

變量流流況下非均勻縱列雙橋墩局部沖刷之研究

Local Scour around Two Non-uniform Circular Piers in Streamwise Direction with Various Flow Hydrographs

逢甲大學 水利工程與資源保育學系 副教授	逢甲大學 水利工程與資源保育學系 碩士	逢甲大學 土木及水利工程研究所 博士候選人	逢甲大學 土木及水利工程研究所 博士生
王傳益*	黃奕超	施漢鵬	鄭人豪
Chuan-Yi Wang	Yi-Chao Huang	Han-Peng Shih	Jen-Hao Cheng

摘要

本研究利用水工試驗模擬前峰型變量流作用下，非均勻縱列雙橋墩(墩徑比 $D/D^* = 0.4$)於 4 種橋墩間距($L_d = 1.25D^*$ 、 $2D^*$ 、 $3D^*$ 及 $4D^*$)及 3 種覆土高度下進行試驗，藉以瞭解縱列雙橋墩之局部沖刷深度與沖刷歷程變化。縱列雙橋墩橋墩間距 $L_d \geq 3D^*$ 時，兩橋墩之間產生明顯之淤積堆。

當橋墩間距為 $3D^*$ 時，上游橋墩墩後之泥砂對下游橋墩具有屏蔽效應或回填下游沖刷坑，以致下游橋墩墩前沖刷深度有減小之現象，為較理想之橋墩配置間距。當橋墩間距 $L_d \leq 1.25D^*$ 時，因橋墩間距較短，當水流通過上游橋墩後，上游來流與馬蹄型渦流結合下游橋墩之向下射流交互作用而產生更為紊亂之流場，造成較大之橋墩沖刷，為較不理想之橋墩配置間距。

關鍵詞：前峰型變量流，非均勻縱列雙橋墩，局部沖刷深度。

ABSTRACT

This research uses hydraulic models to investigate the time variation of local scour depth for two streamwise, consecutive non-uniform circular piers under unsteady flows with advanced peak hydrographs. The upper and lower pier diameters are 20 mm and 50 mm, respectively, i.e. the pier diameter ratio is a constant ($D/D^* = 0.4$). In addition, there are four different longitudinal intervals between the two consecutive piers ($L_d = 1.25, 2, 3$ and $4D^*$), and 3 different initial bed levels in the experimental design.

*通訊作者，逢甲大學水利工程與資源保育學系副教授，40724 台中市西屯區文華路 100 號，cywang@fcu.edu.tw

When $L_d \geq 3D^*$, significant sand deposition occurs between the two consecutive piers. When $L_d \geq 3D^*$, the scour depth in front of the downstream pier decreases because the sand at the back of upstream pier fills downstream scour hole or the sheltering effect. Therefore, a smaller scour depth will occur and it is an ideal arrangement. When $L_d \leq 1.25D^*$, the longitudinal interval between the two consecutive piers is short, the horseshoe vortex combines upstream flow and the downflow so that the flow field becomes more turbulent. Therefore, a bigger scour depth will occur and it is not an ideal arrangement.

Keywords: Unsteady flows with advanced peak hydrographs, Consecutive non-uniform circular piers, Local scour depth.

一、前言

臺灣為歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊相互推擠碰撞產生造山運動所形成之新生島嶼，狹長多山、地質破碎。中央山脈縱橫南北，水系因而呈東西走向，且支流眾多，阻礙了陸上交通運輸。而隨著國家與社會經濟的快速發展，各產業、民生與休閒遊憩於交通運輸需求量上大幅增加，以致交通運輸的快速與便捷性日趨重要。當交通運輸道路跨越河川時，必須興建橋樑因應，而交通流量增大時，為滿足路運交通量之需求，勢必要擴建橋寬為上、下游連續之縱列雙橋墩。

當水流通過橋墩時，由於河川中設置橋墩或橋台等構造物之阻擋，迫使水流壅高後產生向下射流；加上河道通水面積縮減，使得單寬流量加大，橋墩周圍水流速度加快，而水流在橋墩間快速流竄，造成橋墩周圍及河道河床沖蝕下刷。近年來由於全球氣候暖化，降雨型態丕變，強度大且集中，加上 921 地震後地質結構尚未完全穩定與地質條件不佳，上游泥砂輸量不足以填補下游受到沖刷淘蝕之河床，導致河床面逐年降低，使橋樑之橋墩基礎外露。

近年來落橋事件持續發生，如 97 年辛樂克颱風造成大甲溪后豐大橋、98 年莫拉克颱風造成高屏溪雙園大橋等數十座橋樑破壞，人民生命財產安全飽受威脅。本研究透過水工試驗於變量流流況下，探討不同之河床覆土高度之動床變化，藉以瞭解縱列雙橋墩於上下游橋墩不同間距時之局部沖刷深度與沖刷歷程變化。深入分析如后

豐大橋等上、下游連續之不均勻縱列雙橋墩其橋墩上下游河床沖淤機制，提出上、下游連續之縱列雙橋墩較理想之配置間距，以避免此類落橋災害再次發生。

二、文獻回顧

2.1 沖刷之分類

Raudkivi (1986)曾針對橋台附近的沖刷情況做探討，認為橋墩之沖刷現象可以分為三個情況：一般沖刷、束縮沖刷以及局部沖刷。

1. 一般沖刷(*general scour*)：係指河道在未設置任何結構物時，水流對河床沖刷造成高程下降的情況。水流驅使河床泥砂運移，而泥砂也影響水流流況，兩者相互依存，河床永遠處於發展變化的情況。
2. 束縮沖刷(*constriction scour*)：係指橋墩或橋台興建後，佔據部份河寬，水流因通水斷面減少而產生迴水效應(*backwater effect*)，並導致通過橋墩周圍的水流流速加快，進而造成橋墩周圍河床沖刷。
3. 局部沖刷(*local scour*)：係指河道因存在橋墩或其它水工結構物，造成水流產生局部的阻礙與干擾現象，迫使水流在橋墩前方壅水、繞流，使流速與流向的劇烈變化，引起渦流和極強的河床面剪應力，進而造成河床局部的沖刷與高程的下降。

