

環圈式固床工應用於橋墩保護工之研究

王傳益⁽¹⁾張嘉玲⁽²⁾楊敏宏⁽³⁾何璟浩⁽⁴⁾呂紹吉⁽⁵⁾

摘 要

台灣近年來因氣候急速變遷，加上降雨集中於夏季，造成豐枯期流量懸殊，其中西部河川多屬下降型河川，泥砂推移力強，河床劇烈變動，在輸砂極為不平衡情況下，橋墩沖刷加劇，經常造成橋墩因沖刷下切裸露而崩壞。因此，本研究基於橋墩安全，研發新型固床工-透水性環圈式固床工，透過改變固床工種類、設置高度、設置距離等不同配置模式進行比較分析，期能獲致較理想之固床工型式，以供相關單位工程設計之參考。

研究結果顯示，當設置固床工於橋墩下游處時，因固床工橫截水流抬升水位，降低流速使水流沖擊橋墩能量減弱，且能抑制橋墩周圍沖刷坑發展，進而減低向下射流造成橋墩墩前沖刷深度。綜合考量橋墩與固床工之安全性，本研究較佳配置型式為鋸齒式環圈固床工($L/b=1$, $h/b=0.5$, $W/b=0.8$)，能有效抑制橋墩周圍沖刷坑發展，其橋墩沖刷減緩率約 57.3%，固床工下游沖刷坑體積減緩率約 49.4%。此外，依試驗數據，利用複迴歸方法獲致經驗公式，並經驗證得判定係數 $R^2=0.877$ ，透過該公式可預測出橋墩墩前最大沖刷深度。

(關鍵字：鋸齒式環圈固床工、沖刷減緩率、複迴歸)

Application of Ring Consolidation Works to Bridge Pier Protection

C.Y. Wang⁽¹⁾ C.L. Chang⁽²⁾ M.H. Yang⁽³⁾ J.H. He⁽⁴⁾ S.J. Lu⁽⁵⁾

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

ABSTRACT

Recently, the extreme climate types occur frequently under the effect of

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

(2) 逢甲大學水利工程與資源保育學系副教授

(3) 逢甲大學水利工程與資源保育研究所碩士

(4) 逢甲大學水利工程與資源保育研究所碩士生

climate change. In addition, the annual rainfall concentrates in the summer in Taiwan. Bed elevations of many rivers in western Taiwan lower down seriously, due to unbalanced sediment transport. It causes the scouring of the river bed around the pier, and results in the exposure of the pier foundation and impacts the safety of bridge./

The result shows that the consolidation works sets in downstream of the pier can uplift the water depth and decrease the energy of flow impacting bridge. The different configurations of consolidation works can reduce the maximum scour depth in front of the pier. When the sawtooth-type ring consolidation work sets at a distance of 1 time to the pier diameter, a height of half time to the pier diameter, a width of saw tooth of 0.8 time to the pier diameter, it is the optimal type among the experimental conditions conducted in this study. The optimal allocation ($L/b=1$, $h/b=0.5$, $W/b=0.8$) can reduce 57.3% of the pier scour depth reduction rate and 49.4% of scour hole volume reduction rate in downstream of consolidation works. According to experimental data, we can obtain an empirical formula by using multiple regression. The R-squared value of function is 0.877. The maximum scour depth in front of pier can be predicted by this formula.

(Keywords: Sawtooth-type ring consolidation works, Pier scour depth reduction rate, Multiple regression.)

前言

橋梁乃為橫跨河道的水工構造物，會導致水流通水斷面積縮減並有加快流速的現象，造成橋墩周圍河床沖刷加劇的作用。而在洪水期間，湍急洪水挾帶大量泥砂會直接衝擊橋基或橋墩，而造成橋墩周圍的河床被強烈沖刷，導致橋墩損壞，造成落橋事件。如近年因卡玫基颱風造成的大甲溪后豐大橋落橋、莫拉克颱風導致高屏溪雙園大橋落橋等事件層出不窮，使人民生命安全遭受威脅，因此保護橋墩避免落橋事件發生遂成為當前之重要課題。

本研究採用新型橋墩保護工法-透水性環圈式固床工，利用其廢輪胎不易變形且具有彈性的材質，能削弱砂石撞擊力，將其設置於橋墩下游，利用該橫向構造物來抬升水位，使泥砂沉降，進而增高河床，並可減輕水流對橋墩的沖擊能量，以降低橋墩周圍之局部沖刷深度，確保其橋墩穩定性。探討各種配置條件下於橋墩保護效果的差異，並利用橋墩沖刷減緩率與固床工上下游沖刷坑體積減緩率等指標來研判固床工最佳配置，以供相關工程單位之設計參考。

文獻回顧

2.1 沖刷之分類

Melville and Coleman(2000)提出河道的沖刷型態，總沖刷深度為一般沖刷與局部沖刷之加總，茲將橋墩沖刷現象之意涵，說明如下：

一般沖刷(*general scour*)：為上下游河道輸砂量不平衡所致，非河道中構造物之影響，並依水流影響時間，分為一般長期沖刷與一般短期沖刷。

局部沖刷(*local scour*)：設置水工構造物，會使水流受阻礙，對河道流場改變及底床剪應力增大，進而對河床沖刷型態造成極大影響，可分為束縮沖刷(*contraction scour*)與局部沖刷。

2.2 固床工(*consolidation work*)

固床工為一橫向構造物，具有整流、穩定河床及減緩縱橫向沖刷等功能，施設時應避免阻斷溪流，高度不可過高或造成過強之水流，而造成生物無法順利於其上、下游間移動或破壞棲地環境，亦可利用多孔隙材料或設置開口(鋸齒式)，以利生物洄游。

