

七家灣溪拆壩後之河道演變模式

王筱雯* 郭偉丞 張家豪

摘要 為探究七家灣溪一號壩拆壩後達到準平衡階段之河道演變模式，本研究蒐集水文、地形與影像資料，分析拆壩後一年半之河道演變情形，做為建立長期河道演變模式之基礎。七家灣溪之河道調整程度和距壩遠近與溯源侵蝕有關。本研究根據壩上游 48 m 處與下游 30 m 處斷面，分別定義上下游九個與六個河道演變階段。在時間尺度上，上游河道進入階段 B(主河道調整) 僅需數分鐘、進入階段 E3(河道拓寬並持續下切) 需 1~2 年、而準平衡階段 F'尚未達到，因此以此研究所建立之河道演變模式為基礎，持續監測未來七家灣溪達到準平衡階段之過程有其必要。

關鍵詞：河道演變模式、拆壩、泥砂沖淤、河相、七家灣溪。

Channel Evolution Conceptual Model Associated with Dam Removal at Chijiawan Creek

Hsiao-Wen Wang* Wei-Cheng Kuo Chia-Hao Chang

ABSTRACT This study focused on channel responses one and a half years after dam removal in the Chijiawan Creek and proposed a channel evolution model based on analyses of hydrology, morphology, and images. Channel adjustment is highly influenced by the distance between the dam and the headcut erosion. We defined nine and six stages of the channel evolution model for the upstream and downstream reach, respectively, according to the cross sections 48 m upstream and 30 m downstream from the dam. It took a couple of minutes to reach stage B (main channel migration) and one year or so to reach stage E3 (widening and continued incision). As Chijiawan Creek has not reached the quasi-equilibrium state, stage F', we suggest that the establishment of a long-term channel evolution model is critical for in-situ monitoring.

Key Words : Channel evolution model, dam removal, sediment erosion and deposition, river morphology, Chijiawan Creek.

一、前言

由於拆壩能恢復洄游魚類通道、擴增魚類棲地、改善因結構物阻絕而升高之水溫，加上近年來許多壩體因使用年限已久的安全顧慮或原有功能喪失之狀況，因此拆壩的議題受到許多關注 (王筱雯、郭偉丞，2011)。隨著壩體的拆除，蓄積於上游之大量泥砂往下

游運移的過程改變了河道既有的地形條件及水流型態，同時，河道地形的變化會受到水文條件及拆壩後發生的溯源侵蝕現象所支配，進而影響河川生態棲地。因此，了解拆壩後河道演變的過程與影響機制、及各階段變化的時間尺度有其重要性。

拆壩後河道演變會經過暫態 (transient state) 至河道準平衡狀態 (quasi-equilibrium state)。在上游的河道

演變部分, Doyle et al. (2002) 參考 Simon and Hupp (1986) 針對侵蝕河道所述之河道演變模式 (channel evolution conceptual model), 提出拆壩後上游河道河相變化的六個階段: A 階段為壩體移除前, 河道尚未發生沖刷現象, 大量泥砂沉積在壩體上游, 河床坡度較緩而流況平穩; B 階段為壩體移除後水面高程下降, 但還未發生任何泥砂擾動之階段; C 階段因水面急速下降導致泥砂開始快速侵蝕, 受重力作用下河流侵蝕力大幅提高, 進而因河道下切作用使主深槽形成; D 階段為縱向侵蝕高於河岸之臨界高度後一併發生側向侵蝕之階段; E 階段下的泥砂因為河道變寬流速減緩、加上側向侵蝕的砂源與更往上游河段之溯源侵蝕帶來之泥砂粒料傳送而落淤於此, 河床逐漸抬高、河道因側向侵蝕而變寬之幅度減緩; F 階段為上游侵蝕粒料的供給逐漸減少, 植生開始生成覆蓋, 並與未受侵蝕的河岸形成二階的河階地形, 進而發展為穩定的洪氾平原及河道, 為一準平衡狀態。此上述六階段可適用於某一特定時間點下侵蝕河道之縱向特性、亦可適用於某一特定斷面之時間演變。Pizzuto (2002) 進一步討論此河相演變模式之發生機制與壩後攔蓄土方之厚度及壩後攔蓄泥砂顆粒組成粒徑大小有密切關係, 提出如礫石等大粒徑組成的河道之溯源侵蝕為主要大流量所驅動, 而小顆粒如泥、沙等粒料組成之河道, 侵蝕過程之發生主要與小流量有關。Doyle et al. (2003) 將此六階段河相演變模式應用在美國威斯康辛州的兩個案例以說明此河相演變模式之適用性, 並呼應 Pizzuto (2002) 所提不同泥砂粒徑組成之河道之侵蝕過程受不同尺度的流量驅動, 亦強調此六階段河相演變模式是否適用於其他環境下之拆壩案例仍須被詳加檢視。Evans (2007) 進一步根據美國俄亥俄州東北部的 IVEX 潰壩案例之河相變化, 修正 Doyle et al. (2003) 所提出的河道演變模式。

拆壩後河道演變至準平衡所需的時間尺度為幾週至幾個月 (Wohl and Cenderelli, 2000) 或幾年 (Pizzuto, 2002; Doyle et al., 2002; Doyle et al., 2003), 與現地的水文 (Wohl and Cenderelli, 2000; Hassan and Zimmermann, 2012; Sawaske and Freyberg, 2012)、河道地形條件 (Doyle et al., 2003; Simon et al., 2000)、拆除壩體的方式 (一次拆除或分段拆除)(Pizzuto, 2002; Doyle et al., 2003)、河道泥砂粒徑組成 (或是否固結或絮凝)(Pizzuto, 2002; Doyle et al., 2003; Sawaske and Freyberg, 2012)、溯源侵蝕之特性 (Steward, 2005) 有關, 如當河川夾帶含水量高之泥砂、或河道植生之覆蓋狀況差時, 在發

生洪水期間, 河道除縱向侵蝕外, 亦同時進行河道加寬的側向侵蝕, 使得河道調整之時間尺度減小 (Doyle et al., 2002; Doyle et al., 2003)。

至於在下游的河道演變, 雖有不少學者提出下游河道因應拆壩後的變化包括輸砂量增加、河床高程抬高等, 且其變化與泥砂運移之體積、年輸砂量、底床粗糙度、河道蜿蜒 (Madej, 2001)、庫區泥砂相對於底床質或運移泥砂之粒徑大小 (Madej and Ozaki, 1996; Lisle et al., 2001)、以及與河道坡度之局部變異等因子有關, 但並未有一如上述之上游河道之河道演變階段性概念模式。

