

# 應用二維層平均數值模式及孔口流理論公式推估排砂效率之研究

## Apply Two-dimensional Layer-averaged Model and Theoretical Orifice Flow Equations to Estimate Desilting Efficiency

李 豐 佐

FONG-ZUO LEE

國立中興大學土木工程學系  
助理教授

陳 湘 盈

SIANG-YING CHEN

中興工程顧問股份有限公司  
工程師

賴 進 松\*

JIHN-SUNG LAI

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

譚 義 績

YIH-CHI TAN

國立臺灣大學生物環境系統工程學系  
名譽教授

余 化 龍

HWA-LUNG YU

教授

### ABSTRACT

Due to the influence of geographical and hydrological conditions in Taiwan, the slope of the reservoir catchment area is steep, and the flow is rapid. Therefore, during the period of typhoons and heavy rain, a large amount of soil and sand is often washed and deposited in the reservoir and its upstream channels. The reservoir sedimentation problem decreases the reservoir storage capacity. In order to ensure water resources utilization and stabilize the water supply, the prevention and control strategies involve the conservation of the reservoir catchment area as well as the desilting and dredging of the reservoir. Reservoir desilting and dredging involve land excavation and dredging in the water. However, the check dam in the upper reaches of the Zengwen Reservoir is silted up, and the annual sediment volume of the reservoir is estimated to be 5.6 million cubic meters. To increase the sediment desilting efficiency of the Zengwen Reservoir, this study considered the dredging in water to construct a rectangular guiding channel at the bottom of the reservoir in front of the desilting tunnel. It is expected that during typhoon floods or heavy rains in Zengwen Reservoir, the muddy water containing refined grains entering the reservoir can pass through the guiding channel at the bottom of the reservoir. The turbid water flow with high concentration in the reservoir can be transported to the front of the dam in a concentrated manner, and the desilting tunnel can effectively discharge the sediment. This approach is expected to reduce sediment deposition in the reservoir and achieve the goal of sustainable utilization of the reservoir effect. This study selected two torrential rain and typhoon events as two-dimensional layer-averaged model (2DLAM) verification cases, and the two-dimensional and three-dimensional bottom orifice flow theory formula was used to calculate the flow sediment concentration. According

\* 通訊作者，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，台北市106羅斯福路四段一號，[jslai525@ntu.edu.tw](mailto:jslai525@ntu.edu.tw)

to the simulation results, estimating the concentration of sediment outflow through the 2D and 3D bottom orifices formula can reflect the trend of decreasing turbid water in the inflow recession period. Therefore, it can be used to correct the deficiencies of the 2DLAM in simulating the inflow recession period in the future. When the length of the guiding channel reaches Section A-10, the turbid water flow into the reservoir will not be affected by the topography of Changzhi Creek confluence. Sediment begins to concentrate at the upstream entrance of the guiding channel and smoothly transport to the desilting tunnel mouth, effectively discharging sediment out of the Zengwen Reservoir.

**Keywords:** guiding channel, desilting tunnel, 2DLAM, desilting efficiency.

## 摘 要

台灣因為地理及水文條件影響，造成水庫集水區坡陡流急，因而於颱風豪雨時期常有大量土砂沖淤在水庫及其上游河道內，水庫淤積問題造成水庫庫容無法維持，因此如何永續利用水資源及穩定供水，其防治策略為水庫集水區保育及水庫減淤清淤，水庫減淤清淤的方式則有陸面開挖、水中浚渫及水力排砂等方式，然而曾文水庫上游地區各攔砂壩呈現淤滿狀態，水庫年入庫泥砂量推估為560萬立方公尺。為了增加曾文水庫排砂效率，本研究考量曾文水庫防淤隧道前，利用水中浚渫作業建構庫底矩形導流槽，使曾文水庫於颱風或豪雨期間，將含細粒料之入庫渾水能夠藉由庫底導流槽的設置，使高含砂濃度的入庫渾水流可集中運移到達壩前，並由曾文水庫防淤隧道將泥砂以水力排砂的方式有效排出，減少泥砂於水庫中淤積，達到水庫永續利用的成效。本研究選擇兩場豪雨颱風事件作為二維層平均數值模式(Two-Dimension layer-averaged model, 2DLAM)的檢驗證案例，應用二維及三維底部孔口流理論公式計算出流泥砂濃度，探討入庫渾水的運移型態，分析防淤隧道排砂效率的變化，由模擬結果顯示，透過二維底部孔口及三維底部孔口公式進行出流泥砂濃度推估，可於退水段反映渾水潭下降之趨勢，因此未來可應用於修正2DLAM數值模式於退水段模擬結果之不足，而當導流槽之長度到達A-10以上斷面時，入庫渾水渾水流不會因長枝坑溪匯流口地形而受到影響，且於導流槽上游入口處泥砂開始集中，並順利運移至防淤隧道口，可使入庫泥砂有效的排出曾文水庫。

**關鍵詞：**導流槽，防淤隧道，二維層平均數值模式，排砂效率。

## 一、前 言

台灣受地理位置及自然條件影響，每年5到10月經常有梅雨、颱風過境或西南氣流所帶來的豪大雨，造成水庫集水區土石崩塌，以及使河流挾帶大量泥砂流入水庫。以臺灣最大水庫曾文水庫為例，臺灣曾文水庫為臺灣南部地區最重要的水資源設施，主要功能在於發電、防洪及提供灌溉用水來源，2021年底庫容約為 $507.38 \times 106 \text{ m}^3$  (水庫水位EL.230 m)，自1973年蓄水營運以來共淤積 $296.43 \times 106 \text{ m}^3$ ，已明顯衝擊其供水能力，即便將來水資源利用是採「以供定需」的原則調度，為維持南部地區農業、民生、工業與生態用水，都需以維持曾文水庫可持續利用的庫容目標進行規劃(經濟部水利署水利規劃試驗所，2020)。然而台灣曾文水庫因缺乏庫底排砂設施，水庫淤積量逐年增長，為了減緩曾文水庫

泥砂淤積問題，水庫管理單位於中下游庫區透過路面開挖、水中浚渫及水力排砂清淤的方式，減緩水庫泥砂淤積的問題，其中陸面開挖一般是在枯水期水位低時利用挖土設備開挖露出水面之淤積物，而水中浚渫主要清除水面下之淤砂，全年皆可實施，水力排砂主要於颱風期間實施。

