

七家灣溪河床棲地改善之試驗研究(二) -- 系列防砂壩改善工程對河床形態之影響

An Experimental Study of Channel Habitat Improvement for Chi-Chia-Wan Creek (II):

The Effects of Improvement Engineering of Serial Check Dams on Channel Morphology

段錦浩

國立中興大學水土保持系教授

┆

註解:

連惠邦

私立逢甲大學水利工程系副教授

葉昭憲

私立逢甲大學土地管理系副教授

## 摘 要

為解決國寶魚櫻花鉤吻鮭因防砂壩所造成族群隔離、棲息環境惡化以及近親交配等問題，本研究延續去年之研究方法與操作程序對七家灣溪集水區內之防砂壩做適當之開口處理，然而本研究之重點在於探討系列防砂壩改善工程對河床形態與輸砂特性之影響。根據水工模型試驗結果，本研究發現缺口拆除方式對河床之平均淤砂坡度影響不大，而河床之平均淤砂坡度則會隨壩體缺口深度之增加而變大；對於相同之三號壩斷面缺口形狀，一次拆除比分次拆除造成更深的沖刷坑度，而且沖刷坑深度會隨著下游壩體拆除的深度增加而變大；橫斷面的變化與壩體改善的拆除方式並無顯著關係，然而上游淘刷範圍隨壩體缺口深度加深而變大；泥砂排出量與其濃度會隨著缺口深度之增加而增加，而一次拆除的方式之泥砂濃度增率比分次拆除的泥砂濃度增率高約 1.5 倍，因此分次拆除的壩體改善施工方式對泥砂濃度增率以及下游櫻花鉤吻鮭的棲息地衝擊較小。

關鍵字：櫻花鉤吻鮭、河床棲地改善、系列防砂壩、模型試驗。

**ABSTRACT:** By partially breaking the dam body or cutting opening appropriately, our experimental studies tried to provide appropriate river rehabilitation measure for Formosan Salmon (*Oncorhynchus masu formosanus*) in Sheipa National Park. With supports from previous research, this study focused on the effects of improvement engineering of serial check dams on channel morphology from hydraulic model experiment, several results were concluded regarding to the deposit slopes, cross sections, dimension of scouring hole, and sediment discharge of observed channel. The average deposit slope for the observed channel did not change apparently either conducting the dam-conversion simultaneously or gradually, however it increased with the increasing opening depth of dam No.3. With same opening depth applied at dam No. 3, deeper scouring hole was found at the downstream channel of dam No.4 when the dam-conversion was conducted simultaneously. Besides, the depth of downstream scouring hole of dam No.4 increased with increasing opening depth at dam No.3. The changes in the channel

cross sections between dam No.3 and No.4 mainly related to the opening depth applied at dam No.3 and the scouring range extended with increasing opening depth. Overall, the average deposit slope, changes in cross sections, scouring hole, and sediment discharge of downstream channel of dam No.4 increased with deeper opening depth of dam No.3. However, the effects on those channel morphologic phenomena were milder when the opening-developing procedures were applied gradually.

KEYWORDS: Formosan Salmon, Channel Habitat Improvement, Serial Check Dams, Model Experiment.

## 一、前言

由於稀有動物保育意識逐漸受重視，政府乃將國寶魚櫻花鉤吻鮭復育列為重點計畫，其中又以防砂壩阻礙魚類迴游路線的問題需迫切解決，因為防砂壩造成族群隔離、近親交配，導致生存能力降低，為了降低其生存阻力，需改善其棲息環境。本系列研究之目的，是針對七家灣溪集水區內之防砂壩做適當之部份拆除或開口處理，以期能恢復魚類的生機。雖然今年度之研究仍舊延續過去之研究方法與操作程序，然而不同於去年度之單一防砂壩之改善工程（段錦浩等，1998），今年之研究重點在於利用室內水工模型試驗探討改善工程前後所對應之河床與輸砂特性變化，以求得適當之系列防砂壩改善工程方式。而水工模型試驗之對象為高山溪之三號與四號防砂壩。三號壩距離四號壩約四百公尺，其集水區面積 19.41 平方公里也較四號壩之集水面積 17.95 平方公里略大。

大部分之河川棲地，深受水力因子中的水深、流速、剪應力，以及地文因子中河床的寬度、深度、坡度、型態等因子所影響。河床斷面間之水力狀態變化使得流水在整個河川造就多樣的河川棲地，而水流流速在空間及時間上的變化型態也對生活其中的生態體系具有顯著的影響。然而，如洪水、沖蝕及人為衝擊等因素，則是在河川生態系統的建構過程中扮演關鍵的干擾角色。因此，在各種層面的保育工作中，對影響河川生態系統的人類活動則需要

下列幾種適當的管理及控制：(1) 點源污染控制；(2) 土地利用規範：包括地下水保護區的劃定以及利用緩衝區來減少傳輸來源之污染(diffuse-source pollution)；(3) 水量調配以滿足河道以及淺灘的季節性流量需求；(4) 河道及洪氾平原管理以維持地文之多樣性；(5) 控制對人類在河川中如釣魚、娛樂等使用方式；(6) 生態之控制以避免某類物種的過度繁殖，包括生物的引進或入侵 (Petts & Calow, 1996)。

河川棲地復育工作之最基本要求是增加河川在型態、水文以及輸砂等方面之局部變異。在理想狀況下，棲地改善工程應針對渠道穩定(包括河床及河岸)、水力狀態之影響(如流速或水深)、以及河道之洪水含量等三方向加以評估(Hey, 1996)。其中，增加河川型態之多樣性不僅有助於河川本身之承載力(Carrying capacity)並且能提供魚類生命週期中各階段所需之棲息環境。除此之外，多樣性之河川型態也可提供給河川周圍賴以生存的動植物生態所需的自然歧異性(natural diversity)，直接或間接地對所欲保育的河川生物提供更佳的棲息環境(Larsen, 1996)。

