

應用二維數值模式分析攔河堰型式影響河道防洪及輸砂之研究

APPLICATION OF 2-D NUMERICAL MODEL ON FLOOD CONTROL AND SEDIMENT TRANSPORTATION
FOR BARRAGE TYPES

國立臺灣大學
水工試驗所
專案計畫助理研究員

李 豐 佐*
Fong-Zuo Lee

新北市政府
水利局
局長
宋 德 仁
Der-Ren Song

新北市政府
水利局河川工程科
科長

黃 茂 松
Mao-Sung Huang

中校工程顧問
股份有限公司
協理
劉 桂 南
Robert Liu

國立臺灣大學
水工試驗所
專任研究助理

劉 政 其
Cheng-Chi Liu

國立臺灣大學
環境工程學研究所
教授

闕 蓓 德
Pei-Te Chiueh

摘 要

為探討不同攔河堰型式對於河道防洪及輸砂之影響，本研究以二維數值模式(SRH-2D)建置新店溪碧潭堰上下游河段模型，納入考量全固定堰、全倒伏堰及複合堰等攔河堰改建型式，並設計常流況與 200 年重現期洪水之水文情境模擬案例。經綜合評估可知複合堰兼具全固定堰蓄水功能和全倒伏堰調節水位能力，二維模擬成果顯示主流通過複合堰時，水位較現況堰體水位有下降情形，複合堰堰體右側設置排砂道可減緩碧潭堰上游約 0.5 m 的淤積深度，但沖淤影響範圍有限，而複合堰中央的倒伏堰閘門抬升高度自 1.5 m 至 3.0 m，可改善碧潭堰上游靠右岸局部區域約 0.5~1.0 m 的淤積深度。本研究結果可作為相關管理單位碧潭堰整建工程之參考依據，以期達到防洪減淤及改善現地水域環境之目標。

關鍵詞：二維數值模式、攔河堰型式、防洪、輸砂。

* 通訊作者，國立臺灣大學水工試驗所專案計畫助理研究員
10617 台北市大安區羅斯福路四段 1 號，windleft@gmail.com

APPLICATION OF 2-D NUMERICAL MODEL ON FLOOD CONTROL AND SEDIMENT TRANSPORTATION FOR BARRAGE TYPES

Fong-Zuo Lee*

Hydrotech Research Institute
National Taiwan University

Mao-Sung Huang

Water Resources Department,
New Taipei City Government

Cheng-Chi Liu

Hydrotech Research Institute
National Taiwan University

Der-Ren Song

Water Resources Department,
New Taipei City Government

Robert Liu

C.Y.L Engineering
Consulting INC.

Pei-Te Chiueh

Graduate Institute of
Environmental Engineering
National Taiwan University

ABSTRACT

Flash-flood occurs in the river due to the rainfall the catchment area from events of typhoon and hard rain, the construction of weirs at downstream is required for regulating flow and water elevation. For analyzing the efficiency of flood control and sediment transportation of different weir types, the 2-D numerical model (SRH-2D) is established to simulate the water area of Bitan Weir in the Xindian River. The fixed type barrage, compound type barrage and lodging type barrage are discussed in this study, and the cases of normal and 200-year flood return period are simulated by SRH-2D. The assessment result shows that the compound type barrage has both the water storage function of fixed type barrage and the water elevation regulation function of lodging type barrage. The two-dimensional simulation results show that the performance of flood control is better than original one and desilting outlet on the right side of compound type barrage can reduce the silting depth of about 0.5 meter at the upstream area of Bitan Barrage, but the influence area of scouring and silting is limited. Furthermore, the uplifting height of lodging gate on the central body of compound type barrage raise from 1.5 to 3.0 meters, which can improve the silting situation and reduce of the silting depth about 0.5 to 1.0 meter at the upstream right bank of Bitan Barrage. In order to reach the goal of flood prevention and water environment improvement, the results of this study can provide useful information on management and reconstruction of Bitan Barrage.

Keywords: 2-D Numerical model, Barrage type, Flood control, Sediment transportation.

一、前言

攔河堰為建置於河道上常見水工構造物設施之一，多分布於河川中下游，其主要功能為抬升河川水位、導引上游水流及調節河川流量，堰體下游常佈設固床工以穩定河道河床，然颱風豪事件致使洪水災害，水流挾帶泥砂及懸浮物導致攔河堰堰體上下游河床發生沖刷或淤積之情形，而位於新店溪碧潭大橋下游處的碧潭堰近年來因暴雨、風災及 2015 年蘇迪勒颱風等天然災害造成新店溪水位暴漲及河川水流中漂流物衝擊造成碧潭堰堰體結構受損，損壞程度除堰體外觀已出現裂痕外，基礎亦有淘空現象，爰此新北市水利局進行碧潭堰結構受損整建修復及周圍水域環境營造之規劃。本研究參考前人於攔河堰河道流況及河床沖淤變化之相關研究成果，Shimizu and Itakura (1989)應用二維數值模式及泥砂傳輸方程式演算河床沖淤變化，劉宗和(2006)應用二維沖淤模式進行攔河堰庫區底床沖淤及溢洪道排砂模擬演算；姚嘉耀(2009)以渠槽試驗進行攔河堰下游河道沖淤影響分析及沖刷潛勢探討；廖仲達等(2011)研發具軟岩沖刷機制水平二維動床模式探討攔河堰下游底床沖淤變化；黃雅晴(2013)探討不同洪水量通過攔河堰流動型式與消能功能之關係及河床穩定性分析；林郁娟(2020)應用 SRH-2D 模式分析碧潭堰下游固床工不同配置及消能效率對河道生態環境之影響。此外，依據新北市政府水利局(2017)「碧潭堰拆除、重建、修復暨水域環境營造之可行性評估(修正後)」計畫成果可知，碧潭堰上游無法滿足 200 年重現期之水文情境且可能造成溢堤，但短延時強降雨之情境則無溢堤之現象，且其模擬之各情境一維水位與流速可提供碧潭堰修復時之參考資料，然碧潭堰河段上下游均有明顯河道彎曲之地形且堰體包含 3 座橡皮壩及 2 座固定堰，故一維模擬結果無法滿足碧潭堰橡皮壩及固定堰之修復設計所需水理條件，因此本研究採用平面二維數值模式，提供更為精確之平面水位與流場分布資訊，作為碧潭堰修復之水理參考依據，符合現地環境周全改善及防災減洪之目標；為探討碧潭堰不同改建型式對新店溪水流情形及下游河道河床沖淤之影響，本研究採用二維水理輸砂數值模式 SRH-2D (Sedimentation and River Hydraulics-2D) (Lai, 2010)為基礎，結合模式內建之 Parker (1990)輸砂公式模擬在不同攔河堰設計型式設計常流況與颱風事件流量之模擬條件，分析比較固定堰、倒伏堰及複合堰等攔河堰型式於不同水文條件情境中模擬水流現象及泥砂運移情形，期本研究成果可作為碧潭堰改建工