綜上所述, 目前雖已有些拆壩與河相觀點的河道演變模式已被發展與應用 (Pizzuto, 2002; Doyle et al., 2002, 2003; Evans, 2007) (表 1), 但對於較高泥砂產量或較陡坡度之環境下河道演變之探討仍屬非常有限 (Major et al., 2012; Gran and Montgomery, 2005; Kasai et al., 2004; Hassan and Zimmermann, 2012)。台灣河道條件特殊與國外大相逕庭, 具較陡的河道坡度、流量豐枯懸殊及水流含沙量高之特性, 且拆壩案例與國外相較相對較少, 因此, 蒐集現地實測資料以了解拆壩後河道調整之狀態與時間尺度, 並進一步探討適用台灣環境的河道演變模式有其重要性。

本研究選擇位於台中市和平區之七家灣溪一號壩上下游河道為研究區域, 由於安全的考量與棲地廊道的復育, 雪霸國家公園於 2011 年 5 月 25 日將壩體進行拆除, 為國內首例。本研究進行現地河道斷面調查、影像監測及水位監測, 蒐集了拆壩前後共約兩年半之資料, 以了解拆壩後水文變異下之河道演變。

二、研究區域概述

1. 七家灣溪環境背景資料

研究區域位於台灣中部地區之七家灣溪 (圖 1), 此流域平均高程介於 1650 至 3000 m, 流域面積約為 72 km², 平均河寬介於 30 至 150 m, 總長約 15.3 km, 其流域境內坡度五級坡 (40~55%) 以上約佔 29 %, 流域坡向分布平均 (葉昭憲, 2007; 葉昭憲、王傳益, 2008; 王筱雯, 2010)。

本區年平均氣溫約為 15°C, 年平均水溫均為 16°C (葉昭憲, 2007); 年平均年降雨量約為 2006 mm 左右, 主要降雨多來自東北季風、颱風與梅雨。最大年降雨量為 2008 年之 3250 mm 左右, 最小年降雨量為 1969

年之 767 mm 左右。七家灣流域內設有水文測站三站，分別為台灣電力公司之有勝溪流量站與七家灣流量站以及本研究之萬壽橋水文測站（圖 1）。有勝溪流量站位於有勝溪，距七家灣溪匯流口約 200 m 處，流域面積為 31.12 km²，流量資料由 1994 年開始紀錄至今，最大瞬時流量為 233.95 cms (2007/10/06)；七家灣流量站位於伊卡丸溪，距七家灣溪與有勝溪匯流口下游約 400 m 處，流域面積 110.71 km²，流量資料由 1964

年開始紀錄至今，最大瞬時流量為海棠颱風期間之 884.70 cms (2005/07/18)；本研究架設之萬壽橋水位測站位於七家灣溪與有勝溪匯流口處上游約 20 m 處，代表七家灣溪水位值。

本區地質由始新世四稜砂岩層和漸新世水長流層及中新世廬山層所構成，溪流沿岸多分布侵蝕性河階，表層沖積層既淺且薄，可見裸露出之板岩岩盤（葉昭憲，2007；葉昭憲、王傳益，2008；王筱雯，2010）。

表 1 河道演變模式案例比較

Table 1 Comparison of channel evolution models

作者	河相演變階段數	各階段說明	監測時間與河相演變時間尺度	研究資料	應用案例與基本資料	補充說明
Doyle et al. (2002)	上游 六階段	(A) 拆壩前；(B) 拆壩後水位降低；(C) 下切；(D) 下切與側向侵蝕；(E) 淤積並拓寬；(F) 準平衡	-	-	-	首先提出拆壩後之河相演變模式
Pizzuto (2002)	上游 六階段	同上	-	-	-	討論 Doyle et al. 2002 所提出之模式並探討泥砂粒徑與河道侵蝕過程與不同尺度流量之關係
Doyle et al. (2003)	上游 六階段	同上	2000/06~2001/08，共14個月	流量量測、懸浮載與底床載收集、橫斷面、示意圖	a. Rockdale Dam (美國) 1. 壩高：3.3 m 2. 河道坡度：壩上游約 0.0007；壩下游約 0.004 3. 底質粒徑組成：礫石與卵石 b. LaValle Dam (美國) 1. 河道坡度：壩上游約 0.0005，壩下游約 0.0002 2. 底質粒徑組成：細沙與泥	延續 Doyle et al. 2002 所提出之模式並予以應用
Evans (2007)	上游 七階段	(A1) 拆壩前；(A2) 縱向溝痕；(B') 拆壩缺口排水路；(C') 下切；(D') 下切與側向侵蝕；(E') 拓寬並持續下切；(F') 準平衡（河岸穩定與植生再生）	總計12年，由結果發現進入各階段的時間尺度：階段B需數分鐘，階段C需數日，階段D與E需2至3個月，階段F需3至5年。	照片、地圖、現地筆記	IVEX dam 潰壩 (美國) 1. 壩高 7.8 m，壩寬 33 m 2. 河道坡度：0.003 3. 底質粒徑組成：細粒料為主。	修正 Doyle et al. 2002 所提出模式之 A、B、E 階段並予以應用
本研究	上游 九階段 下游 六階段	上游： (A) 拆壩前；(A') 縱向溝痕；(B) 主河道遷移；(C) 沖刷、渠道化；(D') 沖刷並拓寬；(E1) 淤積與拓寬；(E2) 沖刷並拓寬；(E3) 拓寬並持續下切；(F') 準平衡（推測）。 下游： (A) 拆壩前；(B) 淤積；(C) 淤積；(D) 沖刷、淤積；(E1) 淤積、沖刷；(E2) 沖刷	總計一年半，由結果發現進入各階段時間尺度：階段B需數分鐘，階段C需一週，階段D需一個月，階段E1需數月，階段E2與E3需1~2年，階段F'尚未達到	水位紀錄、河道縱橫斷面量測及影像紀錄資料	七家灣溪一號壩 1. 壩高 13 m，壩寬 28.5 m 2. 河道坡度：0.02 3. 底質粒徑組成：大小漂石、圓石、卵礫石、砂。	1. 台灣拆壩後河相演變模式之首例 2. 修正 Doyle et al. (2002) 與 Evans (2007) 所提出之模式並予以應用於台灣

