

非均勻縱列雙橋墩沖刷防治之研究

邱琨皓⁽¹⁾ 王傳益⁽²⁾ 詹明翰⁽³⁾

摘 要

本研究利用水工試驗模擬非均勻縱列雙橋墩於三種覆土高度($Y/D^*=0.2$ 、 0 、 -0.2)、四種不同間距($L_d=1.25D^*$ 、 $2D^*$ 、 $3D^*$ 及 $4D^*$)及三種變量流流況(前峰型、中峰型及後峰型)進行試驗。本研究將分析上下游縱列雙橋墩的最大沖刷深度與沖刷深度減緩率。此外，針對雙橋墩不均勻面高度差產生的沖淤歷程變化加以探討，以獲致較理想縱列雙橋墩的配置模式。

研究結果顯示覆土高度與不均勻面為橋墩基礎之重要保護措施。整體而言，當橋墩基礎為未裸露時($Y=0.2D^*$)且橋墩間距為 $4D^*$ 時為最理想非均勻縱列雙橋墩的配置模式。

關鍵詞：非均勻縱列雙橋墩、變量流、沖刷深度減緩率

Scour Prevention and Control of Two Non-uniform Circular Piers in Streamwise Direction

Kun-Hao Ciou⁽¹⁾ Chuan-Yi Wang⁽²⁾ Ming-Han Zhan⁽³⁾

Abstract

The research uses hydraulic models simulation to streamwise consecutive non-uniform double-bridge piers in three initial bed levels ($Y/D^*=0.2$, 0 , -0.2) and four different spacing ($L_d=1.25D^*$, $2D^*$, $3D^*$, $4D^*$) under unsteady flow with three hydrographs (advanced peak hydrographs, central peak hydrographs, and backward peak hydrographs). This study will analyze the maximum scouring depth and the scour depth reduction rate of the upstream and downstream consecutive double-bridge piers. In addition, the silting change with the time caused by the uneven surface height difference are

¹ 逢甲大學水利工程與資源保育學系碩士

² 逢甲大學水利工程與資源保育學系教授 (通訊作者 Email:cywang@fcu.edu.tw)

³ 逢甲大學水利工程與資源保育學系碩士生

discussed in order to obtain the more ideal configuration mode of the double-bridge pier.

The results show that the soil cover height and uneven surface are important protective measures for the pier foundation. On the whole, the optimal configuration mode for streamwise consecutive double-bridge pier when the foundation of the pier is unexposed ($Y = 0.2D^*$) and the pier spacing is $4D^*$.

Key words : streamwise consecutive non-uniform double-bridge pier, unsteady flows, scour depth reduction rate.

一、前言

人們隨著時代的變遷，因應經濟、文化上的發展，交通系統必須逐漸完善，因而在天然河川中增設水工結構物，如橋墩以連接兩岸、丁壩可挑流並控制留心，其構造物的存在會導致水流流況改變，如通水斷面積縮小而產生束縮作用，造成橋墩周圍強烈的局部沖刷，再加上人為頻繁的開採河床砂石，使河川底床線逐年下降，造成河道刷深現象持續加深，危及結構物基礎並淘刷破壞其安全性及穩定性，可能造成人民生命及財產的損失。

在臺灣的陸運連接道路主要為橋梁，由於交通量的增加，為紓解交通負荷，因此將重要橋梁進行拓寬改建工程，當橋面寬增加後，為了結構安全所需，因此將單一橋墩設置為上下游連續雙橋墩。

本研究將在變量流流況下進行不均勻圓柱型上下游連續雙橋墩局部沖刷試驗，探討非均勻橋墩在不同覆土高度、上下游連續橋墩不同間距與不均勻面高度落差之沖刷時，對其沖刷歷程、局部沖刷最大深度及沖刷減緩率進行分析研究，提出較理想之縱列非均勻雙橋墩配置模式，供日後相關工程人員橋墩工程設計時之參考。

二、文獻回顧

2.1 沖刷之分類

Raudkivi(1986)^[12]及陸浩、高冬光(1991)^[4]曾針對橋墩附近的沖刷情形做探討，其認為橋墩的沖刷現象可分為一般沖刷、束縮沖刷與局部沖刷等三個部分。

- (1) 一般沖刷(**general scour**)：係指河道在未設置任何結構物時，水流對渠床沖刷造成高程下降的情形。河床中水流驅動泥

砂運移，而泥砂影響水流結構，兩者為交互作用，使河床型態永遠在發展變化的型態。

- (2) 束縮沖刷(constriction scour)：因興建橋墩或橋台等構造物後，佔據部分河寬，水流因通水斷面減少，再周遭形成迴水效應，使通過橋墩周圍之水流流速加快，進而對橋墩附近的河床造成沖刷。

- (3) 局部沖刷(local scour)：係指河道因設置橋墩或水工結構物，水流流經橋墩周圍時產生局部的阻礙與干擾現象，迫使水流於橋墩前方產生壅水、繞流，改變水流流速與流向劇烈變化，並引起渦流和極強的河床剪應力，進而造成河床局部的沖刷與高程的下降。

Melville and Coleman(2000)^[10]認為一般橋梁所造成之沖刷，係為一般沖刷及局部沖刷兩種沖刷之加總。因此，李俊穎(2005)^[1]將橋墩沖刷現象以圖 1 表示各種沖刷。

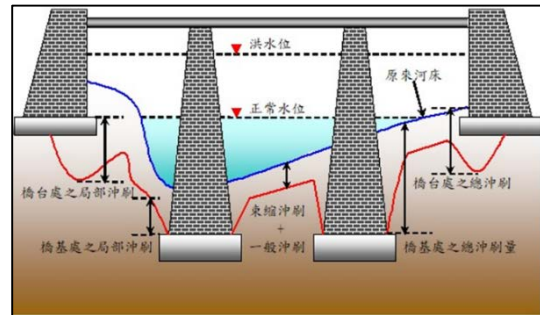


圖 1 橋墩沖刷示意圖(李俊穎，2005)^[1]

2.2 均勻橋墩沖刷

Dargahi(1990)^[5]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：

- (1) 開始階段：無沖刷情形。
- (2) 主要沖刷階段：沖刷較為劇烈，並產生週期性波動。
- (3) 沖刷後期階段：輸砂率及沖刷深度之變化隨時間遞減。

Dey(1999)^[6]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：

- (1) 沖刷情況由馬蹄型渦流造成。
- (2) 底床顆粒由沖刷坑底部帶起並產生最

大冲刷深度。

- (3) 冲刷坑中底床質之重量變化率等於冲刷坑內被帶出之底床質重量變化率與被帶入冲刷坑內之底床質重量變化率之差。

由上述觀念推論出均勻與非均勻之底床質粒徑在清水流動床情況冲刷下，圓形橋墩周圍局部冲刷變化隨時間影響。均勻粒徑泥砂在清水冲刷情況下之試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，主要是由於受試驗底床會產生砂丘之影響。因此，對於非均勻泥砂粒徑還提供一些安全係數，於工程設計時計算最大冲刷深度之用。

2.3 非均勻橋墩冲刷

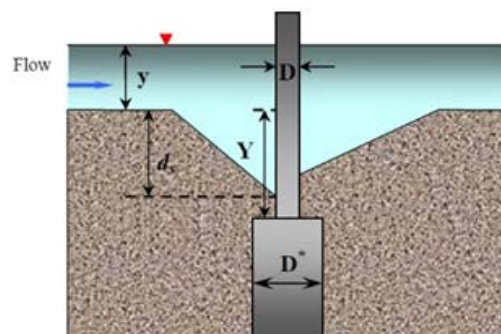
非均勻橋墩與均勻橋墩不同，通常係指為橋墩迎水面寬度(D)與橋基迎水面寬度(D*)不相等之橋墩形式，而兩者之比值即為非均勻橋墩墩徑比 D/D^* (ratio of nonuniform piers diameter)。

Melville & Raudkivi(1996)^[8]分析了三種非均

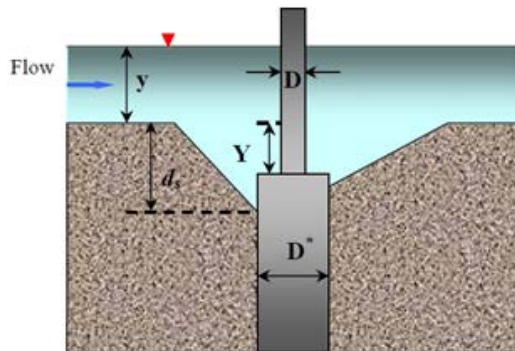
勻橋墩之基礎佈置，如圖 2 所示，主要是由橋墩基礎頂部(不均勻面)位置的不同來做區分，可分為：

