

中華民國第 59 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 地球科學科

佳作

030511

終流砥柱-消波塊對橋墩沖刷的影響

學校名稱：高雄市立阿蓮國民中學

作者： 國二 張殷瑄 國二 梁宇鈺	指導老師： 曹 鎮 洪源茂
---------------------------------	-----------------------------

關鍵詞：流場、消波塊、橋墩

摘要

本報告研究不同洪水量對橋墩沖刷的影響，以高雄甲仙區之寶隆大橋為研究主體，並使用縮小模型搭配沖刷水槽，以模擬實際河流對橋墩沖刷之影響，再搭配消波塊探討對橋墩的保護效果，最後利用 Surfer 繪圖軟體繪製沖刷前後之地形變化，進行圖形之對比與分析，即可完整呈現不同洪水量與各類型消波塊配置之沖刷差異。

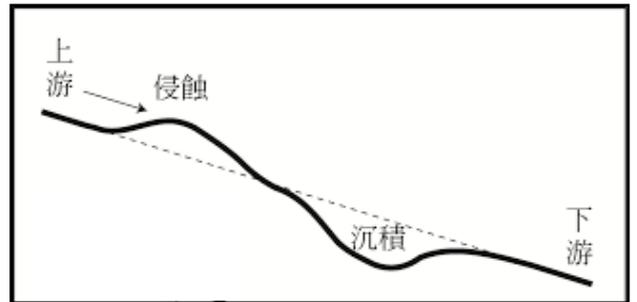
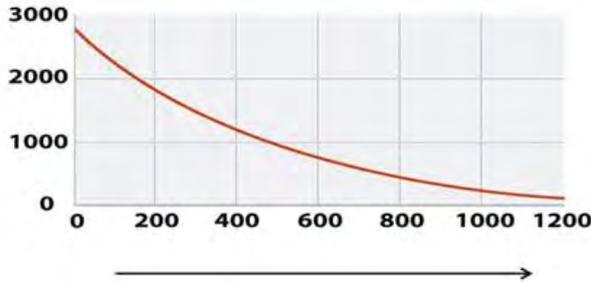
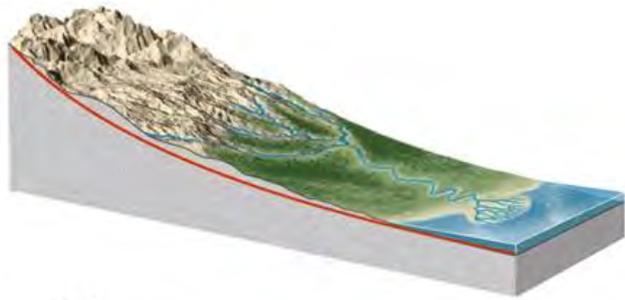
由實驗結果歸納發現，水位及流速越大對橋墩造成的沖刷越強，對橋樑的破壞也最嚴重；另外消波塊的型態與排列方式可以有效減緩流速並降低沖刷，達到一定的保護效果，值得未來做更進一步的研究與討論。

一、前言

台灣位處颱風路徑上，每年往往受到強風豪雨的襲擊，加上先天地形坡陡流急，集水區雨量快速集中，導致河流洪水暴漲沖刷加劇，對橋樑橋墩造成相當不利的因素。

台灣傳統橋樑多為重力式，橋墩採用混凝土沉箱搭配樁基礎設計，主要支撐力依賴沉箱基礎支撐於河床上來抵銷橋梁重力，一旦沖刷太深導致沉箱底完全外露，橋的重量就轉嫁到較細的樁基礎上，可能導致橋墩傾斜或斷裂，橋梁安全岌岌可危。

根據「河道平衡」理論，自然河道最終會達到沖蝕→搬運→堆積的平衡狀態，當河道樹立橋墩時，就是破壞河道平衡的障礙物，水流會往兩側繞過障礙物並加速沖刷，造成橋樑等構造物的沖刷甚至破壞，對人民生命財產造成重大損失，因此有關橋墩沖刷的研究一直是相當重要課題，本報告的重點即為研究 1.流場 2.消波塊 3.橋墩沖刷三者之間的相關性。



河流加速侵蝕河床突起處(削平)，在河床凹陷處加速沉積(填平)，最終河床趨於平滑達到河道平衡

橋墩屬於河道上的突起物，由上圖可知會受到自然營力的加速侵蝕，導致橋墩裸露；若下游有盜採砂石情況會更嚴重，因此必須採取適當措施加以保護。

二、研究動機

前些時候去甲仙遊玩時經過「甲仙大橋」，漂亮的紫色鐵橋搭配奇特造型吸引了我的注意，爸爸說其實以前是水泥橋，因為颱風引發洪水沖毀，才重建現在的新鐵橋，當時甲仙幾乎變成孤島，有很長時間要繞很遠的路才能進去。不禁讓人好奇洪水沖刷的力量有多大？它是怎麼把橋樑被沖毀掉？正好回家時經過下游的「寶隆大橋」，發現橋墩周圍擺了很多消波塊保護，讓我更好奇消波塊能保護橋墩嗎？該怎麼擺最好呢？也使我們決定進行這次的科展研究。



甲仙大橋災後與重建圖

經過上網與圖書館找尋資料，發現其實甲仙大橋是在 2008 年辛樂克颱風被沖毀，而且有關沖刷的現象相當複雜，有很多物理相似律要遵守，大多是使用沖刷水槽來模擬實驗，為此我們請教學校的地科老師，嘗試在探究實作的課程設計橋墩與消波塊模型，並製作沖刷模擬水槽，希望能進一步了解橋墩沖刷與水流流場以及消波塊的相關性。

三、研究目的

1. 了解水工模型實驗的基本原理
2. 了解不同形式消波塊對流場的影響
3. 了解不同水流流速對橋墩沖刷的影響
4. 比較不同形態消波塊對橋墩沖刷的影響
5. 分析消波塊排列方式對橋墩沖刷的影響

四、研究設備器材

寶隆大橋設計圖(公路局甲仙工務段)

沖刷砂(按照級配比例) 鉛錘 游標尺

保麗龍 美工刀 鋤刀

塑膠消波塊模型(3D 列印，縮尺比例 1：100，共五種形式)

翻模用矽膠

波特蘭水泥

沉水泵浦(1/4 馬力，最大揚程 10M，最大水量 180L/min)