2. 七家灣溪一號壩壩體移除過程

七家灣溪位於德基水庫上游集水區，為攔阻水庫集水區上游泥砂，自 1971 年起陸續興建 12 座大型防砂壩；七家灣一號壩興建於 1972 年，壩高 13 m，拆壩前攔砂量約達二十萬 m^3 (王筱雯, 2010)。一號壩壩基因受水流沖擊淘刷，已於壩址處產生約 4 m 深之沖刷坑，於壩體拆除前有安全上的疑慮；加上此溪為台灣櫻花鉤吻鮭唯一之棲地，防砂壩的存在阻絕了鮭魚群洄游的路徑。

考量棲地復育與壩體安全，主管機關雪霸國家公園針對一號壩壩體改善的方式、時機、與可能衝擊，就水文與水理、泥砂與河相、生態與棲地、生態檢核評估及保育效益、民意調查等不同面向進行評估後，於 2011 年 5 月 25 日開始進行為期一週之壩體拆除工程。

雪霸國家公園參考王筱雯 (2010) 針對壩體改善後河道泥砂量、泥砂質、泥砂粒徑與河道主深槽等對河防安全與生態棲地之可能衝擊所建議壩體改善方

式，於壩體改善施工前先行遷移七家灣溪一號壩影響河段之台灣櫻花鉤吻鮭上百隻並安置於種源庫，以避免壩體改善時河道內濁度過高而危及台灣櫻花鉤吻鮭 (王筱雯、郭偉丞, 2011)。壩體改善工程之施工便道位於一號壩上游約 250 m 處，使重型機具可以前進至七家灣溪一號壩址處，進行回填與壩體拆除等工程。壩體改善工程施工階段由施工單位先對壩體上游之淤砂進行整理與篩選，以作為右側壩體下方之回填材料，待回填砂石到達壩體右岸約一半高時，將溪流導引至左岸，再繼續進行砂石回填工程，如圖 2(a)。壩體結構之移除工程乃以怪手與破碎機進行壩體左側 1/3 壩體之移除，拆除壩體之石料回填於壩體下游右岸處，如圖 2(b)。隨著壩體高度逐漸下降，遷急點 (knickpoint) 逐漸往上游前進，如圖 2(c)，壩體於 2011 年 6 月 1 日拆除完成，圖 2(d) 為壩體改善完工圖，河道較拆壩前已有約 50 m 之明顯溯源侵蝕。

三、研究方法

1. 水文記錄與流量推估

本研究於七家灣溪一號壩下游 1.8 km 處設置水位測站於萬壽橋上 (圖 1)，使用非接觸式雷達波水位計 (Siemens Sitrans Probe LR 型)，紀錄時間於 2011 年 5 月 24 日至 2012 年 11 月 11 日，該型水位計頻率為 5.8 GHz，最佳量測深度為 0.3 m 至 20 m，誤差為 0.1%，適用溫度由 $-40^{\circ}C$ 至 $80^{\circ}C$ ，可符合研究區域之現地環境條件要求。

本研究為能了解水文事件對拆壩後河道變遷之影響，以尖峰流量代表各水文事件之強度。為推估萬壽橋水位測站之流量值，本研究蒐集七家灣與有勝溪兩流量站於 2011 年之水位流量實測資料 (台灣電力公司所屬資料) 與七家灣流量站之流量與水位率定曲線關係式 (如 (1) 式， Q 為河川流量 (cms)， H 為水位高度 (m))，以七家灣站與有勝溪站之流量差值呈現 2011 年水文事件之七家灣溪流量值，由於 2012 年尚未有公開記錄資料，本研究藉由萬壽橋水位測站之水位測值與七家灣溪流量站 2011 年之率定曲線推估相應七家灣溪流量值。本研究亦蒐集台灣電力公司自 1981 年至 2009 年七家灣溪流量站各年年最大瞬時流量資料後進一步進行流量頻率分析，以得出不同重現期距之流量值。

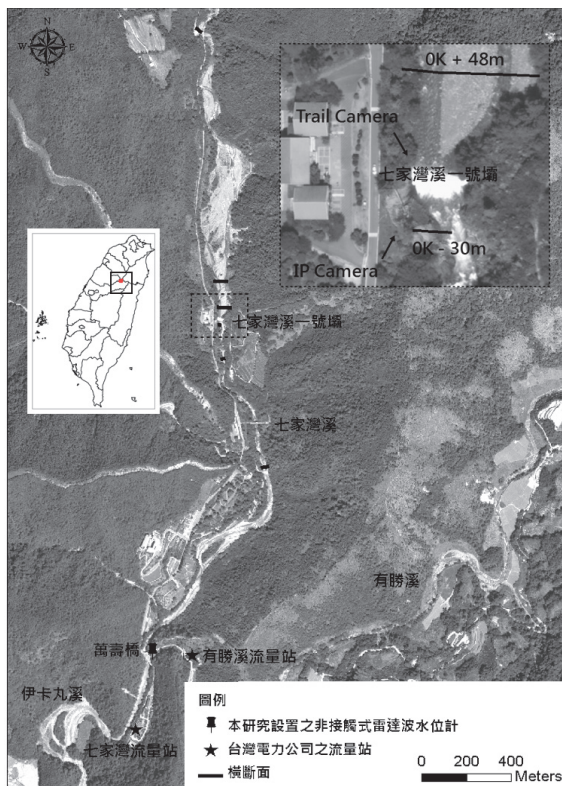


圖 1 研究區域 - 七家灣溪集水區 (底圖來源農林航空測量所，拍攝日期：2008 年 9 月 21 日)

Fig.1 Study area - Chijiawan Creek catchment

$$Q=17.876H^2-4.4761H+0.5412 \quad (1)$$

$$R^2=0.9996$$



(a) 土砂堆填 (2011/05/24)



(b) 開始壩體拆除工程 (2011/05/25)



(c) 遷移點逐漸往上游前進 (2011/05/25)



(d) 壩體工程拆除完成 (2011/06/01)

圖 2 - 壩體拆除歷程 (王符安, 2011)

