

# 應用水工模型試驗探討不同防砂壩建置對楊岸溪及北港溪 匯流水砂運動之影響

詹勳全<sup>(1)</sup> 林毓洲<sup>(1)</sup> 洪嘉駿<sup>(1)</sup> 洪思維<sup>(1)</sup> 許文奕<sup>(1)</sup> 林柏璋<sup>(1)\*</sup>

## 摘要

北港溪支流之楊岸溪上游崩塌地仍存在大量土砂，未來遭遇豪大雨事件可能伴隨溪水大量下移，堆積於匯流口形成土砂災害，因此如何有效攔阻土砂為解決匯流口土砂災害之重要課題。本研究透過木材的切割及組立，建構出北港溪及楊岸溪匯流口之水工模型，用以分析原始河道、鋼管壩方案及傳統壩方案遭遇50年重現期洪水時之水砂運動情況，探討最佳的設計方案作為未來規劃設計之參考。

(關鍵詞：水工模型、防砂壩、流場、土砂運移)

## Using Hydraulic Model to Analyze the Effects of Different Check Dam Configurations on Flow and Sediment Transport at the Confluence of Yang-An and Beigang Streams

*Hsun-Chuan Chan<sup>(1)</sup> Yu-Zhou Lin<sup>(2)</sup> Chia-Chun Hung<sup>(3)</sup>*

*Sz-wei Hung<sup>(4)</sup> Wen-Yi Hsu<sup>(5)</sup> Po-Wei Lin<sup>(6)\*</sup>*

Professor<sup>(1)</sup> PhD candidate<sup>(2)</sup>,Master<sup>(3)</sup>, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taiwan

Master<sup>(4)</sup> ,Master<sup>(5)</sup>, Nantou Branch, Forestry and Nature Conservation Agency

## ABSTRACT

A large amount of sediment remains in the upstream landslide area of the Yang-An Stream, a tributary of the Beigang Stream. During future extreme rainfall events, this sediment could be carried downstream and accumulate at the confluence, potentially causing sediment-related disasters.

<sup>(1)</sup> 國立中興大學水土保持學系 教授

<sup>(2)</sup> 國立中興大學水土保持學系 博士生

<sup>(3)</sup> 國立中興大學水土保持學系 碩士

<sup>(4)</sup> 農業部林業及自然保育署南投分署 技正

<sup>(5)</sup> 農業部林業及自然保育署南投分署 科長

<sup>(6)</sup> 國立中興大學水土保持學系 博士候選人(通訊作者 e-mail : [d10704200@mail.nchu.edu.tw](mailto:d10704200@mail.nchu.edu.tw))

Effectively intercepting this sediment is therefore crucial for hazard mitigation. This study constructed a physical hydraulic model of the Beigang and Yang-An Stream confluence using wood-assembled components. Flow and sediment transport under a 50-year return period flood were analyzed for three scenarios: the original channel, a steel pipe dam, and a traditional check dam. The aim is to identify the most effective design for future planning and implementation.

**(Keywords)** : Hydraulic model, Check dam, Flow field, Sediment transport

## 一、前言

北港溪為烏溪主流之上游，位於台灣南投縣仁愛鄉，其集水區內雨量豐沛，豪雨事件使區域內常伴隨著大規模的土砂災害，民國98年莫拉克颱風來臨時，北港溪之支流楊岸溪於上游處發生大規模崩塌，崩塌土砂隨著楊岸溪水流進入北港溪，導致大量土砂淤積於北港溪內形成沖積扇，使主流流心擺盪產生偏移，對匯流口對岸上邊坡惠蓀林場之聯外道路(投80線)下方坡腳護岸造成嚴重淘刷，影響當地居民的用路安全。北港溪位於台灣南投縣仁愛鄉，為烏溪流域之上游集水區，其集水區內雨量豐沛且地質條件脆弱，致使豪雨事件後經常發生土砂災害，尤其民國98年莫拉克颱風事件期間，北港溪之支流楊岸溪上游發生大規模崩塌事件，崩塌土砂隨著楊岸溪溪水進入北港溪，並堆積於北港溪匯流口右岸形成沖積扇，進而推擠北港溪水流向左岸偏移，造成北港溪左側護岸因嚴重基礎淘空而損毀，故主管機關緊急對沖積扇執行清疏作業，配合損毀護岸的修復工程，以確保岸上邊坡之聯外道路(投80線)，以及當地用路居民與遊客之安全。然而，楊岸溪上游崩塌地仍存在大量殘存土方，未來遭遇豪大雨事件可能導致殘存土方持續下移，再次堆積於北港溪匯流口右岸，重演北港溪流心偏移、左側護岸損毀之情況，因此如何妥善的調節楊岸溪上游崩塌地下移之土砂，

避免匯流口土砂災害的發生，為目前北港溪與楊岸溪匯流口迫切需解決之重要課題。

河道匯流口受兩股水流交互作用影響，致使其流況相當複雜，Nazari-Giglou et al. (2016)透過室內渠槽之動床試驗，探討流況及河道幾何條件對匯流口地形變化之影響，其分析結果發現支流福祿數、支流流量與總流量之比率(Discharge ratio)及主支流匯流角度等皆為影響匯流口泥砂運移之重要因子，為瞭解各因子與泥砂運移彼此之關係，Shakibainia et al. (2007)利用室內實驗資料驗證三維數值模式，再以驗證後之數值模式調整匯流角度及流量比率進行模擬，分析不同條件下水流及底床變動之差異，其結果顯示主支流匯流後，主流受支流推擠而偏移，主流偏移後會淘刷偏移方向之河床，而與支流交會之區域則會呈現淤積狀況；Ribeiro et al. (2010)則以瑞士隆河為參考，設計室內渠槽試驗之泥砂特性、水流流量及泥砂流量，藉由實驗過程觀測三維流場、紊流特性、底床粒徑組成、土砂運移及地形變化等資訊，以分析匯流口主支流交會處之沖淤特性，結果顯示主支流流況的差異使匯流口產生明顯的底床落差，導致主支流匯流後支流水流主要分佈於水體上層，而主流水流則分布於水體底層，形成明顯的雙層流結構(Two-layer flow structure)，支流挾帶土砂進入主流，並於匯流口落淤形成堆積扇，造成主流通洪斷面縮小、流速增快，主流輸砂能力提升。前

述文獻為深入分析匯流口之水理機制，採用簡單的矩形河道之直線渠槽進行試驗，但卻忽略河道蜿蜒及斷面突變對匯流口水砂運動之影響，水工模型試驗是將現場河道以縮尺的方式建立模型，並注水進行實驗，此方法能更有效的反應河段之地形變化特性對水流及泥砂的影響。傳統常見的水工模型製作方式有陰陽版法、等高線法及高程柱法等三種(國立臺灣大學水工試驗所，2011)，惟傳統的水工模型製作需消耗大量的人力及經費資源，且放樣及施工皆採用人工的方式容易產生操作者誤差(Operator bias)(國立臺灣大學水工試驗所，2012)，對於講求精準的水工模型而言，具有不良的影響，因此江明新(2009)嘗試使用測量資料繪製等高線圖，並以不同等高線之輪廓切割夾板進行堆疊組裝，配合矽膠填補夾板間之接縫，建構出樂灘水電站之航道模型，進行不同設計方案之排砂試驗，朱俊豪(2010)則將此方法改用於都市區域排水方面，探討不同配置方案對積淹水現象的改善情況，以及親水環境的營造問題。兩者研究結果皆顯示，採用切割夾板堆疊組裝的方式建置水工模型，具備其可行性，有利於降低製作成本的花費，並節省人力資源。

對於水工模式試驗結果之流速量測方法，以往多採用聲波都卜勒流速計(Acoustic Doppler Velocimeter, ADV)進行測量，惟ADV為接觸式的量測儀器，需直接置入水體中進行操作，可能造成局部水流流速與流向的改變，進而影響底床沖淤結果。近年因影像處理技術的提升，Fujita et al.(1998)嘗試使用兩張影像間質點的移動狀況，計算水流表面之流速，即為大尺度質點影像量測法(Large Scale Particle Image Velocimetry,

