

基於模型試驗探討下游河道放淤之沖刷成效

EXPLORING THE FLUSHING EFFECTIVENESS OF REPLENISHED SEDIMENT THROUGH MODEL EXPERIMENTS

國立中興大學土木工程學系
助理教授

李 豐 佐
Fong-Zuo Lee

中興工程顧問股份有限公司
計畫主任

陳 秀 娟
Hsiu-Chuan Chen

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

中興工程顧問股份有限公司
技術經理

廖 哲 民
Che-Min Liao

台灣電力公司營建處
副處長

涂 秀 錦
Hsiu-Chin Tu

摘 要

本研究旨在探討霧社水庫 Q_2 、 Q_{10} 和 Q_{50} 滯洪條件下，在水庫進行防淤排砂操作時，下游河道水庫抽泥暫置場一及暫置場二的放淤之沖刷效率。研究考慮了暫置場淤泥的乾密度或濃度特性，並進行了模型試驗，將 30 萬 ppm 或 100 萬 ppm 淤泥放置於暫置場一及暫置場二。研究結果顯示，在 Q_2 滯洪條件下，暫置場一的沖刷率為 89.29 %；在 Q_{10} 滯洪條件下，暫置場一及暫置場二的沖刷率分別為 81.68 % 及 84.31 %；在 Q_{50} 滯洪條件下，暫置場一及暫置場二的沖刷率分別為 66.86 % 及 92.53 %。綜合試驗結果顯示，沖刷率受水庫各出水工排放流量、河道水位及沖刷時間等因素影響，但整體沖刷率大致維持八成以上。建議將淤積料機械挖除，再載運至河道暫置場二堆置土堤，並將多數淤泥移至土堤 C 及土堤 D 上游堆置，以提高沖刷效率。

關鍵詞：防淤高程、防淤隧道、排砂效率。

* 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

EXPLORING THE FLUSHING EFFECTIVENESS OF REPLENISHED SEDIMENT THROUGH MODEL EXPERIMENTS

Fong-Zuo Lee

Department of Civil
Engineering, National Chung
Hsing University

Jihn-Sung Lai*

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

Che-Min Liao

SINOTECH Engineering
Consultants, Ltd.

Hsiu-Chuan Chen

SINOTECH Engineering Consultants, Ltd.

Hsiu-Chin Tu

Taiwan Power Company

ABSTRACT

This study aims to investigate the flushing efficiency of sediment deposition in temporary sedimentation ponds one and two downstream of the Wushe Reservoir under Q_2 , Q_{10} , and Q_{50} flood detention conditions during reservoir desilting operations in the reservoir. The study considers the dry density or concentration characteristics of sediment in the temporary ponds and conducts model experiments by placing replenished sediment with concentrations of 300,000 ppm or 1,000,000 ppm in temporary ponds one and two. The results show that under Q_2 flood detention conditions, the flushing rate of temporary pond one is 89.29 %; under Q_{10} flood detention conditions, the flushing rates of temporary ponds one and two are 81.68 % and 84.31 %, respectively; under Q_{50} flood detention conditions, the flushing rates of temporary ponds one and two are 66.86 % and 92.53 %, respectively. The comprehensive experimental results indicate that the flushing rate is influenced by factors such as the discharge flow rate of each outlet of the reservoir, river water level, and flushing time, but overall, the flushing rate is maintained at over eighty percent. It is recommended to mechanically remove accumulated sediment and transport it to temporary sedimentation pond two for deposition on earthen berms. Additionally, relocating the majority of the sediment to upstream berms C and D is suggested to enhance flushing efficiency.

Keywords: Desilting operation, Replenished sediment, Flushing efficiency.

一、前言

臺灣地質脆弱、地形陡峻，加上颱風豪雨事件頻傳，經常導致水庫集水區大量崩塌與沖蝕。這使得水庫集水區的降雨逕流帶來大量泥砂、流木與雜物進入水庫，顯示出水庫泥砂淤積問題以及對穩定供水的影響。因此，如何減少集水區泥砂輸入水庫，以及在汛期利用水力防淤、減緩水庫的淤積量，成為操作水庫時不可或缺的考量。此外，在水庫蓄清排的操作中，要兼具穩定供水的功能，並搭配枯水期的清淤浚渫和多元化土砂經營管理，期望能實現水庫的永續利用目標。這已成為全球性的重要水資源議題。儘管目前尚無關於全球水庫淤積速率的確切數據，但根據現有數據（水利規劃試驗所，2020），Mahmood (1987) 估計全球水庫年淤積量導致的庫容損失約為 1%，相當於約 5×10^9 立方公尺。截至 1986 年，世界水庫的平均年齡根據庫容淤積估算僅剩 22 年，相當於總庫容累積淤積達約 110×10^9 立方公尺。

在美國的案例中，Dendy *et al.* (1973) 研究了 1,105 座水庫的淤積速率，發現庫容大小與淤積速率之間存在負相關。Crowder (1987) 估計，美國 48 個州的年均庫容淤積率為 0.22%，相當於 20.2×10^6 立方公尺，其中大部分來自農地的侵蝕。對美國的水庫而言，小型水庫的淤積問題較大型水庫更為嚴重。相較於美國，大多數世界其他地區的水庫淤積率皆明顯高於美國。例如，Van Den Wall Bake (1986) 對非洲的辛巴威 (Zimbabwe) 數據進行的分析指出，該國大約有一半的水庫，庫容淤積率達到年均庫容淤積率超過 0.5%。Gogus and Yalcinkaya (1992) 研究了土耳其 (Turkey) 的 16 個水庫淤積資料，根據他們的調查水文資料，年均庫容淤積率介於 0.20% 至 2.40% 之間，平均達 1.2%。Abdelhadi (1995) 分析了北非的摩洛哥 (Morocco) 水庫，年均庫容淤積率為 0.7%，突尼西亞 (Tunisia) 為 2.3%，中國年均庫容淤積率則約為 2.3%。Varma *et al.* (1992) 研究了印度的水庫操作策略，指出印度的設計目標是以 100 年壽命的水庫為目標，而淤積研究的結果顯示，水庫的實際使用壽命幾乎與設計壽命相同，印度水庫的年均庫容淤積率為 0.5%。根據水利署資料（水利規劃試驗所，2020），台灣主要水庫的年均庫容淤積率約為 0.56%。然而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，對於緩解未來的水資源匱乏問題至關重要 (Annandale *et al.*, 2016；Rocha *et al.*, 2020；Lee *et al.*, 2022)，因此，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 (Morris, 2020；Asthana and Khare, 2022；Huang, 2024)。

在台灣，一般定義水庫壩高大於 15 公尺且容量大於 100 萬立方公尺之水庫屬大型水庫，多數具有重要的供水與發電功能，其中如石門、曾文、南化、烏山頭、霧社、阿公店水庫等主要供水水庫，總庫容淤積率均已超過 30%，除石門水庫外，其餘水庫之呆容量已淤滿，嚴重影響水庫有效容量。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% (台灣電力公司, 2020)，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，因此，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 立方公尺。

而為了解決水庫淤積問題，部分學者亦透過模型實驗 (Chamoun *et al.*, 2018; Teixeira *et al.*, 2020; 李等 2023) 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，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，包含黃河小浪底之泥砂濃度極高，因此曾以 1/80 等比水工模型試驗探討不同高低含砂量下，泥砂淤積及放水構造物之防淤問題 (竇等, 1995a; 1995b)。為了增加日月潭水庫引水來源及引水通道之維護考量，台灣電力公司遂進行 1/40 新武界隧道及栗棲溪引水工程水工模型試驗 (林等, 2000)。Lai and Chang (2001) 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 (2010) 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.* (2010) 利用不等比模型，探討取水口周圍的鹽度分布。Armanini *et al.* (2010) 研究了防波堤對意大利波河航道條件的影響。Bieri *et al.* (2012) 利用不等比模型對瑞士一水電廠進行了案例研究。Moran *et al.* (2013) 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.*

(2015) 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.* (2016) 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。日月潭水庫之 1/50 等比模型利用豐水期間多餘流量進行排砂，使庫內淤泥回歸濁水溪主流河道，能有效減緩日月潭淤積問題。而霧社水庫，則分別於 2010 年執行「霧社水庫淤積改善可行性研究」(台灣電力公司, 2010) 及 2017 年執行「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」(台灣電力公司, 2017) 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。Huang *et al.* (2018) 為了理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 (1953) 方法的修改，以預測水庫的剩餘壽命。水利規劃試驗所曾於 2012 年利用等比 1/100 模型，針對石門水庫中游導淤及庫區排淤，進行不同方案之初步工程規劃排砂效率探討，並藉由現場調查、規劃及試驗研究提出不同方案之可行性與效益 (水利規劃試驗所, 2012)，2018 年亦執行「曾文水庫防淤隧道全域工模型試驗」，內容主要為利用曾文水庫模型進行試驗，其模型同樣為 1/100 等比模型，並採用壩前抽泥之泥砂進行試驗，旨在比較不同颱風情況之排砂比及觀察異重流現象提供排砂操作參考 (水利規劃試驗所, 2018)。台灣自來水公司第六區管理處，亦以 1/100 等比模型在具備防淤隧道的條件下，探討南化水庫防