Fig.2 Dam removal processes

2. 地形資料

本研究採用電子全站儀 (Leica FlexLine TS02) 於壩體拆除前後進行縱橫斷面量測, 縱斷面為 3 km 河段之河槽最深點之連線, 橫斷面為上下游各三處, 即壩上游 48、167 及 1419 m 處及壩下游 30、183 及 738 m 處共計六個斷面, 以反應與壩不同距離河段之河道變化差異。本研究於 2010 年 4 月 10 日至 2012 年 9 月 10 日期間共進行六次地形資料量測, 包括拆壩前一次與拆壩後五次大型降雨事件發生後 15、21、228、144 及 49 天分別進行了五次河道斷面測量。量測日期及內容分別為 2010 年 4 月 11 日 (包含縱斷面、壩上游 48、167 及 1419 m 處及壩下游 30、183 及 738 m 處之橫斷面)、2011 年 6 月 9 日 (僅有縱斷面)、2011 年 6 月 29 日 (包含縱斷面、壩上游 48 及 167 m 處及壩下游 30 m 處之橫斷面)、2012 年 2 月 13 日 (包含縱斷面、壩上游 48、167 及 1419 m 處及壩下游 30、183 及 738 m 處之橫斷面)、2012 年 7 月 22 日 (包含縱斷面、壩上游 48 m 處之橫斷面) 及 2012 年 9 月 10 日 (包含縱斷面、壩上游 48、167 及 1419 m 處及壩下游 30、183 及 738 m 處之橫斷面)。其中, 壩上游 48 m 及壩下游 30 m 為距離壩最近之斷面, 直接反應拆壩對河道之影響且量測頻率高, 因此本研究以此兩斷面探討拆壩後不同階段之河道演變 (圖 1)。此兩斷面皆屬筆直河道, 河寬各為 70 m 與 23 m, 經現地勘查上游斷面右岸處為連續性岩盤, 左岸則為山坡; 下游斷面處為束縮河道, 經長年水流冲刷下, 兩岸皆為裸露岩盤。

3. 影像資料

本研究採用高解析度的 IP Camera (EV8781F IP Camera, 全時錄影, 解析度為 2592 x 1920) 與中低解析度的 Trail Camera (Game Spy I-65, 每隔一小時拍攝照片一張與攝影 15 秒, 解析度分別為 2484 x 2136 及 640 x 480), 以記錄壩體改善前中後各階段與洪水事件完整歷程。IP Camera 架設於七家灣溪一號壩下游右岸 30 m 處面向上游拍攝; Trail Camera 架設於一號壩右岸壩翼上面面向下游拍攝 (圖 1), 紀錄時間於 2011 年 5 月 25 日至 2012 年 11 月 11 日。

四、結 果

1. 水位紀錄與流量推估

圖 3 為萬壽橋水位測站自架設起 2011 年 5 月 24 日至 2012 年 11 月 11 日所記錄之時水位資料與利用

1981年至2009年七家灣溪流量站各年年最大瞬時流量資料進行流量頻率分析所得出之1.11、2及10年之重現期距洪水流量對應之水位。由於監測儀器受雷擊影響，造成2011年6月2日至6月16日資料紀錄中斷，於2011年6月17日修復儀器並重新開始記錄。由圖3可知七家灣溪經歷五次大型降雨事件而造成大幅變化之水位，分別為米雷颱風(2011/6/25)、東北季風(2011/10/3)、梅雨(2012/6/12)、泰利颱風(2012/6/25)以及蘇拉颱風(2012/8/2)。事件發生時間與記錄到之水位資料趨勢相符，第一場事件為2011年6月25日的米雷颱風，最高水位為1.4 m，而強度最大的為2012年8月2日的蘇拉颱風，最高水位為4.75 m，兩場事件對應到水文頻率分析結果，分別為1.11年與10年之重現期距流量(表2)。

2. 河段縱橫斷面資料

縱橫斷面量測資料如圖4所示。由縱斷面調查結果可知(圖4(a))，壩體拆除前，於2010年4月11日調查，壩上游河道坡度約為1%；壩體改善後，隨著時間推進，溯源侵蝕逐漸往壩體上游傳遞。壩體拆除後15天，溯源侵蝕終點約略在壩上游50 m處，溯源侵蝕段坡度11.9%，溯源侵蝕速率為3.33 m/day，而壩下沖刷坑已被泥砂填滿；距前次調查21天後，期間發生2011年6月米雷颱風，溯源侵蝕終點約略到達壩上游200 m處，溯源侵蝕段坡度4.7%，溯源侵蝕速率為7.14 m/day；距前次調查228天後，期間發生2011年10月東北季風，溯源侵蝕終點些微上移約略到達壩上游250 m處，溯源侵蝕段坡度4.1%，溯源侵蝕速率為0.22 m/day；距前次調查144天後，期間經歷2012年6月的梅雨與泰利颱風，溯源侵蝕終點上移約略到達壩上游400 m處，溯源侵蝕段坡度3.1%，溯源侵蝕速率為1.04 m/day；距前次調查49天後，期間發生拆壩後至今最大強度的蘇拉颱風(10年之重現期距)，結果顯示

溯源侵蝕終點明顯上移，約略到達壩上游800 m處，溯源侵蝕段坡度2.7%，溯源侵蝕速率為8.16 m/day。

在上游橫斷面部分，一號壩上游48 m處斷面，拆壩前河道深度約1 m，寬度約20 m，拆壩後一個月的米雷颱風造成大量泥砂侵蝕，下刷深度最大約5 m，而河寬拓寬至約30 m。底床繼續下刷至一定程度後，於2012年2月13日的調查與現地的觀察，由於2011年10月東北季風後並無出現較大強度水文事件，大粒徑泥砂(中值粒徑約介於45~90 mm)未能被帶走，致使後續的淘刷情形並未太嚴重(王筱雯, 2012)。2012年6月的梅雨與泰利颱風後，由2012年7月22日的調查發現，除主深槽向下刷深約1.1 m外，河道亦發生側向侵蝕，侵蝕距離右岸約2 m，左岸約7 m，河寬拓寬至39 m；蘇拉颱風後，本研究於2012年9月10日的量測結果可看出主深槽偏移且僅下刷0.3 m，然側向侵蝕明顯，以致右岸岩盤出露，而左岸側向侵蝕達14 m，河寬拓寬至53 m，進一步引致河岸崩塌，崩塌土方堆積於原主深槽，產生寬度25 m及厚度3 m的河階地形，造成主深槽向右岸移動，如圖4(b)。圖4(c)為距

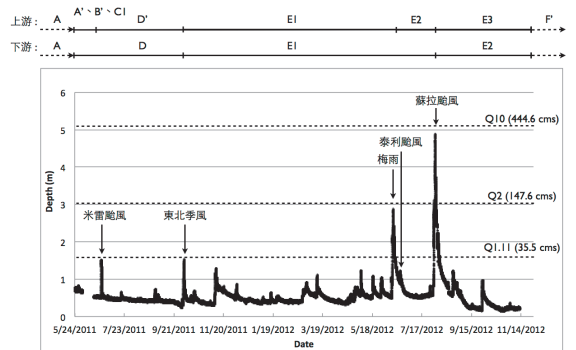


圖3 萬壽橋水位記錄與河段演變階段

Fig.3 Recorded water depth at Wanshou bridge gauge station and the corresponding channel evolution stages

