隧道(33.96%)及數值模擬(30.40%)出砂量相近，排砂效率差異約為3.56%；試驗之溢洪道(6.67%)及數值模擬(12.0%)出砂量亦相近，排砂效率差異約為-5.33%，總排砂效率差異約為-1.77%。

五、結 論

霧社水庫位於南投縣仁愛鄉濁水溪上游支流霧社溪河谷中，於48年興建完成，壩體屬一混凝土拱型重力壩，壩高114公尺，壩頂總長205公尺，其滿水位高程EL. 1,005公尺。本水庫主要設

施包括大壩、壩頂溢洪道、永久河道放水口、發電進水口、排洪隧道等。霧社水庫截至2021年統計庫容淤積率約為75.22%，壩前淤積高程已達EL. 977.52 m，因此興建防淤隧道作為水庫防淤策略之一實屬重要，然而防淤隧道的設計，除了需要考量排砂效益是否可達到預期規劃目標外，亦應符合施工可行性與考量長期營運操作。本研究根據模型相似定律，以1/40等比模型進行水文情境改變對於防淤隧道排砂效率之影響研究。

根據試驗結果，庫區動床鋪設範圍內於試驗後沖刷行為越不明顯。但Q₂及Q₅₀滯洪試驗主要沖淤區域相似且皆為靠右岸，與庫區0k+200 (#3)及0k+500 (#6)兩斷面左右岸泥砂濃度分布成果相

似，且底層泥砂濃度大於接近水面之值，但隨著入流量及泥砂濃度減少，則左右岸的泥砂濃度差異亦隨之變小，且庫區泥砂開始落淤，但由於本試驗上游僅距離壩址1 km，且入流量與泥砂濃度皆因水文條件改變而有所差異，因此隨著水文情境的增大泥砂運移的時間逐漸縮短，受到庫區初始清水的稀釋量也逐漸變少，約經過27~35小時後，累積之出流泥砂總量開始趨於一個定值，整體而言，本研究試驗模擬洪水歷線排砂操作條件下，防淤隧道滯洪排砂之排砂效率介於17.54%~40.63%之間、排砂總量約為9.52~126.26萬噸。

此外，由於庫區地形與出水工位置因素影響，主流場偏右岸，因此泥砂濃度分布與底床主要沖淤位置皆偏右岸，由圖可看出於動床鋪設範圍內於試驗後沖刷深度約為2公尺左右，然而靠近防淤隧道入口附近時，0k+50左岸有淤積趨勢，而右岸有沖刷趨勢，可見防淤隧道入口流場影響沖淤範圍，約為40公尺左右。

致 謝

本研究承蒙科技部計畫編號MOST 111-2221-E-002-062之經費補助，中興工程顧問股份有限公司及台灣電力公司所提供之模型經費補助、防淤隧道設計、水庫水文、防汛與泥砂濃度觀測資料，以及國立臺灣大學水工試驗所提供人力支援，使本研究得以完成，謹致謝忱。