LSPIV)，此方法能透過影像有效地測量大範圍之流場，克服傳統方法於單點接觸水體量測流速的缺點，亦破除傳統方法於水深過淺之區域無法使用之限制，且具有操作簡單、省時省力之特性，吳榮峰(2003)曾針對LSPIV量測精度進行分析，發現LSPIV與傳統量測結果之誤差在8%內，顯示LSPIV之量測結果具有良好的準確率，Patalano et al.(2015)將不同材質之人造粒子施灑於水中，做為LSPIV模式之追蹤質點，分析使用不同材料之人造粒子對LSPIV運算結果之影響，其研究成果指出粒子懸浮於水流表面、質點與水流顏色存在明顯差異及粒子尺寸均勻等三點，為良好人造粒子之必要條件，莊昱仁(2019)則採用玉米壓碎製成之白色、遇水可溶之人造粒子為追蹤質點，探討人造追蹤質點的使用對LSPIV運算結果準確性提升之狀況，其研究結果顯示人造追蹤質點的使用相較於追蹤水面波紋，可增加10%以上的分析準確率，成功優化LSPIV之運算結果。

由於電腦控制技術的提升，CNC切割能操控儀器精準切割複雜的線型，有助於切割木板製作高精度之水工模型，因此本研究使用無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)拍攝北港溪、楊岸溪及匯流口之正射影像，透過運動回復結構(Structure from Motion, SfM)產製數值地表模型(Digital Surface Model, DSM)，用以繪製等高線圖，後將等高線圖匯入電腦輔助CNC切割木板，藉由木板的堆疊製作出之水工模型，以探討北港溪及楊岸溪匯流口土砂災害之治理策略，此外，為提升試驗結果量測之效率及準確性，本研究採用保麗龍球為追蹤粒子，透過相機垂直拍攝水工模型於不同時刻之正射影像，

以 LSPIV 模式追蹤兩時刻間追蹤粒子之移動軌跡，計算出流速及流場分布以比較不同試驗方案之試驗結果，透過對水工模型製作及試驗量測方法的精進，以期能簡單、快速且準確的獲得水工試驗成果，剖析不同試驗方案對北港溪及楊岸溪匯流口水砂運動之影響，以評估出最佳之設計方案，提供主管機關未來工程規劃設計使用。

## 二、研究材料與方法

### 2.1 研究樣區概述

本研究之樣區位於台灣南投縣仁愛鄉內北港溪與楊岸溪交匯處，其中主流北港溪為烏溪流域之上游，集水區涵蓋中興大學惠蓀林場及大面積國有林地，面積為36,528公頃，全長約為82公里，平均高程則為1,612.7公尺，；而楊岸溪為北港溪支流，發源於八仙山，面積為2,159公頃，全長為8,427公尺，其流向為從北向南流入北港溪中，而在楊岸溪上游河道旁邊坡，於民國98年蘇迪勒颱風來臨期間，產生大規模崩塌，導致大量土砂隨著豪雨事件被帶入楊岸溪中，並隨水流流入北港溪及其下游，如圖1為楊岸溪上游崩塌區在民國98年莫拉克颱風前後的變化。



圖1 楊岸溪上游崩塌後衛星影像圖

Figure 1 Satellite image of upstream Yangan Creek after slope collapse

### 2.2 試驗方案研擬

楊岸溪上游崩塌土砂隨水流進入北港溪匯流口後，大量土砂堆積於匯流口，導致主流受到推擠而向左岸偏移，進而對左岸之護岸基礎產生淘刷，因此主管機關為控制崩塌地上的殘存土方，避免大量土方一次性下移，誘發匯流口產生土砂災害，預計採用興建防砂壩的方式進行工程處理。為探討不同防砂壩攔阻土砂之能力，本研究設計三種方案進行水工模型試驗，分別為未施作工程前之零方案、具備調節土砂能力之透過性壩方案，以及全攔阻土砂之非透過性壩方案，以探討匯流口周圍之土砂淤積情況，而防砂壩選址考量工程施作之成本及效益，挑選瓶頸段且其上游具有充足凹砂空間為主，由圖2可知，陽岸溪鄰近匯流口處存在瓶頸段，且瓶頸段上游為開闊之腹地，適合用於儲存下移之土砂，故以此瓶頸段為防砂壩之設置地點，並依其位置之斷面寬度及型態，由主管機關委任專業技師進行透過性壩及非透過性壩方案之設計，其設計完成之透過性壩型式為鋼管壩，其完整壩體由8座獨立鋼管壩所組成，其單座鋼管壩之長度為8.1 m、寬度為2.4 m及高度為4 m，如圖3所示；非透過性壩型式為混凝土壩，其長度為27 m、寬度為3 m 及高度為4 m，屬於全封閉型之防砂壩。



圖2 防砂壩設置位置圖

Figure 2 Location of Check Dam Installation

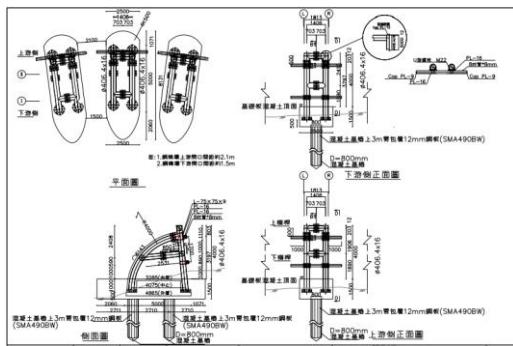


圖3 鋼管壩之設計圖說

Figure 3 Design diagram of the steel pipe dam

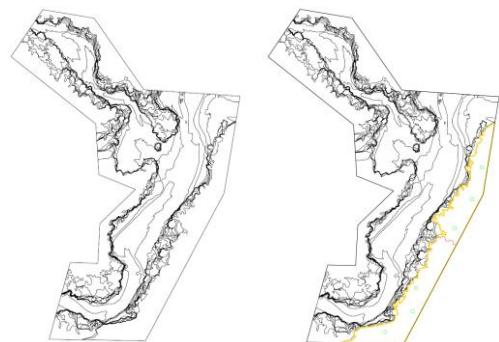
### 2.3 水工模型製作

水工模型的製作採用等高線法來進行，透過 CNC 切割沿不同高程之等高線線型裁切木板，再將裁切完之木板進行堆疊及組立，製作出水工模型之雛形，並考慮到木板本身亦受水分影響而膨脹，如未經處理直接使用，可能導致模型受木板膨脹影響而失真，因此針對模型進行系列的防水處理，以避免木板膨脹之情況發生。以下針對水工模型的製作過程，分為等高線處理與板材切割、模型組立與防水層處理、水工模型精度檢核及壩體模型製作等四部分說明。

#### 1. 等高線處理與板材切割

為取得北港溪、楊岸溪及匯流口之 DSM，作為水工模型製作之原始資料，採用 UAV 拍攝研究樣區之正射影像，以匯入 Pix4Dmapper 產製 DSM，並根據試驗場域及板材厚度的限制，選定模型縮尺為 1:300，以 DSM 產製 4.5 m 之等高線，經縮尺後等高線間之高程差為 15 mm，即適合使用 5 分厚之防水夾板進行 CNC 電腦雷射切割。然而，在等高線切割前需先經過等高線切割前處理，方可順利切割模型，在經 Pix4D 產製 4.5 m 之

等高線後，河道範圍外仍有大量等高線存在，如不經刪減將大量增加施作之成本及時間，故僅保留河道內等高線，並刪除行水區域外之等高線，之後透過訂定模型製作範圍，並刪除範圍外之等高線，即可獲得模型施作所用之等高線，如圖 4(a)。在等高線確定後，將等高線與模型邊界連接，形成封閉圖塊，以利進行 CNC 切割，如圖 4(b)中黃線所示。此外，考量模型製作機台大小之限制，採用分區切割後組合為之，然而此方式易使各木板放置區位不易校準，故在模型施作前透過定位孔及銜接縫的設置，解決分區組裝之問題，如圖 4(b)中綠線與紅線所示。在完成以上步驟後，將修正後之等高線圖匯入 CNC 切割輔助電腦中，以電腦精確控制銑刀切割出各區塊封閉等高線、定位孔及銜接縫，如圖 5 所示。



(a) 模型施作範圍  
選取 (b) 封閉同高程之  
等高線圖塊

圖4 水工模型製作過程圖

Figure 4 Photographs of the hydraulic model construction process



圖5 電腦輔助 CNC 切割圖  
Figure 5 CNC cutting procedure using  
Computer-Aided Design software

