

NETSTARS 模式加入橋墩沖刷功能之研究—以八掌溪為例

王筱雯^[1] 謝慧民^{[2]*} 羅冠名^[1]

摘要 本研究以 NETSTARS V3.0 功能為基礎，根據橋墩沖刷研究，撰寫橋墩沖刷功能並新增 18 個常用的橋墩沖刷公式於模式中。研究區域為八掌溪厚生橋至觸口橋河段。在輸砂模式建置上，將結構物設定為不可沖刷，並輸入邊界條件與現有 19 座橋樑資訊，完成一般沖刷與局部沖刷階段之參數檢定，並利用誤差評估參數檢視最佳參數以反應八掌溪流域河床變遷趨勢。最後對未來十年河床沖淤進行預測，推測有沖刷趨勢的橋樑共 5 座，研究成果可作為一維數值模式新增橋墩沖刷功能之參考。

關鍵詞：NETSTARS、誤差評估參數、橋墩沖刷公式、沖淤模擬。

NETSTARS Improvement with Pier Scouring - A Case Study of Pa-Chang River

Hsiao-Wen, Wang^[1] Hui-Ming, Hsieh^{[2]*} Guan-Ming, Luo^[1]

ABSTRACT This study applies NETSTARS V3.0 by adding the calculation functions of eighteen pier scour formulas based on a comprehensive literature review to demonstrate local scour mechanisms. The study area is a reach of the Pachang Creek from the Housheng Bridge to the Chukou Bridge. We do not set the structures and weirs in the river to be scoured. Simulations are conducted by setting boundary conditions and importing information about nineteen bridges, and validations are separated into two steps as: general scouring and bridge local scouring. The best parameters are qualified by computing error evaluated parameter to fit the changing tendencies of the Pachang Creek. Finally, long-term riverbed evolution is simulated. The results show that there are 5 bridges with erosion trends. The results can be used as a reference for one-dimensional numerical models with pier scouring functions.

Key Words : NETSTARS, error evaluated parameter, pier scour formula, scouring and deposition simulation.

一、前言

河川為人類賴以生存的重要水源，但也阻絕了活動的通路與空間，人類因而在天然河川中增設跨河結構物，來連接兩岸，以增進河川兩岸活動及交流。然而，結構物會阻滯河道造成水流流況改變，加上台灣地勢陡峭、河短流急、降雨量時空上分布不均，易形成河床局部沖淤現象，嚴重者將會造成跨河結構物(如橋墩)的基礎嚴重掏空進而破壞，終致落橋。過去諸多學者專家，如邱永芳 (2011) 等曾研究有關於橋墩周圍泥沙沖淤機制，並且針對不同之水文參數，深入探討其對橋墩局部沖刷之影響，以減低橋墩基礎遭淘刷而破壞之風險。河道的治理，要考慮河床沖淤演變與其河段上人工結構物設置的情形。由於橋墩干擾使水流流況變得複雜，且橋墩之局部沖刷屬於三維問題，因此若利用純理論方式對沖刷行為作描述相當困難，

而採用水工模型試驗加以分析則顯得繁雜與不可再利用。雖各種現存數值模式對於不同流場型態與沉積特性的適用性，受限於所採行數值求解方法的特性與輸砂經驗推估公式的基本假設等因素，且模擬成果也跟資料完整性與檢定方式有關，但以數值模式模擬了解河床沖淤演變趨勢不失為一種經濟可行的分析方法。本文以河川沖淤數值模式 NETSTARS 加入橋墩沖刷機制成為 V3.0 的功能模組，來模擬八掌溪研究河段的河床沖淤及橋墩沖刷行為，研究重點為：(1) 數值模式 NETSTARS 加入橋墩局部沖刷公式並撰寫橋墩沖刷功能；(2) 以誤差評估參數 (Ev_sediment) 進行參數檢定，探討一般沖刷及橋墩沖刷模擬成果的合適性；(3) 評估較適用於八掌溪橋樑之橋墩沖刷公式；(4) 釐清八掌溪研究河段使用橋樑沖刷公式計算橋墩沖刷之必要性；(5) 提供十年長期模擬成果反映整體河床變遷趨勢，以作為橋樑管理單位治理橋墩沖刷之參考。

[1] 國立成功大學水利及海洋工程學系

Department of Hydraulic & Ocean Engineering, National Cheng Kung University, Tainan City, Taiwan

[2] 台灣首府大學資訊與多媒體設計學系

Department of Computer Science and Multimedia Design, Taiwan Shoufu University, Tainan City, Taiwan

* Corresponding Author. E-mail : hmhsieh@tsu.edu.tw

二、文獻回顧

1. 一維模式發展與 NETSTARS 模式：

早期之一維河川沖淤模式以美國陸軍工兵團研發之 HEC-6 (U.S. Army Corps of Engineers, 1993) 定量流模式最著名, 該模式在水理上僅求解能量方程式 (迴水演算), 輸砂演算以河床質載計算, 並納入 HEC-RAS4.0 Beta (U.S. Army Corps of Engineers, 2006) 成為輸砂模組, 方法較為簡單, 適用於長期河道沖淤變化模擬, 今日仍被普遍應用。其它定量流模式尚有 IALLUVIAL (Karim and Kennedy, 1982)、HEC2SR (Li et al., 1988)、BRALLUVIAL (Holly et al., 1985) 等。為了解決變量流況或下游受潮汐影響之河道沖淤行為, 一維變量流輸砂模式陸續出現, 如 SEDICOU (Holly and Rahuel, 1990)、CHARIMA (Holly et al., 1990)、MIKE11 (DHI, 1992) 等模式。進一步考慮河道橫向不均勻沖淤變化, 而採用流管的概念建構擬似二維模式則包括如 GSTARS (Molinas and Yang, 1986)、STARS (Orvis and Randle, 1987)、NETSTARS (李鴻源, 1996) 等。由於實際需要及電腦設備的進步, 乃另有平面或垂直二維、三維變量流模式之研發。本研究選擇較常使用於台灣河川的網路型擬似二維輸砂模式 (Network Stream Tube Model for Alluvial River Simulation, 簡稱 NETSTARS) 新增橋墩沖刷功能, 並評估其在研究河段八掌溪橋墩沖刷的精度。此模式結合了 BRALLUVIAL、CHARIMA 及修正後之 GSTARS 模式, 更能夠合理地模擬主流交匯狀況下之泥砂運動行為。

NETSTARS 模式為李鴻源 (1996) 等開發完成的複雜河系沖淤模擬及防災規劃評估模式, 已在國內水利界使用測試超過十五年的時間, 期間因使用者有模式視窗化的需求, 在 2002 年至 2004 年間透過國科會補助計畫, 進行三年的改良, 稱為 NETSTARS V2.0, 其主要的改良重點在模式程式功能的加強、中文視窗操作界面及後處理繪圖功能的開發、二維沖淤繪圖的 GIS 外掛模組開發、使用 XOOBS 技術建置數位學習網等; 從 2010 年開始, 也透過國科會補助計畫的執行, 模式改良進一步推向 NETSTARS V3.0, 已完成增加為 26 個輸砂公式, 可在各個斷面單獨設定可沖刷層厚度參數, 也增加了 21 個曼寧 n 值自動計算公式, 可做各個斷面的參數推估等 (謝慧民, 2011), 這些新增功能並已藉由八掌溪十年之實測資料加以驗證並做精度分析。而於 2012 年完成了河川岩盤沖刷模組開發、模式資料輸入的中文視窗界面開發、新版數位學習網站建置等, 並開始發展橋墩沖刷模組 (謝慧民, 2012)。

2. 橋墩沖刷相關文獻：

橋墩沖刷分為沖刷型態、周圍流況分類、沖刷性質與局部沖刷預測四個部分：

(1) 橋墩沖刷型態

根據 Melville and Coleman (2000) 曾針對橋墩附近的沖刷型態做探討, 認為橋墩沖刷現象可分為三種, 即一般沖刷、局部沖刷與束縮沖刷, 如圖 1 所示。以砂石補充觀點分類, 沖刷常被分為清水沖刷與濁水沖刷 (蔡長泰, 1993)。清水沖刷沒有來自上游底床質補充到沖刷

坑, 流速小於底床質啟動流速; 濁水沖刷有來自上游底床質補充到沖刷坑, 流速大於底床質啟動流速。當清水沖刷隨著沖刷時間的增長而到達臨界流況時, 因下降流的速度減緩而無法對底床進行掏刷, 此時沖刷坑會趨於平衡; 濁水沖刷的沖刷平衡深度則會因為上游有底床質的補充, 有不規則的震盪, 且其震盪幅度會因流速增加變為平緩。橋基在清水沖刷時期最大沖刷深度會比濁水沖刷大, 而清水沖刷達到平衡所需時間比濁水沖刷長。

(2) 橋墩周圍流況分類

橋墩周圍局部沖刷現象為三維流場, 起因於結構物阻擾流況, 流速往往大於未設立橋墩前數倍, 並將單方向水流轉變為三維亂流, 包括向下水流、馬蹄形渦流等。一般而言, 橋墩周圍局部沖刷深度與水流強度、河床質性質、結構物長度和水流夾角有關 (Breusers, 1991), 如圖 2 所示。橋墩附近流場大致可分為四種流況: 墩前壅水、向下射流、馬蹄形渦流、尾跡渦流。Dey (1999) 針對橋墩局部沖刷深度與時間變化做相關研究比較, 提出包括沖刷情況主要是由馬蹄型渦流造成、底床顆粒從沖刷坑底部被帶起並產生最大沖刷深度、沖刷坑中底床質之重量變化率等於從沖刷坑被帶出之底床質重量變化率與被帶入沖刷坑之底床質重量變化率之差等重要概念。