洪防淤潛壩及空庫排砂效益 (台灣自來水公司第六區管理處, 2017)。Beckers *et al.* (2018) 使用灌入式沉積物採樣器，從水庫底床中採樣沉積泥砂，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，進行了水庫淤積行為的研究。根據 Moldenhauer-Roth *et al.* (2021) 研究指出，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.* (2023) 則利用 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。李等 (2023) 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，本研究以等比模型針對霧社水庫下游河道泥砂放淤，探討霧社水庫在防淤操作下的下游河道水理及輸砂特性，並透過不同水庫防淤操作的情境試驗，了解下游河道放淤泥砂之冲刷成效。

二、研究區域及模型相似率

2.1 霧社水庫基本資料

位於南投縣仁愛鄉濁水溪上游支流霧社溪河谷中的霧社水庫 (見圖 1)，建於民國 48 年，是一座混凝土拱型重力壩，高 114 公尺，壩頂總長 205 公尺，

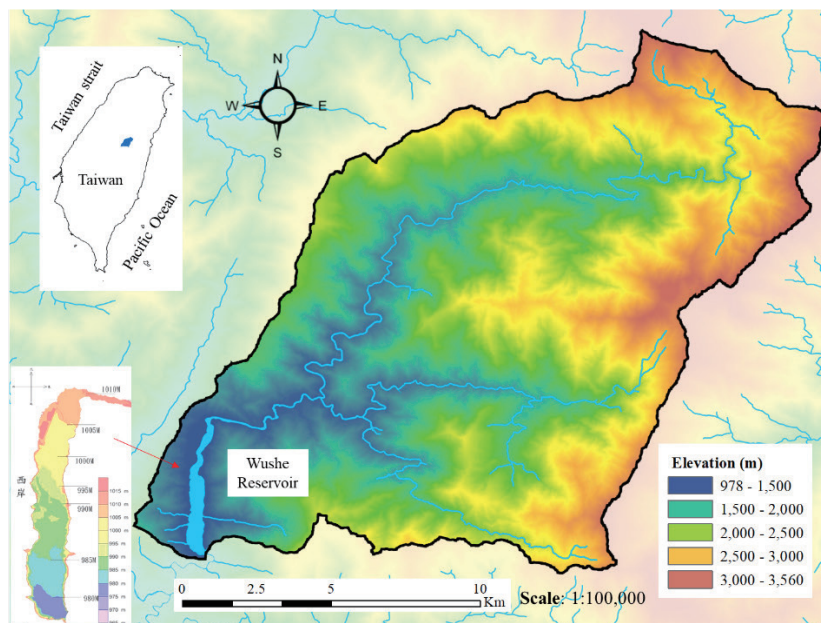


圖 1 霧社水庫集水區範圍及地理位置 (modified from 李等, 2023)

滿水位高程達 1,005 公尺，霧社水庫是濁水溪日月潭發電系統的調節庫容，對集集攔河堰枯水期的水源具有影響。水庫的主要設施包括大壩、壩頂溢洪道（溢頂標高 998.87 公尺，流量 $Q = 850 \text{ m}^3/\text{s}$ ）、永久河道放水口（中心標高 927.65 公尺，流量 $Q = 87 \text{ m}^3/\text{s}$ ）、發電進水口（#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，流量 $Q = 1670 \text{ m}^3/\text{s}$ ）。水庫的集水區面積為 219 平方公里，截至 2021 年統計，總容量淤積率約為 75.22 %，顯示水庫的泥砂淤積情況相當嚴重，約有四分之三的含量已被泥砂覆蓋，使其成為一座高淤積水庫，即將快速達到淤滿狀態，水庫的淤積問題將對其用途產生影響。

因此霧社水庫擬興建防淤隧道且已進入招標階段，預計於 116 年完工。此外，行政院在 109 年 11 月 30 日核定了「霧社水庫防淤工程計畫」，包括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，可每年增加水庫排淤能力 75 萬立方公尺，河道放淤減淤量每年 60 萬立方公尺，以及增加水庫排洪能力每秒 $530 \text{ m}^3/\text{s}$ 。隧道進水口段採用寬 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 公尺的長方形地下結構，全長 282 公尺，坡度 1.5 %，分為漸變段和標準段。出水口段全長 90 公尺，為矩形明渠斷面（寬 7 公尺，側牆高度由 6 公尺至 11.95 公尺），終點設置一跳岸，出口高程 EL. 893.9 公尺，落水池為現地下挖成池，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，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：

2.2.1 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 $\lambda_v = \lambda_L^{1/3}$ 、水流時間比尺 $\lambda_t = \lambda_L^{2/3}$ 及流量比尺 $\lambda_Q = \lambda_L^2$ 。

2.2.2 泥砂動力相似

(1) 推移質起動相似

水工模型在進行動床試驗時，泥砂起動相似可以 Shields (1936) 所建議之底床顆粒起動參數關係來建立示。利用相似律原理，Shields 參數無因次臨界剪應力 其在原型與模型應相同，故可得下式：

$$\lambda_{\tau_c} = \frac{\lambda_{\tau_c}}{\lambda_g \lambda_{(\rho_s - \rho)} \lambda_d} = 1 \quad \text{.....(1)}$$

上式中， τ_c 為泥砂起動之臨界剪力， d 為底床粒徑， ρ 、 ρ_s 分別為水與泥砂顆粒之密度。將 $\tau_c = \rho g R S_f$ 代入，且令 $\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho$ ，可將泥砂顆粒比尺寫為下式：

$$\lambda_d = \lambda_\rho \lambda_h^2 \lambda_L^{-1} \lambda_{(\rho_s - \rho)}^{-1} = \lambda_h^2 \lambda_L^{-1} \lambda_\Delta^{-1} \quad \text{.....(2)}$$

在等比條件下，且模型流體及泥砂密度與原型相同條件時，泥砂顆粒之比尺將與幾何比尺相同。

(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：

$$\varepsilon_{sz} = \frac{\partial S}{\partial z} \Big|_{z=0} = -\omega S_{b_s} \quad \text{.....(3)}$$

S_{b_s} 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沉降量。由此邊界條件可得比尺關係式為：

$$\frac{\lambda_{\varepsilon_{sz}} \lambda_{sb}}{\lambda_\omega \lambda_h \lambda_{sb_s}} = 1 \quad \text{.....(4)}$$

式中， λ_{sb} 、 λ_{sb_s} 為床面含砂量及床面飽和含砂量比。由於黏性細顆粒只要能沖刷起來就可以被水流全部帶走，水流含砂量不是決定於挾砂能力而是決定於水流對黏性淤泥的沖刷過程。在水流沖刷力和淤泥抗沖力都與原型相似的前提下沖刷過程中沖刷起來的淤泥體積 V_s 及沖刷過程之水體積 V 也與原型相似，因此含砂量比尺為：

$$\lambda_{s_s} = \frac{\lambda_{\rho_d} \lambda_{v_s}}{\lambda_\rho \lambda_v} = \frac{\lambda_{\rho_d} \lambda_L^3}{\lambda_\rho \lambda_L^3} = \lambda_{\rho_d} \quad \text{.....(5)}$$

此外，除了考量沖刷過程中暫置場沖刷起來的淤泥體積 V_s 及沖刷過程之水體積 V 也與原型相似之比尺外，考量本計畫暫置場鋪設淤泥亦受到庫區排

砂量影響，因此其暫置場沖刷行為比尺，亦須考量庫區懸移質挾砂能力比尺（包含懸浮質挾砂濃度及輸砂總量）如下式。

$$\lambda_{s^*} = Average(D_s \lambda_{\rho_d} + O_s \lambda_s, D_{QS} \lambda_{\rho_d} + O_{QS} \lambda_s) \quad (6)$$

其中 D_s 為暫置場泥砂濃度、 O_s 為庫區出流泥砂濃度、 D_{QS} 為暫置場放淤泥砂量、 D_{QS} 為庫區出流泥砂量。

(3) 河床變形相似

河床變形連續方程式如下式所示：

$$\frac{\partial(QS)}{\partial x} + \rho_s B \frac{\partial Z_b}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

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：

$$\frac{\lambda_Q \lambda_s \lambda_t}{\lambda_L^2 \lambda_{\rho_s} \lambda_h} = 1 \quad (8)$$

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：

$$\lambda_t = \frac{\lambda_{\rho_s}}{\lambda_s} \cdot \frac{\lambda_L}{\lambda_h^{1/2}} \quad (9)$$

若試驗採用原型砂 $\lambda_{\rho_s} = 1$ 則水流與泥砂運移的時間比尺才會一致。

(4) 含黏滯力動床試驗相似律

下游河道放淤泥砂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 (1989) 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：

$$u_c = a \rho_d^b \quad (10)$$

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：

$$\lambda_{\rho_d} = \lambda_{u_c}^{1/b} = \lambda_u^{1/b} = \lambda_h^{1/2b} \quad (11)$$

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 (張及賴, 1999) 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, 1998) 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。

三、模型試驗規劃

本研究主要針對水庫 Q₂ 滯洪、Q₁₀ 滯洪及 Q₅₀ 滯洪條件下，由於水庫進行防淤排砂操作，探討下游河道水庫抽泥暫置場一及暫置場二之淤泥沖刷效率，且考量霧社水庫發電及蓄水利用主要以高水位（滯洪操作）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，各試驗情境及出水工啟閉規劃如表 1 所列。