- (1) 橋墩基礎頂部位於冲刷坑之下(Zone 1)
- (2) 橋墩基礎頂部位於冲刷坑之中(Zone 2)
- (3) 橋墩基礎頂部位於冲刷坑之上(Zone 3)

圖 2 中， d_s 為冲刷深度、Y 為覆土高度、D 為橋墩直徑、 D^* 為橋墩基礎直徑。

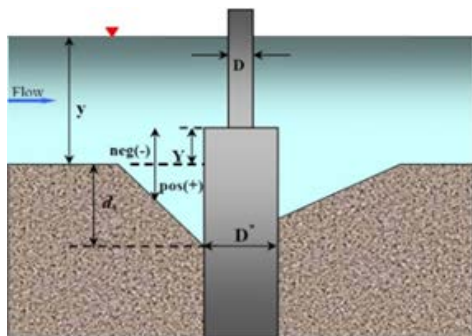


Zone1($Y/D > 2.4$, $d_s = 2.4D$)



Zone2($0 \leq Y/D \leq 2.4$, $d_s < 2.4D$)

(except $Y/D < 0.7$, $D/D^* < 0.6$)



Zone3($Y/D < 0$, $2.4D < d_s < 2.4D^*$)

圖 2 非均勻橋墩沖刷深度與覆土高度示意圖(Melville &

Raudkivi,1996)^[8]

2.4 橋墩沖刷因子

因橋墩周圍的局部沖刷屬三維分離流場，難

以純理論方式推求之橋墩周圍局部沖刷深度，故過往之學者皆以水工試驗方法量測之

沖刷深度，並藉以推估出影響橋墩沖刷因子之權重及相關局部沖刷深度公式，如表 1。

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，這些因子

又與下列條件有關：

- (1) 橋墩性質：橋墩迎水面寬度(D)、橋墩基礎寬度(D*)、水流攻角(alignment)(α)、橋墩形狀因子修正係數(Ksh)、不均勻面面積(A)、橋墩迎水面面積(a)、上下游橋墩間距(Ld)、覆土高度(Y)。
- (2) 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)。
- (3) 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)。
- (4) 時間：沖刷時間(T)、沖刷達平衡所需時間(T_e)。

表 1 均勻橋墩最大冲刷深度推估公式表

學者	公式	標準化形式	備註
林景輝 (1993)	$\frac{d_{se} + y}{D} = 1.378 \cdot \left(\frac{y}{D}\right)^{0.83} \cdot \left(\frac{D}{d_{50}}\right)^{0.045} \cdot \left(\frac{V}{V_c}\right)^{0.24} \cdot (1 - S)^{-1.47}$	同左式	d_{se} ：平衡冲刷深度 y ：水深 D ：橋墩迎水面寬 d_{50} ：底床中值粒徑 V ：來流平均流速 V_c ：底床質臨界啟動速度 S ：河床坡度
蘇重光 (1995)	$\frac{d_s + y}{D} = 0.54P \cdot \left(\frac{y}{D}\right)^{1.2} \cdot \left(\frac{D}{d_{50}}\right)^{0.48} \cdot \left(\frac{V_p}{V_c}\right)^{0.57}$	同左式	V_c ：顆粒啟動速度 V_p ：尖峰流量時接近速度 P ：變量流參數
Parola (1996)	$d_s = 2.25 \sim 2.5a_p$	$\frac{d_s}{D} = 2.25 \sim 2.5a_p / D$	a_p ：矩形橋墩迎水面寬度
Melville (1997)	$d_s/D = K_{yb} K_I K_G K_S K_\theta$	同左式	K_{yb} ：相對水深修正因子

2.5 橋墩冲刷因子探討

本研究將各因子無因次化，主要是能將實驗室內之試驗數據使用於現地之參考值，並對以下各無因次參數之物理意義及其對橋墩局部冲刷之影響分別加以討論：

2.5.1 相對水流深度(y/D)

相對水流深度定義為水深(y)和橋墩迎水面寬度(D)之比值，其比值越小，水深之改變即會影響冲刷深度。當比值越大，則橋墩迎水面寬度會影響冲刷深度，而與水深較無關聯。Melville and Sutherland(1988)^[9]指出，當

y/D>1.43 時橋墩局部冲刷深度只與橋墩迎水面寬度有關；當 y/D<0.2 時，水深會影響橋墩冲刷深度；而當 0.2≤y/D≤1.43，水深及橋墩迎水面寬度皆會影響局部冲刷深度。

2.5.2 橋墩墩徑比(D/D*)

定義為橋墩迎水面寬度(D)與橋基迎水面寬度(D*)之比值，Melville & Raudkivi(1996)^[8]利用非均勻橋墩進行冲刷試驗，而試驗結果如圖 3 所示，當非均勻橋墩墩徑比愈大時，其冲刷深度也愈大。圖 3 中， d_{smin} 為最小冲刷深度、D 為橋墩直徑、D*為橋墩基礎直徑、 Y_{min} 為最小冲刷深度時橋基頂部距底床之高度。

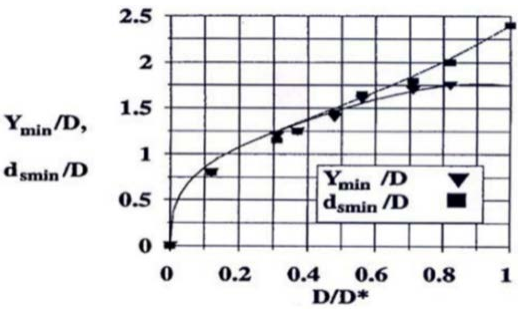


圖 3 墩徑比與冲刷深度之關係圖(Melville and Raudkivi ,1996)^[8]

2.5.3 底床質相對粗糙度(d₅₀/D)

粒徑級屬砂粒之非黏性底床質，當底床顆粒小至黏粒範圍時，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 and Ettema(1977)^[11]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。

2.5.4 橋墩間距(L_d)

陳啟宏(2005)^[2]認為當縱列均勻雙橋墩間距愈大時，水流沖擊下游橋墩之時間愈晚，因此當間距愈大，其上下游橋墩間距相互干涉愈小；反之橋墩間距愈小，造成上游近橋墩水位擁高的現象愈明顯，而壅起的最高點會隨著橋墩間距變大而降低。

2.5.5 相對水流強度(V/V_c)

Melville & Raudkivi(1977)^[7]曾詳細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)之無因次比值(V/V_c)對沖刷的影響，獲得以下結論：

- (1) 當 $V/V_c < 0.5$ 時，不產生沖刷
- (2) 當 $0.5 \leq V/V_c < 1.0$ 時，為清水流況
- (3) 當 $1.0 \leq V/V_c < 4.0$ 時，為含滓流況，為挾砂水流
- (4) 當 $V/V_c \geq 4.0$ 時，為挾砂沖刷並產生逆砂丘

2.5.6 泥砂幾何標準偏差(σ_s)

Raudkivi & Ettema(1977)^[11]指出在清水沖刷時，橋墩周圍局部沖刷深度隨底床標準偏差 σ_s 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 $\sigma_s > 1.3$ 時有護甲(amoring)現象產生，此時沖刷深度會變小。

三、試驗內容

3.1 試驗渠槽

本研究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

循環玻璃渠槽，渠槽主要配置如圖 4 所示，

其相關規格說明如下：

- (1) 試驗渠槽：渠槽全長 13.6m、寬 0.5m 及深 0.75m，渠槽側壁使用強化透明玻璃製成，以方便於試驗進行中觀察橋墩周圍之變化過程，並於渠槽末端設置尾水檻(tailwater gate)，用於控制試驗水流高度。
- (2) 供水系統：以 15HP(Horse Power)之抽水馬達於蓄水池中抽水，經由給水管送至定水頭水箱，供應水量至渠槽中。水流經過渠槽後流至尾水池，再經由排水道進入蓄水池，形成一個循環式的供水系統。
- (3) 流量控制：定水頭水箱至渠槽間設有一顯示式管路手動矩形閘閥，用於控制流量至渠槽中。而渠槽前端設有一 V 型堰(V-type weir)，以供量測試驗時之流量。

