

巴陵防砂壩潰壩後河床變動過程之研究

高育林^[1] 曾文孝^{[2]*} 周士傑^[3] 謝正倫^[1]

摘要 2007年石門水庫上游的巴陵防砂壩潰壩事件，導致上游河床沖刷約20公尺，下游最大淤積約10公尺。本文蒐集巴陵防砂壩1980至2011年潰壩前後8次地形測量資料與2008~2012年共進行3次河床質粒徑調查以分析潰壩對於河床地形變動及河床質粒徑變化的影響。結果顯示，巴陵壩潰壩3個月後河床已逐漸趨於動態平衡，河床質粒徑整體有粗化再細化的趨勢。最後，本文以適用於土石流及高含砂水流的數值模式進行潰壩事件模擬，並利用河床測量成果進行比較。

關鍵詞：巴陵壩、潰壩、河床變動、數值模擬。

Study of the River Bed Variation after the Baling Check-Dam Failure

Yu-Lin Kao^[1] Wen-Hsiao Tseng^{[2]*} Shih-Chieh Chou^[3] Chjeng-Lun Shieh^[1]

ABSTRACT This study provides longitudinal and cross-sectional analysis of 8 pieces topography data collected from 1980 to 2011 and bed material particle size based on three investigations conducted between 2008 and 2012. The mainstream topography data in December 2007 shows that the head-cutting distance was about 3 kilometers after the dam broke. The topography data since 2008 displays that river the channel is stable as well. The topography data shows that the longitudinal section in the tributary had a head-cutting distance of about 3 kilometers after the dam broke, and the river channel still is showing adjustment behavior. The scour-and-fill analysis result of the mainstream cross-section shows that the transverse adjust changed significantly upstream from the dam location from 2006~2008. The particle size of the bed material has shown a trend from coarsening to fining according to different sampling points. Therefore, the river bed is still adjusting continuously. Finally, this study is based on a debris flow and sediment laden flow numerical model. The simulation result is fit for river-bed changes after dam-break.

Key Words : Baling dam, check-dam failure, river-bed variation, numerical simulation.

一、前言與文獻

近年來受氣候變遷影響，在颱風或豪大雨期間容易誘發集水區上游發生大規模崩塌或土石流，導致大

量土砂材料進入水庫集水區而減少水庫的庫容量、縮短使用年限，因此興建大型防砂壩攔蓄河道泥砂、穩定河床及減少河岸侵蝕並抑止土石流等大量土砂材料進入水庫集水區為常見的工程方法，惟此一大型防砂

[1] 國立成功大學水利及海洋工程學系

Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan 701, R.O.C.

[2] 東昇工程顧問有限公司

Sun-Rise Engineering Consultant Company, LTD., Taichung, Taiwan 407, R.O.C.

[3] 智全工程技術顧問有限公司

All-wisdom Engineering Consultants, LTD., Taipei, Taiwan 104, R.O.C.

* Corresponding Author. E-mail : caseytseng26@gmail.com

壩如發生潰壩事件，將對上下游的河床造成劇烈的影響。本研究以石門水庫集水區之巴陵防砂壩為研究對象，該壩於 2004 年艾利颱風事件後已淤滿，在 2007 年韋帕颱風侵襲期間發生潰壩事件，壩體上游蓄積的泥砂受到大量洪水的挾帶往下游輸送，導致壩體上下游的河床劇烈變化，可能對於上下游河工結構物的安全造成威脅。

有關河岸侵蝕及河道沖淤的前人研究中，長谷川和義 (1981) 提出河岸侵蝕理論，當河岸崩塌面積與河床堆積面積相當時，即完成一次河岸侵蝕，因此根據此一理論，河岸侵蝕並非連續性而為階段性發生。Bhowmik and Demissie (2001) 年針對美國 Illinois 州 Kankakee River 進行河道的調查，藉由歷年的橫斷面測量資料進行沖淤變化趨勢分析，進而討論河岸的侵蝕變化歷程，同時探討歷年的河床質代表粒徑 d_{50} 的變化歷程，最後分析得到代表粒徑 d_{50} 與河道沖淤的相關性，該文分析顯示河道呈現沖刷現象則粒徑尺寸較大，若呈現河道淤積粒徑尺寸則較小。

此外，周士傑 (2011) 研究顯示防砂壩潰壩瞬間會產生土石流運動，因此在模擬防砂壩潰壩過程中，需考量土石流及高含砂水流的流動機制。有關前人進行土石流運動模擬研究方面，蔡元芳 (1999) 以 Bagnold (1954) 的本構關係式建立之礫石型二維土石流模式，並以實驗結果之幾何資料作為數值模式參數率定與驗證之依據，再將模式應用至地形變化複雜的土石流災害現場，進行災害模擬及治理工程效果評估。顏志憲 (2010) 以二維土石流沖淤模式應用於花蓮縣拔仔溪工程效果評估，並提出防砂壩拆除位置及拆除高度建議。曾文孝等 (2011) 以適用於土石流及高含砂水流的二維土石流沖淤模式進行小林村角埔溪的土石流事件探討，成果與實際測量的地形資料尚屬吻合。王滢婷 (2010) 及李聖文 (2011) 分別以 NETSTARS 進行巴陵壩潰壩後上游河床變遷的研究，探討潰壩後的地形變化，藉由模式得到溯源侵蝕及河道呈現動態平衡的現象。

