

防砂壩壩體移除之模型試驗-以七家灣溪一號壩為例

王傳益⁽¹⁾ 葉昭憲⁽¹⁾ 鄭人豪⁽²⁾ 段紀湘⁽³⁾ 呂其倫⁽⁴⁾

摘要

台灣河川坡陡流急，豐枯季節流量差異大，因此河床沖淤變化劇烈，加上橋墩基礎之阻水作用下，產生局部沖刷，威脅到橋樑的安全。因此瞭解橋墩局部沖刷機制，提出適合之沖刷深度推估公式，成為當前重要課題。

研究結果顯示，於各評鑑標準下，遺傳演算法(GA, Genetic Algorithms)產出結果之精度絕大部分優於傳統迴歸方法(Kothiyari)。而各項評鑑標準所得之最佳公式與傳統迴歸方式比較其線性關係及判定係數後，結果顯示以評鑑標準為 MAPE 時，GA 所搜尋之優化解於全局搜尋及驗證與預測上，均較其他評鑑標準準確，其中又以 MAPE3 推估所得之結果精度最佳，未來可利用該式推估均勻橋墩之沖刷深度。

GA 可在一種相對較簡單且穩定的模式中建立，使用遺傳演算法可以有效推估橋墩的沖刷深。發展 GA 只需克服部分困難即可解決許多複雜的問題，且 GA 之執行時間較傳統複迴歸分析方法更為省時。此外，本研究新增各種不同文獻資料做驗證，證明 GA 演算結果具適應性及可靠性。

(**關鍵詞**：防砂壩、槽偏量、最大沖刷深度)

Model Experiment on the Check Dam Removal: A Case Study of Chi-Chia-Wan Creek Dam NO.1

Chuan-Yi Wang⁽¹⁾ C.H. Yeh⁽¹⁾ J.H. Cheng⁽²⁾ J.S. Duan⁽³⁾ C.L. Lu⁽⁴⁾

Associate Professor^{(1)*}, Master⁽³⁾, Graduate Student⁽⁴⁾, Department of Water Resources Engineering and Conservation, Ph.D. Candidate⁽²⁾, Institute of Civil and Hydraulic Engineering, Feng Chia University, Taichung 407, Taiwan, R.O.C.

ABSTRACT

-
- (1) 逢甲大學水利工程與資源保育學系副教授(通訊作者 e-mail:cywang@fcu.edu.tw)
 - (4) 逢甲大學土木及水利工程研究所博士生
 - (2) 逢甲大學土木及水利工程研究所博士候選人
 - (3) 逢甲大學水利工程與資源保育學系碩士

Check dam is one of the most common sediment prevention structures for rivers in Taiwan. Its main functions are to intercept the coarse sediments, regulate sediment transportation, prevent erosions and restrain the debris flow. However, it also causes a great influence to the river ecosystem. In recent years, check dam improvement becomes a very important issue due to the bank safety and river ecological restoration considerations. This study is aimed to investigate the effect of the improvement of deposit check dam on riverbed stability and habitat variation. The check dam No. 1 of Chi-Chia-Wan Creek is selected as the research target to evaluate various dam removal cases by using hydraulic experiments to understand riverbed stability before and after dam removal. The improvement cases included the removals of the left, middle, and right parts of the dam under usual flood flow Q_2 and the 50 years flood flow Q_{50} . To fulfill the riverbank safety requirement, this research provides appropriate dam removal strategy using the indicators of horizontal channel trough-line shifting and longitudinal slope stability, which can be served as a design and management reference for relevant units in the future.

The results showed that all kinds of dam removals induced riverbed scours upstream, and depositions and increase stability downstream. The location of maximum scour depth usually occurs at the concave bank and nearby the upstream of dam removal site. The relative horizontal channel trough-line shifting for the removal of the left bank of the dam is smaller than those for the other cases, and the channel slope is milder than those for the other cases. In addition, the location of maximum scour depth is far away from the levee bank when the left bank of the dam is removed. Therefore, this study suggests that the removal of the left bank (top width $b/2$ and bottom width $b/3$) of the dam to be an appropriate improvement program.

(Keywords: check dam, horizontal channel trough-line shifting, maximum scour depth.)

前言

1. 研究動機

近年來對於工程上的要求非僅結構上的安全要求外，更要求有保育生態的概念，而台灣先前做的許多防砂壩雖然現今使用安全上暫無虞慮，過去未曾將自然生態的保護納入設計考量，因此防砂壩造成許多自然生態的消失或破壞。壩體移除不應只考慮拆除壩體，應可考量在既有的壩體上做出不同的移除方式，基於結構性安全、可行性外，更應導入環境生態之考量，以符合更多元化的需求及對經濟面、安全要求及自然生態之衝擊

減至最低。

臺灣櫻花鉤吻鮭是臺灣地區特有亞種的陸封型鮭魚，防砂壩所造成水溫變化與族群阻隔，則是造成櫻花鉤吻鮭棲地環境物理性改變之最顯著因素，因此雪霸國家公園管理處於 1999 年至 2001 年間，陸續完成七家灣溪支流高山溪四座防砂壩之壩體改善工程，並對壩體改善後之河道演變及棲地狀況進行多年之追蹤調查。根據近年櫻花鉤吻鮭族群調查結果，顯示防砂壩之壩體改善工程對其族群生存發展有顯著功效。七家灣溪尚有多座防砂壩存在，櫻花鉤吻鮭棲地環境之人為物理性改變仍未完全消除，因此有必要深入

研究探討。

2. 研究目的

防砂壩壩體移除之評估研究，以七家灣溪防砂壩為例，而七家灣溪眾多防砂壩中體積、高度及淤砂量皆遠超過高山溪內之四座防砂壩，其中又以七家灣溪一號壩之土、砂淤積量最為可觀，壩上下游落差亦大。因此，本研究針對七家灣溪一號壩淤滿壩體移除之實施方式及規模對於河道穩定及生態棲地之影響；即藉由水工試驗，進行七家灣溪一號防砂壩壩體之不同改善方案評估。壩體改善方案分為拆除位置(拆除左側、中間、右側部分壩體)及拆除寬度($b/2$ 、 $b/3$ 、 $b/4$ ， b ：壩體寬度)，在 2 年尋常洪流量及 50 年重現期距流量條件下進行相關試驗。於河防安全前提下，透過槽偏量及最大沖刷位置等指標判定河床穩定性，提出較佳之壩體移除方案，供相關單位未來設計之參考。