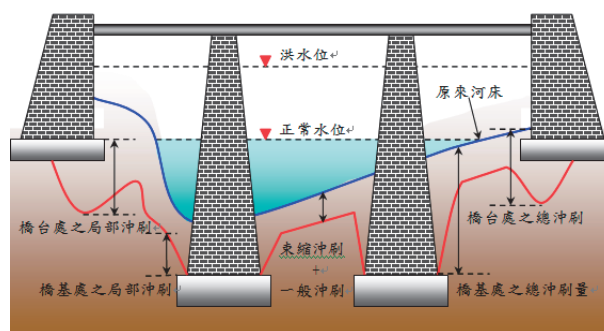


圖 1 - 般沖刷、束縮沖刷與局部沖刷示意圖 (modified from Melville, 2000)

Fig.1 Schematic for general erosion, beam contraction scour, and local scour

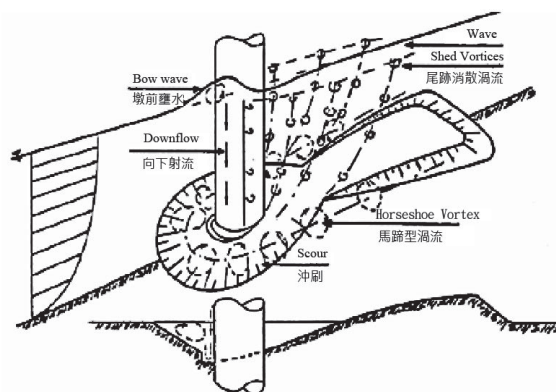


圖 2 圓柱型橋墩周圍水流流況示意圖 (modified from Breusers, 1991)

Fig.2 Schematic for cylindrical water flow conditions around the pier

(3) 橋墩沖刷性質

橋墩周圍沖刷為三維流場，由於純粹以理論分析方式推求橋墩周圍局部沖刷深度較為困難，過去大多運用試驗方式量測橋墩周圍局部沖刷深度，並藉以推導出影響橋墩沖刷因子之權重及相關沖刷深度公式。根據相關文獻分析，影響橋墩沖刷性質可歸納為橋墩性質、底床質性質、水流性質三類。橋墩性質包含橋墩基礎寬度（直徑）、水深、流速與沖刷深度的關係等；底床質性質包含底床質粒徑、底床質級配等；水流性質則包含水流流速、水流深度等，而 Shen(1969) 在研究中提出雷諾數影響馬蹄型渦流之強度關係。

(4) 橋墩局部沖刷預測

因橋樑之橋墩、橋台周遭水理特性與流況變化複雜，能量消散情形難以掌握，利用數值方式計算局部沖刷深度多屬研究階段。依據邱永芳 (2011) 等研究報告說明其原因如下：結構物附近三維流況複雜，能量消散情形難以掌握；附近泥砂啟動條件受紊流掌握，但往昔泥砂啟動條件之發展受限於觀測儀器，多不包含紊流效應；以往發展泥砂輸送率公式，均屬一維單一方向輸送，無法描述三維輸砂現象，故目前評估方法多直接以經驗公式進行 (林景輝, 1993; 陳泳錦, 2008)。國內外估算橋墩局部沖刷經驗公式主要採室內水工試驗，採非黏聚性土壤進行橋墩局部沖刷深度探討 (Coleman, 1971)。雖研究局部沖刷文獻眾多，但局部沖刷水理學仍未能被充分了解，常有在相同水理條件下，不同公式所得計算結果有明顯差異。以水理數值模式為分析工具，欲精確模擬河床橋墩周圍沖淤情形實屬困難，唯取得現地完整量測資料與合適的檢定方法才可提升模式精度。

(1) 橋墩局部沖刷公式

一般局部沖刷公式多以單一尺寸橫斷面橋墩柱作分析，依交通部公路總局「橋墩局部沖刷公式及耐洪能力詳細評估方法」採用相同準則訂定封橋水位之會議結論，適合台灣河川之橋墩沖刷深度估算公式有 6 種常用且誤差較小的局部沖刷公式，包括 Laursen (1962)、Neil (1964)、Shen et al. (1969)、Jain and Fischer (1980)、Froehlich (1988)、修正 CSU 公式 (Jones et al., 1992)。除了上述 6 個公式外，研究並納入其他橋墩局部沖刷或平均沖刷公式以加入 NETSTARS 提供試算，共計整理 18 種國內外使用之橋墩沖刷公式如表 1 所示，其中 y_s 為局部沖刷深度，通常指接近橋墩的最大沖刷深度，為基礎設計之重要因子； d_s 為平均沖刷深度，是橋墩周圍的沖刷深度平均值，對長期橋樑斷面的沖淤方向提供重要訊息。雖然沖刷深度與時間及空間有關，但各公式呈現的結果多為實驗控制條件下的沖刷深度，屬於空間的變化，如欲用在實際河川還需加入時間變化，本研究在模擬時期加入了時間控制參數以符實際需求。

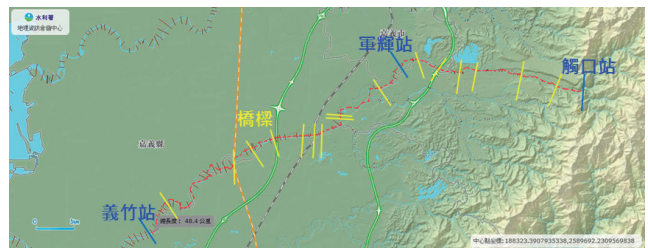


圖 3 研究區域水文測站位置高程圖 (水利署地理資訊倉儲中心)

Fig.3 Location elevation of hydrological station in this study area (WRA geographic information storage center)

三、材料與方法

1. 研究流程：

研究區域為八掌溪主流厚生橋至觸口橋河段，共 134 個斷面樁測量成果，總長度約 48.4 公里，範圍內有 19 座橋樑，水文測站依下游至上游分別為義竹站、軍輝站、觸口站，如圖 3 所示。本研究利用 NETSTARS 模式對八掌溪主流進行一般沖刷模擬，計算水理參數及輸砂量，再代入連續方程式求解平均底床沖淤 (謝慧民, 1996)，再以新增的橋墩沖刷機制模擬橋墩沖刷行為。局部沖刷模擬乃於橋墩斷面位置依橋墩沖刷公式進行演算，評估橋墩附近河床沖淤行為。本研究重點之輸砂模式建構與參數檢定執行流程如圖 4 所示。

2. 模式新增橋墩沖刷機制：

本研究以 NETSTARS 模式模擬八掌溪研究河段橋樑沖刷行為，除了使用 V3.0 已完成的曼寧 n 值自動計算公式、輸砂公式外，茲蒐集 18 個常用的橋墩局部沖刷公式新增於模式中，並撰寫橋墩沖刷機制功能進行局部沖刷模擬，以下就橋墩沖刷公式及模式新增橋墩沖刷功能分別說明：

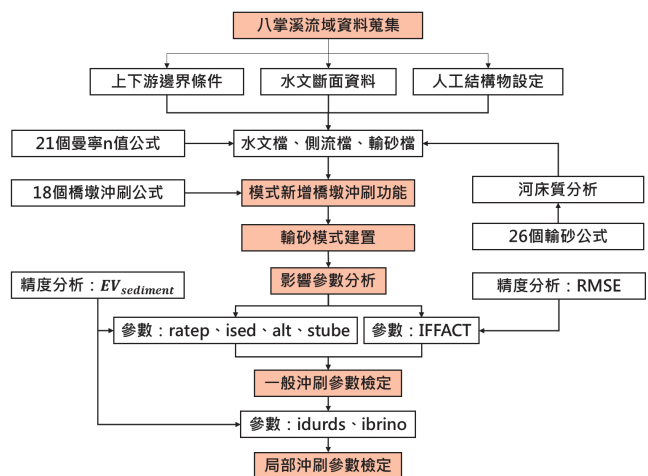


圖 4 輸砂模式建構與執行流程圖

Fig.4 Sediment transport model construction and execution flow chart

(2) 模式新增橋墩冲刷功能

模式設定橋墩邊緣處有最大局部冲刷深度 y_s , 假設冲刷從橋墩邊緣處最大到兩側影響範圍終點為零做線性分佈, 則各式中局部冲刷為平均冲刷的兩倍, 即以 $y_s=2 \times d_s$ 進行程式撰寫。

定義橋墩兩旁可冲刷橋墩直徑的倍數參數 $coef_{bw}$ 來計算橋墩冲刷兩側影響範圍, 即橋墩位置往外算橋墩寬度 D 乘以倍數係數 $coef_{bw}$ 為橋墩冲刷公式影響的冲刷範圍, 各橋樑斷面均可設定一個可調值, 橋墩兩側冲刷機制分為垂直向局部冲刷深度 y_s , 水平向橋墩冲刷影響範圍 $D \times coef_{bw}$, 沿著河床橫斷面的實際冲刷線概念繪製如圖 5 所示。

模式應用範圍包括八掌溪主流斷面 30 至斷面 116-1, 有橋樑斷面共 19 個, 由上述橋墩冲刷機制的概念, 模擬輸入假設、限制及程式撰寫流程如下 (謝慧民, 2012):

