

逢甲大學學生報告 ePaper

環圈柱保護工於橋墩沖刷防治之研究

Application of Ring Column Groups to Pier Scour Prevention

作者：楊敏宏、林則名、葉俊強

系級：水利工程與資源保育學系四甲

學號：D9731312、D9731223、D9731257

開課老師：王傳益

課程名稱：專題實驗

開課系所：水利工程與資源保育學系

開課學年：一百 學年度 第二 學期



謝 誌

本專題能夠順利完成，我們首要感謝的是我們指導教授王傳益教授的細心指導與觀念上的引導，給予我們學問上以及處理各種問題的教導與勉勵，讓我們學生受益良多，在此由衷的感謝教授指導，謹此致上萬分謝忱。

修業與論文研究期間，感謝系上諸位教授在學業上的細心指導，不只讓我們學習到課本上的內容，還分享了許多他們的實際經驗，提攜我們向上，在此深表感謝之意。

研究期間，感謝多位學長姐給予之關心與珍貴建議，特別感謝博班學長，碩班學長張詠善、王依媛、楊佳學，大學部同學李彥德熱心幫忙，學長張詠善給予我們許多寶貴意見及各方面的知識，多所助益，深厚情誼，銘誌心中。

最後，我們要感謝支持我們的家人以及好友們，謝謝你們一路上對我們的支持、鼓勵與照顧，謝謝您們！

摘要

近年來，台灣地區夏季由於滯留鋒與颱風的影響時常造成豪雨，氣候異常使得氣候型態更趨於極端，如2009年莫拉克颱風在台灣創造大雨紀錄，對台灣所造成的重大災害更是前所未見。豪雨所形成之高流量沖刷橋墩周圍河床，造成橋墩基礎裸露進而危及橋梁安全。因此，如何避免橋墩遭沖刷破壞遂成為當前之重要課題。本研究基於保護橋基安全，因此研發新型之環圈柱橋墩保護工，並進行相關水工模型之試驗研究，提出較理想之保護工配置，期能減緩橋墩沖刷，以供相關單位工程設計之參考。

本研究主要利用水工模型試驗模擬於定量流($V/V_c=0.95$)作用下，首先針對六種環圈堆設置距離 ($L/b=1、2、3、4、5、6$) 對橋墩的保護效果進行討論，並選出最佳保護效果的環圈柱設置距離，接著以最佳環圈柱設置距離分析不同直徑 ($D/b=0.8、0.9、1$) 之環圈堆結構物；四種環圈堆設置高度 ($H/b=1.08、1.6、2.4、3$) 對橋墩保護的影響，探討環圈堆結構物遮蔽橋墩上游縱向、橫向水流對減少橋墩沖刷深度的影響，並進行比較分析。

研究結果顯示，當環圈堆直徑與橋墩直徑相同時($D=b$)，能分散橋墩上游橫向水流，另外環圈堆結構物設置高度應大於試驗水深($H/b > 2.4$)與試驗進行中環圈堆下降之高度總和，可避免水流由環圈堆結構物頂端溢流，穩定橋墩上游水流使水流由橋墩兩側導流避免水流集中現象，而環圈堆結構物設置距離採用5倍橋墩直徑 ($L=5b$) 可量測得到橋墩最大沖刷深度最小值與較佳保護效果。

關鍵字：環圈堆、定量流、橋墩沖刷深度

Abstract

Heavy rainfall frequently occurs in the summer in Taiwan due to the effects of the stationary fronts and typhoons. In recent years, the climatic anomalies tend to induce more extreme weather. For example, record-breaking heavy rainfall induced by Typhoon Morakot (2009) caused an unprecedented disaster in Taiwan. High flow caused scouring of the river bed around the piers, resulting in the exposure of the pier foundation and threatening the safety of bridge. To protect the bridge foundation, the use of Ring column groups as a pier scour countermeasure is reported. In this study, hydraulic model experiments with Ring column groups 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 engineers in future.

A series of experiment was conducted with uniform sediments under the steady flow ($V/V_c=0.95$) First for six kinds of distance ($L/b=1、2、3、4、5、6$) Conducted to discuss the protective effect of pier and elect the best protective effect of distance, and then use the best distance analysis is four different diameters ($D/b=0.8、0.9、1$) three different heights ($H/b=1.08、1.6、2.4、3$) to the impact of the bridge pier protection. Investigate the The ring columns consisting of cylindrical rubber rings Obscured the vertical and horizontal flow of the bridge pier upstream to reduce the impact of the bridge pier scour depth.

Based on experimental results, when the diameter of the ring columns is equal to the pier diameter ($D=b$), the ring columns could disperse the transverse flow when the Ring column groups settings at a distance of 5 times the pier diameter, the height of the ring column is higher than the water surface ($H/b>2.4$). to avoid the overflow of water from the top of the ring columns, stabilize the pier upstream flow so that

water from the pier two side diversion to avoid the water concentration, when the Ring column groups settings at a distance of 6 times the pier diameter ($L=5b$) , Can be measured to a minimum scour depth, which is the best set type among the experimental conditions.

Keywords: Ring column groups, steady flow, Pier scour depth



目錄

謝誌	I
摘要	II
abstract	III
目錄	V
表目錄	VIII
圖目錄	IX
照片	X
符號表	XI
壹、前言	1
1.1 研究動機	1
1.2 研究目的	2
1.3 研究架構	3
貳、文獻回顧與理論分析	4
2.1 沖刷型態分類	4
2.1.1 橋墩局部沖刷特性	5
2.2 橋墩局部沖刷特性	6
2.3 橋墩沖刷因子	7
2.3.1 橋墩沖刷因子之分類	7
2.3.2 橋墩沖刷因子之探討	8
2.4 橋墩周圍之局部沖刷機制	13
2.5 橋墩保護工	15
2.6 環圈堆結構物保護橋墩之機制	16
2.6.1 環圈堆結構物之特性	19

參、試驗設備及方法	21
3.1 試驗設備與佈置	21
3.1.1 試驗渠槽	21
3.1.2 試驗橋墩	22
3.1.3 試驗儀器	23
3.2 試驗規劃	24
3.2.1 試驗底床質	24
3.2.2 試驗流量	25
3.2.3 相對水流強度	26
3.2.4 試驗水深	26
3.2.5 沖刷試驗時間	26
3.2.6 完全發展段	27
3.3 試驗內容	28
3.3.1 環圈堆設置距離、環圈堆直徑與環圈堆高度	29
3.3.2 環圈堆設置高度	30
3.4 試驗步驟	30
3.4.1 試驗橋墩及環圈堆安置與底床質鋪設	30
3.4.2 試驗流量控制	30
3.4.3 沖刷深度與河床剖面量測	30
3.4.4 試驗操作程序	31
肆、結論分析與討論	33
4.1 環圈堆設置距離對減少橋墩沖刷之影響	33
4.1.1 沖刷歷程	33
4.1.2 沖刷坑與淤積堆之縱斷面變化	34
4.1.3 保護效果	35

4.2 環圈堆直徑對減少橋墩沖刷之影響	36
4.2.1 沖刷歷程	36
4.2.2 沖刷坑與淤積堆之縱斷面變化	37
4.2.3 保護效果	37
4.3 環圈堆設置高度對減少橋墩沖刷之影響	38
4.3.1 沖刷歷程	38
4.3.2 沖刷坑與淤積堆之縱斷面變化	39
4.3.3 小結	40
伍、結論與建議	41
5.1 結論	41
5.2 建議	42
參考文獻	43



表目錄

表3-1 環圈堆結構物試驗組別表	29
表4-1 不同環圈堆距離對橋墩基礎產生的保護效果表	35
表4-2 不同環圈堆直徑對橋墩基礎產生的保護效果表	38
表4-3 不同環圈堆高度對橋墩基礎產生的保護效果表	40





圖目錄

圖2-1 橋墩沖刷示意圖	5
圖2-2 橋墩局部沖刷深度與水流強度關係圖	7
圖2-3 底床質相對粗糙度與沖刷深度之關係圖	10
圖2-4 泥砂粒徑與沖刷深度關係圖	11
圖2-5 泥砂幾何標準偏差與修正因子之關係圖	12
圖2-6 橋墩周圍水流示意圖	14
圖2-7 環圈堆示意圖	17
圖2-8 橡皮圈示意圖	17
圖2-9 群樁示意圖	18
圖2-10 環圈堆結構物周圍流況示意圖	19
圖3-1 試驗渠槽配置圖	22
圖3-2 試驗泥砂粒徑分佈曲線圖	25
圖3-3 V型堰流量率定曲線	25
圖3-4 橋墩沖刷深度歷程變化圖	27
圖3-5 完全發展區段選定範圍	28
圖3-6 環圈堆於橋墩沖刷之試驗流程圖	32
圖4-1 不同環圈堆設置距離之橋墩沖刷歷程變化圖	34
圖4-2 不同環圈堆設置距離之河床縱斷面變化圖	35
圖4-3 不同環圈堆設置直徑之橋墩沖刷歷程變化圖	36
圖4-4 不同環圈堆設置直徑之河床縱斷面變化圖	37
圖4-5 不同環圈堆設置高度之橋墩沖刷歷程變化圖	39
圖4-6 不同環圈堆設置高度之河床縱斷面變化圖	40



照片

照片3-1	二維電磁式流速計	23
照片3-2	雷射測距儀	23
照片3-3	光纖視鏡照片	24
照片3-4	顯示式管路手動矩形閘閥照片	24



符號表

符 號	符 號 說 明	因 次
A_1	係數	【—】
a	橋墩迎水面面積	【 L^2 】
B	渠道寬度	【 L 】
B_1	係數	【—】
b	橋墩迎水面寬度	【 L 】
d	顆粒粒徑	【 L 】
d_{50}	中值粒徑	【 L 】
d_s	最大沖刷深度	【 L 】
d_{ss}	平衡沖刷深度	【 L 】
$d_{s\min}$	最小沖刷深度	【 L 】
D	環圈堆直徑	【 L 】
f_D	橋墩所佔權重	【—】
Fr	福祿數(Froude number)	【—】
g	重力加速度	【 LT^{-2} 】
g_m	模型之重力加速度	【 LT^{-2} 】
g_p	原型之重力加速度	【 LT^{-2} 】

g_2	橋墩形狀參數	【—】
g_3	流況參數	【—】
G	泥砂顆粒於水中之自重	【 MLT^{-2} 】
h	環圈厚度	【 L 】
H	環圈設置高度	【 L 】
K_1	斜率	【—】
K_2	截距	【—】
K_d	底床質相對糙度修正因子	【—】
K_f	相對水流強度修正因子	【—】
K_n	河床之粗糙度	【 $L^{-1/3}T$ 】
K_{sh}	橋墩形狀因子修正係數	【—】
$K_{sh.D}$	橋墩形狀因子	【—】
K_y	水深修正因子	【—】
K_{yb}	相對水深修正因子	【—】
K_θ	水流攻角修正因子	【—】
K_σ	標準偏差修正係數	【—】
L	保護工距橋墩設置距離	【 L 】
L_s	沖刷坑長度	【 L 】
m_1	係數	【—】

n_1	係數	【—】
N_s	泥砂參數	【 $L^{-1}T$ 】
p	水壓力強度	【 $ML^{-1}T^{-2}$ 】
P_1	係數	【—】
Q	流量	【 L^3T^{-1} 】
Q_{si}	進入沖刷區域之沉滓輸送率	【 L^3T^{-1} 】
Q_{so}	沖刷區域輸出之沉滓輸送率	【 L^3T^{-1} 】
r_1	係數	【—】
S	坡度	【—】
t	流量之總延時	【 T 】
t_1	流量延時	【 T 】
T	沖刷時間	【 T 】
T_e	沖刷達平衡所需時間	【 T 】
u	x 方向之速度	【 LT^{-1} 】
u'	無因次之 x 方向速度分量	【—】
u_*	顆粒剪力速度	【 LT^{-1} 】
U_c^*	底床臨界速度	【 LT^{-1} 】
v	y 方向之速度	【 LT^{-1} 】
V	接近流平均速度	【 LT^{-1} 】

V_c	啟動流速	$【LT^{-1}]$
W_s	坑寬度	$【L]$
X	沖刷修正因子	$【-]$
y	水深	$【L]$
z	河床高程	$【L]$
α 鮎驛	水流攻角	$【-]$
ρ 嚙驛	流體密度	$【ML^{-3}]$
ρ_s	底床質密度	$【ML^{-3}]$
ν 嫻驛	運動黏滯係數	$【L^2T^{-1}]$
μ 爛驛	動力黏滯係數	$【ML^{-1}T^{-3}]$
σ_g	底床質幾何標準偏差	$【-]$



第壹章 前言

1.1 研究動機

河川阻隔了人類活動的通路與空間，為了便於聯絡南北交通系統及河川兩岸人民經貿交流，需興建跨河結構物(如橋樑)以利通行。由於台灣位於亞熱帶地區，因此在每年的五月至九月期間，有較多的颱風侵襲台灣，年平均降雨達2500毫米。雨量雖然豐沛，但在時空上的分佈非常不平均。在枯水時期，造成河床乾枯、水源不足，甚至乾竭，但在豐水期間卻又使得河川水流湍急、水位變化急速。在河道輸砂量方面也產生極大變化，導致河道底床產生劇烈沖淤變化，深水河槽極易變動，進而促使橋墩基礎流失，而危及橋樑安全。此外，因人為不當盜採河道中的砂石，破壞河川的輸砂平衡，造成河床面不斷下降，加上橋墩阻礙水流造成的局部沖刷，導致橋墩基礎裸露。

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沖刷，在橋墩周圍加速局部沖刷，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，危及橋樑安全。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底床之沖刷，使得基礎或保護工破壞而影響橋梁安全。