基本上，棲地復育及改善工程可分為硬體及非硬體方法兩種方法(Hey, 1996)。非硬體復育方法(Nonstructural restoration)主要是在某一河段中重建其自然狀態，它可能包括河川蜿蜒、深潭、淺灘、垂直河岸、以及靜水區等對象之復原工作，而此類方法比較適合實施於下游河川，因為硬體復育方法的效果在下游河川不若上游河川般地顯著。而硬體復育方法(Structural restoration)則是運用不同人工河川構造物以製造深潭以及灘，並藉以保持河川之束縮狀態避免淤泥沉積，常見之構造物包括堰壩、導流設施、以及河床斜樑等三類。

(1) 堰壩(weirs)的主要功能在於製造堰壩上游之深潭河段，並在下游溢流區域造成沖刷。

而根據堰壩寬度與河幅的比例，可分為全幅(full-width)及局部(partial-width)堰壩。前者因其佈置方式而可產生不同形狀的深潭，如圖 1(a)，而後者則利用堰壩缺口所集中之水流在下游造成沖刷。然而各種堰壩都需要河岸保護工程來避免河岸沖刷。

(2) 導流設施(deflectors)係利用構造物藉以限制河道寬度，並使水流速度加快因而形成

局部沖刷與沙灘。根據佈置方式，可區分為翼形(wing)、直線形(straight)、Y形、V形、及A形等導流設施，如圖 1(b)所示。前兩者構造物與河岸直接連結，而後三者則是配置於河道當中。

(3) 河床斜樑(submerged vanes)為配置於河道當中並完全被水流淹沒的構造物，它利用二次迴流(secondary circulation)來促進床底沖刷，而其主要型態有對稱型(symmetrical)、非對稱型(unsymmetrical)、以及直線形(straight)。

根據以上之分類，進行改善工程後之高山溪三號及四號壩可視為硬體復育方法中的局部堰壩(partial-width weir)，而此類構造物在棲地改善上之功能（段錦浩，1993）與滯洪壩類似（葉昭憲、段錦浩，1994），主要在

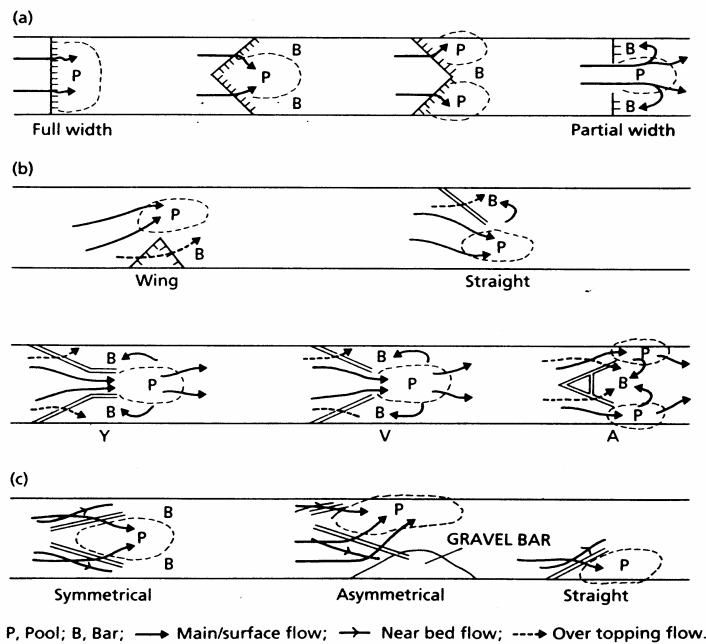


圖 1 河川復育硬體方法：(a)堰壩；(b)導流設施；(c)河床斜樑。(Hey, 1996)

於製造壩體下游面之沖刷與深潭。因此，本研究所建議之改善方式不僅為櫻花鉤吻鮭消除物理性障礙外，亦可增加其棲地之歧異度。針對上述各類棲地復育方法之優缺點及設計限制加以比較，其結果如表 1 所示。

表 1 河川復育方法之工程及環境表現

復育方法	優、缺點	設計限制
非硬體方法	優點： 1. 以自然方式重造棲地並增進視覺美感。 2. 於疏浚河段重造深潭淺灘、減縮被擴展的河道、在直流河段重現蜿蜒型態。	為最佳方案，但在直流河段需要足夠的空間才能復育河川之蜿蜒型態。
堰壩	優點： 1. 在管理與疏浚完善而使淺灘消失的上游河段，魚堰 (fish weir) 可提供些許的局部棲地變異性。 2. 在大量使用工程的都市上游河段，堰壩可提供棲地變異性及視覺改善。 缺點：將降低河川之水流容量，且會囚拘河床質與懸浮質。	在管理完善的上游河段以塊砌石壩較為適合。但在漫長且具深潭的下游河段則較無功效。
硬體方法	優點：翼型導流設施可在過度擴展的下游河道製造並保留深潭、在直流河段重現蜿蜒型態、增加棲地變異性。 缺點： 1. Y形、V形、及A形等導流設施具有非常高之侵略性且不自然。 2. 於迴水河段需要明顯之河道束縮工程配合。 3. 在上游河段可能會被水流所破壞。 4. 將降低河川之水流容量。	翼型導流設施適於無深潭積水之下游河段。
導流設施		
河床斜樑	優點：非壓迫性方法，以導引及簡化自然沖砂過程來製造深潭、增加棲地變異性。	以簡單之木製結構實施於在無深潭積水之下游河段，若在上游河段，則以大型塊砌石構造物較為適合。

(資料來源：Hey, R. D., 1996)