## 2. 模型組立與防水層處理

為確保模型水平，可真實反映河道水理現象，模型下方以基座支撐墊高，並於模型基座腳架下方設置校準螺絲，透過水平尺配合校準螺絲進行水平校正作業，即可令模型維持水平。模型基座以角鐵組合而成，施作過程藉由 AutoCAD 圖檔抓取模型外框，將角鐵依外框輪廓排列，再以調整基座腳架方式使模型載重均勻分佈，最後透過焊接使角鐵相互連接，此外，為避免模型水流濺出造成基座鏽蝕之情況，亦對基座表面進行防水漆防鏽處理。在基座定平完成後，於基座上方放置模型底板，並依編號對各區防水夾板進行拼接工作，而在拼接過程中，透過1/2”之水管穿入定位孔中，確保各區夾板皆置於正確位置。水工模型之防水夾板組裝完成後，考量水工模型使用5分夾板電腦雷射切割等高線後加工組合，模型夾板組合完成後地形為階段狀，為避免試驗時影響試驗成果，使用批土及 AB 膠(環氧樹脂)填補各夾板間的階段空間，使地形得以儘量順接。此外，為防止模型夾板遇水腐壞或因滲流而流量不準確之情形，故另進行防水層施作，防水層大致分為底漆、中塗及面漆三層，待各層防水

層風乾後完成水工模型之製作，製作完成之水工模型如圖6所示。

- (1)第一層(底漆)：使用防水抗裂纖維水泥質砂漿做為補土、AB 膠、防水塗料之間的接著材料，因模型地形複雜且補土材料存在許多細微孔隙，故選補刀配合毛刷作為施工用具。
- (2)第二層(中塗)：使用彈性耐候防裂防水漆，施作時依照防水塗料廠商建議，試驗水位流經區域施作三層，以交叉塗抹的方式增加防水性。此外，本水工物理模型分為四層上漆；其中，底層為試驗底床使用灰色防水塗料，邊坡使用淺綠色防水塗料，崩塌地使用咖啡色防水塗料，遠處山林則使用深綠色防水塗料，使模型外觀更接近實際樣貌。
- (3)第三層(面漆)：採用無機奈米透明塗料，此塗料具高耐候、抗曬、耐磨等特性，確保模型能抵抗試驗中水流衝擊及試驗砂刮磨河道等情形。



圖6 施作完成之水工模型圖  
Figure 6 Photograph of the completed  
hydraulic model

### 3. 水工模型精度檢核

本研究於完成水工模型製作後，以手動方式量測模型長度與縮比後之 DSM 長度進行誤差檢核，其計算方式為上述兩數值之差除上 DSM 之數值；在量測位置分為三個方向，分別為河道順水流方向之長度、垂直水流方向之寬度，以及高程差的檢核，其量測之位置標示如圖7，其中模型的長度是以遊標尺及不鏽鋼鐵尺進行人工量測，DSM 的長度則是透過地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)進行測量。檢核結果如表1所示，由表可知水平誤差百分比在 2.9% 以內，高度誤差百分比於 6.6% 以內，可知高度誤差百分比明顯高於水平誤差百分比，分析其原因為水工模型於組裝銜接的過程中，層與層之間以 AB 膠接合所致，導致整體板材在高程上有較大的誤差。



圖7 水工模型檢核位置圖

Figure 7 Locations for hydraulic model verification

表1 水工模型長度檢核表

Table 1 Hydraulic model length verification

代號	真實距離 (cm)	量測距離 (cm)	誤差 (%)	代號	真實距離 (cm)	量測距離 (cm)	誤差 (%)
L <sub>1</sub>	34.8	35.2	1.1	B <sub>4</sub>	39.3	38.7	1.5
L <sub>2</sub>	32.0	32.6	2.0	B <sub>5</sub>	40.6	39.6	2.5
L <sub>3</sub>	37.8	38.5	1.9	B <sub>6</sub>	35.9	34.9	2.8
L <sub>4</sub>	136.8	140.2	2.5	B <sub>7</sub>	34.5	35.2	2.1
L <sub>5</sub>	79.3	80.9	1.9	B <sub>8</sub>	37.1	36.1	2.6
B <sub>1</sub>	47.2	48.6	2.9	H <sub>1</sub>	6.0	6.2	3.3
B <sub>2</sub>	33.9	33.2	2.1	H <sub>2</sub>	1.5	1.6	6.6
B <sub>3</sub>	17.6	17.1	2.6	H <sub>3</sub>	9.0	9.1	1.1

### 4. 壩體模型施作

本研究針對原河道、鋼管壩及傳統壩三種壩體進行分析，壩體的施作考量到試驗時需拆卸更換，採用獨立製作後置入模型的方式處理。在鋼管壩的施作方面，考量壩體本身線形複雜且細緻，故採用3D 列印技術，以電腦輔助模型施作，以提高壩體模型高度及線形之精準度。常用之3D 列印方法包含 FDM (熱熔融層積)、SLA (光固化) 及 SLS (雷射粉末燒結) 等三種，其中 FDM 技術雖列印價格較便宜，卻有懸空處需支撐結構輔助的問題，而 SLS 雖不需支撐結構，但價格昂貴並有產生之粉塵易造成空氣汙染之情形，相較之下，SLA 製作價格適中，且無需支撐材料，能透過在樹脂槽內倒入樹脂，後再配合雷射光束照射使樹脂硬化方式產製模型，故選以 SLA 製作本研究之鋼管壩模型。鋼管壩模型參考北港溪設計單位提供之設計圖而得，經1/300縮尺後，其高約1.3cm，基座寬約0.8cm、長約2.7cm，共8座，以弧形方式排列於匯流口處，如圖8(a)。而傳統壩因線形較為單純，故以木頭裁切搭配矽利康填補兩側縫隙進行施作，施作成果如圖8(b)，傳統壩壩高約1.3cm、寬約1cm、長約9cm。



圖1 防砂壩模型製作成品圖

Figure 8 Photograph of the completed check dam model

#### 2.4 試驗水流條件

本研究為探討匯流口水流與其對應的土砂問題，透過頻率分析計算北港溪及楊岸溪各重現期之流量歷線，並考量主管機關參採法規之設計流量標準，選用50年重現期之流量歷線作為試驗的水流條件，進行不同方案之水工模型試驗。由匯流口周圍雨量站分布圖(圖9)可知，八仙山(1)雨量站位處楊岸溪集水區上游，而惠蓀(2)則位處北港溪上游，故以八仙山(1)雨量站作為楊岸溪頻率分析之代表雨量站；惠蓀(2)為北港溪頻率分析之代表雨量站。

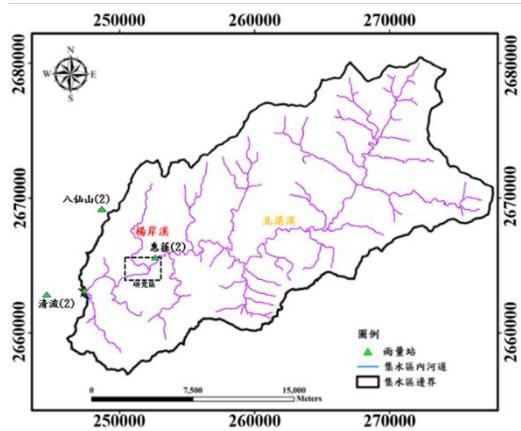
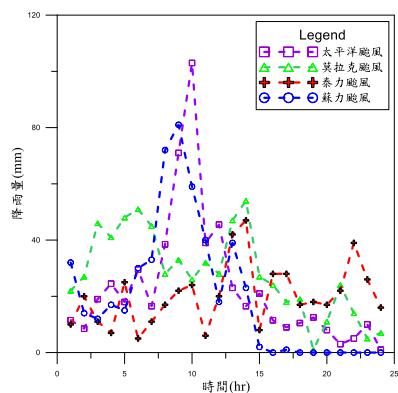


