

應用二維水理輸砂模式於橋墩沖刷之 模擬分析探討

Using 2-D Numerical Model Simulation on Bridge Scouring

國立臺灣大學
水工試驗所專案計畫

財團法人國際合作發展基金會
技術合作處拉美組

國立臺灣大學
水工試驗所研究員
兼任臺灣颱風洪水研究中心

助理研究員

專員

副主任

李 豐 佐

黃 聰 憲

賴 進 松*

Fong-Zuo Lee

Tsung-Hsien Huang

Jihn-Sung Lai

國家地震工程
研究中心
研究員

國立臺灣大學
土木工程學系
教授

林 詠 彬

張 國 鎮

Yung-Bin Lin

Kuo-Chun Chang

摘 要

2009 年莫拉克颱風期間造成橋台、橋墩、橋面板或引道等損毀之橋梁共有上百座，除了橋梁因設計年限之安全結構問題，其原因乃在颱風期間橋梁所在之河道底床受到洪水沖蝕而刷深。本研究以推估橋梁墩前最大橋墩沖刷深度為主，區域為大甲溪國道三號橋，研究範圍介於大斷面編號 13 至編號 7 之間，所涵蓋區域長約 3,285m，寬約 1,165m，主要分析位置為編號 P28L 橋墩。本研究採用 SRH-2D 二維水理輸砂模式執行動床水理運算，搭配 Parker (1990)泥砂傳輸公式計算一般沖刷深度，再利用水理動床運算結果所獲得之水文參數以 Inglis (1949)公式、Laursen (1958)公式、Neill (1964)公式、Shen *et al.* (1966)公式、吳建民(1967)公式、Jain and Fischer (1980)公式及 Froehlich (1991)公式等七種進行局部沖刷計算，以及 Laursen (1958)公式計算束縮沖刷深度。根據國家地震工程研究中心於 P28L 所安裝之沖刷深度監測感應器，以 2014 年 0519 豪雨事件作為模擬條件，考量墩前不同距離計算沖刷深度，

*通訊作者，國立臺灣大學水工試驗所研究員，10617 台北市大安區羅斯福路四段 1 號，jslai525@ntu.edu.tw

分析水流與橋墩夾角 0° 、 15° 、 30° 、 45° 等多種角度推估地形及水位之關係，發現沿橋墩上游面所造成之墩前壅水影響水平範圍大約為 10m。在各種來流方向角度的沖刷深推估後所獲得之結果均相當接近，因此最後仍建議以墩前 0° 及五倍橋墩直徑距離上游處的來流水深及流速，作為橋梁最大沖刷深度之推估位置，且以 Froehlich (1991) 公式所推估之沖刷深度結果，較接近現場實際觀測值。然而，因各河川河道輸砂特性各異、橋墩形式與尺寸、水文水理條件也不盡相同，本研究僅針對單一河川區段進行研究，且以大甲溪國道三號橋為本研究之案例，因此，未來應針對各重要橋梁分別進行橋梁沖刷深度推估，以作為橋梁安全評估參考之用。

關鍵詞：橋墩沖刷，二維數值模式，局部沖刷，束縮沖刷，一般沖刷。

ABSTRACT

Hundreds of bridges of abutments, piers, deck and approach roads damaged during Typhoon Morakot in 2009. Except the structural security problems due to the service life, the river bed where the bridge located were scoured deeply by flood is the main reason. In this study, estimating the largest scour depth of front of the bridge is the purpose. The analyzing pier named PL28, located at National Freeway Bridge in the Dajia River, the reach is about 3,285 m long and 1,165 m wide between the cross section 7 and cross section 13. A 2-D numerical model, SRH-2D, is adapted to simulate hydraulic mechanism and sediment transport in study area. The general scour depth is calculated by Parker's equation which is one of equations of sediment transport simulations in SRH-2D. Furthermore, the simulated results of hydraulic patterns can be adapted to calculate the local scour depth by the Inglis formula, Laursen formula, Neill formula, Shen *et al.* formula, Wu formula, Jain and Fischer formula and Froehlich formula etc. Then, the contraction scour depth which is calculated by Laursen's equation is integrated with general scour depth and local scour depth to complete total scour depth.

The final results were compared to the monitoring sensors installed by the National Center for Research on Earthquake Engineering in Taiwan. One rainfall event named 0519 (2014) was selected to be the event in the simulation and the field case. In this study, not only calculating the scour depth in the front of bridge, but also designed four kinds of angles 0° , 15° , 30° , 45° which are between the water and pier to estimate the relationship between bed element and water level. We found that the horizontal influence distance of backwater resulted from the pier is about 10 m. In addition, the scour depths estimated in various angles are quite closed. Therefore, it is recommended to use the 0° and the five times diameter of the pier as the position to estimate the total bridge scour depth. Based on comparison results, the Froehlich formula is recommend being the estimation formula in this research area after comparing with the estimating and measuring data.

However, due to the different characteristics and the hydrological conditions are not the same of each river, the results of this study only proposed for the National Highway No. 3 Bridge pier in the Daija River. It is suggested to continue study on the bridge scour depth in all important bridges. Thus, the specific suitable formula on allocated bridge scour estimation could be obtained, and the bridge project safety could be assessed.

Keywords: Bridge scour, 2-D numerical model, local scour, contraction scour, general scour.

一、前言

台灣河川以南北向之中央山脈為分水嶺，最高海拔高度達近 4000m，東西向最寬處不到 150 公里，造成台灣河川多屬坡陡流急，加上颱風豪雨時高降雨強度形成的洪水流量，常造成橋梁損毀及人命傷亡之事件，其原因乃在颱風期間橋梁所在之河道底床受到洪水沖蝕而刷深，當橋墩沖刷超過設計深度時，將致使危害橋梁安全形成傾倒斷裂狀況。

橋墩周圍之局部沖刷可分為清水沖刷(clear-water scour)及濁水沖刷(live-bed scour)兩種，濁水沖刷之平均沖刷深度大約較清水沖刷者低 10% [1]。因此，橋墩沖刷問題一般採保守推估時常將清水沖刷所造成之最大沖刷深度作為工程上橋墩設計沖刷深度之依據。