然而陸面開挖及水中浚渫面臨的最大困難是淤泥的去化，自2012年起，曾文水庫持續辦理壩前清淤作業，所清之淤泥暫置於下游河道，並利用颱風期間的溢流洪水將暫置的淤泥沖至曾文溪河口，經實際監測下游河道並無明顯淤積。然而近年來，曾文水庫降雨量減少導致入庫流量與溢流洪水量皆不足，造成暫置於下游河道之淤泥無法去化。因此，為了加強掌握颱風期間可進行之水力排砂效率，南區水資源局擬應用水中浚渫的方式，於曾文水庫防淤隧道前之庫底建置導流槽，透過應用導流槽將颱風期間入庫之高濃度渾

airiti

水集中運移至壩前的型態，加強颱風期間之水力排砂清淤效益，並應用二維數值模式模擬入庫渾水流運移情形，以及孔口流計算公式推估排砂效率的方式，研析導流槽的排砂效益，達到可持續使用水庫水資源的目的。

應用數值模式模擬水庫水理及輸砂運移，主要可分為水平二維、垂直二維及三維模式(Lee *et al.*, 2014; Nafeela, 2021)，其適用範圍及特點有所不同，水平二維模式受到淺水波(Shallow water)假設的限制，無法描述深度方向流速與濃度的變化，因此對於不同高程出水工或是排砂設施的出流泥砂濃度邊界條件設定十分困難，但相較於三維模式而言，模式發展之技術已趨於成熟，電腦計算時間較不受限制，在實用上反較具可行性，概括而言，二維模式可較為完整描述水砂在平面上之運移形態，而二維模式所需之計算時間亦較三維模式節省，故適於長時間之模擬，然而水平二維模式欠缺深度方向資訊，但可提供流場與泥砂濃度之平面分佈，反之，垂直二維模式可提供垂直面之流場與濃度分佈，但缺乏側向資訊。其中水平二維(層平均)異重流模式在近年開始蓬勃發展，如Ellison and Turner (1959)首先提出層平均二維模式的概念，Parker *et al.* (1986)則提出層平均的統御方程式，Olsen (1999)曾利用自行研發之水平二維數值模式，進行尼泊爾Kali Gandaki發電水庫之庫區底床變動模擬，Firoozabadi *et al.* (2003)則針對異重流濃度及速度的運移現象，以垂直二維模式探討兩種泥砂粒徑所產生的影響，Young and Lin (2005)則同樣利用垂直二維方程式，求解德基水庫因為溫度分層所產生之溫度異重流現象，其模式利用美國陸軍工兵團的水槽試驗檢定驗證參數，其模擬之德基水庫水位與溫度分層的數值與量測值相當接近，Oehy and Schleiss (2007)則利用CFX垂直二維模式，模擬混濁的流體受到砂質或是可穿透的障礙物的影響，並透過水槽試驗的影像與數值驗證模式的準確性，其分析結果顯示庫底障礙物可有效阻擋部分濁水流體進入下游區域，Hung *et al.* (2009)以正交曲線座標進行黏性與非黏性泥砂的二維傳輸模擬，並採用隱式差分運算、耦合與迭代法分析質量守恆方程式，將其應用於臺灣阿公店水庫更新改善工程之排砂模擬及臺灣石門水庫

與翡翠水庫泥砂運移模擬，Chung and Lee (2009)考慮三種不同的泥砂沉降特性，包含整體沉降速度、不同顆粒沉降速度及濃度變化所導致之沉降速度變化，利用垂直二維模式進行水庫異重流模擬，Amini *et al.* (2014)亦曾以祕魯Peruvian水庫為研究對象，進行垂向二維庫區懸浮質泥砂濃度之運移模擬，探討發電取水口前不同泥砂粒徑的濃度變化，此外，近年來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) (Lai, 2008; Lai and Greimann, 2010)，亦曾應用於臺灣石門水庫推估水庫異重流運移情形(Lai *et al.*, 2015, 2018; Huang *et al.*, 2019)，指出渾水流二維層平均數值模式(2DLAM)可用於了解渾水流於水庫中的運移特性，Wang *et al.* (2020)亦利用SRH-2D模式，探討阿公店水庫在空庫排砂條件下，不同的水位操作條件其可能的排砂效率模擬分析。因此Wu *et al.* (2021)曾利用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(2020)及南區水資源局(2021, 2022)，亦曾利用SRH-2D模式模擬曾文水庫及阿公店水庫具備人工導槽條件下，對於水庫防淤排砂效率之影響分析。

綜上所述，本研究擬應用二維層平均數值模式(2DLAM)，結合水中浚淤於曾文水庫防淤隧道口前庫底具備矩形導流槽的情境，模擬庫區在不同重現期入流渾水量之運移狀態，以及泥砂濃度於庫區中的變化，進而搭配出口之孔口流理論公式，研究推估防淤隧道之排砂效率。

## 二、孔口流理論及數值模式

本文首先針對二維層平均數值模式所採用之守恆方程式，以及二維及三維孔口流理論公式進行說明如下：

### 2.1 二維層平均數值模式

為探討曾文水庫防淤隧道排砂效率，將採用美國墾務局研發之模式的二維層平均數值模式(Two-Dimension layer-averaged model, 2DLAM)，其發展之主要目的乃用於模擬分析水庫渾水異重

流之運移行為。2DLAM之控制方程式分別列於式(1)到式(5)，其中式(1)為質量守恆方程式，式(2)及式(3)為動量守恆方程式，式(4)和式(5)分別為渾水傳輸和底床高程變化之非平衡泥砂傳輸方程式，並採用Engelund-Hansen公式(式6)計算輸砂量。

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

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

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

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

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

$$E_k = 0.05m_E \left( \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{h\sqrt{(s-1)g/d_k}} \right) \left( \frac{\tau_b/\rho}{(s-1)gd_k} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