圖9 北港溪集水區雨量站位置圖

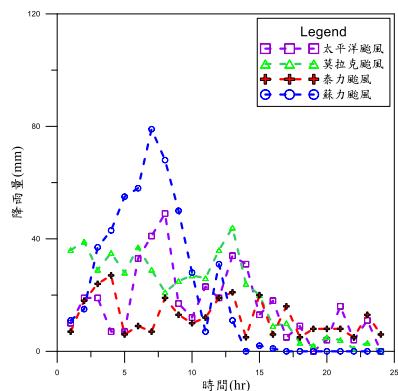
Figure 9 The location of rainfall station in the Beigang River watershed

由於致災原因為匯流口之主支流交匯問題，在北港溪及楊岸溪洪峰到達時間的差異，將影響匯流口處北港溪水流偏折情形，因此本研究蒐集八仙山(1)及惠蓀(2)雨量站所觀測之太平洋颱風、莫拉克颱風、泰利颱風及蘇力颱風等四場事件雨量資料，透過事件雨型分析瞭解兩雨量站在最大暴雨發生時刻及雨型的不同，據以選取最適合北港溪及楊岸溪之雨型進行分析，事件雨型之資料蒐集結果如圖10所示，由圖可知八仙山(1)及惠蓀(2)雨量站在四場事件之最大降雨量多發生於13小時之前，其中，八仙山(1)最大暴雨量落於8小時左右，而惠蓀(2)最大暴雨量落於6小時左右。此外，透過同場暴雨事件不同雨量站之分析可知，八仙山(1)雨量站最大暴雨發生時刻相較於惠蓀(2)雨量站多延遲2小時，且八仙山(1)之最大一日暴雨量皆高於惠蓀(2)。綜合以上所述，在北港溪及楊岸溪之雨型設計上參考游保松(1991)「長延時設計雨量之決定」中提出之設計雨型，以降雨最大量在1/4 延時處的擬前峰雨型作為惠蓀(2)雨量站

設計雨型，而八仙山(1)雨量站設計雨型則以降雨最大量在8小時處之雨型為之。而兩雨量站之1日暴雨量資料則參採經濟部水利署(2013)委辦之「台灣脆弱度及風險地圖製作與整合應用」計畫研究成果，皆採對數皮爾遜三型分布作為最適分佈，以計算求得各頻率年之一日最大暴雨量，如表2所示。



(a)八仙山(1)雨量站



(b)惠蓀(2)雨量站

圖10 不同降雨事件時雨量資料統計圖

Figure 10 D Rainfall statistics for different rainfall events

而北港溪及楊岸溪上游集水區之單位歷線計算方法，採用修正三角單位歷線法，其計算方式係將集流時間與集水區面積的估算代入修正三角單位歷線法公式中，計算出三角單位歷線之洪峰流量、到達洪峰時間、基期及降雨延時等資訊，以繪製出三角單位歷線分布情況。最後，整合雨型設計、一日最大暴雨量及三角單位歷線計算結果，透過 S 歷線將三角形單位歷線轉換為有效降雨延時 1 小時之單位歷線  $U(1,t)$ ，另以 50 年重現期一日最大暴雨量，配合雨型分析成果，將 50 年重現期之一日最大暴雨量分配於 24 小時中，藉由單位歷線線性疊加的假設，以單位歷線  $U(1,t)$  推求 50 年重現期距之流量歷線，計算結果之北港溪 50 年重現期洪峰流量為 3925.54 cms，楊岸溪 50 年重現期洪峰流量為 401.85 cms。為將流量歷線計算結果應用於水工模型試驗中，透過福祿定律對楊岸溪及北港溪之入流量進行縮尺，經縮尺後之楊岸溪入流洪峰流量為 0.00026 cms(約 12 LPM)、北港溪入流洪峰流量為 0.0025 cms(約 149 LPM)，然而經縮尺後之流量歷線為隨時間變化之曲線，難以透過閥門準確控制，為方便流量調整，將流量歷線依洪程分為 12 等分，每等份內流量取平均值，以求得分段平均後之流量歷線作為試驗水流條件，如圖 11(a) 及圖 11(b)。在流量控制設備方面，為使水工模型試驗水槽之抽水功率符合試驗流量需求，挑選全馬力(250 LPM)及半馬力(200 LPM)泵浦，分別作為北港溪及楊岸溪之供水設施，

表2 兩雨量站於不同重現期之一日最大降雨量彙整表

Table 2 Maximum daily rainfall at two rainfall stations for various return periods

站名	2年	5年	10年	20年	25年	50年	100年	200年
八仙山(1)	248.7	351.5	426.0	502.3	520.1	608.8	694.8	786.3
惠蓀(2)	221.2	319.2	390.4	463.3	480.2	564.7	646.5	733.4

搭配面積式流量計的使用，能準確地調整試驗流量進行分析。

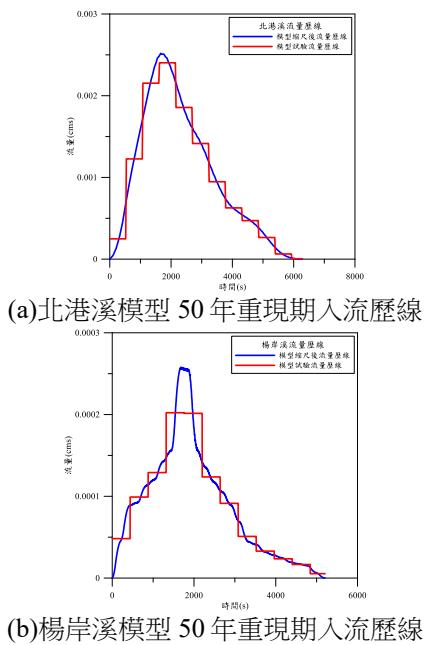


圖2 北港溪及楊岸溪50年重現期之試驗流量歷線圖

Figure 11 Experimental discharge hydrograph for a 50 year return period in the Beigang and Yang-An Streams

## 2.5 試驗泥砂條件

水工模型試驗中，河道中的土砂粒直接影響了匯流區中土砂堆積的型態，因此本研究於北港溪現場進行明坑採樣法，調查研究區之粒徑分佈曲線作為試驗用砂的尺寸選用依據，其結果如下圖12所示。調查結果顯示，78 mm 至362 mm 之土砂佔整體採樣樣本約 50%，且楊岸溪上游土砂主要以大顆粒土砂為主。因此本研究在粒徑的選擇上，配合市面上販售之試驗土砂之粒徑，擇定以  $D_{85}$ 為 256mm 作為代表粒徑進行縮尺，並以  $D_{50}$ 為 0.83mm 試驗石英砂進行水工模型試驗。

而為計算出本試驗在50年重現期豪雨事件下的土砂量，本研究以行政院公布之2012年及2016年全台數值高程地形(Digital elevation model, DEM)，對支流楊岸溪上游之崩塌地進行量體分析，經由 GIS 套疊兩期 DEM 相減，得出2012年至2016年間共累積 286 萬  $m^3$ 的崩塌土砂流出，因此假設此崩塌土砂量皆由豪雨事件所帶出，且帶出的土砂量正比其豪雨事件之降雨量，經查閱八仙山雨量站，蒐集2012年至2016年所間發生之13場豪雨事件資料，將286萬  $m^3$ 的土砂除上13場豪雨事件雨量總和，求得單位雨量所流出之土砂量，再以楊岸溪50年重現期一日最大暴雨量608.8 mm 計算再縮比後得到一場試驗需加入之土砂量為19.2 kg，故透過履帶輸砂器將土砂緩慢加至楊岸溪上游，其不同時刻下之輸砂量如下圖13所示。

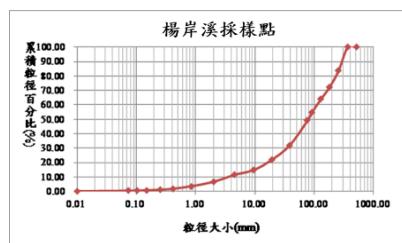


圖12 楊岸溪粒徑分布曲線

Figure 12 Particle size distribution curve of the Yang-An stream

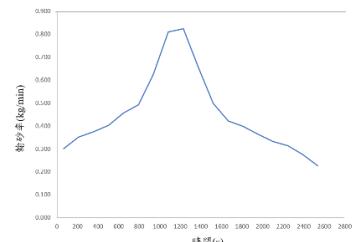


圖13 楊岸溪輸砂入流歷線

Figure 13 Sediment inflow hydrograph of the Yang-An stream

## 2.6 試驗流場量測

為瞭解三種試驗方案河道深槽調整情形，採用正射影像配合人工追蹤質點進行 LSPIV 分析，以獲得主支流匯流區之水流流況。本計畫採用之 LSPIV 軟體為自行撰寫之 MATLAB 程式，以往用於分析河道表面流速及輔助棲地地形判釋皆有良好之成效(吳子佳，2014；柯亭羽，2016)，其計算原理係將拍攝之分析區影像切割為數個子分析區域(IA)，透過計算固定時間間距內之連續影像中各 IA 值的互相關係數，找出追蹤質點移動距離，借以計算表面流速，並將多組之計算結果進行平均，即可繪出該區流場分佈，其計算過程示意圖詳圖14。

