

應用遺傳演算法推估橋墩沖刷深度之研究

王傳益⁽¹⁾ 陳浩寧⁽²⁾ 施漢鵬⁽³⁾ 鄭人豪⁽⁴⁾ 張仁瑋⁽²⁾

摘要

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

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

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

(**關鍵字**：遺傳演算法、局部沖刷、複迴歸)

Estimation of Pier Scour Depths by Using Genetic Algorithm

Chuan-Yi Wang⁽¹⁾ H.N.Chen⁽²⁾ H.P.Shi⁽³⁾ J.H.Cheng⁽⁴⁾ J.W.Chang⁽²⁾

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

ABSTRACT

⁽¹⁾ 逢甲大學水利工程與資源保育學系副教授(通訊作者 e-mail: cywang@fcu.edu.tw)

⁽²⁾ 逢甲大學水利工程與資源保育研究所碩士

⁽³⁾ 逢甲大學土木及水利工程研究所博士候選人

⁽⁴⁾ 逢甲大學土木及水利工程研究所博士生

⁽²⁾ 逢甲大學水利工程與資源保育研究所碩士

River bed scour and deposit variation extremely severe because of most rivers are steep and rapid flows, and river discharge is extremely unstable and highly unsteady during different seasons in Taiwan. In addition to the obstruction of piers foundation, it causes local scour and threatens the safety of bridges. Accordingly, to understand the piers scour mechanism and propose an appropriate protection of piers foundation becomes an important topic for study currently. In this study, the Genetic Algorithms (GA) was set up on predicting the local pier scour depth in order to overcome the problem of exclusive and the nonlinear relationships. The observations obtained from nine laboratory in India, Iowa, Japan, French, New Zealand and Florida ...etc., were verified by the present model. From the comparison with multiple regression analysis methods, it was found that the scour depth around bridge piers can be predicted efficiently by using the GA. The accuracy of MAPE is higher than other models, where MAPE3 is the best model among the MAPEs, and it will estimate of piers scour depths by using GA in the future.

The main advantage of the GA approach over the multiple regression analysis is the relative simplicity. GA model can be set up in a relatively simple and steady way, and applied to more complex problems, and save more time than the traditional multiple regression model. Besides, based on different data set in the literature, it is found that using GA to predict pier scour depth has high applicability and dependability.

(Keywords: Genetic Algorithms, Local scour, Multiple regression analysis)

前言

1. 研究動機

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，人類隨著經濟發展、社會繁榮、環境變遷、新興社區的蓬勃發展，因而在天然河川中增設跨河結構物，連接兩岸以增進河川兩岸活動及經貿交流。然而結構物會阻滯河道造成水流流況改變，形成河床局部沖淤現象，加上台灣地勢陡峭，河短流急，降雨量時空上分布不均，每當颱風季節來臨時產生之局部沖刷，將會造成跨河結構物的基礎嚴重掏空進而破壞，終致落橋。跨河結構物不僅增進兩岸活動及經貿交流亦隱藏了許多危機。因此過去諸多學者專家曾先後研究有關於橋墩周圍泥砂沖淤之機制，並且針對不同之水文及地文參數，

深入探討其對橋墩局部沖刷之影響，提出較佳橋墩配置模式，以減低橋墩基礎遭淘刷而破壞之風險，避免落橋災害發生。

由於個人電腦的普及、CPU 運算速度越來越快、數值方法之進步，近年來各相關之套裝軟體大量出籠。MATLAB 為其中一種數學套裝軟體，其在矩陣與向量上有很強的運算功能，加上其附加軟體如 SIMULINK(模擬時域反應之系統方塊圖)、數十種工具箱(toolboxes)、及各專業的附加程式，使得 MATLAB 已能廣泛的使用且應用於遺傳演算法上。遺傳演算法(Genetic Algorithm, 簡稱 GA)是以自然選擇和遺傳理論為基礎，將生物進化過程中，適者生存規則與群體內部染色體的隨機訊息，交換機制相結合的高效全局尋優搜索算法。GA 可提供求解非線性、多模

型、多目標等系統優化問題的通用框架，它不依賴問題具體的領域，已經廣泛應用於函數優化、組合優化、自動控制、圖像處理、人工生命、遺傳編碼等科技領域，並且已經成功的應用於求解旅行商務問題、背包問題、裝箱問題、圖形劃分問題、流量問題等方面上。

由於橋墩之局部沖刷屬於三維問題，且因橋墩干擾而使水流流況變得十分複雜，若利用純理論方面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顯得十分繁雜，由於遺傳演算法具有解非線性、多模型及多目標等問題之強大運算功能，因此利用該方法求解非線性(nonlinear)之橋墩沖刷問題，建構非線性 GA 演算模式，供相關單位推估橋墩沖刷深度，進而設計橋墩基礎深度，以減低橋墩基礎遭水流淘刷而破壞之落橋事件發生機率。

2. 研究目的

在水利工程問題的研究上，有關橋墩沖刷之研究甚多，同時也有多位學者研究許多沖刷公式做為預估橋墩沖刷深度之參考，對於工程設計與分析上有很大的幫助，而一般水理現象的研究通常可以分為水工模型試驗與數值模擬兩種方法。以往在橋墩局部沖刷的研究當中，多數研究皆以水工模型試驗的方法進行分析，透過遺傳演算等數值方法分析橋墩沖刷之研究則付諸闕如。因此本研究結合過去相關文獻諸多學者的試驗數據，進行分析探討並且建立相當之資料庫。

利用該等資料庫，整合橋墩沖刷影響因子如墩徑、水深、流速及束縮比等參數以建構遺傳演算模式，將其應用於圓柱型均勻橋

墩沖刷深度之推估。以各種不同條件之橋墩試驗資料利用絕對值誤差(MAE)、平均絕對值誤差百分比(MAPE)及皮爾森相關係數(R)等三種不同評鑑標準對本研究建立之模式進行全局搜尋分析及驗證，最後利用統計方法進行比較分析與證明，以確立橋墩沖刷深度預測模式的準確性及可靠性。爾後僅需量測即調查當地水文及第文資料，則可利用該模式推估橋墩設施後造成之局部沖刷深度，據以做為橋墩基礎深度設計之參考，以解決台灣特殊河川環境之橋墩沖刷問題，確保橋樑安全。