- ① 橋墩冲刷公式稽延時間參數 (idurds): 算出的 d_s 或 y_s 要除以一個稽延時間的參數, 當歷線單位為小時, 則此參數的單位也為小時, 可算出每個計算時距的分配冲刷深度, 橋墩冲刷公式稽延時間參數之設置可避免一次刷深過大造成數值發散的問題。
- ② 橋墩冲刷啟動變數 (iscourb): 此參數不等於零時進行橋樑斷面的橋墩冲刷計算, 等於零時則不做橋墩冲刷計算, 但橋樑仍可以進行一般冲刷計算。每個計算時距在橋墩冲刷公式可冲刷範圍內, 計算冲刷深度成果, 加入一般計算的冲刷深度變數內, 再進行河床橫斷面的變動計算。
- ③ 橋墩冲刷公式變數 (ibrino): 編號從 1 至 18, 各橋樑斷面可以獨立設定橋墩冲刷公式。
 - a. 副程式設定: 設 18 個副程式表示不同的橋墩冲刷公式, 並依照作者及發表年份取副程式名稱, 輸出變數為最大冲刷深度 y_s 。
 - b. 先判斷橫斷面計算點在設定冲刷範圍內及該斷面為橋樑斷面, 再進行橋墩冲刷計算, 以節省計算時間。與一般冲刷有一個暫存河床變動深度變數 $betube(ista, lk, j)$ 一樣, 設定一個橋墩冲刷的暫存

變數 $bribe(ista, lk, j)$ 記錄河段 lk 、斷面編號 $ista$ 、流管 j 的橋墩局部最大冲刷深度 y_s , 最後在影響範圍內, 依假設線性分佈的原則, 再一起調整橫斷面點高程。

- c. 應用四個二維變數, 一維度記錄斷面是橋樑的總數量, 另一維度為該橋樑斷面的橋墩數, 斷面左岸第一根橋墩中心起始點位置為 dis_{begin} , 橋墩寬度為 D , 兩橋墩間距為 bw 。四變數敘述如下:

(a) 橋墩左側可冲刷起點:

$$startpt_L = dis_{begin} - D/2 - D \times coef_{bw} + (i-1) \times bw \quad (1)$$

(b) 橋墩左側可冲刷終點:

$$endpt_L = dis_{begin} + (i-1) \times bw - D/2 \quad (2)$$

(c) 橋墩右側可冲刷起點:

$$startpt_R = dis_{begin} + D/2 + (i-1) \times bw \quad (3)$$

(d) 橋墩右側可冲刷終點:

$$endpt_R = dis_{begin} + D/2 + D \times coef_{bw} + (i-1) \times bw \quad (4)$$

3. 模式輸入資料建置:

模擬一般冲刷前須進行河道斷面形狀、斷面間距、底床泥砂粒徑組成、曼寧 n 值粗糙係數、上游流量歷線與下游水理邊界條件等資料建置, 並將河段固床工、攔河堰等跨河或河中構造物所在斷面設定為不可冲刷以符合實際情況, 輸砂模式建置分為斷面幾何資料、河床質粒徑、邊界條件、人工結構物設定。

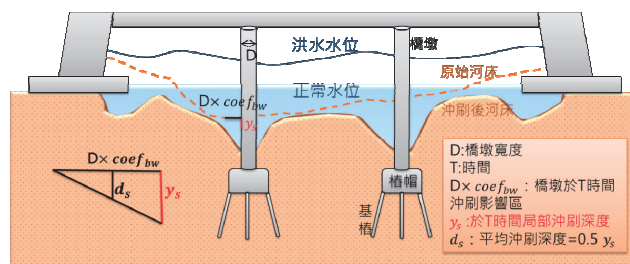


圖 5 橋墩附近局部冲刷機制

Fig.5 Local scour mechanisms near the pier

表 1 橋墩局部冲刷公式一覽表

Table 1 List of pier local scour formulas

編號	學者	年份	公式	備註
1	Laursen	1962	$\frac{D_p}{y_1} = \begin{cases} 5.5 \frac{y_s}{y_1} \left[\frac{y_s}{11.5 y_1} + 1 \right]^{1.7} - 1 & \text{濁水冲刷} \\ 5.5 \frac{y_s}{y_1} \left[\frac{y_s}{11.5 y_1} + 1 \right]^{0.7} \left[\frac{\tau_1}{\tau_c} \right] - 1 & \text{清水冲刷} \end{cases}$	y_s : 局部冲刷深度 (m) y_1 : 墩前水深 (m) D_p : 墩柱迎水寬度 (m) = $L \times \sin\theta + D \times \cos\theta$ L : 橋墩長 (m) D : 墩柱寬度 (m) θ : 水流攻角 (與橋墩夾角, 度°) τ_c : 臨界底床剪應力 (N/m^2) τ_1 : 臨近上游段之底床剪應力 K_s : 橋墩鼻端形狀修正係數 K_θ : 水流攻角修正因子

表 1 橋墩局部冲刷公式一覽表 (續)

Table 1 List of pier local scour formulas

編號	學者	年份	公式	備註
2	Larras	1963	$d_s = 1.05b^{0.75}$	d_s : 平均冲刷深度 (m) b : 橋墩直徑 (m)
3	Neil	1964	$\frac{y_s}{D_p} = 1.5 \left(\frac{y_1}{D_p} \right)^{0.3}$	
4	Aronchalam	1965	$\frac{d_s}{y} = 1.95 \left(\frac{b}{y} \right)^{\frac{1}{6}} - 1$	y : 水流深度 (m)
5	Shen et al.	1969	$y_s = 0.000223 \times \left(\frac{V_1 \times D_p}{v} \right)^{0.619}$	V_1 : 墩前平均流速 ($\frac{m}{s}$) v : 水流運動黏滯係數 = $10^{-6} \frac{m^2}{s}$
6	Coleman	1971	$\frac{V}{\sqrt{2gd_s}} = 0.6 \left(\frac{V}{b} \right)^{0.9}$	V : 水流流速 ($\frac{m}{s}$)
7	Hancu	1971	$\frac{d_s}{b} = 2.42 \left(\frac{2V}{V_c} - 1 \right) \left(\frac{V_c^2}{gb} \right)^{\frac{1}{3}}$	V_c : 底床質臨界啟動速度 ($\frac{m}{s}$)
8	Breusers et al.	1977	$\frac{d_s}{b} = f \left(\frac{V}{V_c} \right) \left[2 \tanh \frac{y}{b} \right] K_s K_\theta$	$f \left(\frac{V}{V_c} \right)$ 條件： $\begin{cases} \frac{V}{V_c} \leq 0.5 \rightarrow f \left(\frac{V}{V_c} \right) = 0 \\ 0.5 < \frac{V}{V_c} < 1 \rightarrow f \left(\frac{V}{V_c} \right) = 2 \frac{V}{V_c} - 1 \\ \frac{V}{V_c} > 1 \rightarrow f \left(\frac{V}{V_c} \right) = 1 \end{cases}$
9	Jain & Fischer	1980	$\frac{y_s}{D_p} = 2.0 \left(\frac{y_1}{D_p} \right)^{0.5} (F_{r1} - F_{rc})^{0.25} = y_{s1}^*$ live-bed scur : $(F_{r1} - F_{rc}) > 2$ $\frac{y_s}{D_p} = 1.84 \left(\frac{y_1}{D_p} \right)^{0.3} (F_{rc})^{0.25} = y_{s2}^*$ clear-water scour : $F_{r1} < F_{rc}$ $\frac{y_s}{D_p} = \max(y_{s1}^*, y_{s2}^*) 0 \leq (F_{r1} - F_{rc}) \leq 0.2$	F_{r1} : 墩前水流福祿數 = $\frac{V_1}{\sqrt{g y_1}}$ F_{rc} : 泥沙啟動臨界流速所對應之水流福祿數 = $\frac{V_{cr}}{\sqrt{g y_1}}$
10	Jain	1981	$\frac{d_s}{b} = 1.84 \left(\frac{y}{b} \right)^{0.3} F_{rc}^{0.25}$	
11	Froehlich	1988	$y_s = 0.32 K_s D_p^{0.62} y_1^{0.47} F_{r1}^{0.22} d_{50}^{-0.09} + D$	d_{50} : 河床中值粒徑 (m) $\begin{cases} y_s \leq 2.4 D_p \text{ for } F_{r1} \leq 0.8 \\ y_s \leq 3.0 D_p \text{ for } F_{r1} > 0.8 \end{cases}$
12	Melville et al.	1988	$\frac{d_s}{D} = 1.872 K_s \left(\frac{d_s}{D} \right)^{0.225}$ if $\frac{y}{D} < 2.6$ $\frac{y_s}{D} = 2.4 K_s$ if $\frac{y}{D} > 2.6$	
13	Chitale	1988	$d_s = 2.5b$	
14	Breusers & Raudkivi	1991	$\frac{d_s}{b} = 2.3 K_y K_s K_d K_\sigma K_\theta$	K_y : 相對水流與水深修正因子 K_d : 底床質相對粗糙度修正因子 K_σ : 標準偏差修正因子
15	林景輝	1993	$\frac{d_s + y}{D} = 1.378 \left(\frac{y}{D} \right)^{0.83} \left(\frac{D}{d_{50}} \right)^{0.045} \left(\frac{V}{V_c} \right)^{0.24} (1-S)^{-1.47}$	S : 河床坡度
16	Ansari & Qadar	1994	$D_p < 2.2m \rightarrow d_s = 0.86 D_p^{3.0}$ $D_p > 2.2m \rightarrow d_s = 360 D_p^{0.4}$	
17	修正CSU	1992	$\frac{y_s}{y_1} = 2 K_s K_\theta K_3 K_4 \left(\frac{D_p}{y_1} \right)^{0.65} F_{r1}^{0.43}$	K_3 : 模型泥沙影響因子 K_4 : 河床粒徑護甲效應修正因子
18	Chiew	2004	$\frac{d_s}{b} = K_d K_y \left(3.77 \frac{V}{V_c} - 1.13 \right)$	K_y : 水流深度修正因子