2.2 橋墩沖刷因子

本研究主要針對非均勻(即橋墩上墩徑與下

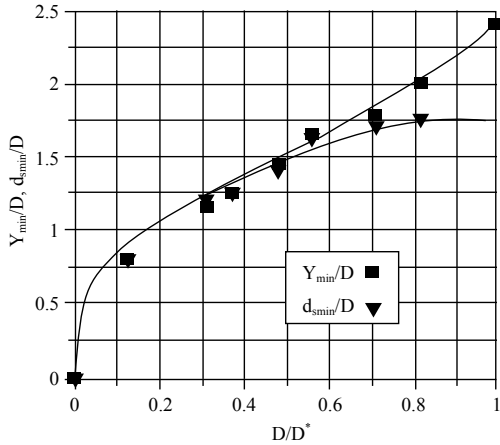


圖 1 墩徑比與沖刷深度之關係圖[3]

墩徑大小不同)縱列雙橋墩進行相關研究,由於台灣河川橋墩基礎,大部分為群樁基礎或非均勻橋墩,又為了滿足交通需求,經常將橋樑擴建形成雙橋墩之情形。而影響橋樑安全的因子包括外在的地文(如底床質特性)及水文(如相對水流強度)條件,還有橋墩本身的配置條件(如橋墩墩徑比、橋墩間距),因此以下針對前人研究與上述相關之參數加以探討。而前人中僅有 Raudkivi (1991)針對縱列均勻雙橋墩進行相關研究,有關非均勻縱列雙橋墩之相關研究則付諸闕如。

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

1. 橋墩性質：橋墩基礎寬度(D^*)、橋墩迎水面寬度(D)、水流攻角(alignment) (α)、橋墩形狀因子修正係數(K_{sh})、不均勻面面積(A)、橋墩迎水面面積(a)、上下游橋墩間距(L_d)、上下游橋墩基礎高度差(H_y)。
2. 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)。
3. 水流性質：流體密度(ρ)、運動黏滯係數(ν)、平均流速(V)、水流深度(y)、重力加速度(g)。
4. 時間：沖刷時間(T)、沖刷達平衡所需時間(T_e)。

2.2.1 橋墩墩徑比(Pier Ratio, D/D^*)

D/D^* 定義為橋墩迎水面寬度(D)即橋墩上墩

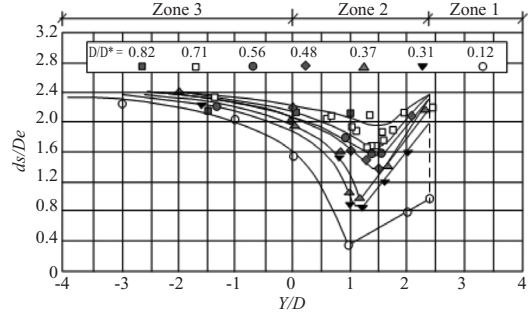


圖 2 覆土高度與沖刷深度之關係圖[3]

徑與橋墩基礎迎水面寬度(D^*)即橋墩下墩徑之比值, Melville & Raudkivi (1996)利用不均勻橋墩進行沖刷試驗,而試驗結果如圖 1 所示,當不均勻橋墩墩徑比愈大時,其沖刷深度也愈大。

2.2.2 覆土高度與橋墩迎水面寬度比(Y/D)

Y/D 定義為覆土高度(Y)與橋墩墩徑(D)之比值,本研究定義覆土若位於橋墩不均勻面之上, Y/D 為正值,反之則為負值。圖 2 為 Melville & Raudkivi (1996)研究所得覆土高度與沖刷深度之關係。當於 Zone 3 時,沖刷深度會隨覆土高度與橋墩迎水面寬度之比值(Y/D)增加而減小,但其減小幅度較緩;而於 Zone 2 時,在 $0 \leq Y/D \leq 1$ 之區間,其沖刷坑深度隨著覆土高度與橋墩迎水面寬度之比值(Y/D)增加而減小,但 $Y/D > 1$ 時,則呈現相反狀況,且沖刷之上升幅度較快速。而於非均勻橋墩墩徑比(D/D^*)小於 0.4 時,其沖刷深度降低之變化較明顯。

2.2.3 橋墩間距(L_d)

Breusers & Raudkivi (1991)指出當縱列均勻雙橋墩間距(L_d)等於橋墩直徑時,即上下游橋墩緊鄰而無間隙,其沖刷深度與單一橋墩沖刷深度相同。橋墩間距 $L_d = 2.5D$ 時,上游橋墩局部沖刷最為嚴重,並隨著橋墩間距($L_d \geq 2.5D$)持續增加其沖刷深度逐步遞減,直至橋墩間距大於 11 倍橋墩直徑,即可視為單一橋墩沖刷。上游橋墩所產生的馬蹄型渦流於上下連續橋墩之間形成複雜渦流形態,其沖刷深度隨橋墩間距增大而減少。總和上下游橋墩沖刷深度與橋墩間形成遮蔽效應關係,可得出在橋墩間距為 4 倍橋墩直徑

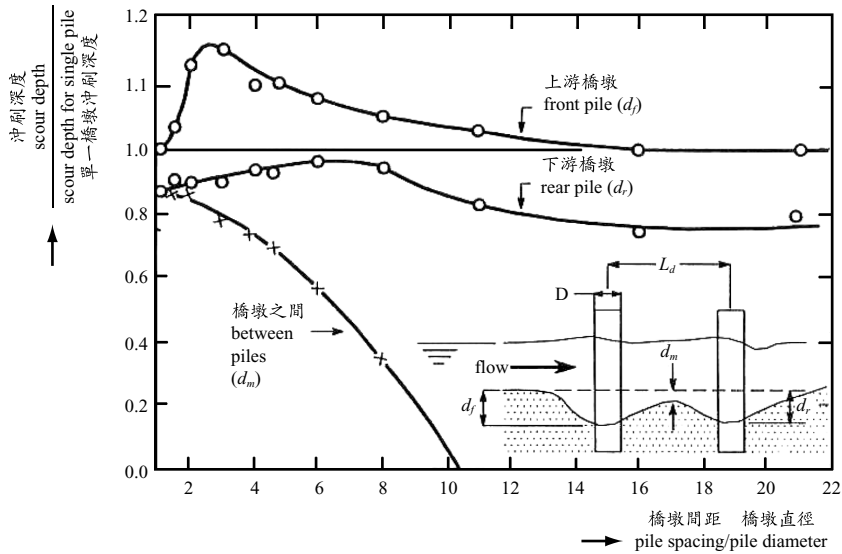


圖 3 縱列均勻雙橋墩於不同橋墩間距下之沖刷深度變化圖[1]