二、研究區域概述

1. 巴陵壩資料概述

巴陵壩興建於 1977 年，位於石門水庫上游約 35.5 公里處，為石門水庫上游集水區的第一座大型防砂壩，原設計攔砂總容量為 1047 萬立方公尺，主壩壩型

為扶壁式混凝土重力壩，壩體寬約 80 公尺，壩高約 38 公尺，溢流口高約 25 公尺，於 2004 年艾利颱風侵襲後淤滿。巴陵壩在 2007 年 9 月 18 日韋帕颱風侵襲期間發生潰壩事件，潰壩後兩週柯羅莎颱風在石門水庫集水區內降下高達 666.4 公厘的累積雨量，推估的洪峰流量約為韋帕颱風的兩倍，兩次洪水挾帶大量的泥砂往下游庫區輸送，使得庫區的原水濁度急遽上升、影響水庫供水功能，石門水庫集水區在巴陵壩潰壩後歷年颱風事件之集水區平均降雨量如表 1 所示。在接連的洪水事件下，巴陵壩的損壞使原本儲存蓄積於上游的土砂材料失去屏障往下游輸送，除造成下游河床抬升外，亦可能對河床上橫向結構物的安全性造成影響。

2. 地形資料說明

本文蒐集 8 次石門水庫集水區的地形資料進行比對，分別為 1980 年 1/10000 的航照地形圖，此為建壩後第 3 年的地形資料；2006 年 5 公尺數值地形資料，以及 2007 年 6 月水利規劃試驗所「高台水庫可行性規劃-替代石門水庫供水水源工程規劃」中，針對石門水庫集水區上游地區進行測量。另外，潰壩事件發生後北區水資源局在 2007 年 12 月對巴陵壩址上下游各 5 公里的範圍進行地形測量，並在 2008 年 12 月把下游測量距離延伸至義興電廠，之後於 2009 年 11 月、2010 年 12 月及 2011 年 12 月持續進行測量作業。巴陵壩潰壩前後照片如圖 1 所示。

表 1. 巴陵壩潰壩事件歷年颱風事件於石門水庫集水區平均雨量 (北區水資源局)

Table 1 The average rainfall in Shihmen Reservoir watershed of the following typhoon events since 2007

年度	颱風名稱	影響時間	平均雨量 (公厘)
2007	聖帕	08/16~08/19	317.1
	韋帕	09/17~09/19	365.9
	柯羅莎	10/04~10/07	666.4
2008	卡玫基	07/16~07/18	87.9
	鳳凰	07/26~07/29	273.9
	辛樂克	09/11~09/16	965.2
	薔蜜	09/26~09/29	427.1
2009	莫拉克	08/05~08/10	512.2
	芭瑪	10/03~10/06	190.6
2010	南修	08/30~08/31	15
	萊羅克	08/31~09/02	10.2
	凡那比	09/17~09/20	0
	梅姬	10/21~10/23	107.8

三、研究方法

1. 沖淤面積分析

巴陵壩於潰壩前壩後儲砂空間已淤滿,使得上游河床坡度趨緩,形成淤積河道且平緩橫斷面的河相型態;潰壩後河床因下切的現象,且受到洪水沖刷攻擊或土體崩落,造成河岸侵蝕現象。因潰壩後河道隨著時、空間的改變而產生河道水理變化,故本文參考 Bhowmik and Demissie (2001) 針對美國 Illinois 州 Kankakee River 進行河道沖淤面積的分析方法,利用前後期橫斷面資料進行比對,並計算沖刷或淤積之面積值。為了量化河道的變化程度,本文再利用相鄰兩斷面之沖刷或淤積之面積推估土砂沖刷淤積體積,並將歷年的沖淤體積量進行土砂收支分析,由分析結果進而探討潰壩前後河床變動之問題。

2. 土石流沖淤模式簡介

本文採用曾文孝等 (2011) 以 Egashira et al. (2007) 提出適用於土石流及一般河道輸砂的本構關係理論,建立適用於土石流及高含砂水流之二維土石流沖淤模式,並以周士傑 (2011) 渠槽動床實驗室測結果作為數值模式率定及驗證之依據 (曾文孝, 2012)。有關二維土石流沖淤模式的基本方程式如下所示:

(1) 連續方程式

$$\left[\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} \right] = \frac{E}{c_*} \quad (1)$$

(2) 動量方程式

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial}{\partial x} (uM) + \beta \frac{\partial}{\partial y} (vM) = -gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_m} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \beta \frac{\partial}{\partial x} (uN) + \beta \frac{\partial}{\partial y} (vN) = -gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_m} \quad (3)$$

上式中, τ_{bx} 、 τ_{by} 分別為 x 、 y 方向的底床摩擦剪應力,表示為:

$$\tau_{bx} = \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \left\{ (\sigma - \rho)ghc_d \cos \theta \tan \phi + \rho_m f_b (u^2 + v^2) \right\} \quad (4)$$

$$\tau_{by} = \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \left\{ (\sigma - \rho)ghc_d \cos \theta \tan \phi + \rho_m f_b (u^2 + v^2) \right\} \quad (5)$$

$$f_b = \frac{25}{4} \left(\frac{d}{h} \right)^2 \left\{ k_d \frac{\sigma}{\rho} (1 - e^2) c_d^{1/3} + k_f \frac{(1 - c_d)^{5/3}}{c_d^{2/3}} \right\} \quad (6)$$

(3) 土砂連續方程式

$$\frac{\partial(c_d h)}{\partial t} + \frac{\partial(c_d M)}{\partial x} + \frac{\partial(c_d N)}{\partial y} = E \quad (7)$$

(4) 底床高程變動方程式

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = - \frac{E}{c_* \cos \theta} \quad (8)$$

$$\frac{E}{\sqrt{u^2 + v^2}} = c_* (\tan \theta - \tan \theta_e) \quad (9)$$

上列方程式中, h 為流體的流動深度, M 、 N 分別為 x 、 y 方向的流量通量, E 為河床變動速度, c_* 為底床堆積層濃度, β 為動量補正係數, u 、 v 分別為 x 、 y 方向的平均流速, g 為重力加速度, η 為土石流液面高程, τ_{bx} 、 τ_{by} 分別為 x 、 y 方向的底床剪應力, ρ_m 為流體密度 ($\rho_m = (\sigma - \rho)c_d + \rho$), c_d 為流體濃度, Z_b 為底床高程, θ 為底床坡度; θ_e 為與流體濃度相關的平衡坡度。