- (1) 斷面幾何資料：本研究採用 2005 年 (98 個斷面)、2008 年 (134 個斷面)、2010 年 (134 個斷面) 自水利署所蒐集之八掌溪實測大斷面資料建構模擬河段中之數值地形，其中 2008 年與 2010 年針對河道固床工與攔河堰多測了上下游斷面，故斷面數量增加 36 個。
- (2) 河床質粒徑分佈資料：八掌溪河段河床質粒徑分佈調查資料共有 1987 年 (台灣省水利局)、1998 年 (水利規劃試驗所)、2000 年 (主要採石河川砂石資源報告書)、2005 年 (水利規劃試驗所) 四次，其中第四次粒徑分析成果為本研究做為起始模擬的粒徑資料。根據 2005 年河道粒徑調查與人造結構物分析可發現，中值粒徑由下游至上游遞增，厚生橋至軍輝橋段 (斷面 30~85) 中值粒徑較低，平均值約為 0.6mm；軍輝橋上游至觸口橋段 (斷面 85~斷面 116-1) 內有 3 座攔河堰，來自上游土砂在此淤積，並在攔河堰下游造成冲刷，其中值粒徑較高，平均值為 30mm。
- (3) 上下游邊界條件：數值模式須給定上游流量邊界條件及下游水位邊界條件，上游邊界條件為給定逐時流量歷線，時流量資料時間從 2006 年 5 月至 2010 年 10 月，沿用水利署分析 2005 年八掌溪一維水理分析的結果，取會影響八掌溪底床變動之較大颱風暴雨場次流量，即大於 40cms 資料進行模擬。而最上游觸口站並未有重要之排水或支流匯入，因此使用觸口站時流量紀錄作為模式上游流量的邊界條件；研究河段下游邊界厚生橋 (斷面 30) 為一橋樑，也是義竹水位測站位置，可作為控制斷面，因此使用義竹站時水位記錄作為下游水位的邊界條件。
- (4) 人工結構物設定：為了合理模擬一般河道沖淤變化，並解析橋樑對水理條件與床形變化的影響，在程式模擬前需將河段上的固床工、攔河堰所在斷面上游端設定不可冲刷，先植入 19 座橋樑橋墩數據，將一般冲刷與橋墩局部冲刷分開處理，以釐清動床問題，結構物設定分固床工、攔河堰與橋樑。

① 橋樑設定：橋樑資訊由下游至上游分別為厚生橋、洪水港大橋、高鐵路橋、八掌二橋、高速公路橋、八掌溪橋、縱貫鐵路橋、過水橋、東石快速公路、通合大橋、永欽一號橋、軍輝橋、忠義橋、二高、心上橋、吳鳳橋、五虎寮橋、行圓橋、觸口橋，共 19 座。以 2008 年斷面編號設定由左右樁計算出橋長，左岸第一根橋墩至左岸斷面樁距離、橋樑寬、橋墩數、橋墩間距、橋墩形狀情形經資料蒐集及實地探勘結果整理如表 2 所示。橋樑之基礎形式可分為直接基礎、沉箱基礎與樁基礎，若橋樑基礎為樁基礎 (如八掌溪橋)，使用橋墩寬為輸入條件；若橋樑為沉箱基礎者 (如厚生橋)，在模式計算時應確定該沉箱有無裸露，若已裸露，則橋樑之橋墩寬度應以沉箱基礎寬為輸入條件。目前修改之模式可輸入沉箱基礎高度及寬度等資料，即斷面中新增沉箱點位，並以鄰近斷面點內插此點上方的覆土高程做為新增點資料，在沉箱區域冲刷

到沉箱高程時，則位在沉箱範圍內之斷面點高程改為沉箱高程，此位置不可再冲刷。然厚生橋已於民國 99 年 10 月改建完畢，跨徑加大，並已加深橋樑基礎，由於本研究範圍甚廣，橋樑設計圖取得不易，無法得知沉箱的高程及大小，且現勘時也未發現沉箱基礎有裸露現象，故本研究在輸入橋墩數據時仍以橋墩寬為輸入條件，如碰到大洪水造成刷深過大至裸露為複合式墩基時，將會產生冲刷位置的誤差。

- ② 固床工設定：水利署第五河川局原規劃在八掌溪河段佈置 18 座固床工，現已設置 6 座，還有其他單位已設置的固床工 2 座，分別為南二高橋固床工及水公司固床工。固床工以 2008 年斷面編號由下游至上游分別為南二高 (斷面 91-1)、3 號 (斷面 95-2)、4 號 (斷面 95-4)、5 號 (斷面 96-2)、6 號 (斷面 97-2)、7 號 (斷面 97-4)、18 號 (斷面 100-1)、水公司固床工 (斷面 100-2~斷面 100-5)，共 8 座。程式運行一般冲刷需設定固床工斷面資料以符合實際情況，在固床工上游端斷面，設定不可冲刷，固定頂部高程；在固床工下游端斷面則設定可冲刷，不固定頂部高程。
- ③ 攔河堰設定：攔河堰以 2008 年斷面編號由下游至上游分別為道將圳攔河堰 (斷面 87-1~斷面 87-4)、仁義潭攔河堰 (斷面 100-3~斷面 100-6) 及觸口堰 (斷面 113-1~斷面 113-2)，共 3 座。程式運行一般冲刷需設定攔河堰斷面資料以符合實際情況，在攔河堰上游端斷面，設定其不可冲刷，固定頂部高程；在攔河堰下游端斷面設定可冲刷，不固定頂部高程。

表 2 八掌溪研究河段橋樑一覽表

Table 2 List of bridges in Pachang Creek for study area

序號	編號	橋樑名稱	左右樁距 (m)	橋墩數	橋墩間距 (m)	橋墩寬 (m)	橋寬 (m)	橋墩形狀
1	30	厚生橋	514	12	42.8	2	22	圓柱形
7	36-1	洪水港大橋	584	20	30	1.8	13	群柱形
20	49	高鐵路橋	527	37	14.2	3	14	圓柱形
25	53-1	八掌二橋	698	20	34.9	2.8	9	圓柱形
30	58-1	高速公路橋	484	11	44	2.2	35	群柱形
37	64-1	八掌溪橋	303.5	10	30.4	6.5	26	圓柱形
38	65	縱貫鐵路橋	271	11	24.6	3.7	11	圓柱形
39	66	過水橋	270	11	24.6	2	5	矩形
45	71	東石快速公路	366	13	28.2	2.5	25	矩形
46	71-1	通合大橋	500	12	41.7	3.3	13	圓柱形
55	79-1	永欽一號橋	355	9	39.4	2.3	16	圓柱形
61	85-1	軍輝橋	290	10	29	2.8	22	圓柱形
69	89-1	忠義橋	217	5	43.4	5	31	圓柱形
74	92-3	二高	444	14	31.7	3.5	41	群柱形
90	97-5	心上橋	175	3	58.3	5	10	圓柱形
100	101	吳鳳橋	195	3	65	3.4	17	圓柱形
114	106-6	五虎寮橋	191	4	47.8	4.5	11	圓形端鼻
131	114-2	行圓橋	144	3	48	1.6	8	群柱形
134	116-1	觸口橋	154	3	51.3	6	8	圓柱形

4. 參數檢定方法：

由於河床沖淤因素複雜，精度不能單純用均方根誤差 (RMSE) 分析，以免得到河床的微小變動量為最佳解。為了能客觀的量化評估模式之合適性，本研究以均方根誤差 (RMSE)、振幅誤差 ($Amplitude_{ratio}$)、趨勢正確率誤差 ($Fitted_{ratio}$) 三項標準組成的誤差評估參數 ($Ev_{sediment}$) 來檢定模式計算結果，以最小的誤差值為最佳解。

(1) 誤差評估參數：

$$Ev_{sediment} = RMSE + |1 - Amplitude_{ratio}| + (1 - Fitted_{ratio}) \quad (5)$$

(2) 均方根誤差：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (Thalweg_{observation} - Thalweg_{simulation})^2}{m}} \quad (6)$$

(3) 振幅誤差：

$$Amplitude_{ratio} = \frac{\sum_{i=1}^m |Simulated\ Difference_i|}{\sum_{i=1}^m |Difference\ of\ Field\ data_i|} \quad (7)$$

(4) 趨勢正確率誤差：

$$Fitted_{ratio} = \frac{\sum_{i=1}^m Fitted\ number_i}{m} \quad (8)$$

本研究蒐集水利署 2005 年至 2010 年間足以影響底床變動大於 40cms 的流量實測資料 (時水位、時流量、斷面樁測量、左右樁座標等) 輸入程式進行演算，並以 19 座橋樑斷面實測資料為模擬成果比對的依據，以檢定適用於八掌溪主流之河道參數。

參考「八掌溪仁義潭 (攔河堰) 下游冲刷河段治理方案」報告 (經濟部水利署, 2006) 對八掌溪上游河段進行參數敏感度分析結果, 以及「網路型河川擬似二維沖淤行為之數值模擬」(謝慧民, 1996) 對沖積河川系統測試參數對 NETSTARS 模式輸出量影響程度的分析結果, 本研究檢定主要參數依序為: 以 RMSE 檢定河道曼寧 n 值 (IFFACT) 參數; 以誤差評估參數 ($Ev_{sediment}$) 檢定上游來砂量參數 (ratep)、輸砂公式 (ised)、可冲刷層厚度參數 (alt)、流管數 (stube) 四個參數, 完成後為八掌溪一般冲刷的參數調整階段; 而有橋樑的橋墩局部冲刷, 則以誤差評估參數 ($Ev_{sediment}$) 檢定橋墩局部冲刷公式 (ibrino) 與橋墩冲刷公式稽延時間 (idurds) 兩個參數。