程設計之參考依據，規劃適用於碧潭堰之攔河堰型式，降低洪水災害於堰體帶來的風險及損害，並符合現地水域環境周全改善之目標。

二、研究區域概述

2.1 研究區域概述

本研究區域為位於淡水河流域新店溪之碧潭大橋(國道 3 號)下游處的碧潭堰，基於數值模式模擬所需水文水理模擬範圍之完整性及地形變動考量，二維數值模擬上游和下游邊界條件分別採用新 27 和新 23 號斷面，研究區域範圍如圖 1 所示。新店溪主流自模擬範圍上游新 27 斷面入流，因彎道效應水流通過新 26 斷面後，主流在約碧潭吊橋至新 25 斷面處從原本左岸偏向右岸，且於碧潭堰蓄水範圍內有多處淤砂所造成之局部淤積現象，且於碧潭堰下方有局部深潭區域，碧潭堰上下游地形及水流概況如圖 2 所示。碧潭堰係由三座橡皮壩及兩座自由溢流固定堰組成，其平面布置如圖 3 所示，其主體結構為混凝土堰，全長為 216 m，由右岸至左岸依序分別為右岸固定堰、1 號橡皮壩、2 號橡皮壩、3 號橡皮壩及左岸固定堰，5 座堰壩的底板高程依序分別為 EL.13.66、12.6、11.9、12.6、13.74 m，圖 3 顯示 1 號橡皮堰頂曲折變形且墩座有位移跡象，2 號橡皮壩溢流面變形受損嚴重，下游中央護床工流失明顯，且由橡皮壩、下游護床工損壞情形以及圖 2 主流區域分布，可知新店溪主流集中於碧潭堰於中央偏右岸區域。

2.2 碧潭堰改建型式概述

攔河堰型式依功能主要可分為固定堰及倒伏堰兩類，其目的為需可維持上游蓄水深度，亦能增加此河段之通洪能力，達到河道水域環境之防洪防淤及遊憩安全等需求，為探討分析碧潭堰在不同改建型式攔河堰模擬情境下防洪輸砂能力，本研究考量全固定堰、全倒伏堰及複合堰型式，將堰體設計及地形納入模擬地形條件中作二維水理輸砂模擬，以下就此三種攔河堰型式進行概述。

固定堰堰頂高於河床故通洪斷面面積小，排洪能力較差致使堰體上游易淤積，其堰頂高程為固定，無調節水位能力，且易造成阻水，若需排砂則需設置排砂設施配合排砂操作；倒伏堰的傾倒式閘門平時是由閘門頂溢流，洪水期間則進行防洪操作使全部閘門倒

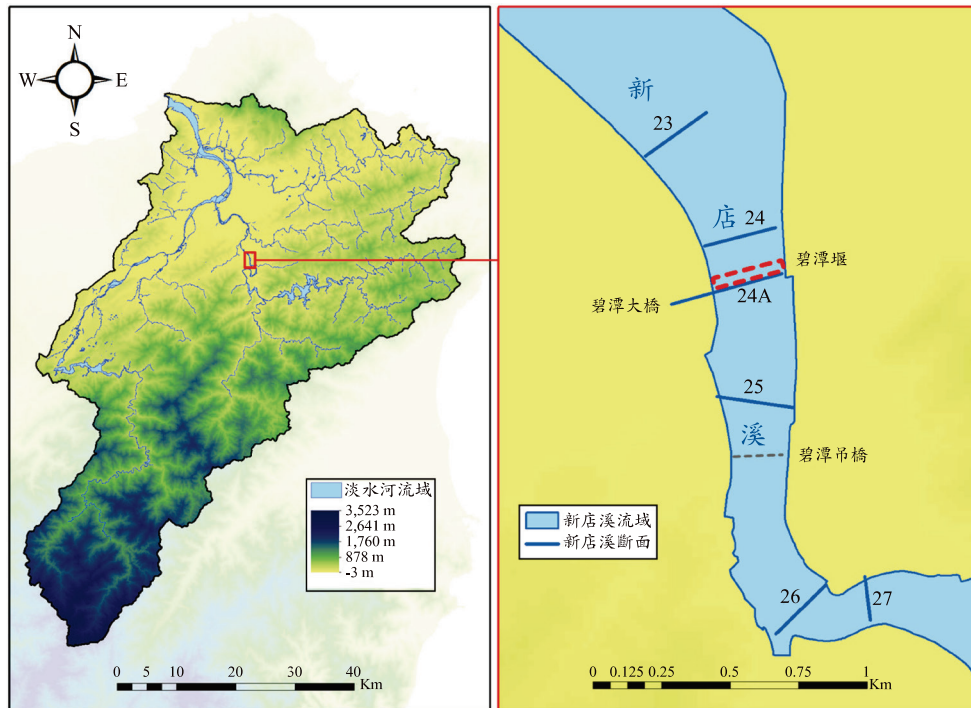


圖 1 研究區域範圍



圖 2 碧潭堰上下游地形及水流概況



圖 3 碧潭堰平面布置示意圖

伏以增加通洪斷面面積，故排洪能力優於固定堰，且閘門可視情況調整堰頂高程，調節水位能力佳，於中低流量時閘門倒伏至完全排砂之高程所需時間較長，易造成堰上游部分蓄水量流失，需利用洪水期間進行排砂操作，若河床淤積量高仍需設置排砂設施；複合堰為綜合固定堰、倒伏堰及排砂設施之工程設計，堰體左右側各設置一定長度之固定堰，中間堰體為鋼製傾倒式閘門，並於河道右岸設置排砂道，通洪能力適中，兼具固定堰穩定蓄水性質及倒伏堰閘門操作調節水位功能，河道主深槽水流可由堰體中間傾倒式閘門排砂操作排砂，而堰體左右側固定堰結構可能造成部分淤積，可搭配排砂道執行排砂作業，排砂能力適中，本研究碧潭堰堰型式方案比較如表 1 所示。

本研究除考量碧潭堰堰體現況，攔河堰型式設計為延續既有堰型改建，考量全固定堰、全倒伏堰及複合堰 3 種方案工程布置，原左右側堰位置改建為左側及右側堰體，原 1~3 號橡皮壩改建為中央堰體(分 4 區)，另有下游護床工、排砂道及魚道設施，其中排砂道及魚道設施可視不同水文情境條件，保留或取消設置狀態以進行模擬案例探討分析。全固定堰型式設計為左右側堰體及中央堰體堰頂高程 EL.13.5 m，全倒伏堰型式設計為左右側堰體及中央堰體堰頂高程皆 EL.12.2 m，複合堰型式設計為左右側堰體堰頂高程 EL.13.5 m 及中央堰體堰頂 EL.12.2 m，排砂道設施寬度約為 6.0 m，碧潭堰堰型設計型式工程布置如圖 4 所示。