前人研究

本研究主要探討河床中結構物橋墩的沖刷行為以及利用遺傳演算法預測橋墩的最大沖刷深度。因此，本章節將分別探討橋墩沖刷及遺傳演算的相關文獻。橋墩沖刷的部分主要為沖刷的分類、橋墩周圍的局部特性及影響橋墩沖刷的各項因子，再依不同的橋墩型式分別探討均勻與非均勻之橋墩，以及轉換兩種橋墩型式之等效橋墩公式；有關遺傳演算學應用在水利工程上的研究有複合式渠道斷面設計、水文洪水預測、尖峰流量預測、水資源調配、灌排工程、建築工程或大規模的建造計畫，應用於河道中結構物之沖刷問題，其相關的文獻則相對稀少，因此有關遺傳演算的部分，著重於遺傳演算的研究方向及其應用範圍，進而從中學習利用該方法來推估在橋墩沖刷。

1. 橋墩周圍局部沖刷特性

橋墩沖刷為局部沖刷(local scour)的一種。局部沖刷現象以概括觀點視之，即沖刷區域之泥砂出流量與入流量間發生不平衡現

象。Laursen(1962)利用長距離束縮渠道研究水流流經橋墩之流場及泥砂顆粒沖刷之情況，對於局部沖刷提出四點結論：

- a. 沖刷速率等於進出沖刷區域之沉滓輸送率差值。
- b. 沖刷開始發生後，沖刷區域通水斷面積增加，沖刷速率隨之減小。
- c. 每一起始條件必有沖刷極限之範圍。
- d. 沖刷範圍隨著時間之增加而漸趨近於極限。

然而有關於沖刷速率等於進出沖刷區域之沉滓輸送率差值，沖刷坑體積隨時間之變化率可由輸砂連續方程式來表示：

$$\frac{dV}{dT} = Q_{so} - Q_{si} \quad (1)$$

式中， V 為沖刷坑之體積； T 為沖刷時間； Q_{so} 為由沖刷區域輸出之沉滓輸送率，與橋墩之幾何形式無關，與來流流速有關； Q_{si} 為進入沖刷區域之沉滓輸送率，與橋墩幾何形式、各水流參數及時間有關。 Q_{si} 為河道單位寬度沉滓輸送率與沖刷區域寬度之乘積。故 Q_{si} 不僅為水流輸運能力之函數，同時與沖刷區域之寬度有關。由上述方程式可知，當進入沖刷區域之沉滓輸送率為零時($Q_{si}=0$)，即為清水沖刷(clear-water scour)；反之則為含滓沖刷(live-bed scour)。

Breusers et al. (1991) 根據剪力速度比值

$$\frac{u^*}{u_c^*} \quad (u^* \text{ 為泥砂剪力速度，} u_c^* \text{ 為泥砂臨界}$$

剪力速度)，將水流型態區分成下列三類：

- a. $\frac{u^*}{u_c^*} \leq 0.5$ 時，為不沖刷情況。

- b. $0.5 \leq \frac{u^*}{u_c^*} \leq 1.0$ ，為清水沖刷條件。

- c. $1.0 \leq \frac{u^*}{u_c^*}$ 時，為含滓水流的情況。

Chabert & Engeldinger(1956)證明當水流

屬於清水流時，最大平衡沖刷深度隨著 $\frac{u^*}{u_c^*}$

呈線性增加，直到 $\frac{u^*}{u_c^*} \cong 1.0$ ，平衡沖刷深度

才會達到最大值。

2. 橋墩沖刷

Dargahi(1990)在均勻橋墩沖刷試驗中提出馬蹄型渦流為造成沖刷的主要原因，並將沖刷歷程分為三個階段：

- a. 開始時期：無沖刷產生。
- b. 主要沖刷：沖刷較劇烈，並產生週期性波動。
- c. 沖刷後期：輸砂率及沖刷深度隨時間遞減。

Dey(1999)曾針對均勻橋墩之局部沖刷深度與時間變化做相關研究比較，提出下列主要概念：

- a. 沖刷情況主要是由馬蹄型渦流造成。
- b. 底床顆粒從沖刷坑底部被帶起並產生最大沖刷深度。
- c. 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。

由上述觀念推論出均勻與不均勻之底床

質粒徑在清水流動床情況沖刷下，圓形橋墩周圍局部沖刷變化隨時間影響。均勻粒徑泥沙在清水沖刷情況下之實驗結果與模式推估結果相當接近，而在動床條件下則有高估的趨勢，主要是由於受實驗底床會產生沙丘之影響。因此，對於不均勻泥沙粒徑還提供一些安全係數，於工程設計時計算最大沖刷深度之用。

3. 橋墩沖刷因子

橋墩周圍局部沖刷為三維分離流場，若純粹以理論分析推求橋墩周圍局部沖刷深度較為困難與複雜，過去大多運用試驗方法量測橋墩周圍局部沖刷深度，並推導出影響橋墩沖刷因子之權重及相關沖刷深度公式。

(1) 相對水流強度 V/V_c

Melville & Coleman(2000)指出在泥沙臨界啟動流速(V_c)時有最大之沖刷深度。含滓沖刷之平均沖刷深度會小於清水沖刷深度，因此橋墩沖刷問題仍以最大清水沖刷深度為主要考量。

Melville & Raudkivi(1977)、Melville & Chiew(1999)曾詳細分析流體之水流強度即平均流速 V 與泥沙顆粒臨界啟動流速 V_c 之比 (V/V_c)對沖刷的影響，獲得以下結論：

- $V/V_c < 0.5$ 時，不產生沖刷。
- $0.5 \leq V/V_c \leq 1$ ，為清水流況，即為清水沖刷。
- $1 < V/V_c \leq 4$ ，為含滓流況，即挾沙沖刷。
- $V/V_c > 4$ 時，為挾砂沖刷並產生逆沙丘 (anti-dune)。