(a) 2007年7月 (北區水資源局, 2007(1))



(b) 2007年9月19日潰壩後

圖 1 巴陵防砂壩潰壩前後照片

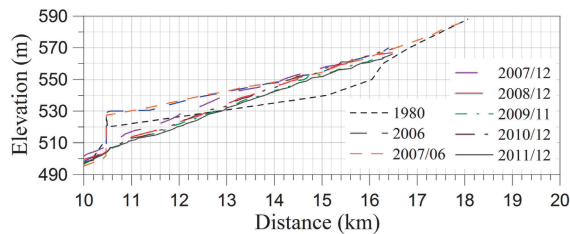
Fig.1 Pictures before and after Baling dam failure

四、分析成果

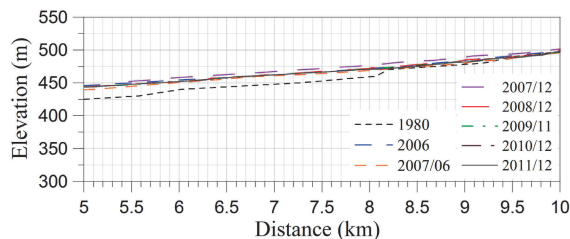
1. 潰壩前後河川斷面變動分析

(1) 主河道縱斷面河床變動分析

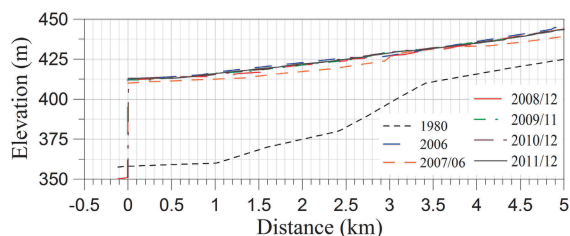
各時期的縱斷面測量成果如圖 2 所示，以榮華壩為研究起始點設為 0 公里，巴陵壩約位於榮華壩上游 10.5 公里處，以巴陵壩上游約 7.5 公里處之砂崙仔防砂壩為研究終點。由 1980 年的縱斷面成果中可發現，巴陵壩興建完成的三年內已有十分驚人淤積量；在 2006 年的數值地形資料中，由於係以航空照片進行製作，在河道及峽谷處可能受到植生或地形陰影的影響而造成判釋上的誤差，因此該成果中有多處的河道高程出現奇異值，若將其忽略後並與 2007 年 6 月的實際測量資料比較，發現在巴陵壩上游兩次的資料成果十分接近，在下游部分則 2006 年的數值地形明顯高於 2007 年 6 月的實際測量資料，如圖 2b、2c。



(a) 巴陵壩上游5公里



(b) 巴陵壩下游5公里



(c) 榮華壩 (巴陵壩下游10公里處) 上游5公里

圖 2 巴陵壩潰壩前後主河道縱斷面圖

Fig.2 The longitudinal profile before and after the Baling dam failure

此後歷經韋帕颱風引發潰壩事件和柯羅莎颱風的洪水沖刷，2007 年 12 月的測量成果顯示上游沖刷的影響範圍約至巴陵壩上游 3 公里左右，巴陵壩下游 5 公里約有 5~10 公尺不等的淤積量，而榮華壩上游 5 公里由於未有測量資料，故無法比較。2008 年 12 月的實測資料顯示巴陵壩壩址上游的影響範圍約增加至 4.5 公里左右，巴陵壩下游 5 公里大致已回復至潰壩前的高程，榮華壩上游至 3 公里及 4~5 公里間的河床則有明顯抬升。2009 年因受莫拉克颱風的影響，在 11 月的測量成果中，巴陵壩上游段沖刷距離已超過 6 公里，巴陵壩下游 5 公里則與 2008 年 12 月的測量成果大致吻合，在榮華壩上游 1~2 公里處河床則有些微抬升。因莫拉克颱風之後，石門水庫集水區內已無劇烈降雨事件，因此在 2010 年 12 月資料中，僅在 13~14 公里處地形有抬升現象，較 2009 年之成果略高約 1~2 公尺，巴陵壩下游 5 公里則大致吻合。由 2011 年 12 月資料顯示壩址上游段河床高程較 2010 年下降約 3~5 公尺，壩址下游段則大致吻合。整體而言，巴陵壩潰壩後的河床變動以 2007~2008 年變化最為劇烈，2008 年之後上游段的河床仍有局部的調整，中下游則變動不大。

(2) 主河道橫斷面河床變動分析

本文以 Bhowmik and Demissie (2001) 採用的橫斷面沖淤面積分析法，以前後期測量資料進行榮華壩至巴陵壩上游 5 公里沖淤量分析，並以榮華壩為起點，約每 1 公里取一斷面，斷面位置分佈如圖 3，沖淤分析成果如圖 4 所示。在潰壩初期 (2007~2008 年) 的最大沖淤量發生在巴陵壩壩體上游約 500 公尺 (Distance=10.67k) 處，在巴陵壩上游約 2 公里 (Distance=12.17k) 處有明顯淤積現象；潰壩次年的最大沖淤量則在巴陵壩壩址上游約 1.5 公里 (Distance=11.67k) 處，且整體趨勢為持續沖刷；潰壩後第 2 年以後 (2009~2011 年) 在巴陵壩壩址附近大致呈現沖刷的現象；然而在潰後 4 年 (2011~2012 年) 於巴陵壩壩址上游約 500 公尺 (Distance=10.67k) 處，則出現明顯的淤積現象。為了進一步了解長期的沖淤情形，以巴陵壩舊址為分界點，分別進行巴陵壩與榮華壩之間及巴陵壩上游五公里河道的土砂收支分析，成果如圖 5 所示。由分析顯示壩址上游在 2007~2009 年經歷多場洪水事件，將壩