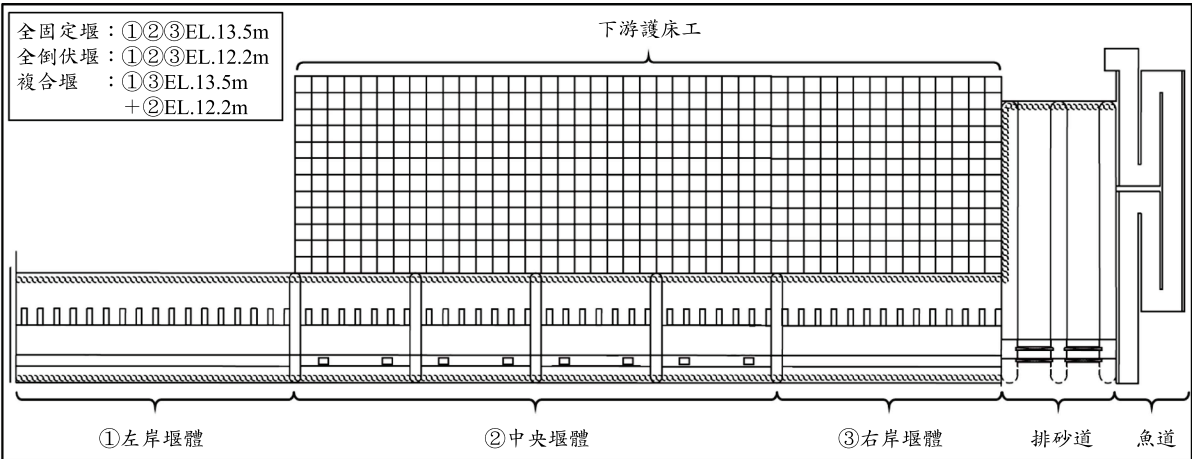


圖 4 本研究碧潭堰堰型設計型式工程布置示意圖

表 1 本研究碧潭堰堰型方案比較表

堰型式	固定堰	倒伏堰	複合堰
通洪能力	堰頂高於河床，易使堰體上游淤積，通洪斷面小。	需設置閘墩，閘門倒伏後，通洪斷面面積大。	通洪斷面面積適中。
水位調節能力	固定堰體結構無水位調節能力。	可適時調整閘門高度，調節水位能力佳。	兼具固定堰穩定蓄水性質及倒伏堰閘門操作調節水位功能。
排砂能力	易造成阻水，無法排砂，需配置排砂設施	將傾倒式閘門底部降至河床面，則排砂效果較佳，若蓄水流失量大需設置排砂道。	中間流可由傾倒式閘門進行排砂操作，固定堰淤積部分可搭配排砂道排砂
綜合評估	無機械設備提供調節水位之功能，排砂功能不佳，需另設置排砂道進行排砂作業，淤積問題較難克服。	利用油壓倒伏閘門設備系統調節水位，排砂功能較佳，但維護保養費用較高。	堰體左右側及中央處分別採用固定堰和倒伏堰型式，搭配排砂道設施排砂，可較全倒伏堰節省部分經費。

三、研究方法與原理

3.1 SRH-2D 模式簡述

二維水理輸砂模式 (Sedimentation and River Hydraulics–Two-Dimensional, SRH-2D) 為水利署水利規劃試驗所委託美國墾務局針對臺灣河川所研發之數

值模式(美國墾務局, 2008, 2.0 版)，SRH-2D 具穩定之二維演算功能，已成功應用於臺灣淡水河、新店溪、大甲溪及濁水溪流域等，因此本研究選用 SRH-2D 模式執行攔河堰案例之二維數值模擬，模擬結果可研擬新店溪碧潭堰排砂閘門淤積改善及作為防淤操作之參考依據。

SRH-2D 係由流域水理輸砂模式 (Sedimentation and River Hydraulics – Watershed, SRH-W) 演進而來，可計算二維動態的波動方程式，即水深方向平均的 Venant 方程式，除由 SRH-W 改進部份演算特性及功能，亦著重於河川的二維建模。就建模能力而言 SRH-2D 可以與現有的模型結合，例如 RMA-2 (U.S. Army Corps of Engineers, 1996) 及 MIKE 21 (Danish Hydraulic Institute, 1996) 等，SRH-2D 在網格建置的要求上相當有彈性，結構網格、非結構網格及混合網格皆可使用。

SRH-2D 模式常見的適用範圍：

1. 河川之主河道流體計算，包含單一或多數流入主支流。
2. 水庫流況計算。
3. 洪水溢淹圖繪製。
4. 水工結構物附近之水理計算。

其水流控制方程式如下所示：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU}{\partial x} + \frac{\partial hV}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots(1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hU}{\partial t} + \frac{\partial hUU}{\partial x} + \frac{\partial hVU}{\partial y} = \\ \frac{\partial hT_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{xy}}{\partial y} - gh \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + D_{xx} + D_{xy} \end{aligned} \dots\dots\dots(2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hV}{\partial t} + \frac{\partial hUV}{\partial x} + \frac{\partial hVV}{\partial y} = \\ \frac{\partial hT_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{yy}}{\partial y} - gh \frac{\partial z}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + D_{yx} + D_{yy} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(3)$$

式中 t 為時間； h 為水深； U 為 x 方向之水深平均流速分量； v 為 y 方向之水深平均流速分量； g 為重力加速度； T_{xy} 、 T_{yy} 為水深平均紊流應力； D_{xx} 、 D_{xy} 、 D_{yx} 、 D_{yy} 為水深平均延散項； z_b 為底床高程； ρ 為密度； τ_{bx} 、 τ_{by} 為底床剪應力。

其中，紊流模式主要依據 Boussinesq 方程式：

$$T_{xx} = 2(\nu + \nu_t) \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{2}{3}k \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$T_{xy} = (\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$T_{yy} = 2(\nu + \nu_t) \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{2}{3}k \quad \dots\dots\dots(6)$$

ν 為水的運動黏滯度； ν_t 為渦流黏滯度； k 為紊流動能。紊流模式用來計算紊流動能，Rodi(1993)使用了兩種紊流模式，分別為深度平均拋物線模式(Depth-averaged parabolic model)與 $K-\varepsilon$ (K-epsilon) 紊流模式。在拋物線模式中， $\nu_t = C_t U_* h$ ， U_* 為底床摩擦速度，常數 C_t 範圍介於 0.3 至 1，在 SRH-2D 中常數 C_t 默認為 0.7，此常數值可自行修改。假如使用 $K-\varepsilon$ 模式，紊流黏滯度以 $\nu_t = C_\mu K^2 / \varepsilon$ 計算。兩個方程式解算式如下：

$$\begin{aligned} \frac{\partial hk}{\partial t} + \frac{\partial hUk}{\partial x} + \frac{\partial hVk}{\partial y} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + P_h + P_{kb} - h\varepsilon \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial hU\varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial hV\varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_h + P_{\varepsilon b} - C_{\varepsilon 2} h \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(8)$$

Rodi 在 1993 年使用下列定義與係數：

$$P_h = h\nu_t \left[2 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right] \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$P_{kb} = C_f^{-1/2} U_*^3; \quad P_{\varepsilon b} = C_{\varepsilon f} C_{\varepsilon 2} C_\mu^{1/2} C_f^{-3/4} U_*^4 / h \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$\begin{aligned} C_\mu = 0.09, \quad C_{\varepsilon 1} = 1.44, \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92, \\ \sigma_k = 1.3, \quad C_{\varepsilon f} = 1.8 \sim 3.6 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(11)$$