(2) 相對水流深度 y/D

y/D 定義為水深和橋墩迎水面寬度的比值，當比值越小，水深改變會影響沖刷深度。當比值越大，則橋墩迎水面寬度會影響沖刷深度，而與水深較無關係。

Neill(1964)根據前人之試驗資料，提出了在定量流下，局部沖刷深度對水深無因次化之方程式：

$$\frac{d_s}{y} = 1.5 \left(\frac{D}{y} \right)^{0.7} \quad (2)$$

式中， d_s 為沖刷深度； y 為水深； D 為橋墩直徑。Jain & Fischer(1980)整理前人試驗研究結果，發現大多數沖刷公式可表示如下式：

$$\frac{d_s}{D} = A_1 \left(\frac{y}{D} \right)^{m_1} (F_r)^{n_1} + B_1 \left(\frac{y}{D} \right)^{r_1 - p_1} \quad (3)$$

式中， A_1 、 B_1 、 m_1 、 n_1 、 p_1 、 r_1 等係數分別與橋墩形狀、水流攻角及底床質特性有關，而 F_r 則為福祿數（為慣性力與重力之比值；矩形渠道 $F_r = V / \sqrt{g y}$ ，其中 g 為重力加速度）。Melville(1997)與 Melville&Chiew(1999)指出矩形橋墩，當 $y/D > 1.43$ 時橋墩局部沖刷深度只與橋墩迎水面寬度有關；當 $y/D < 0.2$ 時，水深會影響橋墩沖刷深度；而當 $0.2 \leq y/D \leq 1.43$ ，水深及橋墩迎水面寬度皆會影響局部沖刷深度。

Raudkivi & Ettema(1983)認為 $y/D > 3 \sim 4$ ，而 Melville(1997)則指出 $y/D > 1.5 \sim 2$ 時，水深變化對沖刷的影響可以忽略，此為深水狀態；反之則為淺水狀態。

(3) 底床質相對粗糙度 d_{50}/D

當底床質粒徑越大，其抵抗水流沖刷的能力越強，使得最大局部沖刷深度越小。反

之底床粒徑越小，最大沖刷深度會增加。當中值粒徑 $d_{50} < 0.6\text{mm}$ 時，會在底床產生沙漣現象，進而影響沖刷深度。然而底床質粗糙度及水流條件會影響底床質臨界啟動流速。Raudkivi & Ettema(1977)提出當 $d_{50}/D < 0.02$ 時為細顆粒，沖刷深度與粒徑無關；而當 $d_{50}/D > 0.02$ 時，沖刷深度為 d_{50}/D 的函數，且沖刷深度隨 d_{50}/D 之增大而變小。

Melville & Sutherland(1988)整理前人相關研究成果，認為當底床相對粗糙度小於 0.02 時，底床質粒徑對於橋墩沖刷深度影響可以忽略。同時提出若以設計為目的，可採用下式計算 d_{50}/D 之底床質相對粗糙度修正因子 K_d 。

$$k_d = 0.57 \log\left[2.24\left(\frac{D}{d_{50}}\right)\right] \quad D/d_{50} < 25 \quad (4)$$

$$k_d = 1 \quad D/d_{50} > 25$$

Melville & Chiew(1999)提出在均勻泥砂時，除粗顆粒外，局部沖刷深度是不受泥砂顆粒大小的影響。根據試驗室資料顯示，當 $D/d_{50} < 50$ 時局部沖刷深度會受到泥砂顆粒大小的影響，如圖 1 所示。

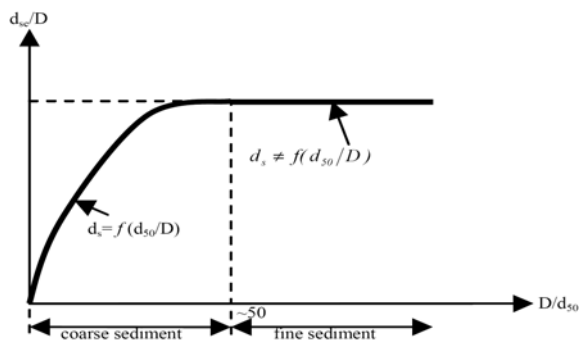


圖 1 泥砂粒徑與沖刷深度關係圖

Figure 1. Relationship between sediment grain and scour depth

4. 遺傳演算

遺傳演算法最早乃由美國密西根大學的 John-Holland(1975)所提出，係基於達爾文之「物競天擇」及「遺傳法則」建構而成的尋優理論。所謂「物競天擇」是指遺傳演算法會在尋優過程中去蕪存菁，剔除較差之基因 (gene)，保留較優良的基因；而其操作方式乃透過模仿遺傳學之複製 (selection)、交配 (crossover) 及突變 (mutation) 等三大法則，故稱之遺傳演算法。由於遺傳演算法之簡單而有效地搜尋能力，故近來已逐漸地應用於各研究領域。遺傳演算法不依賴於梯度訊息，而是通過模擬自然進化的過程來搜索最優解 (optimal solution)，它利用某種編碼技術，作用於稱為染色體的數字串上，模擬這些字串所組成的族群其進化過程。遺傳演算法通過有組織且隨機的訊息交換來重新組合適應性好的字串，產生新字串的族群，GA 尋優流程如圖 2 所示。

遺傳演算法提供了一種求解複雜系統優化問題的通用框架，他不依賴問題本身具體的領域，對於問題的種類有很強的穩健性，所以近十幾年來已迅速的發展在各個領域中，如自動控制、交通工程、環境工程、機械工程及電機工程。而應用在水利工程的相關研究為(1)Robin Wardlaw and Mohd Sharif (1999)利用 GA 推估最理想的蓄水系統操作；(2)劉錦蕙(2000)利用遺傳演算法搜尋 TAR 模式之門檻值，將資料分為乾、濕二季，採用片段線性之方式對於旬流量資料進行模擬與預測；(3)廖旭崇(2002) 針對烏溪流域乾峰橋測站進行日流量預測，嘗試利用時間序列來模擬與掌握日流量序列系統變異特性，利用遺傳演算法推定模式階數與優選參

數；(4) Robin and Kampanad (2004) 透過遺傳演算及線性規劃評估比較中國與印度之運河，並運用 GA 在橫向渠道的調度上；(5)