## 二、材料與方法

### 1. 試區概述

高山溪為大甲溪上游之支流，發源於次高山，向東流經國軍退除役官兵輔導委員會所開發之梨山武陵農場與向南流之七家灣溪在億年橋附近會合後改稱為七家灣溪，蜿蜒曲折至環山之北，匯入發源於次高山之四季郎溪，繼續向西南流至松茂之北而注入大甲溪主流。林務局先後於高山溪構築四座系列防砂壩，而位於七家灣溪上則有五座。

高山溪一至四號壩皆為傳統式重力防砂壩，其中二號與三號壩皆有設置副壩已經出現損壞，從壩體設置至今已有二十多年的時間，壩體上游皆呈穩定的狀態，溪流寬度少則 5-6

公尺，多則 30-50 公尺。一般而言，河道之寬身比（河道寬度/河道深度）皆小於 10，因此可判定高山溪是屬於寬淺型河流，其特性鮮少有深潭出現，對櫻花鉤吻鮭的棲息環境不利，迫使櫻花鉤吻鮭往下游移動而減少棲息的空間。由於河道淤積嚴重，使得河流寬度日益減小，導致河岸兩旁落葉不足、林蔭不夠，使得落葉、藻類之水生昆蟲相對減少，間接使以水生昆蟲為食之櫻花鉤吻鮭覓食更加困難。

本年度之試驗區域為高山溪三號壩上游至四號壩間之河段（見圖 2），而此河段之河道蜿蜒度相當大，河道在三號壩上游 230 公尺處約呈 90° 的變化，而在 300 公尺處也有呈 110° 的變化，河灘地中堆積土石之型態多呈現扁平狀且粒徑分佈多在數十公分之間，經現場量測其淤砂坡度約為 3.00%；四號壩體下游左岸有處新形成的大崩塌，崩塌處上方為大岩盤且其崩塌掉落之土石、樹木橫置在河道上，四號壩上游淤砂坡度已呈現穩定的狀態，其淤砂坡度為 2.79%。

## 2. 水文分析

在上年度之研究期間內，七家灣溪集水區附近之水文資料特性已經藉由月分布百分率加以確認，而頻率分析的結果也提供不同重現期情況下之設計暴雨總量（葉昭憲等，1998）。對於今年度之研究內容而言，推求相同設計暴雨下通過三號壩之流量歷線是在進行水工模型試驗之前最重要及基本之工作。而這過程包含設計暴雨量之決定、降雨分布狀態以及逕流歷線之推導三部分。然而，根據去年之研究成果可知，以赤嘉楊大山雨量站之資料配合 Log-Pearson III 機率分布函數可推估出頻率為 10 年、20 年及 50 年之 24 小時暴雨分別為 29Q 340 及 400 公厘；而降雨分布狀態，則由該站 75 年至 85 年間之 11 場暴雨依其總降雨量分類獲得不同降雨量下之時間分布曲線。





為產生設計暴雨通過

三號壩之逕流歷線，本研究利用壩址之地文參數（如集水區面積、主流坡度、主流長度）來推導該壩址之單位歷線。而所嘗試之方法仍有 1967 年吳建

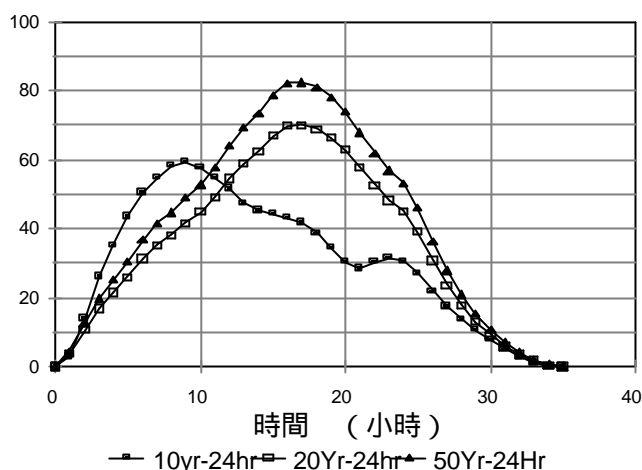


圖 3 雪山溪三號壩設計流量

民推求本省主要集水區之合成單位歷線、美國土壤保持局之三角型單位歷線、陳樹群之三角型單位歷線三種方式。最後，將不同頻率之設計暴雨量分配於 24 小時上，再配合上述三種單位歷線則可產生該壩址之設計流量歷線（請參見圖 3）。若採用去年度之歷線推估模式（吳建民合成單位歷線），本研究發現，雖然三號壩的集水面積較大，然而其單位歷線與四號壩之單位歷線並無明顯差異，因而所推算之設計流量歷線與四號壩之情況相似。

### 3. 模型試驗之試驗目的與工作流程

由於防砂壩上游在泥砂淤滿之後，河床處於穩定的動態平衡狀態（周明坤，1987），若將壩體進行改善而作部份的拆除，勢必會對上游河床與下游泥沙沖淤產生變化（江祥平，1998），故必須經由水工模型試驗來瞭解改善工程實施後河床型態的變化，以提供將來防砂壩壩體進行改善工程時之參考依據。在水工模型試驗進行前，必須經過完整之現場調查後，再經由「模型相似」理論進行模型各項參數的計算，最後將計算之結果再進行模型製作與室內實驗（毛壽彭，1987；左東啟，1985）。而本研究之工作流程如圖 4 所示。

#### 4. 模型理論與計算

水流及河床型態時時刻刻處於變動的狀態，這種變動河床的模型必須是由水流可挾帶泥沙運動的動床試驗 ( Graf, 1971 )。假若考慮上游河床粒徑組成的型態常由粗大卵礫石所組成，則動床泥沙模型試驗主要相似條件為：(1) 重力相似，要求原型與模型重力與慣性力的比值相等；(2) 阻力相似，要求原型與模型阻力與重力的比值相等；(3) 泥沙起動相似，根據水土保持技術規範第 71 條之規定，