沖刷水槽(訂製，長 120cm 寬 35cm)

水泥橋墩模型(自製，縮尺比例 1：100)

水泥消波塊模型(自製，縮尺比例 1：100)

Surfer 科學繪圖軟體

五、水工模型理論

在探討橋墩沖刷現象時，由於水流繞過障礙物會產生加速作用，造成河床的沖刷產生淘刷坑，淘刷坑會改變原本的水流狀態，而揚起之土砂又與水流交互作用，使流場更加混亂，這種三維紊流場問題搭配複雜的邊界條件，很難用一般之物理計算加以分析，因此往往需要設計縮小版的水工模型進行試驗，以釐清沖刷的各種現象。

由於縮小模型與原型間存在不少物理上的差異，因此水工試驗必須能反應原型中各種因素影響下發生的力學現象，故水工模型與原型之間應滿足：1. 幾何相似(geometrical similarity)、2. 運動相似(kinematic similarity)、3. 動力相似(dynamic similarity)；而水工模型相似律為 1. 福祿定律(Froude Law)、2. 雷諾定律(Reynolds Law)、3. 韋伯定律(Weber Law)、4. 馬赫定律(Mach Law)（水工模型試驗參考手冊，2011）。

試驗中要使模型各種參數均與原型相等相當困難，試驗時應選最重要之參數的來決定模型的相似，其他不重要者可以忽略不計。如水工試驗探討以重力主導之水理現象時，在基本公式中除重力外，其他各項均略去，則可以用福祿定律來作為模型之相似律，因此**本次科展即利用福祿相似原理**來進行實驗設計與計算，說明如下。

(一)幾何相似：

指模型(m)與原型(p)間之幾何尺寸成比例，而比尺則以 λ 符號代表之。

$$\text{長度比尺} = \lambda_L = \frac{L_m}{L_p} \quad \text{其中，} L_p = \text{原型長度、} L_m = \text{模型長度}$$

$$\text{面積比尺} = \lambda_A = \frac{L_m^2}{L_p^2} = \lambda_L^2 \quad \text{體積比尺} = \lambda_V = \frac{L_m^3}{L_p^3} = \lambda_L^3$$

(二)運動相似：

指模型與原型間相對應點之速度與加速度成比例，在運動性相似中，時間及長度為控制之因素，在模型試驗中運動性相似所包括之項目為速度、加速度、流量等，說明如下。

$$\begin{aligned} \text{時間比尺} = \lambda_T &= \frac{T_m}{T_p} & \text{速度比尺} = \lambda_v &= \frac{V_m}{V_p} \\ \text{流量比尺} = \lambda_Q &= \frac{Q_m}{Q_p} & \text{加速度比尺} = \lambda_a &= \frac{a_m}{a_p} \end{aligned}$$

(三)動力相似：

指模型與原型間相對應點所受之各種外力成比例，此比值可由牛頓運動第二定律推導。在模型與原型完全相似時，各慣性力之比必須等於各種作用力總和之比，可用下式表示

$$\frac{(F)_m}{(F)_p} = \frac{M_m a_m}{M_p a_p} = \frac{(F_p + F_G + F_V + F_T + F_E)_m}{(F_p + F_G + F_V + F_T + F_E)_p}$$

(四)福祿定律：

當水理現象以重力作用為最重要之控制因素時，應使地心引力與慣性力之比值相等，其他力量在式中則略去不計(水工模型試驗參考手冊，2011)。

V/\sqrt{gL} 稱為福祿數，為模型慣性力與重力之比值，應用在一般河流狀況之模型與原型水理現象時，此參數必須相等；亦即模型必須與原型慣性力與重力之比值相等。因此，模型與原型的速度、時間、流量關係，均可由公式推算出。例如流量比尺 λ_Q 即可由流速比尺 λ_v 及斷面比尺 λ_A 合併而得：

$$\lambda_Q = \lambda_A \lambda_v = \lambda_L^2 \sqrt{\lambda_g \lambda_L} = (\lambda_L)^{5/2} (\lambda_g)^{1/2}$$

因為原型和模型的重力加速度均相同，因此 $\lambda_g=1$ ，代入上式所以流量比尺為幾何比尺的2.5次方。

經過福祿數相似之推導，本報告整理相關結果之比例尺如下表

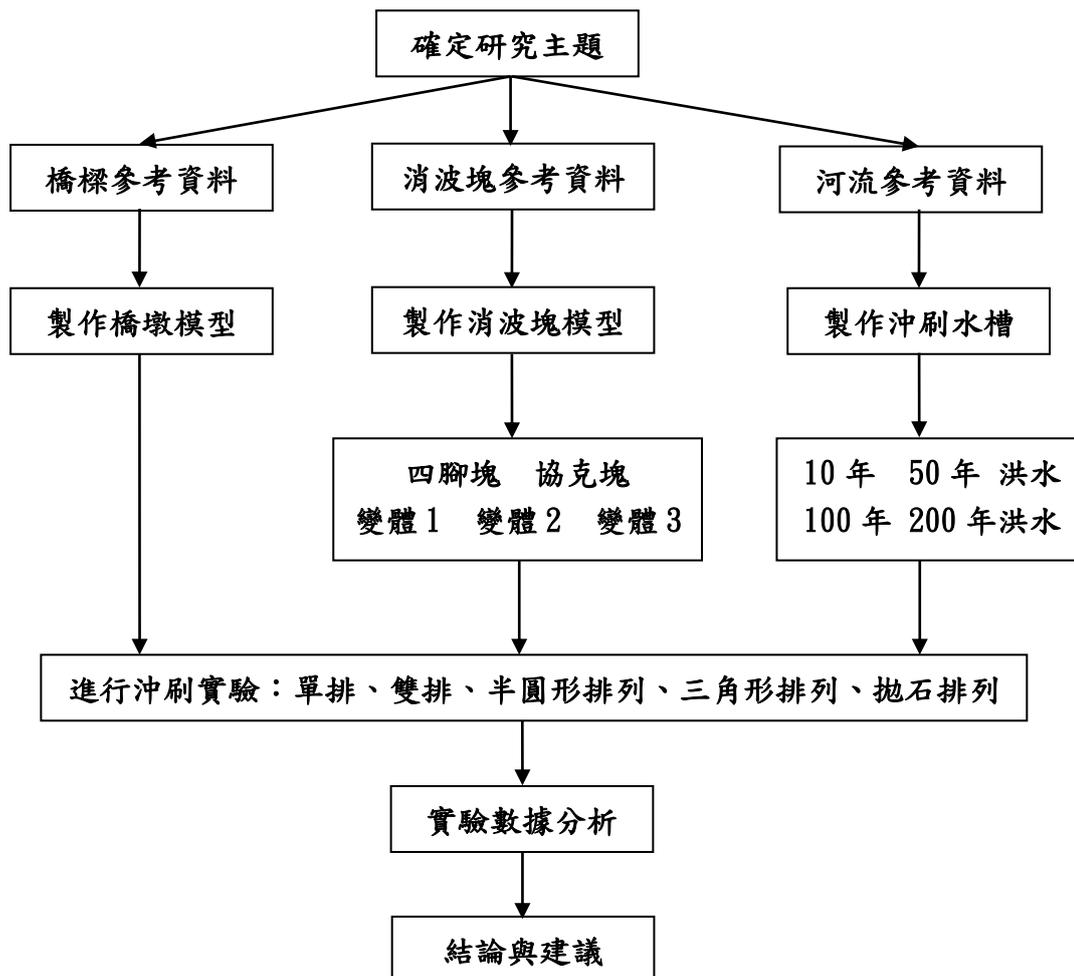
模型比尺	幾何比尺	流速比尺	時間比尺	流量比尺
代號	λ_L	λ_V	λ_T	λ_Q
關係式	λ_L	$\lambda_L^{1/2}$	$\lambda_L^{1/2}$	$\lambda_L^{5/2}$