Raziyeh Farmani1 (2007)利用 GA 求解有關加壓支流灌溉的最佳設計與管理等。

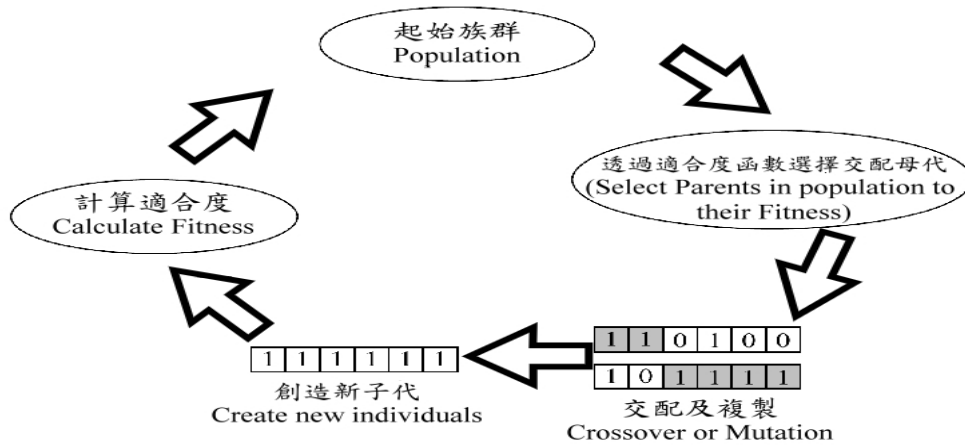


圖 2 GA 演算示意圖

Figure 2. Schematic diagram of GA

模式建立及應用

1. 模式建立

遺傳演算法為一全局搜索及優化的方法，對於某些特定問題該方法可以得到全局最優解，並協助確定具有多個局部最小函數的最優解。本研究蒐集過去學者專家所做橋墩沖刷之水工模型試驗數據，整合各試驗組據以建構有效資料庫，進而利用遺傳演算法獲致橋墩沖刷深之推估。

(1) 橋墩參數因子之選定

影響橋墩沖刷深度之主要因素為底床質中值粒徑(d_{50})、上游平均水深(y)、上游平均接近流速度(V)、底床質臨界啟動流速(V_c)、均勻橋墩迎水面寬度或墩徑(D_u)、橋基頂部距底床高程(覆土高度 Y)及渠槽寬度(B)。

由於在均勻橋墩下覆土高度 Y 的影響較

小，故排除覆土高度因子對沖刷深度的影響。均勻橋墩與沖刷深度的關係依水深、墩徑、流速及斷面束縮比，可為下列無因次化型式：

$$\frac{d_s}{d_{50}} = f\left(\frac{y}{d_{50}}, \frac{D_u}{d_{50}}, \frac{v^2 - u_c^{*2}}{\Delta\gamma_s \rho_f d_{50}}, \frac{B - D_u}{B}\right) \quad (5)$$

式中 $\Delta\gamma_s$ 為流體與河床質單位體積重之差、 ρ_f 為流體密度。

(2) 資料庫的選定

由於遺傳演算法為全局搜尋優選方法，故資料庫的建立以及資料量多寡是相當重要的。本研究參考 Kothyari(1989)用複迴歸方法推導公式時所運用的各項試驗資料，建立 GA 在進行演算前的有效資料庫，除了可以建立一定數量之資料庫外，由於使用的資料來源

相同，更可進一步比較傳統演算方法與人工智慧方法運用在推估均勻橋墩沖刷深度的差異。此外，本研究選擇 Robert Ettema(2006)、Sheppard(2004)、Mia 和 Nago(2003)等學者文獻資料，即來自 Iowa, Florida, Japan, French, New Zealand 等地區所得到之試驗數據來進行驗證，並比較新增的資料點上 GA 模式所得結果之優劣。

(3)顯著性檢定

將 Kothyari 與本研究利用 GA 演算所得之沖刷深度推估公式，對所有資料(包括 Kothyari 與其他學者，共計 130 筆樣本數)計算出的結果與試驗值進行絕對誤差分析，並將此兩群成對樣本透過統計方法來證明本研究與 Kothyari 計算公式之準確性與獨立性。

2. 橋墩沖刷之應用

(1)適應函數選定

Kothyari(1989)根據 Melville 理論進一步分析探討，且考慮參數涵蓋度且符合影響沖刷深之重要參數，故本研究採用其理論基礎，利用 Kothyari(1989)研究之各項試驗數據進行 GA 演算，將其數據隨機抽取 74 筆資料進行模式建構，另外 21 筆資料進行模式驗證，依(5)式將影響沖刷深之因子修正如下：

$$\frac{d_s}{d_{50}} = \left(\frac{y}{d_{50}}\right)^{x1} \times \left(\frac{D_u}{d_{50}}\right)^{x2} \times \left(\frac{V^2 - u_c^{*2}}{\frac{\Delta\gamma_s}{\rho_f} d_{50}}\right)^{x3} \times \left(\frac{B - D_u}{B}\right)^{x4} \quad (6)$$

式中 x1、x2、x3、x4 分別為各沖刷因子之冪次。

(2)全局搜尋範圍及驗證資料

本研究隨機抽取 Kothyari(1989)、

Ettema(1980)、Verstappen(1978)、Walker(1978)、Chabert(1956)等學者試驗數據 74 筆資料進行 GA 模式建構，有關橋墩沖刷深度因子全局搜尋各參數之搜尋範圍，如見表 1。

表 1 橋墩沖刷因子之搜尋範圍

Table 1. Searching range of pier scour factors

$\frac{D_u}{d_{50}}$	$\frac{y}{d_{50}}$	$\frac{v^2 - u_c^{*2}}{\frac{\Delta\gamma_s}{\rho_f} d_{50}}$	$\frac{B - D_u}{B}$
5.327	9.346	3.937	0.813
~	~	~	~
414.634	1578.947	22.446	0.981

(3)模式評鑑標準

絕對值誤差 (Mean Absolute Error, MAE)

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^m |M - E|}{m} \quad (7)$$

式中 m 為推估值個數、M 為試驗值、E 為推估值。

平均絕對誤差百分比 (Mean Absolute Percentage Error, MAPE)

$$MAPE = \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{M - E}{M} \right|\right) \times 100\% \quad (8)$$

皮爾森積矩相關係數 (Pearson product moment correlation coefficient, R)

$$R = \frac{\sum (M - \bar{M})(E - \bar{E})}{\sqrt{\sum (M - \bar{M})^2 \sum (E - \bar{E})^2}} \quad (9)$$