交通部運輸研究所於 2005 年[18]曾進行有關橋墩沖刷相關研究，諸如「河道水位與橋墩沖刷推估模式之建立研究(2010a)」[19]、「橋墩沖刷計算模式之建立研究(2010b)」[20]、「跨河橋梁安全評估之研究(2010c)」[21]、「跨河橋梁安全預警系統之建立研究(2010d)」[22]、以及 2014 年「跨河橋梁安全分析與水位監測之研究」[23]，藉由整體河系從基本水理分析、工程材料、橋梁檢測、規範檢討至預警報系統，希望達到先期預測、通報、預警之橋梁安全管理。國家地震工程研究中心在 2009 年[24]亦開始進行橋梁檢測系統建置及橋墩沖刷相關研究，包含「橋墩沖刷水工模型操作及水理分析(2010)」[25]、「橋墩水工試驗沖刷與水理之量測分析(2011)」[26]、「橋墩沖刷試驗與水理量測分析(2012)」[27]、「橋墩沖刷試驗水理量測與模擬(2013)」[28]、以及「水工模型暨水槽量測與橋墩沖刷水理數值模擬(2014)」[29]，除數值模擬分析橋梁水理以外，也建置現場沖刷感測設備及試驗室之橋墩沖刷水工模型，以二維數值模式推估橋梁最大沖刷深度，藉由理論推估試驗室及現場觀測資料，達到先期預警系統總沖刷深度之預測推估，然而，在現場所獲得的觀測數據仍然極為有限，此因洪水期間現場觀測之水理條件十分複雜且

危險，觀測儀器設備易遭受破壞。

數值模擬部分 Guo (2014)[4]則曾以高屏溪的雙園大橋為研究橋梁，文中以 SRH-2D 計算沖刷深度，並建立水位與沖刷深度之回歸關係，建議利用實際監測資料修改此回歸關係以獲得更佳之關係式。Hong (2014)[5]以濁水溪為研究區域，發現 Shen *et al.* (1969) [17]、Jain and Fischer (1980)[7]公式所獲得之沖刷深往往會有高估情形，但文章中未針對現場實測沖刷與模擬沖刷深度做深入討論。郭與洪(2015) [31]同樣以濁水溪為研究區域，利用二維動床模式及橋墩局部沖刷變量流沖刷演算法，發展物理型計算模式，並模擬濁水溪名竹大橋附近河段於颱風期間河道一般沖刷、束縮沖刷及橋墩局部沖刷之完整沖刷歷程。Lee *et al.* (2014, 2016) [9, 10]以大甲溪為研究河道，以橋墩上之監測儀器建立了橋墩監測預警系統，研究中發現國道 1 號橋對於國道 3 號橋而言，較能夠承受洪水的沖刷。然而，許多沖刷推估經驗公式大多利用試驗室所獲得的數據，仍然缺乏足夠的現場觀測橋墩沖刷深度數據來獲得適當的橋墩沖刷深度公式。由於現場橋墩沖刷深度監測數據十分缺乏，楊等(2015)[32]及張等(2015)[30]利用單軸加速度器所測得之加速度值變動量來判斷沖刷深度，可獲得底床沖刷與淤積歷程最具成效；因此，本研究擬採用單軸加速度器所量測之沖刷歷程驗證數值模式之適用性。

本研究乃依據國家地震工程研究中心於大甲溪國道三號橋 P28L 橋墩安裝之沖刷感測器所測得之沖刷深度，藉本文中所計算之沖刷深度，比較不同局部沖刷深度公式推估結果，並考量探討不同來流方向(角度)及不同模擬位置點探討來流水深及流速之影響，提出最適合之沖刷深度公式，未來可提供作為橋墩沖刷深度監測預警評估之用。

二、研究區域介紹

大甲溪國道三號橋位於中臺灣橫跨苗栗縣與台中市兩地，連接南北(北苗栗、南台中)來往之交通要道，橋身 1.2 公里長、共有 38 座圓柱狀

橋墩，每座橋墩直徑為 2.7m，於 2003 年完工；距大甲溪出海口 6.57 公里，向西注入台灣海峽。大甲溪流域面積為 1,981 平方公里，大甲溪國道三號橋附近河段之坡度約為 1%。大甲溪 100 年重現期之洪峰流量為 21,000 立方米/秒，根據回歸分析結果，大甲溪國道三號橋年平均流量為 116 立方米/秒，流經此橋之河道主深槽為橋墩編號 P26 與 P28L 之間。本研究沖刷深度監測感應器架設於橋墩編號 P28L，將所獲得之振動資訊提供給數值模式驗證沖刷深度之用。主要透過數值模擬評估大甲溪國道三號橋之即時沖刷深度推估公式之適用性研究。

本研究以大甲溪石岡壩下游河段為研究區域，模擬區域以大甲溪 13 號大斷面為上游邊界，下游邊界為大甲溪鐵路橋，模擬範圍涵蓋大甲溪國道 3 號橋為主，計算河段長約 3,285m，寬約 1,165m。二維水理動床分析 2014 年 5 月 19 日至 5 月 23 日之豪雨期間，石岡壩放流量為上游邊界條件，下游以鐵路橋實測水位為下游邊界，進行大甲溪國道三號橋之沖刷深度模擬推估。

三、二維數值模式

3.1 SRH-2D 二維數值模式

一般而言，利用三維數值模式可獲得較精確的橋墩沖刷模擬結果，但三維數值模式的模擬演算時間長，且現階段研究仍著重在單一橋墩之定量流計算或是定床演算。相較於三維數值模式，二維數值模式搭配合適之橋墩局部沖刷公式，不僅能夠解析複數橋墩之局部沖刷現象，且能夠有效率的模擬大範圍河道之底床沖淤變化。近年來，美國墾務局所研發之 SRH-2D (Sedimentation and River Hydraulics – 2D) 二維水理輸砂數值模式，已逐漸廣泛應用於臺灣河川水理輸砂特性之研究，例如：濁水溪及大甲溪流域中下游河道的沖刷問題探討(經濟部水利署水利規劃試驗所，2012 [34]；經濟部水利署水利規劃試驗所，2013 [35])，結果顯示 SRH-2D 模式能合理呈現真實河道之水流與泥砂之動床特性。因此，本研究採用 SRH-2D 模式進行二維河道水理及沖淤模擬。SRH-2D 二

維數值模式[15]能處理二維動態的淺水波方程式，即水深方向平均的 de Saint-Venant 方程式。就模式整合能力而言 SRH-2D 可以與很多現有的模式相結合，例如 RMA-2(美軍工兵團 1996 [16]) 以及 MIKE21(DHI 軟體 1996 [2])，SRH-2D 在格網的要求上相當有彈性，結構網格、非結構網格及混合網格皆可使用，其水流控制方程式如下所示：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = e \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} &= \frac{\partial(hT_{xx})}{\partial x} \\ &+ \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial y} - gh \frac{\partial(z_b + h)}{\partial x} - \frac{\partial(\tau_{bx})}{\partial \rho} \dots\dots\dots (2) \\ &+ \bar{D}_{xx} + \bar{D}_{xy} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} &= \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial x} \\ &+ \frac{\partial(hT_{yy})}{\partial y} - gh \frac{\partial(z_b + h)}{\partial y} - \frac{\partial(\tau_{by})}{\partial \rho} \dots\dots\dots (3) \\ &+ \bar{D}_{yx} + \bar{D}_{yy} \end{aligned}$$