時，上下游橋墩相互遮蔽效應達到最佳，結果如圖 3 所示。

2.2.4 相對水流強度(V/V_c)

Melville & Raudkivi (1977)、Melville & Chiew (1999)曾分析流體之水流強度即平均流速 V 與泥砂顆粒臨界啟動流速 V_c 之比(V/V_c)對沖刷的影響，得到以下結論：

1. $V/V_c < 0.5$ 時，不產生沖刷現象。
2. $0.5 \leq V/V_c \leq 1$ ，為清水流況，即清水沖刷。
3. $1 < V/V_c \leq 4$ ，為含滓流況，即挾沙沖刷。
4. $V/V_c > 4$ 時，為挾沙沖刷並產生逆沙丘 (anti-dune)。

Melville & Coleman (2000)指出水流在泥砂臨界啟動流速(V_c)時，會產生最大之沖刷深度，而含滓沖刷之平均沖刷深度會小於清水沖刷深度。由於最大沖刷深度發生於清水流，基於安全考量，本文於研究橋墩沖刷問題時，以最大清水沖刷深度為探討對象。

2.2.5 底床質相對粗糙度(d_{50}/D)與底床質幾何標準偏差(σ_g)

Raudkivi & Ettema (1983)利用六種橋墩直徑加上兩種泥砂粒徑進行沖刷試驗，在將試驗結果細分為四類。

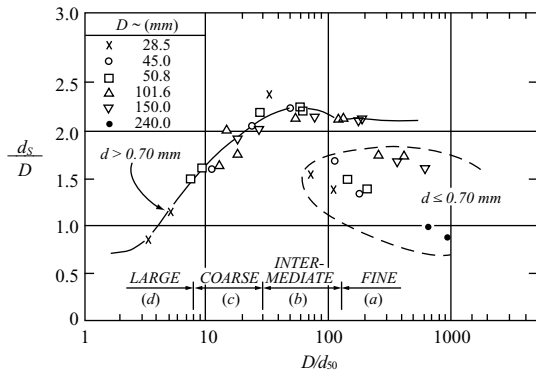


圖 4 底床質相對粗糙度與沖刷深度之關係圖[7]

1. $D/d_{50} \geq 130$ ，細顆粒泥砂。
2. $130 > D/d_{50} \geq 30$ ，中顆粒泥砂。
3. $30 > D/d_{50} \geq 8$ ，粗顆粒泥砂。
4. $D/d_{50} < 8$ ，大顆粒泥砂。

當 $D/d_{50} \geq 20 \sim 25$ 時，平衡沖刷深度不受泥砂粒徑的影響，如圖 4 所示。Raudkivi & Ettema (1977)指出在清水沖刷時，橋墩周圍局部沖刷深度隨底床質標準偏差 σ_g 增大而降低，沖刷深度約為橋墩迎水面寬度之 0.3 ~ 2.3 倍，且在 $\sigma_g > 1.3$ 時有護甲現象產生，此時沖刷深度會隨之變小。本研究底床質標準偏差約為 1.28，屬於均勻泥砂，可排

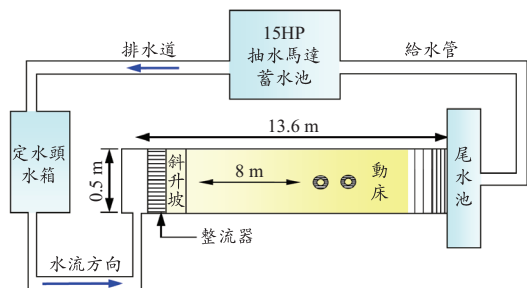


圖 5 試驗渠槽配置圖

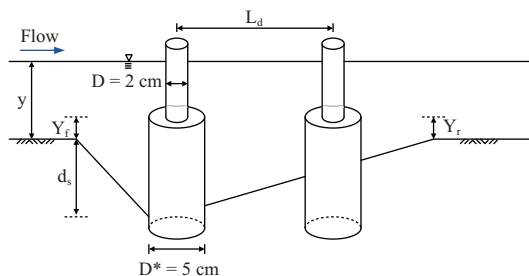


圖 6 試驗橋墩配置圖

除因護甲作用所造成沖刷深度的不準確性。

三、試驗配置

3.1 試驗渠槽

本研究之試驗於逢甲大學水工試驗室內進行，其試驗之渠槽為一中型循環玻璃渠槽。其渠槽全長 13.6 m、寬度 0.5 m、深度 0.72 m，渠槽側壁之材質為強化透明玻璃，渠槽尾端有一尾水閘門，可用以控制實驗水深，渠槽下方有一馬達可抬升前後渠槽之高程，進而控制坡度。而實驗流量控制則以 15 HP 之抽水馬達從蓄水池抽水至定水頭箱，在由定水頭箱與渠槽間之控制閘閥控制入流流量，水流經過渠槽後流進尾水池再排入蓄水池內，如此循環不已。試驗整體主要配置如圖 5 所示。

3.2 試驗橋墩模型

本試驗主要橋墩形式為非均勻圓柱型橋墩，其橋墩模型之選定是依據李俊穎(2005)之試驗結果，採用非均勻橋墩墩徑比 $D/D^* = 0.4$ ，乃因該墩徑比具有最低之局部沖刷深度與較佳之沖刷坑體積減緩效果。而模型主體是以上下不同直徑之壓克力圓管組成，橋墩基礎直徑(D^*)為 5 cm，橋墩直徑(D)為 2 cm，其配置詳如圖 6 所示，圖中 d_s 為非均勻橋墩最大沖刷深度； L_d 為橋墩間距； y 為水深； Y_f 為上游橋墩覆土高度； Y_r 為下游橋墩覆土高度。