體上游蓄積的土砂材料輸送至下游導致河床持續下降, 僅 2010~2012 年因無較大洪水事件的影響而有淤積的現象。在壩址下游的部分, 潰壩初期 (2007~2008 年) 因潰壩後將原蓄積在巴陵壩上游的土砂材料輸送至壩址下游, 呈現淤積的趨勢。潰壩後第 1 年 (2008~2009 年) 在辛樂克颱風洪水影響下, 原堆積在河床上的土砂材料持續往下游輸送, 造成河床開始呈現冲刷的現象。潰壩後 2 年 (2009~2010 年) 受莫拉克颱風影響, 上游堆積的土砂材料輸送至此堆積, 造成河床逐漸抬升。潰壩 3 年之後 (2010~2012 年) 由於無洪水事件的影響, 因此藉由河道輸砂的作用將堆積的土砂材料輸送至更下游。整體而言, 潰壩後的河床變動情形, 係以防砂壩為轉折點, 壩體上游的河床因冲刷而持續下降, 下游河床則逐漸淤積、抬升, 並且逐漸趨於穩定平衡 (周士傑, 2011)。

(3) 支流縱斷面河床變動分析

防砂壩潰壩後除了造成上游河床冲刷下切以及下游河床堆積、抬升之外, 對於河床變動區

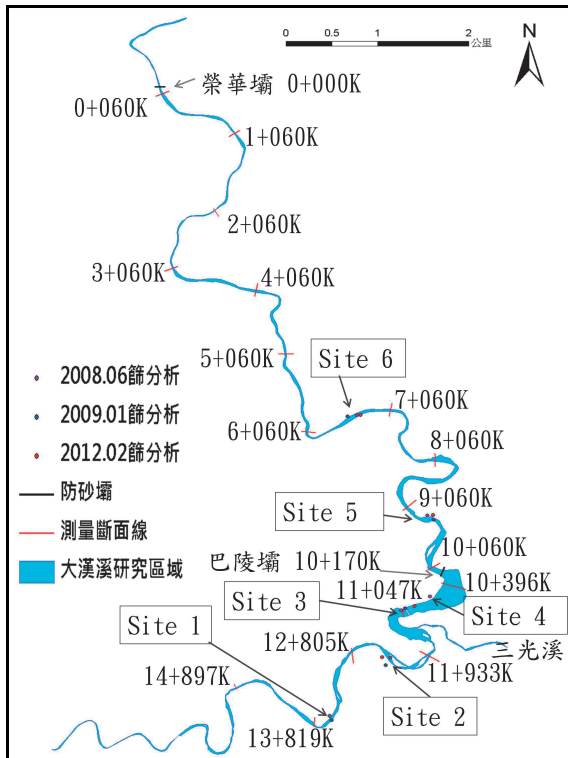


圖 3 橫斷面與採樣孔佈置圖
Fig.3 Location of cross sections and sampling sites

段匯入的支流同樣有極大的影響。自巴陵壩建壩以來, 上游的河床因歷年來颱風豪雨事件造成集水區內崩塌產生的土方量而逐漸淤積, 當河床不斷抬升且高於支流的河床高程時, 以及主、支流交會處的相互影響造成支流產生攔阻、調整坡度等溯源淤積現象, 使得支流的河床不斷的抬升; 而當巴陵壩潰壩後主流河床急速下降, 當主流河床基準面低於支流匯流處的高程時, 對於支流逐漸失去攔阻作用, 造成支流的河床縱斷面重新調整, 巴陵壩上游約 1.5 公里處的三光溪 (見圖 3) 即為主要的案例。由圖 6 可看出 1980 年至 2006

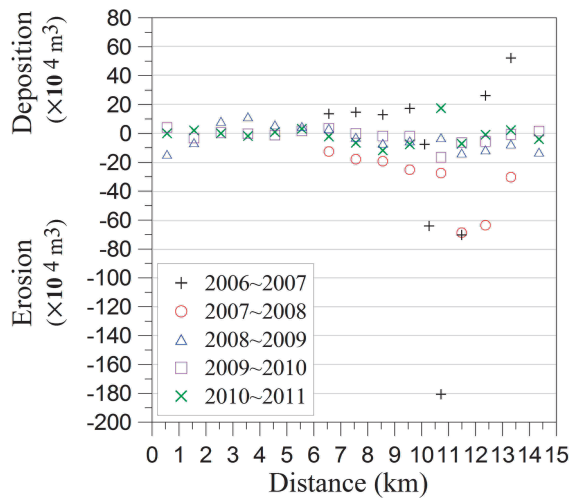


圖 4 沖淤量分析成果圖
Fig.4 Erosion and deposition analysis result

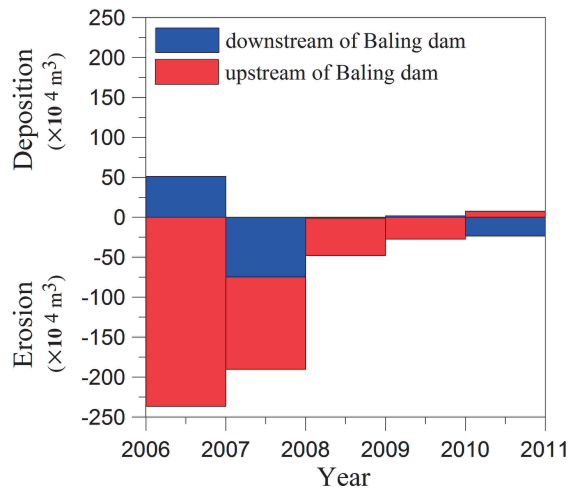


圖 5 榮華壩至巴陵壩及巴陵壩上游五公里河道土砂收支分析
Fig.5 Sediment budgets analysis results

年之間，因巴陵壩建壩的影響，使得大漢溪上游的河床逐漸淤積，也同時造成三光溪的河床逐漸抬升，在匯流口處的河床升高約 8.16 公尺，往上游影響的範圍約至 900 公尺左右。2008 年 12 月的資料顯示，在巴陵壩潰壩後經歷四次在集水區內降下超過 400 公厘累積雨量的颱風事件後，三光溪河床有顯著的沖刷現象，與大漢溪的匯流處約下刷 13.2 公尺，溯源沖刷的距離則超過 1.8 公里，已超過地形測量的範圍。在後續 2009 年 11 月、2010 年 12 月及 2011 年 12 月的資料顯示，三光溪河床在匯流處至上游 200 公尺之間變動量較小，其餘河段仍處在河床的縱向調整階段。

