

變量流流況下環圈柱保護工於橋墩沖刷防治之研究

王傳益⁽¹⁾ 陳雍讓⁽²⁾ 楊敏宏⁽³⁾ 林長葵⁽⁴⁾ 何璟浩⁽⁴⁾

摘 要

台灣每年六月至十月之洪水期間，因颱風及滯留鋒面影響往往造成大豪雨，加上台灣溪流坡度陡峭、造成洪水時流速湍急，因此豪雨形成之高洪峰流量常引發橋梁劇烈沖刷，造成橋梁周邊土砂流失，進而危害橋梁安全。近年因颱風造成災害，如 2008 年卡玫基颱風造成大甲溪后豐大橋落橋事件、2009 年莫拉克颱風造成高屏溪雙園大橋落橋等事件。因此本研究基於橋梁基礎安全考量，針對環圈柱橋墩保護工進行相關研究，期能提出減緩橋墩沖刷之新工法，以供相關單位於工程設計之參考。

本研究利用水工試驗模擬均勻泥砂河床質於中峰型變量清水流流況下，不同配置環圈柱保護工之橋墩沖刷保護效果。針對環圈柱設置之距離($L/b=2、3、4$)及環圈柱之高度($h=\Delta y、y、2y$)不同參數條件下，探討環圈柱消除水流動力及降低橋墩之沖刷深度影響，以獲致較佳橋墩保護工之配置模式。研究結果顯示，設置環圈柱保護工均較未設置保護工之橋墩墩前最大沖刷深度為小，顯見環圈柱具減緩橋墩沖刷之功能。而保護工之最佳設置高度為 $h/b=3.6$ ；最佳設置距離以 2 倍墩徑為最佳，其橋墩沖刷減緩率為 34.3%。

(**關鍵字**：環圈柱保護工、變量流、沖刷減緩率)

Pier Scour Prevention with Ring Columns Protection Worksunder Unsteady Flows

Chuan I Wang⁽¹⁾ Yong Rang Chen⁽²⁾ Min Hong Yang⁽³⁾ Chang Kuwi Lin⁽⁴⁾
Ching Hao He⁽⁴⁾

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

ABSTRACT

Heavy rainfall frequently occurs during the period of June to October in the

(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) 逢甲大學土木工程學系碩士

(3) 逢甲大學水利工程與資源保育學系碩士

(4) 逢甲大學水利工程與資源保育學系碩士生

summer in Taiwan due to the effects of typhoons and stagnation front. High flows and typhoon-induced floods frequently result in severe bridge scours and pier foundation damages. For example, typhoon Kalmaegi (2008) and Morakot (2009) caused heavy damages on Ho-Fon bridge in the Da-jia river and Shuang-Yuan bridge in the Kao-Ping river, respectively. To protect the bridge foundation, the use of ring column as a pier scour countermeasure is reported. In this study, hydraulic model experiments with ring column protection works are carried out to search for the ideal arrangements to reduce the bridge scour. It can be served as a reference of design for relevant agencies.

A series of experiments were conducted with uniform sediment under the clear-water advanced unsteady flow conditions to evaluate the effectiveness of different ring column protection arrangements for protecting the bridge. Various parameters, including diameter ($L/b=2, 3, 4$), height ($h=\Delta y, y, 2y$), ring columns protection works were considered in the experiments. Laboratory data are used to assess the influence of each parameter on reducing the kinetic energy of the flow and to propose optimal allocations. Research results show that the maximum scour depth in front of the pier with ring column protection work is less than that without protection work, indicating the ring column protection work obviously has the function of reducing pier scour. It is found that the best pier scour protection results can be obtained when the ring column protection works are set at a height of 3.6 times of the pier diameter, and a distance of 2 times of the pier diameter flow conditions. The corresponding scour depth reduction rate is 34.3%.

(**Keywords** : Ring column protection works, Unsteady flow, Scour depth reduction rate.)

前言

底床之冲刷，使得基礎或保護工破壞而影響橋梁安全。

1.1 研究動機

每逢豪雨期間，河川的流量劇增，再加上台灣地形坡降大，使得洪水急速傾洩而下，高速的洪水除了對底床進行激烈的冲刷，在橋墩周圍加速局部冲刷，使橋墩周圍底床降低，造成基樁的裸露，再加上防砂壩與固床工的設施，使得泥砂無法補充，破壞輸砂平衡，危及橋梁安全。而目前工程上常用之包墩或蛇籠工法，若規劃或施工不當，將會因攔阻水流造成鄰近兩橋墩之束縮效應而加速

當橋墩因冲刷而產生嚴重裸露時，為了橋墩安全常在其周圍佈置保護工，如異形塊、蛇籠，以抵抗冲刷，於橋梁斷面處產生較堅強的保護層，若此保護層未受到破壞時，則橋墩冲刷可以控制；反之，一旦遭受破壞時，常常僅於某一局部處所產生冲刷，此局部破壞形成一弱面，由於水流集中於主流主深槽，單寬流量加大，水流將由此弱面開始形成劇烈的垂向冲刷，而加劇冲刷深度，產生向源冲刷問題，進而造成橋梁之破壞，如高屏大

橋斷橋即為一顯著的案例。

傳統之混凝土橋墩保護工，於規劃設計或施工不當時，可能因攔阻水流而造成河道內及相鄰橋墩間之束縮冲刷，使橋墩及橋基保護工破損，進而影響安全，本研究因此應用有彈性及具有透水性之橡皮環圈組成之圓柱體，置於橋墩上游，降低水流衝擊橋墩之動能，達到減少泥砂沖淤保護橋墩之目的。

1.2 研究目的

目前國內外用於橋墩保護工法，常見的有拋石控制法、河床控制法及水流導流法，各種方法均有其優缺點，若依配置區位可分為橋墩上游之導流法(如環圈堆)，橋墩本身之保護工法(如拋石工法)及橋墩下游之沉降泥砂工法(如固床工)。