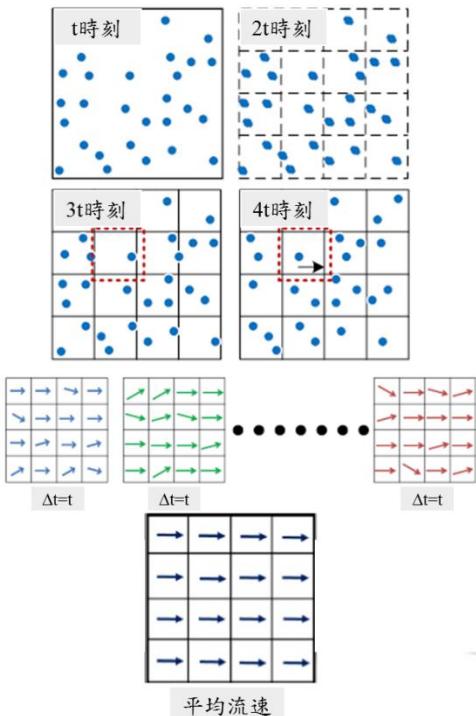


圖14 PIV 計算過程示意圖

Figure 14 PIV processing and calculation workflow

## 三、結果與討論

### 3.1 土砂運動過程分析

本研究將防砂壩上游突擴區域定義為土砂庫容區，北港溪與楊岸溪匯流點向上下游各沿伸約20 cm 之區域定義為匯流口，如圖 15 所示。透過在模型正上方架設錄影器材，並以正射方式拍攝全段模型於試驗時間內之土砂運動過程，藉以分析隨著流量增加，不同方案對土砂庫容區及匯流口之土砂淤積變化情況，以下針對不同方案之土砂淤積變動過程進行說明。



圖15 水工模型分析區域定義圖

Figure 15 Defined analysis zones in the hydraulic model

#### 1. 零方案

零方案試驗過程中，土砂淤積隨時間變化之分布情況如圖16(a)~(h)所示，試驗初期0min~12min 土砂逐漸由楊岸溪上游向下游遞移，並在土砂庫容區深槽處淤積，而12min 後淤積土砂受楊岸水流作用緩慢流入北港溪中，此時北港溪之水流仍具足夠能力

帶走土砂，隨著流量上升達洪峰流量，楊岸溪土砂庫容區已蓄積大量土砂，且在強水流作用下迅速帶入北港溪中，造成北港溪右岸出現明顯之淤積現象，此現象隨著時間的增長越發顯著，在48min 時土砂已淤至北港溪右岸深槽區以上，顯示在未調控楊岸溪下移土砂之情況下，強水流作用時間增長使土砂大量流入北港溪中，當北港溪水流無法順利帶走大量土砂時，匯流口處將出現大量淤積

土砂，導致北港溪水流受淤積土砂推擠向左岸靠攏，左側護岸具損毀之疑慮。

## 2. 鋼管壩方案

鋼管壩方案試驗過程中，土砂淤積隨時間變化之分布情況如圖17(a)~(h)所示，試驗初期0min~12min 土砂運動情況與原方案相同，皆由楊岸溪上游向下游遞移，並在土砂庫容區深槽處淤積，而12min 後楊岸溪土砂