式中 t 為時間； h 為水深； u 為 x 方向之水深平均流速分量； v 為 y 方向之水深平均流速分量； e 為過量降雨率； g 為重力加速度； T_{xx} 、 T_{yy} 為水深平均紊流應力； $\bar{D}_{xx}$ 、 $\bar{D}_{xy}$ 、 $\bar{D}_{yx}$ 、 $\bar{D}_{yy}$ 為水深平均延散項； z_b 為底床高程； ρ 為密度； τ_{bx} 、 τ_{by} 為底床剪應力，而

其中，紊流模式主要依據柏努力方程式 (Boussinesq equations):

$$T_{xx} = 2(\nu + \nu_t) \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}k \dots\dots\dots (4)$$

$$T_{xy} = (\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \dots\dots\dots (5)$$

$$T_{yy} = 2(\nu + \nu_t) \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3}k \dots\dots\dots (6)$$

ν 為水的運動黏滯度； ν_t 為渦流黏滯度； k

為紊流動能。紊流模式用來計算紊流動能，Rodi (1993)[13]使用了兩種紊流模式，分別為深度平均拋物線模式(Depth-averaged parabolic model)與 $K-\varepsilon$ (K-epsilon) 紊流模式。在拋物線模式中， $\nu_t = C_t u_* h$ ， u_* 為底床摩擦速度，常數 C_t 範圍介

於 0.3 至 1，在 SRH-2D 中常數 C_t 默認值為 0.7，此常數值可自行修改。假如使用 $K-\varepsilon$ 模式，紊流黏滯度以 $\nu_t = C_\mu K^2 / \varepsilon$ 計算。兩個方程式解算式如下：

$$\frac{\partial hk}{\partial t} + \frac{\partial huk}{\partial x} + \frac{\partial hvk}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h\nu_t}{\sigma_k} + \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h\nu_t}{\sigma_k} + \frac{\partial k}{\partial y} \right) + P_h + P_{kb} - h\varepsilon \quad (7)$$

$$\frac{\partial h\varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial hu\varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial hv\varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + C_{s1} \frac{\varepsilon}{k} P_h + P_{sb} - C_{s2} h \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

Rodi 在 1993 年使用下列定義與係數：

$$P_h = h\nu_t \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (9)$$

$$P_{kb} = C_f^{-1/2} u_*^3; \quad P_{sb} = C_{sr} C_{s2} C_\mu^{1/2} C_f^{-3/4} u_*^4 / h \quad (10)$$

$$C_\mu = 0.09, \quad C_{s1} = 1.44, \quad C_{s2} = 1.92, \quad \sigma_k = 1.3, \quad C_{sr} = 1.8 \sim 3.6 \quad (11)$$

P_{kb} 與 P_{sb} 是用來計算基於在均勻流之底床摩擦所產生紊流動能與損失。

3.2 一般沖刷深度(Y_g)推估

橋墩周圍最大沖刷深可視為一般沖刷、束縮沖刷與局部沖刷之和，一般沖刷主要源自於懸移質與推移質之河床粒料傳輸，而 Parker 公式較適合使用於由粗粒料與細粒料所共同組成之河川，因此本研究一般沖刷計算則採用 SRH-2D 二維數值模式中 Parker 之推移質公式(1990)[12]，進行 SRH-2D 動床模擬以及一般沖刷深度之計算，SRH-2D 動床模擬中對於泥砂粒徑為 i 類之傳輸方程式表示如下：

$$\frac{Y_g (4\pi(d_i/2)^3/3) / \rho_o g(s-1)}{(\tau_b / \rho)^{1.5}} = P_{ai} G(\varphi_i), \quad \varphi_i = \frac{\theta_i}{\theta_r} \left(\frac{d_i}{d_{50}} \right)^\alpha \quad (12)$$

$$G = \begin{cases} 11.933(1-0.853/\varphi_i)^{4.5} & \varphi_i > 1.59 \\ 0.00218 \exp[14.2(\varphi_i - 1) - 9.28(\varphi_i - 1)^2] & 1.0 \leq \varphi_i \leq 1.59 \\ 0.00218\varphi_i^{14.2} & \varphi_i \leq 1.0 \end{cases} \quad (13)$$

Y_g 為單位寬一般沖刷深度； ρ_o 為泥砂孔隙率； P_{ai} 為 i 類泥砂粒徑在床面之容積率； $S = \rho_s / \rho - 1$ ， ρ 與 ρ_s 為水與泥砂之密度； g 為重力加速度； τ_b 為河床剪應力； $\theta_i = \tau_b / [\rho_o g(s-1)d_i]$ 代表 i 類泥砂之 Shield 參數； θ_r 為 Shield 參數； d_i 為 i 類泥砂直徑； d_{50} 為底床混合粒料之中值粒徑。

3.3 束縮沖刷深度(Y_c)推估

而束縮沖刷深度之推估，則利用 SRH-2D 動床模擬所計算之水理參數進行推估，本研究採用 Laursen (1958)[8]公式，進行束縮沖刷深度之計算，公式表示如下：

$$Y_c = Y_1 \left[\left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^{7/6} \times \left(\frac{B_1}{B_2} \right)^{k_1} \times \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^{k_2} - 1 \right] \quad (14)$$

其中， Y_c = 束縮冲刷深度(m)； Q_1 = 來流流量(每秒立方 m)； Q_2 = 通過橋墩流量(每秒立方 m)； B_1 = 來流通水寬度； B_2 = 橋墩間通水寬度； n_1 = 來流河道曼寧粗糙值； n_2 = 橋墩間曼寧粗糙值； k_1 及 k_2 = 剪力速度與顆粒沉降速度之比值。

3.4 局部冲刷深度(Y_s)推估

當水流經橋墩附近由於橋墩阻礙造成流況改變，所引起流速或底床剪應力增加，而且在水流經過橋墩周圍時造成範圍較小之局部冲刷，其因受三維流體作用力如重力、衝擊力及下向流等之沖擊所造成的結果，以致流場更為複雜，其複雜性隨局部冲刷坑馬蹄形渦流的發展而加劇，然三維數值模擬費時且缺乏實測數據資料可供驗證，因此本研究局部冲刷深度之推估，擬採用 SRH-2D 動床模擬所計算之水力參數進行推估。