要求原型與模型流速與泥沙起動流速的比值相等；(4) 輸沙量相似，要求原型與模型輸砂量與輸砂能力的比值相等；(5) 沖淤時間相似，要求原型與模型沖淤時間的比值相等。

經由現場量測壩體的尺寸 (請參見圖 5、圖 6)，可知三號壩的壩體寬度、厚度分別為 10.5 公尺與 4 公尺而有效壩高與溢洪口寬度

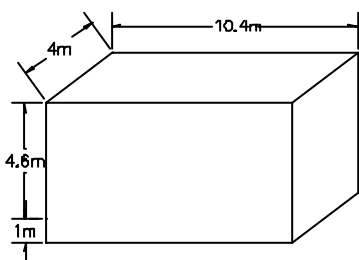


圖 5 高山溪三號防砂壩實測尺寸圖

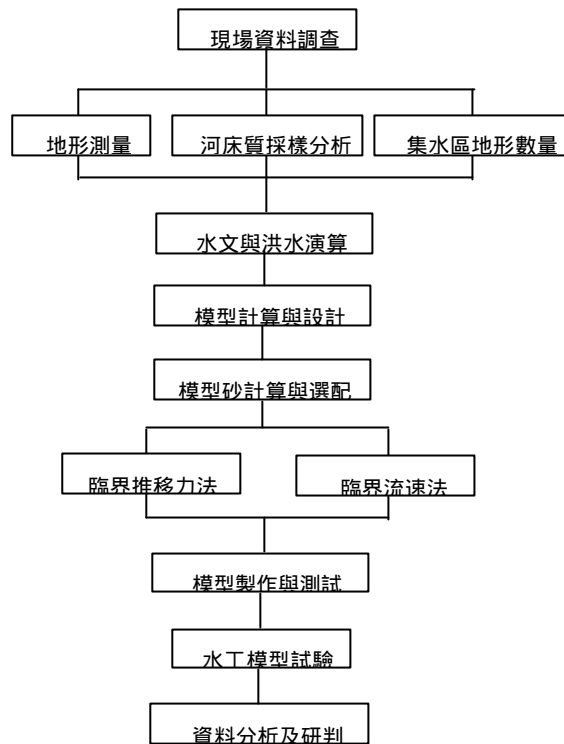


圖 4 水工模型試驗之工作流程圖

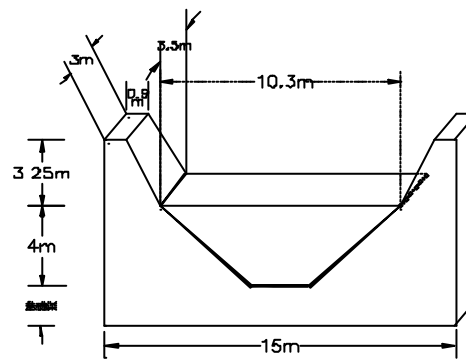


圖 6 高山溪四號防砂壩實測尺寸圖

分別為 4.6 公尺與 10.5 公尺；四號壩的壩體寬度、厚度分別為 15 公尺與 3.5 公尺而有效壩高與溢洪口寬度分別為 4 公尺與 10.3 公尺，現場河道寬約多為 20 公尺左右。為使現場河道適當地模擬至試驗工作平台上（長 4.5 公尺、寬 1 公尺、深度 0.3 公尺），因此在本試驗中所設定現場與模型水平長度縮尺為 120，垂直縮尺為 50。因而，模型試驗所需之各參數縮尺，經計算其結果如表 2 所示。

表 2 模型使用參數表

模型參數	水平長度	垂直長度	模型砂粒徑	試驗流量	輸砂量	時間
模型縮尺	$L_r=120$	$H_r=50$	$d_r=50$	$Q_r=42430$	$P_r=12350$	$T_r=60$

### 5. 模型製作

由於防砂壩壩體模型將設置在模擬河道中進行試驗，因此兩座壩體均採用壓克力材質製作而成。根據去年度之研究成果（葉昭憲等，1998），本試驗之三號壩、四號壩亦採用倒梯形（斜坡坡度 45 度）缺口之拆除方式。三號壩壩體之倒梯形開口（圖 7）上寬 8.67 公分、下寬 2.1 公分，深 9.2 公分，每次拆除一塊，共拆除 3 次；而四號壩壩體則是一次全部拆除為上寬 8.58 公分、下寬 2.08 公分、深 8 公分之倒梯形缺口（圖 8）。

而在現場河道模型方面，首先將高山溪三號壩上游之實測平面圖（圖 2）依比例尺 1 : 120 製成藍圖固定在長 4.5 公尺、寬 1.05 公尺的實驗工作平台上，再運用木板依河道之邊界進行模

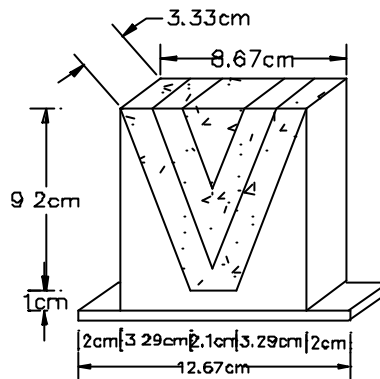


圖 7 高山溪三號防砂壩壩體模型

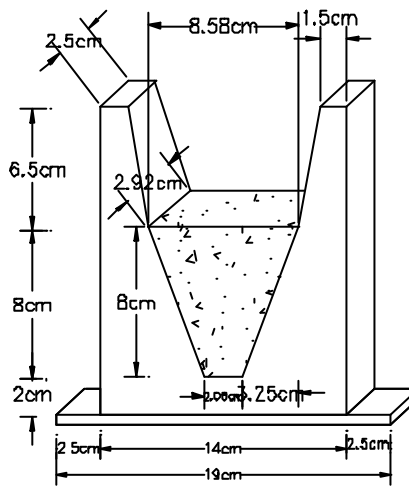


圖 8 高山溪四號防砂壩壩體模型

擬，若岩岸構造曲度過大時，則以化學粘土修補其形狀。由於木板必須長期浸泡在水中加上鋪砂後木板的側向壓力增大亦造成木板（立面）與實驗平台（平面）介面發生漏水的情形，因此介面需用防水膠與塑鋼土進行防水處理，以防止實驗過程中木板腐爛與水流外漏的情況發生。