其中 P_{kb} 與 $P_{\varepsilon b}$ 為用來計算基於在均勻流之底床摩擦所產生紊流動能與損失。

河道動床沖淤之一般沖刷主要源自於懸移質與推移質之河床粒料傳輸，為模擬河川中粗粒料與細粒料之運移情形，本研究於 SRH-2D 二維數值模式採用 Parker 之推移質公式(1990)，進行動床模擬以及一般沖刷深度之計算，SRH-2D 動床模擬中對於泥砂粒徑為第 k 類之傳輸方程式表示如下：

$$\begin{aligned} \frac{q_{t,k}^* g(s-1)}{(\tau_b / \rho)^{1.5}} = \frac{Y_g \left[4\pi (d_k / 2)^3 / 3 \right] / \rho_o g(s-1)}{(\tau_b / \rho)^{1.5}} \quad \dots\dots\dots(12) \\ = P_{ak} G(\phi_k); \quad \phi_t = \frac{\theta_k}{\theta_r} \left(\frac{d_k}{d_{50}} \right)^\alpha \end{aligned}$$

$$G = \begin{cases} 11.933(1 - 0.853/\phi_t)^{4.5} & \phi > 1.59 \\ 0.00218 \exp[14.2(\phi_t - 1) - 9.28(\phi_t - 1)^2], & 1.0 \leq \phi \leq 1.59 \dots\dots\dots(13) \\ 0.00218\phi_t^{14.2} & \phi < 1.0 \end{cases}$$

$q_{t,k}^*$ 為單位寬輸砂量； g 為重力加速度； $s = \rho_s / \rho - 1$ ； ρ 與 ρ_s 為水與泥砂之密度； Y_g 為一般沖刷單位寬； ρ_o 為土壤孔細率； P_{ak} 為 k 類泥砂粒徑在床面之容積率； τ_b 為河床剪應力； $\theta_k = \tau_b / [\rho g(s-1)d_k]$ 代表 k 類泥砂之 Shield 參數； θ_r 為 Shield 參數，值範圍為 0.03 ~ 0.08； d_k 為 k 類泥砂直徑； d_{50} 為底床混合粒料之中值粒徑； α 為曝露因數，值範圍為 0.2 ~ 0.9；本研究 θ_r 及 α 值分別採用 0.04 和 0.65。

3.2 邊界條件概述(含上下游邊界條件及粒徑說明)

基於數值模式模擬所需之上下游邊界條件完整性及地形變動考量，本研究二維數值模式之模擬範圍採用新店溪 27 號及 23 號斷面作為上游及下游邊界。

考量碧潭堰現況、全固定堰、全倒伏堰、複合堰、2018 年新測碧潭堰上游及下游局部地區地形為模擬條件，二維數值模式模擬之上、下游邊界條件可採用新北市政府水利局(2017)「碧潭堰拆除、重建、修復暨水域環境營造之可行性評估(修正後)」計畫 27 號斷面

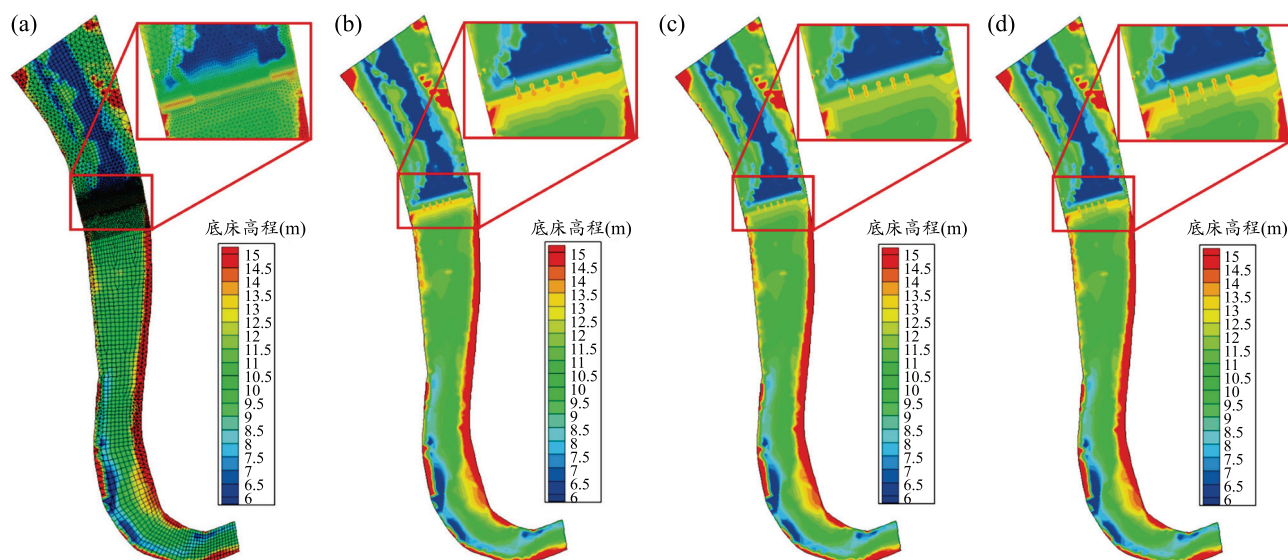


圖 5 二維模擬碧潭堰規劃設計(a)現況及網格地形(b)全固定堰配置及地形(c)全倒伏堰配置及地形(d)複合堰配置及地形

表 2 碧潭堰二維定床模擬檢定驗證

模擬事件	2013 年潭美颱風	2015 年蘇迪勒颱風	2016 年梅姬颱風
模擬流量(cms)	1298.65	5242.00	3205.79
實測水位(m)	15.04	16.97	16.25
SRH-2D (m)	15.11	17.05	16.22
誤差值(m)	+ 0.07	+0.08	-0.03

及 23 號斷面之模擬結果；動床模擬所需粒徑分佈及河道曼寧值(n)分別參考經濟部水利署十河局(2015; 2017)「新店溪中上游段堰壩操作機制對於洪水影響分析研究」及「淡水河新店溪治理規劃檢討(覽勝大橋至碧潭堰)」，在新店溪 27 號至 23 號斷面間，中值粒徑 d_{50} 採用 4.9 mm，而曼寧值則採用 0.038。

根據 2004 ~ 2015 年縱向河床溪豁線圖及水利構造物位置，以及新北市政府水利局(2017)「碧潭堰拆除、重建、修復暨水域環境營造之可行性評估(修正後)」計畫成果，本研究分別針對現況、全固定堰、全倒伏堰及複合堰進行二維網格地形編製，現況及三種堰型方案之二維模擬碧潭堰規劃設計網格及地形如圖 5 所示。

四、研究結果與分析

4.1 二維數值模式檢定驗證

本研究應用二維數值模式針對三場歷史颱風豪雨事件實際紀錄情況進行模式檢定驗證，檢定驗證分別

為 2013 年潭美颱風、2015 年蘇迪勒颱風及 2016 年梅姬颱風(如表 2 所列)，檢定驗證記錄採用經濟部水利署碧潭堰上游實測颱風期間碧潭橋之洪水水位，模擬上游邊界入流量為直潭壩實際放流量，模擬下游水位採用正常水深，本研究所檢定驗證之三場歷史颱風事件皆以現況堰體地形進行二維定床模擬，根據二維數值模式檢定驗證之模擬水位成果與水利署碧潭堰上游實測水位之比較，可知二維數值模式模擬值與實測值之差異約介於 0.03 至 0.08 m 之間，誤差百分比 < 1 %。