當橋墩因沖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，以抵抗沖刷，於橋梁斷面處產生較堅強的保護層，若此保護層沒有受到破壞時，則橋墩沖刷可以控制；反之，一旦遭受破壞時，常常僅於某一局部處所產生沖刷，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沖刷，而加劇沖刷深度，產生向源沖刷問題，進而造成橋梁之破壞，如高屏大橋斷橋即為一顯著的案例。

為了防止類似之斷橋事件持續發生，橋墩保護工遂成為當前之重要課題。本研究基於整體橋基保護安全考量，期能發展出具有防制橋墩沖刷兼具實用性之新保護工法。

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，未來環圈堆結構物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沖刷保護新工法。

本研究主要針對不同之直徑的環圈堆，其對減緩橋墩沖刷的保護效果；並討論環圈堆距離橋墩之長度及不同設置高度時，橋墩周圍之局部沖刷情形，藉以瞭解環圈堆保護工之最佳配置，達到有效減緩沖刷保護橋墩之目標，期能提供橋墩管理相關單位於工程設計之參考，確保橋樑之安全。

1.3 內容架構

本文共分為五個章節，並將其章節內容大略分述如下：

第壹章 前言

概略說明本研究之研究動機、研究目的及內容組織。

第貳章 文獻回顧與理論分析

簡述以往相關研究，並針對其文獻加以探討。並探討橋墩周圍之水流型態、橋墩沖刷原理並整理常見之橋墩保護工法以及介紹本文探討的保護工。

第參章 試驗設備及方法

說明本研究之試驗設備、試驗儀器及試驗前準備工作，並進一步描述試驗條件、試驗步驟與試驗資料之量測方法。

第肆章 結果分析與討論

針對各種不同環圈堆配置方式於橋墩之沖刷歷程、沖刷範圍及局部沖刷深度進行討論與分析，以獲致深入之成果。

第伍章 結論與建議

將本研究之理論分析與實驗結果加以歸納，提出最終之結論與建議，以供後續研究者明確之方向及相關工程於橋墩設計之參考。

第貳章 文獻回顧與理論分析

橋墩設置於河川中，造成河道流況的改變，河道通水斷面積的減少，而橋墩間的束縮沖刷與墩前壅水，導致流速加快，輸砂特性改變。一般而言，橋梁破壞主要因為受水流淘刷基礎造成裸露，水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沖刷，進而影響橋墩安全。本研究針對前人所做橋墩沖刷之相關研究與保護對策。

2.1 沖刷型態分類

Raudkivi(1986)^[50]及陸浩、高冬光(1991)^[4]針對其沖刷情形做為分類，並認為橋墩沖刷現象依情況可分為一般沖刷、束縮沖刷與局部沖刷，依序說明如下：

- (1) 一般沖刷(general scour)：河道未設置結構物前，水流造成河床全面性高程下降，水流使泥砂持續運動，而泥砂影響水流條件，河床屬於持續變化的狀態。
- (2) 束縮沖刷(contraction scour)：當河道設置跨河構造物時，造成阻水效應，導致通水斷面積減少，加快橋墩周圍流速，進而造成沖刷。
- (3) 局部沖刷(local scour)：河道因水工構造物的存在，水流產生阻礙與干擾現象，而使水流在墩前造成壅水，對於流速與流向的劇烈改變，引起渦流和增強床面剪應力，進而造成河床局部沖刷與高程下降。

Melville and Coleman(2000)^[44]則認為河道的沖刷型態，為一般沖刷與局部化沖刷之加總，將橋墩沖刷現象以圖2-1 表示，以釐清各種

不同沖刷現象之意涵，說明如下：

- (1) 一般化沖刷：為河道上下游輸砂量不平衡所致，非水工構造物之影響，依水流影響時間長短，可分為一般長期沖(long-term general scour)與一般短期沖刷(short-term general scour)。
- (2) 局部化沖刷：設置水工構造物，會使水流受到阻礙，造成流場改變和底床剪應力增大，進而影響河床沖刷現象，可分為束縮沖刷與局部沖刷。

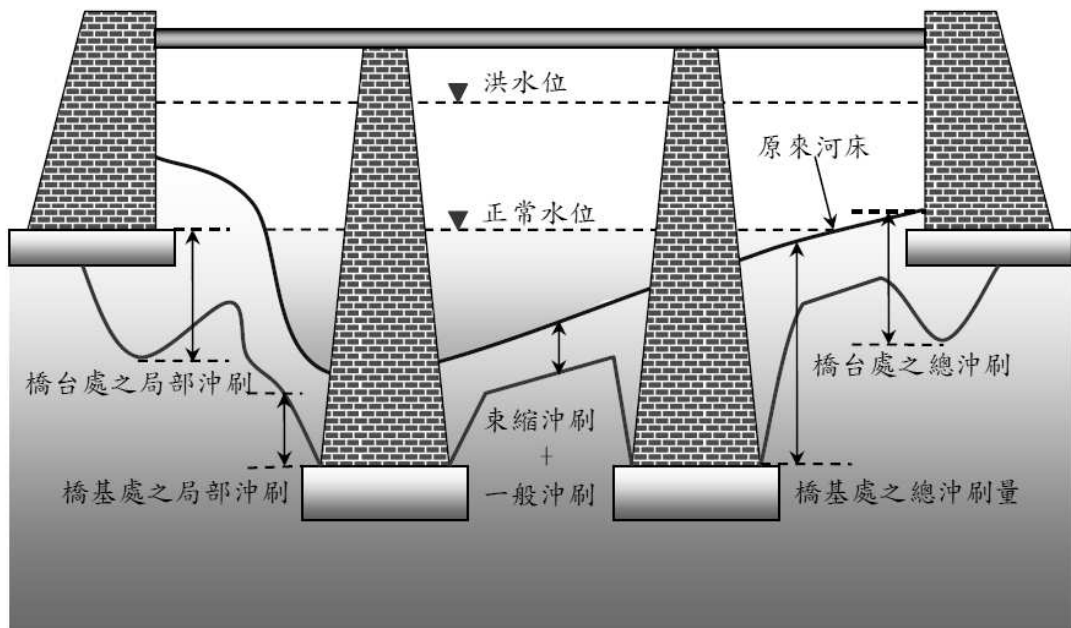


圖2-1 橋墩沖刷示意圖

2.1.1 橋墩局部沖刷特性

目前沖刷研究的輸砂公式諸如：Einstein 法、Meyer-Peter 法，均適用在平衡條件下；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)^[37]綜合許多沖刷現象提出四個一般化的沖刷理論：

- (一) 沖刷率等於由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)極限冲刷範圍隨時間而逐漸接近。

2.2 橋墩局部冲刷型態

局部冲刷現象依據 Laursen(1963)^[38]觀點，於冲刷速率等於進出冲刷區域之沉滓輸送率差值，冲刷坑體積隨時間之變化率可由輸砂連續方程式來表示：

$$\frac{df(B)}{dt} = g(B) - g(S) \quad (2-1)$$

其中， $f(B)$ ：冲刷區邊界之數學式。

dt ：時間。

$g(B)$ ：冲刷區輸出沈滓之沈滓流量。

$g(S)$ ：冲刷區之輸入沈滓流量。

(一) $g(B) = g(S) = 0$ ：無冲刷。

此時冲刷區域為一靜止狀態，無泥砂移動。

(二) $g(B) > g(S) \cong 0$ ：清水冲刷或靜態冲刷。

清水冲刷為水流流速小於泥砂臨界起動流速，且冲刷區上游無砂源供應。冲刷為受橋墩局部束縮，而產生冲刷，隨著冲刷時間增加，橋墩冲刷坑逐漸擴大，冲刷坑深度加深；達到某一冲刷時間，冲刷坑幾何型態趨於穩定，則橋墩局部冲刷即達到平衡狀態。

(三) $g(B) > g(S) > 0$ ：渾水冲刷或動態冲刷。

動態冲刷無加砂條件下，水流流速大於泥砂臨界起動流速，冲刷區上游泥砂流入冲刷區，造成底床床面變動，橋墩冲刷深度起伏變動，平衡冲刷深度取橋墩冲刷深度平均值代表；若動態冲刷持續加砂，當冲刷區 $g(B) = g(S) > 0$ 時，則橋墩局部冲

刷即達到平衡狀態，但是仍然有渾水流動。如圖2-2 所示。 V ：水流流速， V_c ：泥砂臨界起動流速， V_a ：護甲速度， σ_g ：泥砂幾何標準偏差， b ：橋墩迎水面寬度。

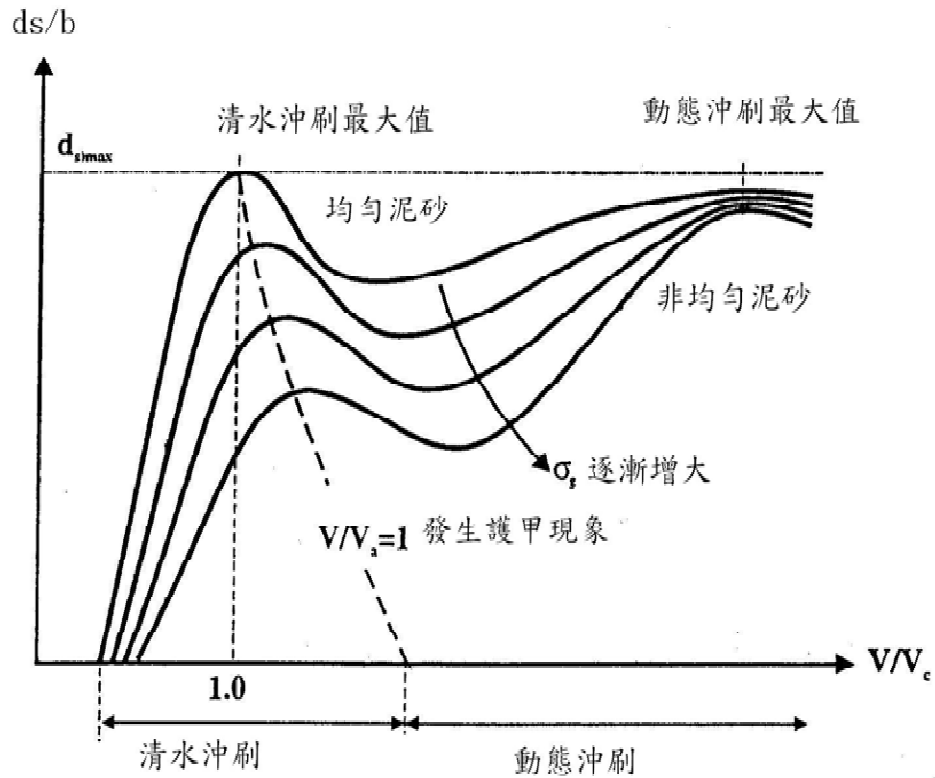


圖2-2 橋墩局部沖刷深度與水流強度關係圖

2.3橋墩沖刷因子

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

2.3.1橋墩沖刷因子之分類

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：

- (一)橋墩性質：橋墩迎水面寬度(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)。

2.3.2橋墩沖刷因子之探討

以下就各無因次參數之物理意義及其對橋墩局部沖刷之影響分別加以討論：

- (一)水流強度 (Flow Intensity, V/V_c)：

清水沖刷條件下，均勻泥砂與非均勻泥砂發生橋墩沖刷的水流強度分別為 $V/V_c < 1$ 與 $[V - (V_a - V_c)]/V_c < 1$ ；動態沖刷，均勻泥砂條件下 ($\sigma_g < 1.3-1.5$)，橋墩發生沖刷的水流強度為 $V/V_c > 1$ ，非均勻堆於橋墩沖刷保護之試驗研究泥砂條件下 ($\sigma_g > 1.3$)，泥砂會發生護甲現象，沖刷坑深度會變小，因此橋墩沖刷發生在 $V/V_c > 1$ ；當 $V/V_a < 1$ 時，動態沖刷非均勻泥砂條件下，泥砂發生護甲現象但沖刷現象會持續發生不影響沖刷深度而清水沖刷沖刷現象被認為會持續發生。

- (二) 相對水流深度 (Flow Shallowness, y/b)：

y/b 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)^[46]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：

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

式中， d_s 為沖刷深度； y 為水深； b 為橋墩直徑。

Jain & Fischer(1981)^[36]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：

$$\frac{d_s}{y} = A_1 \left(\frac{y}{b} \right)^{m_1} (Fr)^{n_1} + B_1 \left(\frac{y}{b} \right)^{r_1 - p_1} \quad (2-3)$$

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 Fr 則為福祿數。Melville & Sutherland(1988)^[41]指出，當 $y/b > 1.43$ 時橋墩局部沖刷深度只與橋墩迎水面寬度有關；當 $y/b < 0.2$ 時，水深會影響橋墩沖刷深度；而當 $0.2 \leq y/b \leq 1.43$ ，水深及橋墩迎水面寬度皆會影響局部沖刷深度。

Raudkivi & Ettema(1983)^[49]認為 $y/b > 3 \sim 4$ ，而Melville(1997)^[39]則指出 $y/b > 1.5 \sim 2$ 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。

(三) 底床質相對粗糙度 (Sediment Coarseness, d_{50}/b) :

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)^[48]提出當 $d_{50}/b < 0.02\text{mm}$ 時為細顆粒，沖刷深度與粒徑無關；而當 $d_{50}/b > 0.02\text{mm}$ 時，沖刷深度為 d_{50}/b 的函數，且沖刷深度隨 d_{50}/b 之增大而變小。

Raudkivi & Ettem(1983)^[49]利用六種橋墩直徑加上兩種泥砂粒徑進行沖刷試驗，再將試驗結果細分為四類，(1) $b/d_{50} \geq 130$ ，細顆粒泥砂；(2) $130 > b/d_{50} \geq 30$ ，中顆粒泥砂；(3) $30 > b/d_{50} \geq 8$ ，粗顆粒泥砂；(4) $b/d_{50} \geq 20 \sim 25$ ，大顆粒泥砂，如圖2-3所示。當 $b/d_{50} \geq 20 \sim 25$ 時，平衡沖刷深度不受泥砂粒徑的影響。