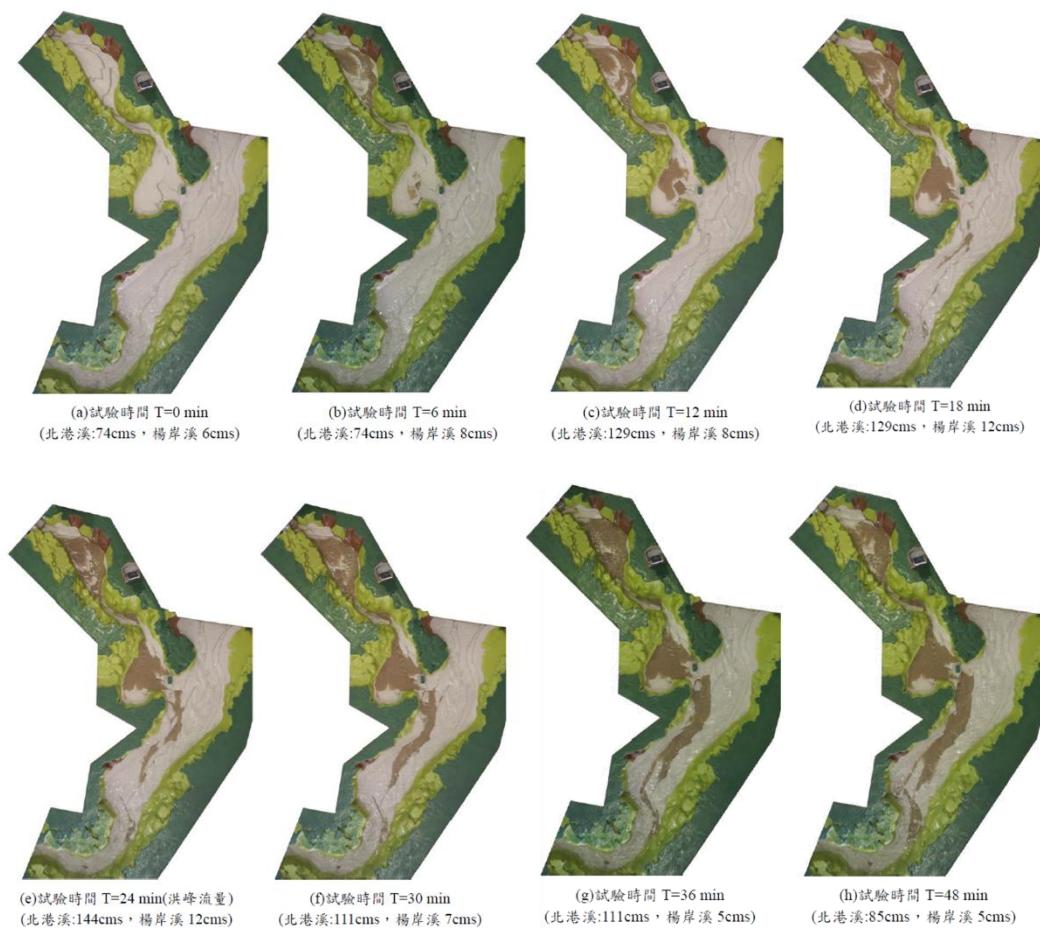


圖 16 原始河道試驗之泥砂運移過程圖

Figure 16 Process of sediment transport in the original channel configuration

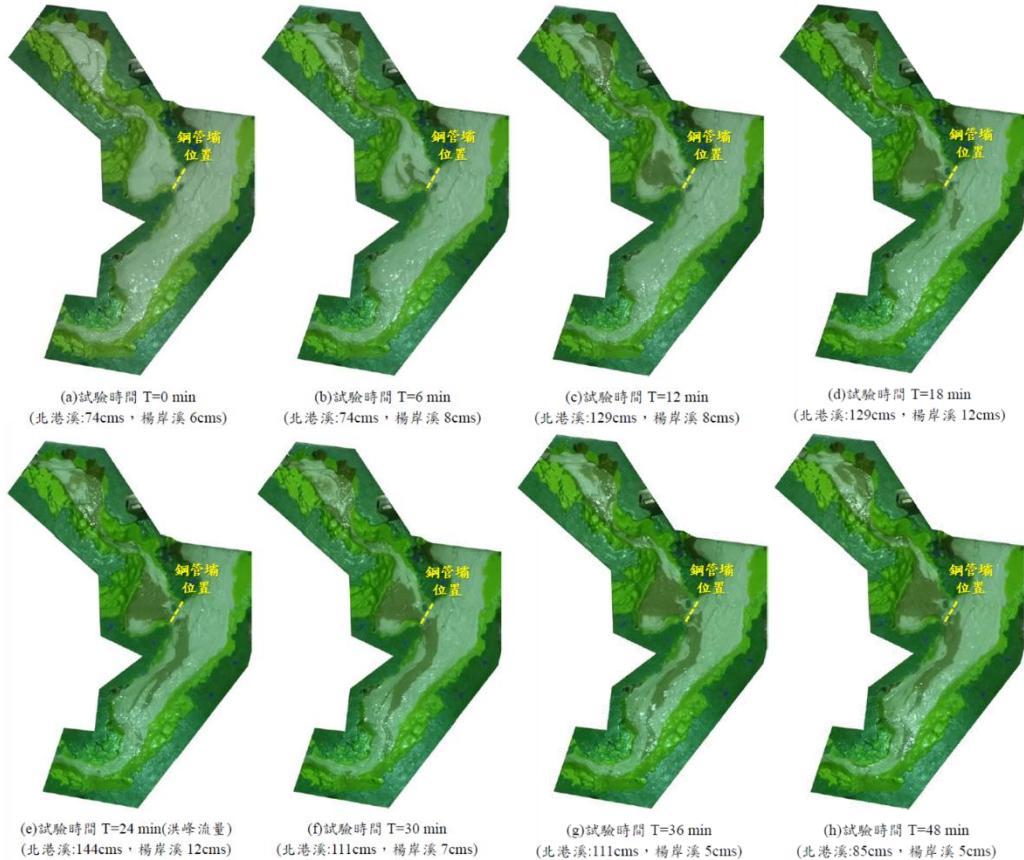


圖 17 鋼管壩試驗之泥砂運動過程圖

Figure 17 Process of sediment transport in the steel pipe dam configuration

庫容區土砂逐漸淤滿，後受楊岸溪水流作用將土砂帶入北港溪中，在24min 時試驗達到洪峰流量，此時下移北港溪之土砂在深槽處形成長條狀淤積，並沿著北港溪主流緩慢往下游遞移，土砂由上游往下游運動之行為持續至36min，後因北港溪主流流量下降致使流速減緩，水流流速不足以帶動土砂運動，導致土砂往下游移動之行為在48min 時中止，促使36min 至48min 間楊岸溪下移土砂堆於匯流口處，此情況顯示防砂壩之建置能減少土砂下移之量體，使北港溪在洪流來臨時可

順利將土砂帶往下游。

### 3. 傳統壩方案

傳統壩方案試驗過程中，土砂淤積隨時間變化之分布情況如圖18(a)~(h)所示，試驗初期0min~18min 土砂由楊岸溪上游逐漸往土砂庫容區移動，並在土砂庫容區深槽處產生大量淤積情形，當試驗時間達24min 洪峰流量時，因楊岸溪水流流速驟增，將楊岸溪淤積之土砂推入北港溪中，在北港溪水流的作用下逐漸往下游遞移，最後當試驗時間達48min 時，因北港溪主流流量下降致使流速

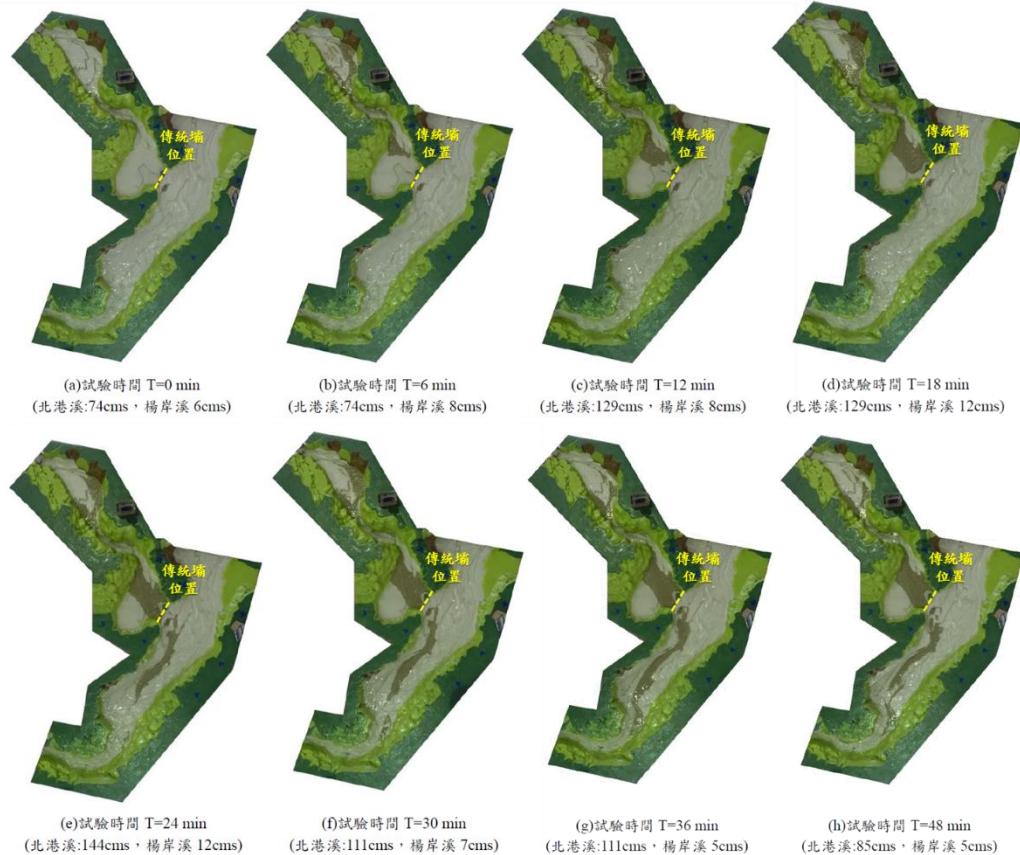


圖 18 傳統壩試驗之泥砂運移過程圖

Figure 18 Process of sediment transport in the traditional dam configuration

減緩，土砂往下游移動之行為趨於靜止，透過以上土砂運移結果可知，傳統壩相較於鋼管壩可攔阻較多之土砂，使楊岸溪排放至北港溪之土砂量體減少，北港溪水流能順利將土砂帶離匯流口處，然傳統壩為封閉式之壩體，水流過壩產生跌水現象，易造成下游底床之淘刷情形。

### 3.2 瓶頸段上下游淤積結果分析

本研究為分析三種配置方案對匯流口土砂淤積之影響，採用河寬束縮比、淤積面積

比及淤積高度比為指標，計算三種配置方案試驗結果於匯流口之指標數值，用以進行方案間之量化比較分析，其指標計算方式如下：

$$\text{河寬束縮比} = \frac{\text{匯流區內最大淤積寬度}}{\text{匯流區最大淤積寬度位置之河寬}} \times 100\%$$

$$\text{淤積面積比} = \frac{\text{匯流區內土砂淤積面積}}{\text{匯流區之面積}} \times 100\%$$

$$\text{淤積高度比} = \frac{\text{匯流區內最大淤積高度}}{\text{匯流區之河岸高度}} \times 100\%$$

其三種方案之指標計算結果繪製如圖19所示，由圖可知，零方案試驗成果中，匯流口區域

內之河寬束縮比為37%，淤積面積比為25%，淤積高度比達93%，其指標數值於三種方案皆為最高，此情況顯示原河道護岸周圍土砂淤積嚴重，且匯流口周圍之土砂已淤積至河道深槽線以上，致使堆積土砂無法透過水流作用帶離匯流口，容易有河道通水斷面束縮，造成束縮沖刷之問題。另由圖20(a)可知，土砂庫容區內仍有大量土砂淤積，未來若遇豪雨事件，恐將大量土砂帶出楊岸溪，使匯流口處之間題趨於嚴重。

由圖19可知，鋼管壩方案試驗成果中，匯流口區域內之河寬束縮比為32%，淤積面積比為17%，淤積高度比約69%，其指標數值於三種方案皆為次高，相較於原河道方案，淤積狀況有明顯的改善，且淤積之土砂位於深槽線內，未來若遇豪雨事件，北港溪水流應能將土砂帶離匯流口。此外，由圖20(b)可知，在土砂庫容區處淤積情況相較於原河道方案，在深槽區有明顯增高之情形，判斷鋼管壩確實具有攔阻土砂之功效。