文獻回顧

隨著人類社會對自然環境保育意識的提昇，當某項人類活動或構造物對自然環境之衝擊超過其所能提供之服務時，該活動或構造物則會面臨停止或排除的可能性，而堰壩移除(dam removal)則是近年來常見的案例，本研究首先對國內、外堰壩移除的相關經驗及文獻資料進行蒐集及分析。

1. 國內堰壩移除經驗與文獻

林務局(1992)^[1]在台灣省近期防砂壩現況調查報告中提到，至 1991 年止有記錄之防砂壩共有 2,855 座(1976 年以前興建有 1,027 座，1976 年至 1996 年間興建有 1,828 座)，其

高度在 3 至 25 公尺間不等。

綜觀國內有關堰壩移除的實例及研究，僅限於營建署雪霸國家公園管理處提出七家灣溪支流高山溪四座防砂壩之改善方案。由於臺灣櫻花鉤吻鮭是臺灣地區特有亞種的陸封型鮭魚，其棲息環境生存條件包括低水溫、高溶氧、水量充沛、覆蓋充分、豐富的無脊椎動物數量、無污染的環境及適於產卵的底質等。防砂壩所造成水溫變化與族群阻隔，則是造成櫻花鉤吻鮭棲地環境物理性改變之最顯著因素。

由於 1997 年國內並無堰壩改善之相關研究，又鑑於壩體改善目的為特定魚類棲地復育，因此壩體改善計畫係以模型試驗模擬不同方式在河道環境及泥砂輸送之衝擊，綜合生態專家之實施時機建議後，呈報相關主管機關核可，最後進行改善工程以及後續監測調查。而管理單位為避免改善工程造成不可預期的生態衝擊，因此改善對象的選擇以非主要棲息地之高山溪四座防砂壩為主；而壩體改善的順序決策，亦基於上游壩體優於下游壩體之原則而產生。高山溪四座防砂壩部份移除而防砂壩基礎及部分壩體仍被保留。

因而雪霸國家公園管理處於 1999 年至 2001 年間，陸續完成七家灣溪支流高山溪四座防砂壩之壩體改善工程，並對壩體改善後之河道演變及棲地狀況進行多年之追蹤調查。以每年二至四次的頻率進行防砂壩壩體改善對河道地形變化及棲地組成之影響追蹤調查；在累積數年資料後，將壩體改善後之河道泥砂體積與降雨資料予以比對，以高山溪三號為例，其壩體上游原淤蓄的泥砂在 18 個月的期間內陸續被帶走，其後則保持動態

平衡之狀態。

在段錦皓、連惠邦、葉昭憲(1998)^[2]對七家灣攔砂壩整建的計畫中就曾以此順序發現：防砂壩的試驗中顯示防砂壩改善成滯洪壩後，對棲息環境之影響及其改善效果顯著，在水工模型試驗中顯示以拆除部分壩體作為恢復河川魚類生態棲息環境之作法，對溪流安定及泥砂輸移均未造成激烈之衝擊，具有相當的可行性。葉昭憲等人(2007)^[3]進一步對拆除工程進行實驗發現，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. 國外堰壩移除經驗與文獻

由於美國法律係透過運作執照之定期審查與核發來對堰壩的安全性進行控管，再加上因為結構完整性的逐漸惡化和淤積物累積等因素，大多數水庫的功能壽命是大約為 60 至 120 年，且在 2020 年前在美國有超過 85% 的水庫或堰壩將接近其操作壽命，因而修復或升級為原本最常被選擇來處理那些老化和低於標準堰壩的改善手段 (Doyle et al., 2003)^[4]。

堰壩移除在 1970 年以前一直都是相對少見的方式，雖然之後逐漸被採用，但在二十世紀期間約有四百個堰壩被移除，圖 2 顯示在 90 年代移除的數量超過 150 座 (The Heins Center, 2002)^[7]。因此，有關堰壩移除的大量研究成果陸續於過去十年間發表，美國土木工程師協會 (ASCE) 並針對相關議題在 2004 年七月至 2005 年二月之間於五個城市舉辦研習會，以使其會員能對堰壩移除所需考量的因素、衝擊、過程及法規有進一步而完整的概念。

美國由於在近數年內有眾多堰壩已達使用再評估階段，對於是否核准堰壩繼續使用或者將之拆除之決策需求相繼出現。因而除對於壩體改善所產生之生態及環境衝擊影響之相關研究逐漸出現外，同時對於壩體改善決策之討論及研究亦逐漸獲得原則性之共識。

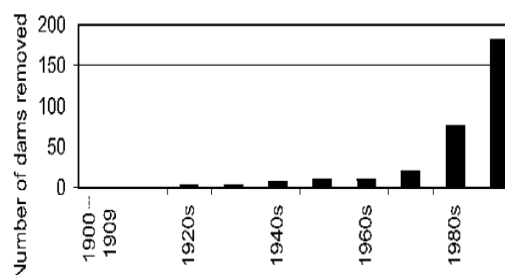


圖 1 美國境內於二十世紀內移除的堰壩數目^[7]

Fig1. The number of dam removal of the United States in twentieth century

圖 2 為 Poff & Hart (2002)^[6]對美國境內於二十世紀期間所移除的 467 座堰壩進行統計發現，堰壩移除的數量在最後二十年急速增加，且在九十年代之總數接近兩百座，但所移除的堰壩近半數為低於五公尺的小型堰壩約為 220 座，而高度低於十公尺之堰壩則佔所有移除總數約七成。