4.2 攔河堰型式對於防洪水位之影響

本研究利用已完成檢定驗證之二維模式，針對現況、全固定堰、全倒伏堰及複合堰堰型式進行方案防洪比較，以 SRH-2D 進行碧潭堰河段二維模式水力定床演算，模擬 200 年重現期洪水流量(9,600 cms)水文情境，分析現況、全固定堰、全倒伏堰及複合堰等 4 種案例，碧潭堰不同設計型式於上游斷面(24A 斷面)之二維數值模式水力成果如表 3 所示。

本研究針對不同堰型式在 200 年重現期洪水(9,600 cms)之防洪分析比較，由二維模式 SRH-2D 之

表 3 碧潭堰不同設計型式之二維水理成果比較表

碧潭堰上游 (24A 斷面)	200 年 重現期流量 (cms)	現況		全固定堰		全倒伏堰		複合堰	
		水位 (m)	流速 (m/s)	水位 (m)	流速 (m/s)	水位 (m)	流速 (m/s)	水位 (m)	流速 (m/s)
SRH-2D	9,600	19.03	7.35	19.12	7.93	18.33	7.24	18.92	7.74

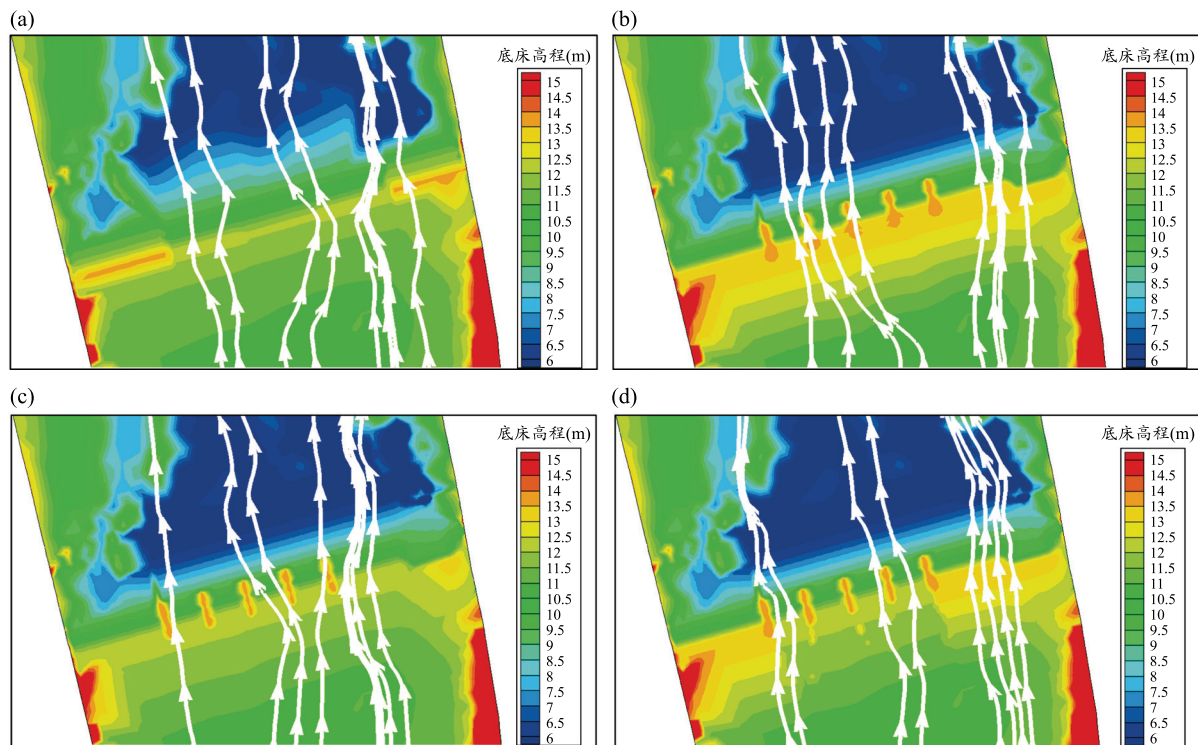


圖 6 二維定床模擬碧潭堰河段 200 年重現期洪水流量(9,600 cms)之流線流況(a)現況(b)全固定堰配置(c)全倒伏堰配置(d)複合型配置

200 年重現期洪水流量(9,600 cms)水文情境可知，現況及 3 種堰型式方案之 200 年重現期洪水流量模擬結果如圖 6 所示。根據二維水理定床模擬結果可知，在現況的模擬情境下，水流流線通過 26 號斷面彎道後，主流向偏向右岸，然靠近碧潭堰處由於橡皮壩損壞及底部高程較低影響，主流通過碧潭堰中央三座橡皮壩。在全固定的模擬堰情境下，主流通過全固定堰中央偏左岸處及排砂道中央處，流速及水位與現況相比並無明顯變化；在全倒伏堰的模擬情境下，主流通過全倒伏堰中央偏右岸處及排砂道偏左岸處，水位較現況堰體水位有下降情形，流速有些微增加；在複合堰的模擬情境下，主流通過複合堰中央處及排砂道中央處，水位較現況堰體水位有下降情形，流速有些微增加。

由全固定堰與現況二維模擬成果比較可知，全固定堰在碧潭堰下游對水位與流速並無影響，碧潭堰上游則全固定堰較現況堰體水位有上升情形，流速則些微下降。；由全倒伏堰與現況二維模擬成果比較可知，

全倒伏堰在碧潭堰下游對水位與流速並無影響，碧潭堰上游則全倒伏堰較現況堰體水位有下降情形，流速有些微增加，效果最優；由複合堰與現況二維模擬成果比較可知，複合堰在碧潭堰下游對水位與流速並無影響，碧潭堰上游則複合堰較現況堰體水位有下降情形，流速有些微增加。就不同堰型式對於防洪水位之影響而言，全固定堰防洪效果較現況為低，效果最差；全倒伏堰防洪效果較現況為佳，效果最優；複合堰防洪效果較現況略佳，效果次之。

4.3 排砂道對於攔河堰上下游底床變動之影響

本研究於碧潭堰右岸處新增設置排砂道設施，其寬約為 6 公尺，於二維水理輸砂數值模式模擬全固定堰、全倒伏堰及複合堰配置方案加入右岸排砂道規劃設計，以複合堰配置為例，模擬結果如圖 7 所示，在

200 年重現期洪水流量(9,600 cms)水文情境下,新設排砂道略為減緩新 25 斷面以下靠碧潭堰右岸區域之淤積;在常流量(2.15 cms)情境下,新設排砂道設施雖然可減緩碧潭吊橋以下主深槽區域之淤積量,然流量低輸砂量不大,影響範圍有限。

有鑑於排砂道規劃設計輸砂效用有限及工程成本之考量,本研究亦考量取消排砂道設置方案,於模式中移除排砂道設施後,加長全固定堰、全倒伏堰及複合堰方案整體堰體寬度,並於堰體右側設置 EL.12.2 m 之閘門,另增加堰下游護床工區域之寬度。以取消排砂道設置之新方案於二維水理輸砂模式,進行全固定堰、全倒伏堰及複合堰方案 200 年重現期流量(9,600 cms)及常流量(2.15 cms)之動床模擬,上述三配置方案二維水理輸砂模擬成果如圖 8 所示。