#### 6. 試驗設備與試驗條件

試驗場地位於逢甲大學水利系之水工試驗室，本試驗所需設備計有試驗工作平台、定水頭裝置、閘門控制裝置、攔砂網、砂面測尺、自動加砂器等。而在試驗條件方面，考量兩個主要模擬條件：試驗流量以及試驗時間。由於本試驗模擬之流量，是以 50 年頻率洪水歷線為考量，而其流量歷線資料來源為觀測地點附近雨量站資料換算而得；其計算方式是將現場 50 年頻率暴雨洪水歷線之實際流量除以流量縮尺 ( $Q_r$ ) 42430，再經由流量單位的換算 ( $m^3 \Rightarrow l$ ，乘以 1000)，最後可得到模擬流量。在模擬時間方面，由於時間縮尺為  $T_r = 60$ ，可知在現場 1 小時的時間，經由時間縮比尺之換算為 1 分鐘。模擬試驗所應控制的條件表列於表 3。

表 3 水工模型之試驗條件

試驗條件項目	原型條件	模型縮尺
流量	採用現場推算之 50 年頻率暴雨	$Q_r=42430$
坡度	高山溪三號壩至四號壩間之河道為 3.00%	7.2%
	高山溪四號壩上游之河道為 2.79%	6.69%
河床砂石	現場採樣之河床砂石	$d_r = 50$
時間	推算現場之洪水歷程	$T_r = 60$
試驗壩體	現場實地量測之結果	$L_r = 120$ 、 $H_r = 50$

### 三、結果與討論

根據去年度研究之結論，壩體在進行「倒梯形」缺口拆除後，對上游河床的淘刷深度較淺且最終淤砂坡度較緩，故本年度之壩體拆除方式以「倒梯形」為主，而試驗內容著重於壩體改善方式對三號與四號壩間之河床變化互動關係、兩壩體之間以及四號壩上游河床沖淤

變化、水流中泥砂濃度的增量等方向。主要討論的項目則為：(1)河床最終淤砂坡度之變化，(2)滯洪坑與沖刷坑之影響，(3)河床橫斷面之變化，(4)輸砂量之分析。

### 1.河床最終淤砂坡度

三號壩體部份拆除之形式有三種而形成不同之缺口形狀，分別為斷面 A（拆除一塊）、斷面 B（拆除兩塊）及斷面 C（拆到壩底），而依據壩體拆除的深度可分為一次拆除與分次拆除的方式。本實驗試驗流量條件為 50 年頻率之洪水，所以模型壩體拆除缺口需經過整個洪水歷程之後，才進行河道中淤砂坡度的量測，並將所得之結果再推算回原型之最終淤砂坡度，實驗結果顯示不同的缺口形狀與拆除方式對最終河床淤砂坡度的影響亦有差異（表 4）。

表 4 三號壩拆壩的缺口形狀與拆除方式對兩壩之間河道淤砂坡度之影響

三號壩壩體缺口形狀	斷面 A (拆除一塊)		斷面 B (拆除兩塊)		斷面 C (拆到壩底)	
	一次	分次	一次	分次	一次	分次
斷面寬度(原型/模型)	3.5m / 2.9cm		7m / 5.8cm		10.5m / 8.7cm	
斷面深度(原型/模型)	1.75m / 3.5cm		3.5m / 7cm		5.25m / 10.5cm	
拆除的方式	一次	分次	一次	分次	一次	分次
模型河道之最終淤砂坡度(%)	8.54	8.81	9.05	9.22	7.99	8.07
原型河道之最終淤砂坡度(%)	3.56	3.67	3.77	3.84	3.33	3.36

四號壩未拆除前之上游河床淤砂坡度經現場測量為 2.79%，由於本次實驗之水工模型為不等比模型經過模型縮尺（ $L_r=120$ 、 $H_r=50$ ）轉換之後，河道中模型砂之淤砂坡度為 6.69%。若對四號壩壩體進行一次拆除，對最終河床淤砂坡度的影響如表 5 所示。

表 5 四號壩的缺口形狀與拆除方式對四號壩上游河道淤砂坡度之影響

四號壩壩體缺口形狀	斷面 D (拆到底)	
上底寬度(原型/模型)	10.3m / 8.6cm	
下底寬度(原型/模型)	2.5m / 2.08cm	
深度(原型/模型)	4m / 8cm	
拆除方式	拆除前	拆除後
模型河道之最終淤砂坡度(%)	6.69	11.43
原型河道之最終淤砂坡度(%)	2.79	4.76

### 2.滯洪坑與沖刷坑

由於四號壩完成改善工程時，原有之防砂壩亦會變成上游出現滯洪坑、下游出現沖刷坑之典型滯洪壩河床形態。上游滯洪坑與四號壩之缺口形狀直接關聯，而在壩體下游形成之沖

刷坑則受三號壩壩體拆壩的方式所影響。表 6 所列為四號壩進行改善工程後，50 年頻率洪水過後所留下之滯洪坑型態。

表 6 洪峰到達時四號壩上游滯洪坑之尺寸表

	寬度	長度	深度
模型滯洪坑	12 cm	8 cm	4.2 cm
原型滯洪坑	14.4m	9.6m	2.1m

水工模型試驗的結果發現，四號壩下游之冲刷坑深度會隨著三號壩壩體缺口深度而增加（表 7）。依實驗河床質的條件以堆積層為主，目前四號壩的有效壩高為 4 公尺且壩體下游並未施作消能設施，三號壩若以斷面 C 拆除方式，無論是一次拆除或分次拆除，經由模型率的換算對四號壩下游冲刷坑之深度為 2.9 公尺至 3.45 公尺之間，對四號壩安定性可能會有影響。由於本模型試驗無法模擬現場之岩盤結構，因此四號壩下游是否如試驗般產生如此深度之冲刷坑仍待後續現場觀測資料加以驗證。但依目前四號壩構築在岩盤基礎上之情況研判，壩體缺口對壩體的安定性影響程度應會相對降低。