環圈本體為具彈性內部空心之圓形橡膠圈，以資源永續利用觀點而言，未來環圈柱運用於現場施工可由廢棄輪胎等天然材料或事業廢棄材料加以製作，達到物資再利用的目標，並解決施工材料取得不易的問題，期能降低施工成本，以提供經濟、實用且符合資源再利用的橋墩冲刷保護新工法。

本研究主要針對在變量流情形下環圈柱對減緩橋墩冲刷的保護效果；並討論改變環圈柱設置距離及設置高度時，橋墩周圍之局部冲刷情形，藉以瞭解環圈柱保護工之最佳配置，達到有效減緩冲刷保護橋墩之目標，期能提供橋墩管理相關單位於工程設計之參考，確保橋梁之安全。

文獻回顧

橋梁為橫跨河川的重要交通建設，然因

興建橋墩使得水流的通水斷面積減小，造成束縮現象，導致橋墩上游發生墩前壅水的情況。而在橋墩周圍由於通水斷面積減少，使得流速增加、單寬流量變大，造成橋墩的冲刷現象。一般而言，橋梁的破壞主因是受水流淘刷，而造成基礎裸露，水流流經橋墩前緣會產生向下射流及周圍之馬蹄型渦流，而使橋墩發生局部冲刷，進而影響橋墩安全。本研究針對前人所做橋墩冲刷之相關研究及其保護工加以探討。

2.1 橋墩冲刷之分類

橋梁的破壞一般是橋基因水流冲刷，使得河床下降導致橋基裸露，而造成橋墩損害。Raudkivi(1986)及陸浩、高冬光(1991)針對其冲刷情形，將橋墩冲刷現象可以分為以下三個部分：一般冲刷、束縮冲刷及局部冲刷，分別說明如下：

- (一)一般冲刷(*general scour*)：指河道未設置任何結構物時，水流對河床冲刷造成河段高程下降的情況。
- (二)束縮冲刷(*constriction scour*)：指橋墩或橋台興建、低水護岸設置、河道窄縮皆使得河道通水斷面積減小，影響正常水流情況，形成阻水效應，造成水流因通水斷面束縮而導致迴水效應(*backwater*)，使通過橋墩附近的水流流速增加，進而對橋墩附近的河床冲刷。
- (三)局部冲刷(*local scour*)：指河道中因存在橋墩或水工結構物，對於水流產生局部的阻礙與干擾現象，迫使水流在橋墩周圍形成向下射流、馬蹄形渦流、墩前壅水、尾跡渦流等流況現象，造成冲刷坑之情形稱為局部冲刷。

前人沖刷研究之輸砂公式如：Einstein 法、Meyer-Peter 法，均適用於平衡條件下；局部沖刷情況卻處於不平衡條件下，水流對渠道產生的沖刷。Laursen(1962)綜合許多沖刷現象提出四個一般化的沖刷理論：

- (一)沖刷率等於輸出沈澱之能力與輸入此沖刷區供給率差值。
- (二)流動斷面若因沖蝕而擴大，則沖刷率會減少。
- (三)對於一已知的起始條件，會有一極限的沖刷範圍。
- (四)極限沖刷範圍隨時間而逐漸接近。

2.2 橋墩沖刷因子之分類

影響橋墩沖刷因子可分為，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：

- (一)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)。
- (二)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)。
- (三)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_g)、泥砂臨界啟動流速 (V_c)。
- (四)時間：沖刷時間 (T)、沖刷達平衡所需時間 (T_e)。

2.3 橋墩保護工

現今橋墩沖刷保護工法可概分為拋石控

制法、河床控制法及水流導流法三大類，茲將各方法說明如下：

- (一)拋石控制法：於橋墩周圍設置天然碎石層(拋石層)，使橋墩周圍泥砂形成護甲現象(armoring phenomena)，以達到抑制橋墩發生沖刷現象。目前台灣河川橋墩大部分設置異形塊或蛇籠工法來進行保護，而產生護甲作用來抑制沖刷發展。此種工法最大的缺點，由於異形塊與河床為兩種不同介質，故無法結合，且因干擾流場，造成結構體之不安定，導致保護效果折減而破壞。
- (二)河床控制法：橋墩沖刷使橋墩周圍底床下降，造成橋墩基礎外露，為改善基礎外露而危及橋梁安全，部分橋梁於橋墩之下游處設置固床工，來減緩流速，使泥砂沉降，以提高橋墩周圍河床，降低橋墩沖刷對橋梁安全的影響。
- (三)水流導流法：目前國外主要方法為：替代性群樁(sacrificial piles)、套環法(collars)及愛荷華導流板(Iowa vanes)；國內研究導流設施為吳(2005)研提筐網結構物。水流導流法主要可避免水流集中，或進一步分散水流能量，以降低水流對橋墩沖刷能力，提高橋梁安全性。

2.4 透水性環圈柱保護橋墩之機制

本文所探討之環圈柱如圖 1 所示為前置型保護工，以橡皮圈如圖 2 所示及群樁如圖 3 所示組成。群樁之功用為提供環圈垂向移動的滑軌，環圈柱設置於橋墩之上游，以破壞正向水流對橋墩的衝擊，並於橋墩前方提供遮蔽之效用，降低橋墩基礎局部沖刷深度。

環圈以交錯方式設置，使保護工表面為一不規則的表面，當水流被保護工分為兩股水流時，保護工周圍的水流因不規則的保護工表面，使得水流呈現不規則變化，而水流能量亦被保護工消減。被減緩的水流在橋墩前形成混亂的流場，降低水流挾帶泥砂的能力，故達到保護橋墩周圍底床的目的。