2. 主河道粒徑分析

本研究於 2008 年 6 月、2009 年 1 月及 2012 年 2 月分別至巴陵壩壩址上下游各 4 公里距離間之河段進行河床質採樣，各採樣點和分析成果如圖 3 及圖 7 所示。雖然潰壩後大部分儲存於壩後的土砂材料多已被洪水沖刷至下游，但河道上仍有部分的高位河階存在，此為潰壩前堆積河床，其中採樣點 Site 4 即針對此特性之地點進行採樣，以作為潰壩前後河床堆積土砂粒徑比較之參考依據。採樣點 Site 1 位於巴陵壩上游約 4 公里處，2008~2009 年兩次採樣的成果粒徑分佈十分相似，顯示潰壩後河床的沖刷情形尚未影響至此處；另外，採樣點 Site 1 在 2011 年 10 月完成左岸的護岸工程，由於河道經過整治無法呈現實際的河道沖淤變化，因此 2012 年不進行現地採樣。圖 7 b~e 為採樣點 Site 2~3 及 Site 5~6，分別為巴陵壩上游約 2.5 公里、上游約 1 公里，以及巴陵壩下游約 700 公尺和 3.5 公里處。由各採樣孔的粒徑分布曲線進行粗細粒徑的變化趨勢研究，歷年的粒徑變化趨勢如圖 7 f 所示，其中細粒徑材料以 d_{16} 為代表，粗粒徑材料則以 d_{84} 為代表。圖中可發現細粒徑材料歷年來上下游河床質顆粒尺寸較無明顯的變化趨勢，粗粒徑材料的歷年變化在壩址上游呈現上升的趨勢，壩址下游則為下降的趨勢，以 2009 年粒徑尺寸分布變化幅度最大，整體而言，各點位的粒徑分佈都有「先粗化再細化」的現象。

3. 數值模擬成果

(1) 模擬條件

由於 2006 年的 DEM 數值地形資料有較大的誤差，無法作為二維模擬的起始地形使用，因此

採用測量斷面數較少的 2007 年 6 月地形測量資料進行一維模擬計算，並以韋帕颱風事件的模擬成果作為柯羅莎颱風事件的模擬地形起始條件。此外，在鄰近巴陵壩上下游的大漢溪主河道上並無水文觀測站，因此流量的推估上利用霞雲及玉峰兩處流量站之觀測資料以面積比例法進行內差，推估巴陵壩位址的流量歷線作為模式計算的入流邊界條件，其流量歷線分別如圖 8 所示，其中韋帕颱風期間巴陵壩的推估尖峰流量為 1523.52 cms；柯羅莎颱風期間的推估尖峰流量約為 2720.15 cms。雖然巴陵壩潰壩後的兩次颱風事件時間十分接近，但由於韋帕颱風期間大部分的細顆粒土砂材料多已沖刷至下游，河床質堆積土砂的粒徑與柯羅莎颱風期間已完全不同，在數值模擬上應將其視為兩次獨立事件，因此本文分別以 Site 4 採樣成果 d_{50} 為潰壩前代表粒徑進行第一階段韋帕颱風事件的模擬，以及 2008 年 Site 3 採樣成果 d_{50} 為代表粒徑模擬柯羅莎颱風事件。

(2) 模擬成果

由於巴陵壩所在大漢溪主流河道區域並無水文站，鄰近的稜角水文站位於支流三光溪上，且因巴陵壩潰壩導致三光溪河床下降而無法有效紀錄水位資料，因此僅能以潰壩後地形測量資料與模擬成果進行比較。在韋帕颱風期間，巴陵壩潰壩後 24 小時內河床縱斷面變動過程的模擬成果如圖 9 所示。

根據本文的模擬成果，在潰壩後 1 小時內為最主要的河床縱向調整階段，防砂壩上游河床的下切、溯源侵蝕以及下游河床的淤積，多在巴陵壩潰壩後的 1 小時內完成，1 小時後的變動量已較為和緩；在 3 小時後上游河床的調整量已非常微小，下游河床也在約 6 小時後達到平衡。

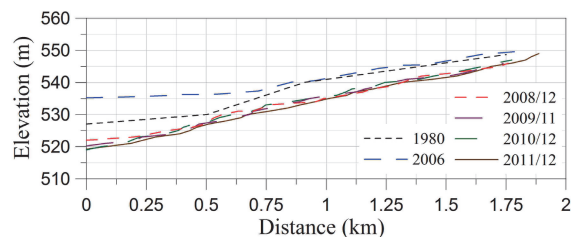


圖 6 巴陵壩潰壩前後支流三光溪縱斷面高程圖

Fig.6 The tributary (Sanguang creek) longitudinal profile before and after the Baling dam failure