3.3 覆土高度

由於本試驗墩徑比(D/D^*)為 0.4，為了探討覆

土高度恰與不均勻面齊平 and 位於不均勻面之上與下時，沖刷前後沖刷坑深度與大小之差異，若覆土高度過高時，將導致沖刷深度無法到達不均勻面而形成均勻橋墩沖刷。因此本研究之覆土高度選定乃蔡坤霖(2006)與李翊嘉(2007)之試驗覆土高度，其設定上、下游覆土高度為 10 mm、0 mm 及 -10 mm 作為試驗之覆土高度，10 mm 代表不均勻面位於河床面(覆土)下 10 mm 處；0 mm 代表不均勻面與河床面齊平；而 -10 mm 代表不均勻面位於河床面(覆土)上 10 mm 處。

3.4 試驗底床質

為充分瞭解非均勻橋墩沖刷之機制，並減少因護甲作用所造成沖刷深度的不準確性，因此於試驗渠槽中鋪設 35 cm 厚之越南細砂，其底床質粒徑為利用 #20、#30、#40 號篩所篩出之三種泥砂粒徑並加以混合，中值粒徑 d_{50} 為 0.62 mm，標準偏差 σ_g 約為 1.28，屬於均勻泥砂。

3.5 試驗流量

本試驗之流量是利用給水管上之電子顯示式管路手動矩形閘閥進行控制，水流從定水頭水箱經由給水管輸送至渠槽上游端，再流至 V 型堰處，利用 V 型堰溢流水深可得流量之迴歸式，本試驗之流量即由該式計算而得。

經統計臺灣地區降雨型式大部份屬於前峰型降雨[9]，而本試驗主要是模擬於天然河川變量流的情況下，橋墩沖刷歷程與各參數間之關係，故以前峰型階梯式變量流(advanced peak stepped unsteady flow)作為試驗條件。階梯式變量流歷程

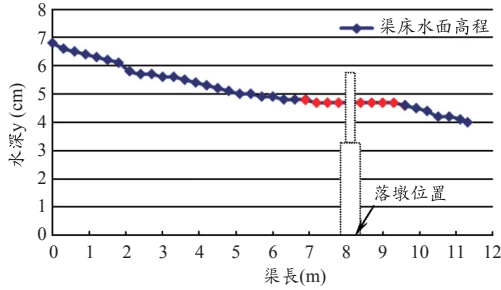


圖 7 完全發展區段選定範圍

型式，採洪峰到達時間 t_p 約為歷線全部延時 t 之 $1/3$ 處，而歷線於每階段歷時約 30 分鐘。

上下游縱列雙橋墩沖刷試驗歷線時間，乃統計李翊嘉(2007)於定量流況下上下游縱列雙橋墩 80 組試驗中有 $1/3$ 組數之平衡沖刷時間為 10 小時。本研究透過前置試驗進行變量流平衡沖刷時間檢定，變量流流況下，縱列雙橋墩之最大沖刷深度均發生於 7 小時 ($L_d = 1.25D^*$ 之上、下游橋墩及 $3D^*$ 之下游橋墩除外)，故採用 7 小時前峰型階梯式變量流歷線為試驗之歷線。

3.6 完全發展段

速度分佈方程式之基本假設為均勻流，而在流況尚未完全發展的情況下所量測的資料，並不適用於分析。故在選定試驗段位置之前，須先確認試驗區段之流況為完全發展 (fully development) 流況。

而對於完全發展流況之檢驗，常用的方法有以下四種：

- (1) 渠寬決定量測點位置。
- (2) 邊界層理論決定量測點位置。
- (3) 水深決定量測位置。
- (4) 速度剖面近似。

因本研究之試驗水深較低，如果以流速剖面決定完全發展段較為困難，故利用試驗區各段水深來決定完全發展段。完全發展段選定之範圍是利用平均流速 V 與泥砂臨界啓動速度 V_c 之比值，即 V/V_c 為 1.0 的情況下量測水深。經試驗分析結果，本試驗之完全發展區段位於距入口口約 7.0 m~9.3 m 之間，因此本研究設計橋墩落墩

表 1 渠槽試驗條件

D/D^*	L_d/D^*	Y_f (mm)	Y_r (mm)	V/V_c
1.0	1.25	-	-	0.5-0.95
	2			
	3			
	4			
0.4	1.25-4	10	10	0.5-0.95
		0	0	0.5-0.95
		-10	-10	0.5-0.95

於距入口口 8.0 m 處之動床區段，詳如圖 7 所示。

3.7 渠槽試驗條件

本試驗於水平渠床坡度 ($S \cong 0\%$)、泥砂中值粒徑 $d_{50} = 0.62$ mm 之均勻泥砂條件下，分別改變上下游橋墩不同的覆土高度 Y_f 、 Y_r ，進行變量流的非均勻橋墩清水沖刷試驗，試驗條件詳如表 1 所示。

3.8 試驗操作程序

本研究試驗程序如下：

1. 裝置試驗儀器。
2. 安置試驗橋墩模型於渠槽內。
3. 鋪設試驗河床質於渠槽內並均勻整平。
4. 開啓定水頭水箱之進水閘閥至試驗所需流量 Q_1 ，每隔 5 分鐘觀察並記錄一次墩前沖刷深度。
5. 每隔 30 分鐘，改變試驗流量由 Q_2 至 Q_{14} 。
6. 待前峰型階梯式變量流歷線沖刷歷程結束後，關閉尾水閘閥讓水壅高，使渠道達到試驗量測所需水深，再以超音波剖面量測儀量測河床剖面高程。
7. 改變覆土高度，並重覆步驟 3~6。
8. 改變不同橋墩間距，並重覆步驟 2~7。

四、結果分析與討論

4.1 沖刷坑與淤積堆之縱斷面變化

圖 8 為試驗均勻橋墩及非均勻橋墩 ($D/D^* = 0.4$ ， $D^* = 50$ mm) 於不同橋墩間距 (L_d) 與橋墩間基礎不均勻面高度差下，不同覆土高度之沖刷坑與