因為本報告採用 1:100 縮尺模型進行實驗，所以 $\lambda_L = \frac{L_m}{L_p} = 1/100 = 0.01$

依據福祿數相似， $\lambda_V = \lambda_T = (0.01)^{1/2} = 0.1$ ，而 $\lambda_Q = (0.01)^{5/2} = 10^{-5} = 0.00001$

也就是說本實驗的流速與沖刷時間只要原型的 10 分之 1即可進行實驗，

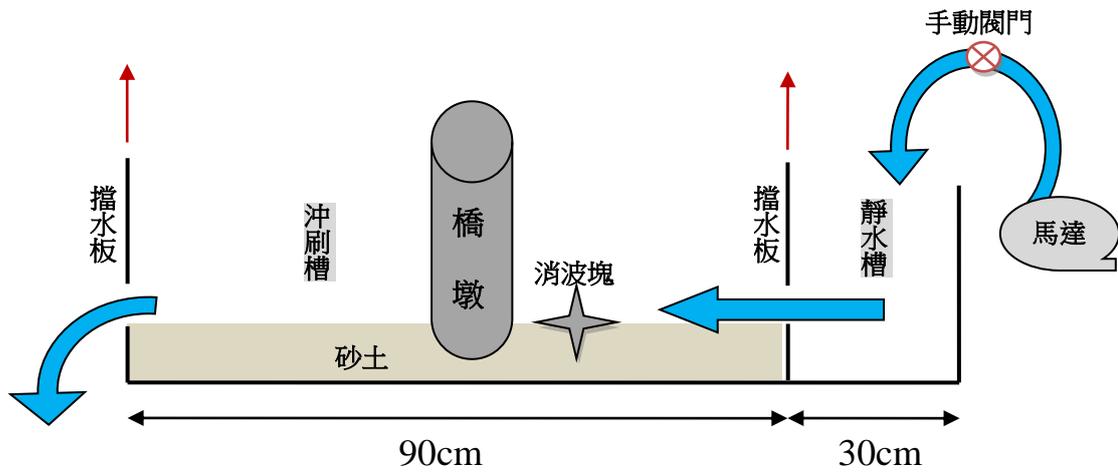
而流量更只需要原型的 10 萬分之 1，即可模擬現場真實的沖刷情況。



六、研究方法

(一)沖刷水槽

依據現地調查以及材料製作考量，河川模型，每支橋墩間距 35m，於是我們設計寬 35cm、長 120cm 之壓克力水槽進行實驗，並在前方設置 30cm 之靜水槽，暫時收納馬達之出水以穩定流場，並搭配手動閘門控制出水量，前後各一片擋水板之開度可用來控制水位與流速，如圖所示。



(二)選用砂土

為了解型橋墩沖刷之機制，並減少沖刷深度的不準確性，本報告依照現場河床質級配比例加以縮小，並於渠槽中鋪設 4cm 厚之試驗砂，而河床質粒徑用#4、#8、#16、#30、#50、#100、#200、#400 號篩所篩出之不同泥沙粒徑加以混和，中值粒徑 $d_{50}=1.45\text{mm}$ ，粒徑分布如表所示，約可表現現場 47.5cm~0.3cm 粒徑大小的沖刷變化。

篩號(No)	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200	#400
網徑(mm)	4.75	2.36	1.18	0.60	0.30	0.15	0.075	0.038
百分比(%)	1.42	9.58	42.25	25.67	11.24	5.85	2.50	1.49

(三)橋墩及消波塊模型

依據寶隆大橋資料，我們設計比例 1：100 之橋墩模型，圓柱型橋墩直徑 3.5cm，沉箱基礎尺寸長×寬×深= 7×7×5cm，根據施工資料沉箱埋入土砂中 3cm，由於允許裸露深度為 1m，故下方配置 1cm 樁基礎，並用鏟刀抹平，如圖所示。



水泥橋墩+沉箱基礎 埋入砂中佈置圖

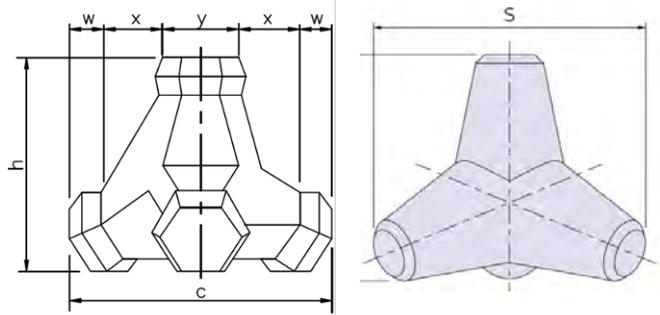
橋梁名稱	橋墩基礎頂部高程 (m)	基礎深度 (m)	基礎允許裸露深度 (m)	基礎型式	大小粒徑分別	可能發生橋墩最大沖刷位置
寶隆大橋	211.610	3.0	1.0	沈箱基礎	卵礫石層夾中細砂	P2