參 考 文 獻

1. Annandale, G.W., Morris, G.L., and Karki, P., *Extending the life of reservoirs: sustainable sediment management for dams and run-of-river hydropower*, Washington, DC: World Bank, (2016).
2. Rocha, J., Carvalho-Santos, C., Diogo, P., Beça, P., Keizer, J.J., and Nunes, J.P., "Impacts of climate change on reservoir water availability, quality and irrigation needs in a water scarce Mediterranean region (southern Portugal)," *Science of the Total Environment*, Vol. 736, 139477 (2020).
3. Lee, F.Z., Lai, J.S., and Sumi, T., "Reservoir sediment management and downstream river impacts for sustainable water resources—case study of shimen reservoir," *Water*, Vol. 14, No. 3, pp. 479 (2022).
4. Morris, G.L., "Classification of management alternatives to combat reservoir sedimentation," *Water*, Vol. 12, No. 3, pp. 861 (2020).
5. Asthana, B.N., and Khare, D., "Reservoir sedimentation," *Recent advances in dam engineering*, Cham: Springer International Publishing, pp. 265-288 (2022).
6. Huang, C.C., "Navigating Reservoir Deposition Challenges: Evaluation of Reservoir Desilting Strategy Through a 4-Stage Life Cycle Assessment Approach," *Water Resources Management*, pp. 1-16 (2024).
7. 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*, Vol. 145, No. 5 (2019).
8. Hung, C.C., Lai, J.S., and Huang, C.C., "An efficient and economic desilting strategy for reservoir sustainable development under the threat of extreme flooding threaten," *Journal of Water and Climate Change*, Vol. 13, No. 3, pp. 1257-1274 (2022).
9. Lee, F.Z., Lai, J.S., Tan, Y.C., and Sung, C.C., "Turbid density current venting through reservoir outlets," *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 18, pp. 694-705 (2014).
10. Lai, Y.G., Huang, J., and Wu, K., "Reservoir turbidity current modeling with a two-dimensional layer-averaged model," *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 141, No. 12, 04015029 (2015).
11. Wang, Z., Xia, J., Li, T., Deng, S., and Zhang, J., "An integrated model coupling open-channel flow, turbidity current and flow exchanges between main river and tributaries in Xiaolangdi Reservoir, China," *Journal of Hydrology*, Vol. 543, pp. 548-561 (2016).
12. Chaudhary, H.P., Isaac, N., Tayade, S.B., and Bhosekar, V.V., "Integrated 1D and 2D numerical model simulations for flushing of sediment from reservoirs," *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 25, No. 1, pp. 19-27 (2019).
13. Zayeri, M.R., and Ghomeshi, M., "Numerical Modeling of Turbid Density Current in Dez Reservoir," *Journal of Civil and Environmental Engineering*, Vol. 49, No. 94, pp. 77-88 (2019).
14. Zhang, R., Wu, B., and Zhang, Y.J., "Three-dimensional numerical simulation of the turbidity current on a flume slope," In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, pp. 4346 (2020).
15. Sun, Y., Li, J., Cao, Z., and Borthwick, A.G.L., "A two-dimensional double layer-averaged model of hyperconcentrated turbidity currents with non-Newtonian rheology," *International Journal of Sediment Research*, Vol. 38, No. 6, pp. 794-810 (2023).