式中 \bar{M} 、 \bar{E} 分別為試驗值及推估值之平均值。應用上述三個評鑑方式於本研究，以利

評定研究模式之推估值與實際值(試驗值)間的離散程度，並可瞭解整體模擬值和實際值的精度高低。本研究透過圖 3 之流程進行操作演算，以獲致最佳解。

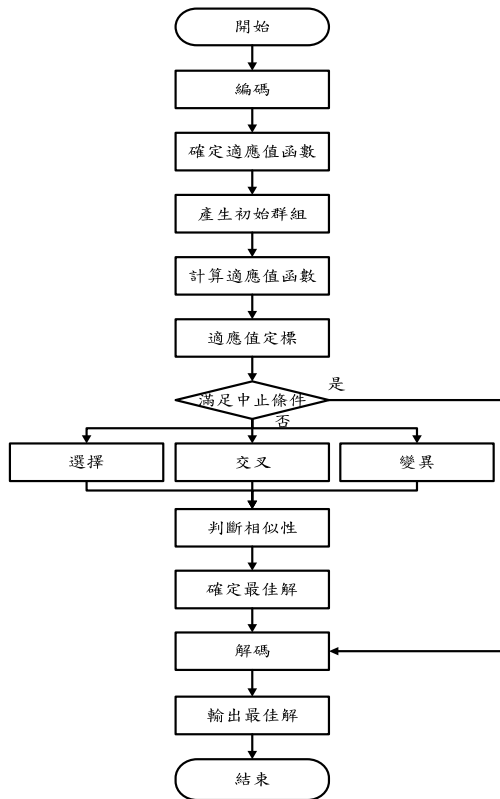


圖 3 研究流程
Figure 3. Flow chart of the study

結果與討論

1. 評鑑標準 MAE

(1) GA 方法之全局搜索與驗證

透過絕對值誤差(MAE)的評鑑標準將(6)式修正為 MAE1、MAE2、MAE3、MAE4 等四個均勻橋墩冲刷深度推估公式，如表 2 所示。在全局搜尋及驗證上以 MAE1 的表現精度最佳，其絕對誤差值皆為最小。圖 4 及圖 5 之橫座標為試驗觀測值，縱座標為公式推估

值，若推估值落在最上方及最下方的兩條黑色虛斜線內，表示該推估值的誤差範圍為與實測值誤差之 25% 內，圖 4 中顯示 MAE1 在 GA 全局搜尋的判定係數 R^2 值為 0.9；由圖 5 可知驗證結果 R^2 值為 0.88，為四項結果中 R^2 值最高且優於 Kothiyari 所得之結果，故在 MAE 的評鑑標準下，以 MAE1 的優化效果最好，其所優化之公式表示為：

$$\frac{d_s}{d_{50}} = \left(\frac{y}{d_{50}}\right)^{0.66} \times \left(\frac{D_u}{d_{50}}\right)^{0.2} \times \left(\frac{v^2 - u_c^2}{\Delta\gamma_s d_{50}}\right)^{0.3} \times \left(\frac{B - D_u}{B}\right)^{-0.3} \quad (10)$$

表 2 GA 模式評鑑指標 MAE 比較表

Table 2. Comparison of GA model with MAE

GA 模式	全局搜尋	驗證
MAE1	24%	28%
MAE2	33%	37%
MAE3	42%	38%
MAE4	38%	37%

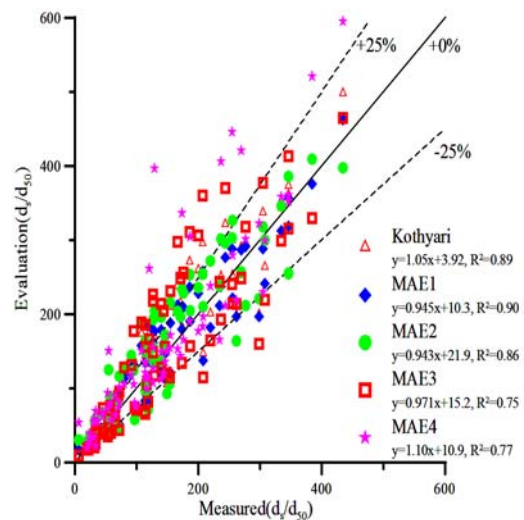


圖 4 模式全局優化評鑑指標 MAE 比較
Figure 4. Comparison of measured and evaluated scour depth with random data using MAE

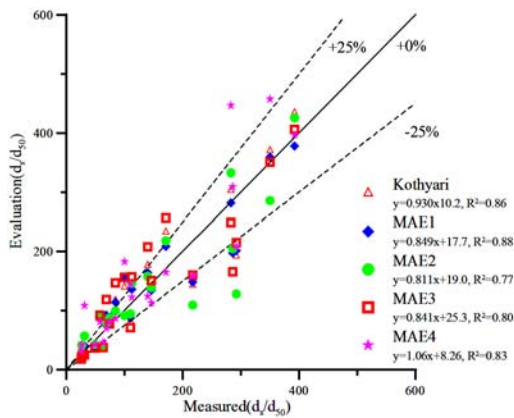


圖 5 模式驗證評鑑指標 MAE

Figure 5. Verification of model with MAE

(2)新資料點之驗證

本研究採取六位學者不同文獻之試驗資料針對本文 GA 演算所得之橋墩沖刷深度推估公式與 Kothyari 學者利用複迴歸方法所得之計算的公式進行比較分析

圖 6 為全部驗證資料，包含 Kothyari 之部分 21 筆資料，及其他文獻的 35 筆資料計

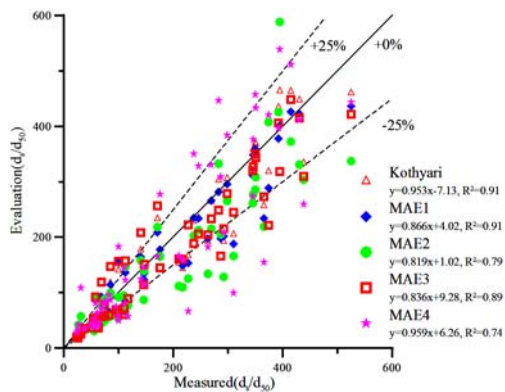


圖 6 MAE 全部驗證資料比較

Figure 6. Comparison of measured and evaluated scour depth with all data using MAE 56 筆合併進行計算分析，發現本研究方法之判定係數值(R²=0.911)與 Kothyari 利用複迴歸