資料來源：公路局甲仙工務段提供

橋梁名稱	寶隆大橋	橋梁編號	0210-095	使用狀態	正常使用	設施種類	橋梁
幾何資料							
橋梁總長	350M	A1 進橋版長度	-	A2 進橋版長度	-		
最大淨寬	9M	最小淨寬	9M	橋版投影面積	3,150M ²		
總車道數	2	總橋墩數	10	最大跨距	35M		
跨距分配	35@10						
橋頭 GPS 經度	120.5513	橋頭 GPS 緯度	23.0572	橋尾 GPS 經度	120.5513	橋尾 GPS 緯度	23.054
結構資料							
結構形式	梁式橋						
主梁材質	預力混凝土	主梁型式	I 型梁	橋墩型態	圓柱形	橋墩直徑	3.5M
支承型式	合成橡膠支承	橋台型式	半重力式	橋墩材質	鋼筋混凝土	橋墩型式	單柱式
橋墩基礎型式	沈箱基礎	橋墩最淺基礎深度	3.0M	橋墩基礎材質	鋼筋混凝土	橋墩基礎尺寸 (長×寬×深)	7×7×5M

另外，我們參考消波塊設計圖，依照 1：100 之幾何比尺，進行 **3D 列印製作** 高度均為 **3cm** 之消波塊陽模，再使用 **水泥灌注矽膠陰模** 得到縮小消波塊模型。

名稱	型式(ton)	10	12	15	20	25	30	40
體積 (m ³)	實	4.137	4.982	6.228	8.326	10.371	12.487	17.32
有效模面積 (m ²)		17.65	19.98	23.19	28.14	32.57	36.87	45.84
實際重量 (t)		9.515	11.459	14.324	19.150	23.853	28.720	39.83
基本值：a (m)		2.701	2.874	3.103	3.414	3.667	3.908	4.358
高度：h (m)		2.372	2.524	2.719	2.995	3.223	3.429	3.822
寬度：c (m)		2.905	3.091	3.329	3.667	3.946	4.198	4.680



我們選用河海工程常用的四腳塊以及協克塊進行實驗，另外為了探討消波塊形狀的影響，再設計出 3 種變體消波塊，變體目的分述如下：

變體 1-將四腳塊之圓柱正投影圓 **面積增加一倍**，目的探討增加擋水面積及重量對沖刷的影響。

變體 2-將四腳塊原設計之漸縮圓柱，依照末端投影圓面積的大小，變體為 **直筒圓柱**，目的探討直筒型圓柱對沖刷的影響。

變體 3-將變體 2 之直筒型圓柱，變體為 **六角形柱**，目的是探討六角形與直筒型對沖刷的影響。



3D 列印-四腳塊

變體 1

變體 2

變體 3

協克塊



水泥灌模-四腳塊

變體 1

變體 2

變體 3

協克塊

(四)流量及水位

由於我們的河道、橋墩、消波塊均採用 1：100 之幾何比尺，因此依據福祿數相似定理，水位須符合 1：100 之幾何比尺，也就是水深為原型的 100 分之 1，流速與沖刷時間只要原型的 10 分之 1，而流量更只需要原型的 10 萬分之 1即可進行實驗，因此我們依據寶隆大橋的歷年水位統計資料，設定以下的實驗條件，如表所示。

寶隆大橋河道測量資料 <small>資料來源：公路局甲仙工務段提供</small>					
重現期距(年)	200	100	50	20	10
洪峰流量(cms)	2,788	2,384	1,943	1,296	739
洪水位(E.L)	202.6	202.4	202.1	201.7	201.3
平均流速(m/s)	3.836	3.417	2.978	2.056	1.839
水深(m)	5.88	5.57	5.28	4.84	4.45
底部高程(E.L)	196.81	196.81	196.81	196.81	196.81

我們選擇低流量之 10 年重現期距，以及高流量之 50、100、200 年重現期距，作為實驗的沖刷條件，以 200 年重現期距 為例，洪峰流量為 2,788cms，由於我們只選用一支橋墩為代表，因此必須將全河道流量除以 10 得到單一橋墩流量為 278.8cms，而 $278.8\text{cms} = 278.8\text{m}^3/\text{s} = 278.8(100\text{cm})^3/\text{s} = 278.8 \times 10^6\text{cm}^3/\text{s}$

依據福祿數相似，模型流量為原型的 10 萬分之 1，故模型設計流量等於 $278.8 \times 10^6\text{cm}^3/\text{s} \times 10^{-5} = 2788\text{cm}^3/\text{s} = 2.79\text{L}/\text{s}$ ，也就是說必須設定手動閘門及馬達，使出水量約等於每秒 2.79 公升，即可模擬 200 年洪水對橋墩的沖刷現象。

此外，由於水深為原型的 100 分之 1，因此擋水板之開度設定為 5.9cm，使得沖刷模擬水位大約等於原型的 5.88 公尺。

流速與沖刷時間只要原型的 10 分之 1，因此流速設定為 38.4cm/s，使得沖刷模擬流速大約等於原型的 3.836 公尺/秒。另外，沖刷時間一律設定為 1 小時，以節省實驗時間，相當於原型沖刷 10 小時的效果，已超過大多數颱風的最高流量通過時間。



沖刷實驗過程圖

小結：

我們在實驗過程中發現，流速是不易進行設定的因素，因為我們採用**簡易浮標搭配錄影格放**，來計算流速，雖然免除人眼按放碼表的誤差，並且可以換算流速。然而由於電訪河川相關單位說明，颱風時期的觀測儀器多已受損或暫停觀測，其中流速是比較不可靠的數據，部分流速紀錄是根據錄影帶中漂浮木的速度反推算出，因此建議我們參考**水深數據較為正確**，因為水深是根據橋墩水尺所得。另外流量數據是參考河川局上游的流量站或攔河堰得到，因此**流量數據也有相當的準確度**。