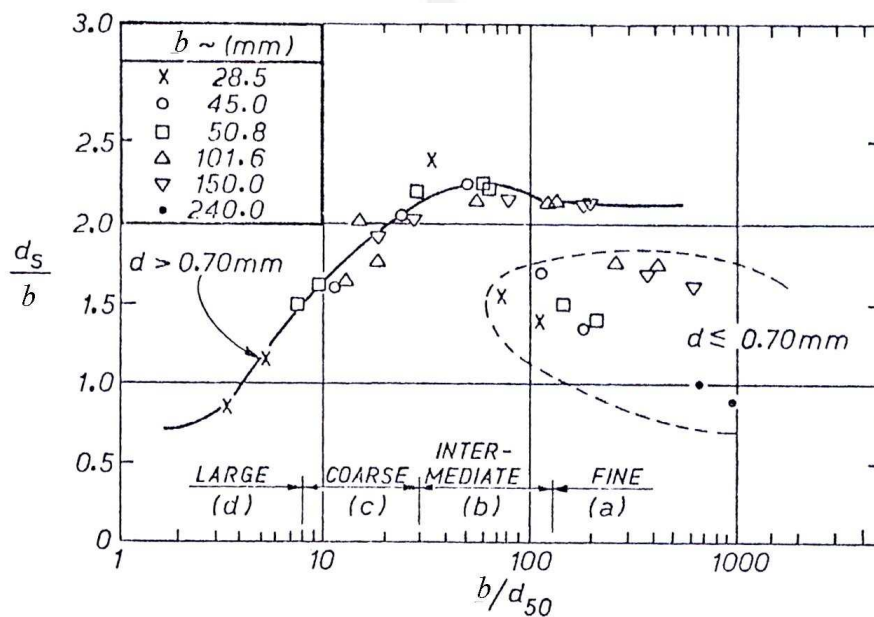


圖2-3 底床質相對粗糙度與沖刷深度之關係圖

Melville & Chiew(1999)^[43]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 $b/d_{50} < 50$ 時局部沖刷深度會受到泥砂顆粒大小的影響，如圖2-4所示。

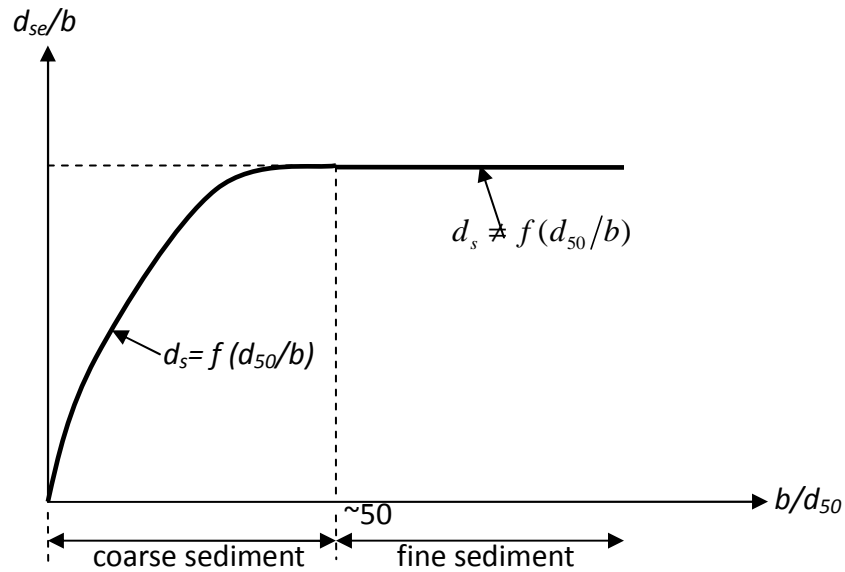


圖2-4 泥砂粒徑與沖刷深度關係圖

(四) 泥砂幾何標準偏差 (Sediment Nonuniformity , σ_g) :

Ettema(1980)^[31]進行非均勻泥砂清水沖刷試驗；

Chiew(1984)^[25]與Baker(1986)進行非均勻泥砂動態沖刷試驗，討論橋墩局部沖刷深度與泥砂幾何偏差關係。研究發現，非均勻泥砂進行動態沖刷試驗時，泥砂幾何標準偏差增大，局部沖刷深度會降低。

Raudkivi & Ettema(1977)^[48]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_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。並且提出以泥砂的幾何標準偏差來推估在天然河川不均勻泥砂之平衡沖刷深度 d_{se} 之方程式，如下所示：

$$\frac{d_{se}(\sigma_g)}{b} = K_{\sigma} \frac{d_{se}}{b} \quad (2-4)$$

式中， d_{se} 為均勻泥砂 ($\sigma_g \cong 1.0$) 之平衡沖刷深度； b 為橋墩直徑； K_σ 為修正因子，如圖2-5所示。

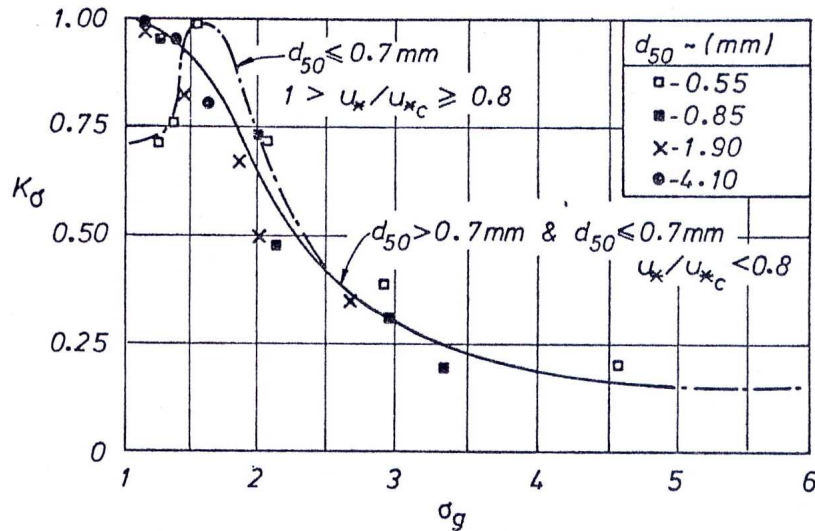


圖2-5 泥砂幾何標準偏差與修正因子之關係圖

Raudkivi & Ettema(1983)^[49] 提出當底床質的標準偏差 σ_g 為1時，沖刷深度約為橋墩直徑的1.4~1.5倍，同時隨著標準偏差的變大，沖刷深度會相對變小。並迴歸獲致無因次沖刷深度之計

$$\text{算公式：} \quad \frac{d_s}{b} = K_1 \left[\left(\frac{d_{50}}{b} \right) \left(\frac{u_* T}{b} \right) \left(\frac{V}{u_* b} \right) \right] + \ln K_2 \quad (2-5)$$

式中， K_1 為上式所繪製關係曲線之斜率， K_2 為截距。

(五) 時間的影響 (T/T_e)：

沖刷時間 T 與平衡沖刷時間 T_e 之比值亦影響橋墩局部沖刷行為。在清水沖刷時，局部沖刷深度隨時間而緩慢增加。在含滓沖刷時，達到平衡沖刷深度的時間要比清水沖刷來的快；惟含滓沖刷之平衡沖刷深度會因底床沙丘之運移，而作不規則的振盪。

Melville & Chiew(1999)^[43] 指出平衡沖刷深度 (d_{se}) 主要

是受流體的作用與沈積物的參數所影響，沖刷深度在總沖刷時間約10%時就可達到總平衡沖刷深度的50~80%，並假設沖刷深度在24小時的增加量小於0.05倍的橋墩寬度時，可視為達到平衡沖刷深度。同時提出沖刷達平衡所需時間的推估公（ $V/V_c < 1$ ，且為清水沖刷條件下）：

由前人研究與試驗室資料發現，進行橋墩清水沖刷試驗時，局部沖刷深度隨時間增加而增大。動態沖刷受底床變動影響，使得橋墩局部沖刷深度隨時間呈現起伏變化。動態沖刷下，橋墩局部沖刷深度達到平衡沖刷時間比清水沖刷條件下的平衡沖刷時間短。為克服橋墩進行清水沖刷試驗，平衡沖刷深度難以確定，Melville & Chiew(1999)^[43]提出：橋墩局部沖刷深度在24小時內，沖刷深度增加率低於橋墩直徑的5%，則此沖刷深度可視為平衡沖刷深度，其對應的時間視為平衡沖刷時間。

(六) 水流福祿數 (Froude Number)：

Ettema et al.(1998)^[32]研究發現，橋墩平衡沖刷公式與水流福祿數具有 $\frac{d_{se}}{y} \propto Fr^{-n}$ 關係式。 d_{se} ：橋墩平衡沖刷深度， Fr ：水流福祿數， y ：水深。Bozkus & Yildiz(2004)^[20]也提出橋墩局部

沖刷深度與福祿數關係可用 $\frac{d_{se}}{y} \propto Fr^{-n}$ 表示。 b ：橋墩直徑， d_{se} ：沖刷深度， Fr ：水流福祿數。

2.4 橋墩周圍之局部沖刷機制

均勻明渠水流流經橋墩時，由於受橋墩干擾而造成水流流況改變，使得泥砂輸送發生變化，橋墩周遭發展出局部沖刷坑。由前人研

究可將橋墩附近水流流動型態分成：如圖2-6 所示。

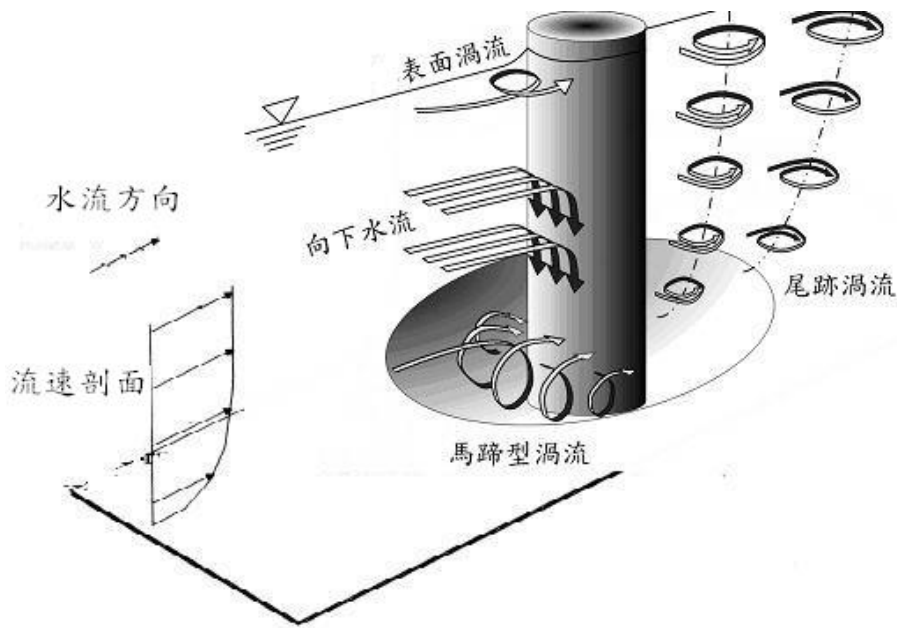


圖2-6 橋墩周圍水流示意圖

(一) 表面渦流 (Surface Roller)

水流流經水中結構物，結構物迎水面存有停滯點 (Stagnation Point) 與停滯流線 (Stagnation Streamline)，使水流動能轉成位能，水面形成墩前壅水 (Bow Wave)，停滯流線上方水流方向向上旋轉形成表面渦流；前人研究發現表面渦流理論上不影響橋墩局部冲刷深度。

(二) 向下水流 (Downflow)

依據伯努利方程式 (Bernoulli Equation) 忽略位置水頭 (Elevation Head) 效應，發現相同流線停滯點上承受最大壓力即為停滯壓 (Stagnation Pressure)，此時橋墩停滯壓大於附近水壓。由於水流流速分佈由水面向下遞減，速度水頭 (Velocity Head) 向下減少，壓力水頭 (Pressure Head) 向下增加且位置水頭 (Elevation Head) 向上增大，令橋墩停滯壓由水面向下遞減，橋墩迎水面發生壓力梯度 (Pressure Gradient) 變化形成向

下水流。向下水流運動型態類似於垂直射流（Vertical Jet），根據前人研究認為向下水流為造成橋墩局部沖刷的主要因素之一。

（三）馬蹄型渦流（Horseshoe Vortex）

橋墩前緣受向下水流作用立刻發展出沖刷坑，沖刷坑附近向下水流與河槽水流方向相互影響，沿橋墩周圍發展出三維性螺旋渦流，稱為馬蹄型渦流。馬蹄型渦流由橋墩迎水面開始發生，沿著橋墩邊緣向下游傳遞，並將沖刷坑泥砂往下游輸送。因此，研究認為向下水流與馬蹄型渦流為影響橋墩局部沖刷的主要因素。

（四）尾跡渦流（Wake Vortex）

尾跡渦流是受水流流經橋墩後，橋墩下游會產生水流分離點（Separation Point），流速剖面發生不連續面導致小型渦流（Cast-off Vortex）形成。此渦流可將泥砂吸入，將泥砂捲往水面，使橋墩後方底床發生堆積現象。