而對於堰壩在當地或景觀環境所產生之生物物理過程 (biophysical process) 影響，該研究則利用一流程圖表達單元間之關連，詳如圖 3 所示。

當氣候與集水區組成直接影響河川系統的水流、泥砂、水溫及化學等狀況時，而生物量則受生物地理 (biogeography) 條件影響，雖然河川系統與生物量會相互影響，但是河川對生物量之作用較大。

堰壩對河川環境生態的衝擊則因源自其

尺寸及操作方式，此兩因素皆會影響水力停留時間，而堰壩之延長水力停留時間則明顯作用於輸砂過程、化學傳輸及河道水體儲蓄，但對水溫層化及傳輸障礙之影響較小，堰壩大小則對水溫層化及傳輸障礙之影響較大，但對河道水體儲蓄影響較小；這些影響將導致泥砂輸送減少、能量基礎改變、流況變化、水溫狀況改變及生物破碎化，最終整體表現於當地及景觀的影響。

在壩體改善決策之眾多相關研究中，以 The Heins Center^[7]於 2002 年所出版一份研究報告” Dam Removal: Science and Decision Making” (The Heins Center, 2002)針對壩體改善之各類型衝擊、考量因素及決策流程有詳細之描述與討論，參與該研究之一群專家小組設計出一套關於堰壩保留或者移除之決策方法，包含以下內容：

- (1) 建立目標及決策基礎：這步驟包括對於此決策及其在環境、社會、經濟、法規和政策後果之資訊收集任務。
- (2) 確認關注之主要議題：從壩體安全保障到與有關人士之文化關注議題。

評估潛在結果並且收集有關河川堰壩、法律政體、生態、社會和經濟體制等要素相關之操作資料；這些評估則取決於有助瞭解現在和可能將來條件的一系列指標。

研究區域與水工試驗

1. 研究區域

七家灣溪一號壩為傳統重力式防砂壩，位於雪霸國家公園管理站東側之七家灣溪河道中詳如圖 4 所示。利用位在七家灣溪與有

勝溪匯流口之七家灣流量站與有勝溪下游有勝溪站 1996~2005 年之流量資料進行分析。

2. 水工試驗

經由現場量測壩體的尺寸如圖 5 所示，現場上游河道寬約多為 120 公尺左右，下游縮減為約 30 公尺，七家灣溪一號防砂壩左岸為天然岩盤，右岸則由混凝土和卵石構成壩翼，下游水面以上之壩體高度為 15 公尺、壩體寬 28.25 公尺、壩頂溢洪道厚度 3.2 公尺。

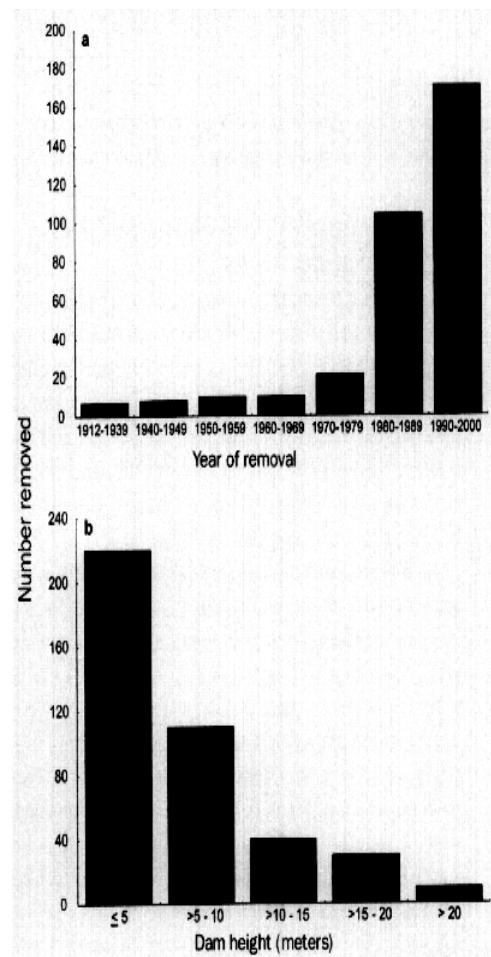


圖 2 美國境內移除堰壩之年數量及高度分布^[6]
Fig2. The number of dam removal and height distribution of the United States

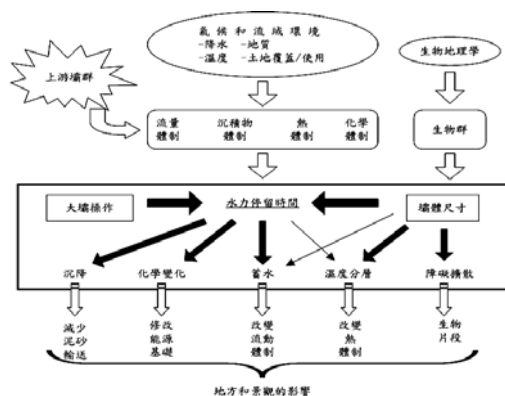


圖 3 壩壩對生物物理過程所產生之影響^[6]

Fig3. Influence of dam on biophysical process



圖 4 七家灣溪一號防砂壩位置圖

Fig4. The location of No.1.dam of Chi-Chia-Wan Creek

七家灣溪一號防砂壩現地研究區段長為 600m、最寬之河寬為 160m、最床質平均粒徑 (dm)為 18.65cm、上游平均坡降約為 0.011，2 年重現期距洪峰流量（尋常洪流量） $Q_2 = 76.6\text{cms}$ 及 50 年重現期距洪峰流量 $Q_{50} = 273.3\text{cms}$ ，受限於試驗室空間，因此採用之模型水平縮尺(L_r)為 200，垂直縮尺(V_r)為 100，相關物理量比例尺關係詳見表 1。