本研究採用 Inglis (1949) 公式、Laursen (1958) 公式、Neill (1964) 公式、Shen *et al.* (1966) 公式、吳建民(1967)公式、Jain and Fischer (1980) 公式及 Froehlich (1991) 橋墩局部冲刷公式等七種冲刷經驗公式互相比較分析，各公式表示如下：

(1) Inglis (1949) 公式 [15]

$$Y_s/D = 4.2 F_r^{0.52} (Y_1/b)^{0.73} \quad (15)$$

(2) Laursen (1958) 公式[6]

$$\frac{D}{Y_1} = 5.5 \times \frac{Y_s}{Y_1} \times \left[\left[\frac{Y_s}{11.5 \times Y_1} + 1 \right]^{1.7} - 1 \right] \quad (16)$$

(3) Neill (1964) [11]

$$\frac{Y_s}{D} = 1.5 \times \left(\frac{Y_1}{D} \right)^{0.3} \quad (17)$$

(4) Shen *et al.* (1966) 公式[14]

$$Y_s/Y_1 = 2.5 F_r^{2/5} (D/Y_1)^{3/5} \quad (18)$$

(5) 吳建民(1967)公式[18]

$$1 + 0.116 \left(\frac{Y_s}{Y_1} \right) = \frac{1}{1.02} \left[1 + \frac{\left(\frac{b}{2Y_1} \right)^{2/3}}{1.3 \left(\frac{Y_s}{Y_1} \right)} \right] \quad (19)$$

(6) Jain and Fischer (1980) 公式[7]

$$\frac{Y_s}{D} = 1.86 \left(\frac{Y_1}{D} \right)^{0.5} \times (F_r - F_{rc})^{0.25} \quad (20)$$

(7) Froehlich (1991) 公式[3]

$$Y_s = 0.32 \phi (a')^{0.62} Y_1^{0.47} F_r^{0.22} d_{50}^{-0.09} \quad (21)$$

If $Y_s \leq 2.4 \cdot a$ for $Fr \leq 0.8$,

If $Y_s \leq 3.0 \cdot a$ for $Fr > 0.8$

其中， Y_s = 局部冲刷深度(m)； D = 橋墩直徑(m)；

Y_1 = 來流水深(m)； $F_r = \frac{V_1}{\sqrt{gY_1}}$ 來流福祿數； V_1

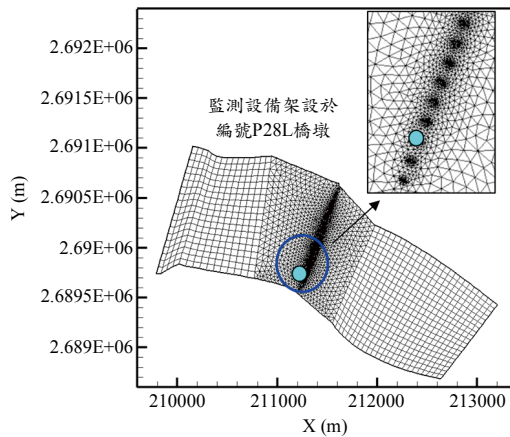
= 來流流速； F_{rc} = 泥砂起動臨界流速所對應之水流福祿數； ϕ = 橋墩鼻頭點之形狀修正係數； $\phi = 1.3$ (方形之鼻頭點)； $\phi = 1.0$ (圓形之鼻頭點)； $\phi = 0.7$ (三角形之鼻頭點)； a' = 垂直水流之橋墩寬度(m)； b = 橋墩迎水面寬度(m)，基腳露出河床者，以基腳迎水寬度計算； d_{50} = 底床材質粒徑大小分佈曲線上通過率為 50% 所對應之顆粒直徑(m)。

四、模擬條件

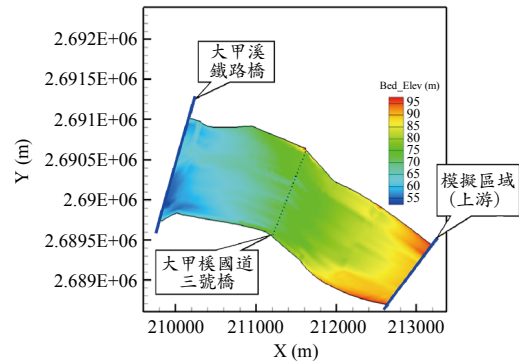
本研究模擬之地形資料使用 102 年之 LIDAR 地形量測及參考第三河川局之 2013 年大甲溪大斷面資料，本研究模擬區域如圖 1(a) 所示，上游邊界以編號 13 號大斷面作為流量邊界，下游邊界以 7 號大斷面作為水位邊界，所涵蓋區域長約 3,285 m，寬約 1,165 m。模擬區域之底床高程如圖 1(b) 所示，介於海平面 51.89 m 至 97.50 m 之間，此河段沿河道之縱向坡度約為 0.01，泥砂中值粒徑 d_{50} 約為 91.5 mm，並依 Parker(1990) 公式之建議將泥砂孔隙率 ρ_0 設定為 0.4，在大甲溪橋之現地監測橋墩 P28L 座標為(x = 211264.51 m, y = 2689692 m)。本研究以 SMS8.0



(a)



(b)



(c)

圖 1 水理及局部沖刷深度運算河段之(a)模擬區域採用之上下游邊界位置(b)網格建置方式(c)大甲溪國道 3 號橋大斷面地形。

版軟體編輯模擬網格數 6870 個，如圖 1(a)所示，因大甲溪橋墩附近流場較為複雜，故於橋墩附近之計算網格較為細密。當模擬完成後可得到流速及水位之相關資料，用以繪製成水位圖及流場圖。

以 2014 年 5 月 19 日至 2014 年 5 月 23 日間豪雨(0519 豪雨事件)為一完整流量歷程，上游邊界採用石岡壩於 0519 豪雨事件之實測放流資料，最大放流量發生於 5 月 21 日 16 時，放流流量為 $1011.3\text{m}^3/\text{s}$ ，下游邊界條件以安裝於台 3 縣大甲

溪橋下之水位計實測水位為下游邊界條件，水位及流量資訊如圖 2 所示。模擬之大甲溪底床粗糙度，參考 2009 年經濟部水利署「大甲溪石岡壩下游河段河床穩定方案之研究(2/4)」[33]，於本模擬河段斷面 7-1 至斷面 13 之曼寧 n 值採用 0.035。