3.1 模型下游河道放淤規劃

此外，依萬大發電廠抽泥工程規劃佈置，分別位於大壩下游落水池內及防淤隧道出口落水池內，堆置量分別為 15 萬立方公尺（暫置場一）及 10 萬立方公尺（暫置場二），依現場操作方式於下游側建置土堤後再暫置淤泥，用以瞭解河道暫置場放淤後，淤泥運移至下游河道過程中河道沖淤情境，下游河道土堤及暫置淤泥區域如圖 2 所示。

表 1 模型試驗水文情境及出水工規劃

組別	水庫起始水位 (公尺)	下游邊界水位 (S15)	水庫 入流量尖峰 (m ³ /s)	出水工		下游河道放淤區	
				溢洪道	防淤隧道	第一期暫置場	第二期暫置場
Q ₂ 滯洪	1002	正常水深	530	-	開啟	放淤	-
Q ₁₀ 滯洪			1063	開啟	開啟	放淤	放淤
Q ₅₀ 滯洪			1529	開啟	開啟	放淤	放淤

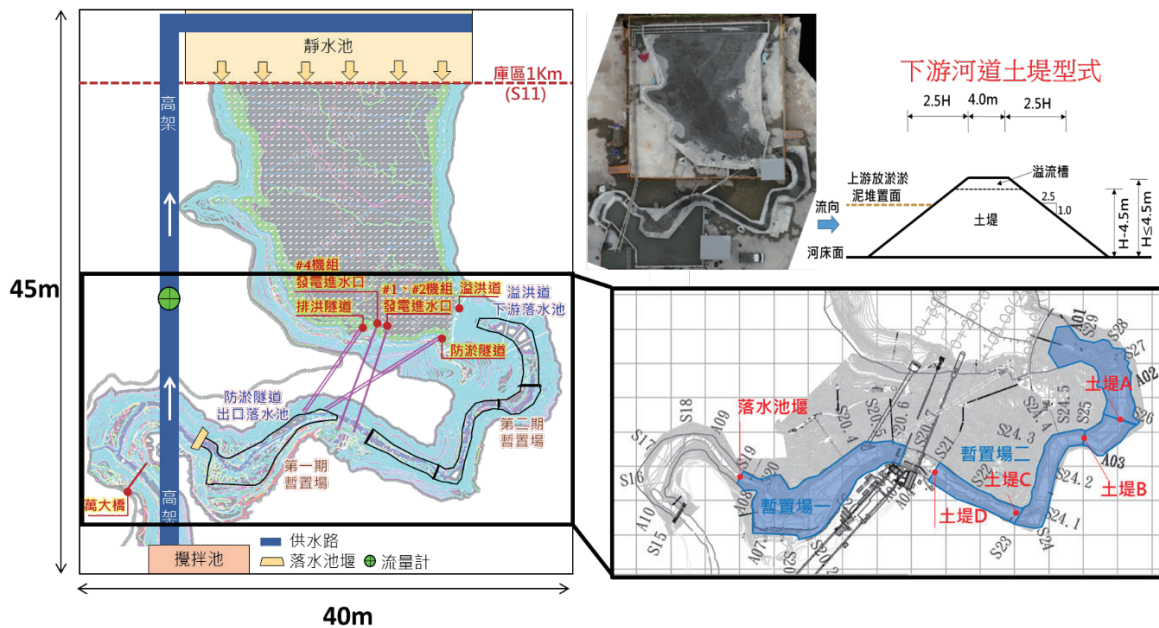


圖 2 水工模型試驗平面佈置圖

3.2 模型試驗泥砂

本研究試驗範圍內依據泥砂特性主要分為兩大區域，包含霧社水庫及霧社溪河道，其中河道暫置場內堆置抽泥泥漿水粒徑與壩前淤泥相同，而河道暫置場土堤一般採用河床料堆置，粒徑與下游河道泥砂相同，分別依據前述泥砂特性說明模型採用之泥砂粒徑。

3.2.1 霧社水庫壩前底床淤積泥砂

本研究模型之邊界位於壩址上游 1 公里，模擬範圍之底床泥砂粒徑參考台灣電力公司於 99 年「霧社水庫淤積改善計畫可行性研究」粒徑調查內容。於 99 年霧社水庫淤積三角洲距離壩前約 3 公里，以此上游之採樣點皆為粗顆粒砂土，以此下游之採樣點則為細顆粒粉土及黏土；然又依據霧社水庫 109 年淤積測量成果報告顯示，淤積三角洲已抵達壩前 500 公尺，且經台灣電力公司 (2022) 推估完工後 116 年地形，壩前淤積面高程 986.8 公尺，淤積三角洲已抵達壩址，因此壩前底床泥砂粒徑應審慎選擇。惟近年無底床泥砂採樣及粒徑分析之更新資料，故僅先以 99 年淤積三角洲位置之泥砂粒徑推估之，則取距壩 2 公里及距壩 4 公里之 D_{50} 平均值 0.5 mm。將採用泥砂粒徑縮比後，已小於 #200 號篩 (0.074 mm)，於水工模型試驗已無法再縮比細化，故模型仍採用庫區粒徑為準，以 0.015 mm 泥砂進行進水口底床之鋪設，雖然採用泥砂粒徑大於理論縮比之尺寸，代表其沉降速度大於理論值，其所模擬之防淤隧道排砂率

可能因此偏低，就整體模擬而言，即便與理論值有些微差異，仍屬於保守估計。

此外，雖然霧社水庫入流泥砂粒徑包含懸浮質及河床質，但本研究模型邊界位於斷面 1 公里處，含砂水流運移至此以懸浮質為主，河床質則多於上游沉澱。因此本研究懸浮質部分之入流含砂水流濃度粒徑，主要依據台灣電力公司 (2017)「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」於上游河道德魯灣橋實測懸浮質粒徑分析結果，考量防淤隧道操作時機以汛期高濃度居多，懸浮質粒徑採用 D_{50} 為 0.08 mm、 D_{90} 為 0.17 mm，根據模型縮比上游河道懸浮質理論粒徑 D_{50} 為 0.002 mm、 D_{90} 為 0.004 mm。然縮比理論粒徑皆小於壩前淤積泥砂擬採用之 0.015 mm，細化難度高且過度細化容易產生極小尺度粒徑特有之物理現象，影響本試驗探討之成果，因此擬同樣以庫區實際淤積泥砂粒徑 0.015 mm 進行上游泥砂入流模擬。

3.2.2 霧社溪河道

依據 106 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」，分別於導水隧道出口右岸及行易橋左岸進行河床質調查。可知防淤隧道出水口霧社溪河道粒徑 D_{50} 約為 10 ~ 30 mm， D_{90} 約為 300 ~ 400 mm，屬於粗顆粒卵礫石河道。

根據模型縮比霧社溪河道粒徑宜採用 0.5 mm (D_{50}) 及 8.75 mm (D_{90}) 泥砂之級配料進行霧社溪河道底床之鋪設。

3.3 模型試驗條件

3.3.1 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，下游河道暫置場一放淤泥砂之冲刷效率。圖 3(a) 及 (d) 為 Q_2 滯洪試驗之庫區入、出流量、水位及下游河道邊界水位條件，總歷時約為 32 小時，階梯式試驗總水、砂量與規劃歷線差異小於 0.07 %。

3.3.2 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，下游河道暫置場一及暫置場二放淤泥砂之冲刷效率。圖 3(b) 及 (d) 為 Q_{10} 滯洪試驗之庫區入、出流量、水位及下游河道邊界水位條件，總歷時約為 41 小時，階梯式試驗總水、砂量與規劃歷線差異小於 0.13 %。

3.3.3 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，下游河道暫置場一及暫置場二放淤泥砂之冲刷效率。圖 3(c) 及 (d) 為 Q_{50} 滯洪試驗之庫區入、出流量、水位及下游河道邊界水位條件，總歷時約為 45 小時，階梯式試驗總水、砂量與規劃歷線差異小於 0.08 %。

四、模型試驗成果

由於本研究暫置場一及暫置場二之放淤泥砂濃度皆採用 100 萬 ppm (台灣電力公司, 2022)，因此根據式 (6) 的模型縮比，暫置場一及暫置場二之放淤泥砂冲刷效率計算方式，可採用式 (13) 及式 (14) 進行計算。