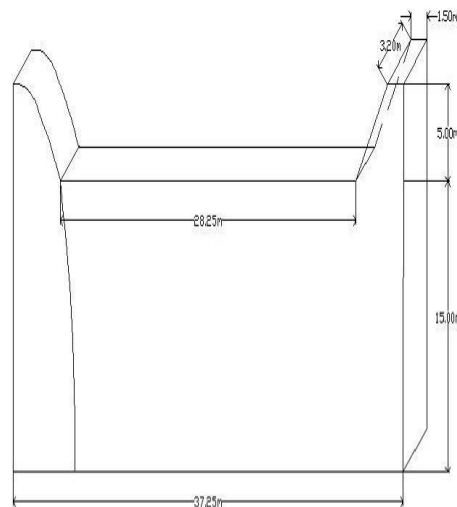


圖 5 七家灣溪一號壩相關尺寸示意圖

Fig5. The schematic diagram of dam No.1 of Chi-Chia-Wan Creek

表 1 試驗模型縮尺與原型資料比較

Table1. Comparison of scale between experiment model and prototype

項目	原型(prototype)條件	模型(model)縮尺	模型(model)試驗條件
流量	尋常洪流量 $Q_2=76.6\text{cms}$	$Q_r=L_r V_r^{3/2}$	$Q_2=0.00038\text{cms}$
	採用現場推算之 50 年洪峰流量 $Q_{50}=273.3\text{cms}$	$Q_r=200,000$	$Q_{50}=0.00136\text{cms}$
坡度	現場平均坡降 $S=0.011$	$S_r=2$	$S_1=0.011$ $S_2=0.022$ $S_3=0.033$
粒徑	平均粒徑 $dm=18.65\text{cm}$	$d_r=158.7$	$dm=1.18\text{mm}$
時間	尋常洪流量 Q_2	---	2 小時
	最大 24 小時暴雨(50 年重現期距洪峰流量 Q_{50})	---	1 小時
壩體	現場實地量測資料	不等比縮尺 ($L_r=200$ 、 $V_r=100$)	壩寬 $b=14.125\text{cm}$

本試驗係於逢甲大學水工試驗室之傾動式渠槽進行試驗，渠槽總長為 512cm、寬為 96cm~10cm 及深為 40cm。渠道底床為 13cm 之木板，為模擬壩體移除前後河床沖淤及河床坡度變化，本研究採動床試驗，於木板上鋪設 20cm 厚度之砂。為求試驗渠槽粗糙度一致，渠道之邊壁及底床皆為木板組合而成，並於其表面均勻塗抹防水漆。

本試驗渠槽為循環水槽，試驗水流自蓄水槽中利用馬達抽水經定水頭後，最終流至渠槽中，在渠槽之入口處裝置蜂巢式整流管進行整流及消能，以避免當水流進入至試驗段後，由於水面的擾動而造成試驗上的誤差，渠槽設備配置如圖 6 所示。根據於現場採樣所得泥砂分析，得知其平均粒徑 dm 約為 18.65 μ m，幾何標準偏差 σ_g 為 4.6。依據模型

縮尺計算，本試驗採用之泥砂以#8 號篩、#16 號篩及#30 號篩之均勻泥砂加以混合而成，其平均粒徑 dm 為 1.18mm，幾何標準偏差 σ_g 為 2.8， $\sigma_g > 1.3$ 屬於非均勻泥砂。七家灣溪一號防砂壩現況河道地形，左岸為岩壁，右岸為公路(武陵路)，本研究主要在探討如何拆壩，即全部拆除或部分拆除，拆除位置為右岸、中央或左岸，透過河床穩定性及河防安全性等評估指標，研判較理想之壩體拆除方案。因此本研究壩體移除試驗方案分為全部拆除及依壩寬(14.125cm) b 的 1/2、1/3、1/4 及梯形開口(頂寬 $b/2$ 且底寬 $b/3$)等部分拆除；拆除位置則以壩之右岸、中央及左岸為基準之配置方式進行試驗。為了解河川不同渠底坡度之因素影響，因此淤砂坡度採用原河床坡度 0.5 倍~1.5 倍進行研究。經換算後渠槽試驗之坡度分別為 0.5 倍縱坡

表 2 壩體移除試驗方案

Table2. Experimental configuration of dam removal

試驗類別	控制項目	控制內容	備註
對照組	坡度	$S_1=0.011$ $S_2=0.022$ $S_3=0.033$	
	流量(cms)	(1) $Q_2=0.00038$ (2) $Q_{50}=0.00136$	
	壩體形式	未拆壩(即現況)	
移除試驗 方案	流量(cms)	(1) $Q_2=0.00038$ (2) $Q_{50}=0.00136$	
	坡度	$S_1=0.011$ $S_2=0.022$ $S_3=0.033$	
	壩體拆除寬度	(1)全拆 (2) $b/2$ (3) $b/3$ (4) $b/4$ (5)頂寬 $b/2$ 且底寬 $b/3$	
	壩體拆除位置	(1)左岸(L) (2)中間(C) (3)右岸(R)	
註：b 為壩寬			

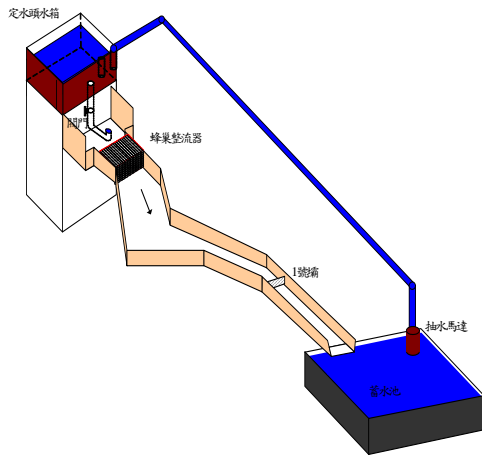


圖 6 試驗渠槽配置圖

Fig6. Schematic diagram of the experiment flume

($S_1=0.011$)、1 倍縱坡($S_2=0.022$)及 1.5 倍縱坡 ($S_3=0.033$) 等。此外，本研究將以未拆壩(即現況)之試驗進行對照分析，做為移除方案的比較基準，試驗方案詳如表 2 所示。在本研究中流量為影響本試驗之重要因子。因此，在試驗前必須對流量加以率定，以確定其精準性。待率定工作完成後，將已經配製好的床砂質均勻鋪於渠床試驗段上，其厚度為 20cm，並加以夯實，形成厚度均勻之飽和堆積砂層。在試驗段劃分 n 個斷面以便量測，並記錄其沖刷深度。