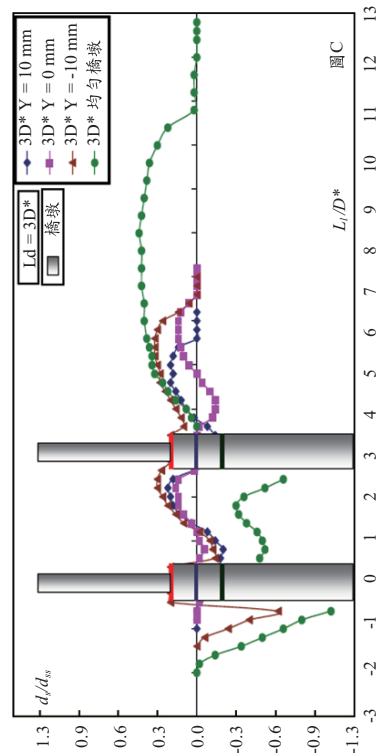
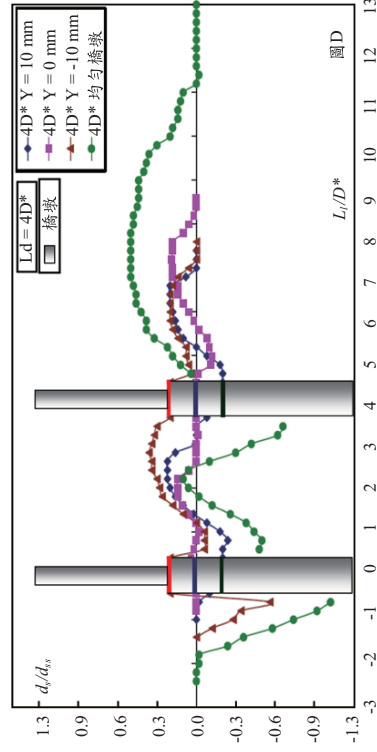
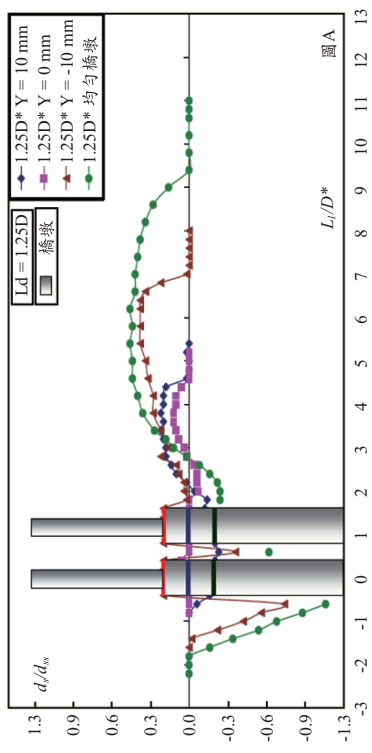
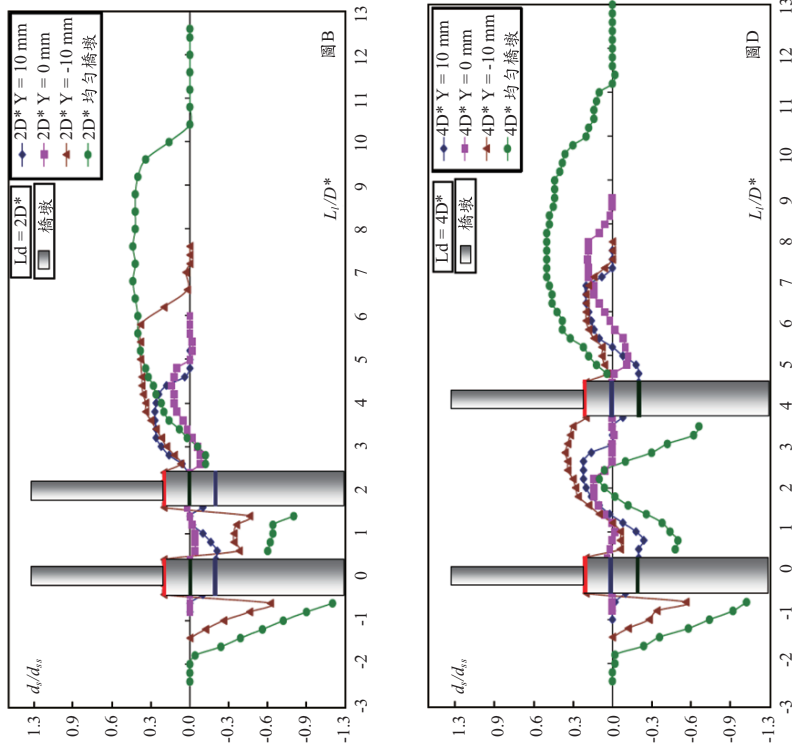


圖 8 縱列橋墩不同間距與覆土高度之河床縱斷面變化圖

淤積堆中心線變化情形。圖中縱軸為非均勻橋墩最大沖刷深度 d_s 與均勻橋墩最大沖刷深度 $d_{ss}(D/D^* = 1, d_{ss} = 48 \text{ mm})$ 之無因次化，橫軸為自上游橋墩中心起算之縱向(水流向)距離 L_i 與橋墩基礎墩徑 D^* 之無因次化；而本研究定義不均匀面與河床面(覆土)齊平為 0，不均匀面於河床面(覆土)下為正值(橋墩基礎未裸露)，不均匀面為於河床面(覆土)上為負值(橋墩基礎裸露)，如 $Y = 10 \text{ mm}$ 為上游與下游橋墩之不均匀面位於河床下 10 mm。