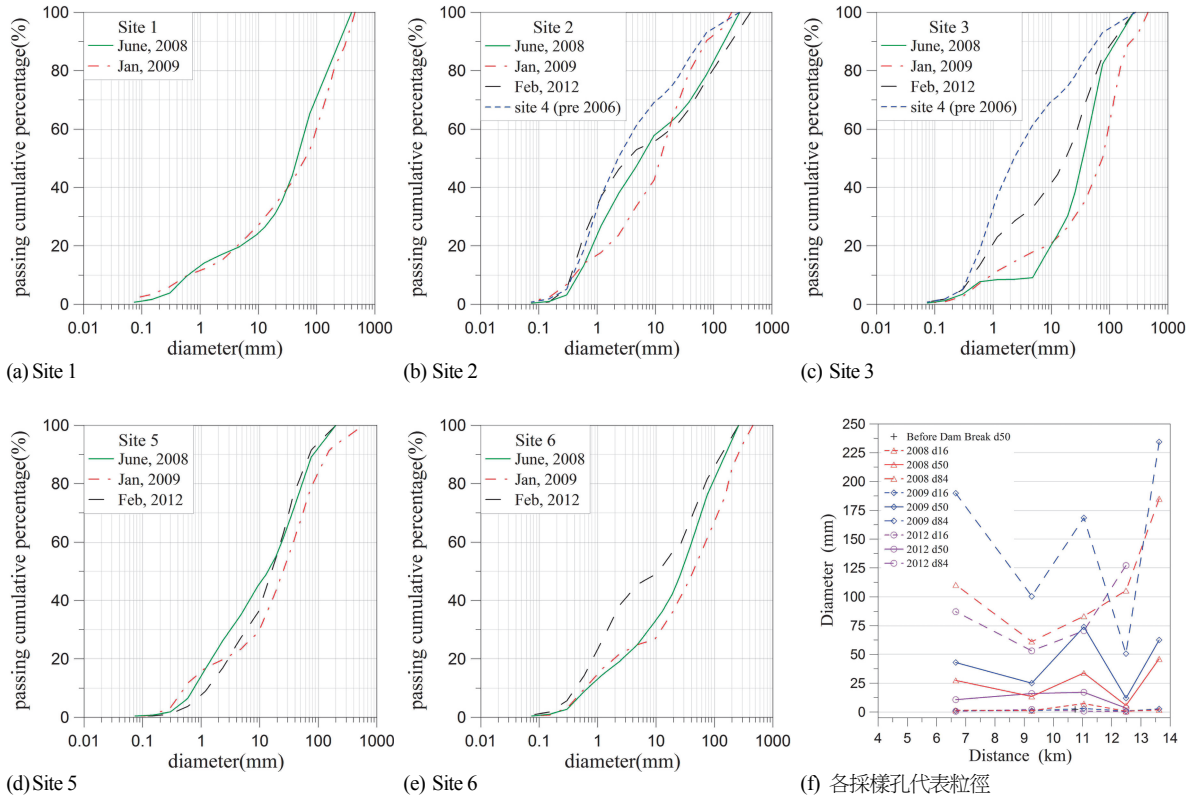


圖 7 各採樣孔分析成果

Fig.7 Results of grain size distribution analysis result

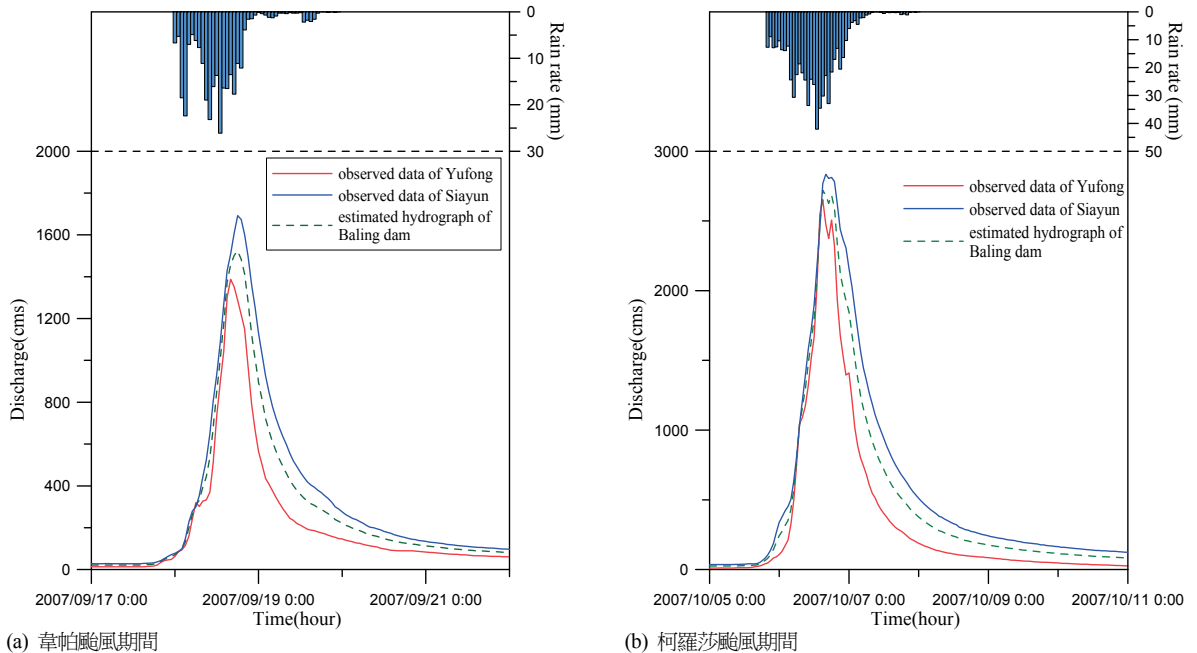


圖 8 平均降雨量、流量觀測資料及推估成果

Fig.8 Average rainfall, observation and estimated flow discharge

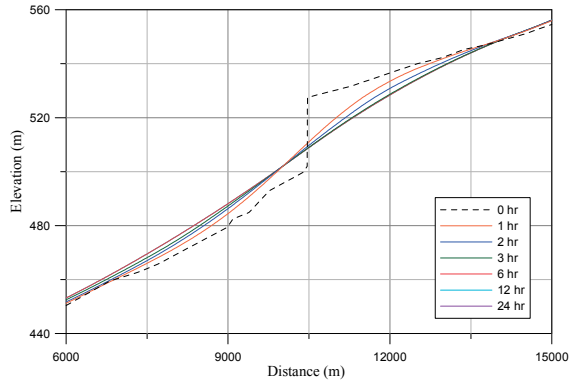


圖 9 潰壩後 24 小時縱斷面變化模擬成果

Fig.9 The simulation results in 24 hours of profile variation after dam failure

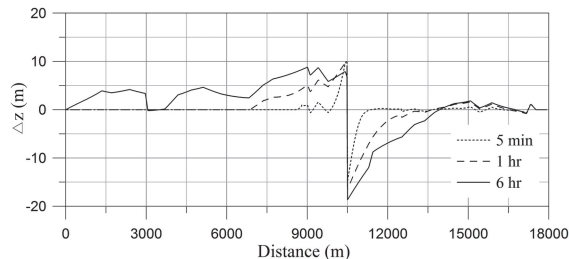


圖 10 韋帕颱風期間巴陵壩潰壩河床變動模擬成果

Fig.10 The river bed variation during typhoon Wipha

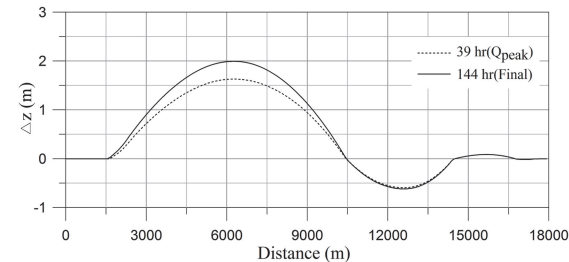


圖 11 柯羅莎颱風期間巴陵壩潰壩河床變動模擬成果

Fig.11 The river bed variation during typhoon Krosa

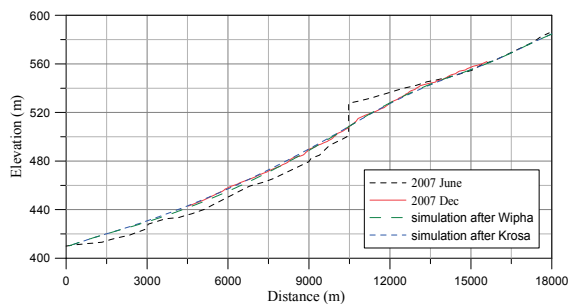


圖 12 巴陵壩潰壩河床變動模擬成果

Fig.12 The simulation results of Baling dam failure

因此在潰壩事件發生後，砂崙仔防砂壩至榮華壩間的河床縱向調整在巴陵壩潰壩後的 6 小時已達穩定平衡階段。