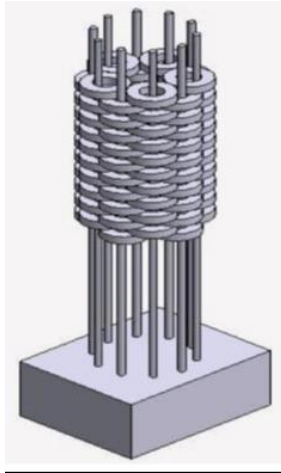


圖 1 環圈柱示意圖圖

Fig.1 Ring columns diagram



圖 2 橡皮圈示意圖

Fig.2 Rubberring diagram

水流流經環圈柱與橋墩所產生之流場變化，如圖 4 所示，環圈柱的前緣受向下射流與馬蹄型渦流影響，為最大冲刷深度之位置，部分水流會被導向環圈柱之兩側，使後面橋墩產生遮蔽與導流的作用。環圈柱為具有不均勻面，能有擾亂水流與增加摩擦阻力，且由於環圈為上下層交錯疊放，向下射流會被漸次削弱，而環圈為空心其孔隙會因水流交錯流入，來削減水流之能量，進而使泥砂能滯留於環圈之間的孔隙中。因以上作用造成水流能量損失，使環圈柱後方開始產生泥砂的淤積，並持續延伸至橋墩，使橋墩周圍能有泥砂補注，減緩冲刷深度，以達保護工之功效。

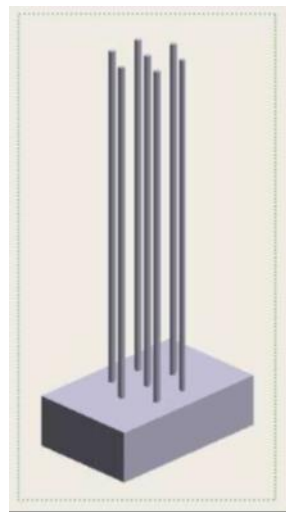


圖 3 群樁示意圖

Fig.3 Pile group diagram

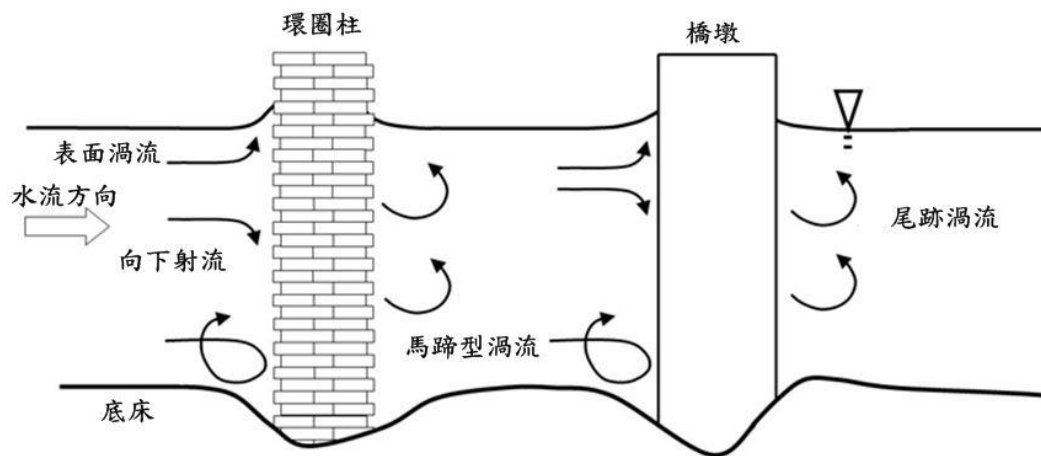


圖 4 環圈柱周圍流況示意圖

Fig.4 Flowfield of ring columnssurrounding

試驗設備及方法

3.1 試驗設備與布置

本研究所使用之設備位於逢甲大學水利工程與資源保育學系水工試驗室，試驗渠槽為中型循環玻璃渠槽，以下就循環渠槽、橋墩模型、環圈柱模型及相關附屬設備等規格說明。

3.1.1 試驗渠槽

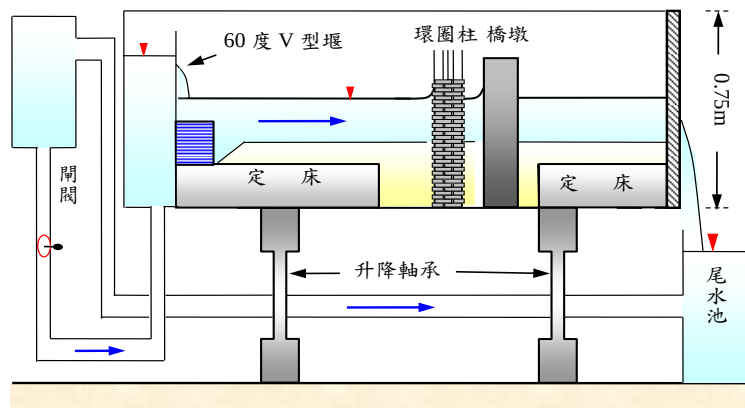
試驗渠槽如圖 5 所示，其相關資料如下：

(一)試驗渠槽：渠槽全長 13.6m、寬 0.5 m、深 0.75m，渠槽側壁之材質為強化透明玻璃，以利於試驗進行時之觀測。渠槽尾

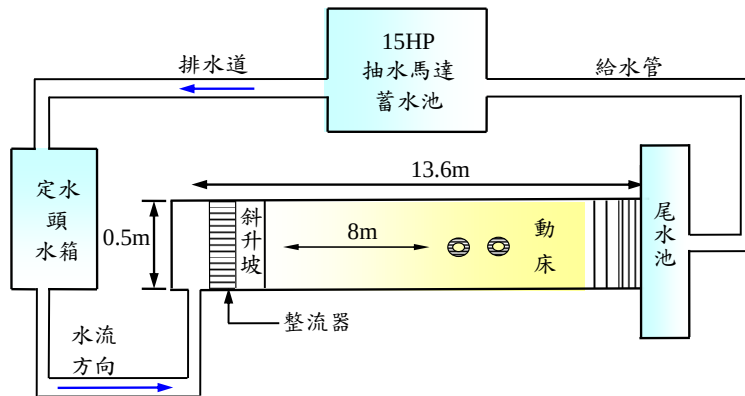
端有一尾水閘門(tailwater gate)，用以控制試驗水深，渠槽下方有一馬達可抬升前後渠槽之高程，進而控制坡度。