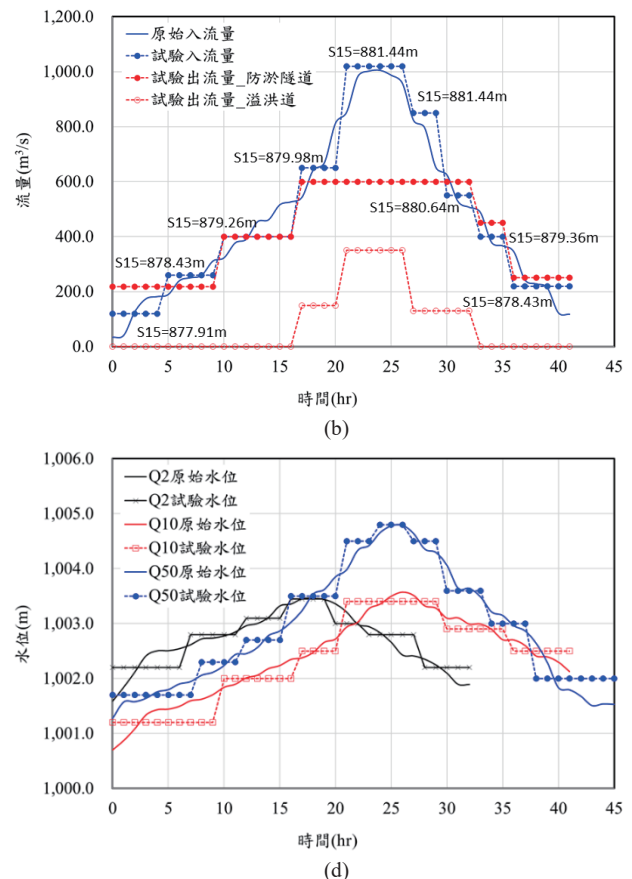
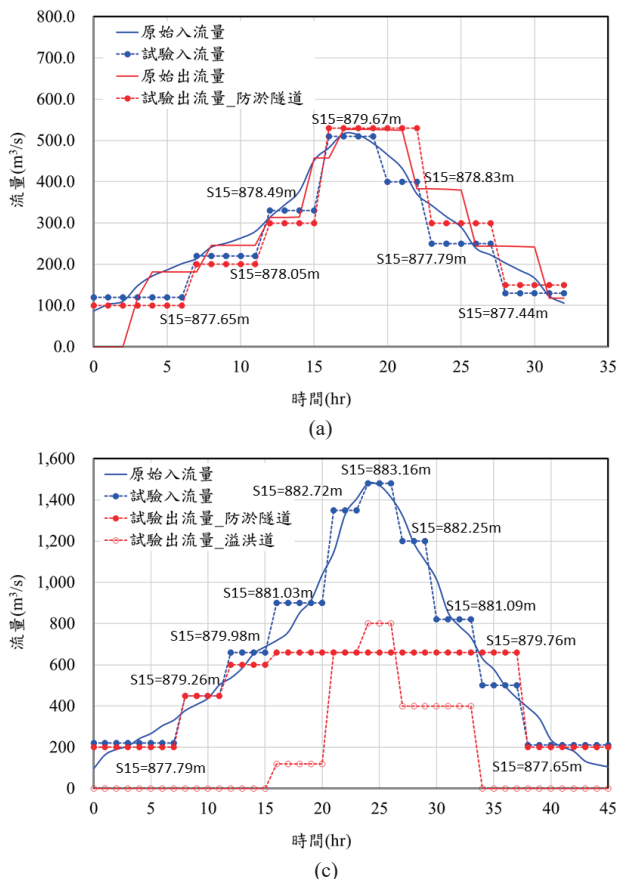


圖 3 庫區入流量、出流量及下游河道邊界水位 (a) Q_2 、(b) Q_{10} 、(c) Q_{50} 、(d)庫區試驗水位

$$\text{暫置場一冲刷效率} = \lambda_{s_1} \times [(\text{斷面 S19 輸砂量} - \text{防淤出砂量} - \text{斷面 S20.7 輸砂量}) / 10 \text{ 萬方}] \dots\dots\dots(13)$$

$$\text{暫置場二冲刷效率} = \lambda_{s_2} \times [(\text{斷面 S20.7 輸砂量} - \text{溢洪出砂量}) / 15 \text{ 萬方}] \dots\dots\dots(14)$$

4.1 試驗組別 Q₂ 滯洪

圖 4 為組別 Q₂ 滯洪試驗水庫防淤隧道出流及下游河道斷面 S19、斷面 S15 之濃度歷線變化，由圖

可知防淤隧道出口距離斷面 S15 距離不長，因此水流運移時間小於 1 小時，因此防淤隧道出流及下游河道斷面 S19、斷面 S15 之濃度歷線變化趨於一致，且由試驗結果可知斷面 S19 及斷面 S15 間泥砂濃度值相近，因此這個河段之間底床泥砂沖淤現象應不明顯，而斷面 S19 及斷面 S15 與防淤隧道濃度值的差異，即為暫置場一放淤泥砂沖刷所導致，暫置場一沖刷試驗後之現象如圖 5 所示，為暫置場一鋪設 100 萬 ppm 之 10 萬方的淤泥沖於成果，由結果可看出最初鋪設淤泥高程面為 EL.884 公尺，試驗過後最深沖刷深度為於里程 560 公尺處之 EL.870.0 公尺，約 14.0 公尺。圖 6(b)~(h) 為暫置場一及斷面 S20~S18 斷面間各斷面之試驗後沖淤成果，由試驗成果看出沖淤程度變化，唯斷面 S20.4 處沖刷較少。

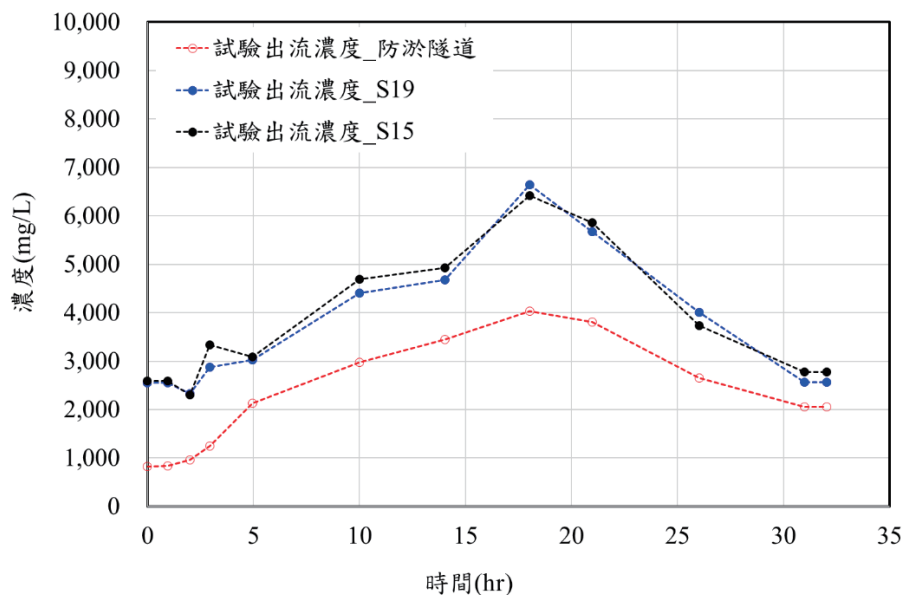


圖 4 組別 Q₂ 滯洪試驗水庫出流及下游河道泥砂濃度歷線



(a)



(b)

圖 5 組別 Q₂ 滯洪試驗後照片 (a) 落水池內沖刷、(b) 斷面 S20.2 至落水池堰前

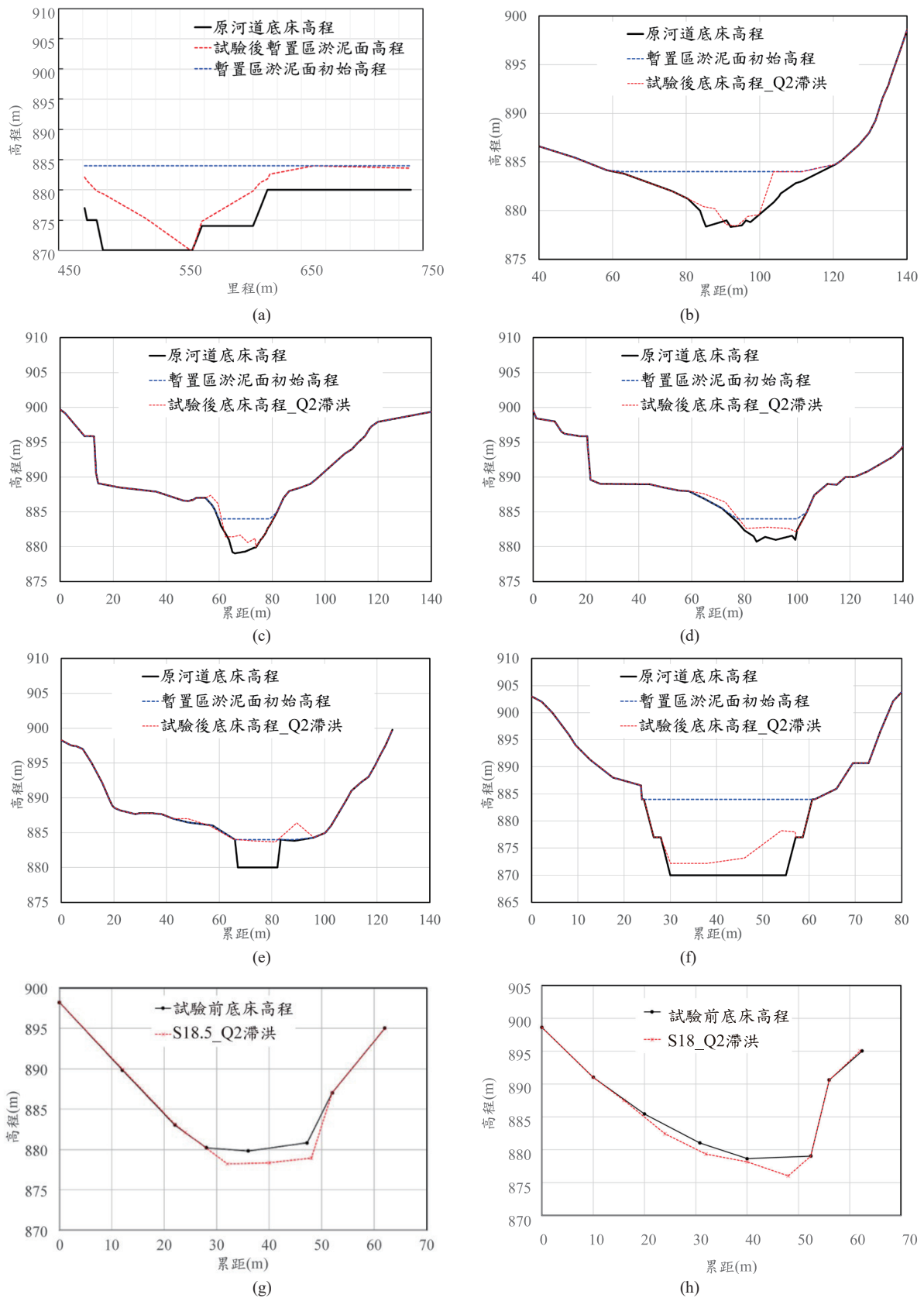


圖 6 組別 Q₂ 滯洪試驗下游河道冲刷断面圖 (a) 暫置場一縱剖面、(b) 下游河道断面 S20 橫剖面、(c) 下游河道断面 S20.1 橫剖面、(d) 下游河道断面 S20.2 橫剖面、(e) 下游河道断面 S20.3 橫剖面、(f) 下游河道断面 S20.4 橫剖面、(g) 下游河道断面 S18.5 橫剖面、(h) 下游河道断面 S18 橫剖面