圖 10 及圖 11 分別為韋帕颱風及柯羅莎颱風期間，砂崙仔防砂壩至榮華壩間的河床變動量的模擬成果，兩者比較後發現，韋帕颱風期間巴陵壩潰壩後 5 分鐘時，防砂壩上游的最大沖刷深度約為 14.81 公尺，一小時後最大沖刷深度約略增為 16.48 公尺，在六小時後，最大沖刷深度約為 18.63 公尺，而柯羅莎颱風的流量雖然約為韋帕颱風的 2 倍，但是對於河床縱斷面的調整卻十分有限；此外，兩者在地形變動量的成果曲線中亦呈現完全不同的現象，圖 10 為潰壩初期的地形變動曲線，因此河床的沖刷、淤積是以防砂壩的位置為分界點，防砂壩的上游是以沖刷為主，下游則以淤積為主，並且分別往上、下游邊界傳遞，因此最大的沖刷及淤積深度發在防砂壩的位置附近。圖 11 為第二次洪水事件（柯羅莎颱風）期間的河床變動成果，結果呈現正弦曲線的形式，且地形變動量已不顯著，雖然在防砂壩上游仍以沖刷為主，下游以淤積為主，但最大的沖刷、淤積處已不在防砂壩附近，相對在防砂壩的位置，地形變動量幾乎為零。

圖 12 為 2007 年 6 月的模擬地形起始條件及韋帕、柯羅莎兩次事件最終模擬成果與 2007 年 12 月測量成果比較圖。由於 2007 年 12 月測量成果是以巴陵壩上下游各 5 公里的範圍進行測量，因此僅能以測量範圍進行模式成果的比對。由圖 12 的成果中顯示，利用曾文孝等 (2011) 及曾文孝 (2012) 所建立的土石流沖淤模式進行巴陵壩的潰壩事件模擬，其結果與潰壩事件後的地形測量成果相當吻合。韋帕颱風事件的模擬成果中，河床縱斷面與測量成果已相當接近，顯示巴陵防砂壩上游儲蓄的大部分土砂材料多已沖刷至下游。

結 論

本文蒐集 8 次地形測量資料及進行 3 次河床質粒徑調查以分析巴陵壩潰壩後的河床變動情形，並以曾文孝等 (2011) 及曾文孝 (2012) 所建立適用於土石流及高含砂水流的二維土石流沖淤模式進行潰壩過程的模擬分析，得到結論如下：

1. 由縱斷面地形資料發現，在 2007~2009 年受多次

颱風洪水事件影響，巴陵壩上游的河床有逐年下降的趨勢，以 2007~2008 年變動最為劇烈；下游河段以淤積現象為主，但在 2008 年以後則變動不大。2009 年以後，由於集水區內並無大規模的洪水事件，因此河床的變動以局部的河道輸砂調整為主。整體而言，在巴陵壩潰壩後，砂崙仔防砂壩至榮華壩間的河床形成上游沖刷、下游淤積的現象。