表2 各事件最高水位值及流量推估

Table 2 Recorded highest water depth and estimated discharge of the five rainfall events

降雨事件	日期	萬壽橋最高水位 (m)	率定曲線推估之流量 (cms)	重現期距 (Year)
米雷颱風 ¹ (Typhoon Meari)	2011/6/25	1.40	28.8	1.11
東北季風 ¹ (Northeast monsoon)	2011/10/3	1.42	28.8	1.11
梅雨 ² (Plum rain)	2012/6/12	2.79	139	2
泰利颱風 ² (Typhoon Talim)	2012/6/25	1.46	38	1.11
蘇拉颱風 ² (Typhoon Saola)	2012/8/2	4.75	403	10

備註：1.台灣電力公司水位流量年報中七家灣溪站與有勝溪站之流量差值
2.以2011年七家灣流量站率定曲線推估之流量值

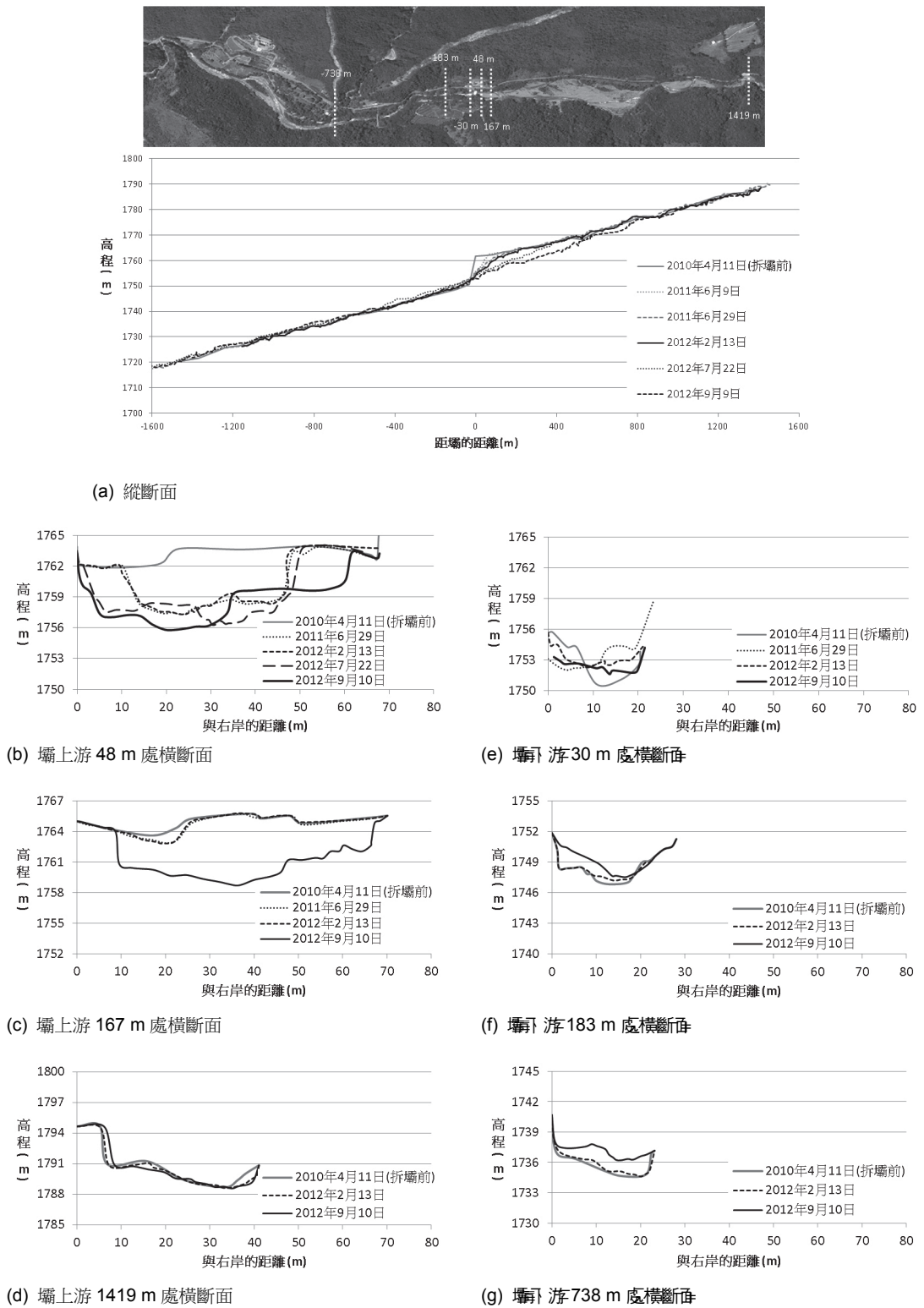


圖 4 - 壩壩上下游拆壩前後縱橫斷面變化

Fig.4 Topography changes pre- and post-dam removal

一號壩 167 m 處斷面，因拆壩與米雷颱風的影響，造成主深槽向下沖刷約 2 m，但因距離壩體較遠且米雷颱風之後無更大的流量，因此在 2012 年 2 月 13 日之斷面變化較不顯著，直到 2012 年 8 月蘇拉颱風過後，由 2012 年 9 月 10 日之量測結果可看出除了距右岸 0~8 m 處河道無明顯變化外，其餘部分皆有明顯沖刷情形發生，最大沖刷深度約 7 m，主深槽也往左岸移動約 16 m，河寬變化則由 20 m 拓寬至 57 m。圖 4(d) 為一號壩上游 1419 m 處斷面，此斷面已遠離拆壩影響河段，2012 年 2 月 13 日調查發現，受米雷颱風與東北季風降雨影響，泥砂因沖刷帶至下游，左岸有沖刷現象；2012 年 8 月蘇拉颱風為七家灣溪壩體拆除後所經歷最大的降雨事件，本研究於 2012 年 9 月 10 日量測結果可看出距右岸 10~25 m 間河道有明顯沖刷情形發生，最大沖刷深度約 0.6 m，左岸的主深槽則無明顯的變化，河道兩岸則無明顯的變化，亦無崩塌潛勢。