4.2 試驗組別 Q10 滯洪

圖 7 為組別 Q₁₀ 滯洪試驗水庫防淤隧道出流及下游河道斷面 S19、斷面 S20.7 之濃度歷線變化，其中斷面 S19 為暫置場一的下游控制斷面，斷面 20.7 為暫置場二的下游控制斷面，且暫置場二被冲刷之泥砂將被水流帶至暫置場一及其下游河道，由圖中可知，當放淤泥砂被水庫出流開始冲刷啟動後，下游控制斷面的泥砂濃度在水庫出水工的濃度達到最高或最高前，即以達到最高濃度，可見放淤泥砂冲刷最有效率的關鍵在於放淤泥砂的啟動（冲刷流量夠大，但冲刷時間不需太長），由試驗結果可知放淤泥砂主要可被冲刷的時間約自第 15 小時起至第 40 小時止，共約 25 小時，可達最大冲刷成效。冲刷試驗

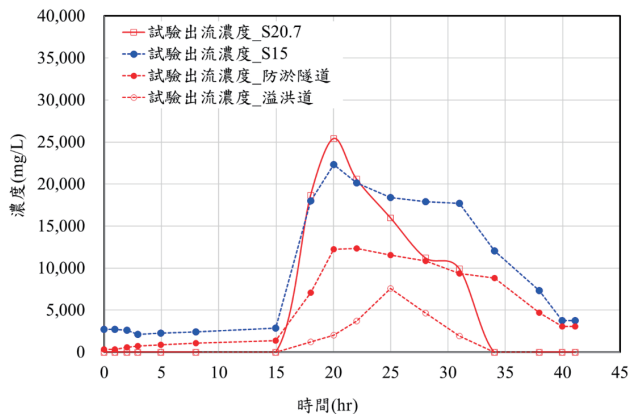


圖 7 組別 Q₁₀ 滯洪試驗水庫出流及下游河道濃度歷線

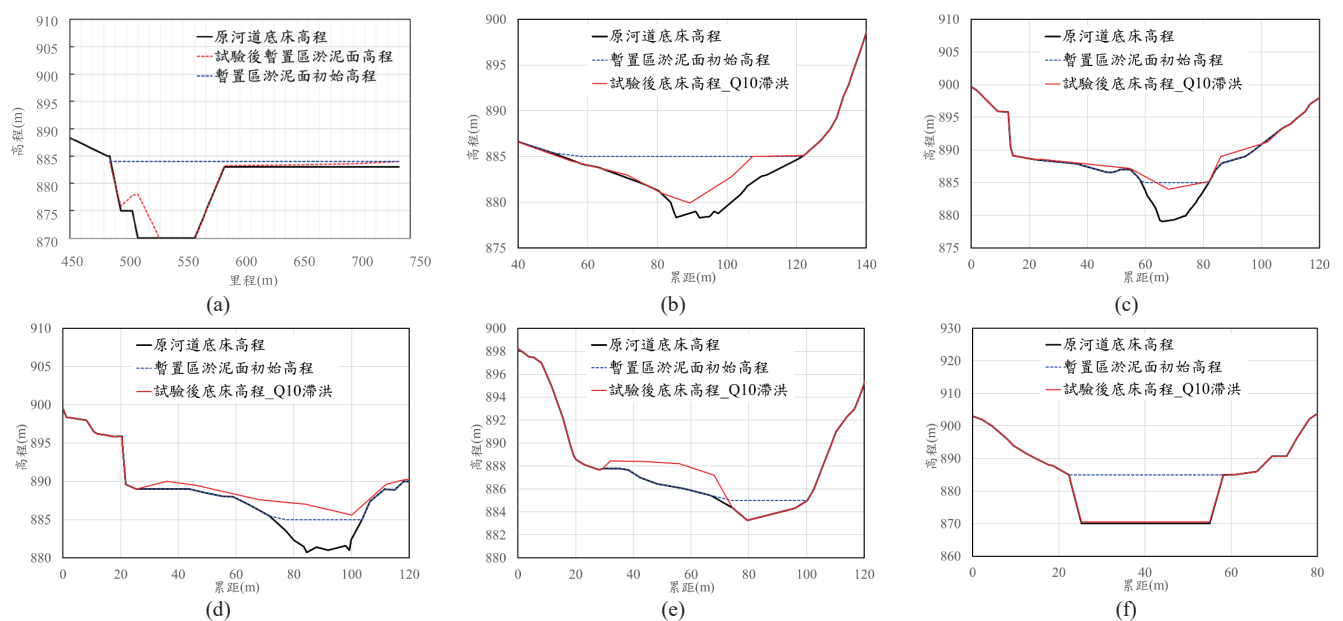


圖 9 組別 Q₁₀ 滯洪試驗下游河道（暫置場一）冲刷断面圖 (a) 暫置場一縱剖面、(b) 下游河道斷面 S20 橫剖面、(c) 下游河道斷面 S20.1 橫剖面、(d) 下游河道斷面 S20.2 橫剖面、(e) 下游河道斷面 S20.3 橫剖面、(f) 下游河道斷面 S20.4 橫剖面

後其現象如圖 8 所示，為暫置場一鋪設 30 萬 ppm 之 10 萬方的淤泥冲於成果，由圖可看出最初鋪設淤泥高程面為 EL.885 公尺，試驗過後最深冲刷深度為於里程 530 公尺後之 EL.870.0 公尺，約 15 公尺，於里程 510 公尺處淤積高程約為 EL.878.0 公尺，約 7 公尺。圖 9 為暫置場一断面之試驗後冲刷成果，由

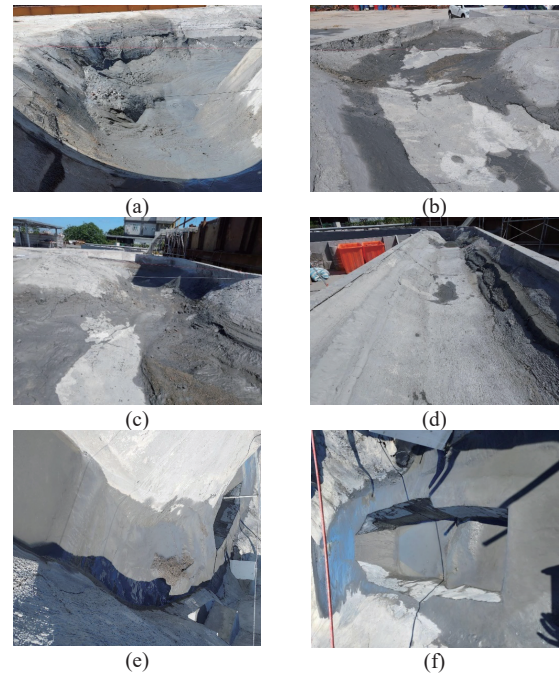


圖 8 組別 Q₁₀ 滯洪試驗後照片 (a) 壩頂溢洪道下游落水池、(b) 土堤 A、(c) 土堤 B、(d) 土堤 C~土堤 D、(e) S20.7、(f) 落水池內