2.5 橋墩保護工

現今橋墩沖刷保護工法可概分為拋石控制法、河床控制法與水流導流法三大類，茲將各方法說明如下：

（一）拋石控制法：在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），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採用蛇籠工法進行保護，進而產生護甲效應抑制沖刷發展。此種方法最大的缺點，由於異形塊與河床為兩種不同之介質，因此其無法結合，且因干擾流場，造成結構體不安定，導致保護效果折

減而破壞。

(二)河床控制法：橋墩沖刷會使橋墩周圍底床下降，造成橋墩基礎外露，為改善基礎外露危及橋樑安全，部分橋樑於橋墩下游設置固床工，藉以減緩流速，使泥砂沉降，提高橋墩周圍河床，降低橋墩沖刷對橋樑安全的影響。

(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）；國內研究導流設施則為：黃進坤（2002）提出成功人工水草（Cheng-Kung Artificial Waterweeds）與黃進坤（2004）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，降低水流對橋墩沖刷能力，提高橋樑安全性。

2.6 環圈堆結構物保護橋墩之機制

本文探討之環圈堆結構物(如圖2-7所示)為前置型保護工，以橡皮圈(如圖2-8所示)及群樁(如圖2-9所示)組成。群樁之功用為提供環圈垂向移動之滑軌，環圈堆設置於橋墩上游，以破壞正向水流對於橋墩的衝擊，並於橋墩前方提供遮蔽效用，降低橋墩基礎局部沖刷深度。環圈以交錯方式設置，使得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，在保護工周圍的水流因不規則的保護工表面，使得水流方呈不規則變化，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，因此達到保護橋墩周圍底床的目的。

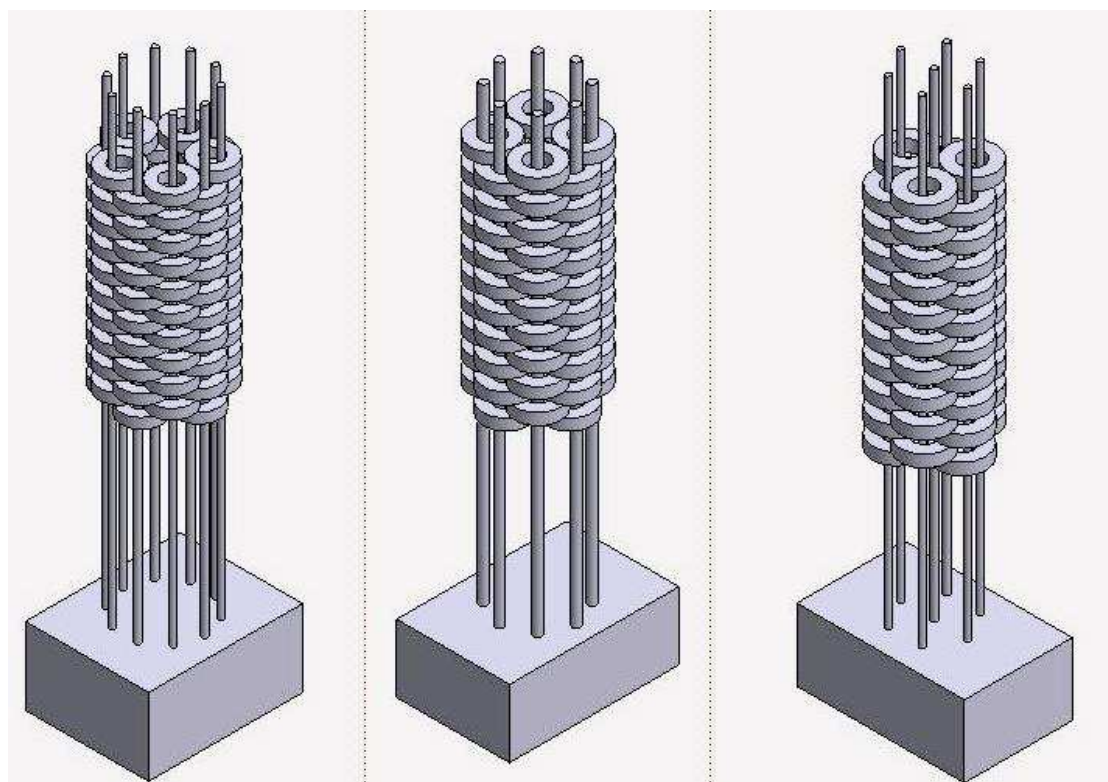


圖2-7 環圈堆示意圖



圖2-8 橡皮圈示意圖

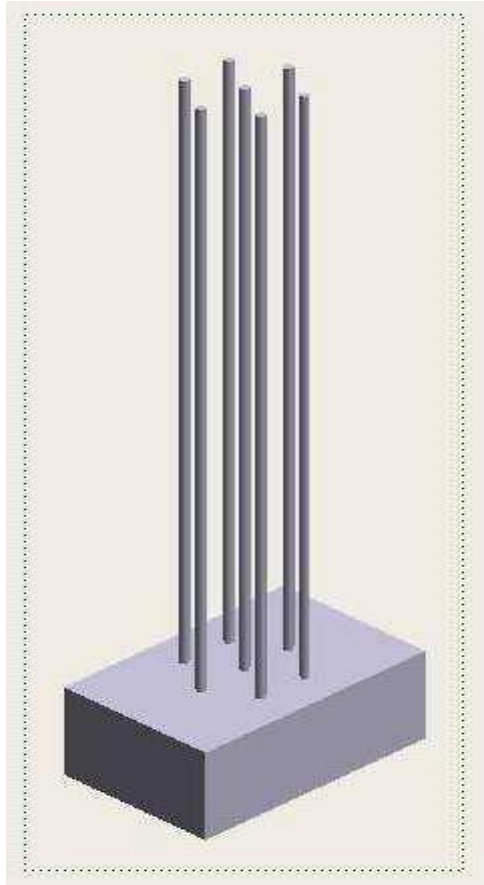


圖2-9 群樁示意圖

水流流經設置環圈堆保護之橋墩，橋墩附近流場(如圖2-10所示)，環圈堆結構物迎水面主要受向下水流與馬蹄型渦流作用，前端發生最大沖刷深度，部分水流往環圈堆兩側流動，為下游橋墩提供遮蔽與導流作用。水流通過環圈時，由於環圈為空心，有一部份的水流會經由環圈中間的孔隙向下流動，而因為環圈為交叉放置，因此水流能量會在環圈裡逐漸被消滅，泥砂被留在環圈間的孔隙中。當水流則由環圈間的縫隙流出，水分子彼此碰撞，造成水流能量損失，泥砂發生淤積現象並且由環圈堆後方開始產生，持續至橋墩前方，補充橋墩沖刷坑泥砂來源，降低橋墩局部沖刷深度。

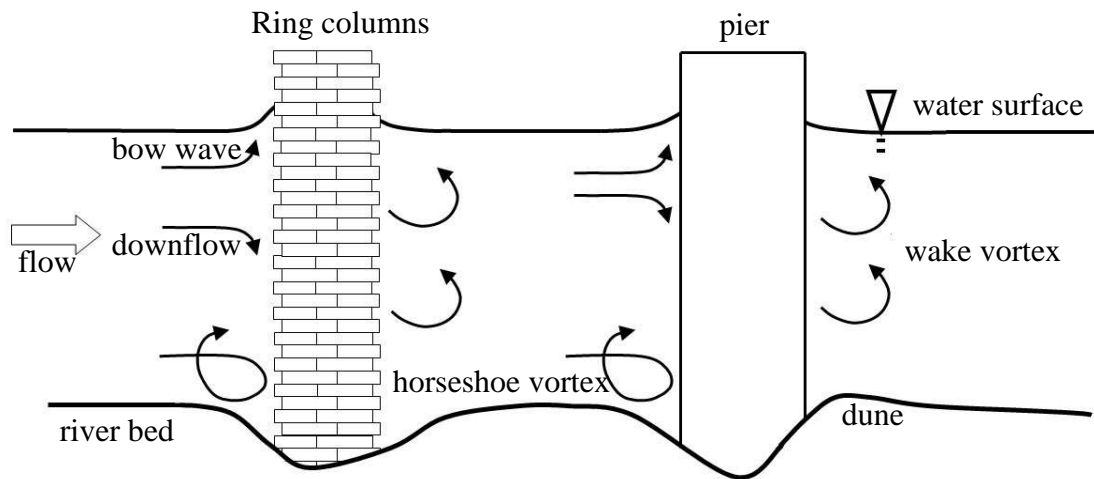


圖2-10 環圈堆結構物周圍流況示意圖

環圈堆背水面與橋墩迎水面間區域，向下水流與馬蹄型渦流作用力低於環圈堆前端作用力，降低對橋墩迎水面沖刷深度的影響。試驗觀察發現，試驗初期環圈堆結構物背水面泥砂底床逐漸增高，環圈堆兩側產生沖刷溝，並延續至橋墩兩側，泥砂被水流迅速帶往下游，使受環圈堆結構物保護的橋墩，最大沖刷深度發生在橋墩兩側。此時橋墩上游淤積堆泥砂流入橋墩迎水面沖刷坑，雖然橋墩迎水面沖刷坑深度隨時間增加逐漸變深，橋墩前緣之泥砂被帶往橋墩兩側，而使橋墩前緣沖刷深度與兩側之沖刷深度趨近，惟因橋墩迎水面沖刷坑泥砂補充來源充足，故能有效抑制橋墩迎水面沖刷坑深度的發展而達到保護功效，提高橋梁安全性。

2.6.1 環圈堆結構物之特性

本研究所探討環圈堆保護工特性說明如下：

(1) 降低水流對橋墩的衝擊力

將保護工設置在橋墩前方，對於下游橋墩產生遮蔽效果，避免橋墩受到正向水流的衝擊力，由環圈先阻擋第一波破壞力。

(2) 不易遭到破壞

即使遇到石頭或枯木的撞擊，因為橡皮環圈是柔性工法具有彈性，所以不容易遭受破壞。

(3) 改變水流方向，減緩流速

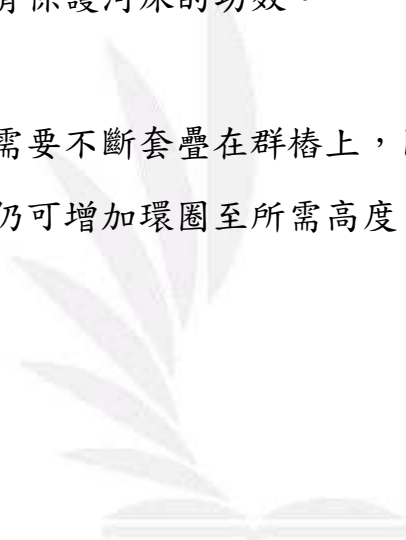
由於橡皮環圈以交錯方式設置，因此水流在流經保護工時，會因不規則的保護工表面使水流方向變成多方向性，水流流速減緩，降低水流對於橋墩周圍的沖刷能力。

(4) 保護工上的橡皮環圈隨著地形下沉

當環圈下層的泥砂被沖刷，橡皮環圈會隨上層重力和地吸引力向下沉，依舊能具有保護河床的功效。

(5) 更換容易

橡皮環圈可以視需要不斷套疊在群樁上，因此就算是環圈向下沉或是遭到破壞，仍可增加環圈至所需高度。



第叁章 試驗設備及方法

由於橋墩之局部沖刷屬於三維問題，且因保護工及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，故須利用水工模型試驗加以分析及驗證。

本研究藉由比較設置環圈堆結構物保護措施前後橋墩周圍之沖刷情形，探討不同環圈堆直徑的環圈堆結構物對橋墩沖刷的保護成效；並針對環圈堆結構物距離橋墩不同位置、不同環圈堆設置高度等重要參數加以分析研究，期能將結果提供相關單位應用之參考。

3.1 試驗設備與佈置

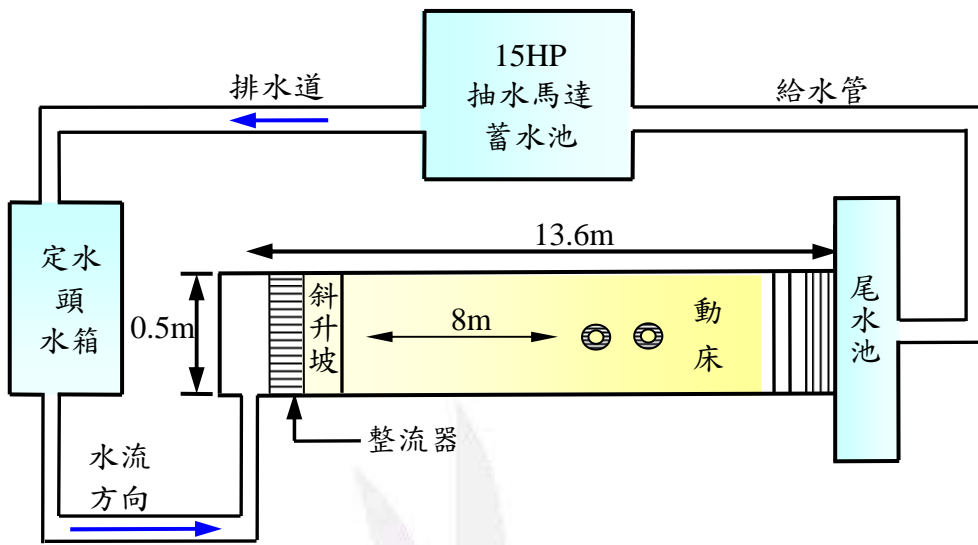
本研究所使用之設備位於逢甲大學水利工程與資源保育學系水工試驗室，試驗渠槽為中型循環玻璃渠槽，以下就循環渠槽、橋墩模型、環圈柱模型及相關附屬設備等規格說明之。