圖 8 中可以看出在任何橋墩間距下，均勻縱列雙橋墩之墩前沖刷深度均較不均匀縱列雙橋墩深，研判其因可能係均勻縱列雙橋墩迎水面寬度($D = 50 \text{ mm}$)較大，產生之向下射流相對較大，且因均勻橋墩無不均匀面抵擋向下射流之能量，所以於墩前產生之沖刷深度較大。此外， $Y = -10 \text{ mm}$ 之沖刷深度較 $Y = 0 \text{ mm}$ 及 $Y = 10 \text{ mm}$ 深，係因橋基裸露於河床面之上 10 mm，形成一個較大之迎水面積，增加了向下射流強度，且不均匀面位於河床上方，無法發揮削減向下射流能量之功效，因此產生沖刷深度較深。下游橋墩在 $1.25D^*$ 及 $2D^*$ 之沖刷深度較 $Y = 0 \text{ mm}$ 及 $Y = 10 \text{ mm}$ 深，惟於 $3D^*$ 與 $4D^*$ 時，上游橋墩之淤砂向後推移，加上橋墩間距較長且處於變量流歷線下降段相對水流強度下降，無法將淤砂帶往墩後，因此上游泥砂落淤於下游橋墩之不均匀面上，導致下游橋墩($Y = -10 \text{ mm}$)墩前沖刷深度低於 $Y = 0 \text{ mm}$ 及 $Y = 10 \text{ mm}$ 之下游橋墩墩前沖刷深度。

在 $Y = 10 \text{ mm}$ 時，不均匀面位於河床下 10 mm 處，由於河床高於不均匀面，此時迎水面寬度為橋墩墩徑，小於橋基寬度，且向下射流強度也較小，因此沖刷現象會延後發生。開始沖刷後，其下刷速度較緩，當墩前沖刷至不均匀面時，因不均匀面抵消向下射流之力量，以致沖刷深度較小(10 mm)。但在 $1.25D^*$ 時，當水流流經上游橋墩時，因墩距較短，故上游橋墩後方產生之渦流快速衝擊下游橋墩，因此下游橋墩之墩前沖刷深度會較 $2D^*$ 、 $3D^*$ 及 $4D^*$ 之下游橋墩墩前沖刷深度大。

於 $Y = 0 \text{ mm}$ 時，其不均匀面與河床面齊平，水流流經橋墩時，於橋墩迎水面產生向下射流，而不均勻面能有效削弱向下射流能量，保護墩前減少沖刷產生；此外，上游來流與向下射流相互作用，會於橋墩後方產生渦流，並對墩後產生淘刷，因此在 $Y = 0 \text{ mm}$ 時，不會於墩前產生沖刷，而是在墩後產生沖刷現象。當橋墩間距為 $1.25D^*$ 時，因橋墩間距較短，上游橋墩產生之渦流對下游橋墩前方泥砂造成淘刷，因此在 $1.25D^*$ 時下游橋墩墩前會有一較大沖刷深產生，而 $2D^*$ 、 $3D^*$ 與 $4D^*$ 則無此現象產生。

由圖 8 中，可比較出在 $1.25D^*$ 時，下游橋墩之墩前沖刷比其它間距之下游橋墩墩前沖刷深度大，主要原因是因為橋墩間距較短，所以上游橋墩產生之渦流較快衝擊下游橋墩，因此雙橋墩間距為 $1.25D^*$ 時可視為單一橋墩沖刷。

由圖 8 可知約在 $3D^*$ 與 $4D^*$ 時，於上游橋墩沖刷出來的砂，大約推積於縱軸座標 2~3 之區間內，主要是因為隨著變量流歷線之作用，於歷線上升段，相對水流強度持續增加因此砂會快速向後移動，但當歷線洪峰過後，相對水流強度漸漸減弱，因此淤砂向下游移動速度漸漸降低，直至停止而趨於穩定。

4.2 沖刷坑之長度(L_s)、寬度(W_s)與縱向橋墩間距(L_d)之探討

圖 9 縱軸為沖刷坑長度(L_s)與橋墩基礎寬度(D^*)之無因次化，圖 10 縱軸為沖刷坑寬度(W_s)與橋墩基礎寬度(D^*)之無因次化，而橫軸為縱向橋墩間距(L_d)與橋墩基礎寬度(D^*)之無因次化。各橋墩配置之符號，A 為上游橋墩，以實心標號與實線表示；B 為下游橋墩，以空心標號與虛線表示。而英文字母後方所銜接之阿拉伯數字代表覆土高度(mm)。不均匀面位於河床面(覆土)下為正值，不均匀面與河床面(覆土)高度齊平為 0，而不均勻面位於河床面(覆土)上為負值。

4.2.1 沖刷坑之長度(L_s)與縱向橋墩間距(L_d)之探討

由圖 9 可以看出 $Y = -10 \text{ mm}$ 時，其沖刷坑長度隨著橋墩間距增加而變短，其因乃上游橋墩

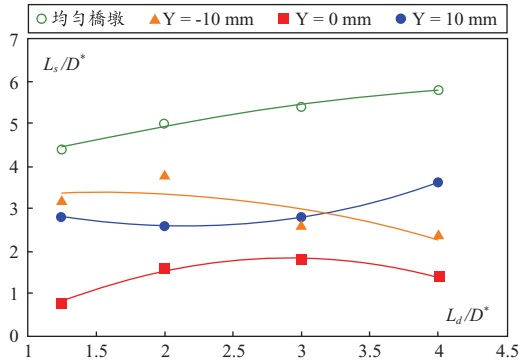


圖 9 縱列雙橋墩沖刷坑長度 L_s/D^* 與橋墩間距 L_d/D^* 之關係

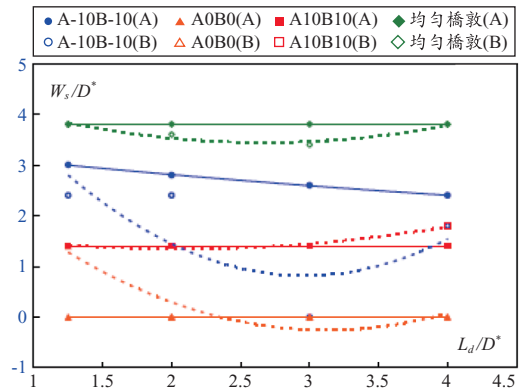


圖 10 縱列雙橋墩沖刷坑寬度 W_s/D^* 與橋墩間距 L_d/D^* 之關係

泥砂向後移動至下游橋墩前緣形成砂丘之屏障保護，以致下游橋墩墩前無法產生沖刷坑，因此沖刷坑長度較小。 $Y = 10 \text{ mm}$ 及 0 cm 時，其 $L_d = 3D^*$ 為反曲點，推測可能是上游沖刷之泥砂回填河床所影響；當 $L_d = 4D^*$ ，其橋墩間距較 $3D^*$ 長，上游泥砂影響減小，因此形成各自獨立之沖刷。