表 7 四號壩下游冲刷坑深度與三號壩壩體缺口形狀及拆除方式之關係

三號壩壩體缺口形狀	缺口斷面 A (拆除一塊)		缺口斷面 B (拆除兩塊)		缺口斷面 C (拆到壩底)	
	一次	分次	一次	分次	一次	分次
三號壩缺口拆除方式						
模型四號壩冲刷坑深度 (cm)	2.1	2.3	2.5	1.6	6.9	5.8
原型四號壩冲刷坑深度 (m)	1.05	1.15	1.25	0.8	3.45	2.9

### 3.河床橫斷面之變化

當四號壩壩體缺口拆除時，上游淤砂會大量排至試驗河道中，但隨著三號壩壩體缺口拆除之後，除此河段泥沙排出外，上游來砂亦會因河床型態改變（坡度變陡）而增加，所以河道冲淤的變化相當複雜。此外，河道橫斷面也會因河道的彎曲而產生不同的改變，尤其在經過洪水歷程之後，斷面的變化與常流量時斷面有顯著的不同。因此，本實驗針對三號壩壩體缺口的拆除方式（一次拆除、分次拆除）對上游河道橫斷面之影響進行分析，並在三號壩壩至四號壩之間河道設置 17 個觀測斷面，四號壩上游將設置 6 個斷面。三號壩上游之斷面 3-3 與河道第一個 90 度的轉彎段為斷面 3-8 至斷面 3-9 之間，斷面 3-11 位在河道第二個

110度的轉彎段，在整個洪水歷程中是屬於沖刷較嚴重的斷面，將來有可能形成深潭。

由實驗結果得知，四號壩在拆除斷面的缺口時，初期會在上游面形成 V 字型的深槽，但隨著流量逐漸增大，水流開始向深槽兩側淘刷，在洪水達到尖峰流量時，此時上游橫斷面幾乎呈水平的狀態，在洪水退水的階段才又有一道深槽形成。而三號壩體之拆除方式（一次拆除或分次拆除）對各觀測斷面之變化並無顯著之影響，斷面的變化主要與三號壩壩體缺口拆除的深度有關，一般而言，壩體缺口深度愈深影響上游淘刷範圍的距離愈遠。在實驗過程中，河道原有之河灘地形相繼消失，取而代之是明顯的深槽，使水深相對的提高，而增加水中生物的棲息空間與繁殖的機會，對櫻花鉤吻鮭的生態環境有明顯的改善。

#### 4. 輸砂量分析

在壩體缺口尚未拆除時，上游的加砂量與下游的排砂量大致維持沖淤平衡的狀態。為瞭解此平衡沖淤狀態是否因進行壩體改善工程而改變，故於不同流量下對壩體上

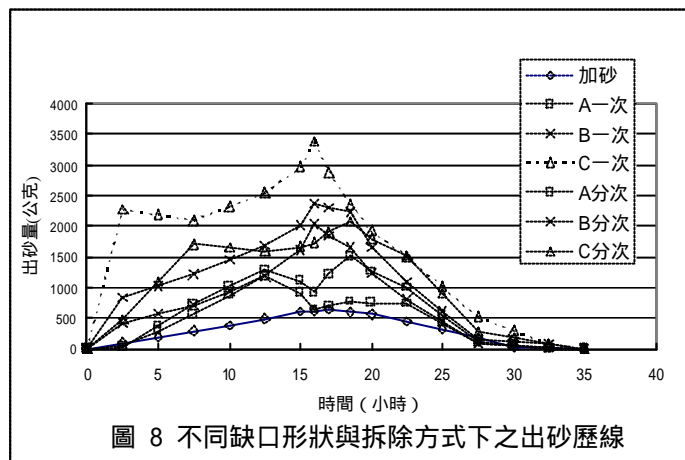


圖 8 不同缺口形狀與拆除方式下之出砂歷線

游沖刷下來之泥砂進行承接與量測的工作，並依據各級流量所承接泥沙總量與相對應之模擬時間繪製成壩體缺口拆除後之出砂歷線圖（圖 9）。

##### (1) 壩體拆除的方式與拆除斷面缺口之比較

若三號壩之缺口形狀為斷面 A 時，不論三號壩斷面 A 是由一次拆除與分次拆除之方式所產完成，兩種拆除方式之出砂歷線圖皆可發現兩個有尖峰出砂量值，而與其所對應之時間亦相同（表 8）。由於四號壩進行壩體改善後其上游會有大量的淤砂排出，但大部份砂石會暫時淤積在三號壩至四號壩間之河道。隨著流量的增加，泥沙逐漸向下游輸移，因此三號壩斷面 A 在拆除的初期主要的來砂量來自三號壩至四號壩之河道間的淤砂，在接近洪水尖峰

流量的階段，此時原從四號壩上游排出的淤砂逐漸運移至三號壩上游，而出現了第二個尖峰的出砂量。第二個尖峰出砂量分次拆除會比一次拆除明顯較小，其主因是分次拆除過程中，拆除時間延長而將泥砂分散的排出，因而降低單位時間的尖峰出砂量。