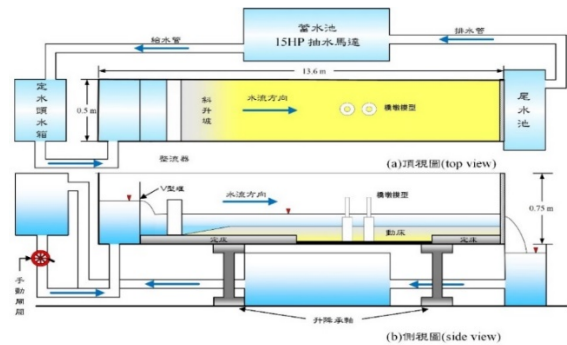


圖 4 渠槽配置圖

3.2 試驗橋墩模型

本研究之橋墩模型皆為圓柱型橋墩，為利於使用光纖視鏡觀測橋墩周圍局部冲刷歷程，墩身材質採用中空透明壓克力製成。模型大小依台灣西部主要河川之橋梁，非均勻橋墩墩徑比(d/D^*)設計落在 0.4 至 0.7 之間，及橋墩間距(L_d/D^*)大多為 1.2 至 3 的範圍，又因陳湘婷(2017)^[3]等前人研究結果，橋墩配置以 $D/D^*=0.4$ (其中 D 為上墩徑， D^* 為基礎墩徑)之冲刷減緩效果為最佳，因此本研究採用 $D/D^*=0.4$ (如圖 5)之雙橋墩配置進行水工試驗探討縱向雙橋墩在不同間距(L_d)及橋墩基礎覆土高 Y_f (上游橋墩)、 Y_r (下游橋墩)的配置下對橋墩局部冲刷之影響。本研究以均勻橋墩為對照組進行比較分析，詳如圖 6 所

示。

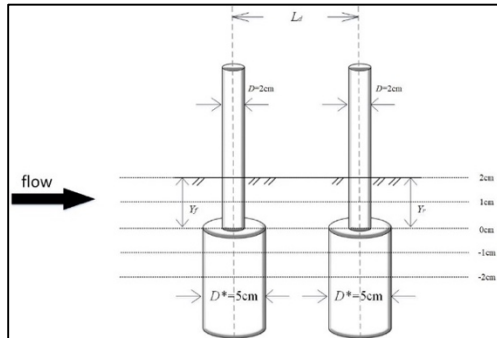


圖 5 非均勻縱列雙橋墩規格與配置($D/D^*=0.4$)

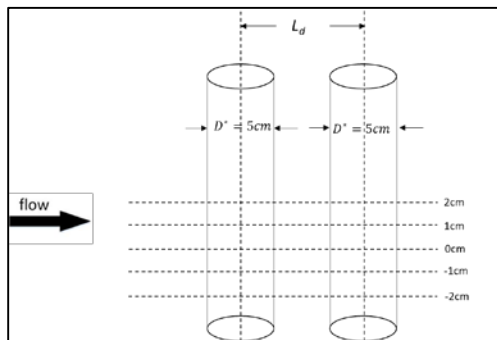


圖 6 均勻縱列雙橋墩規格與配置

3.3 試驗規劃

3.3.1 試驗河床質

本研究於渠槽中鋪設 35cm 厚之越南細砂，其河床質粒徑利用#20、#30、#40 號篩所篩出之三種泥砂粒徑加以混合，中值粒徑 d_{50} 為 0.67mm，標準偏差 σ_g 約為 1.23，如圖 7

所示。

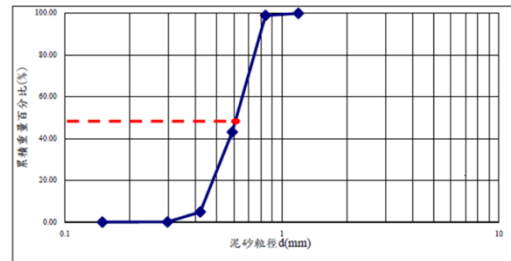


圖 7 試驗河床質粒徑分佈曲線圖

3.3.2 試驗流量

本試驗之試驗流量大小是利用水管上之顯示式管路手動矩形閘閥控制，水流從定水頭水箱經水路管線送至渠槽，再流至 V 型堰。V 型堰之流量率定曲線如圖 8，經回歸得(3.1)式。

$$Q = 0.8239H^2 - 0.6862H + 0.1453 \quad (3.1)$$

式中， Q =流量(cms)、 H =V 型堰溢流水深(m)

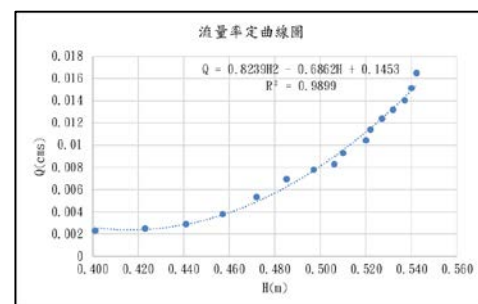
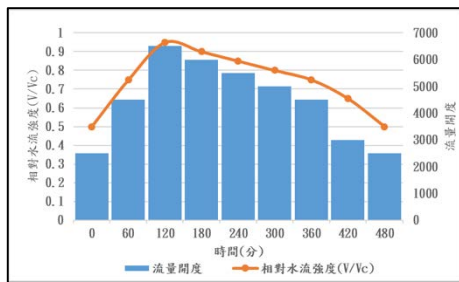


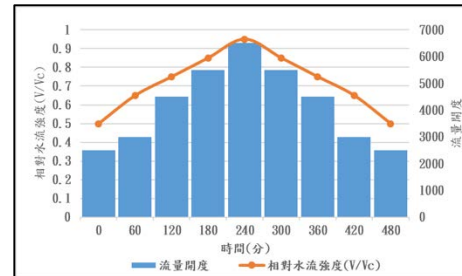
圖 8 V 型堰流量率定曲線

本研究主要模擬自然河川變量流情況下橋墩冲刷歷程與各參數之間的關係，故用階梯式變量流（stepped unsteady flow）作為試驗條件，將每一小時改變流量，探討流量隨時間改變對橋墩冲刷深度之影響。變量流形式分為前峰型(advanced peak)、中峰型(central peak)及後峰型(delayed peak)歷線，其流量歷線達尖峰流量 t_p 分別約為歷線全部延時 t 之 $1/3$ 、 $1/2$ 及 $2/3$ ，藉以模擬不同之天然降雨形式，詳如圖 9 所示。

(a)前峰型($t_p/t \approx 1/3$)



(b)中峰型($t_p/t \approx 1/2$)



(c)後峰型($t_p/t \approx 2/3$)

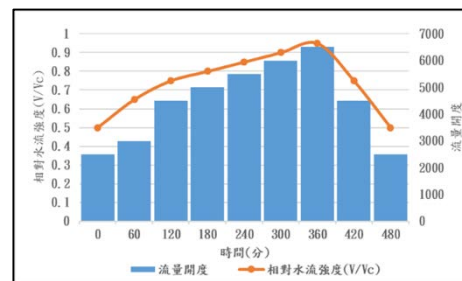


圖 9 變量流流量歷線型式

3.4 相對水流強度

本試驗設定為變量流流況下，在不同相對水流強度下進行局部冲刷歷程變化，其控制的方式如下：

- (1) 將顯示式管路手動矩形閘閥選取一流速，待其穩定後，將流速計放置於橋墩上游約 1 公尺處量測流速。
- (2) 由已知水深 y 及底床中值粒徑 d_{50} ，運用 Melville and Coleman (2000)^[10] 推估公式得底床質臨界啟動流速 V_c ，如(3.2)式。

$$\frac{V_c}{u_{*c}} = 5.75 * \log \left(5.53 \frac{y}{d_{50}} \right) \quad (3.2)$$