3.1.1 試驗渠槽

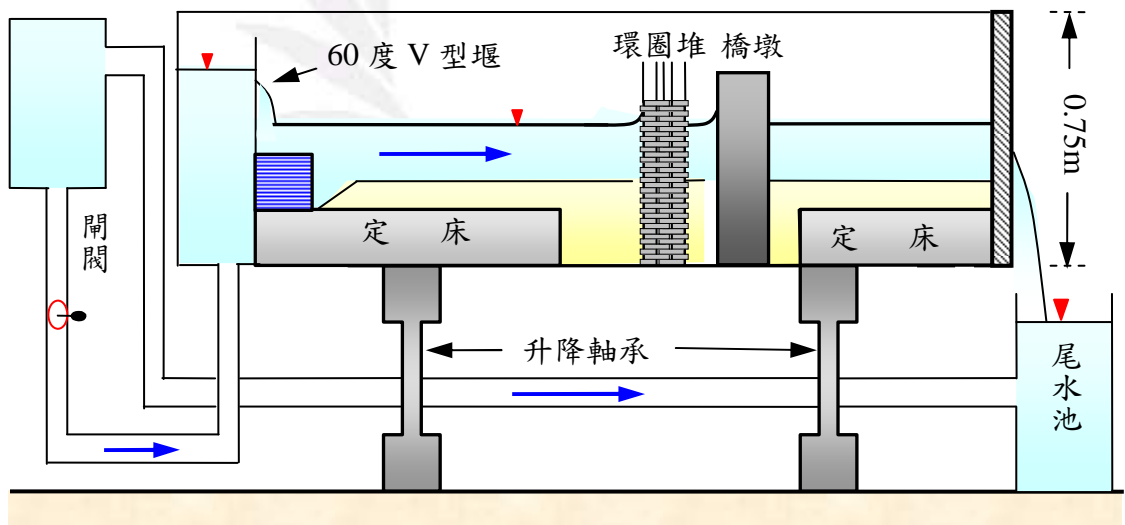
試驗渠槽如圖3-1所示，其相關資料如下：

- (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。
- (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

閘，可控制流量流至渠槽中。



(a) 頂視圖(plan view)



(b) 側視圖(side view)

圖3-1試驗渠槽配置圖

3.1.2 試驗橋墩

本研究藉由水工試驗探討不同環圈柱群配置對橋墩沖刷之影響，為了排除束縮效應對沖刷深度的影響，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沖刷現象。

3.1.3 試驗儀器

- (1) 二維電磁流速計(照片3-1):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。
- (2) 雷射測距儀(照片3-2):用以量測保護工及橋墩附近沖刷坑深度和範圍，了解橋墩周圍沖淤之分佈情形。
- (3) 光纖視鏡(照片3-3):量測橋墩之沖刷深度與觀察沖刷歷程，可配合數位攝影機拍攝。
- (4) 顯示式管路手動矩形閘閥(照片3-4):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。
- (5) 電腦:儲存試驗資料，以利研究分析並減少人為錯誤。
- (6) 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。
- (7) 環圈:外徑1.8公分、內徑1.2公分、寬度0.6公分之橡膠圈。
- (8) 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。



照片3-1 二維電磁式流速計



照片3-2 雷射測距儀



照片3-3 光纖視鏡



照片3-4 顯示式管路手動矩形閘閥

3.2 試驗規劃

為了使試驗能夠順利進行減少誤差，於試驗前需先進行(1)河床質分析(2)流量率定(3)相對水流強度(4)完全發展段之選定。

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厚之越南砂砂，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和，中值粒徑 d_{50} 為0.62mm，標準偏差 σ_g 約為1.29，屬於均勻泥砂，粒徑分佈如圖3-2所示。

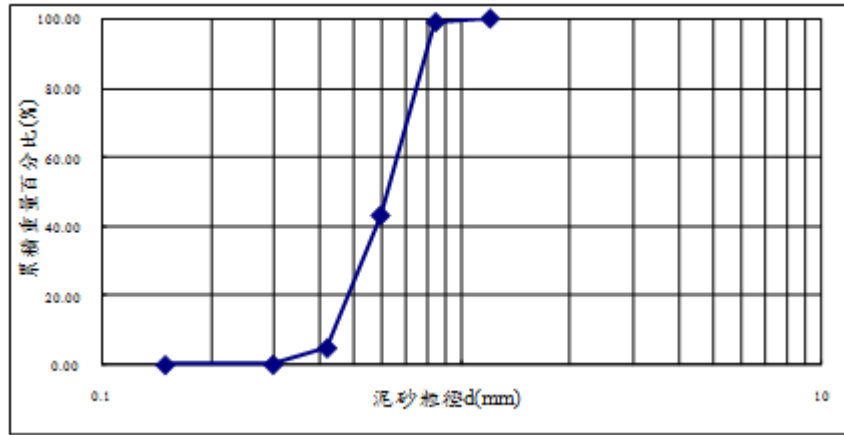


圖3-2 試驗泥砂粒徑分佈曲線

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。V型堰之流量率定曲線如圖3-3，經迴歸得式3-1。

$$Q=0.00004 y^2 -0.0003 y+0.001 \quad (3-1)$$

式中， Q =流量(cms)、 y =V型堰溢流水深(cm)

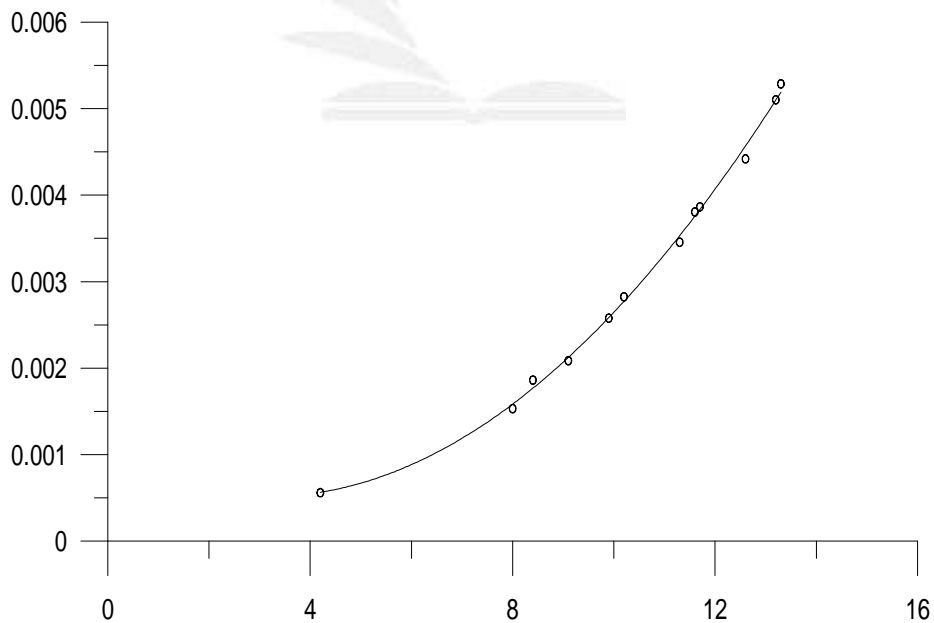


圖3-3 V型堰流量率定曲線

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} ，運用下列公式估算底床質臨界啟動速度 V_c 。

$$\frac{V_c}{u_{*c}} = 5.75 \times \log\left(5.53 \frac{y}{d_{50}}\right) \quad (3-2)$$

$$\text{上式中} \quad \begin{cases} u_{*c} = 0.00115 + 0.0125d_{50}^{1.4} & 0.1\text{mm} < d_{50} < 1\text{mm} \\ u_{*c} = 0.0305d_{50}^{0.5} - 0.0065d_{50}^{-1} & 1\text{mm} < d_{50} < 100\text{mm} \end{cases}$$

- (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) 。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 試驗水深

Melville & Sutherland(1988)^[41]指出，當 $y/b > 1.43$ 時橋墩局部沖刷深度只與橋墩迎水面寬度有關，即水深不影響沖刷深度，故本研究選定水深為1.5 倍橋墩直徑，而為了排除束縮效應對沖刷深度的影響，本研究選定橋墩直徑為渠道寬度之1/10為5公分，而水深則為8公分。

3.2.5 沖刷試驗時間

本研究在試驗前，分別進行設置保護工與未設置保護工的橋墩局部沖刷延時之預備試驗，設置保護工的配置為環圈柱群設置於距離橋墩直徑九倍處(即 $L=45$ cm)，環圈柱底部與砂面齊平。未設置保護工於16小時至40小時之沖刷深度變動量小於2.5 mm (橋墩直徑之5%)，符合Melville(1999)^[43]平衡沖刷條件，由此可知於40小時時已

達平衡沖刷時間，詳如圖3-4所示。由圖可知當連續沖刷10小時之橋墩沖刷深度達平衡沖刷深度之90.41%，已可充分表達沖刷坑特性，而設置保護工在第8個小時的最大沖刷深度已經穩定，因本研究旨在探討設置不同配置之保護工對橋墩沖刷的保護效果，而非探討橋墩平衡沖刷度，故本試驗採用連續沖刷8小時為試驗時間。

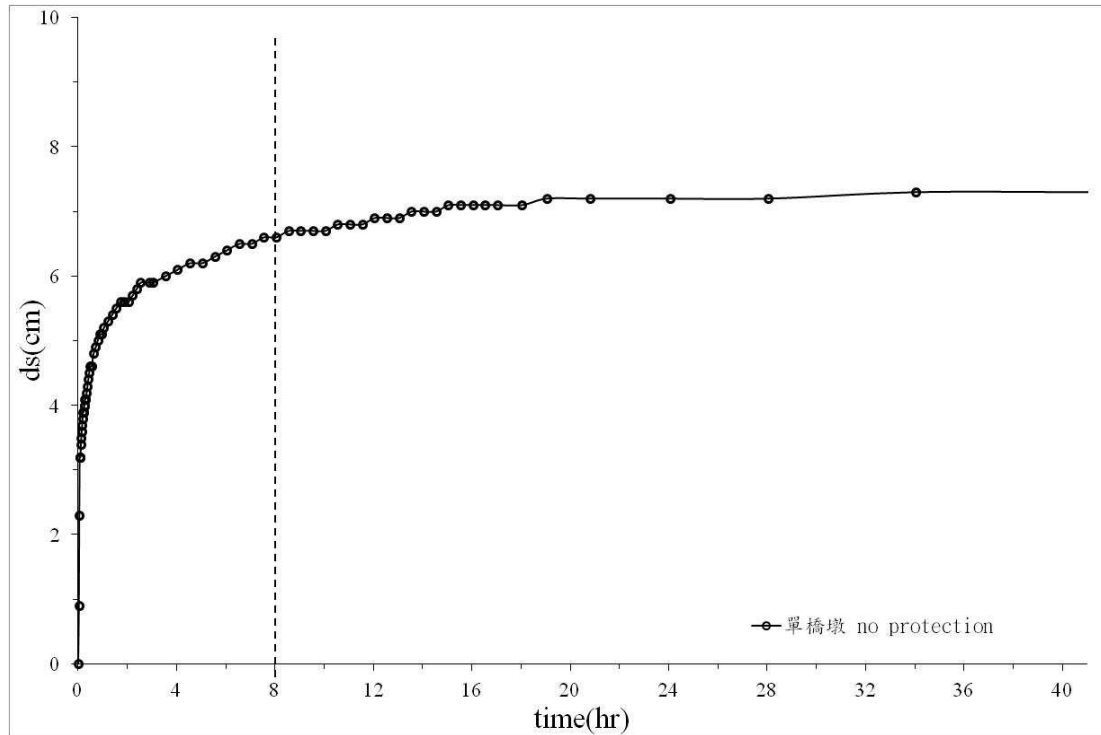


圖3-4 橋墩沖刷深度歷程變化

3.2.6 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：

- (一) 渠寬決定量測點位置。
- (二) 邊界層理論決定量測點位置。
- (三) 水深決定量測位置。
- (四) 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 與泥砂臨界啟動速度 V_c 之比值，即 V/V_c 為0.95的情況下量測水深，大約8公分。經試驗分析結果，本試驗之完全發展區段位於距入口約7.00m~9.30m之間，因此本研究設計橋墩落墩於距入口8.5m處之動床區段，詳如圖3-5。

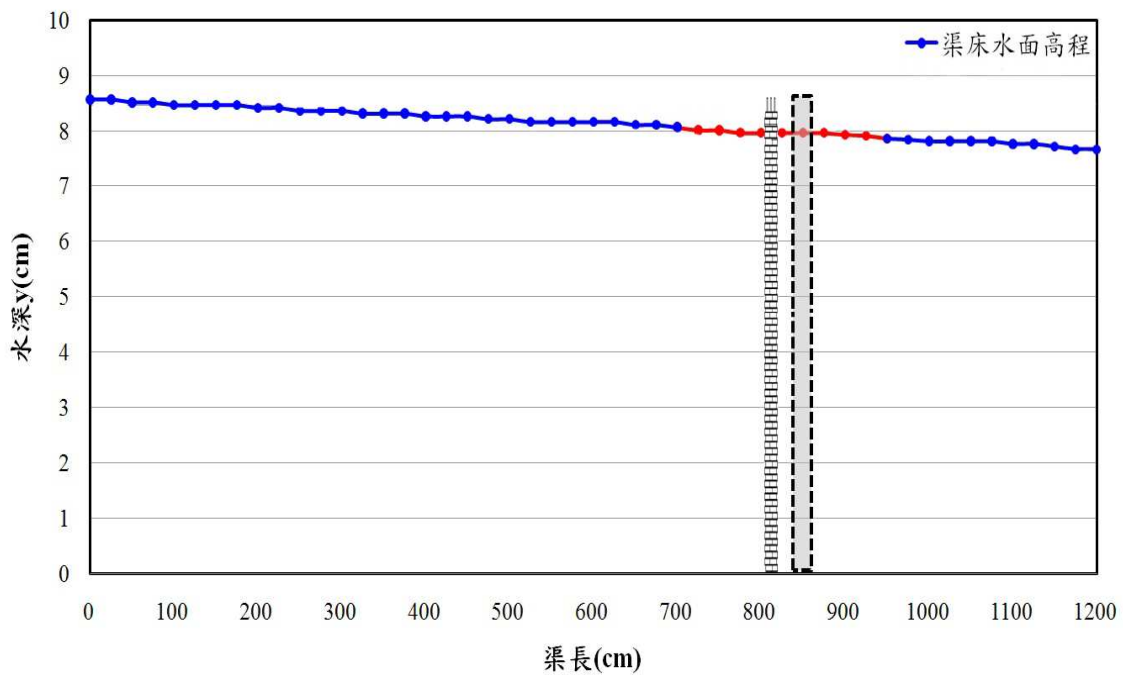


圖3-5 完全發展區段選定範圍

3.3 試驗內容

影響環圈堆對橋墩保護效果的因素主要有：（1）環圈堆設置距離、（2）環圈堆直徑、（3）環圈堆設置高度。本研究主要針對四種影響因素分別進行試驗，如表3-1 所示，期能提出環圈堆結構物對橋墩沖刷保護的最佳配置型式。