由圖19可知，傳統壩方案試驗成果中，匯流口區域內之河寬束縮比為31%，淤積面積比為9%，淤積高度比約51.1%，其指標數值於三種方案皆為最低，且其河寬束縮比與鋼管壩方案相近，顯示傳統壩及鋼管壩方案於匯流口堆積之土砂對北港溪水流有相似之影響，且兩方案匯流口堆積之土砂皆低於河到深槽線，未來若遇豪雨事件，可將淤積之土砂帶離匯流口處。然而，依壩體上游淤積情況判斷，如圖20(c)所示，傳統壩方案中土砂皆於土砂庫容區深槽處淤積，無法妥善利用深槽左右兩側之凹砂空間，再者，因深槽土砂堆積，導致水流流路改沿左岸岸壁流動，有淘刷岸壁坡腳，造成岸壁崩塌之疑慮。

### 3.3 河道流心偏移分析

本研究採用 PIV 影像處理技術量測水流表面流速，以了解不同方案流心偏移情況及評估通水斷面是否充足等問題，故於模型匯流口上方架設相機以正射方式錄影，蒐集完整的流況資訊進行分析，然而由測試組之試驗結果可知，水流表面產生之氣泡與河道底床色調相近，使 PIV 程式無法準確辨識自然追蹤質點(表面氣泡)，造成分析成果之誤差，因此，本研究改以黑色保麗龍球作為人工追蹤質點，試驗過程中於河道上游處穩定且均勻的施灑，確保追蹤質點均勻分布於河道表面，提升 PIV 程式判釋追蹤質點之準確度。另透過測試組之分析結果亦可知，北港溪河段於縮尺後斷面寬度驟降，促使水流於匯流口上游瓶頸段出現高流速區域，若影片截取時間過長，追蹤質點移動距離過大，將造成 PIV 解算成果難以描述細部水流流動之過程，因此影像擷取時間經測試後以1/30秒有較佳之成果，故採1/30秒作為影像讀取間隔時間，共分析五分鐘內每間隔1/30秒之影像進行表面流速計算，最後對分析歷程內之所有表面流速計算值進行平均，以獲得平均表面流速值，用以說明三種方案對河道表面流速及通水斷面之影響，其分析之表面流速繪製成等值圖成果如圖21所示。

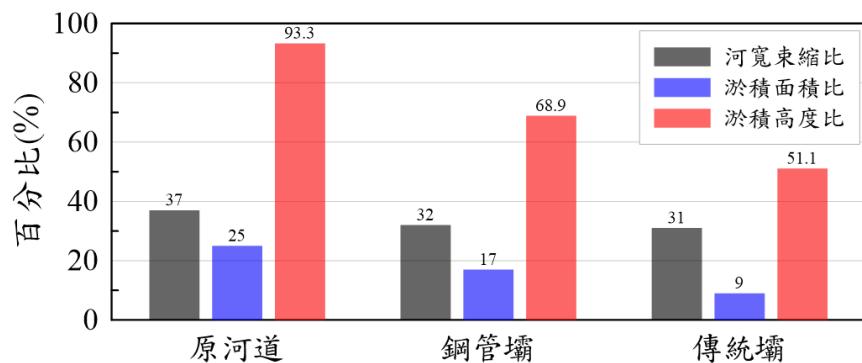


圖 19 不同方案於匯流口處之指標比較圖

Figure 19 Comparison of performance index at the confluence under different scenarios

由圖21可知，在楊岸溪出流口未佈設任何構造物之情況下，水流通過隘口加速逕直撞擊北港溪水流，其撞擊點之支流流速達6.3m/s左右，導致北港溪流心大幅向左岸偏移，其流心距左岸距離僅7.3cm，甚至溢流出左側護岸，顯示在未佈設構造物之情況下，計畫河段遭遇50年重現期之洪水將使北港溪

### 3.3 河道流心偏移分析

本研究採用 PIV 影像處理技術量測水流表面流速，以了解不同方案流心偏移情況及評估通水斷面是否充足等問題，故於模型匯流口上方架設相機以正射方式錄影，蒐集完整的流況資訊進行分析，然而由測試組之試驗結果可知，水流表面產生之氣泡與河道底

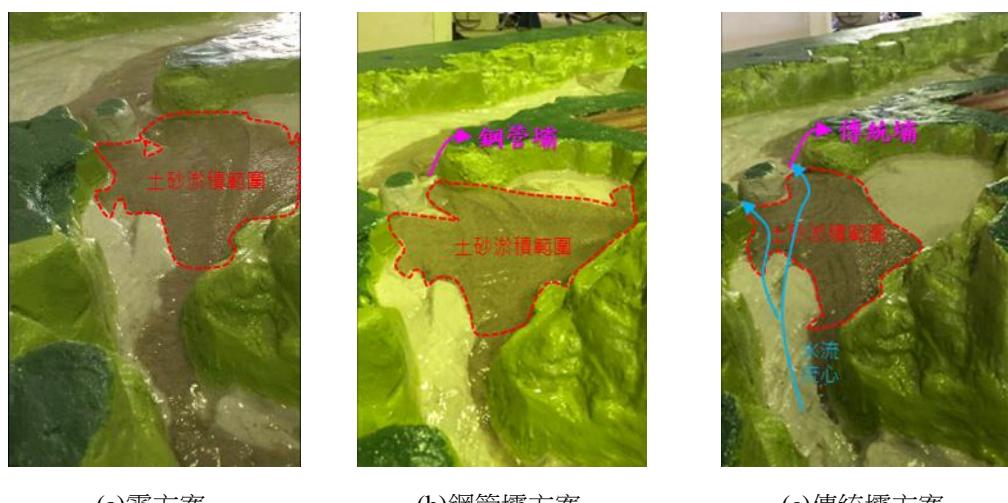


圖 20 不同方案土砂庫容區之淤積分布圖

Figure 20 Sediment deposition patterns in the sediment reservoir zone for different scenarios

床色調相近，使 PIV 程式無法準確辨識自然追蹤質點(表面氣泡)，造成分析成果之誤差，因此，本研究改以黑色保麗龍球作為人工追蹤質點，試驗過程中於河道上游處穩定且均勻的施灑，確保追蹤質點均勻分布於河道表面，提升 PIV 程式判釋追蹤質點之準確度。另透過測試組之分析結果亦可知，北港溪河段於縮尺後斷面寬度驟降，促使水流於匯流口上游瓶頸段出現高流速區域，若影片截取時間過長，追蹤質點移動距離過大，將造成 PIV 解算成果難以描述細部水流流動之過程，因此影像擷取時間經測試後以 1/30 秒有較佳之成果，故採 1/30 秒作為影像讀取間隔時間，共分析五分鐘內每間隔 1/30 秒之影像進行表面流速計算，最後對分析歷程內之所有表面流速計算值進行平均，以獲得平均表面流速值，用以說明三種方案對河道表面流速及通水斷面之影響，其分析之表面流速繪製成等值圖成果如圖 21 所示。

由圖 21 可知，在楊岸溪出流口未佈設任何構造物之情況下，水流通過隘口加速逕直撞擊北港溪水流，其撞擊點之支流流速達 6.3 m/s 左右，導致北港溪流心大幅向左岸偏移，其流心距左岸距離僅 7.3 cm，甚至溢流出左側護岸，顯示在未佈設構造物之情況下，計畫河段遭遇 50 年重現期之洪水將使北港溪通水斷面不足，造成水流溢流之情形；在楊岸溪出流口設置鋼管壩之情況下，水流於楊岸溪出流口受壩體阻水而流速趨緩，且因鋼管壩具有可通透水流之特性，使水流過壩後未有明顯加速之現象，在與北港溪交會後之支流流速僅為 4.9 m/s，使北港溪流心偏移現象相較傳統壩方案更不明顯，其流心距左岸距離為 11.2 cm，北港溪水流大致仍維持於河道中心流動，且河段內無水流溢流之情況，顯示通水斷面仍屬充足；在楊岸溪出流口設置傳統壩之情況下，水流於壩體上游面受到壩體阻水之影響，水流流速減緩，然而在水流通過壩體後，因其高落差使水流跌水加速，