式 中 $u_{*c} = 0.0115 + 0.0125d_{50}^{1.4}$, $0.1mm <$

$d_{50} < 1mm$

$u_{*c} = 0.0305d_{50}^{0.5} - 0.0065d_{50}^{-1}$, $1mm < d_{50}$
 $< 100mm$

(3) 藉由流速計所測得上游接近流流速 V ,
且利用(3.2)式求得底床質臨界啟動速度
 V_c , 即可求得相對水流強度(V/V_c)。

(4) 調整流量控制閘閥調整流量大小, 得所
需之相對水流強度。

3.5 渠槽試驗條件

本試驗在趨近水平坡度($S \cong 0.001\%$)的渠床,
且鋪設泥砂中值粒徑 $d_{50}=0.62mm$ 之均勻泥
砂條件下進行, 並分別改變不同橋墩基礎覆
土高 Y_f (上游橋墩)、 Y_r (下游橋墩)、三種階
梯式變量流況(前峰型、中峰型、後峰型)

及縱向橋墩間距以橋墩基礎墩徑(D^*)的

1.25、2、3、4 倍距離條件下進行局部冲刷

試驗, 且利用光纖視鏡觀測橋墩前冲刷深度

變化歷程, 試驗條件如表 2 所示。

表 2 試驗配置條件

D/D*	L _d /D*	Y _f /D*	Y _r /D*	V/V _c
1.0	1.25	對照組 (均勻橋墩)	對照組 (均勻橋墩)	前峰型 中峰型 後峰型
	2			
	3			
	4			
0.4	1.25 3	0.2 (橋基未裸露)	0	中峰型
			-0.2	
		0 (齊平不均勻面)	0.4	
			0.2	
			-0.2	
			-0.4	
	1.25 2 3 4	-0.2 (橋基裸露)	0.2	前峰型 中峰型 後峰型
			0	
		0.2 (橋基未裸露)	0.2	
			0	
		0.2 (齊平不均勻面)	0	
			-0.2	
		-0.2 (橋基裸露)	-0.2	
			-0.2	

註：D=橋墩墩徑、D*=橋墩基礎墩徑、L_d=橋墩間距、Y_f=上游橋墩基礎覆土高、
Y_r=下游橋墩基礎覆土高、V=接近流平均流速、V_c=泥砂顆粒臨界啟動流速

3.6 試驗步驟

本研究試驗流程詳如圖 10。

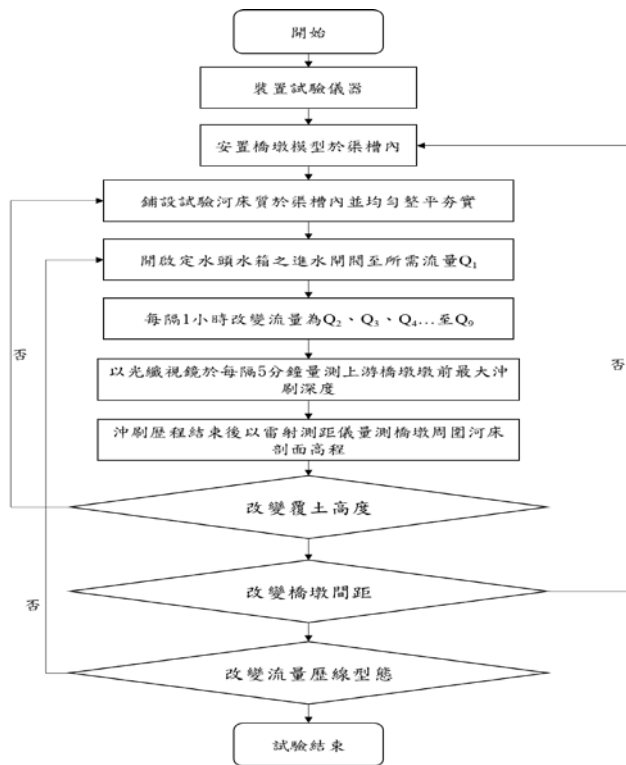


圖 10 試驗流程圖

四、結果分析與討論

本研究透過水工試驗模擬非均勻縱列雙橋墩於變量流況下，以不同橋墩間距(L_d)及不同橋墩基礎覆土高 Y_f (上游橋墩)、 Y_r (下游橋墩)，且觀測雙橋墩間局部沖刷之現象與機制，探討上下游連續橋墩間距(L_d)及橋墩基礎不均勻面高度差(H_y)於橋墩周圍河床之沖

淤現象。

4.1 沖刷坑與淤積堆之縱斷面變化

4.1.1 橋基不均勻面高度差($H_y=0D^*$)

由圖 11 至圖 14 得知，以覆土高而言，整體可以看出在任何橋墩間距下，均勻橋墩之上游橋墩墩前沖刷深度皆較不均勻橋墩深，係因均勻橋墩迎水面寬度($D=5\text{cm}$)較大，墩前壅水增高，導致向下射流之強度相對較大，且無不均勻面抵擋向下射流強度，墩前產生之沖刷深度最大。而不均勻橋墩之上游橋墩墩前沖刷深度皆是橋墩基礎裸露情況下($Y=-0.2D^*$)為最大，乃因橋基之迎水面寬度增加，向下射流之強度增大，且無覆土及不均勻面之保護效果，而無法發揮阻擋向下射流之強度。橋墩基礎未裸露時($Y=0.2D^*$)與橋墩基礎齊平時($Y=0D^*$)，因橋基之迎水面寬度較小，向下射流之強度較小，且有覆土高與不均勻面之保護效果，而減少墩前向下沖刷之現象。綜合而言，不均勻橋墩中以橋基裸露($Y=-0.2D^*$)之沖刷深度最大，橋基齊平($Y=0D^*$)之沖刷深度其次，橋基未裸露($Y=0.2D^*$)之沖刷深度最小。

以相同覆土高度於不同間距情況下之探討發

現，在間距為 $1.25D^*$ 情況下，會因上下游橋墩間距離過短，使水流通過上游橋墩所產生尾跡渦流尚未消散，便即到達下游橋墩，而無法有效延長下游橋墩之向下冲刷時間。在間距為 $3D^*$ 情況下因上下游橋墩間距離較長，所產生之尾跡渦流，有效的在兩墩間消散，從圖 13 可發現冲刷深度曲線呈凸字型，更在橋基齊平($Y=0D^*$)時形成小堆積丘。

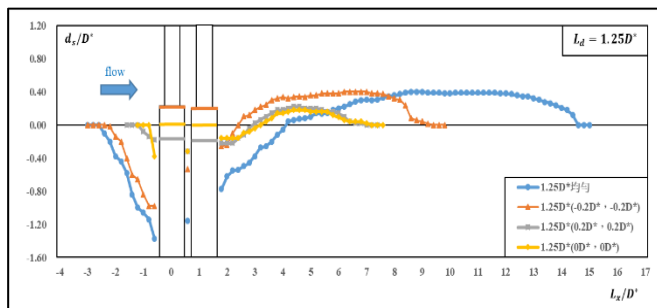


圖 11 橋墩間距 $1.25D^*$ 與覆土高度之河床縱斷面圖

($H_y=0D^*$)

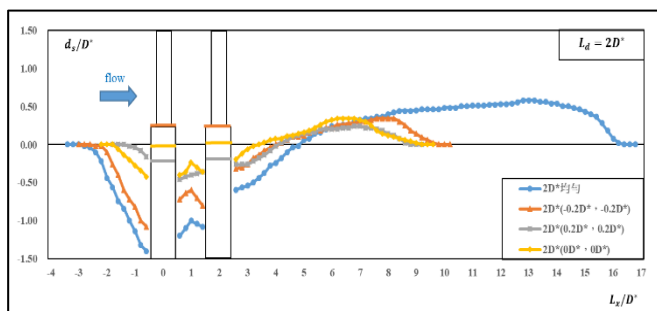


圖 12 橋墩間距 $2D^*$ 與覆土高度之河床縱斷面圖

($H_y=0D^*$)

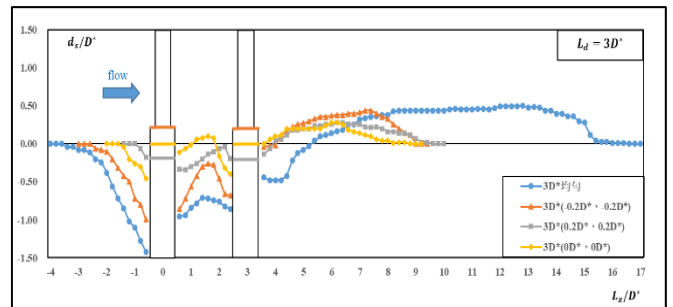


圖 13 橋墩間距 $3D^*$ 與覆土高度之河床縱斷面圖

($H_y=0D^*$)