式中， $h$  為渾水層平均厚度， $t$  為時間， $x$  和  $y$  分別為笛卡兒座標中之  $x$  方向和  $y$  方向， $U$  和  $V$  分別為  $x$  方向和  $y$  方向之層平均流速， $e_w$  為捲水係數(Parker *et al.*, 1987; Bradford and Katopodes, 1999)， $r_w$  為上部周圍的水與水流之間的摩擦力， $T_{xx}$ 、 $T_{xy}$  及  $T_{yy}$  為分散項， $R = s - 1$ ， $s = \rho_s / \rho_w$  為密度比( $\rho_s$  為泥砂密度及  $\rho_w$  為水密度)， $Z$  為水位高程，剪力強度  $\tau_b = \sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2}$ ， $\tau_x$  為  $x$  方向底床剪力強度， $\tau_y$  為  $y$  方向底床剪力強度， $v_k$  為  $k$  級泥砂粒徑沉降速度， $p_k$  為  $k$  級泥砂粒徑體積分率，為總懸浮泥砂濃度， $C_k$  為  $k$  級泥砂粒徑層平均體積泥砂濃度， $E_k$  為輸砂量， $m_E$  為輸砂量檢校參數， $C_{bk}$  為  $k$  級泥砂粒徑近底床泥砂濃度， $d_k$  為  $k$  級泥砂粒徑， $\gamma$  為底床泥砂孔隙率， $Z_b$  為底床高程。

## 2.2 孔口流理論

當含有泥砂之入庫渾水與清水或密度較低之渾水相遇時，由於入庫渾水密度較大，因此入庫渾水會潛入水庫底部形成底層渾水流，當底層渾水流運移至壩體底孔時，可應用孔口流公式推估底孔排砂效益，因此，本研究應用二維及三維孔口理論公式(Fan, 2008)計算底孔的出流泥砂濃度，並與數值模式之模擬結果作為比較。

本研究假設二維底孔理論之出流泥砂濃度  $C_{T2}$  之計算如式(7)，三維底孔理論之出流泥砂濃度  $C_{T3}$  之計算如式(8)，其中式(7)及式(8)中之  $C_m$  為渾水層平均泥砂濃度(計算如式(9))，式(9)中  $c$  為高程  $z$  之泥砂濃度， $\delta$  為泥砂濃度接近零之高程， $h$  為渾水層平均厚度(計算如式(10))。而式(7)及式(8)中之  $g' = (\Delta\rho/\rho_w)g$ ， $\Delta\rho$  為清水密度與渾水密度之差， $\rho_w$  為清水密度， $g$  為重力加速度。式(7)中之  $K_{d2}$  為二維底孔係數， $q_T$  為底孔單位寬度之總出流量，式(8)中之  $K_{d3}$  為三維底孔係數， $Q_T$  為底孔出流量  $Q_T = Q_w + Q_m$ ，其中  $Q_w$  為清水出流量， $Q_m$  為渾水出流量。

然而當底孔出流量影響範圍小於渾水層平均厚度時，出流泥砂濃度等於渾水層之平均泥砂濃度，反之，若底孔出流量影響範圍大於渾水層平均厚度時，方能使用式(7)及式(8)進行出流泥砂濃度推估，其中二維( $Z_{c2}$ )及三維( $Z_{c3}$ )底孔出流量影響範圍可分別用式(11)及式(12)進行計算，式中  $\rho$  為渾水層平均密度。

$$\frac{C_{T2}}{C_m} = \frac{g'^{1/3} h}{2K_{d2} q_T^{2/3}} \quad (7)$$

$$\frac{C_{T3}}{C_m} = \frac{g'^{1/5} h}{2K_{d3} Q_T^{2/5}} = \frac{h}{Z_{c3}} \quad (8)$$

$$C_m = \frac{\int_0^\delta cdz}{h} \quad (9)$$

$$h = \frac{\int_0^\delta 2czdz}{\int_0^\delta cdz} \quad (10)$$

$$Z_{c2} = 2K_{d2} \left[ \frac{q_T^2}{\Delta\rho g} \frac{1}{\rho} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

$$Z_{c3} = 2K_{d3} \left[ \frac{Q_T^2}{\Delta\rho g} \frac{1}{\rho} \right]^{\frac{1}{5}} \quad (12)$$

## 三、基本資料概述

### 3.1 研究區域概述

曾文水庫集水區位於嘉義縣大埔鄉境內(如圖1所示)，上游集水區地形陡水流急，沖蝕作用旺盛且輸砂行為強烈，因此於集水區內具備33座攔砂壩，用來防止上游泥砂進入水庫，然而各攔砂壩呈現淤滿狀態，因此已逐漸喪失其攔砂能力，導致曾文水庫年入庫泥砂量高達560萬立方公尺/年，由圖2可知，曾文水庫的庫區底床高程逐年攀升。於民國98年8月8日莫拉克颱風期間降下豪雨，造成水庫嚴重淤積，並且於99年3月有效容量僅剩4.9億立方公尺，壩前庫床淤積高程已達約179公尺，而民國63年壩前庫床原始高程約為112公尺，因此36年間壩前已淤積約67公尺，年平均淤積高度約1.86公尺。由歷年水庫淤積縱斷面最低點高程圖變化(圖2)可知，曾文水庫於2013年完成取水斜塔改建以及2015年完成永久河道放水道(PRO)改建後，降低了A1至A2斷

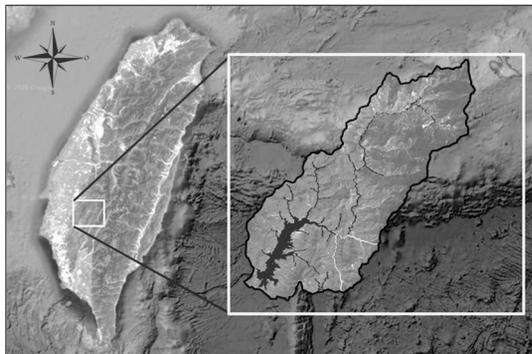


圖1 曾文水庫集水區

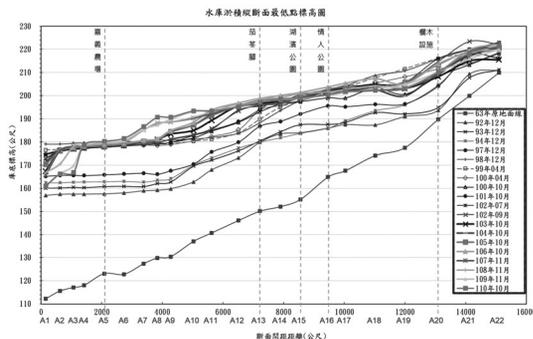


圖2 曾文水庫歷年淤積縱斷面最低點高程圖

面之底床高程，A1斷面之壩前庫底標高降低至約171公尺。

曾文水庫於2018年完工並啟用象鼻防淤隧道後，又降低了A1至A3斷面之底床高程，A1斷面之壩前庫底高程降低至約167公尺，由此可知庫底排砂設施的重要性。本研究為了加強排砂設施的水力排砂效率，結合水中湍流的特性，於曾文水庫防淤隧道前之庫底建置導流槽，透過導流槽將颱風期間入庫之高濃度渾水集中運移至壩前，以加強颱風期間庫底排砂設施之水力排砂清淤效益，達到延長水庫壽命的目的。