張則安(1994)

該研究證實了河床面構築固床工可有效增加河床糙度、減緩平均流速，進而降低水流總剪力，以減少泥砂啟動之機率。

林瑞仁(2003)

利用開口式固床工於不同溪床坡降、河床質粒徑、開口位置及流量條件下，評估其對溪流蜿蜒營造可行性。提出當固床工設置

開口後，選擇性泥砂輸送機制於深槽線的兩岸開始形成，同時，開口處則為高流速、高泥砂輸送之缺口，但未開口處流速減緩且溪床間產生淤積，因而營造出多樣性之床型，最後發展為蜿蜒、邊灘與槽線，並依其試驗結果得到溪床彎曲度指數(*Sinuosity Index*)與試驗條件之關係為：

$$S_n = 1.309 \frac{d_{50}^{0.0085} Q^{0.0077}}{B^{0.0077} S^{0.02185} y_n^{0.0192}} \left(\frac{\Delta e}{Li} \right)^{0.0894} \quad (2-1)$$

其中 S_n = 彎曲度指數、 Q = 設計流量 (cms)、 d_{50} = 河床質中值粒徑(m)、 B = 河幅寬度(m)、 S = 設計溪床坡降、 y_n = 設計正交水深(m)、 $\Delta e / Li$ = 固床工開口偏離中心線位置與固床工間距之比值。

Chiew 和 Lim(2003)

建議在橋墩上游設置可替換的底檻，作為保護橋墩的對策，並於橋墩尾跡渦流產生的地方，在設置底檻，設置後可觀察到此區域的流速變緩，沖刷深度相對減少。

Grimaldi(2005)

在橋墩下游近處設置底檻，可以降低橋墩之局部沖刷，而橋墩與底檻之間的距離愈小，會有較佳之保護效果，能有效減少墩前沖刷深度達到約 26%，最佳配置能減少的沖刷面積和體積之和達到 80%。

Carmelo Grimaldi et al. (2009)

當橋墩下游設置固床工，都可有效降低局部沖刷。當橋墩與固床工距離越小，其橋墩前最大沖刷深度減緩率可達 26%，而面積

和體積冲刷減緩率可高達 80%以上。若橋墩與固床工間距 $L=0$ 時，其最大冲刷深度是在固床工與橋墩交界處。

呂其倫(2011)

運用單環圈柱組合成環圈柱群，藉由改變環圈柱群與橋墩間之距離、環圈柱群彼此間的相對距離、群樁間之夾角及水流攻角等重要幾何與水力參數，探討該等參數於消減水流動能，降低橋墩冲刷深度之影響。由試驗結果得知，當環圈柱群設置於距離橋墩為 6 倍橋墩直徑處、環圈柱群間之夾角為 50 度、環圈柱群間距為 2 倍橋墩直徑及環圈柱群的水流攻角為 0 度時，對於橋墩之冲刷減緩率可達 55.8%。

張詠善(2012)

運用新型保護工-透水性環圈柱，透過改變環圈柱設置直徑、環圈堆設置高度、環圈規格及環圈柱設置距離進行相關防治冲刷試驗，由試驗結果得知，當相對水流強度 V/V_c =0.9 及 $V/V_c=0.99$ 時，於環圈規格為 III 型 ($DR/b=0.28$)組成之直徑 $D/b=0.8$ ，環圈堆設置高度(H)為 3 倍橋墩直徑(b)時，環圈柱保護工設置距離以 $L/b=4$ 之保護效果為最佳，冲刷減緩率分別為 30.3%及 25%。

2.3 橋墩冲刷因子

影響橋墩冲刷之因子可分為，橋墩性質、水流性質、底床質特性、冲刷時間等，而這些因子又與下列條件有關：

橋墩性質：橋墩直徑(b)、橋墩形狀因子修正係數(K_{sh})、橋墩迎水面面積(a)、水流攻角(β)。(L)為橋墩下游至固床工上游之距離，

(h)為固床工高出河床面之高度、(W)為固床工之鋸齒間寬度。

水流性質：流體密度(ρ)、動力黏滯係數(μ)、平均流速(V)、水流深度(y)、重力加速度(g)。

底床質特性：中值粒徑(d_{50})、底床質幾何標準偏差(σ_g)、底床質密度(ρ_s)、泥砂臨界啟動流速(V_c)。

時間：冲刷時間(t_i)、冲刷達平衡所需時間(t)。

2.4 因次分析

藉由上述之假設，可將局部冲刷之最大冲刷深度(d_s)表為下式：

$$d_s = f_1(\rho, \rho_s, g, \sigma_g, \mu, d_{50}, y, V, V_c, L, h, W) \quad (2-2)$$

選擇 ρ 、 V 、 b 為重複變數，並依據白金漢 π 定理(Buckingham π theorem)，將上式表示如下：

$$\frac{d_s}{b} = \alpha \times f_2\left(\frac{\rho_s b}{\rho}, \frac{\sigma_g}{\rho}, \frac{b}{d_{50}}, \frac{y}{b}, \frac{V}{\sqrt{gy}}, \frac{V}{V_c}, \frac{L}{b}, \frac{h}{b}, \frac{W}{b}\right) \quad (2-3)$$