16. Ettema, R., Arndt, R., Robert, P., and Wahl, T., *Hydraulic modeling: Concepts and practice*, ASCE Publications, Vol. 97 (2000).
17. Chamoun, S., De Cesare, G., and Schleiss, A.J., "Influence of operational timing on the efficiency of venting turbidity currents," *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 144, No. 9 (2018).
18. Teixeira, E.K.D.C., Rinco, A.V., Coelho, M.M.L.P., Saliba, A.P.M., Pinto, E.J.D.A., and Furtado, L.M., "Methodology for physical modeling of reservoir sedimentation," *RBRH*, Vol. 25, e27 (2020).
19. 李豐佐、賴進松、涂秀錦、廖哲民、楊淑媛、艾菲拉，「防淤隧道進水口高程影響排砂效率之研究」，*農業工程學報*，第69卷，第3期，第1-15頁 (2023)。
20. 水利規劃分署，「水庫防淤管理與技術應用」，經濟部水利署 (2020)。
21. Lu, J., Liao, X., and Zhao, G., "Experimental study on effects of geometric distortion upon suspended sediments in bending channels," *Sedimentary Geology*, Vol. 294, pp. 27-36 (2013).
22. Abderrezzak, K.E.K., Moran, A.D., Mosselman, E., Bouchard, J.P., Habersack, H., and Aelbrecht, D., "A physical, movable-bed model for non-uniform sediment transport, fluvial erosion and bank failure in rivers," *Journal of Hydro-environment Research*, Vol. 8, No. 2, pp. 95-114 (2014).
23. Huang, C.C., Lai, J.S., Lee, F.Z., and Tan, Y.C., "Physical model-based investigation of reservoir sedimentation processes," *Water*, Vol. 10, No.4, pp. 352 (2018).
24. Sawadogo, O., Basson, G.R., and Schneiderbauer, S., "Physical and coupled fully three-dimensional numerical modeling of pressurized bottom outlet flushing processes in reservoirs," *International Journal of Sediment Research*, Vol. 34, No. 5, pp. 461-474 (2019).
25. Lai, J.S., and Chang, F.J., "Physical modeling of hydraulic desiltation in Tapu reservoir," *International Journal of Sediment Research*, Vol. 16, No. 3, pp. 363-379 (2001).
26. Mefford, B., and Gill, T., "Physical hydraulic model proposal for US Army Corps of Engineers Missouri river bend model," *Hydraulic Laboratory Report HL-2010-05*, US Department of the Interior, Bureau of Reclamation (2010).
27. Ho, J., Coonrod, J., Gill, T., and Mefford, B., "Case study: Movable bed model scaling for bed load sediment exclusion at intake structure on Rio Grande," *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 136, No. 4, pp. 247-250 (2010).
28. Armanini, A., Sartori, F., Tomio, G., Cerchia, F., and Vergnani, M., "Analysis of a fluvial groynes system on hydraulic scale model," *River Flow 2010: Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics*, Karlsruhe: Bundesanst für Wasserbau, (2010).
29. Bieri, M., Müller, M., Boillat, J.L., and Schleiss, A.J., "Modeling of sediment management for the Lavey run-of-river HPP in Switzerland," *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 138, No. 4, pp. 340-347 (2012).
30. Moran, A.D., Abderrezzak, K.E.K., Mosselman, E., Habersack, H., Lebert, F., Aelbrecht, D., and Laperrousz, E., "Physical model experiments for sediment supply to the old Rhine through induced bank erosion," *International Journal of Sediment Research*, Vol. 28, No. 4, pp. 431-447 (2013).
31. Camnasio, E., Orsi, E., and Schleiss, A.J., "Experimental study of velocity fields in rectangular shallow reservoirs," *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 49, No. 3, pp. 352-358 (2011).
32. Alhasan, Z., Jandora, J., and Riha, J., "Comparison of specific sediment transport rates obtained from empirical formulae and dam breaching experiments," *Environmental Fluid Mechanics*, Vol. 16, pp. 997-1019 (2016).
33. Brune, G.M., "Trap efficiency of reservoirs," *Eos, Transactions American Geophysical Union*, Vol.34, No.3, pp. 407-418 (1953).
34. Beckers, F., Haun, S., and Noack, M., "Experimental investigation of reservoir sediments," *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Vol. 40 (2018).
35. Moldenhauer-Roth, A., Piton, G., Schwindt, S., Jafarnejad, M., and Schleiss, A.J., "Design of sediment detention basins: Scaled model experiments and application," *International Journal of Sediment Research*, Vol. 36, No. 1, pp. 136-150 (2021).
36. Huang, C.C., Ho, H.C., Lai, J.S., and Lee, F.Z., "Experimental study with hydraulic modeling of a reservoir desilting operation using a sediment bypass tunnel," *Environmental Earth Sciences*, Vol. 82, No.12, pp. 313 (2023).
37. 台灣電力公司，「霧社水庫淤積改善可行性研究」，中興工程顧問股份有限公司 (2010)。
38. 台灣電力公司，「萬大發電廠#1、#2機組進水口前淤積改善-導水隧道改造為排砂可行性研究」，中興工程顧問股份有限公司 (2017)。
39. 台灣電力公司，「109 年度日月潭水庫、明湖下池水庫、霧社水庫淤積測量工作」，詠翔測量工程有限公司 (2020)。
40. 張斐章、賴進松，「大埔水庫防淤操作技術與水工模型之建置(三)」，國立臺灣大學水工試驗所，研究報告第322號 (1999)。

41. 賴進松，「阿公店水庫淤泥沖刷啟動之研究」，台灣水利，第46卷，第3期，第76-83頁(1998)。
42. 台灣電力公司，「霧社水庫防淤工程規劃設計」，中興工程顧問股份有限公司(2022)。
43. 台灣電力公司，「112年度霧社水庫淤積測量工作

成果報告」(2024)。

收稿日期：2024年05月20日

修正日期：2024年07月09日

接受日期：2024年08月06日