至於下游橫斷面部分，圖 4(e) 為七家灣溪一號壩下游 30 m 處斷面，拆壩後一個月的米雷颱風後於 2011 年 6 月 29 日的調查可看出主深槽約抬高 1.5 m，斷面左岸處有非常明顯的淤積，淤積的主要原因為此處受

到岩盤與混凝土塊的保護，在洪水退水階段，流速減緩，泥砂落淤於此。經歷了 10 月的東北季風降雨事件後，於 2012 年 2 月 13 日的調查可知該斷面沖淤互現，無明顯主深槽。蘇拉颱風後於 2012 年 9 月 10 日的調查，主深槽約下刷 0.6 m。圖 4(f) 為一號壩下游 183 m 處斷面，在 2011 年受壩體拆除及米雷颱風後造成淤積，在 2012 年 2 月 13 日的調查可知主深槽淤積高度約 0.3 m。在 2012 年 9 月因受蘇拉颱風影響，造成右岸有大量的淤積，最大淤積深度約為 2 m，主深槽線則有些微的淤積現象，左岸有些微的沖刷。圖 4(g) 為一號壩下游 783 m 處斷面，由壩體拆除前之 2010 年 4 月 11 日與壩體拆除後之 2012 年 2 月 13 日調查可知主深槽處有淤積現象，最大淤積高度約達 0.5 m，顯示拆壩下游淤積影響段已達下游約 800 m。本研究於蘇拉颱風後 2012 年 9 月 10 日進行量測，結果可看出距右岸 20 m 處高程約抬升 2 m。

3. 河段影像紀錄

本研究選取部分代表影像作為河相演變模式之探討，後詳述如圖 5。

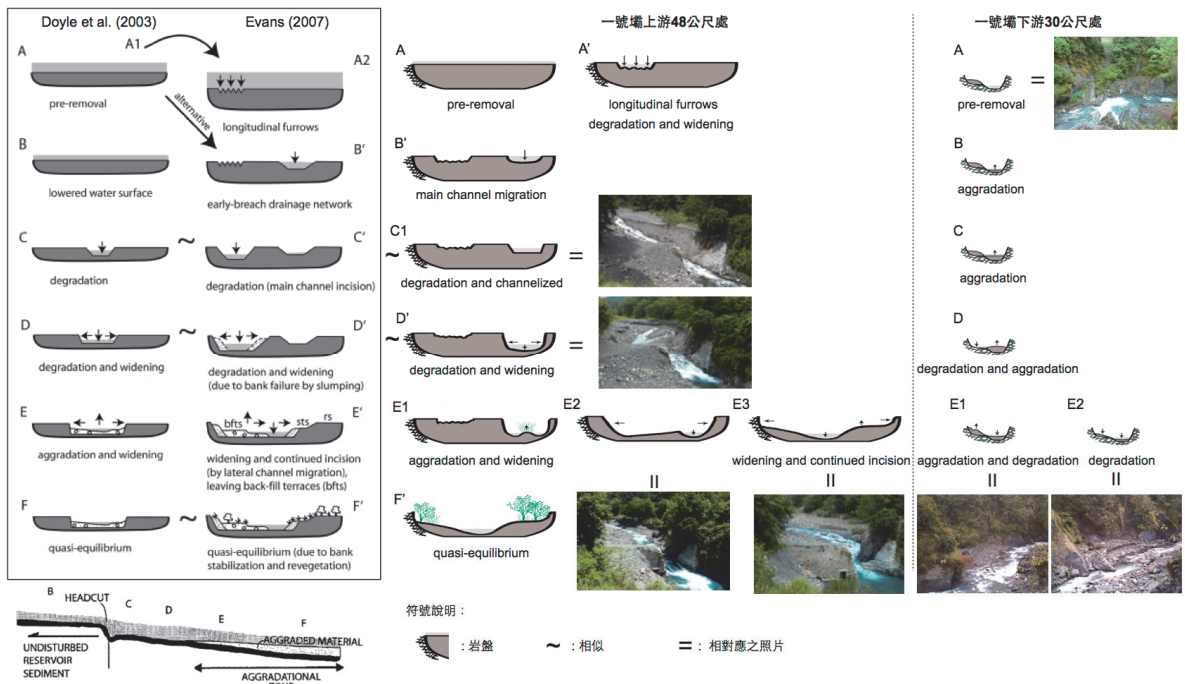


圖 5 本研究與前 Doyle et al. (2003) 及 Evans (2007) 之河道演變模式

Fig.5 Proposed Channel Evolution Models of this study and the previous works by Doyle et al. (2003) and Evans (2007)

五、討 論

本研究於兩年半的監測時間下，針對七家灣溪一號壩拆壩後之河相演變進行探討。由結果可知溯源侵蝕影響河段距離由拆壩後 15 天之 50 m 上溯至拆壩後 457 天之 800 m，溯源侵蝕速度 < 3.33 m/day，溯源侵蝕段之坡度由 11.9 % 減緩至 2.7 %，而拆壩後第一場事件米雷颱風與拆壩後最大強度事件蘇拉颱風造成河道最為明顯之溯源侵蝕速率。此縱向上的溯源侵蝕之距離與程度與橫向上的橫斷面變化密切相關，如上游 167 m 處斷面，即使經歷的拆壩後的第一場洪水事件米雷颱風，但由於其所在位置靠近溯源侵蝕終點，因此縱向侵蝕程度上僅下刷約 2 m，且未有橫向侵蝕，而更往上游 1419 m 處斷面，河道調整極為有限，此現象呼應 Doyle et al. (2003) 應用在美國威斯康辛州之案例所得溯源侵蝕影響河段外之河道變化微乎其微之發現。另外，本研究亦發現拆壩後第一場水文事件發生之時間點與強度，影響河道變化甚鉅，如上游 48 m 處斷面與下游 30 m 處斷面；然而，後續的水文事件若規模相近或較小，其能影響河道之變化有限，如米雷颱風之後的東北季風流量規模相近，因此並未進一步明顯調整河道，直至更大規模之梅雨、泰利颱風、與蘇拉颱風，方得以啟動河道變化。