待準備工作完成後，自渠槽之上游處供給清水流量，並開始計時。由於流量及拆壩方案不同，造成之河道動態平衡沖刷時間不同，因此，當底床沖淤變動小於最大沖刷深度之 5%即達平衡沖刷時間，則可視為河床已達平衡沖刷而停止試驗，此時則以超音波水位計量測各斷面之沖淤深度，並記錄之。其後，改變不同試驗條件，重覆此步驟，試驗

流程詳如圖 7 所示。

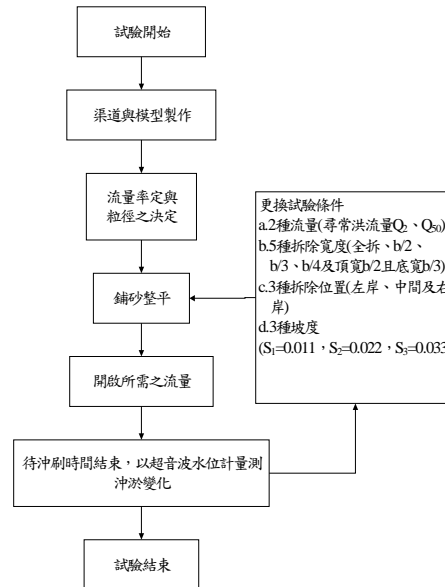


圖 7 試驗流程圖

Fig7. Flow chart of experiment

結果分析與討論

本試驗研究主要控制參數為流量、坡降、壩體拆除位置及大小等四項，分別利用槽偏量、河床穩定性、沖刷深度大小及位置評估分析防砂壩壩體移除策略之優劣，由於試驗控制參數眾多，以及各參數對河防安全影響之重要性有別，因此本研究依據影響河防安全之重要性先後，作為分析比較層次順序。

首先，利用高流量 Q_{50} 及陡坡 1.5 倍坡降 (S_3) 之槽偏量先進行橫向穩定分析，從中優選出較佳拆壩位置。由試驗結果可知，拆壩位置對槽偏量影響程度最明顯，且槽偏量對河防安全最為直接，故先利用槽偏量分析決定較佳拆壩位置，再進一步探討拆壩位置之各參數影響情形，有效分離各參數影響程度。

主深槽的擺盪對於河型的調整、河工的設計皆具極大的影響，因此本研究在橫斷面沖刷改善上，採用槽偏量 D' (horizontal channel trough-line shifting) 來分析各斷面變化情況。主深槽係指河道各橫斷面最低點，因此無論順直、蜿蜒或辮狀河道(braided channel)皆有主深槽。槽偏量係以實測斷面資料做為衡量標準，取河道各斷面之中心點 A 作為基準點，而各斷面之最低點為主深槽 B 點，槽偏量 D' 為河道主深槽 B 點與中心軸 A 點之距離，詳如圖 8 所示。透過試驗前後實測資料，推求出各試驗組之 B 點位置，再分析 A 點與 B 點間相對距離與方向之變化，即可瞭解主深槽擺盪的情況。相對槽偏量：

$$-1 < D = \frac{X - X_0}{X_0} < 1 \quad (1)$$

- X：河道之主深槽距右岸之距離(cm)；
 X_0 ：河道中心軸位置，為中心軸距右岸之距離，即河寬之半(cm)；
 D：相對偏槽量； D' ：X- X_0 ，槽偏量(cm)。

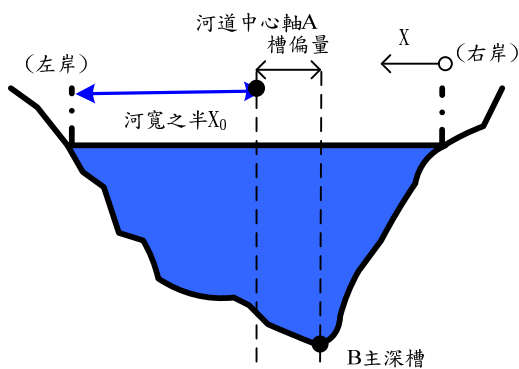


圖 8 槽偏量示意圖

Fig8. Schematic diagram of horizontal channel trough-line shifting

相對槽偏量 D 值越接近 1 時，表示其主深槽位置偏離中心軸位置愈遠，且愈迫近左側堤岸。相對槽偏量 D 值愈接近-1 時，表示其主深槽位置偏離中軸位置越遠，且愈迫近右側堤岸。當 D 值為 0 時，表示主深槽恰位於河道中心軸，此時對左右兩岸基礎之影響為最小，可視為最佳之流路狀態，亦即基礎獲得最佳之保障，最符合河防安全。惟因本研究右岸為道路屬重要之保全對象，左岸為岩盤且無保全對象，因此相對槽偏量 D 值愈趨近於 1 時，表示主深槽愈接近左岸，對於河防安全影響最小，屬較理想之拆壩方案。

1. 橫向穩定分析

由於防砂壩下游流路紊亂，本研究僅對防砂壩上游相對槽偏量進行分析，其結果詳如表 3 及表 4。於尋常洪流量 Q_2 及高流量 Q_{50} 情況下，三種河床坡降均顯示以拆除左側壩體之相對槽偏量相對較小，而各方案之主深槽均較偏向右岸，七家灣溪一號壩上游兩岸均為天然邊坡，下游右岸為武陵路且路基設有方籠保護工，而下游左岸則為岩盤，因此，主要保全對象為右岸。

由表 3 及表 4 可知，大部分移除壩體方案其上游主深槽均迫近右岸，可能會造成右岸基礎之刷深；在下游部分，由於右岸為道路、左岸為岩盤，故移除壩體後主深槽以遠離右岸為佳，因此以拆除壩體左側為較理想之改善方案。綜合而言，於各流量及坡降條件下，以移除壩體左側梯形方案對於上、下游兩岸之衝擊最小，主深槽相對較靠近河中央，安全性較高，因此為較理想之拆壩方案。