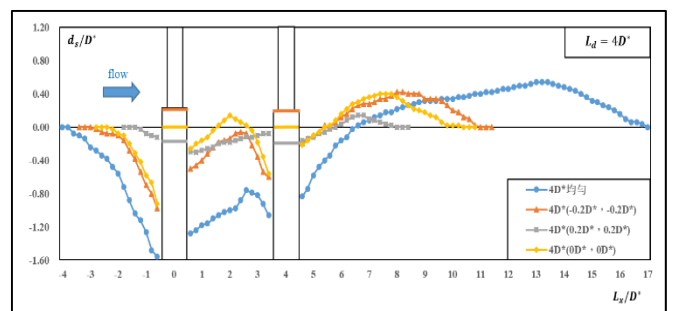


圖 14 橋墩間距 $4D^*$ 與覆土高度之河床縱斷面圖

($H_y=0D^*$)

4.1.2 橋基不均勻面高度差($H_y=0.2D^*$)

本節將以橋墩基礎不均勻面高度差 H_y 為 $0.2D^*$ ，上下游橋墩覆土高為 $(-0.2D^*, 0D^*)$ 及 $(0D^*, 0.2D^*)$ 於橋墩間距為 $1.25D^*$ 及 $3D^*$ 下進行試驗並探討其間河床之冲淤變化，詳如

圖 15 及圖 16。

上下游橋墩覆土高為 $(-0.2D^*, 0D^*)$ 及 $(0D^*, 0.2D^*)$ 時，在橋墩間距為 $1.25D^*$ 及 $3D^*$ 條件下，上游墩前沖刷深度皆較下游墩前沖刷深度為深，主要是因上游橋墩迎水面寬度較寬，產生向下射流較強，且缺乏覆土高保護而無法減弱向下射流之強度；而下游橋墩因受上游橋墩阻擋消減水流強度，再加上不均勻面齊平和低於河床，則有效的減低向下射流之強度。

上下游橋墩覆土高為 $(-0.2D^*, 0D^*)$ ，即上下游橋墩不均勻面分別位於河床面上 1cm (橋基裸露)與 0cm (覆土與不均勻面齊平)。上游橋墩之沖刷深度隨間距增大而增加，而下游橋墩沖刷深度在間距 $3D^*$ 時較間距 $1.25D^*$ 時為深，主要因間距 $1.25D^*$ 時受雙橋墩遮蔽效應影響加上不均勻面保護，間距 $3D^*$ 時其效應較小，僅受不均勻面之保護所致。

上下游橋墩覆土高為 $(0D^*, 0.2D^*)$ ，其沖刷深度亦隨間距增大而增加，但其深度小於上下游橋墩覆土高為 $(-0.2D^*, 0D^*)$ 之情況，主要是該配置上游有不均勻面，下游有不均勻面及覆土高之保護效果。而此配置下游橋墩

沖刷深度在間距 $1.25D^*$ 時卻較間距 $3D^*$ 時為深，可能係因間距為 $3D^*$ 有較長距離堆積上游沖刷之泥砂，且回填下游沖刷坑，不易於墩前產生沖刷。

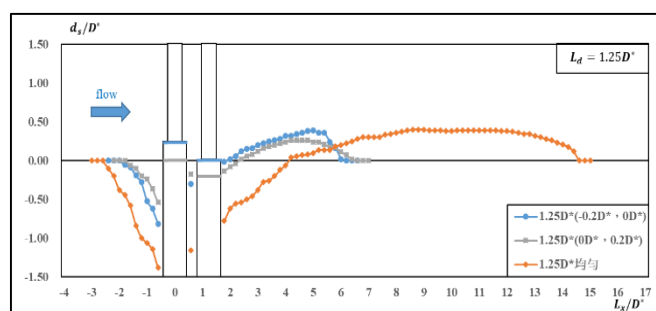


圖 15 橋墩間距 $1.25D^*$ 與覆土高度之河床縱斷面圖

($H_y=0.2D^*$)

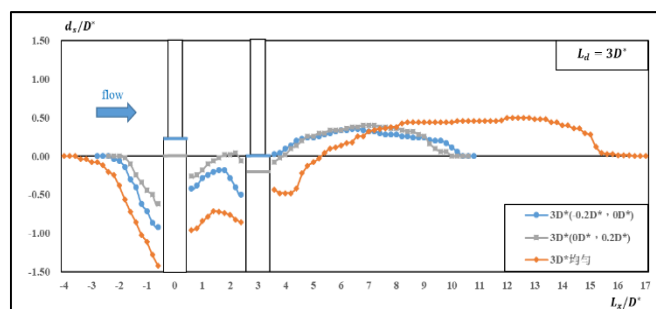


圖 16 橋墩間距 $3D^*$ 與覆土高度之河床縱斷面圖

($H_y=0.2D^*$)

4.1.3 橋基不均勻面高度差($H_y=-0.2D^*$)

由於前低後高之橋墩配置，上游橋墩迎水面

積較下游為小，水流經過上游橋墩時阻力較小，向下射流之能量較小。而下游橋墩迎水面積較大，產生墩前向下射流之能量較大，造成下游橋墩墩前沖刷深度加深之現象，詳如圖 17 及圖 18。

上下游橋墩覆土高為 $(0.2D^*, 0D^*)$ 時，即上下游橋墩不均勻面分別位於河床面下 1cm(橋基未裸露)與 0cm(覆土與不均勻面齊平)。由於上游橋墩有覆土高及不均面之保護，而下游僅有不均勻面之保護，無覆土高延緩沖刷深度之時間，因此在間距為 $1.25D^*$ 及 $3D^*$ 時，下游墩前沖刷深度均較上游墩前沖刷深度為深。

上下游橋墩覆土高為 $(0D^*, -0.2D^*)$ 時，不均勻面屬前低後高之橋墩配置，但其沖刷結果卻為上游橋墩沖刷深度較下游橋墩沖刷深度為深，乃因上游橋墩所沖刷之泥砂受馬蹄型渦流之作用，將泥砂運移至兩墩間，並形成堆積丘，又因下游橋墩之不均勻面位置較高，產生遮蔽效應以延緩下游橋墩沖刷時間及強度，再加上上游墩前沖刷之泥砂回填至下游墩前沖刷坑，所以造成此結果。在間距

為 $3D^*$ 時，可以明顯看出兩墩間有堆積之現象，而下游墩前因橋基裸露，無不均勻面及覆土高之保護效果，產生較劇烈沖刷現象，剛好上游泥砂回填沖刷坑，及在間距為 $1.25D^*$ 時因兩墩間距短，上游沖刷之泥砂快速被帶至下游，無法有效堆積與回填，但因遮蔽效應的影響，皆使下游墩前沖刷深度較上游為小。

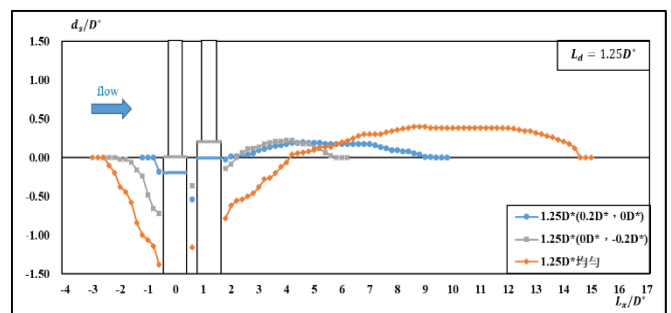


圖 17 橋墩間距 $1.25D^*$ 與覆土高度之河床縱斷面圖

($H_y = -0.2D^*$)

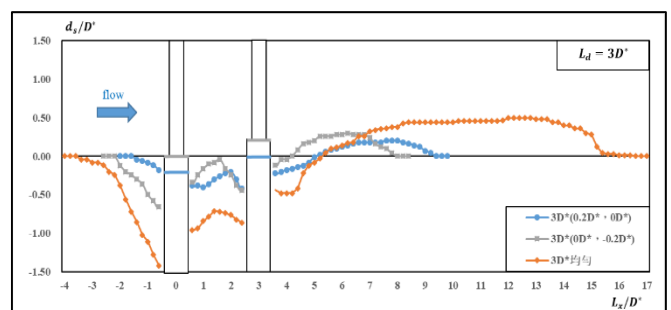


圖 18 橋墩間距 $3D^*$ 與覆土高度之河床縱斷面圖($H_y = -0.2D^*$)