方法計算之值(R²=0.907)相當，可見本文提出之橋墩沖刷深度之推估方法為具體可行。

2. 評鑑標準 MAPE

(1) GA 方法之全局搜索與驗證

利用平均絕對值誤差百分比(MAPE)之評鑑標準將(6)式修正為 MAPE1、MAPE2、MAPE3、MAPE4、MAPE5 等五個均勻橋墩沖刷深度推估公式，如表 3 所示。在全局搜尋及驗證上，由於各項公式精度相當且皆在 25% 以內，故將搜尋及驗證之各項結果分別顯示於圖 7 及圖 8。由圖 7 得知在 GA 全局搜尋中 MAPE3 及 MAPE4 其推估值與實際值(y=1.01x ; y=0.998x)均有較佳之線性關係。惟於圖 8 之驗證資料中以 MAPE3 之線性關係又優於 MAPE4，故本研究於 MAPE 評鑑標準中選取 MAPE3 為優化解。

在全局搜尋中 MAPE3 之線性關係為 y=1.01x，判定係數 R² 值為 0.89，而 Kothyari 其整體誤差百分比為 24.4% 較本研究不理想；而由圖 8 之驗證結果可知本研究之線性關係較 Kothyari 之結果為佳，且判定係數 R² 值亦高於 Kothyari，綜觀 MRPE 結果優於 Kothyari 所得之結果，故在 MAPE 的評鑑標準下，以 MAPE3 的優化效果最佳，其所優化之公式可示為：

$$\frac{d_s}{d_{50}} = \left(\frac{y}{d_{50}}\right)^{0.6} \times \left(\frac{D_u}{d_{50}}\right)^{0.3} \times \left(\frac{v^2 - u^2}{\Delta \gamma_s d_{50}}\right)^{0.2} \times \left(\frac{B - D_u}{B}\right)^{-0.4} \quad (11)$$

(3)新資料點之驗證

圖 9 為所有驗證資料包含 Kothyari 之部分 21 筆資料，及其他文獻的 35 筆資料計 56 筆合併進行計算分析後，發現本研究方法中之 MAPE3 之線性關係較 Kothyari 利用複迴歸

方法所計算的值更接近 1，而判定係數(R^2)則約略相當，故本文研究方法較傳統複迴歸方法為佳。

表 3 GA 模式評鑑指標 MAPE 比較表

Table 3. Comparison of GA model with MAPE

GA 模式	全局搜尋	驗證
MAPE1	18.53%	21.17%
MAPE2	18.52%	21.42%
MAPE3	21.40%	24.10%
MAPE4	21.61%	23.72%
MAPE5	21.62%	23.72%

3. 評鑑標準 R

(1) GA 方法之全局搜索與驗證

利用皮爾森積矩相關係數之評鑑標準將(6)式修正均勻橋墩沖刷深度推估公式，並與 Kothyari 比較。將模式全局優化及驗證結果分別示如圖 10 及圖 11。由圖 10 得知本研究在 GA 全局搜尋中 R 推估值與實際值之線性關係與判定係數($y=0.9x$; $R^2=0.87$)與 Kothyari 約略相當，唯二者在沖刷深 $d_s/d_{50}=200$ 上下處少數推估值有部分高估之現象。圖 11 顯示

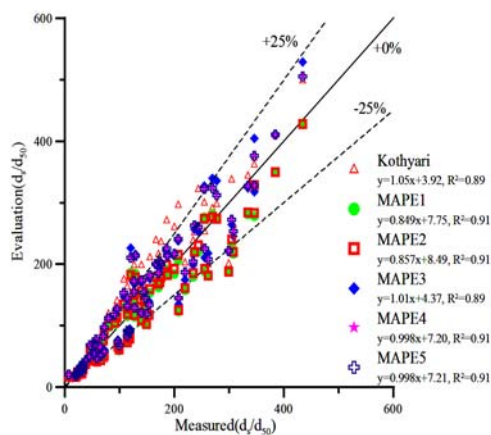


圖 7 模式全局優化評鑑指標 MAPE 比較
Figure 7. Comparison of measured and evaluated scour depth with random data using MAPE

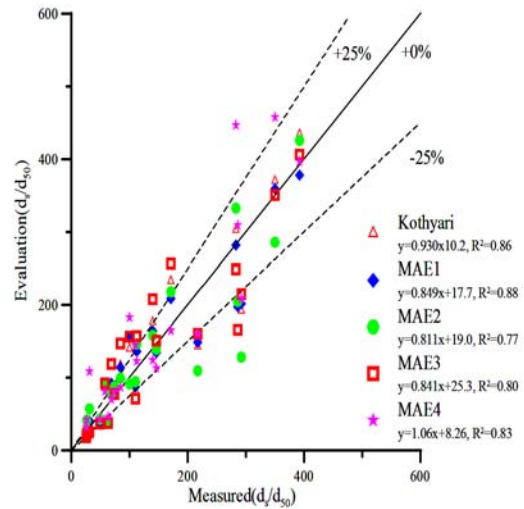


圖 8 模式驗證評鑑指標 MAPE

Figure 8. Verification of model with MAPE

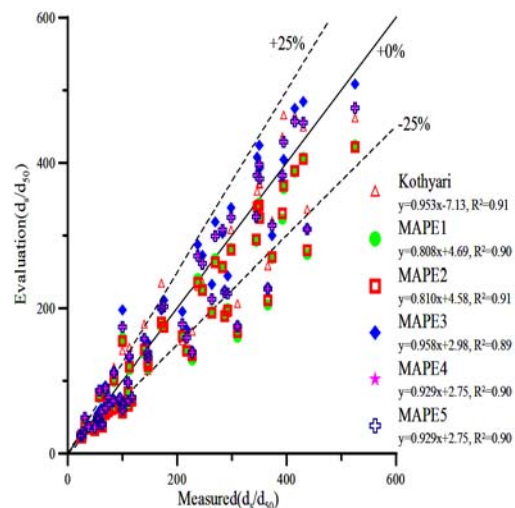


圖 9 MAPE 全部驗證資料之比較

Figure 9. Comparison of measured and evaluated scour depth with all data using MAPE