(二)供水系統：以 15HP(Horse Power)之抽水馬達從蓄水池中抽水，經由給水管送至定水頭水箱，供應水量至渠槽中。水流經渠槽後流入尾水池，再經由排水道流進蓄水池，形成一供水循環系統。而定水頭水箱上緣有一溢流管，可將多餘之水量輸送至尾水池。

(三)流量控制：定水頭水箱至渠槽間設有顯示式管路手動矩形閘閥，可控制流量流至渠槽中。



(5-1) 平面圖(plan view)



(5-2) 側視圖(side view)

圖 5 試驗渠槽配置圖

Fig.5 Schematic diagram of the flume

3.1.2 試驗橋墩

本研究藉由水工試驗探討不同環圈柱高度及設置距離之配置，以瞭解其對橋墩冲刷之影響。為了排除束縮效應對冲刷深度的影響，本研究選定橋墩直徑為渠道寬度之 1/10，即 5 公分之均勻橋墩進行試驗。而材質則為中空透明壓克力(acrylic)管所製成，以便使用光纖視鏡置入觀測橋墩冲刷現象。

3.1.3 試驗儀器

- (一)二維電磁流速計:量測橋墩上游 1m 處之接近流速度，採單點量測(0.6 倍水深)之平均流速。
- (二)雷射測距儀:用以量測保護工及橋墩附近冲刷坑深度和範圍，了解橋墩周圍冲淤之分佈情形。
- (三)光纖視鏡:量測橋墩之冲刷深度與觀察冲刷歷程，可配合數位攝影機拍攝。

(四) 顯示式管路手動矩形閘閥: 可控制試驗流量為定量流或變量流, 優點為流量可由數字顯示閘來控制, 而數字顯示閘上下開度 0~12000 數字, 無間隙誤差, 可確實達到試驗條件的設定與實際狀況之需求。

(五) 電腦: 儲存試驗資料, 以利研究分析並減少人為錯誤。

(六) 攝影機、照相機: 錄影或拍攝沖刷試驗之歷程, 藉以瞭解橋墩周圍流場之流況與泥砂運移之情形。

(七) 環圈: 外徑 1.8 公分、內徑 1.2 公分、寬度 0.6 公分之橡膠圈。

(八) 橋墩模型: 壓克力材質外徑 5 公分、厚度 2 毫米之透明空心管。

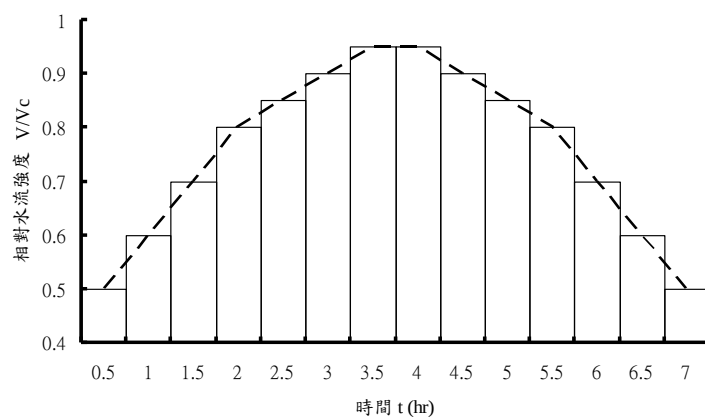


圖 6 變量流流量歷線型式-中峰型($t_p/t \approx 1/2$)

Fig.6 Discharge hydrograph under unsteady flow (central peak)

3.2 試驗規劃

3.2.1 試驗底床質

為瞭解保護工防止橋墩沖刷之成效, 避免低估橋墩局部沖刷深度, 減少因護甲作用所造成沖刷深度的不準確性, 本試驗於渠槽中鋪設 35cm 厚之越南細砂, 而河床質粒徑用 #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 0.62mm, 泥砂標準偏差 $\sigma_g (= \sqrt{d_{84}/d_{16}})$ 約為 1.29, 屬於均勻泥砂, 其中 d_{84} 及 d_{16} 分別為通過 84% 及 16% 之泥砂粒徑。

3.2.2 試驗流量

本試驗之流量, 由給水管上之閘閥所控制, 水流從定水頭水箱經由給水管輸送到渠槽中,

再流至 V 型堰處。經迴歸得(1)式。

$$Q = 0.00004Y^2 - 0.0003Y + 0.001 \quad (1)$$

式中, Q =流量(cms)、 Y =V 型堰溢流水深(cm)。

而流量的變化資料主要是模擬天然河川變量流的情況, 因此試驗以階梯式變量流 (stepped unsteady flow) 做為試驗條件, 而變量流型式為中峰型歷線如圖 6, 其洪峰到達時

間 t_p 約為歷線全部延時 t 之 $1/2$ ，藉以模擬天然降雨型式。

3.2.3 相對水流強度

(一) 流量控制閘閥上、下限中任意選取一流量，待其穩定後，將流速計放至於橋墩上游約 1m 處量測流速。

(二) 由已知水深 y 及底床中值粒徑 d_{50} ，運用(2)式估算底床質臨界啟動速度 V_c ，藉由 Melville(1997)所提出之公式求得，即

$$\frac{V_c}{u_{*c}} = 5.75 \times \log \left(5.53 \frac{y}{d_{50}} \right) \quad (2)$$

上式中

$$0.1mm < d_{50} < 1mm$$

$$1mm < d_{50} < 100mm$$

$$u_{*c} = 0.00115 + 0.0125d_{50}^{1.4}$$

$$u_{*c} = 0.0305d_{50}^{0.5} - 0.0065d_{50}^{-1}$$

(三) 運用流速計測得上游平均流速 V ，而利用上試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) 。