五、模擬結果

5.1 水理資料分析採用位置

本研究為探討距離橋墩前不同區位之水深

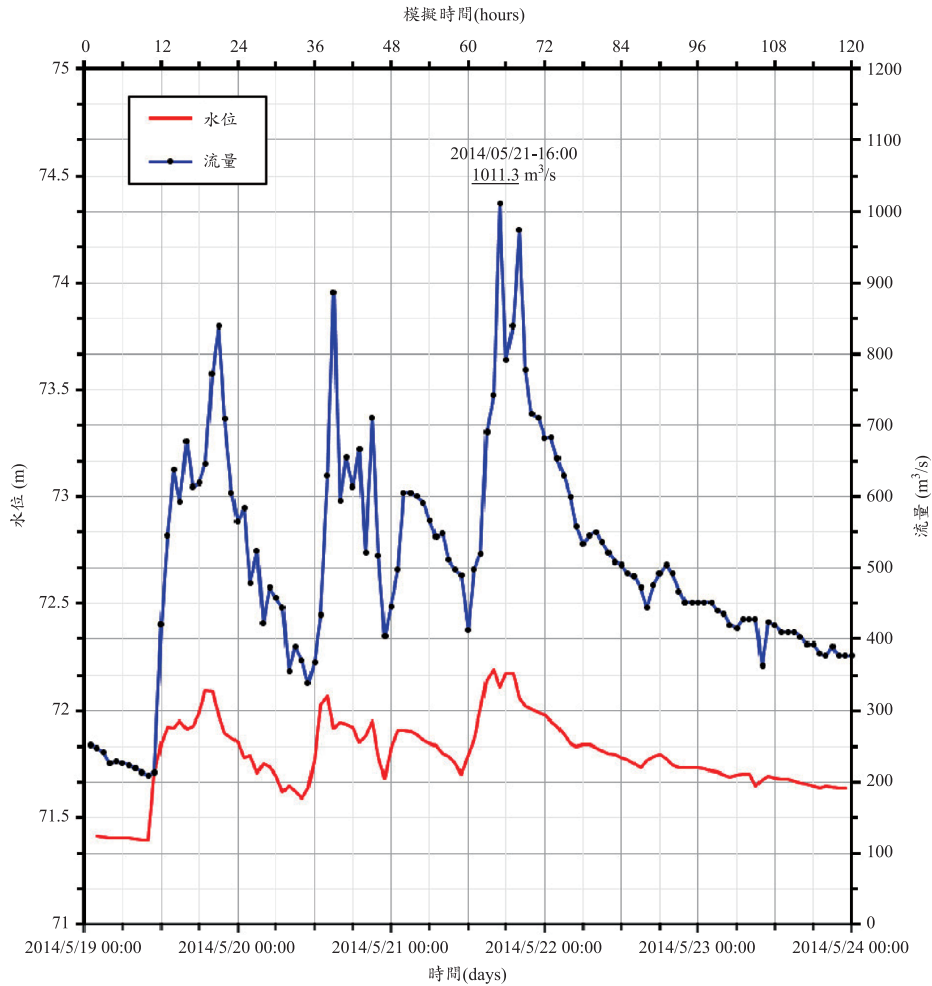


圖 2 石岡壩 0519 豪雨放流歷線及大甲溪國道 3 號橋監測點模擬水位圖。

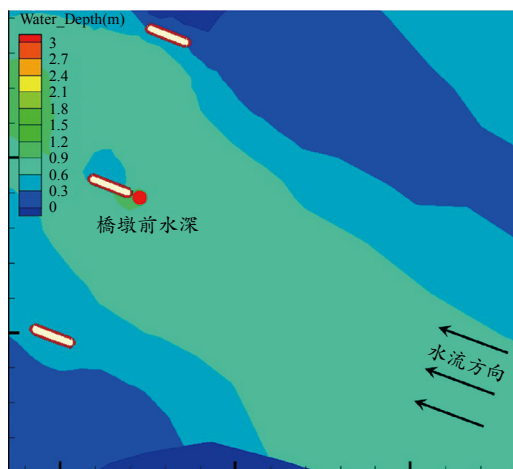
及流速(來流水深及流速)，對推估橋墩冲刷深度所造成之差異性，分別考慮了水流方向與橋墩所形成之夾角，依橋墩直徑比例考量以下三組不同的水理資料：

- (1) 橋墩前：直接採取橋墩前方為計算水深，如圖 3(a)。
- (2) 橋墩直徑(D)五倍：僅用單一橋墩直徑之五倍距離處為計算水深，例如單一根橋墩直徑為 2.7 m，五倍單一橋墩直徑則為 13.5 m，資料截取點位如圖 3(b)所標示，分別以橋墩與水流方向之左側(L)45 度、中間(M)0 度、右側(R)45 度等共三處。

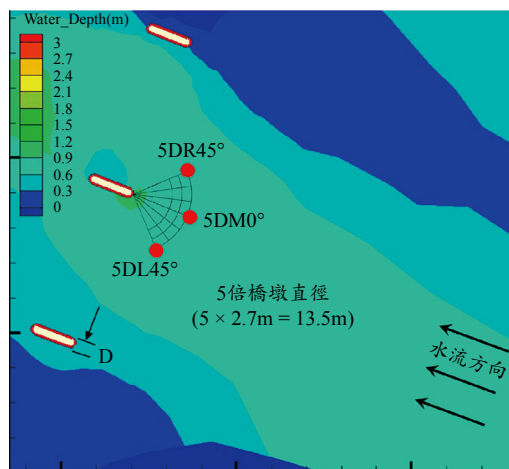
- (3) 上下游橋墩間距(ℓ)倍數：上下游橋墩間距距離為 13 m，資料點位分別以四倍(52 m)距離與來流方向之左側 45 度、中間 0 度、右側 45 度共三處；五倍(65 m)與來流方向之左側 30 度、中間 0 度、右側 30 度共三處；六倍(78 m)距離與來流方向之左側 15 度、中間 0 度、右側 15 度共三處，資料截取點位如圖 3(c)所示。

5.2 冲刷深度分析與驗證

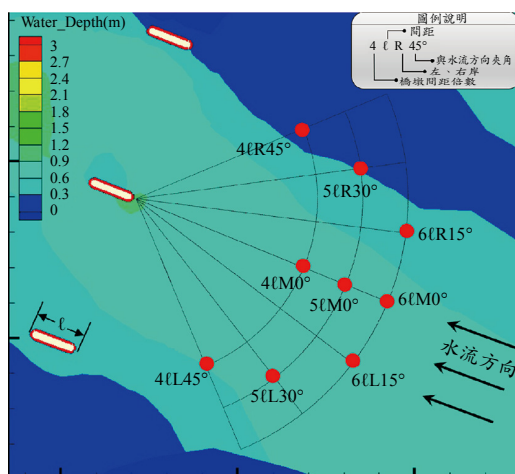
本研究採用 Inglis (1949)公式、Laursen (1958)公式、Neill (1964)公式、Shen *et al.* (1966)公式、