4.1.4 橋基不均勻面高度差($H_y = 0.4D^*$)

本節將以橋墩基礎不均勻面高度差 H_y 為 $0.4D^*$ ，在上下游橋墩覆土高($-0.2D^*$ ， $0.2D^*$)及($0D^*$ ， $0.4D^*$)於橋墩間距為 $1.25D^*$ 及 $3D^*$ 下進行試驗並探討其間河床之沖淤變化，詳如圖 19 及圖 20。本節與 4.1.2 節 $H_y = 0.2D^*$ 相較下，上游橋墩之不均勻面較下游橋墩之不均勻面更高。

上下游橋墩覆土高為($-0.2D^*$ ， $0.2D^*$)，即上、下游橋墩不均勻面分別位於河床面上 1cm 與面下 1cm 。結果顯示上游沖刷深度因橋基裸露產生較大向下射流較下游為深，而下游因橋基未裸露及上游橋墩阻擋削減水流強度，以致於沖刷深度較小。

上下游橋墩覆土高($0D^*$ ， $0.4D^*$)為上游橋墩基礎之不均勻面與覆土齊平，下游橋墩基礎未裸露之狀態。由於上游橋墩迎水面較大，而下游橋墩迎水面較小，且受不均勻面及覆土高之削減水流強度，因此在下游橋墩墩前沖刷深度均低於上游橋墩墩前沖刷深度。

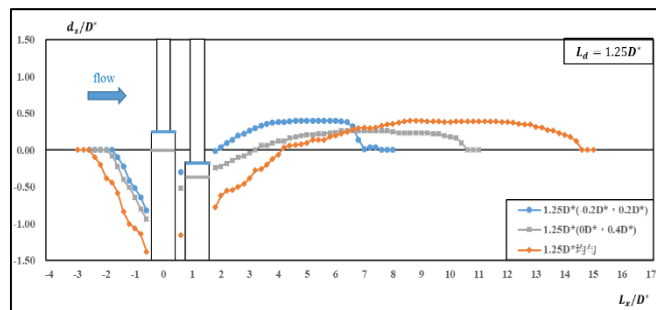


圖 19 橋墩間距 $1.25D^*$ 與覆土高度之河床縱斷面圖
($H_y = 0.4D^*$)

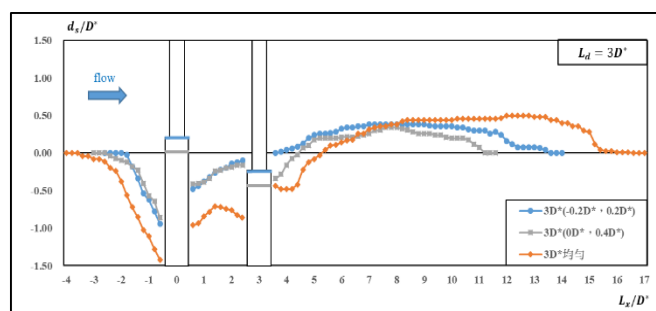


圖 20 橋墩間距 $3D^*$ 與覆土高度之河床縱斷面圖
($H_y = 0.4D^*$)

4.1.5 橋基不均勻面高度差($H_y = -0.4D^*$)

本節將以橋墩基礎不均勻面高度 H_y 為 $-0.4D^*$ ，在上下游橋墩覆土高($0.2D^*$ ， $-0.2D^*$)及($0D^*$ ， $-0.4D^*$)於橋墩間距為 $1.25D^*$ 及 $3D^*$ 下進行試驗並探討其間河床之沖淤變化，詳如圖 21 及圖 22。本節與 4.1.3 節

$H_y = -0.2D^*$ 相較下，下游橋墩之不均勻面較上游橋墩之不均勻面更高。 $H_y = -0.4D^*$ 之下游橋墩前沖刷深度較 $H_y = -0.2D^*$ 更加嚴重，主要為下游橋墩不均勻面皆高於覆土，迎水面積較大，產生向下射流之能量較大，無覆土高可延緩沖刷深度時間，因此造成下游橋墩前沖刷深度更加劇烈之現象。在橋墩間距為 $3D^*$ 下其沖刷深度幾乎與均勻橋墩相同，可知該非均勻橋墩之不均勻面幾乎未發揮功能。

上下游橋墩覆土高($0.2D^*$ ， $-0.2D^*$)及($0D^*$ ， $-0.4D^*$)在橋墩間距為 $1.25D^*$ 及 $3D^*$ 下之沖淤現象大致與上下游橋墩覆土高($0.2D^*$ ， $0D^*$)及($0D^*$ ， $-0.2D^*$)相同，由於下游橋墩不均勻面位置較高有效的阻擋上游沖刷坑之泥砂，但也因此產生較大向下射流，而導致兩墩間之泥砂皆受較強烈水流帶至下游橋墩後方而後落淤成堆積丘。

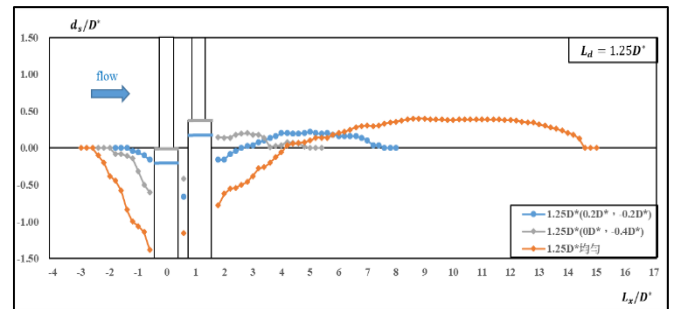


圖 21 橋墩間距 $1.25D^*$ 與覆土高度之河床縱斷面圖

($H_y = -0.4D^*$)

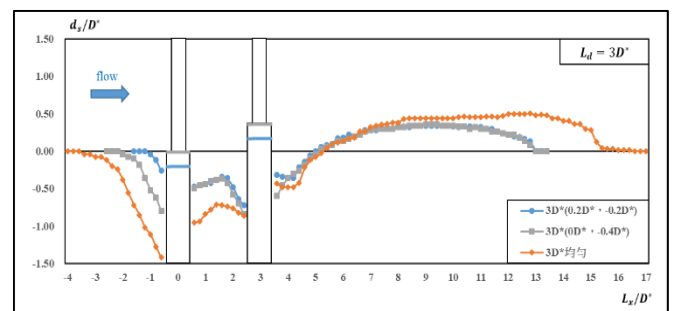


圖 22 橋墩間距 $3D^*$ 與覆土高度之河床縱斷面圖($H_y = -$

$0.4D^*$)

4.2 橋墩間距與沖刷深度之關係

由圖 23 可知上游橋墩墩前沖刷深度(d_f/D^*)與橋墩間距(L_d/D^*)之關係不甚明顯，意即上游橋墩墩前沖刷深度受橋墩間距影響有限。在均勻橋墩與橋墩基礎齊平($Y=0D^*$)時，其沖刷深度有隨橋墩間距增大而增大之趨勢，

而在橋墩基礎未裸露($Y=0.2D^*$)時與橋墩基礎裸露($Y=-0.2D^*$)時，其最大冲刷深度未隨橋墩間距增大而有增減之現象，意即冲刷深度受間距影響極小。

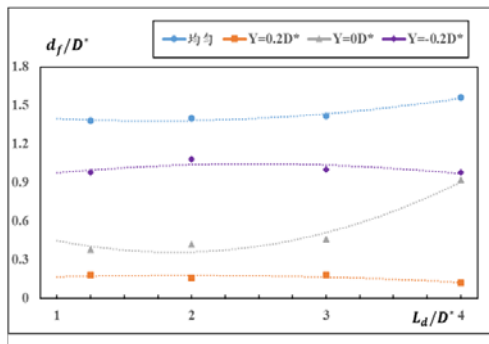


圖 23 上游橋墩墩前冲刷深度(d_f/D^*)與橋墩間距(L_d/D^*)之關係圖

圖 24 顯示下游橋墩墩前冲刷深度(d_r/D^*)與橋墩間距(L_d/D^*)之關係，其結果與上游橋墩墩前冲刷現象相近(詳如圖 22)。整體而言，除橋墩基礎未裸露($Y=0.2D^*$)時冲刷深度隨間距之增大而減小，而橋墩基礎與覆土高齊平($Y=0D^*$)時，其冲刷深度有隨橋墩間距(L_d/D^*)增大而增大之趨勢。均勻橋墩與橋墩基礎裸露($Y=-0.2D^*$)時，其冲刷深度與橋墩間距之關係較不明顯。