(四) 運用流量控制閘閥調整大小，而得到所需相對水流強度。

3.2.4 環圈柱設置距離之選定

圖 7 分別為無保護工與設置 1 倍與 5 倍間距環圈柱保護工之橋墩冲刷歷程(以前峰型之流量歷線為例)，其中縱座標為最大冲刷深度(d_s)與橋墩直徑(b)無因次化的數值、橫坐標為流量延時(t_i)與流量之總延時(t)無因次化的數值、保護工距橋墩設置距離為 L 、最大洪峰流量時的水深為 y 。由試驗結果得知，當設置距離為 1 倍($L/b=1$)，相當於單一個體之冲刷情形，無保護效果；當設置距離為 5 倍($L/b=5$)，因為距離太遠，保護效果與無設置保護工的冲刷情形類似，相當於兩個獨立結構體。因此，此試驗之環圈柱設置距離決定為 2~4 倍的橋墩直徑來做探討。

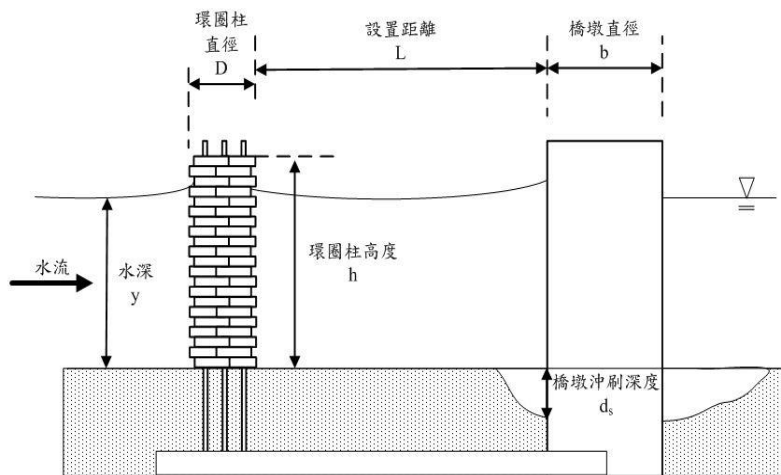


圖 7 橋墩冲刷深度歷程變化圖

Fig.7 Time evolution of pier scour depth variations

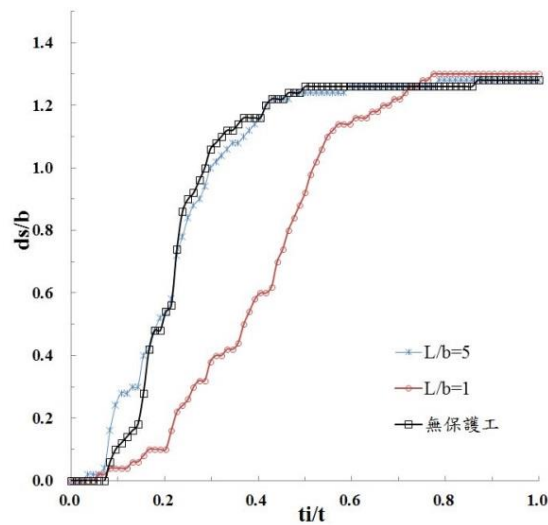


圖 8 環圈柱與橋墩布置圖
Fig.8 Arrangement of ring columns and pier

表 1 試驗條件
Table 1 Parameters of experiment

組別	環圈設置距離(L/b)	環圈設置高度(h/b)
CA1	無保護工(對照組)	
C1~C9	2、3、4	1.46、1.8、3.6
備註	1.y 為最大洪峰流量時的水深(18cm)，設置高度(h/b)1.46、1.8、3.6 分別為平均水深、1 倍水深、2 倍水深。 2. Δy 為 $V/V_c=0.5\sim 0.95$ 之平均水深(7.3cm)。 3.前峰型：F；中峰型：C；後峰型：B。	

3.3 試驗條件

本研究探討影響環圈柱對橋墩保護效果的因素為環圈柱設置距離及環圈柱設置高度。本研究主要針對上述參數進行試驗，圖 8 為環圈柱與橋墩配置圖，其中 D 為環圈柱直徑、h 為環圈柱於河床面上之高度、ds 為橋墩墩前最大冲刷深度，各符號意義如圖所示，試驗配置如表 1 所示，藉由試驗獲得環圈柱對橋墩冲刷保護的最佳配置型式。

3.4 試驗步驟

本研究試驗程序如下：

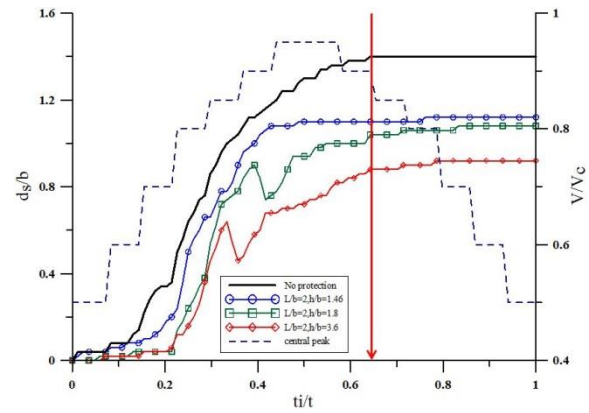
- (1) 裝置試驗儀器。
- (2) 安置橋墩模型於渠槽內。
- (3) 鋪設試驗河床質於渠槽內並均勻整平夯實。
- (4) 開啟定水頭水箱之進水閘閥，再調整顯示式管路手動矩形閘閥之數據至試驗

- 時間 0~0.5hr 所需的流量並且開始計時，
於每隔 5 分鐘量測一次墩前冲刷深度。
- (5) 每隔 0.5hr 調整顯示式管路手動矩形閘閥之數據至所需的流量。
 - (6) 待冲刷時間 T 結束後，關閉抽水馬達，抽乾試驗段的水，使渠道無含水狀態，以雷射測距儀量測河床剖面高程。
 - (7) 改變不同配置，並重複步驟(1)~(6)。