圖可看出暫置場淤泥被沖刷帶至下游之現象較為明顯，但被沖刷之暫置場淤泥則有部分落淤於落水池堰上游側各斷面上。圖 10 則為暫置場二斷面之試驗

後沖淤成果，由圖可看出於斷面 A02 之後堆積之淤泥幾乎皆會被沖刷至下游。

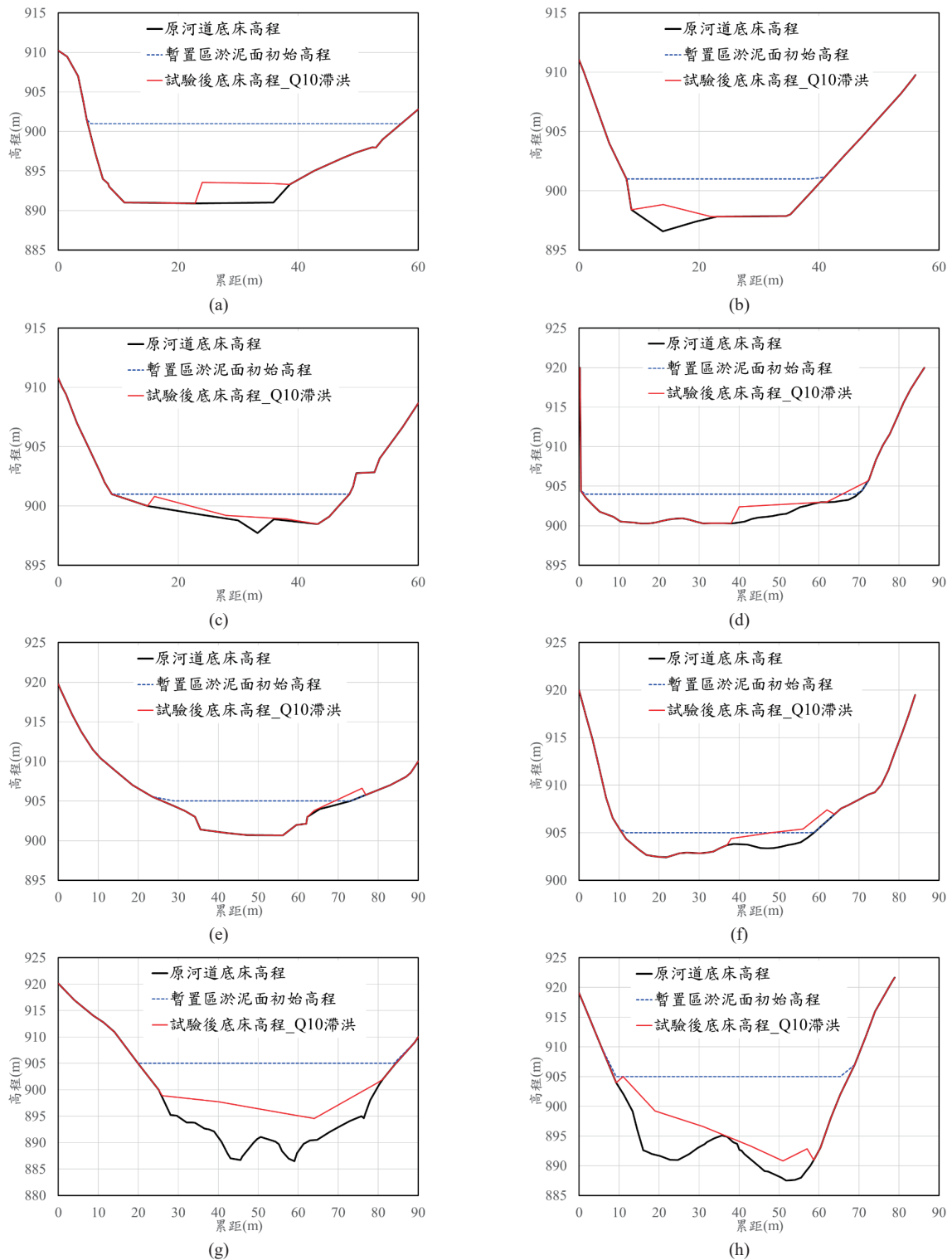


圖 10 組別 Q₁₀ 滯洪試驗下游河道 (暫置場二) 沖刷斷面圖 (a) 下游河道斷面 S24 橫剖面、(b) 下游河道斷面 S24.2 橫剖面、(c) 下游河道斷面 S24.3 橫剖面、(d) 下游河道斷面 S25.1 橫剖面、(e) 下游河道斷面 S26 橫剖面、(f) 下游河道斷面 S26.1 橫剖面、(g) 下游河道斷面 S27 橫剖面、(h) 下游河道斷面 S28 橫剖面

4.3 試驗組別 Q50 滯洪

圖 11 為組別 Q₅₀ 滯洪試驗水庫防淤隧道出流及下游河道斷面 S15、斷面 S19 及斷面 S20.7 之濃度歷線變化，其中斷面 S19 為暫置場一的下游控制斷面，斷面 20.7 為暫置場二的下游控制斷面，且暫置場二被沖刷之泥砂將被水流帶至暫置場一及其下游河道，由圖中可知，防淤隧道出流及下游河道斷面 S19、斷面 S15 之濃度歷線變化同 Q₂ 滯洪試驗一致，而暫置場一及二的沖刷特性同 Q₁₀ 滯洪試驗一致，當放淤泥砂被水庫出流開始沖刷啟動後，下游控制斷面

的泥砂濃度在水庫出水工的濃度達到最高或最高前，即以達到最高濃度，可見放淤泥砂沖刷最有效率的關鍵同樣在於放淤泥砂的啟動（沖刷流量夠大，但沖刷時間不需太長），由試驗結果可知放淤泥砂主要可被沖刷的時間約自第 0 小時起至第 32 小時止，共約 32 小時，可達最大沖刷成效，沖刷試驗後其現象如圖 12 所示。圖 13(a) 則為暫置場一鋪設 100 萬 ppm 之 10 萬方的淤泥沖於成果，可看出最初鋪設淤泥高程面為 EL.884 公尺，試驗過後最深沖刷深度為於里程 560 公尺處之 EL.870.0 公尺，約 14.0 公尺，於里程 610 至 740 公尺處有淤積現象，最高淤積高

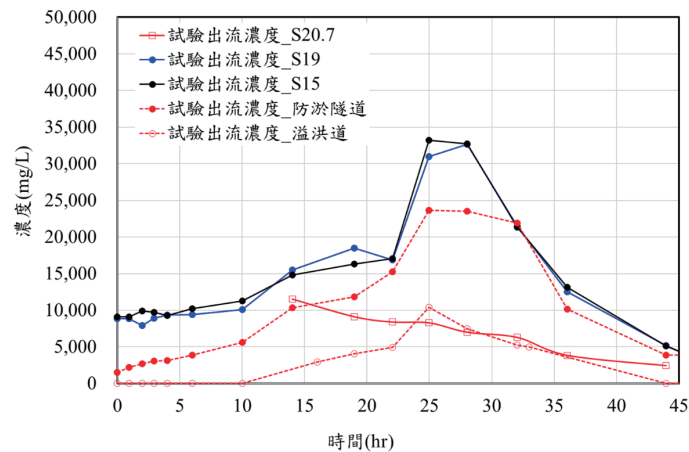


圖 11 組別 Q₅₀ 滯洪試驗水庫出流及下游河道濃度歷線

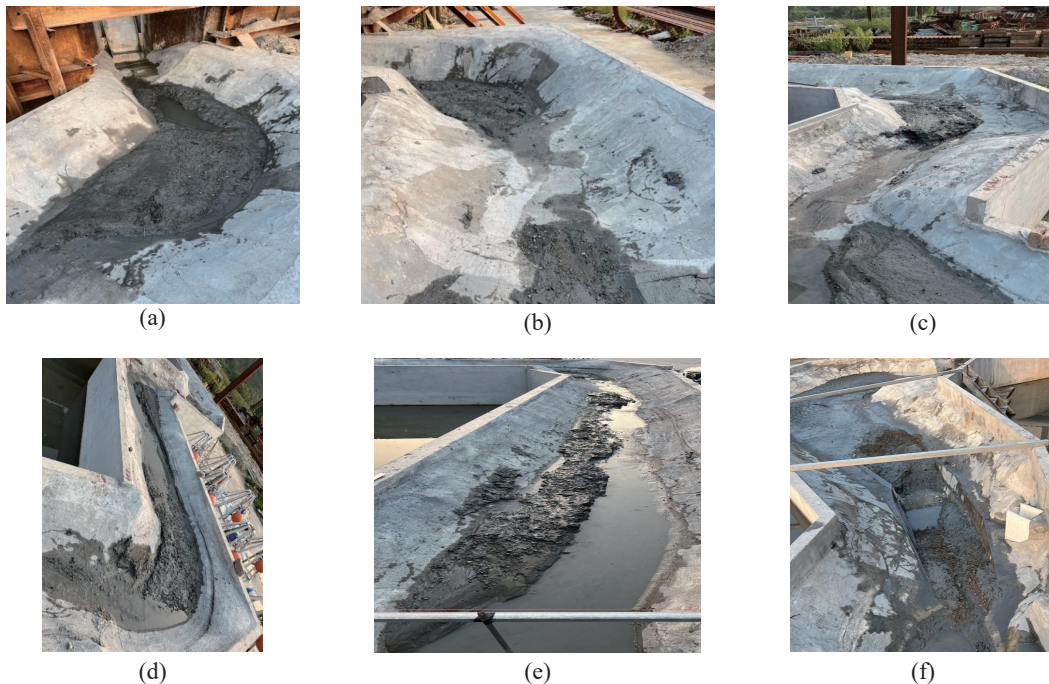


圖 12 組別 Q₅₀ 滯洪試驗後照片(a) 壩頂溢洪道下游落水池、(b) 土堤 A、(c) 土堤 B、(d) 土堤 C、(e) 土堤 D、(f) 落水池內

度約 3.56 公尺。圖 13(b) ~ (h) 為暫置場一及斷面 S20~S18 間各斷面之試驗後沖淤成果，可看出暫置場淤泥被沖刷帶至下游之現象較為明顯，但被沖刷之暫置場淤泥則有部分落淤於落水池堰上游側各斷面上。而暫置場二試驗後沖淤成果如圖 14 所示，可

看出斷面 21 至斷面 A02 中，除斷面 24、斷面 24.3 及斷面 A03 轉彎處淤泥未被沖刷光之外，其他斷面淤泥皆被沖刷至底床處。靠近溢洪道上游斷面 27 至斷面 A01 處沖刷情形反而沒有下游明顯，但也幾乎被沖刷掉大部分之放淤淤泥。