本研究觀察到上游及下游的河道斷面變化各可分為九個及六個階段 (圖 5)：

在上游部分，A 階段為未拆壩狀態，即為壩體拆除前河道尚未發生沖刷現象之狀態，與原本 Doyle et al. (2003) 之 A 階段與 Evans (2007) 之 A1 階段相同，而本研究所新增的 A' 階段則為拆壩期間隨著河流慢慢沖刷之河道狀態，代表在拆壩工程進行中階段，隨壩體高度逐漸下降即已導致溯源侵蝕且主深槽逐漸下切，與 Evans (2007) 修正 Doyle et al. (2003) 所新增之洪水事件發生前河道即因重力與常流水產生縱向溝痕的 A2 階段類似；而由於一號壩拆壩缺口為左岸位置三分之一 (照片右側) 的壩體，導致泥砂於拆壩過程中被帶至下游而形成斷面切口，主深槽逐漸由右岸遷移至左岸為階段 B'，因重力作用，由 A' 階段進入階段 B' 僅需數分鐘；在接下來的 C1 階段，則同 Evans (2007) 保留 Doyle et al. (2003) 原本 C 階段的定義，因水面急速下降導致泥砂開始侵蝕，河道下切作用使主深槽形成，七家灣溪約在一號壩體拆除後一個星期即達此階段；至於之後的 D' 階段，亦類似 Doyle et al. (2003) 及 Evans (2007) 之定義，因為第一場洪水事件之發生，河

道因縱向與側向侵蝕而下切與拓寬，七家灣溪在一號壩體移除後約一個月後，即尖峰流量為 28.8 cms 的米雷颱風發生時到達此一階段；在數個月後同為 1.11 年重現期距流量的東北季風事件由於其規模相當，不具有更大的泥砂啟動能量，因此未造成河道進一步的明顯調整，而後約半年期間，由於未有其他水文事件之干擾，部分河道些微回淤，且河道中出現多處沙洲並且有植生生長，是為 E1 階段，此與原本 Doyle et al. (2003) 之 E 階段與 Evans (2007) 之 E' 階段皆有所異；而在植生得以穩定生長前，七家灣溪又再經歷 2012 年 6 月尖峰流量為 139 cms 與 38 cms 的梅雨及泰利颱風後，造成河道再度向下及側向侵蝕之大幅調整，是為 E2 階段，之後又經歷 8 月份尖峰流量為 403 cms 的蘇拉颱風，河道再行大幅調整，除向下侵蝕外，大幅度的側向侵蝕造成左岸崩塌土堆積於河道中，產生河階地形的斷面形狀是為 E3 階段；七家灣溪達到階段 E1 所需時間為數個月、達到階段 E2 與 E3 需 1~2 年；至於 Doyle et al. (2003) 與 Evans (2007) 所提及最後的 F' 階段，是由於邊坡穩定加上植生形成準平衡的狀態，在七家灣溪拆壩一年半後之現在，雖過程中有暫態之植生形成，但隨後因水文事件之干擾而不復見，準平衡階段仍未明顯形成。

至於下游河道演變部分，A 階段為未拆壩的狀態，於拆壩期間，隨著壩體拆除工程的進行，上游庫區泥砂開始被帶至下游淤積，使得底床逐漸小幅度抬高約 1.5 m，此時為 B 階段；當上游河道主深槽形成且第一場洪水事件發生前，溯源侵蝕趨緩，下游河道淤積亦趨緩，此時為 C 階段；D 階段為米雷颱風後之泥砂運移使得原左岸主深槽底床抬高、原右岸堆積層土砂被帶往下游更大量的泥砂進入下游河道造成左岸淤積，主深槽位置偏向右岸，斷面整體橫向高程變化趨於平緩，由 4.6 m 的高程差調整為 2.6 m；經過八個月後，期間發生東北季風降雨事件，其規模與米雷颱風差異不大，因此並未有進一步明顯之上游泥砂粒料傳輸至此，而部分原淤積在此之泥砂則往下游傳遞，因此河道沖淤互現，此為 E1 階段；直至蘇拉颱風，十年頻率的洪水使得斷面整體下刷，進入 E2 階段；同上游河道，在七家灣溪拆壩一年半後，下游河道是否穩定仍在持續觀察中。

整體而言，本研究觀察到七家灣溪一號壩壩體拆除後各階段的河道調整包括河道坡度、寬度及型態大幅調整，與所經歷的 5 次大型降雨事件有關 (表 1)。其中，上游階段 B'、階段 E1、E2、E3 與過去 Doyle et

al. (2003) 與 Evans (2007) 所提概念有所不同，其原因乃在於壩體規模、河道岩盤、水文事件之時間點、河道泥砂粒徑組成、與河道坡度等因子之差異。七家灣溪壩體規模為 Doyle et al. (2003) 所探討案例之四倍高、Evans (2007) 所探討案例之兩倍高；河道坡度為 Doyle et al. (2003) 與 Evans (2007) 所探討案例之一個數量級以上；泥砂組成爲漂石、卵石、砂等大粒徑材料，且非具絮凝現象，呼應 Pizzuto (2002) 所提出如礫石等大粒徑組成的河道之溯源侵蝕爲主要大流量所驅動；而水文事件之時間點與規模，使得七家灣溪進入階段 D' 與 E1 所需之數個月與 Evans (2007) 所探討案例之 2 至 3 個月類似，然而，上游階段 E1 的暫態植生平衡歷時數個月後，又進一步經歷 E2 與 E3 階段的大幅調整。至於準平衡之階段 F'，七家灣溪一號壩於拆壩後一年半後，上游 48 m 處及下游 30 m 處之河道尚未達到此一階段，根據 Evans (2007) 所探討之案例，邊坡穩定加上植生形成準平衡的狀態需 3 至 5 年，而七家灣溪自蘇拉颱風結束後之河道仍未有植生覆蓋足夠時間以使河相達準平衡階段，加上根據過去水文歷史資料，此處仍有機會發生較蘇拉颱風更大規模水文事件，如 50 年重現期距之海棠颱風 (2005/7/18)，因此，持續觀察七家灣溪之後續演變與達到準平衡階段之過程有其必要性。

六、結 論

台灣河道條件特殊與國外大相逕庭，具較陡的河道坡度、流量豐枯懸殊及水流含沙量高之特性，且拆壩案例相對較少，因此，了解適用於台灣環境之拆壩後河道演變模式有其重要性。

本研究選取七家灣溪一號壩上下游共六個斷探討拆壩後一年半內 (2011 年 5 月 25 日至 2012 年 11 月 11 日) 之河道變化，並以壩上游 48 m 處及下游 30 m 處之河道斷面，搭配水文記錄與流量分析與影像紀錄，研究發現，拆壩後，溯源侵蝕影響河段距離由拆壩後 15 天之 50 m 上溯至拆壩後 457 天之 800 m，溯源侵蝕速度 < 3.33 m/day，溯源侵蝕影響河段之坡度由 11.9 % 減緩至 2.7 %；拆壩後一年半內之河道演變模式與溯源侵蝕及五場水文事件相關。本研究並修正 Doyle et al. (2002) 與 Evans (2007) 所提出之河道演變模式，以壩上游 48 m 與下游 30 m 處斷面分別定義上下游九個與六個河道演變階段，其中，上游階段 B'、階段 E1、E2、E3 與過去 Doyle et al. (2003) 與 Evans (2007) 所提概