2. 縱向穩定分析

河川處在平衡或準平衡狀態下，河床型態與流域的來水、來砂與河床邊界條件之間存在著某種定量關係。

Lane(1955)^[5]以流量(Q)、河床坡降(S)、輸砂率(Qs)及中值粒徑(d₅₀)為變數來表示河川演變時之互動關係。在平衡狀態下，此四變數維持下列之關係：

$$Q_s d_{50} \propto QS \quad (2)$$

當其中一變數之值改變時，其餘三變數之值需改變以維持上式之臂之秤盤裝載輸砂率 Q_s；秤臂長度代表泥砂中值粒徑 d₅₀，其刻度值沿秤臂由內往外增加(亦即由細變粗)，天平右臂之秤盤裝載流量 Q；秤臂長度代表河床坡降 S，其刻度值沿秤臂由內往外增加(亦即由緩變陡)。

當其中一變數之值改變時，秤臂將往左或往右傾，欲維持天平之平衡，則其餘三變之值需予以調整使秤臂恢復水平，代表比降之秤上傾時表示河槽有發生淤積之趨勢，反

之則有發生沖刷之趨勢。在來水量不變之情況下，來砂量如果增加，則天平將向左傾；為維持天平之平衡，右臂之比降必需增大，亦即底床將經由沿程淤升而變陡，反之，在來砂量不變之情況下，來水量如果增加，則天平將向右傾；為維持其平衡，天平左臂之中值粒徑需增大，亦即床質中值粒徑將經由底床之沖刷而變粗，圖 9 提供一簡捷之定性演變判斷工具。在本研究中，由於天平左邊秤臂(即河床質大小)為兩種情況，在清水沖刷下，輸砂量隨時間趨向於零，因此在固定流量下，為維持河床縱向之穩定，天平之右秤臂必須縮小，即其坡度將變緩，在縱向穩定分析方面，指標的考量大部分著重於水流對於泥砂的作用力和泥砂對於水流抵抗力間之對比關係，因此，本研究採用勞哈金數(Rouse, f₁)作為分析指標。勞哈金(1948)認為河床穩定程度取決於水流對河床的作用力與河床泥砂的抵抗力間的對比關係，因此提出勞哈金數(f₁)作為分析指標，其定義如下：

表 3 移除方案相對槽偏量比較表(Q₅₀)

Table3. Relative horizontal channel trough-line shifting (Q₅₀) of dam removal cases

		Q ₅₀		
坡降	拆壩位置	L	C	R
S ₁	1/2	-0.80	-0.90	-0.95
	1/3	-0.82	-0.96	-0.97
	1/4	-0.86	-0.82	-0.86
	1/2&1/3	-0.64	-0.99	-0.90
S ₂	1/2	-0.53	-0.63	-0.65
	1/3	-0.60	-0.88	-0.89
	1/4	-0.64	0.64	-0.86
	1/2&1/3	-0.43	-0.95	-0.64
S ₃	1/2	-0.80	-0.81	-0.66
	1/3	-0.90	-0.99	-0.99
	1/4	-0.86	-0.98	-0.97
	1/2&1/3	-0.64	-0.92	-0.93

註:(1)L, C, R 分代表拆除壩之左側、中間及右側。(2)相對槽偏量負值代表主深槽較靠近右岸，正值則較靠近左岸。

(3)1/2, 1/3, 1/4, 1/2&1/3 分別代表拆除壩體之 b/2, b/3, b/4 及梯形(頂寬 b/2 與底寬 b/3)等方案，其中 b 為壩寬。

表 4 移除方案相對槽偏量比較表(Q₂)

Table4. Relative horizontal channel trough-line shifting (Q₂) of dam removal cases

Q ₂				
坡降	拆壩位置	L	C	R
S ₁	1/2	-0.64	-0.76	-0.82
	1/3	-0.88	-1.00	0.59
	1/4	-0.76	-0.89	-0.92
	1/2&1/3	-0.51	-0.70	-0.96
S ₂	1/2	-0.67	-0.79	-0.82
	1/3	-0.56	-0.69	0.46
	1/4	-0.83	-0.85	-0.92
	1/2&1/3	-0.54	-0.65	-0.62
S ₃	1/2	-0.88	-0.98	-0.74
	1/3	-0.87	-0.92	-0.98
	1/4	-0.77	-0.95	-0.98
	1/2&1/3	-0.71	-0.96	-0.92

$$f_1 = \frac{d_m}{S} \quad (3)$$

式中， d_m = 泥砂平均粒徑(mm)； S = 河床坡降。一般而言， f_1 愈大表示河床愈穩定。本研究採用相同粒徑 d_m (兩種標準偏差)，因此縱向穩定指標 f_1 隨河床坡降 S 之減小而增大，將各試驗組之河床平均坡降 S_n 與對照組(未拆壩)之河床平均坡降 S_x 進行比較， K_s 值愈大代表拆壩後之河床相對較穩定，縱向河床穩定指標 K_s 公式如下：

$$K_s = \frac{d_m / S_n}{d_m / S_x} = \frac{S_x}{S_n} \quad (4)$$

其中： S_n 為各試驗組之河床平均坡降

S_x 為對照組之河床平均坡降

由相對槽偏量之橫向穩定分析，可知拆除左側壩體為相對較理想之方案，因此本研究針對河床縱斷面變動較明顯之區段

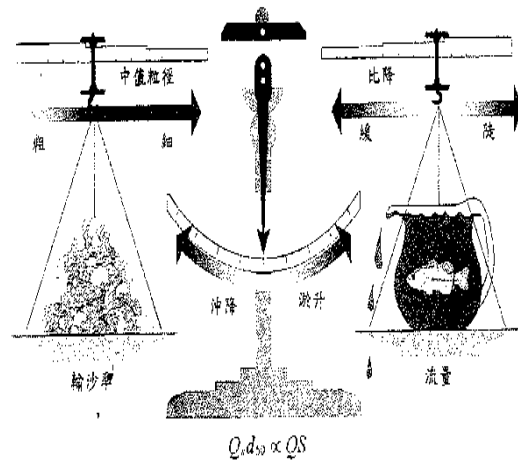


圖 9 河川縱向穩定之參數關係

Fig9. Relationship of parameters for longitudinal stable of river

(即中游段)，進行縱向河床穩定分析。由表 5 可知在不同流量與坡度條件下，整體而言以拆除壩體頂寬 $b/2$ 且底寬 $b/3$ (梯形方案)之 K_s 值最大，表示拆壩後之河床相對較穩定，屬較理想之方案。