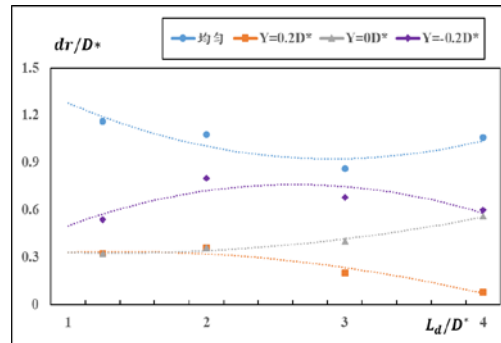


圖 24 下游橋墩墩前冲刷深度(d_r/D^*)與橋墩間距(L_d/D^*)之關係圖

由圖 25 至圖 27 得知，當 $Y=-0.2D^*$ 及 $Y=0D^*$ 時以上游墩前之冲刷深度為最大，下游墩前其次，墩間為最小。而當 $Y=0.2D^*$ 時以墩間為最大，下游墩前其次，上游墩前為最小，推測當 $Y=0.2D^*$ 時上下游橋墩受不均勻面及覆土之保護，上游墩前冲刷之泥砂較少，不足以補充墩間冲刷坑，導致於上下游橋墩間冲刷較激烈。反之當 $Y=-0.2D^*$ 及 $Y=0D^*$ 時上下游橋墩受未受不均勻面及覆土之保護，上游墩前冲刷之泥砂較多，以致於冲刷泥砂隨水流落淤補充於上下游橋墩間，因此墩間冲刷深度隨距離增加而有減小之現象。

邱琨皓、王傳益、詹明翰：
非均勻縱列雙橋墩冲刷防治之研究

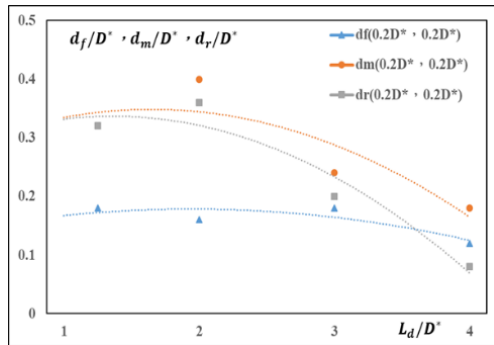


圖 25 覆土高 $Y=0.2D^*$ 於各間距之冲刷深度比較圖

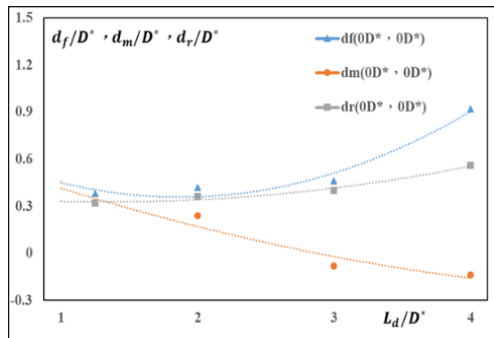


圖 26 覆土高 $Y=0D^*$ 於各間距之冲刷深度比較圖

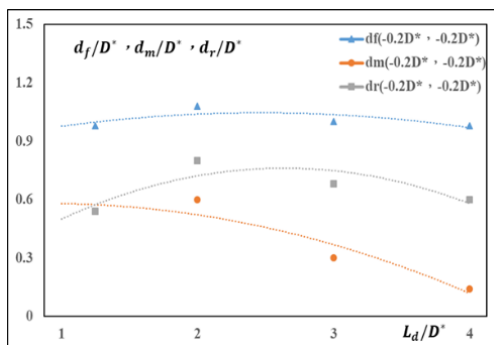


圖 27 覆土高 $Y=-0.2D^*$ 於各間距之冲刷深度比較圖

4.3 冲刷深度減緩率及安全度之綜合分析

本研究以橋墩墩前冲刷深度減緩率(R_p)及安全度(S)作為研判指標進行綜合分析比較，其示如(4.1)式、(4.2)式。

$$R_p(\%) = \left(\frac{d_{su} - d_s}{d_{su}} \right) \times 100\% \quad (4.1)$$

式中 R_p 為橋墩墩前冲刷深度減緩率， d_{su} 為均勻橋墩墩前冲刷深度， d_s 為非均勻橋墩墩前冲刷深度。

考量橋墩冲刷安全情況下，訂定安全度(S)做為評估雙橋墩安全與否之指標，並依據水利構造物檢查及安全評估技術規範，將 S 值分為四部分，當 $S < 25$ 時為立即改善；當 $25 \leq S < 50$ 時為注意改善；當 $50 \leq S < 75$ 時為計畫改善；當 $S \geq 75$ 時為正常。由於上下橋墩之重要性均相同，只要其中任何一支橋墩損毀，即造成安全疑慮，因此上下游橋墩墩前最大冲刷深度，權重皆為 50%。

$$S = [(R_{fp}) \times 0.50] + [(R_{rp}) \times 0.50] \quad (4.2)$$

式中 R_p 為上游橋墩墩前冲刷深度減緩率，

R_{rp} 為下游橋墩墩前沖刷深度減緩率。

表 3 可知，當上游橋墩基礎未裸露時($Y_f = 0.2D^*$)，其沖刷深度皆小於橋墩基礎齊平($Y_f = 0D^*$)及裸露時($Y_f = -0.2D^*$)，而其下游橋墩則因各種不同覆土高產生不同沖刷深度，主要分為前後均高、前低後高及前高後低。其中以在橋墩間距 $3D^*$ 時覆土高為 $(0.2D^*$ ， $0.2D^*$) 下安全度為最佳，乃因橋基上方同時有不均勻面及覆土保護，可減低橋墩沖刷深度，為橋墩基礎之重要保護措施。

表 3 沖刷深度減緩率及安全度比較表

L_d / D^*	Y_f / D^*	Y_r / D^*	Y_f 最大 沖刷深 度(cm)	Y_f 沖刷 深度減 緩率(%)	Y_r 最大 沖刷深 度(cm)	Y_r 沖刷 深度減 緩率(%)	安全度 (%)
1.25	均勻橋墩		6.9	----	5.8	----	---
	0	0	1.9	72.5	1.6	72.4	72.5
	0.2	0.2	0.9	87.0	1.6	72.4	79.7
	-0.2	-0.2	4.9	29.0	2.7	53.4	41.2
	-0.2	0	4.1	40.6	1.5	74.1	57.4
	0.2	0	0.9	87.0	2.7	53.4	70.2
	0	0.2	2.7	60.9	0.9	84.5	72.7
	0	-0.2	3.6	47.8	1.8	69.0	58.4
	-0.2	0.2	4.1	40.6	1.5	74.1	57.4
	0.2	-0.2	0.8	88.4	3.3	43.1	65.8
	0	0.4	4.7	31.9	2.6	55.2	43.5
	0	-0.4	3.0	56.5	2.1	63.8	60.2
3	均勻橋墩		7.1	----	4.3	----	----
	0	0	2.3	67.6	2.0	53.5	60.5
	0.2	0.2	0.9	87.3	1.0	76.7	82.0
	-0.2	-0.2	5.0	29.6	3.4	20.9	25.3
	-0.2	0	4.6	35.2	2.5	41.9	38.5
	0.2	0	0.9	87.3	2.1	51.2	69.2
	0	0.2	3.1	56.3	0.3	93.0	74.7
	0	-0.2	3.3	53.5	2.2	48.8	51.2
	-0.2	0.2	4.7	33.8	0.5	88.4	61.1
	0.2	-0.2	1.3	81.7	3.6	16.3	49.0
	0	0.4	4.3	39.4	0.8	81.4	60.4
	0	-0.4	4.0	43.7	4.2	2.3	23.0