式中， d_s/b 為無因次橋墩冲刷深度， α 為待定常數。

明渠流中，雷諾數($\rho V b / \mu$)之影響性可忽略不計；試驗水流福祿數($V / \sqrt{gy} < 1$)與相對水流強度(V/V_c)均為影響冲刷深度之相同水力參數，惟前者影響較小予以忽略；底床值密度為一般定值 $\rho_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$ ，於常溫下進行試驗，溫度變化甚小，故不考慮水之密度 ρ_s / ρ 。本試驗於定量清水流況下，底床質中質粒徑 $d_{50} = 0.62 \text{ mm}$ ， $\sigma_g = 1.26$ 下進行試驗，故(2-3)式可改寫為：

$$\frac{d_s}{b} = \alpha \times f_3\left(\frac{L}{b}, \frac{h}{b}, \frac{W}{b}, \frac{y}{b}, \frac{V}{V_c}\right) \quad (2-4)$$

水工試驗

3.1 試驗渠槽

本研究所使用之渠槽位於逢甲大學水利工程與資源保育學系水工實驗室，試驗渠槽為中型玻璃循環渠槽，渠槽全長 13.6 m、寬 0.5 m、深 0.75 m，渠槽側壁之材質為強化透明玻璃，以利於實驗進行時之觀測。渠槽尾端有一尾水閘門(tailwater gate)，用以控制試驗水深，渠槽下方有一馬達可抬升前後渠槽之高程，進而控制坡度，如圖 1 所示。

3.2 試驗模型

3.2.1 環圈與橋墩

本研究主要目的為廢輪胎回收再利用，即將其作為橋墩保護工之材料—環圈。因此，市面上小客車輪胎泛用之直徑為 60 cm，環圈直徑為 1.8 cm 原型與模型之縮尺比利為 1：33.3，詳如圖 2 所示。本研究橋墩模型直徑 5 cm，依照上述縮尺放大，則應用於現場之實體橋墩(原型)直徑約為 1.5 m，此與台灣西部

主要河川之橋墩直徑約為 1.2 m~2.5 m 間吻合。

3.2.2 固床工

環圈式固床工(ring consolidation works)配置模板由木板製成，上面刻畫距離，連接橋墩以及固床工模型，詳如圖 3，圖中 b 為橋墩直徑， L 為橋墩下游至固床工上游之距離， y 為水深， h 為固床工高出河床面之高度。傳統式固床工(traditional consolidation works)材料為木板所製。本研究另一新設計鋸齒式環圈固床工(sawtooth-type ring consolidation works)，利用調整其鋸齒寬度(W)，來探討上游橋墩沖刷以及下游河床沖刷坑體積等影響。

3.3 試驗條件

本試驗於清水定量流況($0.5 < V/V_c < 1$)下，水平渠床坡度($S \cong 0\%$)、泥砂中值粒徑 $d_{50} = 0.62 \text{ mm}$ 之均勻底床質的條件下，分別改變不同的固床工種類(傳統式、環圈式及鋸齒式環圈，詳圖 4)、固床工設置高度(h)、橋墩與固床工設置距離(L)及鋸齒狀環圈式固床工之鋸齒間寬度(W)，進行圓型橋墩沖刷試驗，試驗條件詳如表 1 所示。