表 5 移除左側壩體方案之縱向穩定指標 Ks 值

Table5. Longitudinal stable index Ks of left dam removal cases

坡降	壩體移除比例	Q ₅₀	Q ₂
S ₁	1/2	0.166	0.204
	1/3	0.143	0.273
	1/4	0.113	0.169
	1/2&1/3	0.173	0.273
S ₂	1/2	0.053	0.789
	1/3	0.013	0.556
	1/4	0.004	0.375
	1/2&1/3	0.052	0.856
S ₃	1/2	0.008	0.429
	1/3	0.008	0.115
	1/4	0.010	0.176
	1/2&1/3	0.019	0.454

3. 最大沖刷深度及位置

由沖刷坑的位置及深度，可以瞭解壩體移除後其可能產生的破壞範圍及主要破壞位

置，當最大沖刷深度位置迫近堤岸則會產生堤岸基礎沖刷，導致岸坡崩落，終而危及保全對象之安全。表 6 為全拆及各移除方案最大沖刷深度比較表，表中正值代表河床刷深，反之，負值為河床淤積。由該表可知，下游段的最大沖刷深度發生在未拆壩(對照組)時。當壩體拆除後，於尋常洪流量 Q₂時，原有上、下游不連續河床段(防砂壩)，因河床坡度調整，初期坡度變化較大，而後漸趨於穩定，因此其下游段均呈現回淤積之現象；當高流量 Q₅₀時，壩體拆除初期坡度變化較大，由回淤而後漸趨於穩定，因無上游來砂之挾注，長期而言下游段部分仍呈現些微沖刷之現象，惟其沖刷深度均較未拆壩之情況來得小；在上游段河道，無論何種拆壩方案，因河床坡度調整均會產生沖刷。

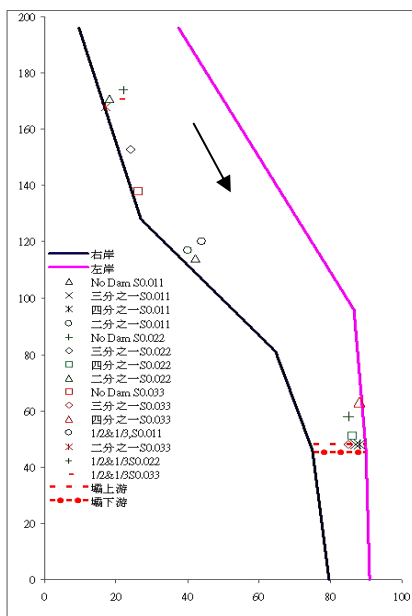


圖 10 拆除左側壩體之最大沖刷位置圖(Q₅₀)
Fig10. Location of maximum scour for left dam removal (Q₅₀)

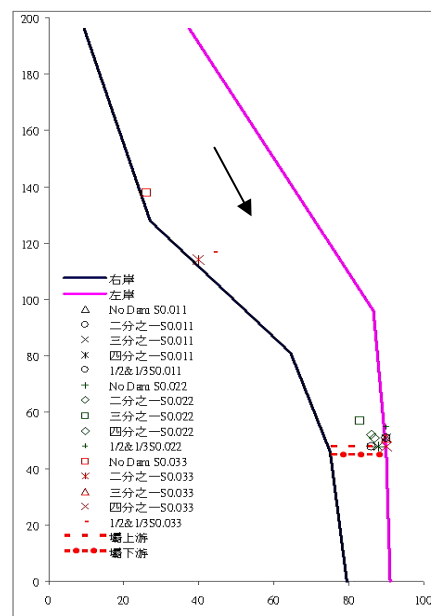


圖 11 拆除左側壩體之最大沖刷位置圖(Q₂)
Fig11. Location of maximum scour for left dam removal (Q₂)

表 6 移除壩體方案最大冲刷深度比較表

Table 6. Comparison of maximum scour depth for dam removal cases

坡度	拆壩位置	下游段	上游段	下游段	上游段	坡度	拆壩位置	下游段	上游段	下游段	上游段	坡度	拆壩位置	下游段	上游段	下游段	上游段
		(Q ₂)	(Q ₂)	(Q ₅₀)	(Q ₅₀)			(Q ₂)	(Q ₂)	(Q ₅₀)	(Q ₅₀)			(Q ₂)	(Q ₂)	(Q ₅₀)	(Q ₅₀)
		(cm)	(cm)	(cm)	(cm)			(cm)	(cm)	(cm)	(cm)			(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
S ₁	未拆壩 (對照組)	7.47	18.98	14.53	25.32	S ₂	未拆壩 (對照組)	7.27	18.78	14.30	25.32	S ₃	未拆壩 (對照組)	7.40	18.93	14.09	25.34
	全拆	-8.53	-0.88	-0.99	4.94		全拆	-7.73	2.28	-0.68	5.35		全拆	0.12	11.55	-0.70	5.24
	L 1/2	-4.06	3.22	-1.75	4.82		L 1/2	-7.96	2.84	-0.33	4.89		L 1/2	-1.42	9.97	2.70	4.38
	C 1/2	-2.82	7.40	4.67	14.52		C 1/2	-7.47	8.54	0.74	12.17		C 1/2	-2.10	7.75	5.30	16.54
	R 1/2	-7.69	0.02	-0.69	9.00		R 1/2	-7.08	2.80	1.25	10.90		R 1/2	-2.18	8.33	-0.89	10.62
	L 1/3	-7.57	0.92	0.20	4.54		L 1/3	-7.05	3.02	0.10	3.99		L 1/3	-0.74	9.63	2.70	4.38
	C 1/3	-2.41	7.18	4.67	17.52		C 1/3	-8.19	3.00	1.51	10.54		C 1/3	-1.74	8.81	9.29	15.54
	R 1/3	-7.99	-0.28	-0.61	11.88		R 1/3	-8.22	-0.44	4.88	8.82		R 1/3	-2.24	8.57	0.11	9.62
	L 1/4	-6.21	1.58	-0.66	4.58		L 1/4	-7.43	3.56	1.96	3.78		L 1/4	-1.40	9.21	3.22	4.36
	C 1/4	-2.55	6.86	3.61	18.26		C 1/4	-8.05	1.54	3.66	9.34		C 1/4	3.14	8.55	7.09	16.44
	R 1/4	-8.49	0.72	2.03	9.94		R 1/4	-7.63	1.32	1.80	9.94		R 1/4	-0.10	8.29	1.65	9.54
	L 1/2&1/3	-5.57	1.22	-1.06	2.85		L 1/2&1/3	-5.05	0.84	1.96	3.83		L 1/2&1/3	1.26	7.97	0.31	5.15
	C 1/2&1/3	-5.16	0.42	1.65	7.50		C 1/2&1/3	-7.83	1.08	0.30	10.82		C 1/2&1/3	6.92	8.40	7.23	15.86
	R 1/2&1/3	-8.67	0.36	1.15	8.15		R 1/2&1/3	-6.22	0.80	0.90	9.02		R 1/2&1/3	-1.85	9.17	3.42	9.32