表3-1 環圈堆結構物試驗組別

組別	設置距離(L/b)	直徑變化(D/b)	高度變化(H/b)
A1	無保護工對照組		
B1	1	1	3
B2	2	1	3
B3	3	1	3
B4	4	1	3
B5	5	1	3
B6	6	1	3
C1	5	1	3
C2	5	0.9	3
C3	5	0.8	3
D1	5	1	3
D2	5	1	2.4
D3	5	1	1.6
D4	5	1	1.08

3.3.1 環圈堆設置距離、環圈堆直徑與環圈堆高度

環圈堆結構物提供橋墩沖刷保護的主要作用為遮蔽、導流與消能三大作用。環圈堆主要藉由水流能量消散，進而減緩水流沖刷能力，使橋墩前方產生泥砂淤積有效降低橋墩沖刷深度，達到保護橋墩的功效。

影響環圈堆結構物對橋墩保護效果的因素為：(一)環圈堆設置距離、(二)環圈堆設置高度、(三)環圈堆直徑。茲分述如下：

(一)環圈堆設置距離

環圈堆結構物設置於橋墩前方，能抑制橋墩沖刷坑深度發展。當設置距離超過臨界值，環圈堆保護工的消能導流與遮蔽作用，將無法發揮功效。

(二)環圈堆結構物設置高度

直接影響環圈堆縱向水流的遮蔽作用，使得橋墩前方向下射流的

能量產生變化。

(三)環圈堆直徑

影響環圈堆結構物提供橋墩橫向水流遮蔽作用之重要因素。

3.3.2 環圈堆設置高度

環圈堆結構物置於最佳設置距離時，因為環圈堆會隨底床沖刷而沉降，環圈堆突出試驗砂面高度，可視為影響橋墩沖刷深度的因素之一。環圈堆具有消能與導流功效，若環圈堆能將橋墩上游水流能量消減則可降低橋墩沖刷深度。

3.4試驗步驟

3.4.1試驗橋墩及環圈堆安置與底床質鋪設

在進行沖刷試驗前，先將試驗用橋墩及群樁置於渠槽動床試驗段，使其與渠槽兩側邊壁等距離，並確定試驗用橋墩及群樁保持鉛垂。試驗所選用之底床質主要為越南矽砂，屬於均勻粒徑。為確保實驗的準確性，在每一次試驗前均將底床質充分攪拌並均勻鋪設於渠槽中，再以木板整平。整平完成後，再利用超音波剖面量測儀量測底床剖面，確定底床平整性。

3.4.2試驗流量控制

利用顯示式管路手動矩形閘閥控制流量在研究所需 $V/V_c=0.95$ 內，打開抽水馬達後，開始計時，同時先開啟些微流量，直到水平面與後方尾水板等高之後，慢慢加大至試驗流量，此時約為2分鐘，在開始測量第一次數據，在依規定時間記錄下來，確定試驗區段水深為8 cm。直到試驗完成，再將閘閥控制關閉。試驗區段尾端設置0.5 cm高之壓克力尾水板，藉以抬升水位與防止泥砂流入尾水池。

3.4.3沖刷深度與河床剖面量測

本試驗主要是在沖刷至最大沖刷深度時之時間內，利用光纖視鏡

於規定時間觀測一次沖刷深度，並於歷時結束後，關閉尾水閘門使水壅高，但需緩慢關閉避免造成實驗誤差。

3.4.4 試驗操作程序

本研究試驗程序如下，流程示如圖3-6。

- (1) 裝置試驗儀器。
- (2) 安置橋墩模型於渠槽內。
- (3) 環圈柱設置於試驗預定位置。
- (4) 鋪設試驗河床質於渠槽內並均勻整平。
- (5) 開啟定水頭水箱之進水閘閥至試驗所需流量 Q ，前16分鐘每分鐘觀測一次並記錄，16至30分鐘每2分鐘觀測並記錄之，30至60分鐘每5分鐘觀測並記錄，60至180分鐘每10分鐘觀測並記錄，180到480分之間每半小時觀察並記錄。
- (6) 待沖刷時間達8個小時結束後，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(3)~(6)。



結束

圖3-6 環圈堆於橋墩沖刷之試驗流程圖



第肆章 結果分析與討論

本研究利用模型模擬透水性環圈柱群保護工設置於均勻橋墩上游，其周圍河床之沖淤變化。沖刷過程中利用光纖視鏡，同步觀測橋墩前方沖刷深度，並於沖刷結束後量測橋墩周圍沖刷深度，分析其沖刷特性。針對不同距離之環圈堆結構物，對橋墩具有的保護效果進行討論，選出最佳保護效果的環圈堆結構物距離，接著以最佳距離結構物分析環圈堆設置直徑對橋墩保護的影響；並且變化環圈堆設置高度，探討環圈堆結構物遮蔽橋墩上游縱向、橫向水流對減少橋墩沖刷深度的影響。

4.1 環圈堆設置距離對減少橋墩沖刷之影響

由於環圈堆結構物設置於橋墩前方位不同，會影響環圈堆結構物的保護成效。因此，選擇最佳環圈堆結構物進行六組環圈堆結構物設置距離的研究，其能找出最佳設置距離，使環圈堆結構物能充分發揮保護功效，降低橋墩沖刷深度。

4.1.1 沖刷歷程

由圖4-1可看出，各試驗組在沖刷初期沖刷深度快速增加，連續沖刷3小時後，沖刷歷程曲線斜率趨於平緩，橋墩沖刷深度緩慢增加，於6.5小時後，逐漸達到平衡沖刷深度。而經試驗發現橋墩沖刷深度受環圈堆設置距離影響，發現在 $L/b=5$ 倍距離時有最佳保護效果和 $L/b=1$ 倍的效果約略相同，但在圖中看到 $L/b=1$ 倍距離會有明顯回淤的現象產生，在約2小時半也有明顯回淤現象，其認為是橋墩和保護工距離近，導致保護工後方快速淤積之後發生第二次崩塌至橋墩前，而 $L/b=3$ 與 $L/b=1$ 由於橋墩前向下水流能量小於保護工後方上升流能

量，當保護工後方淤積堆達極限時則崩塌，而 $L/b=2$ 為何無此狀況，推測是橋墩前向下流與橋墩後方上升流水流持續以穩定狀態流動。

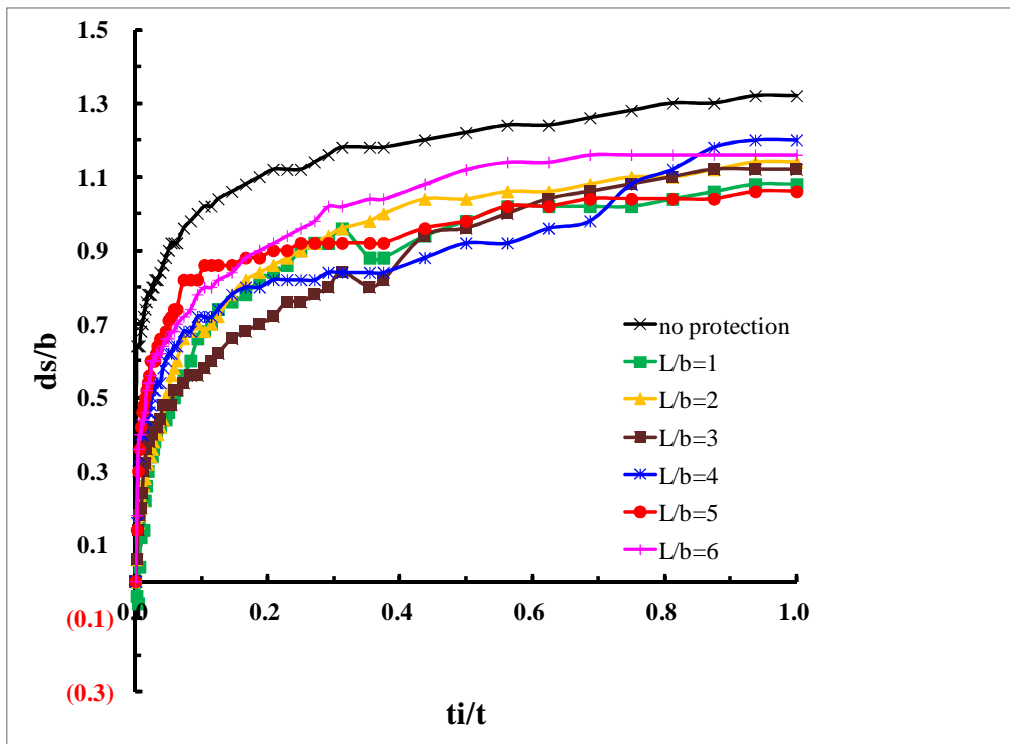


圖 4-1 不同環圈堆設置距離之橋墩沖刷歷程變化

4.1.2 沖刷坑與淤積堆之縱斷面變化

觀察六組試驗資料發現各組都在環圈堆結構物後方發展出一個延續至橋墩前方的淤積堆，可充分證明當水流通過環圈堆時，水流能量有損失情形發生，使得泥砂發生淤積現象。 $L/b=5$ 和 $L/b=6$ 由於保護工與橋墩距離遠，使水流能量在兩者中能量消散變小，所以保護工與橋墩後方皆有淤積堆的情況發生。從 $L/b=6$ 的淤積堆和沖刷深度來看，保護工以及橋墩兩者已經可以視為兩個個體，然而 $L/b=5$ 處於臨界距離的情況而達到較佳的保護橋墩效果。如圖4-2所示。

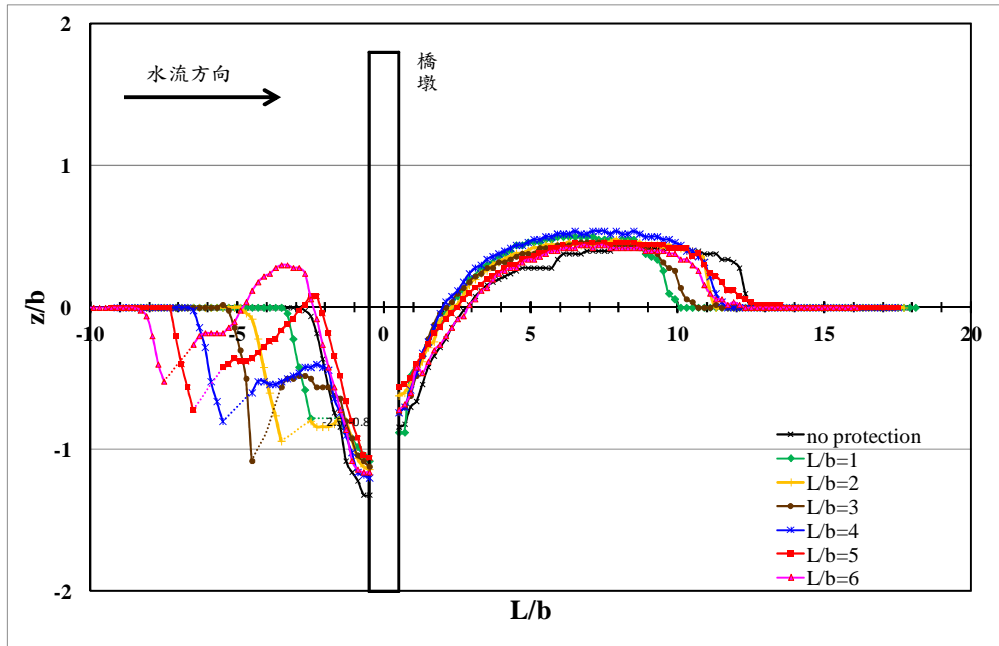


圖 4-2 不同環圈堆設置距離之河床縱斷面變化

4.1.3 小結

保護工與橋墩距離越近，其中間水流流動變化大，穩定狀態也無準確性可判斷。當環圈柱設置距離為5倍橋墩直徑($L=5b$)，可得最佳之保護效果，當 $L=6b$ 時，會產生最嚴重沖刷。在5倍距離時，前面45分鐘為正常沖刷，當50分鐘時前方淤積堆會掉入橋墩沖刷坑，達到保護效果。 $L=6b$ 時，前面沖刷深度大於5倍，達平衡時間之沖刷深度也比5倍大，推估當 $L>6b$ 時其保護越來越差。

表4-1 不同環圈堆距離對橋墩基礎產生的保護效果

組別	距離(L/b)	最大沖刷深度 ds(cm)	減少沖刷率(%)
A1	無保護工	6.6	
D1	1	5.4	18.2
D2	2	5.7	13.6
D3	3	5.6	15.2
D4	4	6.0	9.1
D5	5	5.3	19.7
D6	6	5.8	12.1