表 8 三號壩缺口（斷面 A）不同拆除方式下之對應尖峰出砂量（單位：g/min）

斷面 A 拆除方式	第一個尖峰出砂量	第二個尖峰出砂量	模擬時間 (hr)
一次拆除	1268	1513	10~15
分次拆除	1182	766	17~20

若三號壩之缺口形狀為斷面 B，模型試驗顯示在拆除過程的初期，一次拆除所產生的泥沙增量比分次拆除為多（見表 9），而且輸砂量會隨著洪水到達尖峰流量時而達到最大（約為上游河段加砂量的兩倍）。由於上游泥沙的供應量不足下游泥沙的排出，因而得藉由河床淘刷以產生所需的泥砂。

表 9 三號壩缺口（斷面 B）不同拆除方式下之對應尖峰出砂量

斷面 B 拆除方式	初期出砂量 (g/min)	尖峰出砂量 (g/min)	模擬時間 (hr)
一次拆除	830	2370	0~5
分次拆除	422	2030	15~17

若三號壩之缺口形狀為斷面 C，模型試驗顯示其出砂歷線之主要特徵在於改善工程的初期即有大量的泥砂排出，而這些初期的大量泥沙對下游所可能產生的災害，在未來實施壩體改善工程的過程中必須加以考慮。若針對不同之三號壩缺口形狀與拆除方式組合下所產生出砂歷線之初期出砂量進行比較，則可得表 10。

表 10 不同三號壩缺口形狀與拆除方式所對應之初期出砂量及其高峰出現時間

壩體拆除的方式	斷面 A(g/min)	斷面 B(g/min)	斷面 C(g/min)	模擬時間 (hr)
一次拆除	18	830	2274	0~5
	744	1216	2096	5~10
分次拆除	32	422	480	0~5
	556	720	1708	5~10

## (2) 總出砂量之分析

泥沙排放總量是壩體在進行不同之缺口形狀改善工程與拆除方式時，經過 50 年頻率的洪水歷程後，然後累計各級流量所對應模擬時間之出砂量總和，若定義總加砂量( 11.61 kg )與總出砂量之比值為相對排砂比，則此比值將可用以顯示不同改善工程組合（缺口形狀與拆



除方式)所產生之影響,而試驗結果如表 11 所示。當壩體改善為相同之缺口形狀時,一次拆除的施工方式所產生的相對排砂比大約為分次拆除的 1.5 倍,因此壩體缺口的拆除方式應以分次拆除為佳。

表 11 不同改善工程組合之對應總出砂量 (總加砂量 11.61 kg)

三號壩 缺口形狀	一次拆除		分次拆除	
	總出砂量 (kg)	相對排砂比	總出砂量 (kg)	相對排砂比
斷面 A	22.19	1.91	16.67	1.43
斷面 B	36.67	3.16	25.31	2.18
斷面 C	58.90	5.07	37.75	3.25

### (3) 泥沙濃度的變化

當壩體缺口深度改變時,泥沙排出量會隨之變化,進而影響水中的泥沙濃度與水中生物的繁殖。為瞭解不同的壩體拆除方式對泥沙濃度變化的影響,本研究以重量百分濃度來計算並作比較,而計算公式為:泥沙濃度 = 泥沙排出量 / (泥沙排出量 + 水流重量)。而不同改善工程組合(缺口形狀與拆除方式)所產生之泥沙濃度則如表 12 所示。

表 12 不同改善工程組合下之對應泥沙濃度與濃度增率

三號壩 缺口形狀	一次拆除			分次拆除		
	總出砂量 (kg)	泥沙濃度 (%)	濃度增率	總出砂量 (kg)	泥沙濃度 (%)	濃度增率
拆除前	3.89	0.21	1	3.89	0.21	1
斷面 A	22.19	1.18	5.24	16.67	0.89	4.24
斷面 B	36.67	1.93	9.19	25.31	1.34	6.38
斷面 C	58.90	3.07	14.62	37.75	2.00	9.52

由上表可知,不管拆除方式為何,泥沙排出量與其濃度會隨著缺口深度之增加(由斷面 A 至斷面 C)而增加,因而泥沙濃度之增加倍數亦隨之增大。然而一次拆除的方式之泥沙濃度增率比分次拆除的泥沙濃度增率高約 1.5 倍,因而分次拆除的壩體改善施工方式對泥沙濃度增率以及下游櫻花鉤吻鮭的棲息地衝擊較小。

## 四、結論與建議

本模型試驗研究主要針對系列防砂壩在淤滿的狀態下進行壩體部份拆除,以便瞭解壩體改善工程對壩體上、下游河床型態以及沖淤變化的影響。而試驗對象為高山溪三號壩至四

號壩上游的河段。跟據試驗結果，本研究獲致以下之結論與建議：

## 1. 結論

- (1)河床淤砂坡度之變化：對於相同之三號壩缺口形狀（深度相同），無論拆除方式如何，其對河床之平均淤砂坡度影響不大；然而河床之平均淤砂坡度則會隨壩體缺口深度之增加而變大。
- (2)滯洪坑與沖刷坑之影響：當壩體改善工程剛完成時，壩體上游因為淤砂流出與流量增大而逐漸形成深槽，並且有向上游與深槽兩側淘刷發展的趨勢，因此四號壩上游左岸 10 至 20 公尺範圍內沖刷情況較嚴重，而三號壩上游左岸 5 至 10 公尺處為河道的轉彎段，且改善工程後所形成的滯洪坑亦會偏向上游左岸，故造成水流直接淘刷邊坡坡腳之情形。在壩體下游之沖刷坑深度方面，三號壩壩體的拆除方式會對四號壩下游沖刷坑產生影響，對於相同之斷面缺口形狀，一次拆除比分次拆除造成更深的沖刷坑度，而且沖刷坑深度會隨著下游壩體拆除的深度增加而變大。若以試驗條件而言（堆積層河床），依目前四號壩的有效壩高為 4 公尺且壩體下游並未施作消能設施之狀況下，三號壩改善為斷面 C 之缺口形狀，則無論拆除方式如何，四號壩下游沖刷坑之深度可達到 2.9 公尺至 3.45 公尺之間。
- (3)河床橫斷面之變化：壩體改善的拆除方式與橫斷面的變化並無顯著關係，橫斷面的變化主要與壩壩體之缺口形狀（深度）有關，壩體缺口深度愈深則上游淘刷範圍愈大。在試驗過程中，明顯的主深槽取代原有河道之河灘地形，進而使水深相對提高，對櫻花鉤吻鮭生態環境的重建有明顯的改善。三號壩上游之斷面 3-3、斷面 3-8 至斷面 3-9 之間、斷面 3-11 在整個洪水歷程中是屬於沖刷較嚴重斷面，其中以 3-11 斷面沖刷深度較深，將來會形成一處深潭可提供水中生物與魚類棲息。
- (4)輸砂量與泥砂濃度：不管拆除方式為何，泥砂排出量與其濃度會隨著缺口深度之增加（由