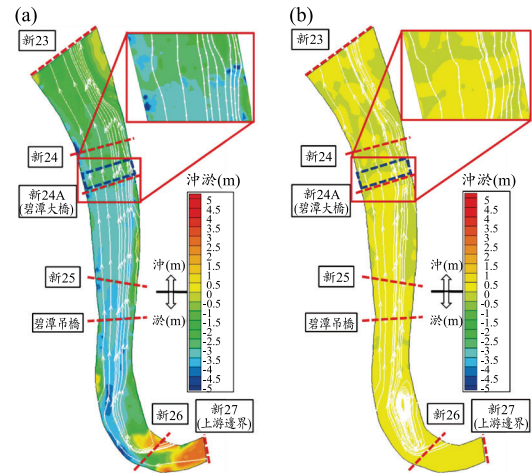


圖 7 二維模擬碧潭堰複合堰方案(有排砂道設施)動床模擬之流場流線及底床高程沖淤變化(a)9,600 cms ; (b)2.15 cms

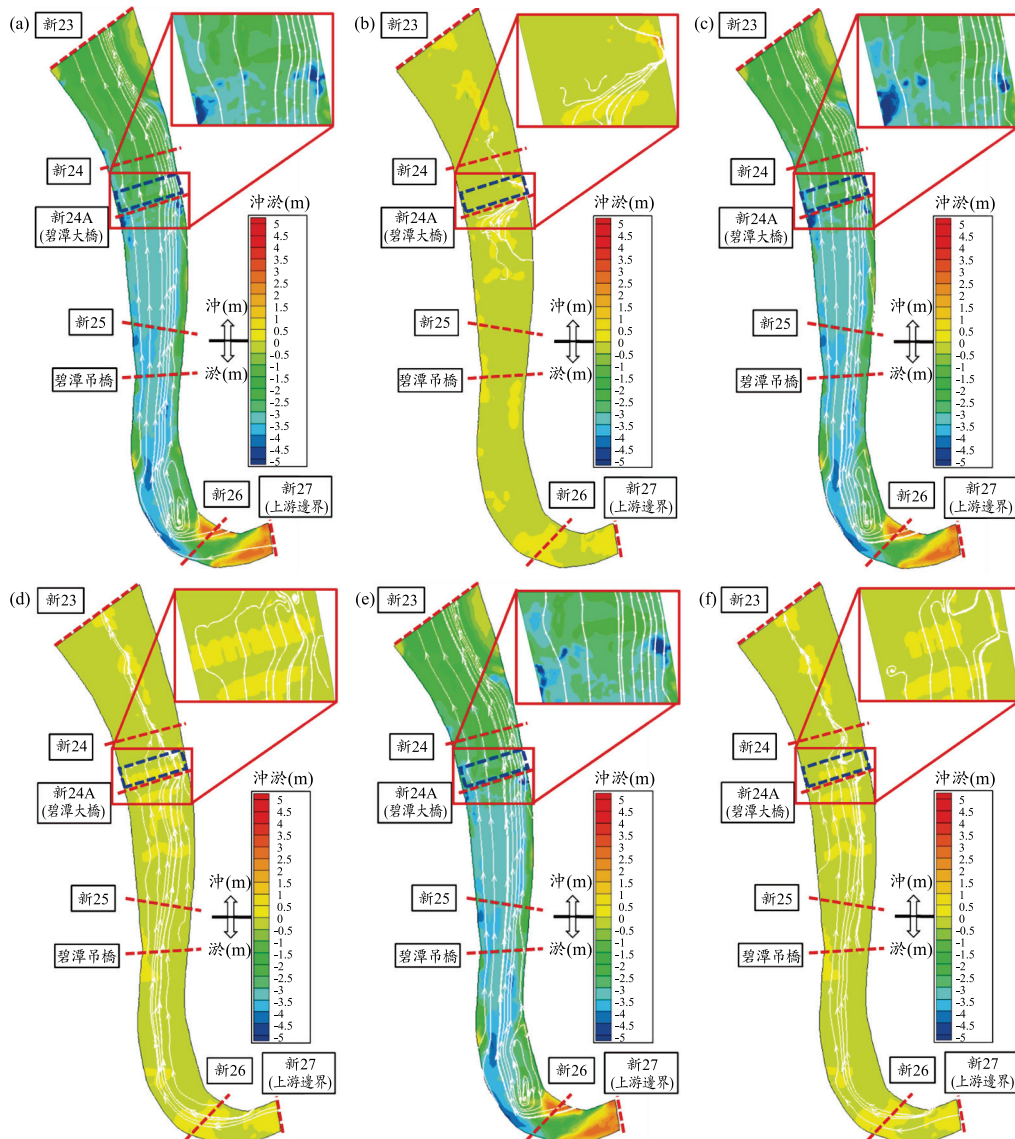


圖 8 二維模擬碧潭堰方案(無排砂道設施)動床模擬之流場流線及底床高程沖淤變化(a)全固定堰 9,600 cms ; (b)全固定堰 2.15 cms ; (c)全倒伏堰 9,600 cms ; (d)全倒伏堰 2.15 cms ; (e)複合堰 9,600 cms ; (f)複合堰 2.15 cms

由圖 8 可知，在無排砂道設置後 200 年重現期洪水流量(9,600 cms)的模擬情境下，全固定堰、全倒伏堰及複合堰方案之主流皆通過碧潭堰中央偏右處，與有排砂道設置的模擬結果比較(圖 7(a))，新 25 斷面以上沖淤情形大致相同，但在堰體上游區域發生較明顯淤積情形；在取消排砂道設置後常流量(2.15 cms)的模擬情境下，與有排砂道設置的模擬結果比較(圖 7 (b))，全固定堰之主流通過碧潭堰右側閘門處，全倒伏堰及複合堰之主流通過堰體中央偏右及右側閘門處，24A 號斷面(碧潭大橋)上下游的淤積區域皆有增加，整體淤積厚度約為 0.5 m。

觀察無排砂道設置方案於二維水理輸砂數值模式反應碧潭堰上下游沖淤情形之模擬成果，當流量大時，無排砂道設置對新 25 斷面上游幾乎無影響，但在碧潭堰堰體上游，三配置方案皆發生淤積增加情形，其中複合堰方案淤積區域及淤積深度較全固定堰及全倒伏堰小；當流量小時，全固定堰方案之主流集中於右側閘門，而全倒伏堰及複合堰方案主流分布較均勻。綜合取消排砂道設置之三配置方案模擬成果，其中以複合堰的流況較佳，水流對堰體結構影響較小，而碧潭堰體上游約 80 m 範圍內之淤積深度，較設置排砂道之情境約增加 0.5 m，因此本研究建議在取消排砂道設置後，可針對堰體上游約 80 m 範圍內之淤積區域搭配浚渫或是路挖方式進行處理，亦可節省原擬定排砂道設置之成本費用。