2. 本文以 Bhowmik and Demissie (2001) 採用的橫斷面沖淤面積法進行橫斷面分析，成果顯示以 2007~2009 年上游河段的沖淤變化最為劇烈，與縱斷面成果同樣呈現持續沖刷的現象，僅在 2011~2012 年產生淤積，大致上與縱向分析的趨勢相當。壩址下游在 2007~2008 年產生明顯的淤積，2008~2012 年則是以沖刷現象為主，大致上河床變動量不大。
3. 由於巴陵壩發生潰壩後，主河道河床急速下降導致三光溪出口的屏障消失後，如同三光溪發生潰壩效應一般，河道開始進行縱向及橫向的河床調整。由測量資料比對後，顯示匯流口至上游 200 公尺間的變動量已不大，上游的河段仍持續在調整中，尚未達到穩定。
4. 根據 3 次的河床質粒徑調查進行不同粒徑的變化趨勢分析，發現除 d_{16} 歷年來上下游河床質顆粒尺寸較無明顯的變化，其餘皆有「先粗化再細化」的現象。
5. 本文將潰壩前後的兩次颱風事件考慮為兩次獨立事件模擬巴陵壩潰壩過程中河床的變動情形，其結果與事件後的地形測量成果十分吻合，其中砂崙仔防砂壩至榮華壩間的河床在潰壩後 1 小時內為最主要的河床縱向調整階段，在潰壩後的 6 小時內已達平衡階段。在韋帕颱風期間的地形變動量成果中，防砂壩的上游是以沖刷為主，下游則以淤積為主，並且分別往上、下游邊界傳遞，因此最大的沖刷及淤積深度發在防砂壩的位置附近；而柯羅莎颱風期間雖上游仍以沖刷為主，下游以淤積為主，但在防砂壩位置的地形變動量幾乎為零。

誌 謝

本文中石門水庫集水區及巴陵壩上下游河道測量相關資料，由水利署北區水資源局提供，特此致謝。

參考文獻

- [1] 北區水資源局 (2007), 「韋帕颱風巴陵防砂壩災損檢討報告」。(NRWRO (2007). Investigation of Baling chek dam failure during typhoon Wipha, technical report, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [2] 北區水資源局 (2007), 「高台水庫可行性規劃—替代石門水庫供水水源工程規劃」。(NRWRO (2007). Kaotai Reservoir Feasibility Study - Shihmen Reservoir Alternate Water Resources Planning, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [3] 北區水資源局 (2007), 「巴陵壩上下游河道斷面測量作業」。(NRWRO (2007). Cross-section survey of Baling chek dam riverbed, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [4] 北區水資源局 (2008~2011), 「巴陵壩上下游淤積砂石下移河道測量作業」。(NRWRO (2008~2011). Surveying of the deposition of Baling chek dam riverbed, Taiwan, ROC.(in Chinese))
- [5] 王滢婷 (2010), 「巴陵壩潰壩後對上游河床變遷影響之研究」, 國立台灣大學土木工程研究所碩士論文。(Wang, Y.T. (2010). A Study on Head-cutting Behavior due to Balin Dam Break, Master thesis, National Taiwan University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [6] 李聖文 (2011), 「巴陵壩潰壩後河床形貌變遷行為之研究」, 國立台灣大學土木工程研究所碩士論文。(Lee, S.W. (2011). A Study of Riverbed Morphology due to Barlin Dam Break, Master thesis, National Taiwan University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [7] 長谷川和義 (1981), 「非平衡性を考慮した側岸侵食量式に関する研究」, 土木学会論文報告集, 338, 37-50。(Kazuyoshi yoshi Hasegawa (1981). "Bank-erosion discharge based on a non-equilibrium theory." *Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering*, JSCE, 338, 37-50. (in Japanese))
- [8] 周士傑 (2011), 「防砂壩潰壩後河床演變過程之實驗研究」, 國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文。(Chou, S.C. (2011). Experiment Study of the riverbed variation after a check-dam failure, Master thesis, National Cheng Kung University, Taiwan, ROC.(in Chinese))
- [9] 曾文孝、徐郁超、賴文基、詹錢登、謝正倫 (2011), 「土石流沖淤模式應用於小林村角埔溪災害模

- 擬」，中華水土保持學報，42(3)，219-227。(Tseng, W.H., Hsu, Y.C., Lai, W.C., Jan, C.D., and Shieh, C.L. (2011). "The Debris Flow Numerical Model with Erosion and Deposition Effects: An Application in Jiaopu Creek, Hsiaolin Village." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 42(3), 219-227. (in Chinese))
- [10] 曾文孝 (2012)，「防砂壩於洪水事件中潰壩導致河床變動之研究」，國立成功大學水利及海洋工程學系博士論文。(Tseng, W.H. (2012). Study on the Flooding-Driven Erosion and Sedimentation Following a Check-Dam Failure, Ph. D, National Cheng Kung University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [11] 蔡元芳 (1999)，「土石流扇狀地形特性之研究」，博士論文，國立成功大學水利及海洋工程學系。(Tsai, Y.F. (1999). Study on the Configuration of Debris-Flow Fan, Ph. D. Thesis, National Cheng Kung University. (in Chinese))
- [12] 顏志憲 (2010)，「拔仔溪既有防砂工程調整方法之研究」，國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文。(Yen, C.H. (2010). A study on the evaluation of engineering construction adjustments in Ba-tz Creek, Master thesis, National Cheng Kung University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [13] Bagnold, R.A. (1954). "Experiments on A Gravity-Free Dispersion of Large Solid Spheres in a Newtonian Fluid Under Shear," *Proc. Roy. Soc. London, Series A*, 225, 49-63.
- [14] Egashira, S., Miyamoto, K., and Itoh, T. (1997). "Constitutive Equations of Debris Flow And Their Applicability." *Proceedings of the First International Conference on Debris Flow Hazards Mitigation*, California, USA, 340-349.
- [15] Bhowmik & Demissie (2001). "River Geometry, Bank Erosion, and Sand Bars within the Main Stem of the Kankakee River in Illinois and Indiana." Illinois State Water Survey Watershed Science Section Champaign, Illinois.
-

2012 年 10 月 15 日 收稿

2013 年 03 月 14 日 修正

2013 年 05 月 06 日 接受

(本文開放討論至 2014 年 3 月 31 日)