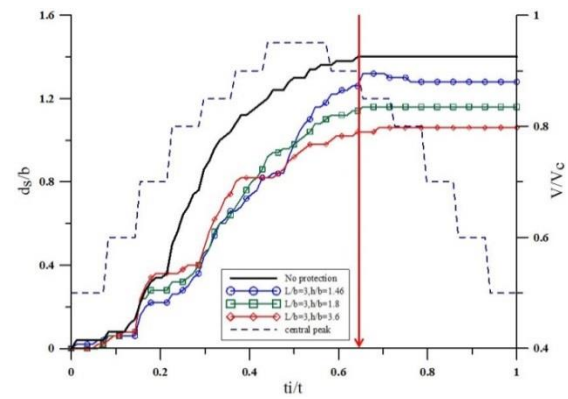
結果分析與討論

4.1 橋墩冲刷歷程

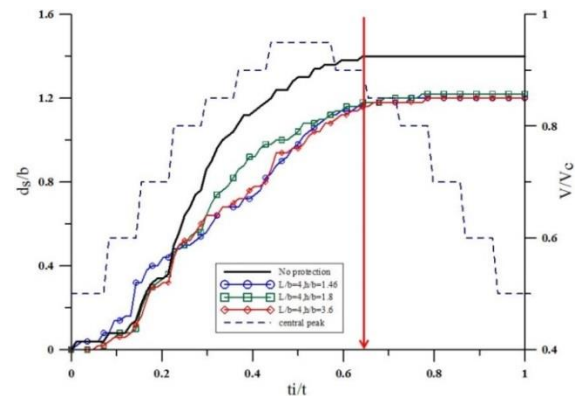
圖 9 為環圈柱不同設置距離與高度之橋墩冲刷歷程圖，其中 x 軸為流量歷線延時(t_i)與流量歷線歷程(t)之無因次比值，左側 y 軸為冲刷深度(d_s)與橋墩直徑(b)之無因次比值，右側 y 軸為前峰型之水流強度歷程延時。整體來說，冲刷深度隨水流強度的增加而加大，而最大冲刷深度約發生於流量歷線之上升段至洪峰($t_p/t=0.5$)結束後之下一時間階段(Δt_i , time step)，即約冲刷歷程 64%($t_i/t=0.64$ ，約 4.5 小時)後趨於平衡冲刷深度。分段於環圈柱與橋墩設置距離 $L/b=2$ ，設置高度 $h/b=1.8$ 及 3.6 時，在冲刷時間分別約為 2.7 小時($t_i/t=0.38$)及 2.3 小時($t_i/t=0.33$)有回淤現象產生，研判係因前期水流衝擊環圈柱時後方產生淤積堆，回淤高度分別約為 $0.15b$ 及 $0.17b$ ，隨水流強度增強而逐漸挹注至橋墩前，因此冲刷深度呈現先上升而後下降之趨勢，惟於前期冲刷時間 20%($t_i/t=0.2$ ，約 1.4 小時)前，較無明顯冲刷趨勢。



(9-1) $L/b=2$



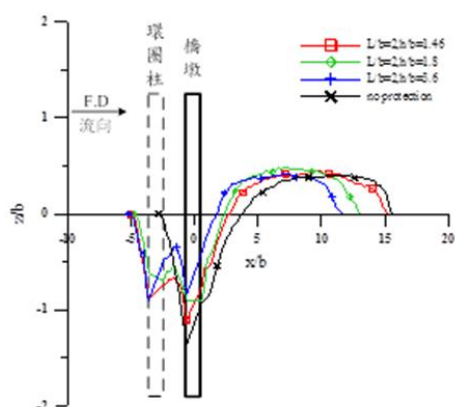
(9-2) $L/b=3$



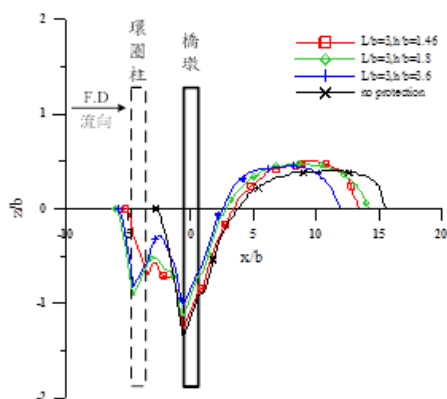
(9-3) $L/b=4$

圖 9 中峰型歷線之橋墩冲刷歷程圖

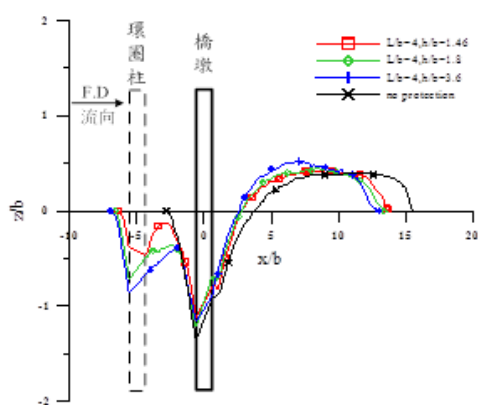
Fig.9 Pier scour depth variations under central peak hydrograph



(10-1) $L/b=2$



(10-2) $L/b=3$



(10-3) $L/b=4$

圖 10 中峰型歷線之河床縱斷面圖

Fig.10 Longitudinal bed profiles under central peak hydrograph

由圖 9-1 及圖 9-2 可發現，當設置距離較小時 ($L/b=2、3$)，環圈柱設置高度對於橋墩沖刷深度之影響甚大，其能完全遮蔽水流直接沖擊橋墩並分散其向下射流能量，進而有效減緩橋墩沖刷深度發展。當設置距離 $L/b=4$ 時(圖 9-3)，環圈柱之遮蔽水流效應較不明顯，故環圈柱設置高度對於橋墩沖刷深度之發展影響較小。