四、結果與討論

1. 一般冲刷參數檢定：

本研究採 NETSTARS 模式模擬河床冲刷行為, 模擬時間採用 2006 年 5 月至 2008 年 9 月與 2008 年 9 月至 2010 年 9 月期間之水文站實測水位, 以及八掌溪 2008 年及 2010 年的大斷面測量資料檢定各參數, 包括水位模擬評估 n 值公式, 以 RMSE 判斷其適用性; 河床沖淤量模擬評估各參數如上游來砂量參數、輸砂公式、可冲刷層厚度參數、流管數, 以誤差評估參數判斷模擬成果的優劣。

模式提供曼寧 n 值推估公式依編號排序共 21 個, 以義竹站的實測水位, 模擬軍輝橋、觸口站水位變化, 使用 2007 年 8 月至 2010 年 9 月三年時間中較大颱風暴雨場次 (>40cms) 資料共 809 小時, 以軍輝橋、觸口站實測水位與模擬水位之 RMSE 值來檢驗公式計算出的水位歷線是否與實測資料吻合, 模擬結果最佳曼寧 n 值推估公式為編號 6 的 He Huang-type, $n = 0.015 \times D_{90}^{1/6}$, 其中 D_{90} = 通過 90% 重量的代表粒徑 (mm)。2008 年 9 月至 2010 年 9 月軍輝站模擬成果如圖 6 所示, 結果顯示水位模擬成果良好; 2008 年 9 月至 2010 年 9 月厚生橋流量模擬成果如圖 7 所示, 結果顯示尖峰流量過後的模擬值偏低, 此乃 6 處側流量推估不準所造成。

本研究參考謝慧民(1996)敏感度分析與案例測試結果, 先檢定來砂量參數 (ratep), 其次進行輸砂公式 (ised) 與可冲刷層厚度參數 (alt) 之檢定, 最後處理八掌溪河寬、縱橫斷面變化大之區域進行流管數 (stube) 檢定以反映整體沖淤。根據參數調整範圍模擬河道斷面沖淤變化, 以誤差評估參數最低值取平均作為選用的最佳參數, 包括局部冲刷之兩階段, 參數檢定共分六個階段進行。各階段參數檢定成果敘述如下：

(1) 上游來砂量參數之檢定成果 (第一階段)

上游沖淤需能與實測資料吻合, 避免不正常淤積情形, 可透過調整輸砂量倍數即上游來砂量參數 ratep 檢視。模式設定 ised=1(Yang)、alt=1.0, 上下調整參數範圍分析沖淤變化, 在不調整或調高上游來砂量倍數時, 輸砂量在最上游斷面產生大量淤積, 此淤積對精度分析影響很大, 由變化趨勢可知調小範圍可使最上游斷面

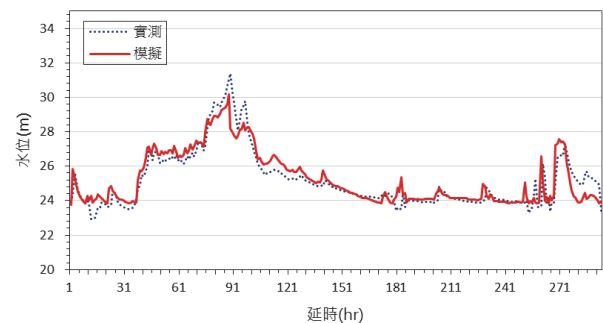


圖 6 2008/09~2010/09 軍輝站水位比較 (He Huang-type)
Fig.6 Comparison of water stage values at Junhui station from 2008/09 to 2010/09

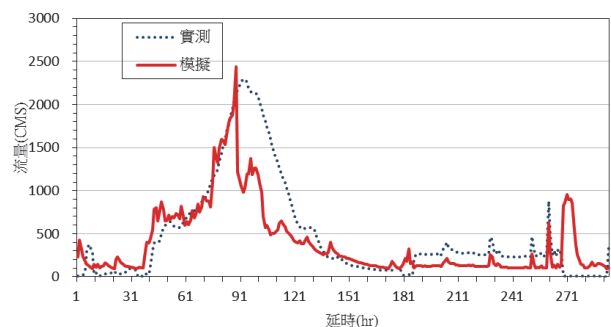


圖 7 2008/09~2010/09 厚生橋流量比較 (He Huang-type)
Fig.7 Comparison of discharges at Housheng bridge from 2008/09 to 2010/09

116-1(斷面累距 61 公里) 符合實測底床, 誤差評估參數較小的 $ratep$ 前三名依序為 0.001、0.02、0.002, 不同來砂量河床斷面沖淤量變化如圖 8 所示。

(2) 輸砂公式之檢定成果 (第二階段)

模式輸砂演算採用總輸砂量法, 模式設定第一階段檢定之最佳參數 $ratep=0.001$ 、 $alt=1.0$, 進一步調整輸砂公式共 26 組, 平均誤差評估參數較小的前三名依序為 $ised=2$ (Ackers & White)、 $ised=16$ (HR 之 Ackers & White)、 $ised=1$ (Yang), 不同輸砂公式河床斷面沖淤量變化如圖 9 所示。

(3) 可沖刷層厚度參數之檢定成果 (第三階段)

河床質粒徑組成變化通常發生在河床表層處, 適當的可沖刷層厚度可反映真實粒徑組成變化, 可沖刷層厚度為 $alt \times$ 最大粒徑, 檢定「最佳可沖刷層厚度參數」, 模式設定第一與第二階段所檢定之最佳參數 $ratep=0.001$ 、 $ised=2$ (Ackers & White), 進一步上下調整可沖刷層厚度參數範圍, 平均誤差參數較小的 Alt 前三名依序為 1.0、2.0、0.5, 不同可沖刷層厚度參數的河床斷面沖淤量變化如圖 10 所示。由於 2008 年粒徑較 2006 年粒徑有粗化現象, 可沖刷層厚度需加大, 而為求兩個模擬時間於同一基準比較, 固定 Ackers & White 公式, 可沖刷層厚度參數採用 1.0, 模擬結果較為穩定。

(4) 流管數之檢定成果 (第四階段)

模式設定 $ratep=0.001$ 、 $ised=2$ (Ackers & White)、 $alt=1$, 上下調整流管數範圍, 平均誤差評估參數較小的前三名依序為 3、4、1, 不同流管數河床斷面沖淤量變化如圖 11 所示。當流管數為 3 時, 各組粒徑與流量資料所得模擬結果均較為穩定, 模擬結果無震盪情形。此時得到的 $Ev_{sediment}=2.552$ 。

根據上述檢定成果, 並結合之前分析的曼寧 n 值參數, 完成八掌溪厚生橋至觸口橋河段一般沖刷之參數檢定工作, 這些參數將提供給橋墩局部沖刷模擬使用。

2. 局部沖刷參數檢定:

本研究以八掌溪河段為例, 時間取 2006 年 9 月至 2008 年 9 月 (共 98 斷面) 進行局部沖刷模擬, 針對一般沖刷下橋樑位置河床沖刷量不足之 7 座橋樑為加入垂直向的局部沖刷量計算的應用對象, 進行沖刷演算。

橋墩沖刷公式稽延時間, 即反應橋墩沖刷公式一次計算的沖刷深度所需要的延時, 對沖刷量影響劇烈, 為了能得到合理穩定且各組一致之參數, 需先進行橋墩沖刷公式稽延時間 ($idurds$) 參數檢定, 爾後再進行橋墩沖刷公式 ($ibrino$) 參數檢定, 而橫向沖刷影響範圍參數 $coef_{bw}$ 則參考一般橋墩沖刷實驗結果 (陳泳錦, 2008), 採用橋墩寬的 5 倍進行計算。各階段檢定成果敘述如下:

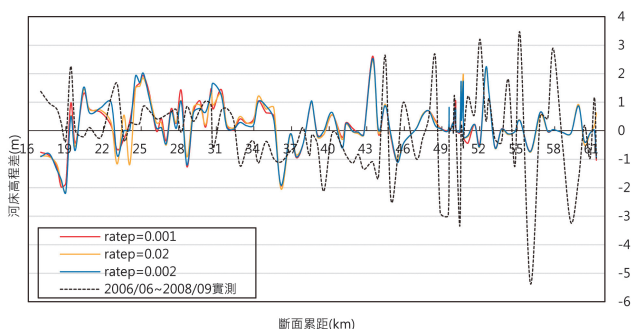


圖 8 第一階段模擬河床斷面沖淤量變化 (不同上游來砂量參數)

Fig.8 Simulated scour-deposition changes of the riverbed (different amount of upstream incoming sands)

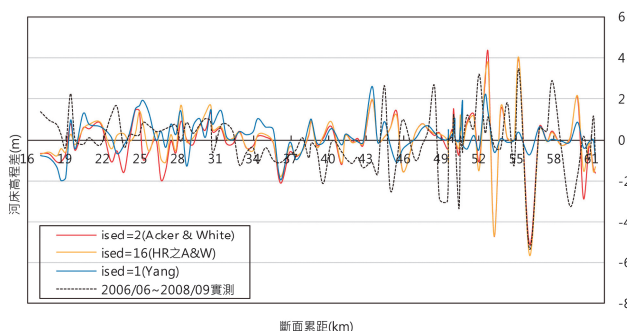


圖 9 第二階段模擬河床斷面沖淤量變化 (不同輸砂公式)