### 3.2 入、出流量及泥砂濃度觀測資料

為了探討於曾文水庫防淤隧道前之庫底建置導流槽後的排砂效率，本研究應用二維數值模式(2DLAM)，模擬入庫渾水流於曾文水庫庫區中運移的情形，並選用兩場颱風事件做為2DLAM數值模式之檢定驗證案例，檢定案例為蓄蜜颱風，驗證案例為蘇力颱風，本研究蒐集此兩場颱風事件之觀測資料，包含事件起始時間、各出水工開啟時間、入流量、各出水工之出流量及泥砂濃度觀測資料，用以作為2DLAM數值模式之邊界條件設定。

本研究之檢定案例，蓄蜜颱風事件起始時間為2008/09/28 08:00，此事件之各出水工亦於同一時間開啟，蓄蜜颱風事件初始入流量為256，溢洪道尖峰放流量為1,800(如圖3)。蓄蜜颱風之壩前分層泥砂濃度(如圖4)量測高程分別有E.L.168.2公尺、E.L.173.2公尺、E.L.178.2公尺、E.L.188.2公尺及E.L.208.2公尺，於高程為E.L.168.2公尺且2008/9/29 12:00時刻尖峰泥砂濃度到達7,191(mg/L)。

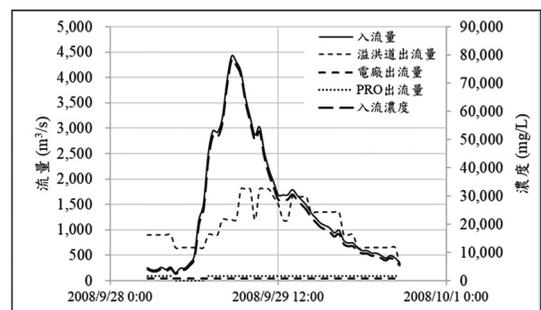


圖3 蓄蜜颱風-曾文水庫運轉操作紀錄

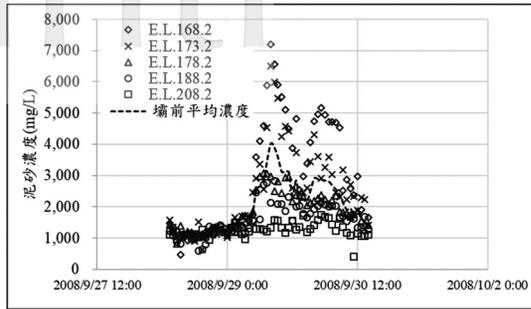


圖4 蕃蜜颱風-壩前分層泥砂濃度

本研究之驗證案例，蘇力颱風事件起始時間為2013/7/12 18:00，此事件之初始入流量為2，溢洪道尖峰放流量為1,800 (如圖5)。蘇力颱風之壩前分層泥砂濃度(如圖6)量測高程分別有E.L.177.5公尺、E.L.185.0公尺及E.L.210.0公尺，其中於高程為E.L.177.5公尺且2013/7/14 0:00時刻尖峰泥砂濃度到達10,015 (mg/L)。

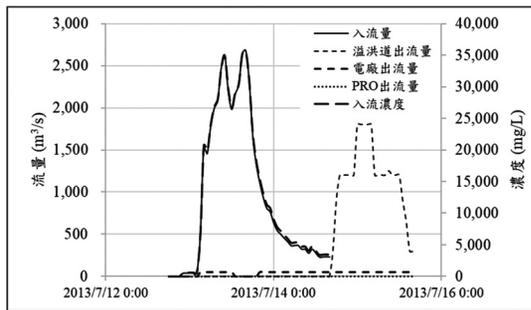


圖5 蘇力颱風-曾文水庫運轉操作紀錄

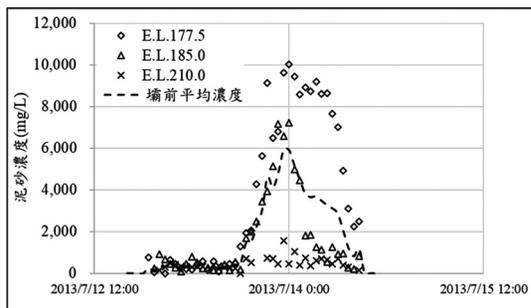


圖6 蘇力颱風-壩前分層泥砂濃度

### 3.3 導流槽設計規劃

除了蒐集檢定驗證事件之觀測資料，本研究亦探討曾文水庫防淤隧道前之庫底導流槽的幾何

特性以及曾文水庫之水文條件，藉由庫底導流槽不同幾何特性，包含長度、寬度及深度，觀察庫底導流槽對入庫渾水流的影響。考量每年水庫進到汛期前水位約為EL. 210 m上下以及每年防洪排砂操作時應以防淤隧道為常態優先之規劃，本研究曾文水庫之水文條件設定為水位210公尺，入庫流量設定為重現期距兩年 $Q_2 = 2,769 \text{ m}^3/\text{s}$ ，並參考南水局(2013)「曾文水庫庫區泥砂濃度觀測站建置」入流量與入流泥砂濃度相關性，求得入庫泥砂濃度為 $C_2 = 36,719 \text{ mg/L}$ ，出流量則視水位變化與各出水工閘門全開之條件給定。

針對曾文水庫防淤隧道前之庫底導流槽的幾何特性，設定為庫底導流槽的深度分別為2公尺及5公尺，庫底導流槽的寬度設定分別為10公尺、30公尺、50公尺及200公尺(如圖7所示)，庫底導流槽的長度分別到達A-1斷面、A-5斷面、A-10斷面及A-18斷面(如圖8所示)。

由上述設計之條件，以庫底導流槽的深度分別規劃出案例1及案例2(表1)，其中案例1-0為無導流槽之情境。並依據排砂累積量(萬噸)、排砂效率比(%)及排砂效率增加率(%)評估庫底導流槽之水力排砂效益。排砂累積量(萬噸)之計算式如式(13)，排砂效率比之計算式如式(14)，排砂效率增加率(%)之計算式如式(15)。其中， $C_o$ 為出流泥砂濃度， $C_i$ 為入流泥砂濃度， $Q_o$ 為出流量， $Q_i$ 為入流量， $v_{c0}$ 為不具備導流槽之排砂效率比。