驗證範圍處本研究 GA 透過評鑑標準 R 與 Kothyari 之推估結果相較之下本研究之線性關係佳($x=y$)，惟其判定係數較低，且有部分推估值有高估之情形。本研究將評鑑標準 R 其所優化之公式表示為：

$$\frac{d_s}{d_{50}} = \left(\frac{y}{d_{50}}\right)^{0.6} \times \left(\frac{D_u}{d_{50}}\right)^{0.06} \times \left(\frac{v^2 - u_c^{*2}}{\Delta\gamma_s d_{50}}\right)^{0.8} \times \left(\frac{B - D_u}{B}\right)^{-0.3} \quad (12)$$

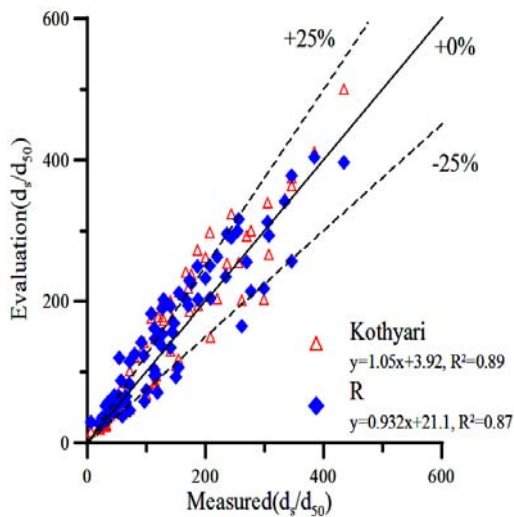


圖 10 模式全局優化評鑑指標 R 比較

Figure 10. Comparison of measured and evaluated scour depth with random data using R

(2)新資料點之驗證

圖 12 為所有驗證資料共計 56 筆，其驗證結果有部分高估之資料為採用 Kothyari 之 21 筆驗證資料所導致。研判其因可能係本研究採用 Kothyari 所推估之公式(12)計算流速項中 u_c^* 時所產生之誤差，以致產生高估之情形。

4. 評鑑標準選定

鑑標準為 MAPE3 時 GA 所搜尋到的優化解，無論在全局搜尋得到之結果或是在驗證數據上亦或於新資料點的驗證上皆較其他評鑑標準佳且更優於傳統迴歸所得結果。因此本文選定該項評鑑標準之解為本研究之最優化

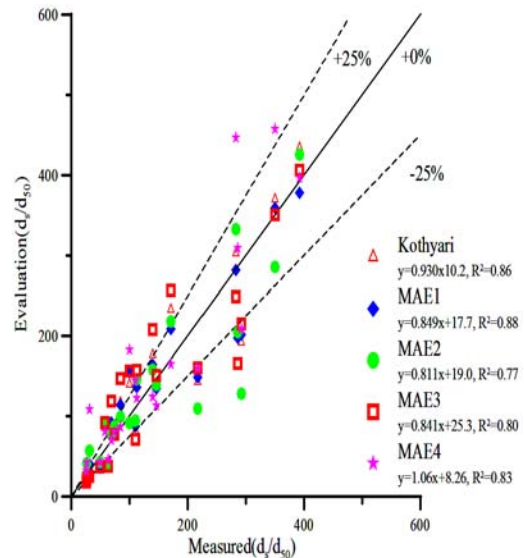


圖 11 模式驗證評鑑指標 R 比較

Figure 11. Verification of model with R

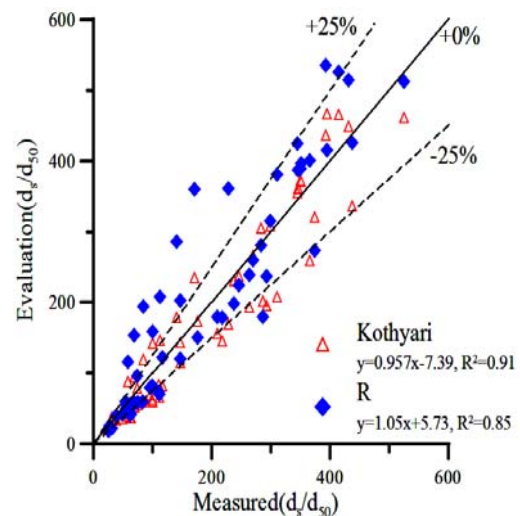


圖 12 R 全部驗證資料之比較

Figure 12. Comparison of measured and evaluated scour depth with all data using R

解，即(11)式，式中顯示在四個影響冲刷深的因子當中相對水深的影響因子較大(冪次為 0.6)。又經分析比較，本研究方法較前人推估

公式準確之原因主要在於 u_c^* 的評估上。

5. 顯著性差異

計算之成對樣本(本研究與 Kothyari 推估之公式所計算出之推估值與試驗值之絕對誤差)，做成對樣本之平均數差異、比例差異及變異數比等三種估計與檢定，詳如表 4 及表 5。由表 4 可知，本研究 GA 方法之平均絕對誤差百分比小於 Kothyari 傳統複迴歸方法。

表 4 GA 與 Kothyari 推估值成對樣本統計分析

Table4. Statistical analysis of estimated coupling samples by GA model and Kothyari

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Kothyari	130	0.236	0.171	0.0150
Present	130	0.205	0.222	0.0194

由圖 13 可知兩個方法在 5% 的信賴區間時，其絕對誤差並無明顯差異，但在整體絕對誤差分佈範圍上 Kothyari 方法相對於 GA

方法來的廣，且在 95% 信賴區間時，Kothyari 大的絕對誤差值亦較 GA 之誤差為大。此外，GA 的多數誤差值約 0.2 小於 Kothyari，亦證明本研究方法之推估公式相對於 Kothyari 公式有效且其使誤差值較低，雖然 GA 方法有 5 筆極值，但在 130 筆數據當中可視為少數，故整體而言本研究所推估出來的沖刷深公式較 Kothyari 推估公式之準確性為高。