念有所不同，其原因乃在於壩體規模、河道岩盤、水文事件之時間點、河道泥砂粒徑組成、與河道坡度等因子之差異。在調整時間上，七家灣溪進入階段 D' 與 E1 所需之數個月與 Evans (2007) 所探討案例之 2 至 3 個月類似，然而，上游階段 E1 的暫態植生平衡歷時數個月後，又進一步經歷 E2 與 E3 階段的大幅調整。七家灣溪一號壩於拆壩後一年半後，上游 48 m 處及下游 30 m 處之河道尚未達到準平衡之階段 F'。截至目前，七家灣溪所經歷的最大強度的水文事件爲十年重現期距流量的蘇拉颱風，未來七家灣溪仍可能出現更大強度的水文事件，河道的演變與調整仍有待觀察。

參考文獻

- [1] 王筱雯 (2010)，「七家灣溪一號壩壩體及棲地改善工程-泥砂衝擊物理模型及數值分析」，雪霸國家公園管理處。(Wang, H. W. (2010). "Numerical Simulations and Physical Modeling of Potential Sediment Impact Assessment and Dam Removal Strategies for the No.1 Check Dam on Chijiawan Creek." Shei-Pa National Park. (in Chinese))
- [2] 王筱雯、郭偉丞 (2011)，「台灣堰壩的存與廢」，科學發展，467，52-57。(Wang, H. W. and Kuo, W. C. (2011). "Keeping or Demolishing Dams in Taiwan." Science Development, 467, 52-57. (in Chinese))
- [3] 王筱雯 (2012)，「七家灣溪一號壩壩體改善後河道環境衝擊評估」，雪霸國家公園管理處。(Wang, H.W. (2011). "Evaluation of Environmental Impact after Chijiawan No.1 Check Dam Removal." Shei-Pa National Park. (in Chinese))
- [4] 葉昭憲 (2007)，「七家灣溪壩體改善研究評估」，雪霸國家公園管理處。(Yeh, C.H. (2007). "Evaluation of Dam Removal on Chijiawan Creek." Shei-Pa National Park. (in Chinese))
- [5] 葉昭憲、王傳益 (2008)，「七家灣溪一號防砂壩壩體改善之試驗研究」，雪霸國家公園管理處。(Yeh, C.H., and Wand, C.Y. (2008). "Experiments of Dam Removal on Chijiawan Creek." Shei-Pa National Park. (in Chinese))
- [6] Doyle, M.W., Stanley, E.H., and Harbor, J.M. (2002). "Geomorphic Analogies for Assessing Probable Channel Response to Dam Removal." *Journal of the American Water Resources Association*, 38(6), 1567-1579.

- [7] Doyle, M.W., Stanley E.H., and Harbor J.M. (2003). "Channel adjustments following two dam removals in Wisconsin." *Water Resource Research*, 39(1), 1-15.
- [8] Evans, J.E. (2007). "Sediment Impacts of the 1994 Failure of IVEX Dam (Chagrin River, NE Ohio): A Test of Channel Evolution Models." *Journal of Great Lakes Research*, 33(sp2), 90-102.
- [9] Gran, K.G., and Montgomery, D.R. (2005). "Spatial and temporal patterns in fluvial recovery following volcanic eruptions: Channel response to basin-wide sediment loading at Mount Pinatubo, Philippines." *GSA Bulletin*, 117(1-2), 195-211.
- [10] Hassan, M.A., and Zimmermann, A.E. (2012). "Channel response and recovery to changes in sediment supply. In *Gravel-Bed Rivers: Processes, Tools, Environments*." M. Church, P. Biron, A. Roy (eds). John Wiley and Sons, 464-473.
- [11] Kasai, M., Marutani T., and Brierley, G.J. (2004). "Patterns of sediment slug translation and dispersion following typhoon-induced disturbance." Oyabu Creek, Kyushu, Japan. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, 59-76.
- [12] Lisle, T.E., Cui, Y., Parker, G, Pizzuto, J.E., Dodd, A.M. (2001). "The dominance of dispersion in the evolution of bed material waves in gravel-bed rivers." *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 1409-1420.
- [13] Madej, M.A., and Ozaki, V. (1996). "Channel response to sediment wave propagation and movement, Redwood Creek, California, USA." *Earth Surface Processes and Landforms*, 21, 911-927.
- [14] Madej, M.A. (2001). "Development of channel organization and roughness following sediment pulses in single-thread, gravel bed rivers." *Water Resources Research*, 37, 2259-2272.
- [15] Major, J.J., O'Connor, J.E., Podolak, C.J., Keith, M.K., Grant, G.E., Spicer, K.R., Pittman, S., Bragg, H.M., Wallick, J.R., Tanner, D.Q., Rhode, A., and Wilcock, P.R. (2012). "Geomorphic response of the Sandy River, Oregon, to removal of Marmot Dam." *USGS Professional Paper*, 1792, 64.
- [16] Pizzuto, J. (2002). "Effects of Dam Removal on River Form and Process." *BioScience*, 52(8), 683-691.
- [17] Simon, A., Curini, A., Darby, S.E., and Langendoen, E.J. (2000). "Bank and near-bank processes in an incised channel." *Geomorphology*, 35, 193-217.
- [18] Steward, G., Grant, G.E. (2005). "Potential Geomorphic and Ecological Impacts of Marmot Dam Removal, Sandy River, OR." Prepared for Portland General Electric.
- [19] Sawaske, S.R., and Freyberg, D.L. (2012). "A comparison of past small dam removals in highly sediment-impacted systems in the U.S." *Geomorphology*, 151-152, 50-58.
- [20] Wohl, E.E., and Cenderelli, D.A. (2000). "Sediment deposition and transport patterns following a reservoir sediment release." *Water Resources Research*, 36, 319-333.

2013年03月29日 收稿

2013年05月06日 修正

2013年07月19日 接受

(本文開放討論至 2014 年 6 月 30 日)