流速測量 1



流速測量 2



流速測量 3



寶隆大橋水尺

因此實驗時，我們採用較可靠的流量及水位作率定，步驟如下：

1. 配置消波塊與橋墩，並用鏟刀整平砂床。
2. 啟動馬達，開啟手動閘門，調整閘門開度率定流量。(以下 200 年為例)
3. 使用容器承接出水，量測出水量每秒 2.79 公升時，固定閘門開度。
4. 前後擋水板關閉，在沖刷槽內緩緩裝滿水深 5.9 公分之水，勿擾動砂床。
5. 將出水管置入靜水槽，待靜水槽水位上升超過 5.9 公分時，打開擋水板。
6. 前擋水板打開至 5.9 公分後固定以率定出水位，後擋水板則完全抽除。
7. 持續沖刷 1 小時後，關閉馬達，待水排乾後拍照記錄。
8. 每 0.5 公分為一格點，使用鉛錘量測沖刷坑深度，並紀錄橋墩傾斜角度。
9. 輸入電腦作圖並進行後續分析。



測量沖刷坑深度



橋墩傾斜 0 度



橋墩傾斜 3 度



橋墩傾斜 7 度

七、結果與討論

本報告以 10、50、100、200 年重現期距洪水量，作為實驗的沖刷條件，首先進行流場分析，並且使用浮標分析流速，當沖刷完成後分析沖刷坑的變化以及橋墩傾斜角，以判斷消波塊的保護效果。

1. 流場分析：

我們使用 10、50、100 年重現期洪水，測試五種不同消波塊的流場，分析對沖刷的影響，並且錄影拍照記錄，如下所示。

(一) 四腳塊



10 年重現期距



50 年重現期距



100 年重現期距

(二) 變體 1



10 年重現期距



50 年重現期距



100 年重現期距

(三) 變體 2



10 年重現期距



50 年重現期距



100 年重現期距

(四) 變體 3



10 年重現期距



50 年重現期距



100 年重現期距

(五) 協克塊



10 年重現期距



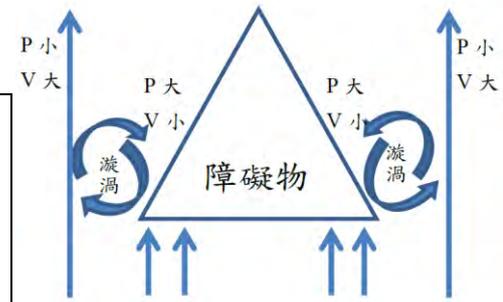
50 年重現期距



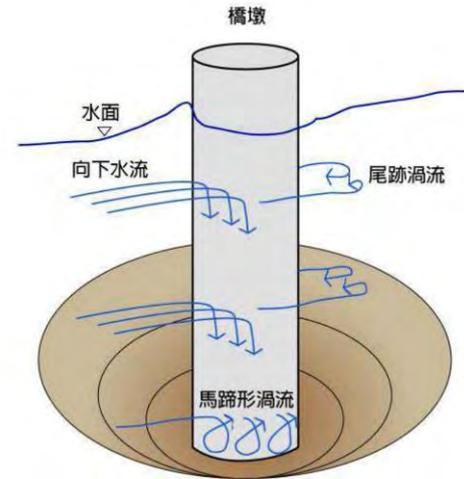
100 年重現期距

(六)冲刷现象

四脚塊		<ol style="list-style-type: none"> 冲刷坑第 3 大 尾流区第 3 大 涡流第 4 强
變體 1		<ol style="list-style-type: none"> 冲刷坑第 1 大 尾流区第 1 大 涡流第 3 强
變體 2		<ol style="list-style-type: none"> 冲刷坑第 2 大 尾流区最小(第 5) 涡流最弱(第 5)
變體 3		<ol style="list-style-type: none"> 冲刷坑最小(第 5) 尾流区第 4 大 涡流第 2 强
協克塊		<ol style="list-style-type: none"> 冲刷坑第 4 大 尾流区第 2 大 涡流最强烈(第 1)



白努力定理流體運動機制



橋墩冲刷機制

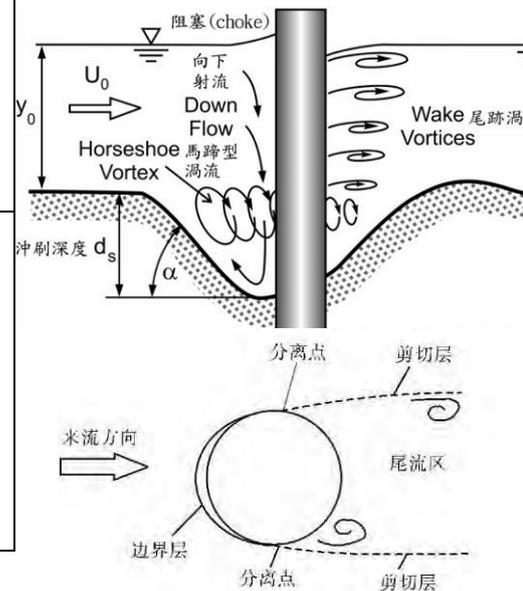
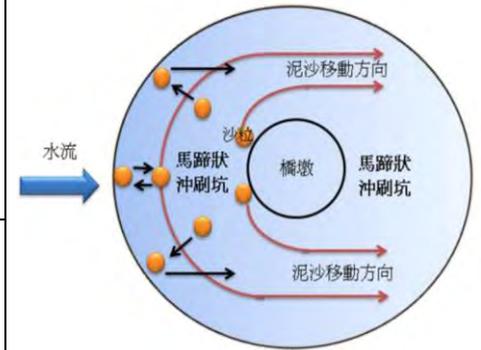


图 1 圆柱绕流示意

小結：

我們發現**體積(投影面積)越大**的消波塊，如變體 1，**阻擋水流**的效果**越好**，將會迫使水流繞道兩側才能通過，因此**保護後方**的區域範圍也越大。