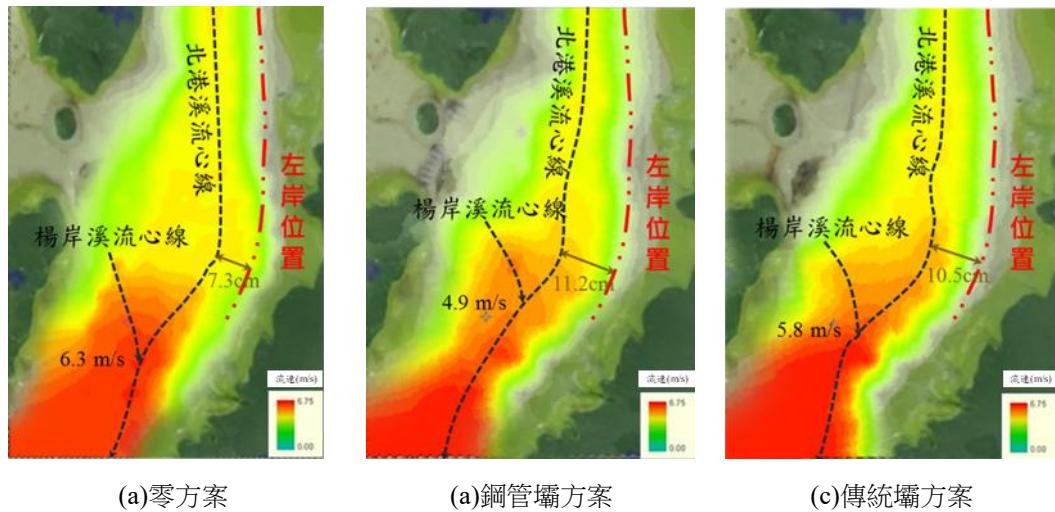


圖 21 不同方案於匯流口之流心比較圖

Figure 21 Comparison of flow centerlines at the confluence under various scenarios

在與北港溪水流交會後推擠北港溪流心向左岸靠攏，其流心距左岸距離為10.5cm，但因其撞擊點之支流流速為5.8m/s，使北港溪流心偏移現象較原方案不顯著，水流仍束於河道內流動，並無溢流之情況，顯示在設置傳統壩後可減少北港溪流心偏移，維持北港溪通水斷面充足。

#### 四、結論與建議

本研究為探討楊岸溪建置防砂壩前後，對北港溪及楊岸溪匯流口之影響，採用水工模型試驗進行分析，在50年重現期流量及泥砂條件，針對原始河道、鋼管壩方案及傳統壩方案等三種方案進行試驗，透過試驗期間土砂推移過程、匯流口與土砂庫容區之土砂淤積分析及河道流心之分析結果，評估本研究區較為合適之整治方案，並得出以下之結論。

1. 本研究透過 UAV 空拍影像產製等高線資料，用於 CNC 切割木板製作楊岸溪及北港溪匯流口之水工模型，經檢核模型精度控制於水平誤差百分比2.9%以內，高度誤差百分比6.6%以內，模型精度良好。
2. 透過試驗過程之土砂運移分析結果顯示，原始河道於洪峰時刻土砂開始堆積於北港溪右岸，並於退水時段堆積區長度、寬度及高度不斷增加，直至試驗結束；鋼管壩方案亦於洪峰時刻土砂開始堆積於北港溪右岸，隨著時間增加堆積區卻無明顯擴展之情況；傳統壩方案土砂開始堆積之時間與原始河道及鋼管壩方案相同，然而退水時段水流緩慢將堆積之土砂帶離匯流口，使堆積範圍不斷縮小。

3. 試驗結果顯示，原始河道、鋼管壩方案及傳統壩方案於匯流口之河寬束縮比分別為37%、32%及31%，淤積面積比分別為25%、17%及9%，淤積高度比分別為93.3%，三種方案之匯流口淤積程度由高至低依序為：原始河道、鋼管壩方案及傳統壩方案，以傳統壩方案之攔砂效果最佳，然就土砂庫容區之淤積分布而言，傳統壩方案之土砂皆淤積深槽處，無法良好利用凹砂空間，且深槽土砂堆積，導致水流流路往左岸靠攏，有淘刷岸壁坡腳之疑慮。
4. 由流心分析結果可知，原始河道方案主支流交匯處之支流流速達6.3m/s 左右，導致北港溪流心大幅向左岸偏移，甚至溢流出左側護岸；鋼管壩方案水流通過鋼管壩後未有明顯加速現象，在與北港溪交匯處之支流流速僅4.9m/s，流心偏移現象不明顯，主流流心大致維持於河道中心；傳統壩方案水流因過壩跌水而加速，以5.8m/s 之流速撞擊主流，使主流流心略偏離河道中心。
5. 綜合分析結果顯示，鋼管壩在土砂庫容區可均勻凹砂，亦具備調節楊岸溪下移土砂之功能，能避免大量土砂淤積於匯流口處造成流心偏移之情形，以保護道路投80之安全，故建議採用鋼管壩工程作為楊岸溪之防砂工程。
6. 目前治理工程設計多仰賴工程師經驗進行，常有學理依據不足之疑慮，本研究提出一種低成本、低耗時，簡單且準確之水工模型施作方法，建議未來在重要工程設計前，能以水工模型試驗進行不

同方案之效益評估，透過量化方式比較不同方案之治理效益，以提供工程設計學理之參考依據。

## 參考文獻

1. 朱俊豪，2010，「應用水工模型試驗探討都市地區多功能渠道之水理現象」，淡江大學水資源及環境工程學系碩士論文。
2. 江明新、李業堅，2009，「樂灘水電站整體水工模型航道沖沙試驗研究」，紅水河，第4期，165-168。
3. 吳子佳，2014，「應用無人飛行載具以大尺度質點影像法量測水流表面流速」，國立中興大學水土保持學系碩士論文。
4. 吳榮峰，2003，「大尺度質點影像量測法之應用-分析水面流場」，國立成功大學水利及海洋工程研究所博士論文。
5. 柯亭羽，2016，「應用無人飛行載具結合大尺度質點影像量測法進行河道物理棲地型態分類」，國立中興大學水土保持學系碩士論文。
6. 國立臺灣大學，2013，「台灣脆弱度及風險地圖製作與整合應用」，經濟部水利署。
7. 國立臺灣大學水工試驗所，2011，「水工模型試驗參考手冊」，經濟部水利署水利規劃試驗所。
8. 國立臺灣大學水工試驗所，2012，「中庄攔河堰水工模型試驗報告」，經濟部水利署北區水資源局。
9. 莊昱仁，2019，「應用無人飛行載具結合大尺度質點影像量測法進行不同流況下之流速分析比較」，國立中興大學水土保持學系碩士論文。
10. 游保杉、古旭程，1991，「長延時設計雨量之決定」，中國土木水利工程學刊，第3卷，第3期，271-276。
11. Fujita, I., Muste, M., and Kruger, A., 1998. "Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications", *Journal of Hydraulic Research*, 36(3), 397-414.
12. Leite Ribeiro, M., Boillat, J. L., Schleiss, A. J., and Blanckaert, K., 2010. "Experimental study on a widening tributary channel and its influence on the confluence morphology", *River Flow 2010*, 961-968.
13. Nazari-Giglou, A., Jabbari-Sahebari, A., Shakibaenia, A., and Borghei, S. M., 2016. "An experimental study of sediment transport in channel confluences", *International Journal of Sediment Research*, 31, 87-96.
14. Patalano, A., Garcia, C. M., Brevis, W., Bleninger, T., Guillen, N., Moreno, L., and Rodriguez, A., 2015. "Recent Advances In Eulerian and Lagragian Large-Scale Particle Image Velocimetry". *E-proceedings of the 36th IAHR World Congress*, 1-6.

15. Shakibaeinia, A., Zarrati, A. R., and Majdzadeh Tabatabaei, M. R., 2007. "Three-Dimensional Numerical Study of River Channel Confluence with Bed Changes", Proceedings of the 32nd IAHR World Congress, 2, 609-617.

---

114年 7月 1日 收稿

115年 1月 2日 修改

115年 1月 6日 接受