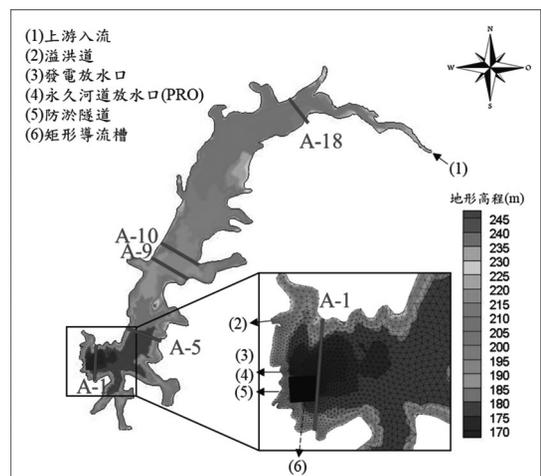


圖7 曾文水庫地形及導流槽網格(案例1-4)

表1 曾文水庫矩形導流槽模擬案例

項目	入庫流量(m <sup>3</sup> /s)	起始水位(m)	導流槽深度(m)	導流槽長度(m)	導流槽寬度(m)	
案例1-0	2,769	210	-	-	-	
案例1-1			2	A-1	10	
案例1-2					30	
案例1-3					50	
案例1-4					200	
案例2-1			5	A-1	200	
案例2-2						A-5
案例2-3						A-10
案例2-4						A-18

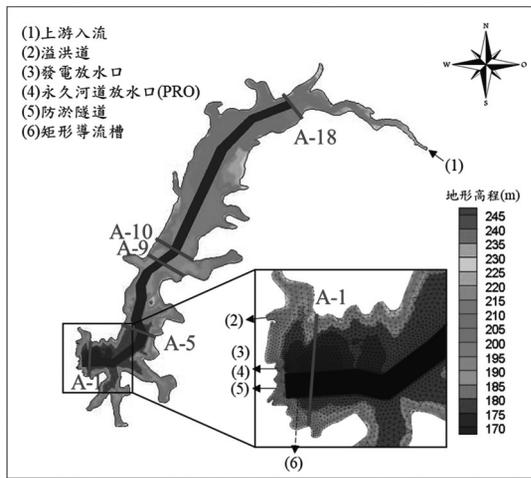


圖8 曾文水庫地形及導流槽網絡(案例2-4)

$$\text{排砂累積量(萬噸)} = \sum C_0 \times Q_0 \quad (13)$$

$$\text{排砂效率比 } v_e = \frac{\sum C_0 \times Q_0}{\sum C_i \times Q_{i0}} \quad (14)$$

$$\text{排砂效率增加率(\%)} = \frac{v_e - v_{e0}}{v_{e0}} \quad (15)$$

## 四、排砂效率推估公式評估

### 4.1 數值模式檢定驗證

本研究藉由兩場颱風事件做為2DLAM數值模式之檢定驗證案例，檢定案例為2008年蓄蜜颱風，如圖9所示，數值模式於2008/9/29 12:00時刻，模擬尖峰壩前泥砂濃度為2,521 mg/L，仍可由漲水段數據中看出，此模式能適切反應事件中

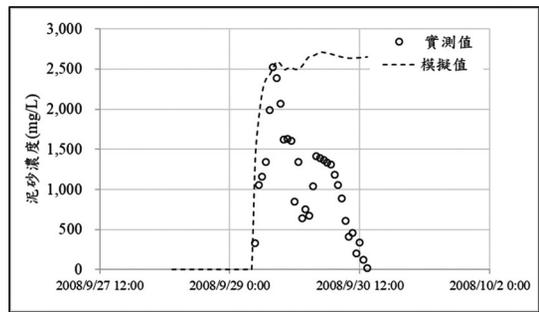


圖9 蓄蜜颱風-壩前泥砂濃度比較圖

漲水段與尖峰段的泥砂濃度變化現象。

因此本研究接著利用2013年蘇力颱風作為模式驗證案例，且使用相同的模式設定(表2)進行模擬，由模擬值與實測值之壩前泥砂濃度比較圖(圖10)，可觀察出此模式能適切反應事件中的漲水段，然而模式於退水段則無呈現泥砂濃度下降趨勢，研判應與模式無法充分考量渾水潭沉降有關(Huang *et al.*, 2019)，但模式在漲水段與尖峰段的泥砂濃度變化均能有效模擬，泥砂濃度在庫區運移及到達壩前之分布情形。

表2 曾文水庫檢定驗證之2DLAM數值模式參數設定

模式設定之參數值	參數值之範圍
模式選擇	渾水流模式
流場模式	k-ε 紊流模式
泥砂傳輸方程式	Englund-Hansen
泥砂比重	2.7
阻力係數	0.1
水溫	24°C
曼寧N值	0.002-0.02
時間步長	0.05-1.0 s

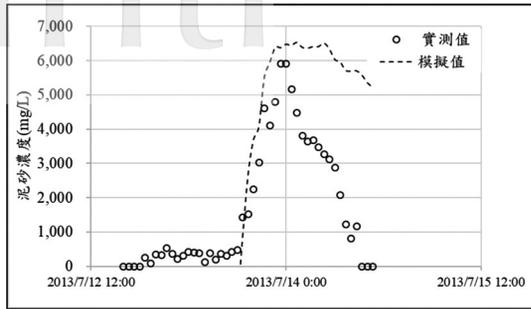


圖10 蘇力颱風-壩前泥砂濃度比較圖

經由兩場颱風事件之檢定驗證案例可得2DLAM數值模式之參數設定，如表2所示，本研究利用2DLAM數值模式模擬渾水流於曾文水庫中運移情形，並由檢定驗證案例之結果，可知2DLAM數值模式可作為本研究探討庫底導流槽對於入庫渾水運移及平面上之變化，以及作為推估各出水工出流泥砂量之評估資料來源。

#### 4.2 孔口流理論評估

由兩場颱風事件之檢定驗證結果可知，2DLAM數值模式無法充分考量退水段渾水潭沉降，因此本研究應用孔口流理論公式計算曾文水庫各出水工之出流泥砂濃度，透過出流泥砂濃度實測值率定二維及三維底孔係數，並與2DLAM之模擬結果進行比較。