(a)



(b)



(c)

圖 3 大甲溪國道 3 號橋 P28L 橋墩資料擷取點位示意圖(a) 墩前水深 (b) 單一橋墩直徑五倍距離、與水流夾角 0°至 45° (c) 上下游橋墩間距 4 倍至 6 倍距離、與水流方向夾角 0°至 45°。

吳建民(1967)公式、Jain and Fischer (1980)公式及 Froehlich (1991)等七種局部沖刷公式，依據三組水理資料採用位置所得之水深及流速數據，推估沖刷深度結果分別整理如表 1 至表 3。P28L 橋墩於尖峰流量發生時間之各資料截取點來流水深及來流流速如表列，綜合三組水理資料採用位置所推估之局部沖刷結果，七種公式所推估之局部沖刷深度最小為 Froehlich (1991)公式(接近 1 m 沖刷深度)，最大沖刷深度為 Inglis (1949)公式及

Shen *et al.* (1966)公式推估所得結果。而三組水理資料採用位置所推估之局部沖刷結果，在七種公式所推估之局部沖刷深度所呈現之數值皆在同一量級，各種來流方向角度的沖刷深推估後所獲得之結果均相當接近。

根據國家實驗研究院國家地震工程研究中心建置之沖刷深度監測感應器，於 2014 年 5 月 18 日至 2014 年 5 月 25 日期間所觀測之監測資訊如圖 4 所示，沖刷深度推估有 0.5m ~ 1m 間之沖

表 1 各經驗公式局部冲刷深度之推估(墩前)

(單位：m)

點位 編號	來流 水深 Y_1 (m)	來流 流速 V_1 (m/s)	福祿數 F_r	局部冲刷深度(Y_s)						
				Inglis (1949)	Laursen (1958)	Neill (1964)	Shen <i>et al.</i> (1966)	吳建民 (1967)	Jain and Fischer (1980)	Froehlich (1991)
墩前	1.06	0.54	0.166	2.259	1.832	3.062	2.268	3.288	1.729	0.752

表 2 各經驗公式局部冲刷深度之推估(單一橋墩直徑 D)

(單位：m)

點位 編號	來流 水深 Y_1 (m)	來流 流速 V_1 (m/s)	福祿數 F_r	局部冲刷深度(Y_s)						
				Inglis (1949)	Laursen (1958)	Neill (1964)	Shen <i>et al.</i> (1966)	吳建民 (1967)	Jain and Fischer (1980)	Froehlich (1991)
5DL45°	0.789	2.577	0.926	4.439	2.800	2.800	4.002	2.826	2.600	0.954
5DM0°	0.809	2.628	0.933	4.537	2.821	2.821	4.054	2.862	2.638	0.967
5DR45°	0.800	2.622	0.936	4.508	2.811	2.811	4.041	2.846	2.626	0.963

表 3 各經驗公式局部冲刷深度之推估(上下游橋墩間距 ℓ)

(單位：m)

點位 編號	來流 水深 Y_1 (m)	來流 流速 V_1 (m/s)	福祿數 F_r	局部冲刷深度(Y_s)						
				Inglis (1949)	Laursen (1958)	Neill (1964)	Shen <i>et al.</i> (1966)	吳建民 (1967)	Jain and Fischer (1980)	Froehlich (1991)
4ℓM0°	0.800	2.473	0.883	4.373	1.548	2.812	3.948	2.846	2.584	0.951
5ℓM0°	0.736	2.376	0.884	4.119	1.518	2.743	3.821	2.728	2.478	0.915
6ℓM0°	0.729	2.473	0.924	4.188	1.511	2.735	3.875	2.715	2.497	0.920
4ℓL45°	0.585	2.265	0.945	3.607	1.349	2.560	3.580	2.426	2.246	0.833
4ℓR45°	0.195	1.168	0.843	1.527	0.763	1.842	2.206	1.371	1.237	0.485
5ℓL30°	0.725	2.378	0.892	4.091	1.505	2.730	3.810	2.707	2.464	0.910
5ℓR30°	0.275	1.422	0.865	1.986	0.912	2.042	2.556	1.641	1.487	0.573
6ℓL15°	0.823	2.532	0.891	4.486	1.606	2.836	4.008	2.887	2.628	0.965
6ℓR15°	0.428	1.760	0.859	2.730	1.146	2.330	3.040	2.063	1.862	0.704

刷深度，而最大觀測冲刷深度(約 1 m)發生在尖峰流量($Q = 1011.3 \text{ m}^3/\text{s}$)左右，比較單一橋墩直徑(D)(如表 2)之局部冲刷公式推估結果可發現，表 2 中顯示在點位編號無論水流方向在 0 度或左右 45 度之角度，其推估局部冲刷深度(Y_s)都差異不大，然而只有 Froehlich (1991)公式所推估之局部冲刷深度，較接近實際觀測的深度。另外，表 1 利用橋墩前之水理條件所推估局部冲刷深度，雖然以 Froehlich (1991)公式較近似，但與觀測冲刷值仍有約 25%之誤差；而考量上下游橋墩間距(ℓ)

倍數時，沿著 0 度方向不同距離所推估的局部冲刷深度皆接近觀測冲刷深度(在約 10%誤差之內)，其他角度方向所推估之冲刷深度，則不具一致性，此可能與該資料截取點位之水深與流速大小有關連，下一節將進一步探討此現象。因此，本研究建議以墩前 0°及五倍橋墩直徑(本研究橋墩直徑約 2.7 m)處，不論來流的方向角度，可作為橋梁最大冲刷深度之推估位置，且橋墩 P28L 局部冲刷公式可參考採用 Froehlich (1991)公式進行推估。