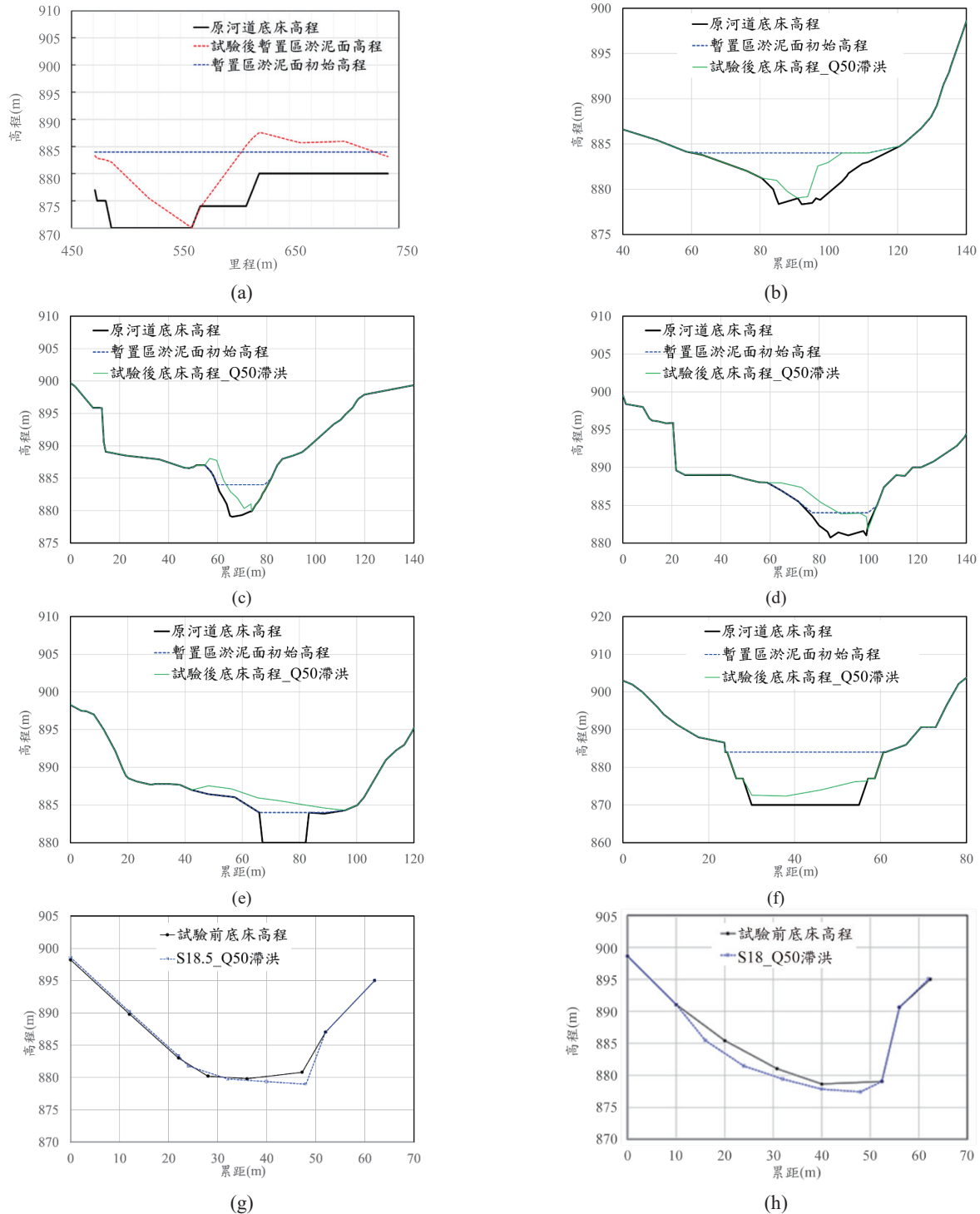


圖 13 組別 Q_{10} 滯洪試驗下游河道 (暫置場一) 沖刷斷面圖 (a) 暫置場一縱剖面、(b) 下游河道斷面 S20 橫剖面、(c) 下游河道斷面 S20.1 橫剖面、(d) 下游河道斷面 S20.2 橫剖面、(e) 下游河道斷面 S20.3 橫剖面、(f) 下游河道斷面 S20.4 橫剖面、(g) 下游河道斷面 S18.5 橫剖面、(h) 下游河道斷面 S18 橫剖面

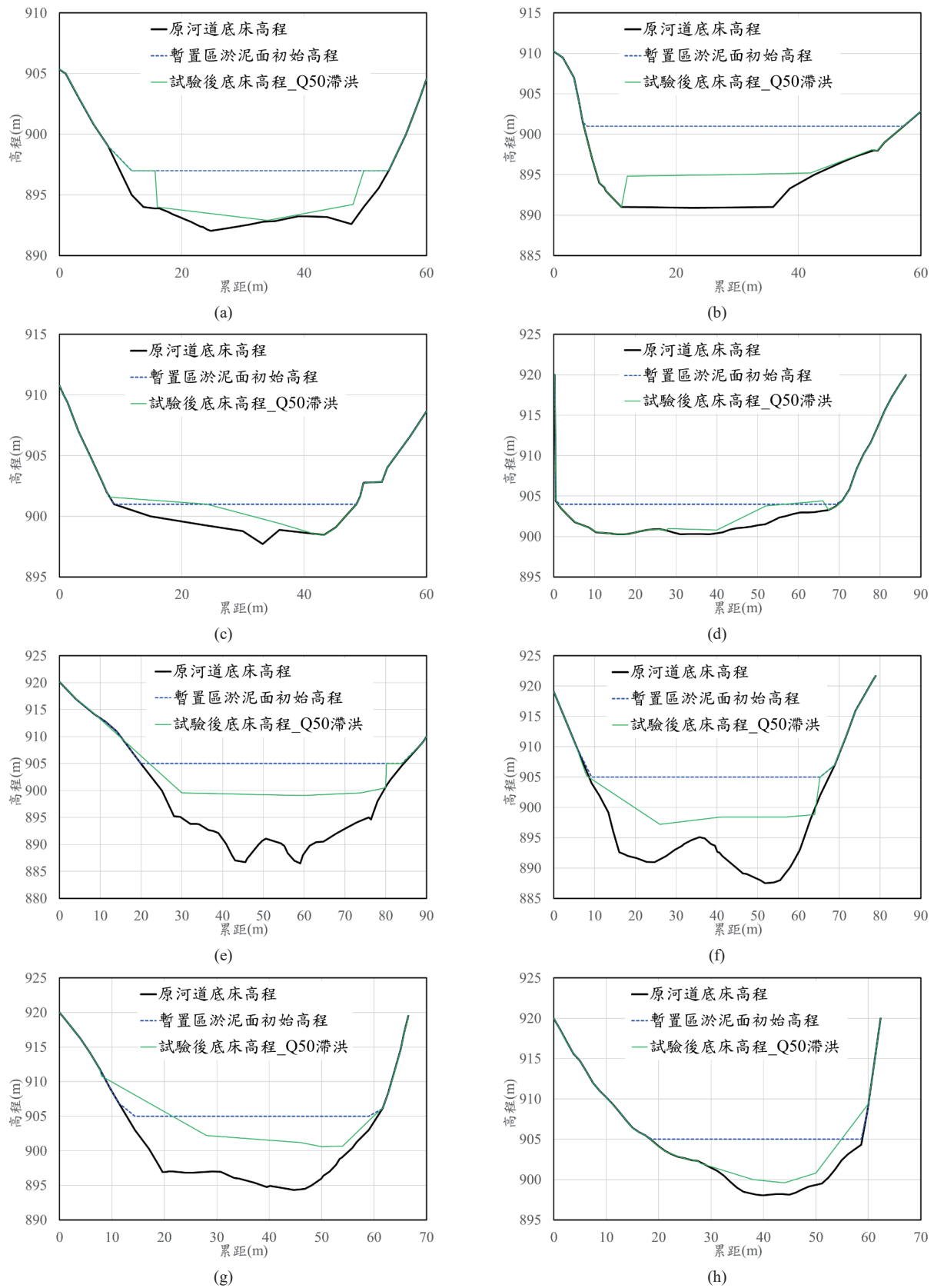


圖 14 組別 Q_{10} 滯洪試驗下游河道(暫置場二)冲刷断面圖(a) 下游河道断面 S21 横剖面、(b) 下游河道断面 S24 横剖面、(c) 下游河道断面 S24.3 横剖面、(d) 下游河道断面 S25.1 横剖面、(e) 下游河道断面 S27 横剖面、(f) 下游河道断面 S28 横剖面、(g) 下游河道断面 S29 横剖面、(h) 下游河道断面 S29.1 横剖面

五、結論

本研究針對霧社水庫 Q2 滯洪、Q10 滯洪及 Q50 滯洪條件下，在進行防淤排砂操作時，探討下游河道水庫抽泥暫置場一及暫置場二之淤泥沖刷效率，考慮暫置場淤泥的乾密度或濃度特性，本研究以 100 萬 ppm 淤泥放淤於模型試驗之暫置場一及暫置場二，因此，除了考量沖刷過程中暫置場沖刷起來的淤泥體積及沖刷過程之水體積也與原型相似之比尺外，亦受到暫置場鋪設淤泥亦受到庫區排砂量影響，因此其暫置場沖刷行為比尺須考量庫區懸移質挾砂能力比尺（包含各出水工之懸浮質挾砂濃度及輸砂總量）。