藉由本研究檢定案例蓄壩颱風事件，計算出水工發電放水口(圖11)及PRO出口(圖12)之出流泥砂濃度，將2DLAM數值模式與孔口流理論公式之出流泥砂濃度計算結果進行比較。由圖11及圖12之演算結果，可知二維底部孔口及三維底部孔口推估結果於退水段有泥砂濃度下降的趨勢，較能符合退水段渾水潭下降之趨勢，因此未來將

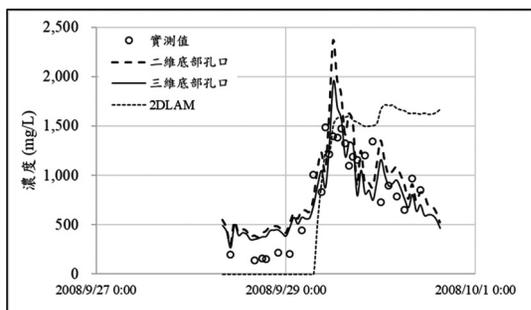


圖11 發電放水口出口泥砂濃度

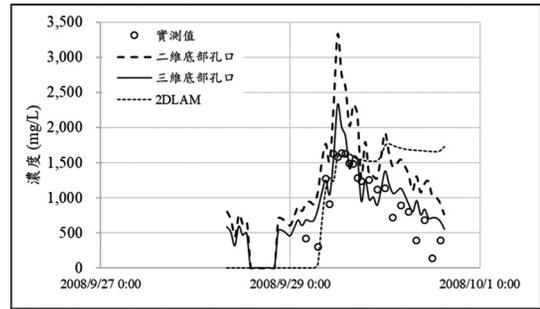


圖12 PRO出口泥砂濃度

能提供此方法修正2DLAM數值模式於退水段模擬結果之不足，但是整體而言，2DLAM數值模式仍可應用於探討建置防淤隧道前後之庫底導流槽，對於水力排砂清淤效益的研究。

### 五、模式應用

本研究依據模式的檢定驗證案例，得到2DLAM數值模式之參數設定(表2)，並透過與孔口流理論之計算結果比較後，將2DLAM數值模式應用於探討庫底導流槽的水力排砂防淤效益，並觀察入庫高濃度渾水於庫區中之運移及平面上的變化。

#### 5.1 導流槽寬度

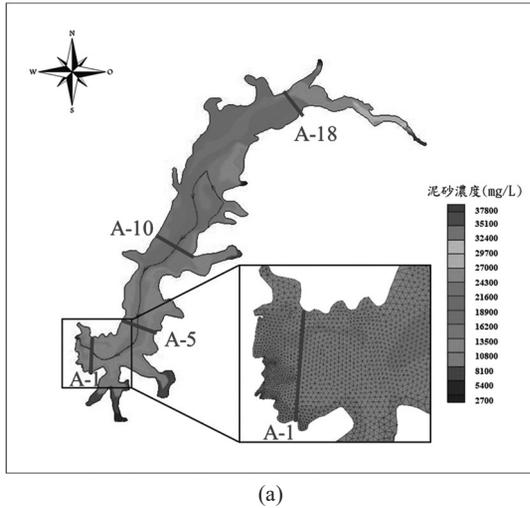
由案例1可觀察出庫底導流槽不同寬度的結果，由2DLAM數值模式模擬結果可知，當曾文水庫沒有設置庫底導流槽時(表3)，排砂累積量為19.80(萬噸)且排砂效率比為6.28(%)，而當曾文水庫有設置庫底導流槽且庫底導流槽寬度為200公尺時，排砂累積量為21.53(萬噸)且排砂效率比為6.83(%)，可使排砂效率增加率增加約8.76(%)，此處之排砂效率增加率定義為各案例與未設置導流槽之排砂效率差異值百分比。整體而言，導流槽寬度越寬，排砂量及排砂效率越高，但由於導流槽只設定至A1斷面，因此對於A1斷面以上庫區之泥砂運移影響不大，如圖13中案例1-1及案例1-4所示。

#### 5.2 導流槽長度

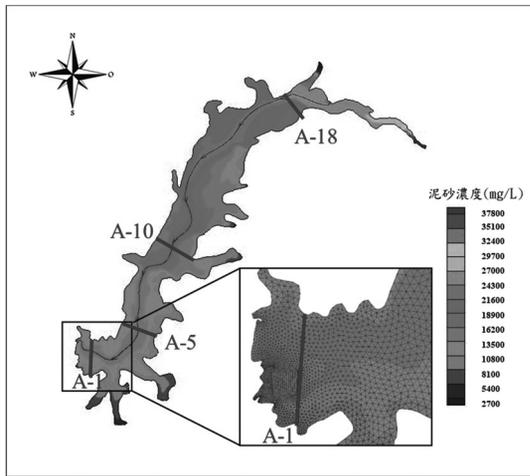
案例2可觀察出庫底導流槽不同長度的結果，由2DLAM數值模式模擬結果可知(表4)，

表3 矩形導流槽寬度對於排砂效率之影響

項目	排砂累積量(萬噸)	排砂效率比(%)	排砂效率增加率(%)	泥砂濃度到達壩前的運移時間(hr)
案例1-0	19.80	6.28	0.00	5.83
案例1-1	21.11	6.70	6.69	5.83
案例1-2	20.79	6.60	5.10	5.84
案例1-3	21.07	6.68	6.37	5.84
案例1-4	21.53	6.83	8.76	5.89



(a)



(b)

圖13 曾文水庫泥砂濃度及導流槽網絡(a)案例1-1(b) (案例1-4)

當曾文水庫有設置庫底導流槽，且庫底導流槽長度到達A-10斷面時，排砂累積量為23.46 (萬噸)且排砂效率比為7.44(%)，可使排砂效率增加18.47(%)，而當曾文水庫庫底導流槽長度到達

A-18斷面時，排砂累積量為32.26 (萬噸)且排砂效率比為10.24(%)，可使排砂效率增加率達到63.06(%)，且由圖14流速分佈可知，入庫渾水將主要沿著導流槽運移至壩前，換言之，導流槽具有水庫底床主深槽之特性，可較為集中入庫渾水流之運移，避免受到周圍地形之影響，而發生泥砂濃度消散或集中之現象，由表4可知，導流槽長度越往上游，入庫渾水流到達壩前時間略微增快，而由導流槽從長度到達A-5及A-18案例可知，當導流槽之長度到達A-10以上斷面時，入庫渾水渾水流不會因長枝坑溪匯流口地形而受到影響且於導流槽上游入口處泥砂開始集中，並順利運移至防淤隧道口，可使入庫泥砂有效的排出曾文水庫，相對地從圖15 (案例2-4)底床沖淤可知，由於模擬之泥砂為細顆粒之粉土或是黏土所形成之渾水流，因此底床沖淤現象較不明顯，但主要沖刷區域集中於地形變化較大(導流槽周圍)或是水面交界之區域，淤積部分則亦不顯著，但仍可看出淤積主要集中於A-5断面以下之區域，該區域地形較為平坦且流速較慢。