4.2 縱斷面沖淤變化

圖 10 為不同環圈柱設置距離與高度之河床中心縱斷面變化情形，以橋墩直徑(b)對橫軸距離(x)和縱軸高度(z)之尺度無因次化，其中 $x=0$ 為橋墩中心， $z=0$ 為原始河床高程。由圖 16 來看，當設置高度 $h/b=3.6$ 時，於三種設置距離下，環圈柱下游處皆有回淤現象產生，若沖刷持續進行，泥砂可持續挹注於橋墩墩前，進而保護橋墩抑制沖刷深度之發展。當設置距離越遠時，環圈柱之遮蔽效應漸次減弱，因此保護工後方的回淤範圍較小，造成墩前沖刷深度有加深的趨勢。當設置高度 $h/b=1.8$ 時，保護工未能有效削弱上層水流動能，以致水流越過環圈柱而形成較強的向下射流，故造成較深的沖刷深度。

4.3 橋墩周圍沖刷坑體積與面積變化

圖 11 為中峰型流量作用下，不同配置環圈柱保護時之橋墩周圍沖刷坑體積與面積變化情形，以設置不同配置保護工與未設置保護工（單橋墩）情況下之沖刷坑體積或面積為縱坐標，不同設置距離或高度為橫坐標繪製而得之沖刷坑體積與面積變化圖。由圖 11 可發現，不同設置距離下之沖刷坑體積相似，探究其因可能係於設置距離 $L/b=2$ 時，環圈柱與橋墩間沖刷坑因加劇效應導致沖刷體積

增加。於設置高度 $h/b=1.46$ 、 1.8 時，保護工縱向遮蔽水流的效應隨環圈柱設置高度的減小而減弱，以致橋墩周圍冲刷坑體積隨環圈堆設置高度降低而加大。

由冲刷坑面積來看，發現由於設置環圈柱，保護工對水流產生分流的效果，造成橋墩周圍冲刷坑的範圍加大，以致整體冲刷坑面積較未設置保護工時為大。

不同配置環圈柱保護工於變量流歷線作用時之橋墩周圍冲刷情形，並與未設置環圈柱保護工(對照組)進行比較分析，藉以瞭解保護工減緩冲刷之效果，本研究以橋墩墩前冲刷深度減緩率(R)為研判指標，如(3)式所示。

$$R(\%) = \left(\frac{d_{sn} - d_s}{d_{sn}} \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中 R 為設置與未設置環圈柱保護工時之橋墩最大冲刷深度減少百分比， d_{sn} 為未設置保護工時橋墩墩前之最大冲刷深度， d_s 為不同配置環圈柱保護工設置後其下游橋墩墩

前之最大冲刷深度。

經由上述分析探討，復由表 2 可知，於中峰型流量歷線流況下，環圈柱最佳配置為設置距離 2 倍橋墩直徑(b)，設置高度為 2 倍水深(y)。推究其因可能係於設置距離 $L/b=2$ 時，其環圈柱保護工下游處有較大體積之淤積堆，於冲刷時間持續進行時會對橋墩周遭進行泥砂之挹注，進而抑制橋墩墩前最大冲刷深度發展，其冲刷減緩率為 34.3%。

4.4 迴歸分析

依據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冲刷深度關係式，其關係式如下：

$$\frac{d_s}{b} = 1.108 \times \left(\frac{L}{b} \right)^{0.181} \times e^{-0.077 \left(\frac{h}{b} \right)} \quad (4)$$

上式中冲刷深度(d_s/b)與各參數間具有高相關性，其判定係數 $R^2=0.901$ ，為驗證上式各參數與冲刷深度之相關性，本研究另帶入驗證數據進行驗證，結果符合上述限制條件，透過該公式可預測出橋墩墩前最大冲刷深度。

表 2 中峰型歷線之橋墩冲刷減緩率

Table.2 Pier scour retardation rates under central peak hydrograph

組別	設置距離 (L/b)	設置高度 (h/b)	最大冲刷深度 d_s (cm)	橋墩冲刷減緩率 R(%)	冲刷坑面積 A (cm ²)	冲刷坑體積 V (cm ³)
CA1	-	-	7.0 (未設置保護工)	-	721	1,457
C1	2	1.46	5.6	20.0	772	1,582
C2	2	1.8	5.4	22.9	631	1,187

C3	2	3.6	4.6	34.3	628	1,019
C4	3	1.46	6.4	8.6	873	1,589
C5	3	1.8	5.8	17.1	824	1,559
C6	3	3.6	5.3	24.3	721	1,189
C7	4	1.46	6.2	11.4	981	1,630
C8	4	1.8	6.1	12.9	982	1,542
C9	4	3.6	6.0	14.3	811	1,263

註：1.“-”為對照組，即未設置環圈柱保護工。
2. 平均水深 Δy ($h/b=1.46$)，1倍水深 y ($h/b=1.8$)，2倍水深 $2y$ ($h/b=3.6$)

強度

結論與建議

本研究主要以室內水工試驗模擬變量流況下，將環圈柱設於橋墩上游，探討環圈柱保護工對橋墩沖刷之減緩效果。於中峰型

流況與泥砂幾何標準偏差 $\sigma_g=1.24$ 條件下進行相關試驗。透過改變環圈柱的設置距離、環圈柱結構物高度等條件進行試驗，以瞭解不同配置之環圈柱保護工對橋墩沖刷深度之影響。經由試驗過程、試驗觀察及試驗分析，得到下列結論與建議。

5.1 結論

1. 各種環圈柱配置型式之橋墩最大沖刷深度均發生在橋墩上游前緣，設置環圈柱保護工之沖刷深度均較未設置保護工時為小。整體來說，沖刷深度隨水流

的增加而加大，而最大沖刷深度約發生於流量歷線之上升段至洪峰結束後之下一時間階段(Δt_i , time step)。

2. 若環圈柱與保護工設置距離過近，會產生類似雙橋墩的加劇效應，造成保護工與橋墩間的河床下刷情況更嚴重，加深墩前的沖刷深度。若設置距離過遠，則環圈柱後方淤積堆較無法落淤於橋墩前緣及其周遭，近似兩個獨立構造物，因此保護效果有限。
3. 環圈柱設置高度若低於水深($h < y$)，則無法遮蔽上層水流沖擊橋墩時所產生之向下射流，僅能減緩馬蹄型渦流所造成的沖刷。環圈柱頂部若持續高於水位之上，則可完全發揮其環圈柱保護工分流特性。