4.2 環圈堆直徑對減少橋墩沖刷之影響

4.2.1 沖刷歷程

圖4-3為不同環圈堆直徑條件下之橋墩最大沖刷歷程變化圖，觀察會發現不同環圈堆直徑時，橋墩最大沖刷深度皆能達到較小值，沖刷歷程曲線斜率較平緩，橋墩沖刷深度增加緩慢，當連續沖刷6.5小時，橋墩沖刷深度呈現出平衡沖刷型態，沖刷深度趨近於一固定值。經試驗分析後發現橋墩沖刷深度受環圈堆直徑影響，環圈堆直徑越小，橋墩沖刷保護效果越差。環圈堆直徑與橋墩直徑相同時，在連續沖刷3小時的時間內，橋墩沖刷歷程快速發展，橋墩沖刷深度迅速趨近於固定深度。

$D/b=0.8$ 在1小時半時，有回淤現象產生，也是因為保護工後方淤積堆崩落至橋墩前。直徑變化只在於接觸水流時堆積面積縮小，影響橫向水流變異較垂直水流明顯，由圖4-3可看出 $D/b=1$ 、 0.9 、 0.8 實際沖刷深度差異不大，但 $D/b=1$ 仍為較佳的配置。

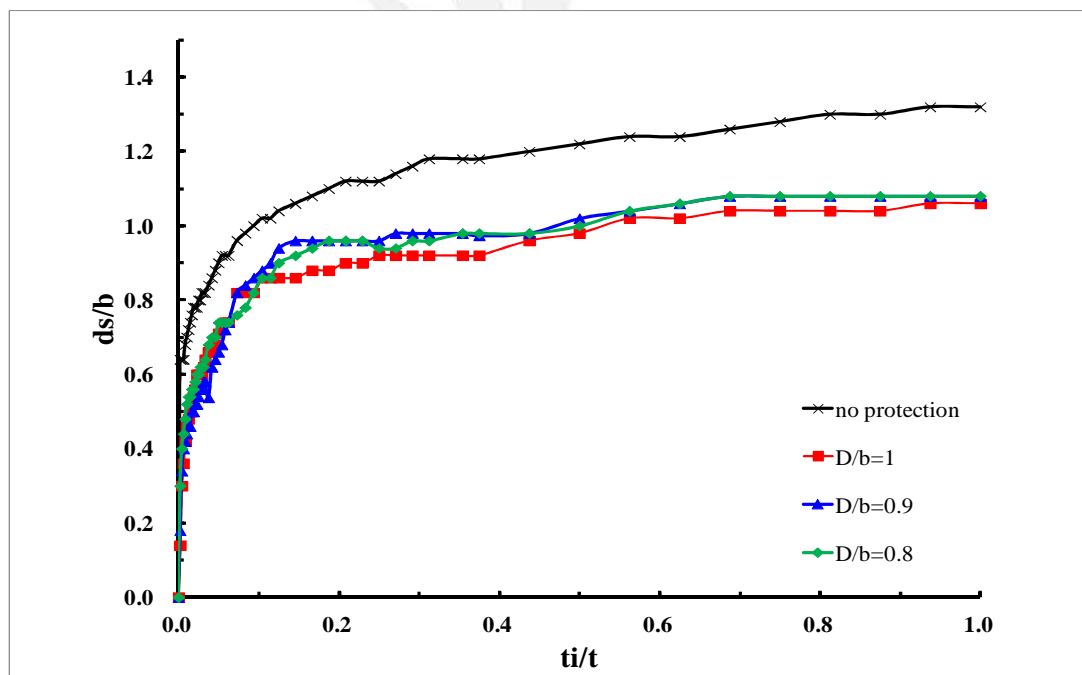


圖4-3不同環圈堆設置直徑之橋墩沖刷歷程變化

4.2.2 沖刷坑與淤積堆之縱斷面變化

由圖4-4可知，無論環圈堆直徑變化，環圈堆結構物對橋墩基礎都會有消能、遮蔽與導流效果發生，減少橋墩最大沖刷深，橋墩迎水面及背水面底床高程均受泥砂淤積影響，並且迅速於墩後發生淤積現象。當環圈堆直徑逐漸縮小，環圈堆結構物無法將橋墩上游水流完全遮蔽，以致於橋墩向下水流能量消散不明顯，橋墩基礎保護效果較不顯著。當環圈堆直徑與橋墩直徑相同，環圈堆結構物能完全遮蔽橋墩上游橫向水流，使水流能量消散，故保護效果達到最佳狀態。

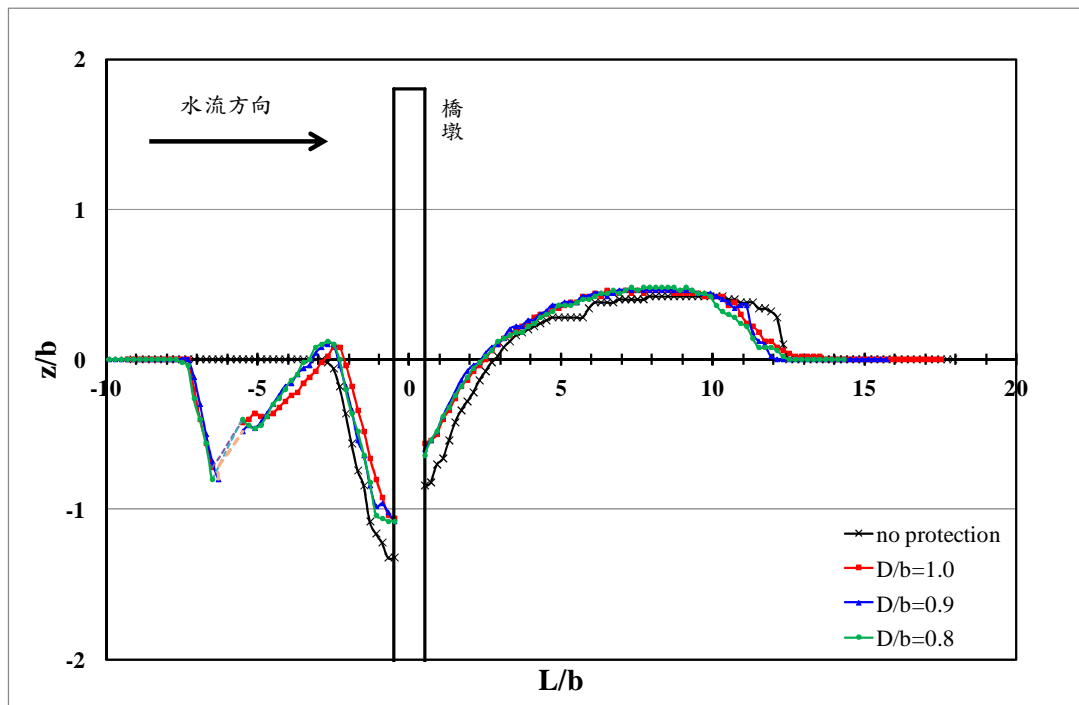


圖 4-4 不同環圈堆設置直徑之河床縱斷面變化

4.2.3 小結

在相同設置距離、設置高度與試驗條件下，環圈堆結構物直徑與橋墩直徑相同時，則橋墩基礎受最佳保護效果。環圈堆直徑為橋墩直徑的0.8時，橋墩基礎保護效果由19.7%降低至18.2%，保護效果約略減低；環圈堆直徑為橋墩直徑的0.9時，橋墩基礎保護效果也只有18.2%。由此可知環圈堆直徑變化對於橋墩局部沖刷影響甚小，當環圈堆

直徑與橋墩直徑相同時，環圈堆結構物能遮蔽橋墩上游水流，讓水流能量消散，並使部分水流往環圈堆兩側導流，環圈堆結構物保護功效可發揮，因而橋墩基礎獲得最佳保護效果。表4-1列出不同環圈堆直徑對橋墩基礎的保護效果。

表4-2 不同環圈堆直徑對橋墩基礎產生的保護效果

組別	直徑(D/b)	最大沖刷深度ds(cm)	減少沖刷率(%)
A1	無保護工	6.6	
C3	1	5.3	19.7
C4	0.9	5.4	18.2
C5	0.8	5.4	18.2

4.3 環圈堆設置高度對減少橋墩沖刷之影響

由於環圈堆結構物會隨底床沖刷而沉降，環圈堆高度（H）是否與試驗水深（y）相同，環圈堆高度是否影響環圈堆結構物對橋墩基礎的保護效果，為本節試驗研究的重點。採用四組不同環圈堆高度（15cm、12cm、8cm、5.4cm），進行橋墩沖刷效果的研究。

4.3.1 沖刷歷程

由圖4-5可知，當環圈堆設置高度低於試驗水深 $H/b < 1.6$ 時，於沖刷初期，沖刷深度即明顯增加；當環圈堆設置高度與水深齊平時，連續沖刷1小時後，由於環圈堆會隨底床沉降，水流通過環圈堆上方，而使橋墩再度向下刷深。 $H/b=2.4$ 可視為 $H/b=3$ ，除了其衝刷歷程相似之外，沖刷深度與剖面圖約略相同，兩者皆可完全遮蔽橋墩上游水流。當 $H/b=1.6$ 前半小時與 $H/b=3$ 相似，主要原因是有遮蔽橋墩上游水流達到保護效果，而過了半小時之後環圈因表面土砂下降，造成環圈順勢下降，使環圈高度低於水面而無法遮蔽上游水流，造成沖刷加速，使保護效果不彰。 $H/b=1.08$ 因環圈高度低於水面，無法完全遮蔽

上游水流，使其保護效果不佳，其次由於前方保護工冲刷量小，而使保護工後方淤積堆量也少，崩落至橋墩冲刷坑土砂量不足，不能呈現出保護效果。

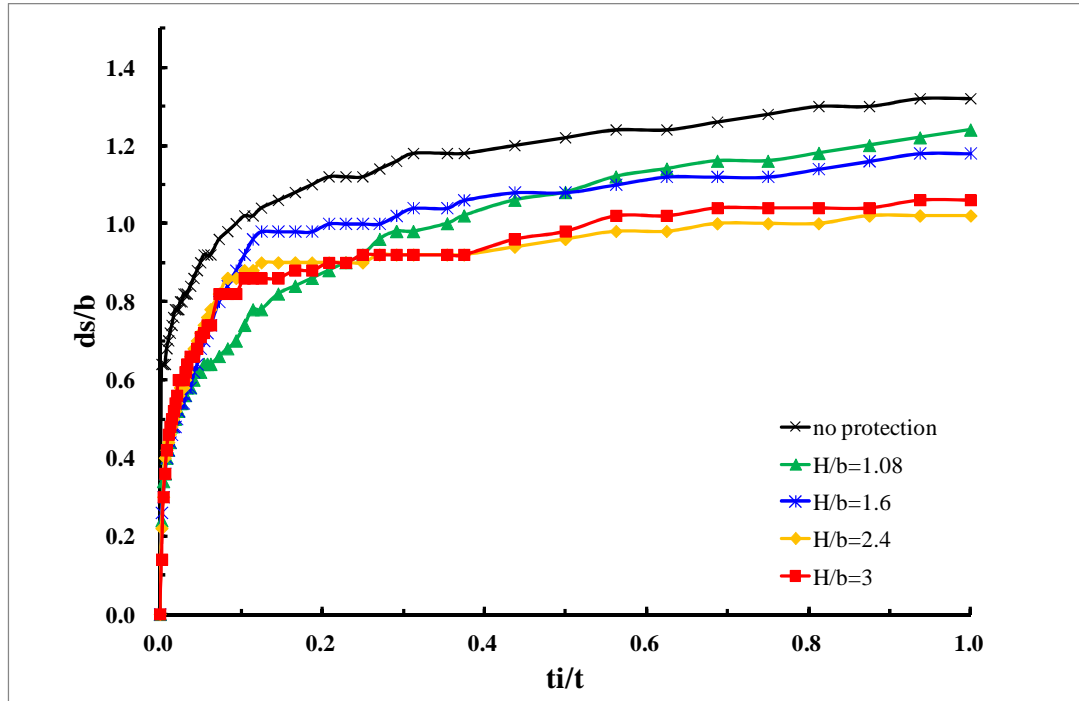


圖 4-5 不同環圈堆設置高度之橋墩冲刷歷程變化

4.3.2 冲刷坑與淤積堆之縱斷面變化

由圖4-6可知，當環圈堆設置高度小於水深時，由於設置度高度到水面這段水流並無受到保護，所以無法發揮遮蔽與消能功用，使得橋墩受向下水流影響產生較大之冲刷深度。當環圈堆設置高度小於水深時，橋墩後方之淤積堆較大。研判其原因為消能作用較弱，使泥砂無法於墩前淤積，而被水流帶至橋墩後方所致。H/b=1.08類似於水中大石頭，阻擋水流效果不大，因為流速越接近河床面越小，能量也越小。所以上層水流沒有受到任何阻擋是橋墩冲刷形態和無保護工型態相似。