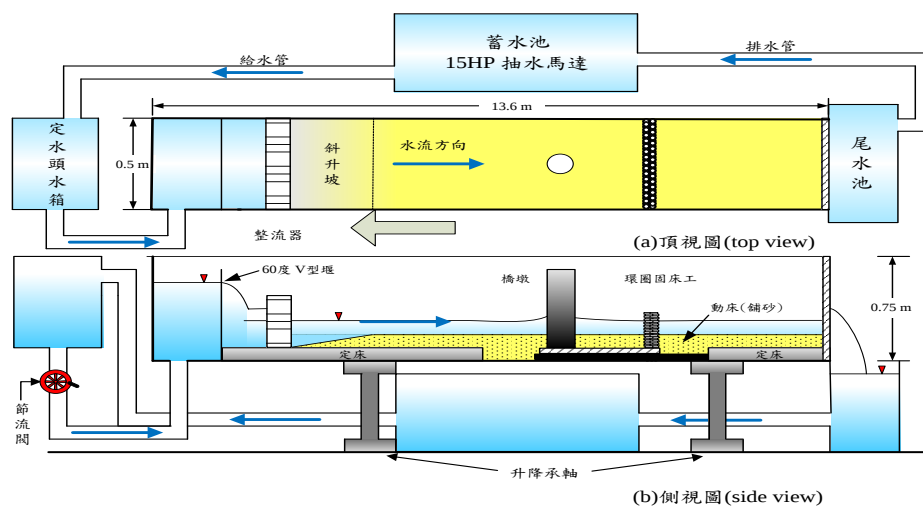


圖 1 試驗渠槽配置圖
Fig.1 Schematic diagram of the flume

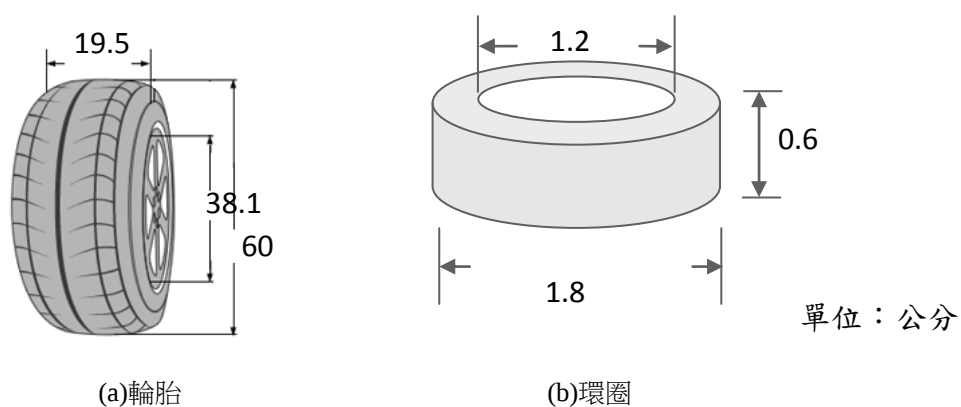


圖 2 輪胎及環圈尺寸對照圖
Fig.2 The contrast diagram between tire and ring column

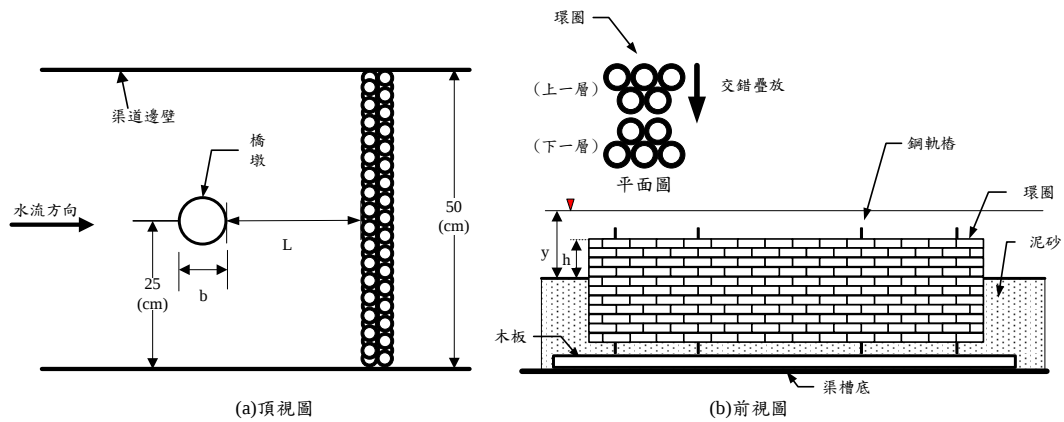


圖 3 環圈式固床工配置圖
Fig.3 Arrangement diagram of ring consolidation works

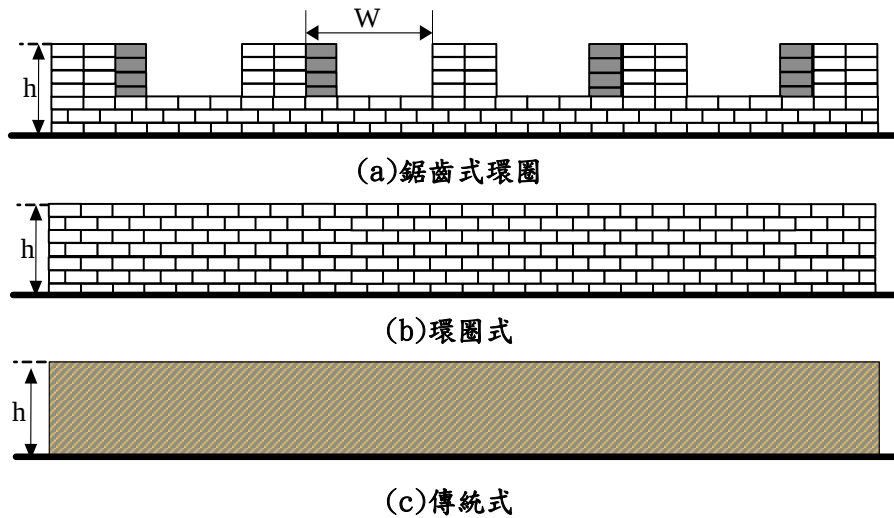


圖 4 不同型式固床工配置圖
Fig.4 Arrangement diagram of different type consolidation works

結果分析與討論

本研究於定量清水流況下，藉由改變固床工與橋墩設置距離(L/b)、固床工設置高度(h/b)、固床工鋸齒間距(W/b)，相對水流強度

($0.5 < V/V_c < 1$)等條件下分析橋墩最大冲刷深度、冲刷坑範圍及固床工下游冲刷之影響，評估固床工防治橋墩冲刷及減緩固床工下游冲刷體積之成效。其後利用試驗數據進行複迴歸獲致橋墩冲刷深度經驗公式，探討各參

數與橋墩冲刷深度之相關性。

4.1 固床工種類於橋墩冲刷歷程之影響

圖 5 為傳統式、環圈式與鋸齒式環圈固床工之最佳配置橋墩冲刷歷程圖。由圖中可知無論設置何種固床工，皆能減緩上游橋墩最大冲刷深度。於冲刷時間前 20%，各配置之最大冲刷深度皆已達總冲刷深度約 80%，且冲刷初期梯度較大，而後漸次達平衡冲刷深度。

由橋墩墩前最大冲刷深度來看，環圈式固床工 R7 冲刷深度較小，其次為傳統式及鋸齒式環圈固床工，其因環圈式與傳統式固床工之設置高度 $h/b=0.5$ 能削弱較大水流能量，由於鋸齒式環圈固床工之鋸齒頂部設置高度 $h/b=0.5$ ，底部為 $h/b=0.3$ ，可抬升水位並減低向下射流能量較傳統式與環圈式固床工小，故冲刷深度較其他二者大。整體而言，固床工高度發揮其抬升水位削減水流能量之特性，較未設固床工之橋墩保護效果為佳。

4.2 固床工種類於固床工上下游冲刷坑影響

圖 6 為最佳配置之傳統式、環圈式與鋸齒式環圈固床工之上下游冲刷坑等高線圖。整體來說，在橋墩下游設置固床工可減緩橋墩周圍冲刷坑擴大，並能有效抑制橋墩墩前冲刷深度發展，且主深槽發生於河道中央。惟固床工下游因固床工抬升水位，位能轉為動能形成跌水效應，使其冲刷量大於固床工上游橋墩周圍冲刷量。由圖中可看出，傳統式固床工下游冲刷坑發展較其他二種固床工廣而深，其最大冲刷坑深度相對較大。環圈