註： D^* = 橋墩基礎墩徑、 L_d = 橋墩間距、 Y_f = 上游橋墩基礎覆土高、 Y_r = 下游橋墩基礎覆土高

由表 4 發現上游橋墩最大沖刷深度不隨間距及峰型而改變，下游橋墩則因間距的不同有些微差異，橋墩間距為 $2D^*$ 時，沖刷深度最大，而橋墩間距為 $1.25D^*$ 時，則因間距過小，且受遮蔽效應影響，導致水流流速減緩，使沖刷深度減少。當橋墩間距由 $3D^*$ 增至 $4D^*$ 時，橋墩基礎受到不均勻面及覆土高

五、結論與建議

5.1 結論

- (1) 上游橋墩墩前沖刷深度主要是受覆土高及不均勻面位置之影響，而較不受間距之影響，其沖刷深度皆是以橋基裸露($Y=-0.2D^*$)之沖刷深度最大，橋基齊平($Y=0D^*$)之沖刷深度其次，橋基未裸露($Y=0.2D^*$)之沖刷深度最小，其安全性最高。而下游橋墩墩前沖刷深度則受間距、上游不均勻面位置及本身不均勻面位置之影響，沖刷變化較多樣性，但大致上沖刷深度仍以橋基裸露時為最大。
- (2) 在四種橋墩間距情況下，無論在上游橋墩還是下游橋墩墩前沖刷深度，均以無不均勻面的均勻橋墩為最深，主要因橋墩迎水面寬度較大，產生較大強度之向下射流，加上無不均勻面之保護，因此造成沖刷深度較深。而具有不均勻面的不均勻橋墩，雖因其位置不同，會產生不一樣的沖刷深度，但均比較無不均勻面之均勻橋墩來的小，主要乃因不均勻面有效的減緩向下射流之強度，發揮不均勻面之阻擋效應所致。
- (3) 當間距為 $1.25D^*$ 時，因橋墩間距較短，當水流通過上游橋墩後，馬蹄型渦流及尾跡渦流隨即到達下游橋墩，下游橋墩受上游橋墩遮蔽，兩墩間沖刷現象較不明顯，因此可視為單一橋墩沖刷。當間距大於 $3D^*$ 時，水流通過上游橋墩後，由於馬蹄型渦流及尾跡渦流，將泥砂顆粒帶至下游橋墩，橋墩間距相對較長，泥砂漸次堆積於兩墩間，以致下游橋墩有較小之沖刷深度。

之保護影響，其沖刷深度越來越小，且有如兩座單一橋墩無相互影響之沖刷現象，同時可知在相同覆土高度下，最大沖刷深度不受峰型改變而有顯著的變化。

表 4 $Y=0.2D^*$ 之沖刷深度減緩率及安全度比較表

L_d /D*	變量 流峰 型	Y_f 最大 冲刷 深度 (cm)	Y_f 冲刷 深度 減緩 率 (%)	Y_r 最大 冲刷 深度 (cm)	Y_r 冲刷 深度 減緩 率 (%)	安全 度 (%)	平均 安全 度 (%)
1.25	前峰 型	0.6	91.3	1.3	77.6	84.4	82.0
	中峰 型	0.9	87.0	1.6	72.4	79.7	
	後峰 型	0.7	89.9	1.5	74.1	82.0	
2	前峰 型	0.9	87.1	1.9	64.8	76.0	77.6
	中峰 型	0.8	88.6	1.8	66.7	77.6	
	後峰 型	0.7	90.0	1.7	68.5	79.3	
3	前峰 型	0.7	90.1	1.1	74.4	82.3	82.7
	中峰 型	0.9	87.3	1.0	76.7	82.0	
	後峰 型	0.8	88.7	0.9	79.1	83.9	
4	前峰 型	0.8	89.0	0.6	85.4	87.2	87.8
	中峰 型	0.6	91.8	0.4	90.2	91.0	
	後峰 型	0.9	87.7	0.7	82.9	85.3	
註：D*＝橋墩基礎墩徑、L _d ＝橋墩間距、Y _f ＝上游橋墩基礎覆 土高、Y _r ＝下游橋墩基礎覆土高							

- (4) 在三種變量流峰型中，橋墩局部冲刷深度會隨著水流強度增強而向下刷深，在最大洪峰到達後發生最大冲刷深度。因此在相同覆土高配置及相同間距下，最大冲刷深度僅在發生時間上有所差異，而最大冲刷深度則不因峰型不同有太大差異。
- (5) 整體而言，在相同橋墩間距情況下以橋墩基礎為未裸露時($Y=0.2D^*$)之安全度為最高，且於三種變量流作用下安全度(S)隨著橋墩間距之增大而有增高之趨勢。當上下游墩徑比均為 $D/D^*=0.4$ ，於覆土高度 $Y/D^*=0.2$ 至 -0.2 、橋墩間距 $L_d=1.25D^*$ 至 $4D^*$ 及三種變量流流況作用下，以橋墩間距為 $4D^*$ 時之安全度為最佳，乃因橋墩基礎上同時有不均勻面及覆土保護，能有效減緩冲刷時間及阻擋向下射流，大幅降低橋墩冲刷深度，而有效的保護橋墩基礎與減緩橋墩基礎周圍之局部冲刷，顯示覆土高度與不均勻面為橋墩基礎之重要保護措施。

5.2 建議

- (1) 本研究針對水平坡降($S\cong 0.001\%$)進行試驗，因台灣現地河川坡度陡流急，建議未來可調整為符合現地之坡度進行試驗。
- (2) 本研究屬於清水冲刷試驗，因天然河川多為含滓冲刷，且上游來流夾帶泥砂，有助於回淤冲刷坑之效果，於上下游橋墩間之冲淤變化應有所改變，建議未來可進行在含滓冲刷條件下之試驗。
- (3) 本研究冲刷歷程僅對上游橋墩墩前進行量測比較，建議未來可增加下游橋墩墩前冲刷歷程的量測，以探討上下游墩前冲刷深度隨

時間改變之差異性。

- (4) 本研究採用非均勻橋墩進行雙橋墩之冲刷，建議未來可增加犧牲樁群、固床工及導流板等多種保護裝置，來減緩橋墩周圍之局部冲刷現象。

參考文獻

1. 李俊穎，2005，「歷線型流況下同心圓局部冲刷之研究」，逢甲大學水利工程研究所碩士論文。
2. 陳啟宏，2005，「以最小平方有限元素法探討雙橋墩流場變化」，國立中原大學土木工程研究所碩士論文，第 57~92 頁。
3. 陳湘婷，2017，「定量流非均勻橋墩於橋墩冲刷防治之研究」，逢甲大學水利工程研究所碩士論文。
4. 陸浩、高冬光，1991，「橋梁水力學」，人民交通出版社，第 167~184 頁。
5. Dargahi, B., (1990). "Controlling Mechanism of Local Scouring." *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol.116, No.10, pp.1197-1214.
6. 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.
7. Melville, B. W., and A. J. Raudkivi, (1977). "Flow Characteristics in Local Scour at Bridge Piers." *Journal of Hydraulic Research*, Vol.15, No.4, pp.373-380.

8. Melville, B. W., and A. J. Raudkivi, (1996).
“Effects of Foundation Geometry on Bridge
Pier Scour.” *Journal of Hydraulic Engineering*,
pp.203-209.
9. Melville, B. W., and A. J. Sutherland, (1988).
“Design Method for Local Scour at Bridge
Piers.” *Journal of Hydraulic Engineering*,
ASCE, Vol.114, No.10, pp.1210-1226.
10. Melville, B. W., and S. E. Coleman, (2000).
“Bridge Scour.” *Water Resources Publications*,
LLC, Highlands Ranch, Colorado, USA.
11. Raudkivi, A. J., and R. Ettema, (1977). “Effect
of Sediment Gradation on Clear Water Scour.”
Journal of Hydraulic Engineering, ASCE,
Vol.109, No.3, pp.338-349.
12. Raudkivi, A. J., (1986). “Functional Trends of
Scour at Bridge Piers.” *Journal of Hydraulic
Engineering*, ASCE, Vol.112, No.1, January,
pp.1-13.

水土保持學報 51 (1): 2659-2682 (2021)

Journal of Soil and Water Conservation, 51 (1): 2659-2682 (2021)

109 年 8 月 16 日收稿

109 年 9 月 15 日修改

109 年 10 月 26 日接受