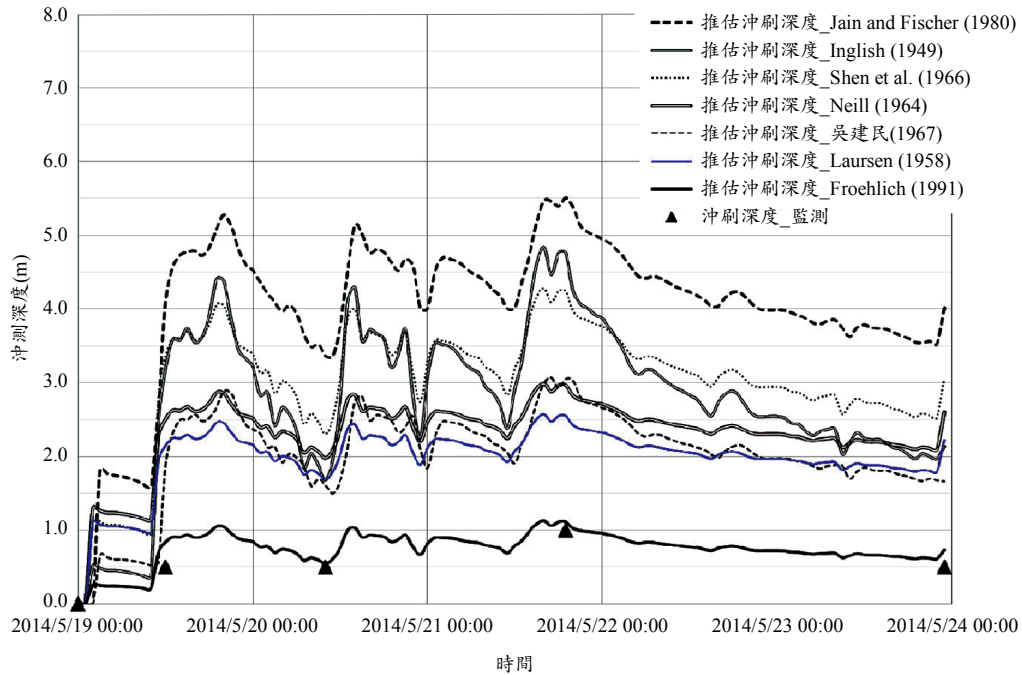


圖 4 模擬區域冲刷深度隨時間之變化圖。

另外，由二維動床數值模式分析模擬得知，圖 4 中顯示 P28L 橋墩依據 SRH-2D 模式所演算之一般冲刷深度，加上墩前 0° 及五倍橋墩直徑處之水深與流速依據公式(14)~公式(21)所推估之束縮冲刷及局部冲刷深度，所繪製 P28L 橋墩冲刷深度隨時間變化之歷程，歷程中產生之三段冲淤現象發生時間與圖 2 流量尖峰區段相符合，證明本研究中所使用之二維數值模式及推估橋墩冲刷公式以 Froehlich (1991) 公式所推估之冲刷深度最符合現地觀測結果。

5.3 來流水深與底床地形之關係

由於河道經水流冲刷後，除了在橋墩周圍產生局部之冲刷坑外，橋墩附近的河床高程冲淤變化，也會影響來流水深及來流流速之估算；因此以 5.2 節中第三組資料中，考量上下游橋墩間距 (ℓ) 五倍的資料點為例，由橋墩處至點位 $5\ell M0^\circ$ 所截取之資料點，繪成如圖 5 之水位與地形之關係圖。從圖 5 可看出，墩前因水流經過橋墩周圍時，

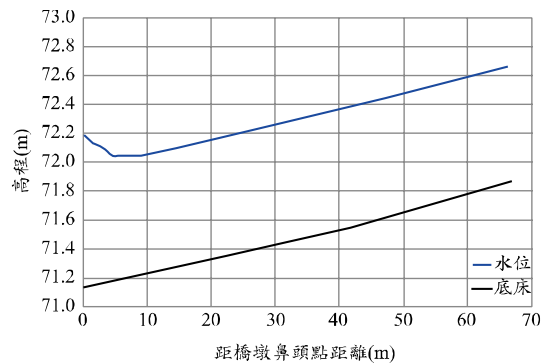


圖 5 從橋墩鼻頭點至點位 $5\ell M0^\circ$ 之縱向水位-底床地形剖面圖。

在橋墩鼻頭點形成停滯點，使水流之動能轉換為位能所造成之壅水現象，此壅水現象之影響範圍約有 10 m，且由表 3 點位編號 $5\ell L30^\circ$ 及 $5\ell R30^\circ$ 之來流水深與來流流速所推估之局部冲刷深度，約有 2 倍冲刷深度之差異，因此於地形上具河床坡度變化時，此河床坡度變化對於用以計算局部冲刷之來流水深 (Y_1) 與來流流速 (V_1) 有明顯影響，

然而計算局部冲刷之來流水深(Y_1)與來流流速選取較為靠近橋墩處之資料截取點時,如表 2 點位 5D 處,則角度與地形因素影響較小,因此,若不考量角度與地形因素之影響,則計算局部冲刷之來流水深(Y_1)與來流流速(V_1)應選取資料截取點 5D 位置之數值較為恰當。

六、結 論

本研究以大甲溪國道三號橋之編號 P28L 橋墩為冲刷深度計算之模擬對象,考量動床與非平衡輸砂之情況下,以 SRH-2D 模式進行二維水理輸砂運算,以獲得一般冲刷深度及推估束縮冲刷與局部冲刷深度所需之水深與流速。橋墩冲刷主要以一般冲刷、束縮冲刷及局部冲刷為主,因此,除了以束縮冲刷及局部冲刷公式計算以外,另搭配 Parker 輸砂公式計算一般冲刷深度。

在 2014 年 5 月 19 日豪雨事件中,尖峰流量時刻所獲之之水理計算結果,依不同位置所推估之最大冲刷深度,雖多數局部冲刷公式皆有高估情形,但以 Froehlich (1991)公式所推估之冲刷深度結果(介於 0.485 m 至 0.967 m),較接近國家地震工程研究中心之現場實際觀測值(冲刷深度介於 0.5 m 至 1 m)。

依本研究針對墩前、五倍橋墩直徑、及五倍上下游橋墩間距等三種距離條件所估算之冲刷深度結果可知,七種局部冲刷公式在三種距離所推估之冲刷深度,由各種局部冲刷公式所推估之冲刷深度量值均相當接近,因此可直接利用墩前 0°及墩前五倍橋墩直徑作為後續冲刷深度推估之依據。另根據水位-地形分析結果得知本研究區域之壅水現象影響範圍接近 10 m,而由上下游橋墩間距(ℓ)五倍的資料點所分析之局部冲刷深度可知,不同角度所推估之局部冲刷深度約有 2 倍之差異,因此,若不考量角度與地形因素之影響,則計算局部冲刷之來流水深(Y_1)與流速應選取 5D 位置之數值較為恰當。

本研究之二維水理輸砂模擬與冲刷公式應用,配合國家地震工程研究中心於現場裝設之冲刷深度監測感應器,除了有助於選擇適用於此區

域之冲刷公式,亦可有助於發展橋墩冲刷即時監測系統之建置。然而,因各河川河道輸砂特性各異、橋墩形式與尺寸、水文水理條件也不盡相同,本研究僅針對單一河川區段進行研究,未來因應各重要橋梁墩柱分別進行橋墩冲刷深度推估,以獲得適用之輸砂公式,除了可達到橋梁安全評估之參考,對於人民安全更能發揮預警通報之效果。