式固床工因環圈交錯疊放，對上游來流產生干擾，其下游冲刷坑變化較不明顯，最大冲刷深度較傳統式固床工為小，而最大冲刷深度與傳統式固床工相似，皆發生於固床工下游兩側。

設置鋸齒式環圈固床工時，從圖 6(c)可看出鋸齒開口處因水流通水斷面束縮使水流流速增大，故固床工下游冲刷坑變化明顯發生於鋸齒開口下游處。此外，由於鋸齒設計採平行四邊形[圖 6(c)紅色部分]，其目的將上游水流導流至河道主深槽處，防止水流因沖擊上游橋墩後分散兩側而造成側向沖蝕，於圖中可發現固床工下游冲刷坑發展偏至中央，並配合鋸齒型設計，使固床工下游形成沖淤變化較大之不規則河床面。

於傳統式、環圈式及鋸齒式環圈固床工下游最大冲刷深度橫斷面繪製成圖 7，橫坐標為渠寬自右岸至左岸距離(50 cm)，縱坐標為原始河床下刷深度(mm)，圖中可看出傳統式固床工於下游處冲刷量明顯大於環圈式及鋸齒式環圈固床工，底床高程相對較平緩，主深槽較不明顯，並於渠槽兩側有較大冲刷深度，其因上游橋墩分散水流而沖擊邊壁。比較環圈式與鋸齒式環圈固床工，兩者平均冲刷高程均較傳統式固床工為小，環圈式固床工底床沖淤變化較小，其主深槽也較不明顯；鋸齒式環圈固床工下游底床沖淤變化劇烈，可看出設置開口後水流因束縮效應而造成流速加快，造成下游多個冲刷坑槽。

表 1 試驗條件表

Table 1 Parameters of experiment

固床工型式	傳統式(T)、環圈式(R)	鋸齒式環圈(SR)
橋墩與固床工設置距離 (L/b)	1、2、3	
固床工設置高度 (h/b)	0、0.3、0.5	0.5
鋸齒間距 (W/b)	-	0.8、1.2、2.4
試驗相對水深 (y/b)	<1.43	