斷面 A 至斷面 C) 而增加, 因而泥砂濃度之增加倍數亦隨之增大。然而一次拆除的方式之泥砂濃度增率比分次拆除的泥砂濃度增率高約 1.5 倍, 因此分次拆除的壩體改善施工方式對泥砂濃度增率以及下游櫻花鉤吻鮭的棲息地衝擊較小。

## 2. 建議

- (1) 由於本研究之試驗條件為堆積層河床與五十年洪水, 因此現場兩岸與河床底層之可能岩盤結構無法完全模擬, 進而在實際進行三號壩體改善工程時 (三、四月間之高山溪估水期), 河道斷面之變化以及四號壩下游之沖刷坑深度可能會因岩盤保護與低流量等因素而減緩, 然而這些可能變化必須靠現場觀測資料方能確定。
- (2) 進行壩體改善時, 三號壩上游左岸 5 至 10 公尺 (斷面 3-2 至 3-3) 與四號壩上游左岸 10 至 20 公尺 (斷面 4-2 至 4-3) 範圍內沖刷為較嚴重, 現場會踏勘發現此處邊坡目前雖有岩壁保護, 但仍須考量其將來影響。
- (3) 若依堆積層河床型態的試驗條件而言, 三號壩若以斷面 C 進行改善, 則四號壩下游沖刷坑之深度達到 2.9 公尺至 3.45 公尺之間 (四號壩有效壩高為 4 公尺), 因該壩下游並未施作消能設施, 為避免洪水來臨之際可能會對四號壩影響, 應考慮對應之保護措施。
- (4) 若三號壩之缺口形狀為斷面 C (拆到壩底) 時, 無論是一次拆除或分次拆除, 其出砂歷線的特徵在於初期即有大量的淤砂排出, 而為防止泥沙瞬間增量 (泥砂濃度) 對下游產生的災害, 建議在三號壩下游設置攔砂設施, 減緩泥砂濃度的增量對壩體下游櫻花鉤吻鮭的衝擊。
- (5) 壩體一次拆除的改善方式會產生比分次拆除更大的泥沙排出量 (泥砂濃度), 所以壩體拆除缺口時, 應採用少量分次拆除的方式進行, 除了可避免泥沙排放量 (泥砂濃度) 增加, 對施工過程的不確定性亦可有效降低。
- (6) 目前三號壩的副壩呈現懸空狀態, 當三號壩進行拆除部份壩體時, 上游的泥砂會隨著水流大量的排出, 此舉可以有效減緩壩體下游繼續淘刷情況, 而上游來砂亦可減少壩體上

游、下游高度的落差，提供一條暢通的迴游路線，同時由於壩體下游淘刷減緩，壩體的安定性也相對提高。

## 五、誌謝

本研究由內政部營建署雪霸國家公園管理處經費補助（計畫編號：雪霸 8805）。研究期間，雪霸國家公園管理處在試驗壩址之現場勘查以及櫻花鉤吻鮭之生態習性等方面提供許多寶貴意見及建議，促使本計畫順利進行，謹此致謝。

## 六、參考文獻

- 毛壽彭，1987。水工模型試驗，中國土木水利工程學會。
- 左東啟，1985。模型試驗的理論與方法，水利電力出版社，p.96~144。
- 江祥平，1998。防砂壩改建滯洪壩後上游河床型態變化之研究，國立中興大學水土保持研究所碩士論文。
- 周明坤，1987。防砂壩上游河床之沖淤變化觀測與試驗研究，國立中興大學水土保持研究所碩士論文。
- 段錦浩，1993。大甲溪水潭水文及河道疏濬及沖淤研究 – 三年總結成果報告，國立中興大學水土保持學系。
- 葉昭憲，1988。系列防砂壩之沖淤試驗與初步規劃，國立中興大學水土保持研究所碩士論文。
- 葉昭憲、段錦浩，1994。滯洪壩之水文水利特性，中華水土保持學報，25(4)，p.181-189。
- 段錦浩、連惠邦、葉昭憲，1998。七家灣溪河床棲地改善之試驗研究，國家公園學報，8(2)，p.179-190。
- Graf, W. H. 1971. Hydraulics of Sediment Transport, McGraw-Hill book company, P.131~135.
- Hey, R. D. 1996. Environmentally Sensitive River Engineering. In: Petts, G. et. al. (eds.), River Restoration: Selected Extracts from the Rivers Handbook, Blackwell Science Ltd.
- Larsen, P. 1996. Restoration of River Corridors: German Experiences. In: Petts, G. et. al. (eds.), River Restoration: Selected Extracts from the Rivers Handbook, Blackwell Science Ltd.
- Petts, G. E. & P. Calow. 1996. The Nature of Rivers. In: Petts, G. et. al. (eds.), River Restoration: Selected Extracts from the Rivers Handbook, Blackwell Science Ltd.