4.4 倒伏堰抬升高度對於攔河堰上下游底床變動之影響

本研究倒伏堰堰體抬升高度對排砂效能之影響，因此本研究於二維水理輸砂數值模式針對複合堰之中央堰體的倒伏堰部份設計四種不同堰體高程，進行常流量(2.15 cms)及 200 年重現期洪水流量(9,600 cms)之動床模擬，倒伏堰 4 種抬升高度對應堰頂高程如表 4 所示，而倒伏閘門抬升及倒伏運作示意如圖 9 所示。

因在常流量(2.15 cms)情境下流量較小，倒伏堰堰體 4 種不同高程之底床模擬成果並無差異，因此本章節主要探討在 200 年重現期流量(9,600 cms)情境下，複合堰方案之四種不同倒伏堰堰體高度對排砂效能之

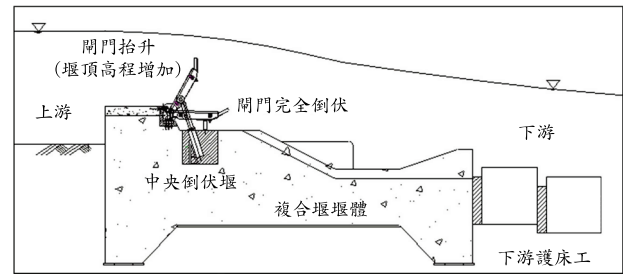


圖 9 複合堰方案堰體剖面及中央倒伏堰運作示意圖

影響，二維模擬成果如圖 10 所示。在複合堰配置中四種不同倒伏堰堰體高程(寬約 85 m)在二維水理輸砂數值模式反應碧潭堰上游之沖淤情形之模擬成果，四種情境之主流皆分布於碧潭堰中央偏右側，亦皆在碧潭堰上游發生淤積情形，不同倒伏堰抬升高度在倒伏堰堰體左側至固定堰堰體右側處(約 130 m)，於碧潭堰上游淤積影響範圍約為 80 m，如圖 9 黑虛線框所示。

觀察發生淤積情形區域，在倒伏堰堰體抬升高度 3.0 m 情境下，於四種不同倒伏堰堰體高程中有較小的淤積深度及面積；而在倒伏堰體抬升高度 1.5 m 情境下，於四種不同倒伏堰堰體高程中有較大的淤積深度及面積。倒伏堰抬升高度自 1.5 m 至 3.0 m 的變化過程中，改善了碧潭堰上游 80 m 範圍內局部區域約 0.5 ~ 1.0 m 之淤積深度，且改善較明顯區域偏向河道中央左側。

然而因為目前倒伏堰閘門設計抬升高度普遍採用 1.5~2.0 m(新北市政府水利局, 2019)，以及考量閘門尺寸過大所造成之經費成本及維運風險提高、淤積深度與面積改善程度有限，以及河床地形沖淤改變可能過劇進而影響上游橋梁穩定性等因素，故本研究建議在複合堰方案(無排砂道)中採用倒伏堰堰體倒伏堰抬升高度 2.0 m 之規劃設計，在較佳的排砂效能情況下，可節省在碧潭堰堰體上游 80 m 範圍內浚渫及路挖等工程成本費用。

五、結論

為探討不同堰型規劃設計是否能改善碧潭堰區域之流況及提升排砂效用，本研究首先針對現況、全固定堰、全倒伏堰及複合堰設計進行方案防洪比較，以既有二維數值模式(HEC-RAS)水理成果對檢定及驗證二維水理輸砂模式(SRH-2D)之準確性，二維模式定床模擬案例包含 200 年重現期洪水流量(9,600 cms)及常流量(2.15 cms)之水文情境，分析現況及上述三種堰型之二維定床模擬成果，就防洪效果與現況比較，全固定堰

表 4 複合堰方案中央堰體倒伏堰抬升高程及對應堰頂高程

中央倒伏堰 抬升高度(m)	1.5	2.0	2.5	3.0
複合堰堰體 堰頂高程(m)	12.0	11.5	11.0	10.5

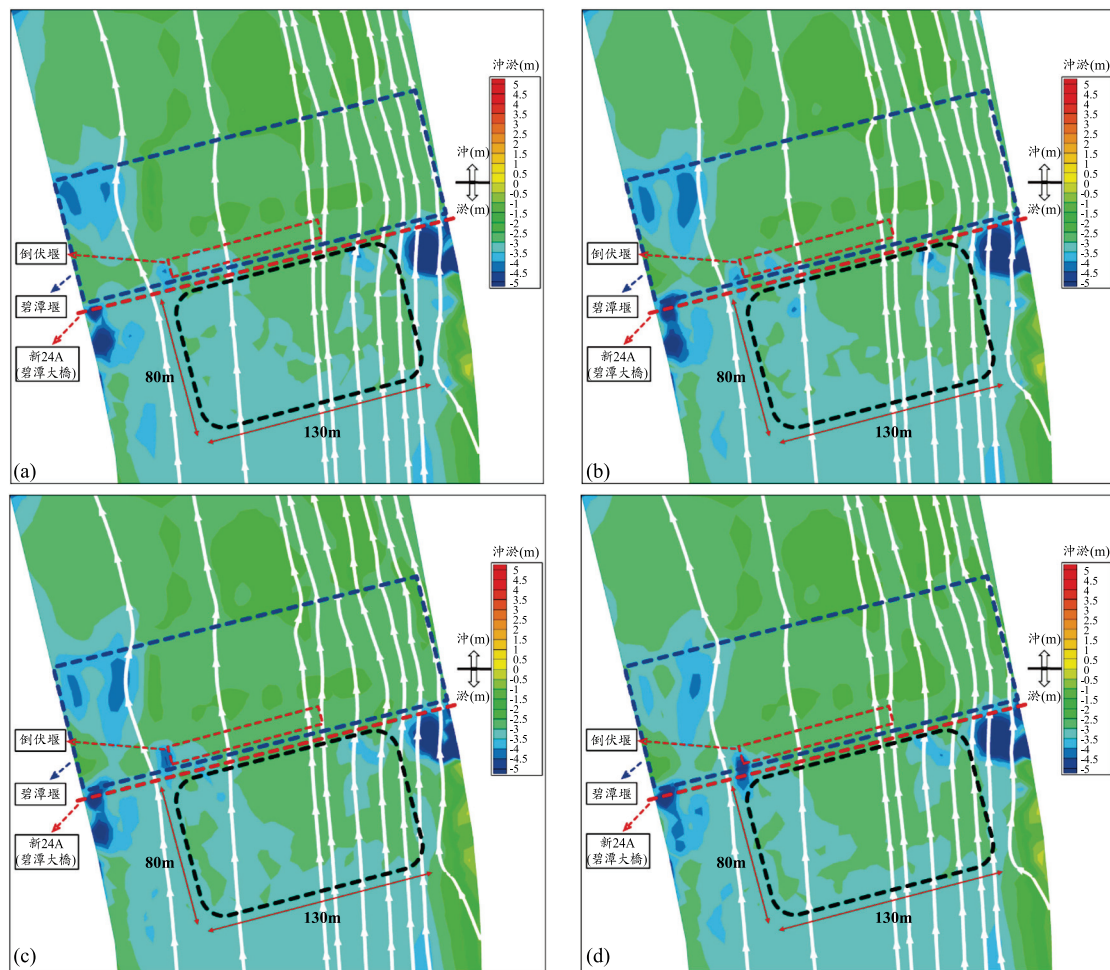


圖 10 二維動床模擬碧潭堰複合堰方案倒伏堰部分不同抬升高高度之流線及底床高程沖淤變化(a)抬升 1.5 m ; (b)抬升 2.0 m ; (c)抬升 2.5 m ; (d)抬升 3.0 m