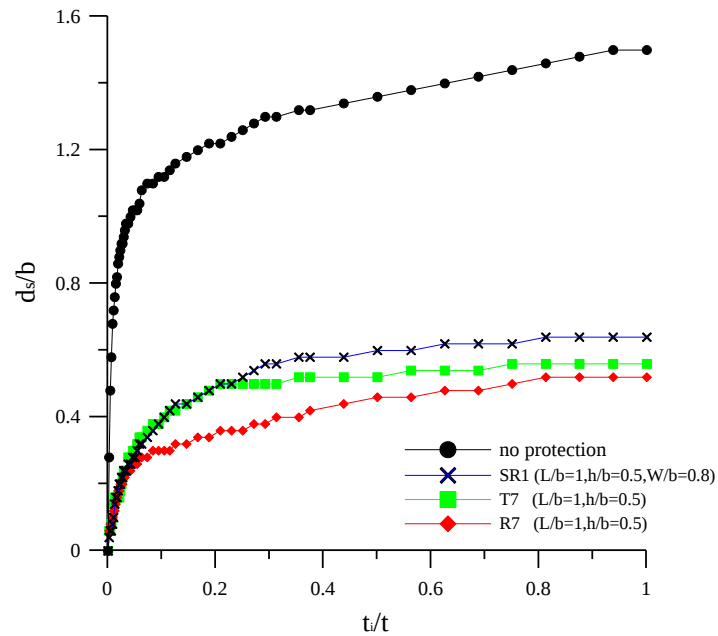


圖 5 傳統式、環圈式及鋸齒式環圈固床工於不同配置之橋墩冲刷歷程圖

Fig.5 Time evolution of pier scour depth with different type consolidation works

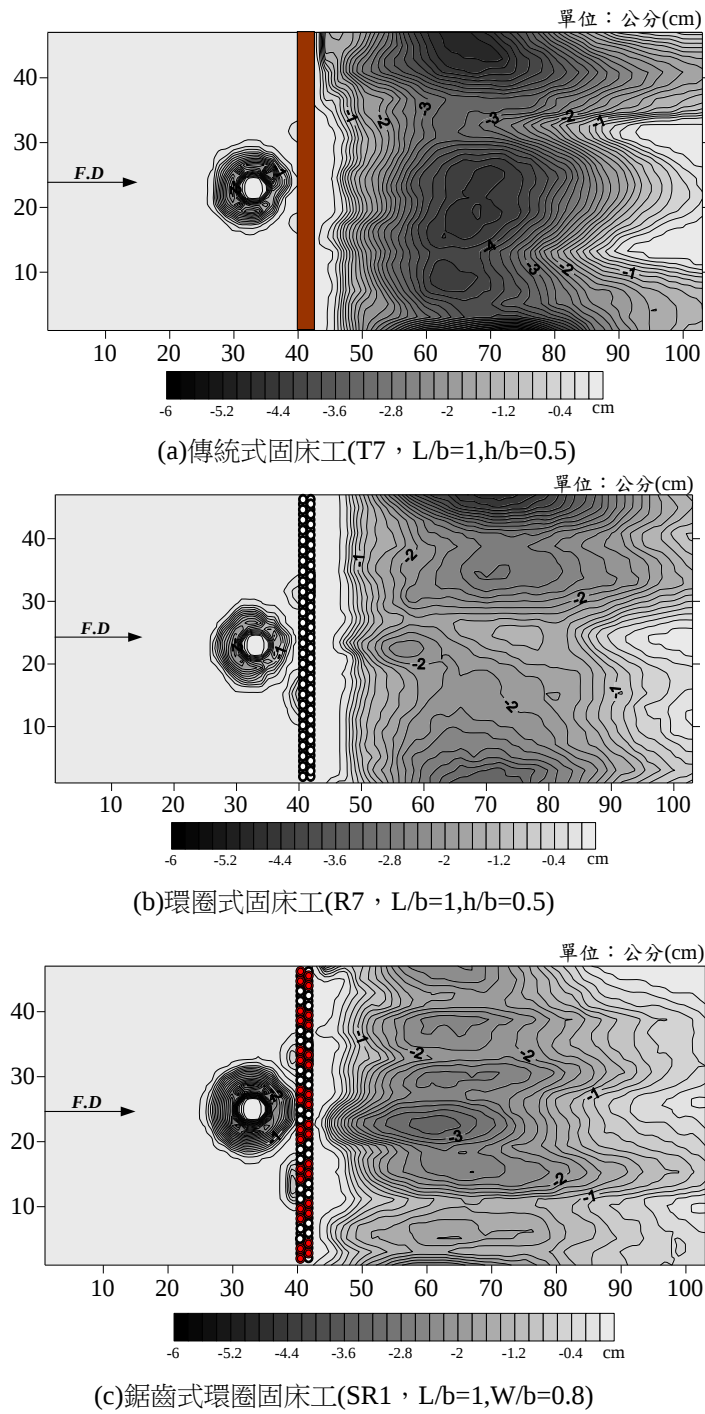


圖 6 三種固床工上下游沖刷坑等高線圖

Fig.6 Comparison of contour lines of scour hole with different type consolidation works

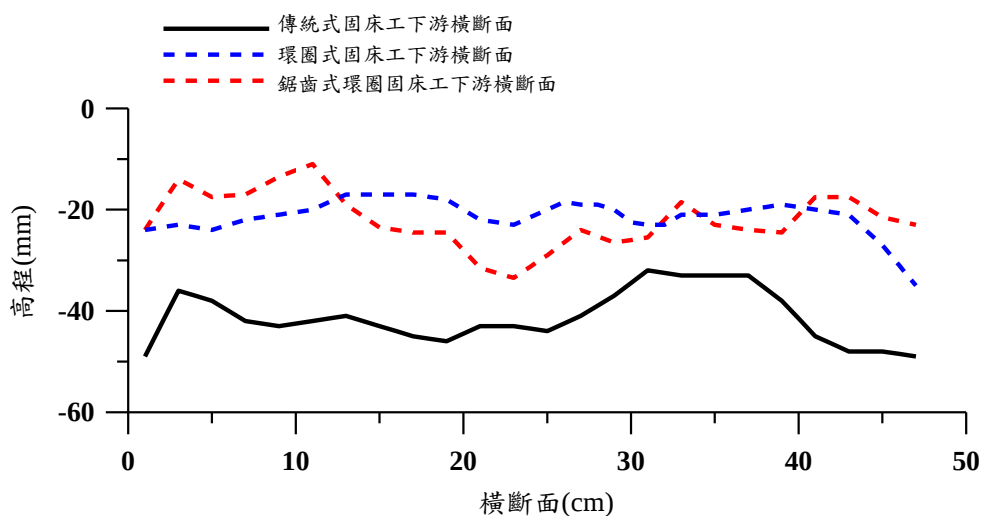


圖 7 三種固床工於最佳配置之固床工下游斷面圖

Fig.7 Comparison of cross section bed profiles at downstream with different type consolidation works

4.3 沖刷減緩率綜合評估

本研究以橋墩墩前沖刷深度減緩率(R_p)及固床工上、下游之沖刷坑體積減緩率(ΔR_u 、 ΔR_d)作為研判指標，如下(4-1)式、(4-2)式及(4-3)式。經由上述小節三種固床工最佳配置於橋墩沖刷歷程及固床工上下游沖刷坑等高線，將其數據表示於表 2、表 3 與圖 8。表 2 可看出鋸齒式環圈固床工之橋墩沖刷減緩率($R_p=57.3\%$)較傳統式($R_p=62.6\%$)與環圈式固床工($R_p=65.3\%$)為小。惟由表 2 可看出固床工上游平均沖刷坑體積減緩率約 94.2%，固床工下游沖刷坑體積因設置傳統式固床工時有較大沖刷坑體積，而設置環圈式固床工可減緩體積約 31.2%，設置鋸齒式環圈固床工可減緩體積約 49.4%。綜合考量橋墩與固床工之安全性，設置鋸齒式環圈固床工有較佳之保護效果。

$$R_p(\%) = \left(\frac{d_{sn} - d_s}{d_{sn}} \right) \times 100\% \quad (4-1)$$

$$\Delta R_u(\%) = \left(\frac{V_{un} - V_u}{V_{un}} \right) \times 100\% \quad (4-2)$$

$$\Delta R_d(\%) = \left(\frac{V_{dn} - V_d}{V_{dn}} \right) \times 100\% \quad (4-3)$$

式中 R_p 為設置與未設置固床工時之橋墩最大沖刷深度減緩率， d_{sn} 為未設置固床工之橋墩墩前最大沖刷深度， d_s 為各式固床工於不同配置條件之橋墩墩前最大沖刷深度。 V_{un} 與 V_{dn} 分別為未設置固床工時之固床工上、下游之沖刷坑體積， V_u 與 V_d 分別為設置各式固床工時之固床工上、下游之沖