Fig.9 Simulated scour-deposition changes of the riverbed (different sediment formulas)

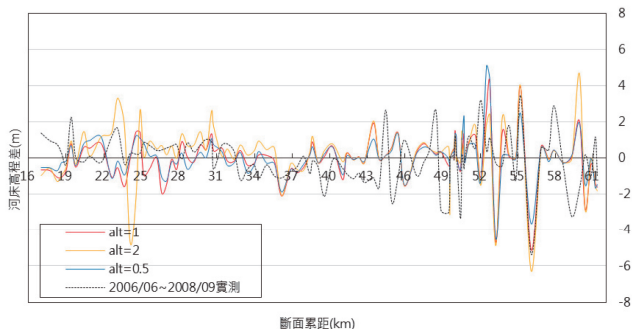


圖 10 第三階段模擬河床斷面沖淤量變化 (不同可沖刷層厚度參數)

Fig.10 Simulated scour-deposition changes of the riverbed (different Alt parameter)

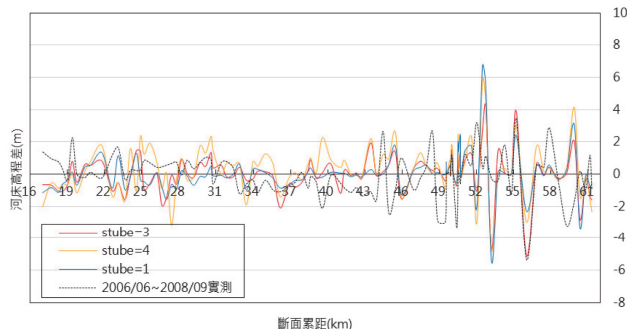


圖 11 第四階段模擬河床斷面沖淤量變化 (不同流管數)

Fig.11 Simulated scour-deposition changes of the riverbed (different stream tube number)

(1) 橋墩沖刷公式稽延時間 (第五階段)

模式設定 $ibrino=17$ ，即修正 CSU 公式，調整橋墩沖刷公式稽延時間參數共 9 組，平均誤差參數較小的前三名依序為 1500、1200、3000 小時，不同橋墩沖刷公式稽延時間河床斷面沖淤量變化如圖 12 所示。

(2) 橋墩局部沖刷公式 (第六階段)

模式設定 $idurds=1500$ ，調動橋墩沖刷公式共 18 組，平均誤差評估參數較小的前三名依序為 $ibrino=9$ (Jain & Fischer)、 $ibrino=17$ (修正 CSU)、 $ibrino=6$ (Coleman)，不同橋墩沖刷公式河床斷面沖淤變化如圖 13 所示。檢定完成局部沖刷參數的目的為反映八掌溪流域整體河床變遷趨勢，配合未來相關案例之模擬分析，可提供合適策略之判斷依據。

3. 橋墩沖刷成果適用性分析：

橋墩沖刷演算成果以交通部建議之沖刷公式適用性、精度工具適用性、橫斷面河床沖淤三個部分討論如下：

(1) 交通部建議之沖刷公式適用性

由局部沖刷模擬結果可知，誤差評估參數排序如表 3 所示，其中 Jain and Fischer (1980) 公式具有最佳的模擬成果。參考 2008 年 12 月 31 日於交通部公路總局之「橋墩局部沖刷公式及耐洪能力詳細評估方法」計算準則及「河川橋樑之橋墩沖刷保護工法之研究」報告建議，適合台灣河川之橋墩沖刷深度估算公式有 6 種常用公式，包括 Laursen (1958,1962)、Neil (1964)、Shen et al. (1969)、Jain and Fischer (1980)、Froehlich (1988)、修正 CSU 公式 (1992)。對照交通部建議的 6 種公式應用於八

表 3 橋墩沖刷公式應於八掌溪河床評估排名

Table 3 Rank of bridge scour formulas applied to Pa-chang Creek

編號	橋墩沖刷公式	誤差評估參數	排名
1	Laursen (1958,1962)	2.55	9
2	Larras (1963)	2.52	5
3	Neil (1964)	2.53	6
4	Aronchelam (1965)	2.55	10
5	Shen et al. (1969)	2.54	8
6	Coleman (1971)	2.51	3
7	Hancu (1971)	2.62	13
8	Breusers et al. (1977)	2.53	7
9	Jain and Fischer (1980)	2.49	1
10	Jain (1981)	2.58	12
11	Froehlich (1988)	2.52	4
12	Melville et al. (1988)	3.28	16
13	Chitale (1988)	3.42	17
14	Breusers and Raudkivi (1991)	3.90	18
15	林景輝 (1993)	2.56	11
16	Ansari and Qadar (1994)	2.79	14
17	修正CSU公式 (1992)	2.50	2
18	Chiew (2004)	3.25	15

掌溪河床局部沖刷量計算有很好的關聯，其中 Jain and Fischer (1980) 排名第 1、修正 CSU 排名第 2、Froehlich (1988) 排名第 4、Neil (1964)、排名第 6、Shen et al. (1969) 排名第 8、Laursen (1958,1962) 排名第 9，均低於一般沖刷的 $Ev_{sediment}$ 值 2.552。

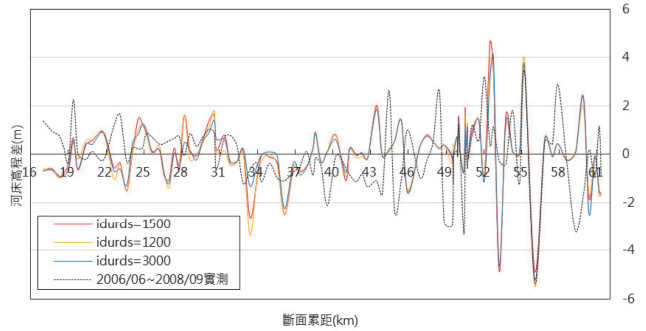


圖 12 第五階段模擬河床斷面沖淤量變化 (不同橋墩沖刷公式稽延時間)

Fig.12 Simulated scour-deposition changes of the riverbed (different duration time for bridge scour formula)

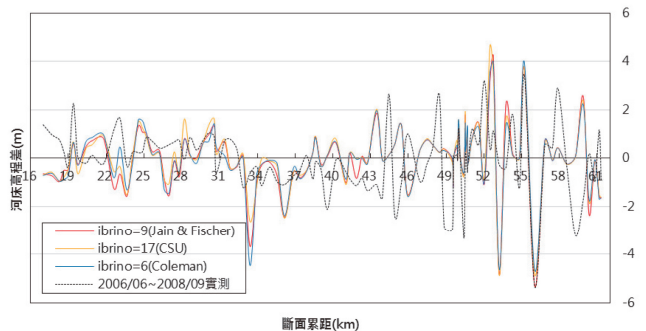


圖 13 第六階段模擬河床斷面沖淤量變化 (不同橋墩沖刷公式)

Fig.13 Simulated scour-deposition changes of the riverbed (different bridge scour formula)

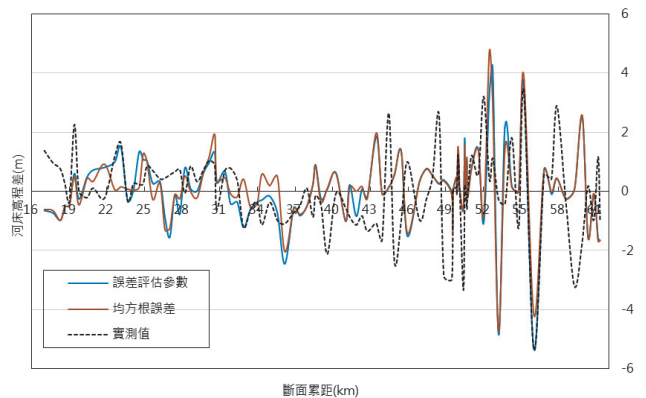


圖 14 誤差評估參數與均方根誤差最佳精度比較

Fig.14 Comparison of error evaluation parameter and RMSE methods

(2) 模式選擇精度分析方法之適用性

本研究使用誤差評估參數 ($E_{v_{sediment}}$) 來檢定河床沖淤計算的參數, 因包含均方根誤差 (RMSE)、振幅誤差 ($Amplitude_{ratio}$)、趨勢正確率誤差 ($Fitted_{ratio}$) 三項標準, 對河床沖淤因素較複雜之八掌溪流域可提高檢定結果的可信度, 例如八掌溪仁義潭攔河堰至軍輝橋河段於 1996 年賀伯颱風造成岩層為泥岩層河段大量沖刷, 而五虎寮橋至觸口橋河段於 921 震災後淤積明顯 (經濟部水利署, 2006)。為能客觀評估模式使用不同精度工具造成之差異, 以 $E_{v_{sediment}}$ 及 RMSE 比較最佳沖淤成果, 如圖 14 所示, 一般沖刷或加入局部沖刷若採用數值差異程度的均方根誤差 RMSE, 其檢定成果在部分斷面較難反應模擬與實測造成之振幅強度, 即沖淤明顯的現象較難從使用最佳均方根誤差的結果中顯示; 而使用誤差評估參數所得結果, 則在河段中下游斷面處模擬值與實測值沖淤趨勢符合, 相同斷面處均方根誤差檢定之沖淤趨勢卻相反, 故以考量振幅與沖淤趨勢因素的誤差評估參數來檢定河床沖淤的參數, 為較佳的精度分析方法。