消波塊後方的尾流區受到消波塊保護，流速相對緩慢，由流線觀察可知多呈現旋轉的渦流，因此水流搬運的砂土會在消波塊**後方沉降堆積**。

消波塊正前方的區域由於水流衝擊，迫使**水流繞道兩側沖刷**並將砂土帶走，部分水流則形成**向下射流沖刷**，因此在**正前方形成沖刷坑**。

當消波塊**體積越大**時，如變體 1 與協克塊，**阻擋水流**通水面積也越大，因此**尾流區**的範圍**越大**，也更能夠保護後方的橋墩。

沖刷坑最大的**前 3 名**，都是**圓柱體為主**的四腳塊以及變體 1、變體 2，推論是**圓柱形阻擋水流較強**，產生**較強向下射流**而產生沖刷坑。

六角柱體的消波塊，如變體 3 與協克塊，相對於圓柱形更**容易形成渦流**，推論是因**多角形態擾動水流更容易產生渦流**，在後方尾流區更容易**形成堆積**。

當使用 200 年洪水沖刷時，除了較重的變體 1 和多角造型的協克塊，其餘消波塊都有**滑動或被沖走**的現象，因此流場試驗**只做到 100 年週期**。

2. 橋墩沖刷及傾斜情況：

由上述實驗發現，消波塊可以**減緩流速**並在後方形成**尾流區**，有效保護後方**橋墩降低沖刷**，因此我們使用 5 種形式消波塊，分別使用 3、4、8 塊消波塊保護橋墩，並搭配 10、50、100、200 年重現期洪水量，作為實驗的沖刷條件：

(一)10 年重現期距

由於 10 年重現期距的沖刷情況**大致良好**，顯示橋墩原有設計禁得起沖刷，無消波塊保護也無妨，為節省篇幅加以省略。

(二)50 年重現期距

我們採用 3 塊及 4 塊消波塊減緩沖刷，可達到**良好防護效果**，詳見附錄。

(三)100 年重現期距

3 塊消波塊：

四 腳 塊			<ol style="list-style-type: none"> 1. 右側消波塊輕微滑移 2. 沖刷坑最深 1.4 公分 (黃色圓圈處) 3. 橋墩傾斜 2.1 度
變 體 1			<ol style="list-style-type: none"> 1. 左側消波塊輕微滑移 2. 沖刷坑最深 1.3 公分 (黃色圓圈處) 3. 橋墩傾斜 1.8 度
變 體 2			<ol style="list-style-type: none"> 1. 兩側消波塊嚴重沉陷 2. 沖刷坑最深 2.4 公分 (黃色圓圈處) 3. 橋墩傾斜 2.8 度
變 體 3			<ol style="list-style-type: none"> 1. 左側消波塊滑移沉陷 2. 沖刷坑最深 2.0 公分 (黃色圓圈處) 3. 橋墩傾斜 2.5 度
協 克 塊			<ol style="list-style-type: none"> 1. 左側消波塊輕微滑移 2. 沖刷坑最深 1.5 公分 (黃色圓圈處) 3. 橋墩傾斜 2.0 度

4 塊消波塊：

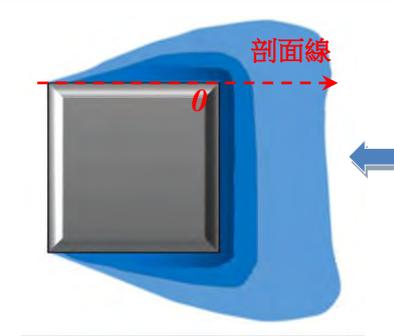
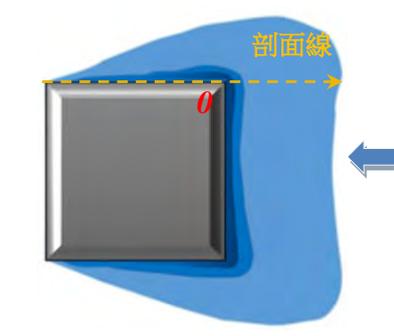
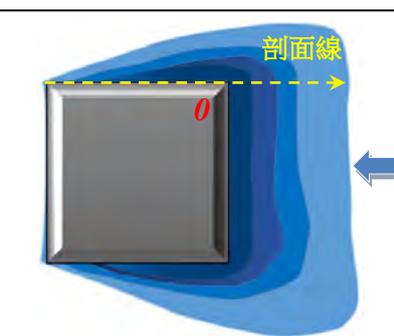
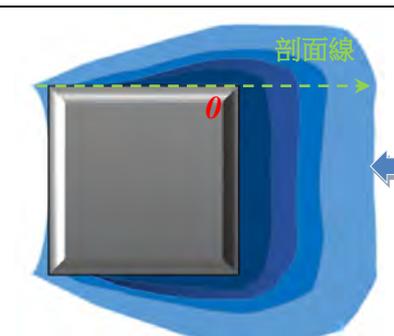
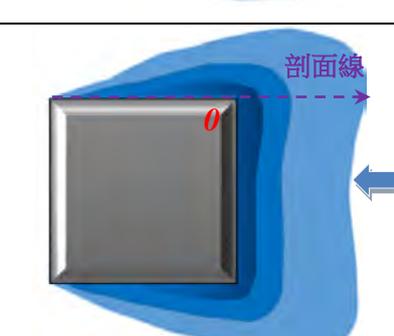
四腳塊			<ol style="list-style-type: none"> 1. 左側消波塊傾斜沉陷 2. 沖刷坑最深 1.2 公分 (黃色圓圈處) 3. 橋墩傾斜 1.2 度
變體 1			<ol style="list-style-type: none"> 1. 右側消波塊滑移 2. 沖刷坑最深 0.9 公分 (黃色圓圈處) 3. 橋墩傾斜 0.8 度
變體 2			<ol style="list-style-type: none"> 1. 左側消波塊滑移沉陷 2. 沖刷坑最深 1.8 公分 (黃色圓圈處) 3. 橋墩傾斜 1.7 度
變體 3			<ol style="list-style-type: none"> 1. 右側消波塊滑移沉陷 2. 沖刷坑最深 1.7 公分 (黃色圓圈處) 3. 橋墩傾斜 2.0 度
協克塊			<ol style="list-style-type: none"> 1. 兩側消波塊滑移 2. 沖刷坑最深 1.1 公分 (黃色圓圈處) 3. 橋墩傾斜 1.0 度

(四)200 年重現期距

4 塊消波塊：

四 腳 塊			<ol style="list-style-type: none"> 1. 右側消波塊流失 2. 左側消波塊傾斜沉陷 3. 沖刷坑最深 3.0 公分 4. 橋墩傾斜 4.8 度
變 體 1			<ol style="list-style-type: none"> 1. 右側消波塊滑移沉陷 2. 沖刷坑最深 2.3 公分 (黃色圓圈處) 3. 橋墩傾斜 3.5 度
變 體 2			<ol style="list-style-type: none"> 1. 兩側消波塊流失 2. 沖刷坑最深 3.5 公分 3. 橋墩傾斜 6.0 度
變 體 3			<ol style="list-style-type: none"> 1. 兩側消波塊流失 2. 沖刷坑最深 3.7 公分 3. 橋墩傾斜 6.8 度
協 克 塊			<ol style="list-style-type: none"> 1. 兩側消波塊滑移沉陷 2. 沖刷坑最深 2.6 公分 3. 橋墩傾斜 4.0 度