致 謝

本研究感謝國家實驗研究院國家地震工程研究中心提供部份研究經費,另感謝國立臺灣大學水工試驗所協助試驗設備,以及美國壅務局提供數值模式進行本研究計畫。

參考文獻

1. Chang, W. Y., Lai, J. S. and Yen, C. L., (2004) "Evolution of scour depth at circular bridge piers, Journal of Hydraulic Engineering", Vol. 130, No. 9, pp. 905-913.
2. DHI (1996) "MIKE21 hydrodynamic module users guide and reference manual." Danish Hydraulic Institute, USA, Treviso, Pa.
3. Froehlich, D. C. (1991) "Analysis of Onsite Measurements of Scour at Piers," Proc., A.S.C.E., National Hydraulic Engineering Conference, Colorado Springs, CO.
4. Guo, W. D., Hong, J. H., Lee, F. Z. and Lai, J. S. (2014) "Bridge Scour Predictions using 2D Hydraulic Model with Empirical Equations - A Case Study of Shuangyuan Bridge Piers on the Kao-Ping River", 6th World Conference of the International Association for Structural Control and Monitoring, Barcelona, Spain.
5. Hong, J. H., Guo, W. D., Wang, H. W., Lee, F. Z. and Lin, Y. B. (2014) "Field Measurement and Simulation of Riverbed and Bridge scour in Cho-Shui River in Taiwan", 6th World Conference of the International Association for

- Structural Control and Monitoring, Barcelona, Spain.
6. Inglis, S. C. (1949) "Maximum depth of scour at heads of guide bands and groynes, pier noses, and downstream bridges-the behavior and control of rivers and canals," Indian Waterways Experimental Station, Poona, India.
 7. Jain, S. C. and Fischer, E. E. (1980) "'Scour around Bridge Piers at High Velocity,'" Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 106, No. 11, pp. 1827-1842.
 8. Laursen, E. M. (1958) "The Total Sediment Load of Streams," J. of the Hyd. Div., ASCE, Vol. 84, No. HYI, Paper 1530, pp. 1-36.
 9. Lee, F. Z., Huang, C. C., Liao, Y. J., W. Y. Chang, Chang, H. K. and Tan, Y. C. (2014) "Deviation of local scour and contraction scour near bridge with various scour formulas around bridge piers", 6th World Conference of the International Association for Structural Control and Monitoring, Barcelona, Spain.
 10. Lee, F. Z., Lai, J. S., Chang, K. C., Lin, Y. B., Chang, H. K., Guo, W. D., Tan, Y. C. and Huang, C. C. (2016) "Flood threshold value for bridge scour prediction and warning", 8th International Conference on Scour and Erosion (ICSE), 12-15 September 2016, Oxford, UK.
 11. Neill, C. R. (1964) "River bed Scour, a review for bridge engineers." Contract No. 281, Res. Council of Alberta, Calgary, Alberta, Canada.
 12. Parker G. (1990) "Surface-based bed load transport relation for gravel rivers", J. Hydraulic Research, 28(4), pp. 417-436.
 13. Rodi, W. (1993) "Turbulence models and their application in hydraulics", 3rd Ed., IAHR Monograph, Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
 14. Shen, H. W., Schneider, V. R. and Karaki, S. S. (1969) "Local scour around bridge piers," Journal of the Hydraulic Division, A.S.C.E., 95(HY 6), pp. 1919-1940.
 15. SRH-2D version 2 (2008) "Theory and User's manual." pp. 36-37.
 16. U. S. Army Corps of Engineers (1996) "Users' guide to RMA2-Version 4.3." Waterway Experiment Station, Hydraulic laboratory, Vicksburg, Miss.
 17. Van Rijn, L.C. (1987) "Mathematical modeling of morphological processes in the case of suspended sediment transport." Delft Hydraulics Communication No. 382.
 18. 交通部公路總局, 2005, "河川橋梁之橋墩(台)冲刷保護工法之研究"。
 19. 交通部運輸研究所, 2010a, "河道水位與橋墩冲刷推估模式之建立研究"。
 20. 交通部運輸研究所, 2010b, "橋墩冲刷計算模式之建立研究"。
 21. 交通部運輸研究所, 2010c, "跨河橋梁安全評估之研究"。
 22. 交通部運輸研究所, 2010d, "跨河橋梁安全預警系統之建立研究及整合作業"。
 23. 交通部運輸研究所, 2014, "跨河橋梁安全分析與水位監測之研究(2-1)"。
 24. 國研院國家地震工程研究中心, 2009, "高科技橋梁檢測系統建置", 第七十二期。
 25. 國研院國家地震工程研究中心, 2010, "橋墩冲刷水工模型操作及水理分析"。
 26. 國研院國家地震工程研究中心, 2011, "橋墩水工試驗冲刷與水理之量測分析務"。
 27. 國研院國家地震工程研究中心, 2012, "橋墩冲刷試驗與水理量測分析之"。
 28. 國研院國家地震工程研究中心, 2013, "橋墩冲刷試驗水理量測與模擬"。
 29. 國研院國家地震工程研究中心, 2014, "水工模型暨水槽量測與橋墩冲刷水理數值模擬"。
 30. 張禾銀、賴宇紳、周科吟、林詠彬、古孟晃及李柏翰, 2015, "即時冲刷監測元件之研究", 臺灣水利, 第 63 卷, 第 1 期, pp. 64-70。
 31. 郭文達及洪建豪, 2015, "礫石河床橋墩冲刷

- 現場觀測與數值模擬”，臺灣水利，第 63 卷，第 1 期，pp. 71-82。
32. 楊智喬、謝依潔、林志興、郭致廷、宋岡能、吳建明及黃俊銘，2015，“橋梁沖刷監測系統之研究與實現-以國三大甲溪橋為例”，臺灣水利，第 63 卷，第 1 期，pp. 46-57。
33. 經濟部水利署，2009，「大甲溪石岡壩下游河段河床穩定方案之研究(2/4)」。
34. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2012，「台美合作案之技術引進及應用研究」，成果報告，臺灣大學水工試驗所。
35. 經濟部水利署水利規劃試驗所，2013，「濁水溪流域因應氣候變遷防洪及土砂研究」，成果報告。

收稿日期：民國 106 年 4 月 24 日

修正日期：民國 106 年 6 月 6 日

接受日期：民國 106 年 6 月 7 日