(3) 橫斷面河床沖淤分析

為瞭解八掌溪橋樑斷面沖刷細節, 分析各橋樑 2008 年 9 月至 2010 年 9 月河床橫斷面一般沖刷與局部沖刷模擬變化, 以縱貫鐵路橋沖淤趨勢為例, 模式局部沖刷功能可針對橋墩附近模擬額外沖刷量, 如圖 15 所示 (上圖為橫斷面點變化比較, 下圖為沖淤差異比較), 模擬期間最大洪水量約為 $Q_{10}(2080CMS)$ 。永欽一號橋則有橋墩局部沖刷現象, 增加局部沖刷模擬結果明顯比一般沖刷佳, 如圖 16 所示。因兩年實測的點位資料不盡相同, 因此 2010 年斷面資料使用線性內插來符合 2008 年的資料點位, 並算出高程, 再相減繪製圖 15 及 16 下方之沖淤高程差異圖, 兩個差異圖均顯示局部沖刷的精度較佳。雖然模式的流管功能可以反應橫斷面不均勻的沖淤深度, 但是目前尚無法模擬河道蜿蜒造成彎道斷面外側沖刷、內側淤積的現象, 這些問題有待未來研究去克服。

4. 十年長期沖淤預測:

以現有的 5 年水文資料 (2005~2010 年) 在未來發生兩次的假設下, 利用前述檢定之最佳參數值, 從 2010 年開始模擬未來 10 年的河道一般沖刷及橋墩局部沖刷, 並推估八掌溪模擬河段內局部沖刷量較大可能有風險的橋樑。經 10 年颱風洪水長期河床變動沖淤模擬, 在既有攔河堰與固床工保護的現況下, 厚生橋 (斷面 30) 至忠義橋 (斷面 89-1) 段河床高程變化如圖 17 所示 (綠線為橋樑, 紅線為有沖刷趨勢的橋樑); 忠義橋至觸口橋 (斷面 116-1) 段河床高程變化如圖 18 所示 (黃線為仁義潭攔河堰)。由於單一斷面並非均勻沖刷, 河床高程變化有些微震盪情形。由模擬結果發現, 有沖刷趨勢的橋樑斷面為過水橋 (斷面 66)、永欽一號橋 (斷面 79-1)、吳鳳橋 (斷面 101)、五虎寮橋 (斷面 106-6)、行圓橋 (斷面 114-2) 及觸口橋等六處, 而長期模擬結果呈現沖刷較單場洪水嚴重, 推測之橋樑沖刷段為仁義潭攔河堰 (斷面 100-3~100-6) 至觸口橋河段。

本研究於 2013 年 2 月現勘結果發現, 過水橋橋墩附近輕微侵蝕, 仁義潭攔河堰下游掏刷嚴重與長期模擬趨勢相符; 由歷年大斷面測量資料 (經濟部水利署, 2006) 及現勘發現行圓橋尚無侵蝕沖刷現象, 長期無侵蝕情形推測至未來沖淤趨勢為沖刷較不合理。針對八掌溪河床沖淤趨勢模擬結果, 本研究提出有沖刷趨勢受影響之橋樑包括過水橋、永欽一號橋、吳鳳橋、五虎寮橋及觸口橋等五座, 可提供河川橋樑管理單位進行橋樑維護工作的參考。

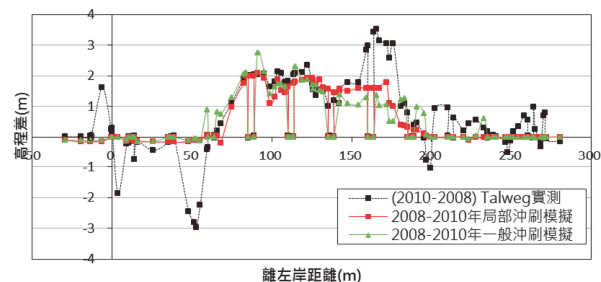
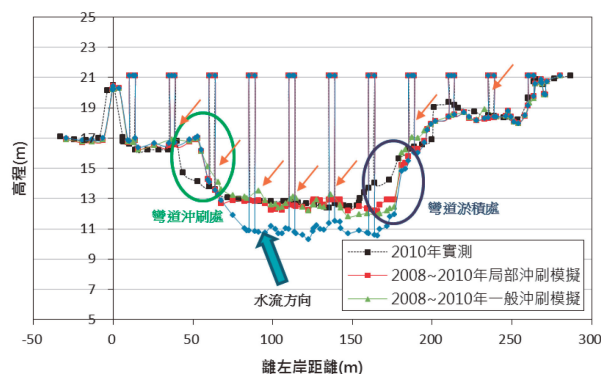


圖 15 縱貫鐵路橋橫斷面 (斷面 65) 變化
Fig.15 Cross-section (No.65) changes of the south-north direction's railway bridge

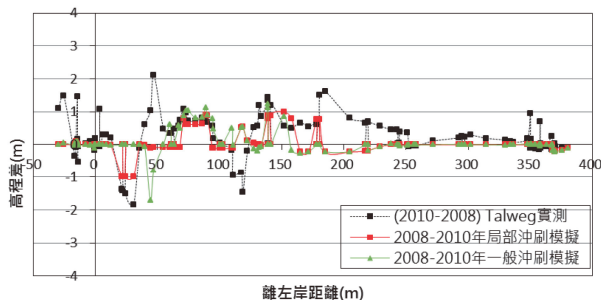
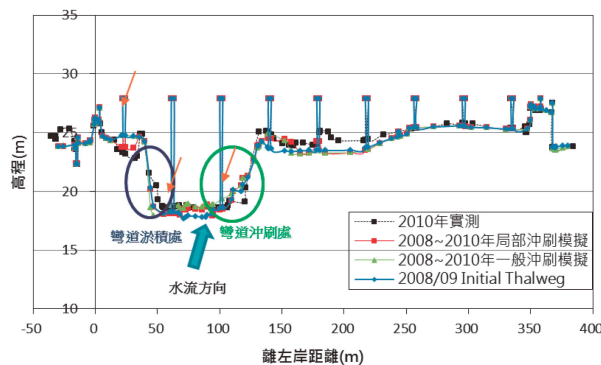


圖 16 永欽一號橋橫斷面 (斷面 79-1) 變化
Fig.16 Cross-section (No.79-1) changes of Yungchin No.1 bridge

五、結 論

本研究以八掌溪主流 48.4 公里長河段，134 個測量斷面為例，對 19 個橋樑斷面植入橋墩資訊及配合 8 座固床工與 3 座攔河堰設定，以 NETSTARS V3.0 新增橋墩沖刷功能模擬河床沖淤變化進行參數檢定及公式評估。重要結論如下：

- (1) 八掌溪模擬案例的一般沖刷計算中，以均方根誤差 (RMSE)、振幅誤差 ($Amplitude_{ratio}$)、趨勢正確率誤差 ($Fitted_{ratio}$) 三項標準組成的誤差評估參數 ($Ev_{sediment}$) 進行檢定，優於單純使用均方根誤差 (RMSE) 的河床沖淤結果。
- (2) 由一般沖刷檢定參數的結果得知最佳設定為：上游來砂量參數 $ratep=0.001$ ，輸砂公式 $ised=2(Ackers \& White, 1973)$ ，可沖刷層厚度參數 $Alt=1.0$ ，流管數=3。由橋墩局部沖刷檢定參數的結果得知，橋墩沖刷公式稽延時間 $idurds=1500$ 小時，橋墩沖刷公式 $ibrino=9(Jain \text{ and } Fischer, 1980)$ 。

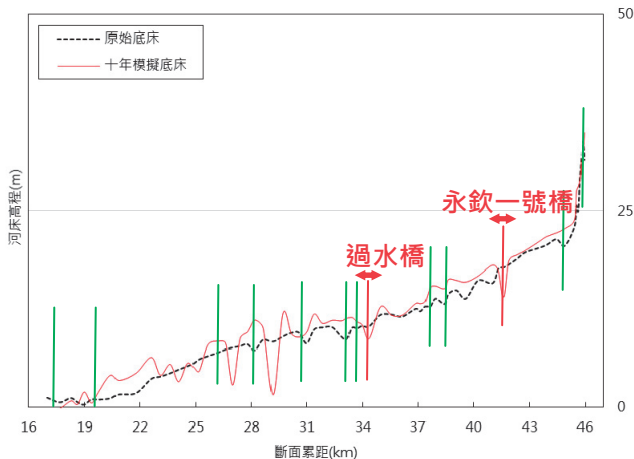


圖 17 原生橋至忠義橋段十年河床高程變化 (沖淤趨勢)

Fig.17 Riverbed elevation changes from Housheng Bridge to Chungyi Bridge in the decade(erosion and deposition trends)

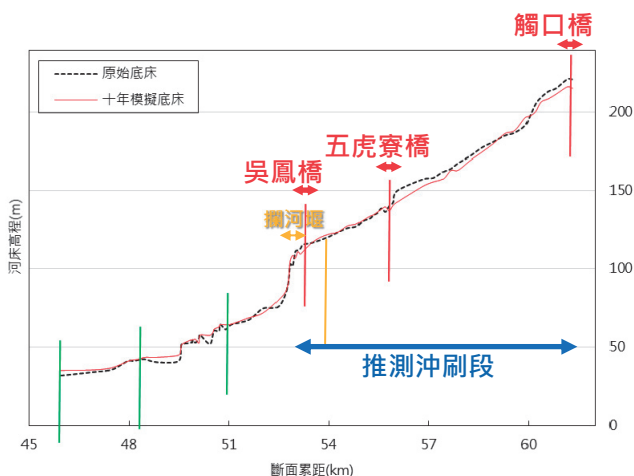


圖 18 仁義橋至觸口橋段十年河床高程變化 (沖淤趨勢)