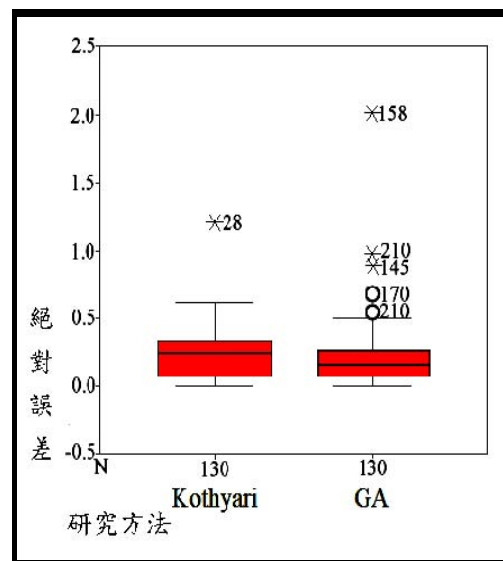


圖 13 本研究 GA 與 Kothyari 複迴歸盒型圖
Figure 13. Box plot of GA model and Kothyari multiple regression analysis

表 5 GA 與 Kothyari 推估值成對樣本之估計與檢定

Table5. Evaluation and calibration of estimated coupling samples by GA model and Kothyari

Paired Differences				t	df	Sig. (2-tailed)
Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference			
0.031	0.167	0.015	Lower	2.128	129	0.035
			Upper			
			0.002			
			0.060			

結論與建議

(一)結論

1. 研究結果顯示，使用遺傳演算法可以有效推估橋墩的平衡冲刷深，與傳統演算法相比較，GA 可在一種相對較簡單且穩定的模式中建立。發展 GA 只需克服小困難即可解決許多複雜的問題，且 GA 之執行時間較傳統複迴歸分析方法更為省時。
2. 本研究將各項評鑑標準所得之最佳公式與傳統迴歸方式比較其線性關係及判定係數，結果顯示以評鑑標準為 MAPE 時，GA 所搜尋之優化解在全局搜尋及驗證與於新資料點驗證上，皆較其他評鑑標準準確且明顯優於傳統迴歸方法所得之推估公式。故選定(11)式為本研究之最優公式，未來可利用該式推估均勻橋墩冲刷深度。
3. 由 MAPE3 最優化公式可知四個影響冲刷深的因子(相對水深、墩徑、流速及束縮比)當中，以相對水深的影響因子較大。本研究利用三種評鑑標準(MAE1、MAPE3 及 R)所得公式，較前人推估公式準確之原因主要在於 GA 公式可有效修正在部分特殊條件下 u_c^* 計算冲刷深度公式所造成之誤差。
4. 在平均絕對誤差百分比的評鑑標準下，利用 GA 推導出之推估公式較傳統複迴歸方法來的準確。且以統計方法進行 T 檢定(成對樣本 T 檢定， $P < 0.05$)，其顯著值為 0.035，表示本研究與 Kothyari 所推求之公式有顯著的差異

性，而非極值所致。

5. 整體而言於各評鑑標準下，GA 產生的結果與傳統方法非常相似，且大部分以 GA 較佳，證明本研究方法為可行且有效。而在操作上 GA 使用約為傳統方法 75%的數據，其獲得結果卻較佳。此外，本研究新增各種不同文獻資料做驗證，結果證明 GA 演算結果具適應性及可靠性。

(二)建議

1. 在等效橋墩推估的公式上找出流速項與其他因子的關係後，再利用人工智慧方法推估其公式，進而獲致非均勻橋墩冲刷深度的推估公式。
2. 未來可考慮使用遺傳規劃的方法加入流速項進行研究。
3. 未來可結合流量、雨量之預測找出最佳橋墩配置方法，使其滿足最大利益。

參考文獻

1. 雷英杰、張善文、李續武、周創明，(2005)，「MATLAB 遺傳算法工具箱及應用」，西安電子科技大學出版社。
2. 廖旭崇，2002，「烏溪乾峰橋站日流量預測模式」，逢甲大學水利工程研究所碩士論文。
3. 劉錦蕙，2000，「乾濕季時間序列分析」，逢甲大學水利工程研究所碩士論文。
4. Breusers, H. N. C. and A. J. Raudkivi(1991), "Scouring", IAHR, Hydraulic Structure Design Manual, 2:84-87.

5. Dargahi B. (1990), "Controlling Mechanism of Local Scouring", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 116(10):1197-1214.
6. Dey S. (1999), "Time-variation of Scour in the Vicinity of Circular Piers", *Proc Instn Civ. Engrs Wat., Marit. And Energy*, 136: 67-75.
7. Ettema, R., Kirkil, G., Muste, M. (2006,) "Similitude of Large-Scale Turbulence in Experiments on Local Scour at Cylinders", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 132(1) 33-40.
8. Ettema, R. (1980), "Scour at Bridge Piers", *School of Engineering Report No.216*, Department of Civil Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand, 527.
9. Laursen, E. M., (1962) "Scour at Bridge Crossings", *Journal of the Hydraulic Division*, ASCE, 86 (2).39-54.
10. Kothyari, U. C. (1989), "Scour Around Bridge Piers", *Department of Civil Engineering*, University of Roorkee. India
11. Melville, B. W., and Coleman, S. E., (2000), "Bridge Scour", *Water Resources Publications*, LLC. Highlands Ranch, Colorado, USA.
12. Melville, B. W. and A. J. Raudkivi (1977), "Flow Characteristics in Local Scour at Bridge Piers," *Journal of Hydraulic Research*, 15(4)73-380.
13. Melville, B. W. (1997), "Pier and Abutment Scour: Intergrated Approach", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.123 (2):125-136.
14. Melville, B. W., and Chiew, Y. M. (1999), "Time scale for Local Scour at Bridge Piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 125(1) 59-65.
15. Melville, B. W. and A. J. Sutherland (1988), "Design Method for Local Scour at Bridge Piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 114(10) 1210-1226.
16. Mia, M. F., and Nago, H. (2003), "Design Method of Time-Dependent Local Scour at Circular Bridge Pier", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 129(6) 420-427.
17. Raudkivi, A. J. and R. Ettema(1983), "Clear-Water Scour at Cylindrical Piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 111(4) 713-731.
18. Raudkivi, A. J. and R. Ettema (1977), "Effect of Sediment Gradation on Clear Water Scour", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 109(3) 338-349.
19. Sheppard D. Max, Mufeed Odeh, Tom Glasser(2004), "Large Scale Clear-Water Local Pier Scour Experiments", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 130(10) 957-963.

99 年 07 月 13 日收稿

99 年 07 月 28 日修改

99 年 10 月 01 日接受

水土保持學報 42(4) : 377-391 (2010)

Journal of Soil and Water Conservation , 42 (4) : 377-391 (2010)