基於上述理論與設定，本研究主要成果如表 2 所列，Q₂ 滯洪在暫置場一堆置之 100 萬 ppm 淤泥於模型換算成原型沖刷率為 89.29 %。Q₁₀ 滯洪試驗在暫置場一及暫置場二堆置之 30 萬 ppm（模型試驗暫置淤泥已考量黏性淤泥模型沖刷相似比尺，因此模型

試驗成果可反映原型 100 萬 ppm 暫置淤泥之沖刷效果）淤泥於模型及原型沖刷率分別為 81.68 % 及 84.31 %。Q₅₀ 滯洪試驗在暫置場一及暫置場二堆置之 100 萬 ppm 淤泥於模型換算成原型分別為 66.86 % 及 92.53 %。然而 Q₁₀ 滯洪及 Q₅₀ 滯洪情境下，暫置場一之泥砂來源多了暫置場二所沖刷下來之泥砂量，因此導致暫置場一之沖刷效率隨著水庫尖峰出流量之增加而減少。

綜合上述試驗成果可知，河道暫置場沖刷率於第一期河道暫置場為 66.86 % ~ 89.29 %、第二期河道暫置場為 84.31 % ~ 92.53 %，惟沖刷率受霧社水庫各出水工排放流量、河道水位及沖刷時間影響，整體沖刷率大致維持八成以上，河道暫置場一之落水池淤泥可有效完成沖刷，然而落水池堰上游因流速降低呈現淤積，建議可將淤積料以機械挖除，再載運至河道暫置場二用以堆置土堤，循環利用；河道暫置場二於土堤 A 及土堤 B 之間為河道轉彎處，沖刷率較低，建議可將多數淤泥移至土堤 C 及土堤 D 上游堆置。

表 2 下游河道放淤泥砂之沖刷效率試驗成果

組別	排砂量 (萬噸)		尖峰出流泥砂濃度(mg/L)				尖峰出流量(m ³ /s)		沖刷效率(%)	
	溢洪道	防淤 隧道	溢洪道	防淤 隧道	S20.7	S19	溢洪道	防淤 隧道	暫置場 一	暫置場 二
Q ₂ 滯洪	-	9.52	-	4029	-	6644		510	89.29	-
Q ₁₀ 滯洪	5.1	44.62	7,580	10,843	22320	24408	350	600	81.68	84.31
Q ₅₀ 滯洪	20.74	105.6	10,412	23,655	23655	30992	800	660	66.86	92.53

致謝

本研究承蒙科技部計畫編號 MOST 111-2221-E-002-062 及 NSTC 113-2221-E-005-027 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. Abdelhadi, M. L. "Environment and Socio-economic Impacts of Erosion and Sedimentation in North African Countries," 6th Intl. Symp. River Sedimentation. Central Board of Irrigation and Power, New Delhi., pp. 1141-1152, 1995.
2. Alhasan, Z., Jandora, J. and Riha, J. "Comparison of Specific Sediment Transport Rates Obtained from Empirical Formulae and Dam Breaching Experiments," *Environmental Fluid Mechanics*, 16(5), pp.997-1019, 2016.
3. Annandale, G. W., Morris, G. L. and Karki, P. "Extending the Life of Reservoirs: Sustainable Sediment Management for Dams and Run-of-river Hydropower," World Bank, Washington, DC, 2016.
4. Armanini, A., Sartori, F., Tomio, G., Cerchia, F. and Vergnani, M. "Analysis of a Fluvial Groynes System on Hydraulic Scale Model," In *River Flow 2010*:

- Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics. Karlsruhe: Bundesanst für Wasserbau, 2010.
5. Asthana, B. and Khare, D. "Reservoir sedimentation. In Recent Advances in Dam Engineering," *Springer*, pp.265-288, 2022.
 6. Beckers, F., Haun, S. and Noack, M. "Experimental Investigation of Reservoir Sediments," In E3S Web of Conference. EDP Sciences 40(03030):8, 2018.
 7. Bieri, M. D., Muller, 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*, 138(4), pp.340-347, 2012.
 8. Brune, G. M. "Trap Efficiency of Reservoirs," *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 34(3), pp.407-418, 1953.
 9. Camnasio, E., Orsi, E. and Schleiss, A. J. "Experimental Study of Velocity Fields in Rectangular Shallow Reservoirs," *Journal of Hydraulic Research*, 49(3), pp.352-358, 2015.
 10. Chamoun, S., De Cesare, G. and Schleiss, A. J. "Influence of Operational Timing on the Efficiency of Venting Turbidity Currents," *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(9):04018062, 2018.
 11. Crowder, B. M. "Economic Costs of Reservoir Sedimentation: A Regional Approach to Estimating Cropland Erosion Damages," *Journal Soil and Water Conservation*, 42(3), pp.194-197, 1987.
 12. Dendy, F. M., Champion, W. A., and Wilson, R. B. "Reservoir Sedimentation Surveys in the United States." In W. C. Ackermann, G. F. White, and E. B. Worthington (editors), *Man-made Lakes: Their Problems and Environmental Effects*, Geophysical Monograph No. 17. *American Geophysical Union*, Washington, D.C., 1973.
 13. Gogus, M. and Yalcinkaya, F. "Reservoir sedimentation in Turkey," *5th Intl. Symp. River Sedimentation*, Karlsruhe, pp.909-918, 1992.
 14. Huang, C. C. "Navigating Reservoir Deposition Challenges: Evaluation of Reservoir Desilting Strategy Through a 4-stage Life Cycle Assessment Approach," *Water Resources Management*, 2024.
 15. 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*, 82(12):313, 2023.
 16. Huang, C. C., Lai, J. S., Lee, F. Z., and Tan, Y. C. "Physical Model-based Investigation of Reservoir Sedimentation Processes," *Water*, 10, 352, 2018.
 17. Lai, J. S. and Chang F. J. "Physical Modeling of Hydraulic Desiltation in TAPU Reservoir," *International Journal of Sediment Research*, 16(3), pp.363-379, 2001.
 18. Lee, F. Z., Lai, J. S. and Sumi, T. "Reservoir Sediment Management and Downstream River Impacts for Sustainable Water Resources—case Study of Shihmen Reservoir," *Water*, 14, 479, 2022.
 19. Mahmood, K. "Reservoir Sedimentation: Impact, Extent, Mitigation," *World Bank Technical Report* ,71, Washington, D.C., 1987.
 20. 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)," Washington: U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 2010.
 21. 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*, 36 (2021): pp.136-150, 2021.
 22. Moran, A. D., Abderrezzak, K. E. K., Mosselman, E., Habersack, H., Lebert, F., Aelbrecht, D. and Laperrousaz, E. "Physical Model Experiments for Sediment Supply to the Old Rhine Through Induced Bank Erosion," *International Journal of Sediment Research*, 28(4), pp.431-447, 2013.
 23. Morris, G. L. "Classification of Management Alternatives to Combat Reservoir Sedimentation," *Water*, 12(3):861, 2020.
 24. 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*, 736:139477, 2020.
 25. Shields, A. "Application of Similarity Principles and Turbulence Research to Bed-load Movement," California Institute of Technology, Pasadena, 1936 (Translate from German).

26. 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 25, 2020.
27. Van Den Wall Bake, G. W. "The Siltation and Erosion Survey in Zimbabwe: Drainage Basin Sediment Delivery," *Drainage Basin Sediment Delivery*. IAHS Publ. 159, pp.69-80. Wallingford, U.K., 1986.
28. Varma, C. V. J., Rao, A. R. G., and Natarajan, S. "Sedimentation of Indian Reservoirs — An Assessment," *Proc. 5th Intl. Symp. River Sedimentation*. Karlsruhe, pp.919-923, 1992.
29. 水利規劃試驗所：「石門水庫上游主河道分洪防淤工程初步規劃及水工模型試驗研究」，經濟部水利署，2012。
30. 水利規劃試驗所：「曾文水庫防淤隧道全域水工模型試驗第二階段成果報告」，經濟部水利署，2018。
31. 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。
32. 台灣自來水公司第六區管理處：「南化水庫防洪防淤潛壩及空庫排砂水工模型試驗」，國立成功大學，2017。
33. 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。
34. 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。
35. 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。
36. 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。
37. 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，69 卷 3 期，1-15 頁，2023。
38. 林國峰、賴進松、何興亞：「新武界隧道及 栗棲溪引水工程水工模型試驗報告」，國立臺灣大學水工試驗所，2000。
39. 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。
40. 賴進松：「阿公店水庫淤泥冲刷啟動之研究」，台灣水利，46 卷 3 期，76-83 頁，1998。
41. 寶國仁、王國兵、王向明、於為信、高亞軍、韓信：「黃河小浪底工程泥沙問題的研究」，水利水運科學研究，第 3 期，197-209 頁，1995a。
42. 寶國仁、萬聲淦、陸長石：「三峽工程變動 回水區泥沙淤積的試驗研究」，水利水運科學研究，第 4 期，327-335 頁，1995b。
43. 王兆印、張新玉：「水庫黏性淤積物洩空冲刷的模型試驗研究」，泥沙研究，第 2 期，1989。

收稿日期：民國 113 年 05 月 20 日
修改日期：民國 113 年 07 月 10 日
接受日期：民國 113 年 08 月 10 日