4.2.2 沖刷坑之寬度(W_s)與縱向橋墩間距(L_d)之探討

由圖 10 上游橋墩之沖刷坑橫向寬度不隨橋墩間距增加而改變，惟橋墩配置為 A-10B-10 除外，其該配置會隨距離增加而變小。此外，當橋墩配置 A0B0 時，因不均勻面與河床面齊平，向下射流與上游來流受不均勻面阻擋，而未於周圍產生沖刷坑，反而於橋墩後方產生微型沖刷。下游橋墩之沖刷坑寬度呈現一上拋物線型式，於橋

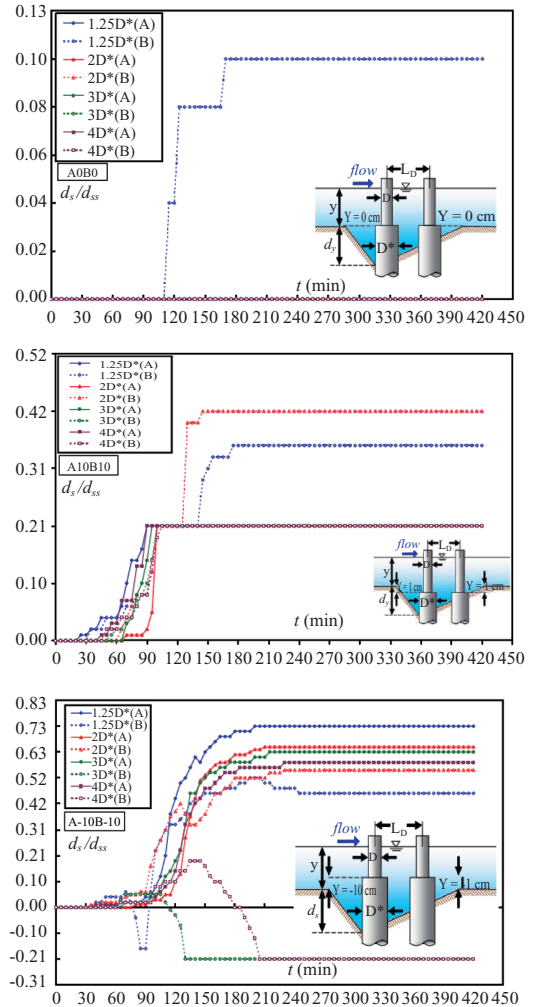


圖 11 縱列雙橋墩於不同覆土高之沖刷歷程圖

墩間距為 $1.25D^*$ 時，下游橋墩之沖刷坑寬度最大 (A10B10 時除外)，係因為當橋墩間距較短，上游橋墩後方尾跡渦流、上游來流與向下射流互相影響產生紊亂流場，加劇沖刷行為。在橋墩間距為 $3D^*$ 時，會產生一走勢相異之點位，推測是因為上游橋墩產生之淤砂對下游橋墩局部沖刷之沖刷坑產生影響。

4.3 雙橋墩沖刷歷程之探討

本研究採用 7 小時前峰型階梯型變量流歷線，每 30 分鐘改變一次試驗流量，而試驗之觀察以 5 分鐘為單位。圖 11 中縱軸為非均勻橋墩

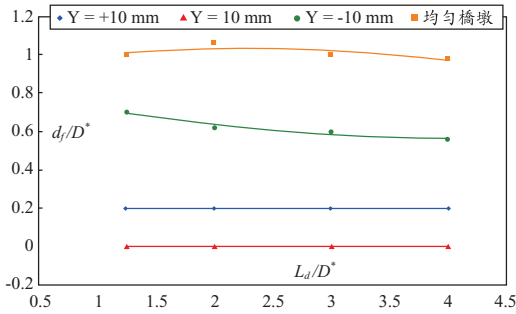


圖 12 上游橋墩墩前沖刷深度(d_f/D^*)與橋墩間距(L_d/D^*)之關係

最大沖刷深度(d_s)與單一均勻橋墩最大沖刷深度(D/D^* , $d_{ss} = 48$ mm)之無因次化，橫軸為變量流沖刷時間(t)。

由圖 11 可看出，墩前沖刷深大致上隨著相對水流強度增加而增加，直到洪峰流量過後才趨於穩定平衡。由 A0B0 及 A10B10 配置可看出，當橋墩間距為 $1.25D^*$ 時，其下游橋墩墩前沖刷深較其它間距之沖刷深度大，係因為橋墩間距過短，橋墩間水流流況較混亂且作用力較大，因此沖刷深度會刷至不均勻面以下，其餘則是沖刷至不均勻面則停止。

橋墩配置為 A-10B-10 時，因不均勻面位於河床面(覆土)上 10 mm 處，不均勻面無法有效阻擋向下射流強度，所以沖刷深度皆較其它配置之沖刷深度大，而在橋墩間距為 $3D^*$ 和 $4D^*$ 時，因上游橋墩淤砂後移，而包圍下游橋墩基礎，形成類似不均勻面與河床面齊平之沖刷情況，其前緣無沖開之跡象，因此產生下游橋墩淤積現象。

4.4 沖刷深度與橋墩間距之關係

橋墩與墩基礎間交接之不均勻面，其不均勻面配置之位置為影響橋墩沖刷深度大小的重要因子之一。若不均勻面與覆土高度之相對位置設計得宜，則能有效減緩水流對橋墩周圍局部沖刷所造成之破壞。

圖 12 為上游橋墩墩前沖刷深度(d_f)與橋墩間距(L_d)之關係圖，圖中可以看出當不均勻面位於河床面之上，即橋墩基礎裸露($Y = -10$ mm)時，其沖刷深度最深；而當不均勻面與河床面齊平