刷坑體積

表 3 三種固床工於不同配置之固床工上下游體積變化

Table 3 Comparison of scour hole volume variations at different arrangement of consolidation works

組別	設置 距離 L/b	設置 高度 h/b	鋸齒 寬度 W/b	固床工上游 沖刷坑體積 V_u (cm ³)	固床工上游沖 刷坑體積減緩 率 ΔR_u (%)	固床工下游沖 刷坑體積 V_d (cm ³)	固床工下游沖 刷坑體積減緩 率 ΔR_d (%)
A1	未設固床工			2842.8	-	-	-
T7	1	0.5	0	131.8	95.3	6767.9	-
R7	1	0.5	0	123.6	95.6	4657.2	31.2
SR1	1	0.5	0.8	234.2	91.8	4188.2	49.4

註：T=傳統式固床工，R=環圈式固床工，SR=鋸齒式環圈固床工
固床工下游對照組：傳統式固床工 T7 = 6767.9 cm³

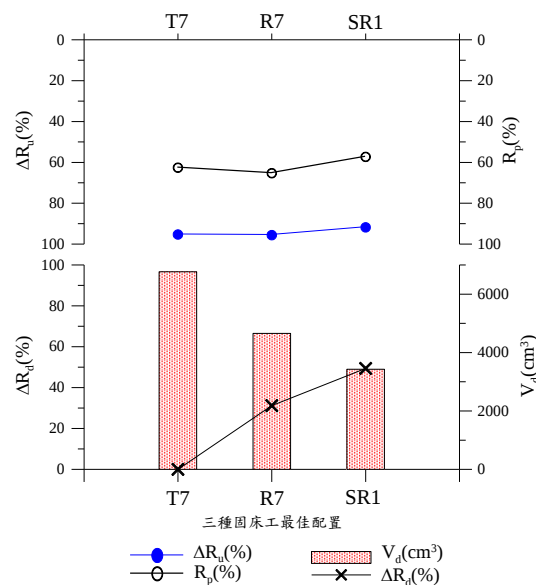


圖 8 三種固床工之最佳配置綜合比較圖

Fig.8 Comparison of optimum arrangement with different type consolidation works

4.4 固床工功能評估

綜合考量橋墩與固床工之安全性，本研

究以橋墩最大沖刷深度及固床工下游沖刷坑體積為指標，針對鋸齒式環圈固床工與環圈式固床工利用加權統計法之擇定較佳型態固

床工，即統計學標準偏差 σ (Standard Deviation) 可看出數據間離散程度，並利用變異係數 C.V.(Coefficient of Variation)對橋墩沖刷深度及固床工下游沖刷坑體積進行權重分配，其標準偏差與變異係數公式如(4-4)、(4-5)式。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \tag{4-4}$$

$$C.V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \tag{4-5}$$

式中 N 為資料總數，i 為 1~N， x_i 為個別觀測值， $\bar{x}$ 為各觀測值之平均值。

由(4-4)及(4-5)式可得兩種固床工型式之總加權沖刷減緩率，分別為 41.0%與 54.3%，詳如表 4，故選定鋸齒式環圈固床工為本研究最佳固床工型式，即該型式配置之固床工對於橋墩及固床工有較佳之保護效果。

表 4 環圈式與鋸齒式環圈固床工權重表

Table 4 Weighting of ring-type and sawtooth-type ring consolidation works

型式	環圈式固床工		鋸齒式環圈固床工	
影響參數	橋墩沖刷深度	固床工下游沖刷坑體積	橋墩沖刷深度	固床工下游沖刷坑體積
變異係數(C.V)	0.319	0.794	0.153	0.095
(權重)	0.287	0.713	0.617	0.383
沖刷減緩率 (%)	65.3	31.2	57.3	49.4
總加權沖刷減緩率 (%)	41.0		54.3	

4.5 迴歸分析

依據上述試驗數據及相關試驗因子分析判斷，利用複迴歸分析方法得出各主要相關影響因子與沖刷深度關係式，其關係式如下：

$$\frac{d_s}{b} = 1.046 \times \left(\frac{L}{b}\right)^{0.084} \times \left(\frac{y}{b}\right)^{-1.987} \times \left(\frac{V}{V_c}\right)^{0.182} \times e^{-1.12\left(\frac{h}{b}\right)} \times e^{0.06\left(\frac{w}{b}\right)}$$

上式中沖刷深度(d_s/b)與各參數間具有高相關性，其判定係數 $R^2=0.837$ ，為驗證上式各參數與沖刷深度之相關性，本研究另帶入驗證數據($L/b=1.5、2.5$ ； $h/b=0.2、0.4$ ； $W/b=0.4、$