8 塊消波塊：

四 腳 塊			<ol style="list-style-type: none"> 1. 沖刷坑範圍變大變淺 2. 沖刷坑最深 1.4 公分 3. 橋墩傾斜 2.0 度
變 體 1			<ol style="list-style-type: none"> 1. 沖刷坑範圍變大變淺 2. 沖刷坑最深 1.2 公分 3. 橋墩傾斜 1.8 度
變 體 2			<ol style="list-style-type: none"> 1. 沖刷坑範圍變大變淺 2. 消波塊輕微錯動沉陷 3. 沖刷坑最深 2.0 公分 4. 橋墩傾斜 2.5 度
變 體 3			<ol style="list-style-type: none"> 1. 沖刷坑範圍變大變淺 2. 消波塊輕微錯動沉陷 3. 沖刷坑最深 2.2 公分 4. 橋墩傾斜 2.6 度
協 克 塊			<ol style="list-style-type: none"> 1. 沖刷坑範圍變大變淺 2. 消波塊輕微錯動 3. 沖刷坑最深 1.6 公分 4. 橋墩傾斜 1.8 度

小結：

採用 50 年沖刷水量時，使用 **3 塊及 4 塊消波塊**即可減緩沖刷，3 塊消波塊沖刷深度多介於 0.8~1.5 公分、橋墩傾斜角介於 0~0.5 度；而 4 塊消波塊沖刷深度多介於 0.5~1.1 公分、橋墩傾斜角介於 0~0.3 度，兩者均達到良好防護效果，而且 **4 塊消波塊的保護效果比 3 塊好**。

採用 100 年沖刷水量時，使用 **3 塊消波塊**效果已明顯不足，沖刷深度多介於 1.3~2.4 公分、橋墩傾斜角介於 2~3 度，已**達到危險警戒值**，另外位於兩側之消波塊多出現**滑移或者傾斜沉陷**，而失去保護效果；而使用 4 塊消波塊時，雖然仍會出現滑移或者傾斜沉陷，但因為消波塊**排列密度較高**，仍可達到**較佳的減緩沖刷效果**，沖刷深度多介於 0.9~1.6 公分、橋墩傾斜角介於 1~2 度，仍然處於安全範圍內。

採用 200 年沖刷水量時，使用 4 塊消波塊**效果也明顯不足**，除了體積最大的變體一，其餘消波塊大多在實驗開始 **10 分鐘以內即被沖走**，而留下的消波塊通常**只剩 1~2 顆而失去保護效果**，因此最終沖刷深度大幅提升至 2.7~3.8 公分、橋墩傾斜角介於 3~7 度，已**達到橋梁破壞危險值**。

由前述實驗可發現，增加消波塊**排列密度可減少沖刷**，因此我們採用 **8 塊消波塊密集排列**，來進行 200 年洪水的沖刷，發現除了部份消波塊產生**輕微錯動或沉陷**，基本上**沒有消波塊被沖走**，也因此保護了後方的橋墩，沖刷深度多介於 1.1~2.3 公分、橋墩傾斜角介於 2~3 度，成功**保護橋墩免於破壞**，但仍然處於**危險警戒**範圍內。

為了更降低沖刷，讓橋墩禁得起 200 年洪水的沖刷，本報告嘗試改良消波塊排列方式，詳如下一節討論。

本報告實驗過程中，**沒有發生橋墩受沖刷而倒塌的情況**，推論是因為**沒有橋面板**等結構載重促使倒塌。然而隨著沖刷水量加大，橋墩的傾斜角度也加大，最多可達將近 7 度角傾斜，推論是水流沖刷底床砂土所導致。

依照封橋警戒資料，**冲刷深度達 3 公尺**(沉箱底外露)，或者**傾斜角達 3 度**，就**達到警戒值**，此時須密切監控橋梁安全；而**冲刷深度達 4 公尺**(基樁外露)，或者**傾斜角達 5 度**，就**達到封橋值**，此時橋樑結構有破壞的可能，如下表。

因此我們界定冲刷坑**深度達到 3 公分**或橋墩**傾斜角達到 3 度**是**安全極限**，超過該值則代表消波塊的**保護失敗**，需要重新調整消波塊的配置。

冲刷深度 (m)	橋版位移量		橋板頂總位移量 (cm)	安全係數 F.S	傾斜角 Deg	評估安全程度
	水平(cm)	垂直(cm)				
1.0	1.860	-2.454	3.080	3.944	1.082	安全
2.0	1.235	-2.718	2.986	3.096	2.054	安全
3.0	2.563	-2.409	3.518	2.553	3.113	警戒
4.0	2.995	-2.321	3.981	1.034	5.132	封橋

3. 改良消波塊排列對於橋墩冲刷情況：

目前許多橋樑都使用全面密植消波塊的方式，來保護橋墩，這種方式或許有效但也相當浪費，而且密布河床的消波塊是否也影響生物的活動？為改善此缺點，本報告測試十多種不同的消波塊排列方法，經過多次的失敗，找出最能**降低冲刷**，且消波塊不容易被沖走，也**最環保有效率的消波塊排列方法**，就是呈**1. 半圓形排列** **2. 正三角形排列**，且後方砥住橋墩，如此不但可以**消減流速**、減緩橋墩冲刷；也可藉由消波塊彼此間的**作用力傳遞至橋墩**，**避免消波塊被沖走**而使橋墩喪失保護，如下圖所示。