將案例1及案例2比對進行探討後，可得庫底導流槽深度對於排砂效率的影響，當庫底導流槽寬度為200公尺，庫底導流槽長度到達A-1断面，庫底導流槽深度分別為2公尺深(案例1-4)及5公尺深(案例2-1)時，排砂累積量(萬噸)、排砂效率比(%)及排砂效率增加率(%)的影響並不顯著。

## 六、結 論

曾文水庫完成PRO之改建並於2018年起啟用防淤隧道後，已逐漸改善水庫缺乏庫底排砂設施的問題，本研究為了加強排砂設施的水力排砂效率，結合水中浚淤的措施，探討於曾文水庫防淤

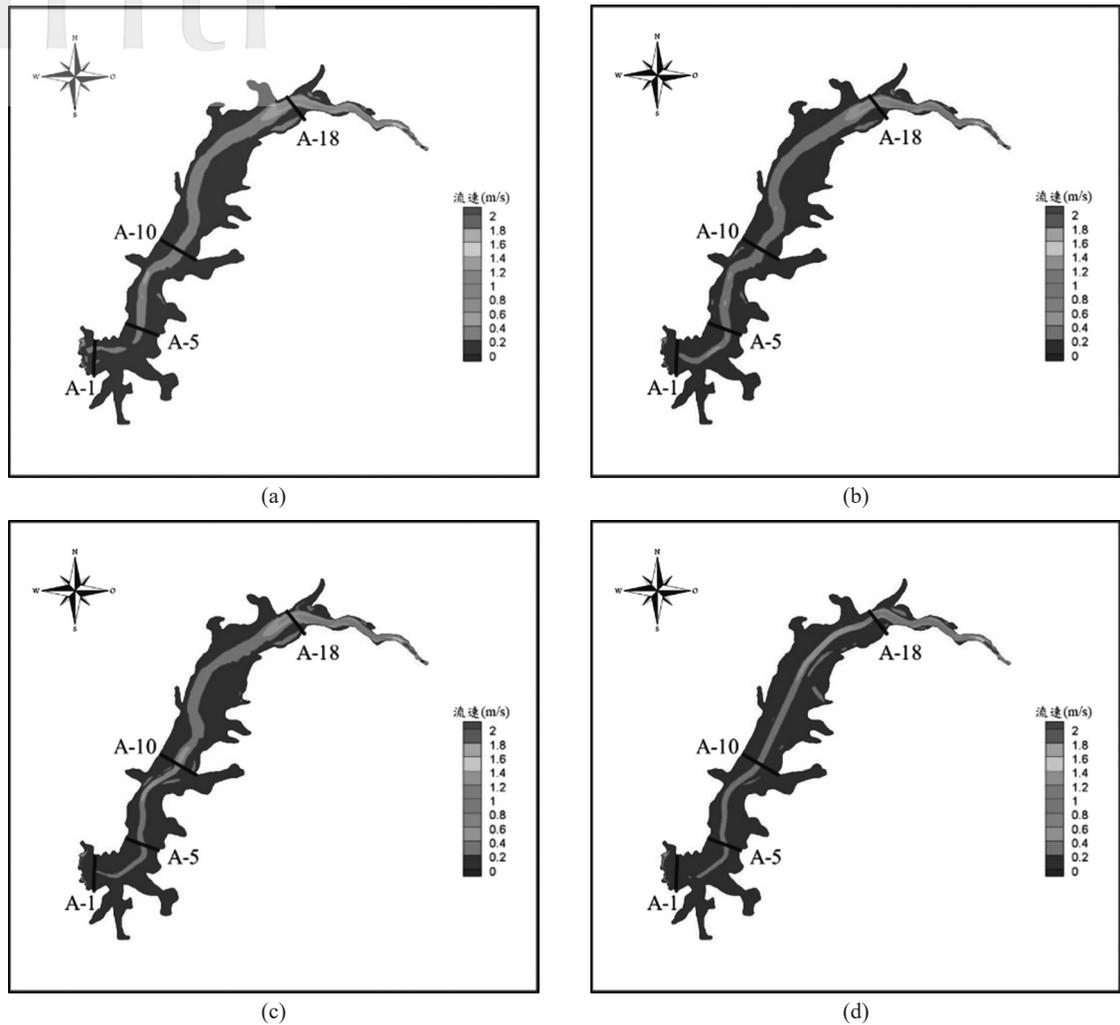


圖14 曾文水庫流速分布圖(a)案例2-1 (b)案例2-2 (c)案例2-3 (d)案例2-4

表4 矩形導流槽長度對於排砂效率之影響

項目	排砂累積量(萬噸)	排砂效率比(%)	排砂效率增加率(%)	泥砂濃度到達壩前的運移時間(hr)
案例1-0	19.80	6.28	0.00	5.83
案例2-1	21.30	6.76	7.64	5.83
案例2-2	20.93	6.64	5.73	5.82
案例2-3	23.46	7.44	18.47	5.48
案例2-4	32.26	10.24	63.06	4.14

隧道前之庫底建置導流槽，期望藉由颱風豪雨防洪運轉時期，進行水庫防淤操作時，可加強颱風期間庫底排砂設施之水力排砂防淤效益，達到延長水庫壽命的目的。

本研究選用2008年蓄蜜颱風及2013年蘇力颱

風做為2DLAM數值模式之檢定驗證案例，由模擬結果可知，模擬值於漲水段及尖峰泥砂濃度與壩前實測平均值之趨勢相符，但退水段之模擬結果仍有改進空間，因此本研究透過二維底部孔口及三維底部孔口公式進行出流泥砂濃度推估，結

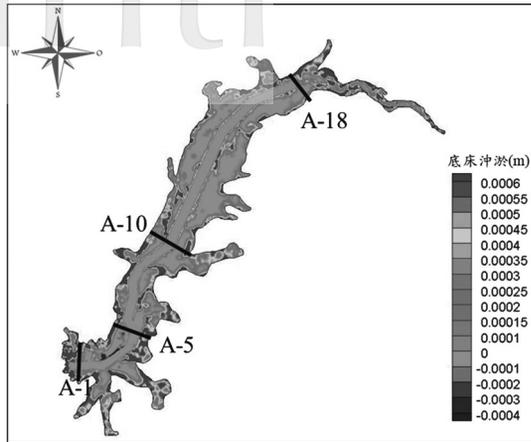


圖15 曾文水庫底床沖淤圖(案例2-4)