Fig.18 Riverbed elevation changes from Jenyi Bridge to Chukou Bridge in the decade(erosion and deposition trends)

- (3) NETSTARS 模式新增了 18 個橋墩局部沖刷公式與建置橋墩沖刷機制，包含交通部建議之 6 個橋墩沖刷公式，經評估在八掌溪模擬案例均可反映橋墩所造成的額外沖刷量。根據未來十年長期模擬成果，推測八掌溪有沖刷趨勢受影響之橋樑包括過水橋、永欽一號橋、吳鳳橋、五虎寮橋、觸口橋，共五座，可提供河川橋樑管理單位進行橋樑維護工作的參考。

誌 謝

本文係國科會專題研究計畫「河川沖淤模式 NETSTARS 進階功能研發計畫 (III)」(NSC 101-2221-E-434 -004 -) 之部分研究成果，承蒙國科會經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

參考文獻

- [1] 李鴻源、楊錦釧、葉克家、楊志達、謝慧民 (1996)，「辮狀河系沖淤模式之發展」，中興工程顧問社專案研究報告 SEC/R-HY-96-07。(Lee, H.Y., Yang, J.C., Yeh, K.C., Yang C.T., and Hsieh, H.M. (1996). "Development of braided river sedimentation model," Sinotech Engineering Consultants Social Project Research Report SEC/R-HY-96-07. (in Chinese))
- [2] 林景輝 (1993)，「圓柱型橋墩周圍局部沖刷之研究」，逢甲大學土木及水利工程研究所碩士論文。(Lin, J.H. (1993). *Research on Local Scour around Cylindrical Piers*, Master thesis, Feng Chia University, Institute of Civil and Hydraulic Engineering, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [3] 邱永芳等 (2011)，「河道水位與橋墩沖刷推估模式之建立研究」，交通部運輸研究所研究報告。(Ciou, Y.F. et al. (2011). *Establishment research of river water level and scour estimation model*, Transportation Research Institute. (in Chinese))
- [4] 邱永芳等 (2011)，「橋墩沖刷計算模式之建立研究」，交通部運輸研究所研究報告。(Ciou, Y.F. et al. (2011). *Establishment research of bridge scouring model*, Transportation Research Institute. (in Chinese))
- [5] 陳泳錦 (2008)，「定量流流況下水深對非均勻橋墩局部沖刷影響之研究」，逢甲大學水利工程與資源保育學系碩士班碩士論文。(Chen, Y.J. (2008). *The Effect of Flow Depth on Local Scour around Non-uniform Circular Piers under Steady Flows*, Master Thesis, Feng Chia University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [6] 經濟部水利署 (2006)，「八掌溪仁義潭 (攔河堰) 下游沖刷河段治理方案之研析報告」，經濟部水利署水利規劃試驗所。(Water Resources Agency (2006), "Research and analysis report of river management project for Pachang Creek Renyitan (Weir) downstream scouring reach," Water Resources Planning Institute, Water Resources Agency. (in Chinese))

- [7] 蔡長泰等 (1993), 「台灣河川沈澱輸運之分析 (三)」, 水資會研究報告。(Tsai, C.T., et al. (1993), *Analysis for river sediment transport in Taiwan (III)*, The Water Resources Research Report. (in Chinese))
- [8] 謝慧民 (1996), 「網路型河川擬似二維沖淤行為之數值模擬」, 國立台灣大學土木工程學研究所博士論文。(Hsieh, H.M. (1996). *On A Quasi-Two-Dimensional Simulation of Scour and Deposition in Alluvial River Network*, PhD Thesis, National Taiwan University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [9] 謝慧民 (2011), 「河川沖淤模式 NETSTARS 進階功能研發計畫」, 台灣首府大學資訊與多媒體設計學系研究報告第 1001 號。(Hsieh, H.M. (2011). *Project of Advanced R & D programs for river erosion and deposition model NETSTARS*, Taiwan Shoufu University, Department of Information and Multimedia Design Research Report No. 1001. (in Chinese))
- [10] 謝慧民 (2012), 「複雜河系沖淤模式 NETSTARS V3.0 使用者技術手冊」, 台灣首府大學資訊與多媒體設計學系研究報告第 10103 號。(Hsieh, H.M. (2012). *NETSTARS V3.0, User Technical Manual for Erosion and Deposition Model of Complex Channel*, Taiwan Shoufu University, Department of Information and Multimedia Design Research Report No. 10103. (in Chinese))
- [11] Breusers, H.N.C., and Raudkivi, A.J. (1991). *Scouring*, IAHR, Hydraulic Structure Design Manual, Vol.2, Belkema.
- [12] Chiew, Y.M. (2004). "Local Scour and Riprap Stability at Bridge Piers in a Degrading Channel," *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.130, No.3, March 1.
- [13] Chitale, S.V. (1988). *Estimation of Scour at Bridge Piers*, Water and Energy International, Vol. 45, Issue.1.
- [14] Coleman, N.L. (1971). "Analyzing laboratory measurements of scour at cylindrical piers in sand beds," *Procedure 14th Congress IAHR*, Vol. 3.
- [15] Dey S. (1999). "Time-variation of Scour in the Vicinity of Circular Piers." *Proc Instn Civ. Engrs Wat., Marit. and Energy*, Vol.136, pp67-75.
- [16] DHI Software. (1992). *User guides and reference manuals for MIKE 11 model*, Danish Hydraulic Institute, Denmark.
- [17] Froehlich, D.C. (1988). "Analysis of onsite measurements of scour at piers." *ASCE Hydraulic Engineering*, Proceedings of 1988 Conference, 534-539.
- [18] Holly, F.M., and Rahuel, J.L. (1990). "New numerical/physical framework for mobile-bed modelling, part I: numerical and physical principles," *J. Hydr. Res.*, IAHR, 28(4), 401-416.
- [19] Holly, F.M., Yang, J.C., and Spasojevic, M. (1985). "Numerical simulation of water and sediment movement in multi-connected networks of mobile bed," *Iowa Institute of Hydraulic Research*, Limited Distribution Report No. 131, The University of Iowa, Iowa City, Iowa, USA.
- [20] Holly, F.M., Yang, J.C., Schovarz, P., Scheefer, J., Hsu, S. H., and Einhellig, R. (1990). *CHARIMA: numerical simulation of unsteady water and sediment movements in multiply connected networks of mobile-bed channels*, IIHR Report No. 343, The University of Iowa, Iowa City, Iowa, USA.
- [21] Jain, S.C., and Fischer, E.E. (1980). "Scour around Bridge Piers at High Velocity," *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.106, No.11, 1827-1842.
- [22] Jain, S.C. (1981). "Maximum Clear-Water Scour around Circular Piers," *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.107, No.5, pp.611-626.
- [23] Jones J.S., Kilgore R.T., and Mistichelli, M.P. (1992). "Effects of footing location on bridge pier," *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.118, No.2, pp.280~290.
- [24] Karim, M.F., and Kennedy, J.F. (1982). *IALLUVIAL: a computer-based flow and sediment-routing model for alluvial streams and its application to the Missouri river*, Report No. 250, Iowa Inst. of Hydr. Res., Univ. of Iowa, Iowa City, Iowa, USA.
- [25] Laursen, E.M. (1962). "Scour at Bridge Crossings," *Journal of the Hydraulic Division*, ASCE, Vol.86, No.Hy2, February, 39-54.
- [26] Li, R.M., Mussetter, R.A., and Grindeland, T.R. (1988). *Sediment-routing model: HEC2SR*, Subcommittee on Sedimentation, Interagency Advisory Committee on Water Data.
- [27] Melville, B.W., and Sutherland, A.J. (1988). "Design Method for Local Scour at Bridge Piers," *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.114, No.10, October, 1210-1226.
- [28] Melville, B.W., and Coleman, S.E. (2000). *Bridge Scour*, Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch, Colorado, USA.
- [29] Molinas, A.M., and Yang, C.T. (1986). *Computer Program User's Manual for GSTARS*, U.S. Department of Interior Bureau of Reclamation, Engineering and Research Center, Denver, Colorado.
- [30] Neill, C.R. (1964). *River-Bed Scour, a Review for Engineers*, Canadian Good Roads' Assoc, Techn, Publ, No.23, Ottawa.
- [31] Orvis, C.J., and Randle, T.J. (1987). *STARS: sediment transport and river simulation model*, Technical Guideline, Bureau of Reclamation, U.S. Department of Interior.
- [32] Qadar, A., and Ansari, S. (1994). *Bridge Pier Scour Equations an Assessment*, New York: American Society of Civil Engineers.
- [33] Shen, H.W., Schneider, V.R., and Karaki, S. (1969). "Local Scour around Bridge Piers," *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.95, No.6, 1919-1940.
- [34] U.S. Army Corps of Engineers. (1993). *HEC-6: scour and deposition in rivers and reservoirs, user's manual*, Hydrological Engineering Center, CPD-6.
- [35] U.S. Army Corps of Engineers. (2006). *HEC-RAS River Analysis System Users Manual Version 4.0 Beta*, Hydrologic Engineering Center, CPD-68.

2013 年 08 月 10 日 收稿

2013 年 10 月 17 日 修正

2014 年 02 月 21 日 接受

(本文開放討論至 2014 年 12 月 31 日)