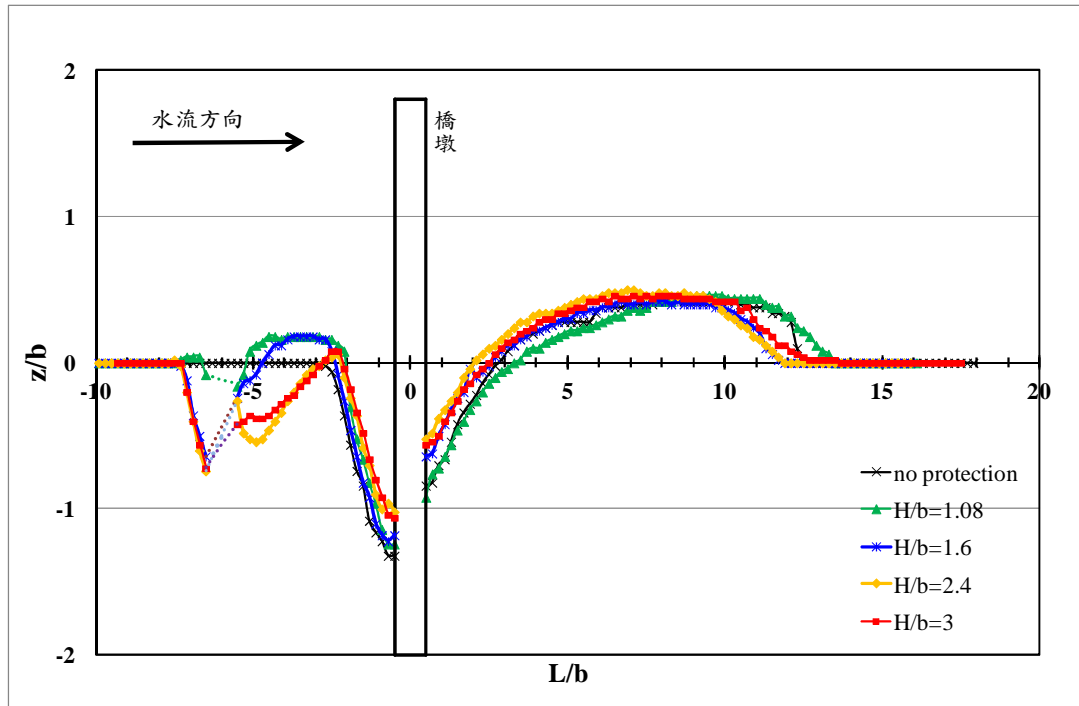


圖 4-6 不同環圈堆設置高度之河床縱斷面變化

4.3.3 小結

經試驗發現，若橋墩上游環圈堆結構物設置高度大於試驗水深，並且在試驗期間，環圈堆之頂端皆在水面之上，水流無法由環圈堆頂端溢流，則環圈堆結構物能完全遮蔽橋墩上游水流，且環圈堆結構物對橋墩基礎的保護效果能發揮出最大效用。由此試驗資料斷定，若橋墩上游水流完全通過環圈堆結構物，影響橋墩沖刷的向下水流能量將被減弱，使得橋墩最大沖刷深度降低，達到保護橋墩基礎的效果。當環圈堆設置高度小於試驗水深，其對橋墩提供的保護效果不佳，表4-3所示。

表4-3 不同環圈堆高度對橋墩基礎產生的保護效果

組別	高度(H/b)	最大沖刷深度 ds(cm)	減少沖刷率(%)
A1	無保護工	6.6	
D1	3	5.3	19.7
D2	2.4	5.1	22.7
D3	1.6	5.9	10.6
D4	1.08	6.2	6.06

伍、結論與建議

本研究主要以室內水工試驗模擬定量流流況下，當環圈柱設於橋墩上游，環圈柱保護工對橋墩沖刷之減緩效果，並於水流因素(相對水流強度 $V/V_c=0.95$ 、相對水流深度 $y/b=1.5$)與河床值特性(底床值相對糙度 $b/d_{50}=81$ 、泥沙幾何標準偏差 $\sigma_g=1.24$)進行相關試驗。透過改變環圈柱的設置距離、環圈柱直徑、環圈柱結構物高度等條件進行試驗，藉以瞭解不同配置之環圈柱保護工對橋墩沖刷深度之影響。由試驗過程、試驗觀察及試驗分析可以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小。
2. 環圈柱群設置於橋墩上游之距離為5倍墩橋墩直徑($L/b=5$)時為臨界最大值，橋墩沖刷減緩率約19.7%。無論設置距離變近或變遠，其減緩橋墩沖刷深度效果均漸次變差。另外，當設置距離 $L/b=4$ 時，環圈柱群保護工削減水流動能之效應無法擴及於墩前，僅有局部削減效果，因此，減緩橋墩沖刷率只剩9.1%。
3. 環圈堆設置高度 ($H/b>2.4$) 具有遮蔽橋墩上游水流的效果，環圈堆結構物設置高度應大於試驗水深與試驗進行中環圈堆下降之高度總和，可避免水流由環圈堆結構物頂端溢流，穩定橋墩上游水流使水流由橋墩兩側導流避免水流集中現象。
4. 當環圈柱無法如預期隨地勢而沉降，然而環圈柱仍有導流效果，惟其消能效果會減少許多。而環圈柱底部因沖刷之沖刷坑與底床有段距離後，底部水流又會開始沖刷，造成墩前沖刷深度加深。

5. 當環圈堆結構物設置距離採用5倍橋墩直徑 ($L=5b$)，環圈直徑與橋墩直徑相同時($D=b$)，環圈堆結構物設置高度大於試驗水深 ($H>b$)，對於橋墩之沖刷減緩率可達19.7%，為本研究試驗條件中最佳配置型式。

5.2 建議

1. 本研究針對水平坡降之清水沖刷試驗，由於台灣地形屬坡陡流急，與一般河川特性不太一致，未來可針對不同坡度進行試驗。
2. 本研究的水深為定值，可藉由不同水深進行試驗，延伸探討水深對橋墩沖刷保護效果之影響。
3. 試驗過程中發現環圈柱能減緩水流強度，並在圓柱後產生淤積堆，顯示具有抵抗沖刷產生淤積之效果，可將環圈柱嘗試用於彎道之沖刷防治。
4. 本研究為固定流量，可針對不同流量進行試驗，討論不同流量對橋墩沖刷保護效果之影響。
5. 理當要將數據迴歸分析，研究出一經驗方程式，提供以後學者參考使用。



參考文獻

1. 田附銘，2002，「橋墩局部沖刷受橋墩上導流及消能裝置之影響」，逢甲大學土木及水利工程研究所碩士論文。
2. 吳虹邑，2005，「筐網結構物對橋墩沖刷保護之研究」，成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。
3. 段錦浩，2004，「廢輪胎材料對土石流撞擊力消能之研究」，中華水土保持學報，第35卷第二期，151-163頁。
4. 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。
5. 陳泳錦，2008，「定量流流況下水深對非均勻橋墩局部沖刷影響之研究」，逢甲大學水利工程與資源保育學系碩士班碩士論文。
6. 程仕帆，2003，「套環保護工法對減少橋墩局部沖刷之研究」，中央大學土木工程研究所碩士論文。
7. 傅家揚，2006，「筐網結構物在不同水流攻角對橋墩沖刷保護之影響」，成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。
8. 彭大雄，2007，「柔性葉片環圈堆對橋墩抗沖刷效果之實驗研究」，成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。
9. 黃俊傑，2008，「筐網群角度變化對地形變動之影響」，成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。
10. 黃怡仁，2009，「直排筐網群樁於渠道中之沖淤現象」，成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。
11. 張仁瑋，2010，「環圈柱於橋墩沖刷保護之研究」，逢甲大學水利工程與資源保育學系碩士班碩士論文。
12. 楊志偉，2006，「透水結構物附近及其內部流場特性分析」，成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。

13. 鄭人豪，2007，「變量流流況下非同心圓柱型橋墩局部沖刷之研究」，逢甲大學水利工程與資源保育學系碩士班碩士論文。
14. 鄭聰信，2007，「橋墩沖刷保護機構之現地實驗與探討」，成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文。
15. 賴泉基，2005，「透水與不透水結構物於高水位之流場特性」，中華民國第十五屆水利工程研討會，第N69-73頁。
16. 16.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」，逢甲大學水利工程研究所碩士論文。
17. 蔡岳臻，2006，「變量流歷線作用下非均勻同心圓柱型橋墩局部沖刷之研究」，逢甲大學水利工程研究所碩士論文。
18. 顏榮甫，1986，「粗質渠床上橋墩周圍之沖刷試驗研究」，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文，第33頁。
19. 盧昭堯、林呈、王傳益，2004，「河道深槽沖淤量測及預測模擬變化潛勢評估(2/3)」，經濟部水利署水利規劃試驗所報告。
20. Bozkus, Z. and Yildiz, O. (2004), "Effects of Inclination of Bridge Piers on Scouring Depth", *Journal of Hydraulic Engineering*, pp. 827-832.
21. Breusers, H. N. C., Nicollet, G. and Shen, H. W. (1977), "Local Scour around Cylindrical Piers", *Journal of Hydraulic Research*, 15(3):211-252.
22. Breusers, H. N. C. and Raudkivi, A. J. (1991), "Scouring", *IAHR, Hydraulic Structure Design Manual, Vol.2, Belkema*.
23. Carmelo Grimaldi, Roberto Gaudio, Francesco Calomino and Antonio H. Csrdo (2009), "Control of Scour at Bridge Piers by a Downstream Bed Sill" *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.135, No.1, pp.13-21.
24. Chabert, J. and Engeldinger P. (1956), "Etude des afouillements

- authordes piles des ponts”, Laboratoire National d’Hydraulique, Chatou,France.
25. Chiew, Y. M. (1984), “Local Scour at Bridge Piers, School of Engineering”, Report, No.355, pp. 200.
 26. Chiew, Y. M. and Melville, B.W. (1987), “Local Scour Around BridgePiers”, Journal of Hydraulic Research, 25(1):15-26.
 27. Dargahi, B. (1990), “Controlling Mechanism of Local Scouring”, Journal of Hydraulic Engineering, 116(10) :1197-1214.
 28. Dey, S. (1999), “Time-variation of Scour in the Vicinity of CircularPiers”, Proc Instn Civ. Engrs Wat., Marit. and Energy, 136 :67-75.
 29. Dey, S. (2004), “Clear-Water Scour at Abutments in Thinly ArmoredBeds”, Journal of Hydraulic Engineering, 130(7).
 30. Dey, S. and. Raikar, R. V. (2007), “Characteristics of Horseshoe Vortex in Developing Scour Holes at Piers”, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.133, No.4, pp.399-413.
 31. Ettema, R. (1980), “Scour at Bridge Pier”, School of Engineering, 216:527.
 32. Ettema, R., Mostafa, E. A., Melville, B. W., and Yassin, A. A. (1998), “Local Scour at Skewed Piers”, Journal of Hydraulic Engineering, 124(7):756-759.
 33. Ghorbani, B. and Kells, P.O. (2008), “Effect of submerged vanes on the scour occurring at a cylindrical pier”, IAHR, Journal of Hydraulic Research, Vol.46, No.5, pp. 610-619.
 34. Graf, W. H. and Istiarto I. (2002), “Flow pattern in the scour hole around a cylinder”, Journal of Hydraulic Research, 40(1):13-20.
 35. Huang, C. K., Tang, C. J., and Kuo, T. Y. (2005), “Use of Surface Guide Panels as Pier Scour Countermeasures”, International Journal of Sediment Research, 20(2):119-130.

36. Jain, S. C. (1981), "Maximum Clear-Water Scour around Circular Piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.107, No.5, pp.611-626.
37. Laursen, E. M. (1962), "Scour at Bridge Crossings", *Journal of theHydraulic Division*, 86(2):39-54.
38. Laursen, E. M. (1963), "Analysis of Relief Bridge Scour", *Journal ofHydraulic Division*, 89(3):93-118.
39. Melville, B. W. (1997), "Pier and Abutment Scour: Intergrated Approach", *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(2):125-136
40. Melville, B. W. and Raudkivi, A. J. (1977), "Flow Characteristics in Local Scour at Bridge Piers", *Journal of Hydraulic Research*, 15(4):373-380.
41. Melville, B. W. and Sutherland, A.J. (1988), "Design Method for LocalScour at Bridge Pier", *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(10):1210-1226.
42. Melville, B. W. and Hadfield, A.C. (1999), "Use of Sacrificial Piles as Pier Scour Countermeasures", *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(11):1221-1224.
43. Melville, B. W. and Chiew, Y. M. (1999), "Time Scale for Local Scourat Bridge Piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(1):59-65.
44. Melville, B. W., and Coleman, S. E. (2000), "Bridge Scour", *Water Resourcrs Publications, LLC*.
45. Morris, H. M. (1955), "Flow in rough conduits", *ASCE Transactions*, Vol.120, No.2745, pp.372-388.
46. Neill, C.R. (1964), "River-Bed Scour, a Review for Engineers", *Canadian Good Roads' Assoc, Techn, Publ, No.23, Ottawa*.
47. Oliveto, G. and Hager, W. H. (2005), "Further Results to Time-Dependent Local Scour at Bridge Elements", *Journal of*

- Hydraulic Engineering, 131(2):97-105.
48. Raudkivi, A. J. and Ettema, R. (1977), "Effect of Sediment Gradation on Clear Water Scour", Journal of the Hydraulic Division, 103(10):1209-1213.
 49. Raudkivi, A. J. and Ettema, R. (1983), "Clear-Water Scour at Cylindrical Piers", Journal of Hydraulic Engineering, 109(3):338-350.
 50. Raudkivi A. J., 1986, "Functional Trends of Scour at Bridge Piers", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.112, No.1, January, pp.1-13.
 51. Subramanya, K. (2003), "Flow in Open Channels", Tata Mcgraw Hill.
 52. Unger J. and Hager W. H. (2006), "Riprap Failure at Circular Bridge Piers" ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.132, No.4, pp.354-362.
 53. Virender Kumar, Kittur G. Ranga Raju and Nandana Vittal. (1999), "Reduction of Local Scour around Bridge Piers Using Slots and Collars", ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.125, No.12, pp.1302-1305.
 54. Zarrati, A. R., Nazariha, M., Mashahir, M. B. (2006), "Reduction of Local Scour in the Vicinity of Bridge Pier Groups Using Collars and Riprap", Journal of Hydraulic Engineering, 132(2):154-162.