由槽偏量分析結果，以拆除壩體左側為較理想方案，因此本研究就不同流量條件下，拆除左側壩體方案之最大冲刷深度位置加以分析。圖 10 顯示於高流量 Q₅₀ 時，上游最大冲刷深度大多發生於右岸，此乃因高流量之慣性力趨於凹岸所致。於防砂壩處，主要冲刷位置則迫近左岸，此乃因拆左側壩體其慣性力迫使水流以直線型態運行所致。相同地，於尋常洪水量 Q₂ 時，亦有類似之情形發生，詳如圖 11 所示。於各種坡度下以梯形方案(頂寬 b/2 且底寬 b/3)之最大冲刷深度位置遠離右岸，對於右岸保全對象之影響最小，屬較安全之拆壩方案。

結論與建議

1. 結論

- (1) 無論何種拆壩位置，在防砂壩上游段，其相對槽偏量顯示均靠近右岸；在中游段，即上游段與防砂壩之間，相對槽偏量顯示由上游右岸漸次向中游左岸移動；防砂壩下游段時，流況較為紊亂，相對槽偏量顯示隨壩體拆除位置而變。
- (2) 各種移除方案實施後防砂壩上游大多呈現冲刷之現象，下游則漸次回淤而趨於穩定，最大冲刷深度位置多半集中於河道凹岸及鄰近拆壩位置上游處。

- (3) 拆除左側壩體後之河道相對槽偏量較小，且其河道平均坡度相較於其他方案來的平緩；復以河道最大沖刷深度來評估，拆除左側壩體時之最大沖刷深度位置遠離堤岸，因此移除左側壩體為相對較理想之壩體改善方案。
- (4) 高流量 Q_{50} 時，上游最大沖刷深度大多發生右岸，此乃因高流量之慣性力趨於凹岸所致，於各種坡度下以梯形方案(頂寬 $b/2$ 且底寬 $b/3$)之最大沖刷深度位置遠離右岸，屬較安全之拆壩方案。於防砂壩處，主要沖刷位置則迫近左岸，此乃因拆左側壩體其慣性力迫使水流以直線型態運行所致。於尋常洪水量 Q_2 時之情形亦然。
- (5) 拆除壩體左側之梯形方案(頂寬 $b/2$ 且底寬 $b/3$)時，無論於上、中、下游各河段之相對槽偏量較小，最大沖刷深度位置較遠離右岸，其拆除後河床之縱向穩定性較高，對於上、下游兩岸之衝擊最小，為本研究建議之壩體改善方案。

2. 建議

- (1) 本研究主要探討縱橫向及沖淤變化以建議移除壩體方案，未來可考量生態棲地之歧異度，以獲取更符合生態需求之移除方案。
- (2) 無論何種拆壩方案，於上游段因河床坡降自行調整均會產生沖刷情形，故建議於拆壩前做好壩體上游保護工程及加深堤岸基礎，以防止拆壩後因水流淘刷而造成堤岸之崩塌破壞。
- (3) 為防止拆壩初期，上游泥砂快速下移至

壩體下游而破壞生態廊道，建議加入柔性調節網以漸次調整河床坡降。

誌謝

本文承蒙 行政院 國家科學委員會(NSC 99-2221-E-035-043)補助，方得以完成本研究，謹此致謝。

參考文獻

1. 台灣省林務局(1992)「台灣省近期防砂壩現況調查報告」。
2. 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(一)」，雪霸國家公園管理處研究計畫報告。
3. 葉昭憲、段錦浩、連惠邦(2007)「七家灣溪壩體改善研究評估」，雪霸國家公園管理處研究計畫報告。
4. Doyle, Martin W., Jon M. Harbor & Emily H. Stanley (2003) "Toward Policies and Decision-Making for Dam Removal", *Environmental Management*, 31 (4):453 - 465.
5. Lane, E.W. (1955) "A Study of the Shape of Channels formed by Natural Streams Flowing in Erodible Material", *M. R. D. Sediment Series*, 9, US. Army Engineering Division, Missouri River, Corps of Engineers.
6. Poff N Leroy, David D Hart (2002) "How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal", *Bioscienc*,52(8): 659-668.

王傳益、葉昭憲、鄭人豪、段紀湘、呂其倫：
防砂壩壩體移除之模型試驗-以七家灣溪一號壩為例

7. The Heins Center (2002) “ Dam Removal: Science and Decision Making” , Washington, D.C., USA.

99年 11月 25日收稿

99年 12月 06日修改

99年 12月 07日接受

水土保持學報 42(4) :423-437 (2010)

Journal of Soil and Water Conservation , 42 (4) : 423-437 (2010)