1.6)共 12 組試驗數據進行驗證，結果符合上述限制條件，其判定係數 $R^2=0.877$ (如圖 9 所示)，透過該公式可預測出橋墩墩前最大沖刷深度。

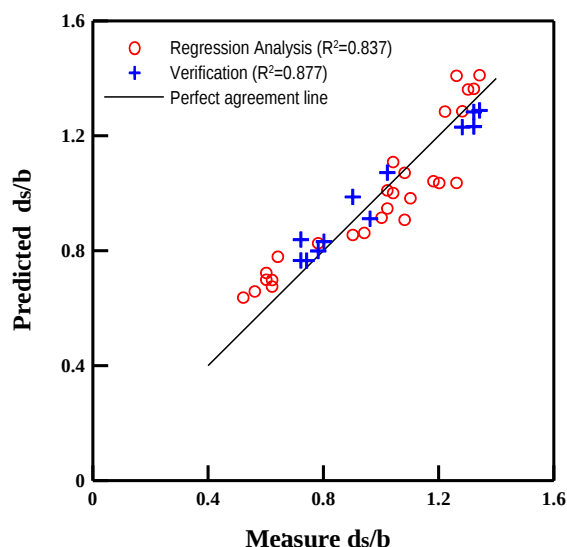


圖 9 迴歸公式參數關係圖

Fig.9 Parameter relationship of regression formula

結論與建議

本研究利用傳統式、環圈式及鋸齒式環圈固床工設置於橋墩下游以保護橋墩，並探討固床工下游沖淤變化，評估固床工防治橋墩沖刷及減緩固床工下游沖刷體積之成效。本研究於定量清水流況下，藉由改變固床工與橋墩設置距離(L/b)、固床工設置高度(h/b)、固床工鋸齒間距(W/b)，相對水流強度($0.5 < V/V_c < 1$)等條件下分析探討固床工在不同設置條件下對橋墩之最大沖刷深度、沖刷坑範圍及固床工下游沖淤之影響，其後利用試驗數據進行複迴歸求得橋墩沖刷深度經驗公式，並獲致如下之結論與建議。

5.1 結論

1.不同配置固床工之橋墩最大沖刷深度均發生在橋墩前緣，整體來說設置固床工之橋墩墩前最大沖刷深度較未設置固床工時為小，顯見設置固床工可減緩橋墩墩前沖刷深

度。

2.當設置固床工於橋墩下游處時，因固床工橫截水流抬升水位，降低流速使水流沖擊橋墩能量減弱，且能抑制橋墩周圍沖刷坑發展進而減低向下射流造成橋墩墩前沖刷深度。水流於固床工前緣產生向下沖刷現象，越過固床工下游則因跌水效應，位能轉換為動能，形成投潭作用，對固床工下游底床產生較大沖刷影響。

3.本研究利用變異係數來擇定環圈式固床工與鋸齒式環圈固床工中較佳之固床工型式。依試驗數據得出，環圈式固床工於固床工下游沖刷坑體積有較高影響性，鋸齒式環圈固床工於橋墩沖刷深度有較高影響性，綜合考量橋墩與固床工之安全性，本研究較佳配置型式為鋸齒式環圈固床工($L/b=1$, $h/b=0.5$, $W/b=0.8$)，能有效抑制橋墩周圍沖刷坑發展，其橋墩沖刷減緩率約 57.3%，固床工下游沖刷坑體積減緩率約 49.4%。

4.根據試驗所得數據，利用複迴歸分析方法獲得如下經驗公式：

$$\frac{d_s}{b} = 1.046 \times \left(\frac{L}{b}\right)^{0.084} \times \left(\frac{y}{b}\right)^{-1.987} \times \left(\frac{V}{V_c}\right)^{0.182} \times e^{-1.12\left(\frac{h}{b}\right)} \times e^{0.067\left(\frac{w}{b}\right)}$$

上式各參數因子與其冲刷深度之判定係數為 $R^2=0.837$ ，其限制條件為 $1 \leq L/b \leq 30$ ； $0 \leq h/b \leq 0.5$ ； $0 \leq W/b \leq 2.4$ ； $y/b < 1.43$ ； $0.5 < V/V_c < 1$ ，透過該公式可於該條件下預測橋墩墩前最大冲刷深度。

5.2 建議

- 1.為更符合天然河川條件，未來可考慮加入坡度及泥砂粒徑等水力條件因子，藉以瞭解設置固床工後，其對橋墩冲刷深度及固床工周圍冲刷之影響。
- 2.本研究主要探討橋墩冲刷深度及固床工下游冲刷坑變化之情形，未來可考慮設置系列固床工以減低固床工之下游冲刷，於固床工安全無虞之前提下，探討固床工設置後對橋墩之保護成效。

謝誌

本文承行政院科技部補助，方得以完成本研究，謹此致謝。

參考文獻

1. 呂其倫，2011，「環圈柱群於橋墩冲刷防治知研究」，逢甲大學水利工程與資源保育學系碩士班碩士論文。
2. 林瑞仁，2003，「開口式帶工對整治後溪流蜿蜒促成可行性之研究」，國立屏東科技大學水土保持所碩士論文。
3. 張則安，1994，「固床工間距之研究」，中興大學水土保持研究所碩士論文。
4. 張詠善，2012，「環圈柱應用於橋墩保護工

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。

5. 陸浩、高冬光，1991，橋梁水力學，人民交通出版社，第167頁至第184頁。
6. Carmelo Grimaldi et al.,(2009),“Control of Scour at Bridge Piers by a downstream Bed Sill”,Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 135, No. 1, January 1
7. Chiew, C. M., and Lim, C. S. (2003),“Impact of lesson study on mathematics training teachers”,Science Education, University of Malaya, Kuala Lumpur.
8. Grimaldi, C. (2005), “Non-conventional countermeasures against localscouring at bridge piers” Ph.D. thesis, Hydraulic Engineering forEnvironment and Territory, Univ. of Calabria, Cosenza, Italy.
9. Melville, B. W., and Coleman, S. E. (2000), “Bridge scour”, Water Resource Publications, LLC.
- 10.Raudkivi, A. J. (1986),“Functional trends of scour at bridge piers”, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.112, No.1, January, pp.1-13.

103 年 08 月 19 日收稿

103 年 08 月 23 日修改

103 年 09 月 25 日接受

水土保持學報 47 (2): 1367–1382 (2015)

Journal of Soil and Water Conservation, 47 (2): 1367–1382 (2015)