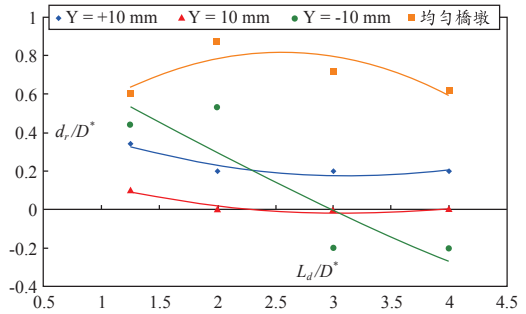


圖 13 下游橋墩墩前沖刷深度(d_r/D^*)與橋墩間距(L_d/D^*)之關係

($Y = 0$ mm)，沖刷深度最小。此外，當橋墩配置為 $Y = 10$ mm 與 0 mm 時，其上游墩前沖刷深度不受橋墩間距增加而有太大之變化。

圖 13 為下游橋墩墩前沖刷深度(d_r)與橋墩間距(L_d)之關係圖，下游橋墩沖刷變化較為混亂，主要是受上游橋墩來砂影響，當 $Y = -10$ mm，橋墩間距 $L_d \geq 3D^*$ ，則下游橋墩墩前呈現淤積之狀況。此外，橋墩間距為 $3D^*$ 時，會有走勢相異之趨勢點，推測應是上游橋墩產生之淤砂所致。橋墩間距為 $3D^*$ 時，上游橋墩墩後之泥砂對下游橋墩具有屏蔽效應或回填下游沖刷坑，以致下游橋墩墩前沖刷深度有減小之現象，為較理想之橋墩配置間距。此結果與 Raudkivi (1991) 均勻縱列雙橋墩之 4 倍墩徑為較理想之配置間距略有差異。研判可能因不均勻面有阻擋向下射流之功能，因此理想墩距較均勻橋墩之 4 倍直徑為小。

五、結論與建議

5.1 結論

- (1) 在任何橋墩間距下，均勻縱列雙橋墩之墩前沖刷深度均較不均勻縱列雙橋墩深，研判其因可能係均勻縱列雙橋墩迎水面寬度 ($D = 50$ mm) 較大，產生之向下射流相對較大，且因均勻橋墩無不均勻面抵擋向下射流之能量，所以於墩前產生之沖刷深度較大。
- (2) 上游橋墩之沖刷坑寬度不受雙橋墩間距之增加而有太大之變化，惟於上游橋墩基礎裸露時，則沖刷坑寬度受橋墩間距之影

響。而下游橋墩沖刷寬度，會隨上游泥沙輸出量與橋墩配置方式而有不同結果。

- (3) 橋墩間距 $L_d \leq 1.25D^*$ 時，因橋墩間距較短，當水流通過上游橋墩後，上游來流與馬蹄型渦流結合下游橋墩之向下射流交互作用而產生更為紊亂之流場，造成較大之橋墩沖刷，為較不理想之橋墩配置間距。
- (4) 橋墩間距 $L_d \geq 3D^*$ 時，兩橋墩之間產生明顯之淤積堆。橋墩間距為 $3D^*$ 時，上游橋墩墩後之泥沙對下游橋墩具有屏蔽效應或回填下游沖刷坑，以致下游橋墩墩前沖刷深度有減小之現象，為較理想之橋墩配置間距。
- (5) 墩前沖刷深大致隨相對水流強度增加而增加，直到洪峰流量過後才趨於穩定平衡。當橋墩間距為 $1.25D^*$ 時，其下游橋墩墩前沖刷深較其它間距之沖刷深度大，而在橋墩間距為 $3D^*$ 時，因上游橋墩淤砂後移，因此產生下游橋墩淤積現象。

5.2 建議

- (1) 本研究採用之變量流歷線為前峰型變量流歷線，未來可以針對中峰型、後峰型及雙峰型歷線進行試驗，並與前峰型歷線進行分析比對。
- (2) 本研究採用之變量流歷線雖與天然河川變量流況相近，惟仍屬清水流沖刷，未來可考慮以含滓變量流來進行試驗，以期與天然河川流況一致。

六、參考文獻

1. Breusers, H. N. C., Raudkivi, A. J., 1991, Scouring, IAHR, Hydraulic Structure Design Manual, Vol. 2, Belkema, pp. 84-87.
2. Melville, B. W. Raudkivi, A. J., 1977, Flow Characteristics in Local Scour at Bridge Piers, Journal of Hydraulic Research, Vol. 15, No. 4, pp. 373-380.
3. Melville, B. W., Raudkivi A. J., 1996, Effects of Foundation Geometry on Bridge Pier Scour, Journal of Hydraulic Engineering, pp. 203-209.
4. Melville, B. W., Chiew, Y. M., 1999, Time scale for Local Scour at Bridge Piers, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 125, No. 1, pp. 59-65.
5. Melville, B. W., Coleman, S. E., 2000, Bridge Scour, Water Resources Publications, LLC., Highlands Ranch, Colorado, USA.
6. Raudkivi, A. J., R. Ettema, 1977, Effect of Sediment Gradation on Clear Water Scour, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 109, No. 3, pp. 338-349.
7. Raudkivi A. J., R. Ettema, 1983, Clear-Water Scour at Cylindrical Piers, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 4, April, pp. 713-731.
8. Raudkivi, A. J., 1986, Functional Trends of Scour at Bridge Piers, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 1, January, pp. 1-13.
9. 李俊穎，2005，歷線型流況下同心圓局部沖刷之研究，逢甲大學水利工程研究所碩士論文。
10. 李翊嘉，2007，定量流流況下不均勻圓柱型上下游連續橋墩局部沖刷之研究，逢甲大學水利工程研究所碩士論文。
11. 陸浩、高冬光，1991，橋樑水力學，人民交通出版社，pp.167-184。
12. 蔡坤霖，2006，定量流流況下非同心圓柱型橋墩局部沖刷之研究，逢甲大學水利工程學系碩士班碩士論文，第 55 頁。

收稿日期：民國 99 年 4 月 28 日

修正日期：民國 99 年 7 月 8 日

接受日期：民國 99 年 7 月 13 日