果於退水段有下降的趨勢，較能符合退水段渾水潭下降之趨勢，因此未來能應用於修正2DLAM數值模式於退水段模擬結果之不足，但是整體而言，2DLAM數值模式仍可應用於探討建置防淤隧道前後之庫底導流槽，對於水力排砂防淤效益的研究。

2DLAM數值模式經由檢定驗證後，模式的參數設定更加合適，因此本研究運用庫底導流槽概念，加強防淤隧道排砂效益並探討防淤隧道排砂效率的變化。由結果可知設置不同幾何特性的庫底導流槽，對於水力排砂防淤的效益也不同，並可由模擬結果圖觀察入庫高濃度渾水於庫區中之運移及平面上的變化，得到以下結論，包含當庫底導流槽寬度越寬時，曾文水庫防淤隧道之排砂累積量(萬噸)、排砂效率比(%)及排砂效率增加率(%)皆有逐漸增加的趨勢。當庫底導流槽深度較深時，對於排砂累積量(萬噸)、排砂效率比(%)及排砂效率增加率(%)的影響並不顯著。當導流槽之長度到達A-10以上斷面時，入庫渾水渾水流不會因長枝坑溪匯流口地形而受到影響且於導流槽上游入口處泥砂開始集中，並順利運移至防淤隧道口，可使入庫泥砂有效的排出曾文水庫。而由2DLAM數值模式之模擬結果圖顯示，當庫底導流槽越往上游延伸，使得入庫渾水異重流得以集中且沿著導流槽往壩前移動，可增加曾文水庫防淤隧道或其他底孔之排砂效率，因此最佳庫底導流槽長度預估應位於入庫渾水異重流潛入點附近。

## 致 謝

本研究承蒙國科會計畫編號NSTC 111-2221-E-005-092及MOST 111-2625-M-002-015之經費補助，經濟部水利署南區水資源局所提供之導流槽規劃、水庫防汛與泥砂濃度觀測等資料，以及國立臺灣大學水工試驗所及中興大學提供人力支援，使本研究得以完成，謹致謝忱。

## 參 考 文 獻

- 水利規劃試驗所。2020。水庫防淤管理與技術應用。經濟部水利署。
- 南區水資源局。2013。曾文水庫庫區泥砂濃度觀測站建置。經濟部水利署。
- 南區水資源局。2021。曾文水庫集水區分流隧道可行性研究。經濟部水利署。
- 南區水資源局。2022。阿公店水庫清淤策略檢討暨提升水源利用方案規劃。經濟部水利署。
- 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。碩士論文。台北：國立臺灣大學生物環境系統工程學研究所。
- Amini, A., Heller, P., De Cesare, G., and Schleiss, A.J. 2014. *Comprehensive numerical simulations of sediment transport and flushing of a Peruvian reservoir*. Reservoir Sedimentation: 211-219.
- Bradford, S. F., and Katopodes, N. D. 1999. Hydrodynamics of turbid underflows. I: Formulation and numerical analysis. *Journal of hydraulic engineering* 125(10): 1006-1015.
- Chung, S. W., and Lee, H. S. 2009. Characterization and modeling of turbidity density plume induced into stratified reservoir by flood runoffs. *Water Science and Technology* 59(1): 47-55.
- Ellison, T. H., and Turner, J. S. 1959. Turbulent Entrainment in Stratified Flow. *Journal of Fluid Mechanics* 6(3): 423-448.
- Engelund, F., and Hansen, E. 1972. A Monograph on sediment transport in Alluvial Streams. Teknisk Forlag, Copenhagen.
- Fan, J. 2008. Stratified flow through outlets. *Journal of Hydro-Environment Research* 2.1: 3-18.
- Firoozabadi, B., Farhanieh, B., and Rad, M. 2003. Hydrodynamics of two-dimensional, laminar turbid density currents. *Journal of Hydraulic Research* 41(6): 623-630.
- 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.
- Hung, M. C., Hsieh, T. Y., Wu, C. H., and Yang, J. C. 2009. Two-Dimensional Nonequilibrium Noncohesive and Cohesive Sediment Transport Model. *J. Hydraul. Eng.*, 135(5): 369-382.
- 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 the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Sedimentation and River Hydraulics Group. Denver, Colorado.
- Lai, Y. G., and Greimann, B. P. 2010. Predicting contraction scour with a two-dimensional depth-averaged model. *Journal of hydraulic research* 48(3): 383-387.
- Lai, Y. G., and Wu, K. W. 2018. A numerical modeling study of sediment bypass tunnels at Shihmen Reservoir, Taiwan. *Int. J. Hydro* 2: 72-81.
- Lai, Y. G., Huang, J., and Wu, K. 2015. Reservoir turbidity current modeling with a two-dimensional layer-averaged model. *Journal of Hydraulic Engineering* 141(12): 04015029.
- 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* 18(2): 694-705.
- Nafeela Imtiyaz. 2021. 水庫抽泥浚淤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。
- Oehy, C. D., and Schleiss, A. J. 2007. Control of Turbidity Currents in Reservoirs by Solid and Permeable Obstacles. *Journal of Hydraulic Engineering* 133(6): 637-648.
- Olsen, N.R.B. 1999. Two-dimensional numerical modelling of flushing processes in water reservoirs,” *Journal of Hydraulic Research*, 37(1): 3-16.
- Parker, G., Fukushima, Y., and Pantin, H. M. 1986. Self-accelerating turbidity currents. *Journal of Fluid Mechanics* 171: 145-181.
- Parker, G., Garcia, M., Fukushima, Y., and Yu, W. 1987. Experiments on turbidity currents over an erodible bed. *Journal of Hydraulic Research*, 25(1): 123-147.
- 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.
- Wu, 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, 2166; doi: 10.3390/w12082166
- Young, D. L., and Lin, Q. H. 2005. Two-dimensional simulation of a thermally stratified reservoir with high sediment-laden inflow. *Journal of Hydraulic Research* 43(4): 351-365.

收稿日期：2023 年 02 月 01 日  
修正日期：2023 年 03 月 23 日  
接受日期：2023 年 04 月 06 日