效果最差，複合堰效果次之，全倒伏堰效果則最佳。

為分析碧潭堰右岸處設置排砂道於不同堰型之適用性，本研究針對全固定堰、全倒伏堰及複合堰進行方案排砂道排砂效用比較，以 SRH-2D 之定床模式和動床模式各模擬 200 年重現期洪水流量 (9,600 cms) 及常流量 (2.15 cms) 之水文情境，分析三種堰型之二維定床模擬成果，設置排砂道雖對主流影響範圍有限 (靠近排砂道入流口上游約 30 m 處)，然可將主流方向由河道中央處導引致排砂道區域。分析於三種堰型右岸新設排砂道之二維動床模擬成果，排砂道設置可減緩碧潭堰上游靠右岸的沖淤區域，但影響範圍有限 (碧潭堰至新 25 斷面右岸處)。

有鑑於排砂道規劃設計排砂效用有限及工程成本之考量，本研究亦以 SRH-2D 模擬無排砂道設置方案，於二維模式中加長全固定堰、全倒伏堰及複合堰之右側寬度，於堰右側設置 EL.12.2 m 之閘門，另增加堰下游鼎塊重置區域之寬度。分析於三種堰型右岸無排砂道設置之二維動床模擬成果，無排砂道設置碧潭堰

體上游約 80 m 範圍內之淤積深度，較有排砂道設置之水文情境約增加 0.5 m。

本研究進一步探討取消排砂道設置後，複合堰方案中倒伏堰部分不同抬升高高度之排砂效用，於二維模式中設定四種倒伏堰抬升高高度 (1.5、2.0、2.5 及 3.0 m) 並進行動床模擬，分析上述複合堰中倒伏堰四種抬升高高度之二維動床模擬成果，可知倒伏堰抬升高高度自 1.5 m 至 3.0 m 的變化過程中，改善了碧潭堰上游 80 m 範圍內局部區域約 0.5 ~ 1.0 m 之淤積深度，且改善較明顯區域偏向河道中央左側，亦可節省上游 80 m 範圍內浚淤及路挖等工程成本費用。

綜上述二維模擬成果之水文水理分析及工程成本之考量，本研究優選複合堰方案，取消堰體右岸排砂道設置，倒伏堰抬升高高度採用 2.0 m (堰體高程 11.5 m)，並建議可搭配浚淤、路挖等方式改善碧潭堰上游沖淤區域，以維持碧潭堰水體體積及水深，本研究二維水理輸砂模式之模擬方案及水文水理分析綜合整理如表 5 所示。

表 5 本研究二維模擬成果分析綜合整理

方案探討		攔河堰型式	模式	流量(cms)	方案分析
攔河堰型式對於防洪水位之影響		全固定堰 全倒伏堰 複合堰	定床 動床	1. 9,600 2. 2.50	與現況比較，全固定堰防洪效果最差，複合堰次之，全倒伏堰防洪效果最佳。
排砂道對於攔河堰上下游底床變動之影響	有排砂道設施	全固定堰 全倒伏堰 複合堰	定床 動床	1. 9,600 2. 2.15	排砂道可減緩碧潭堰上游靠右岸的沖淤區域，但影響範圍有限(碧潭堰至新 25 斷面右岸處)。
	無排砂道設施	全固定堰 全倒伏堰 複合堰	動床	1. 9,600 2. 2.15	碧潭堰體上游沖淤區域(約 80 m 範圍內)較設置排砂道之情境約增加 0.5 m 淤積深度。
倒伏堰抬升高度對於攔河堰上下游底床變動之影響		複合堰	動床	1. 9,600 2. 2.15	倒伏堰抬升高度自 1.5 m 至 3.0 m，改善碧潭堰上游局部區域約 0.5 ~ 1.0 m 之淤積深度(約 80 m 範圍內)，且改善較明顯區域偏向河道中央左側。

誌謝

本研究承蒙新北市政府水利局及科技部(MOST 109-2625-M-002-001)經費補助，美國墾務局提供 SRH-2D 數值模式，以及國立臺灣大學水工試驗所和土木工程學系提供人力協助，特此致謝。

參考文獻

1. Danish Hydraulic Institute "MIKE21 hydrodynamic module users guide and reference manual," Trevose, Pa, USA (1996).
2. Lai, Y. G., "Two-Dimensional Depth-Averaged Flow Modeling with an Unstructured Hybrid Mesh," *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(1), 12-23 (2010).
3. Parker, G. "Surface-based bed load transport relation for gravel rivers," *J. Hydraulic Research*, 28(4), 417-436 (1990).
4. Rodi, W., "Turbulence models and their application in hydraulics," CRC Press, Germany (1993).
5. Shimizu, Y. and Itakura, T., "Calculation of Bed Variation in Alluvial Channels," *J. Hydraulic. Eng.*, 115(3) 367-383 (1989).
6. SRH-2D (2008) "Theory and User's Manual," version 2, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service Center.
7. U. S. Army Corps of Engineers "Users' guide to RMA2-Version 4.3," Waterway Experiment Station, Hydraulic laboratory, Vicksburg, USA (1996).
8. 林郁娟，「消能效率與生物棲地對最佳化固床工配置影響之研究」，碩士論文，國立臺灣大學土木工程學系研究所，2020。
9. 姚嘉耀，「攔河堰對河道沖淤影響之研究—以集集攔河堰為例」，博士論文，國立中興大學土木工程學系研究所，2009。
10. 黃雅靖，「攔河堰消能成效對河床及河岸穩定之影響」，碩士論文，逢甲大學土木工程學系研究所，2013。
11. 新北市政府水利局，「碧潭堰拆除、重建、修復暨水域環境營造之可行性評估(修正後)」，2017。
12. 新北市政府水利局，「碧潭堰整建工程委託設計技術服務」，2019。
13. 經濟部水利署第十河川局，「新店溪中上游段堰壩操作機制對於洪水位影響分析研究(2/2)」多采工程顧問有限公司，2015。
14. 經濟部水利署第十河川局，「淡水河新店溪治理規劃檢討(覽勝大橋至碧潭堰)」，2017。
15. 廖仲達、葉克家、陳春宏，「二維軟弱岩盤河道冲刷模式之研發與應用」，中國土木水利工程學刊，第二十三卷，第二期，237-244，2011。
16. 劉宗和，「集集攔河堰底床沖淤與排砂之二維數值模擬之研究」，博士論文，國立成功大學水利及海洋工程學系研究所，2006。

收稿日期：民國 109 年 12 月 31 日
修正日期：民國 110 年 04 月 12 日
接受日期：民國 110 年 04 月 23 日