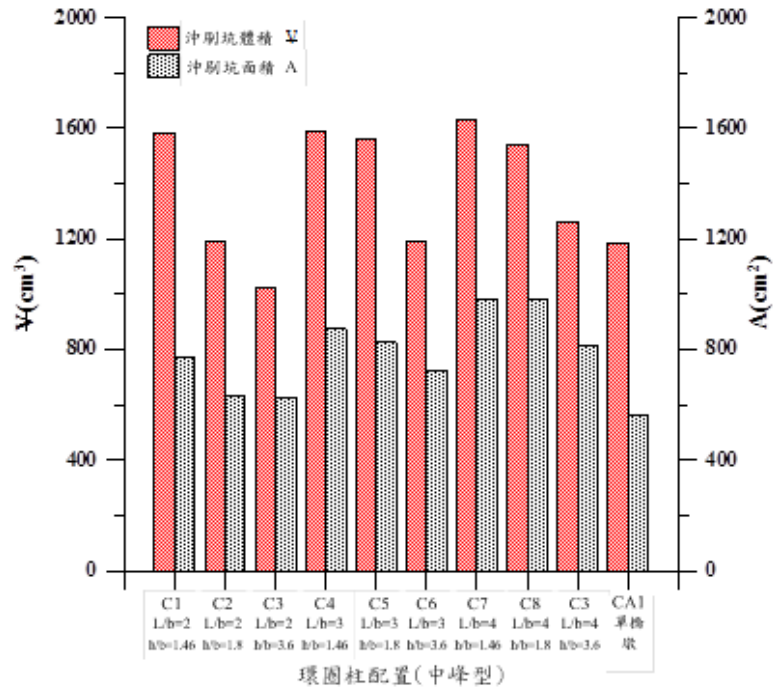


圖 11 中峰型歷線之橋墩周圍冲刷坑體積與面積

Fig.11 Scour hole volumes and areas at pier surrounding under central peak hydrograph

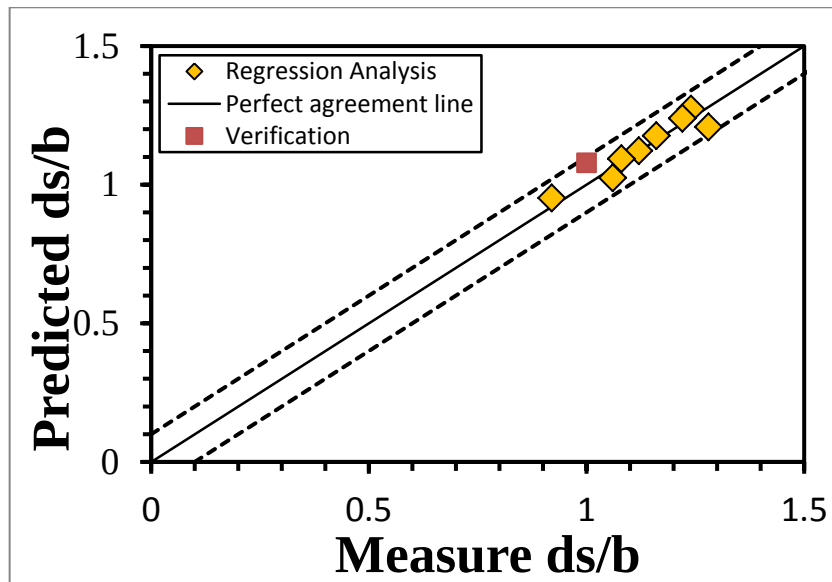


圖 12 迴歸公式參數之關係圖

Fig.12 Parameter relationship of regression formula

4. 本研究之最佳環圈柱保護工配置，在設置高度 $h/b=3.6$ 時有最佳保護效果；而設置距離以 2 倍墩徑為最佳，其橋墩冲刷減緩率為 34.3%。

5. 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：

$$\frac{d_s}{b} = 1.108 \times \left(\frac{L}{b} \right)^{0.181} \times e^{-0.077 \left(\frac{h}{b} \right)}$$

5.2 建議

1. 本研究針對水平坡降之清水冲刷進行試驗，與台灣河川坡陡流急之特性不太一致，未來可針對不同坡度之含滓冲刷進行試驗。
2. 本研究將環圈柱應用於橋墩上游之導流工法，未來可將環圈柱布設於橋墩周圍或橋墩下游，以瞭解三種工法之橋墩冲刷防治成效。此外，可將環圈柱嘗試用於河川彎道凹岸之一般冲刷防治。

均勻同心圓柱型橋墩局部冲刷之研究」，逢甲大學水利工程研究所碩士論文。

4. 吳虹邑，2005，「筐網結構物對橋墩冲刷保護之研究」成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。
5. Ettema, R. (1980), "Scour at Bridge Pier", School of Engineering, 216:527.
6. Laursen, E. M. (1962), "Scour at Bridge Crossings", Journal of Hydraulic Division, 86(2): 39-54.
7. Melville, B. W., and Y. M. Chiew (1999), "Time Scale for Local Scour at Bridge Piers", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 125(1): 59-65.
8. Raudkivi, A. J., and R. Ettema (1983). "Clear-Water Scour at Cylindrical Piers", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 109(3): 338-350.

103 年 12 月 29 日收稿

103 年 12 月 31 日修改

104 年 01 月 05 日接受

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. 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。
2. 鄭人豪，2007，「變量流況下非同心圓柱型橋墩局部冲刷之研究」，逢甲大學水利工程與資源保育學系碩士班碩士論文。
3. 蔡岳臻，2006，「變量流歷線作用下非