1. 半圓形排列

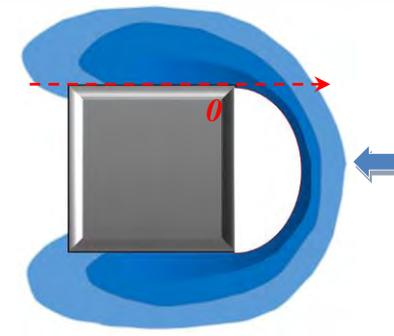
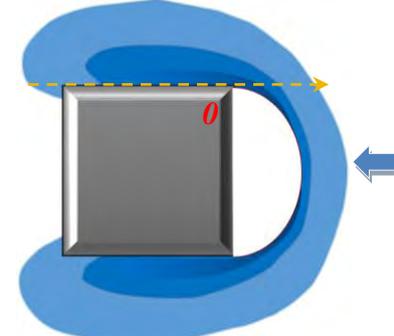
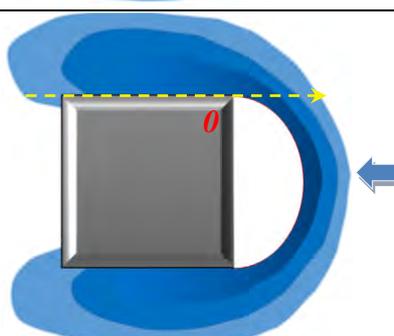
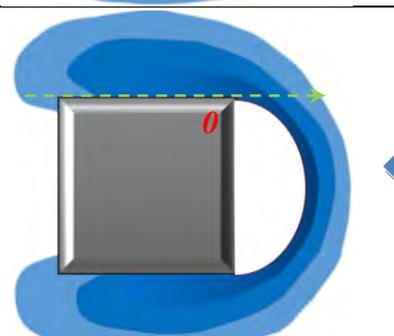
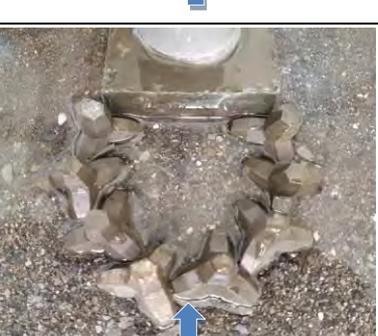
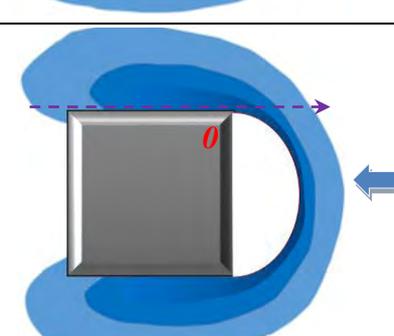


2. 正三角形排列

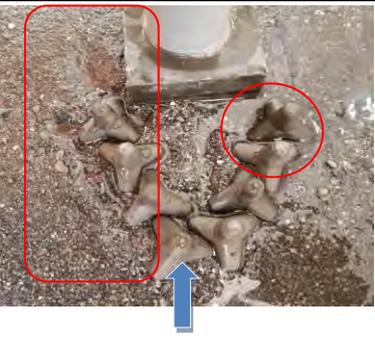
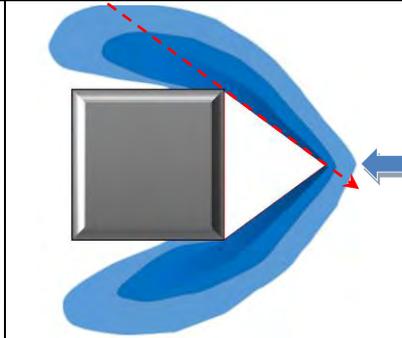
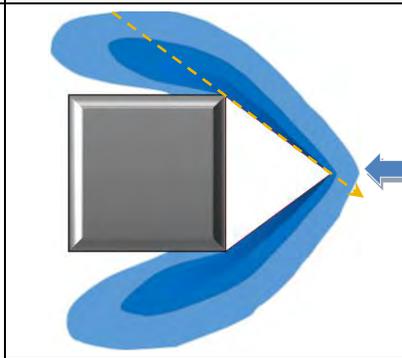
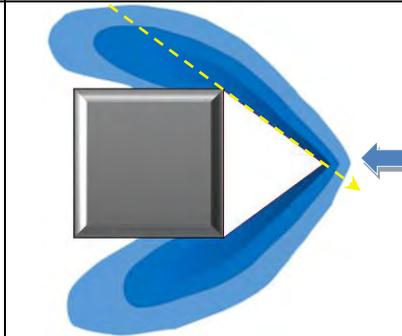
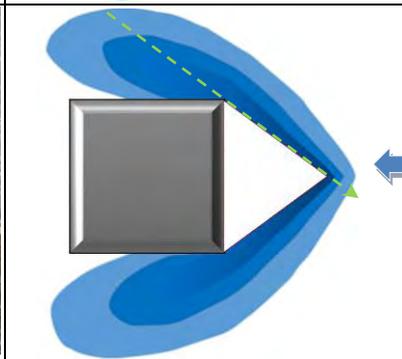
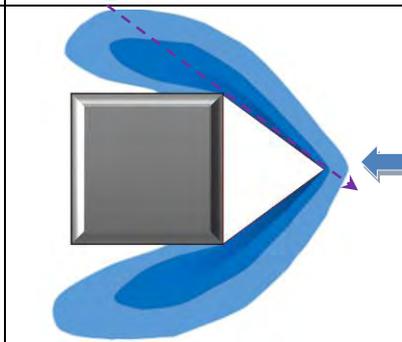


全面密植消波塊(傳統工法)

半圓形排列消波塊：

四 腳 塊			<ol style="list-style-type: none"> 1. 沖刷坑比 8 塊更大更淺 2. 消波塊無明顯滑移傾斜 3. 沖刷坑最深 1.3 公分 4. 橋墩傾斜 1.4 度
變 體 1			<ol style="list-style-type: none"> 1. 沖刷坑比 8 塊更大更淺 2. 消波塊無明顯滑移傾斜 3. 沖刷坑最深 1.0 公分 4. 橋墩傾斜 0.8 度
變 體 2			<ol style="list-style-type: none"> 1. 沖刷坑比 8 塊更大更淺 2. 消波塊輕微傾斜 3. 沖刷坑最深 1.9 公分 4. 橋墩傾斜 1.7 度
變 體 3			<ol style="list-style-type: none"> 1. 沖刷坑比 8 塊更大更淺 2. 消波塊輕微傾斜偏移 3. 沖刷坑最深 1.7 公分 4. 橋墩傾斜 2.2 度
協 克 塊			<ol style="list-style-type: none"> 1. 沖刷坑比 8 塊更大更淺 2. 消波塊無明顯滑移傾斜 3. 沖刷坑最深 1.2 公分 4. 橋墩傾斜 1.1 度

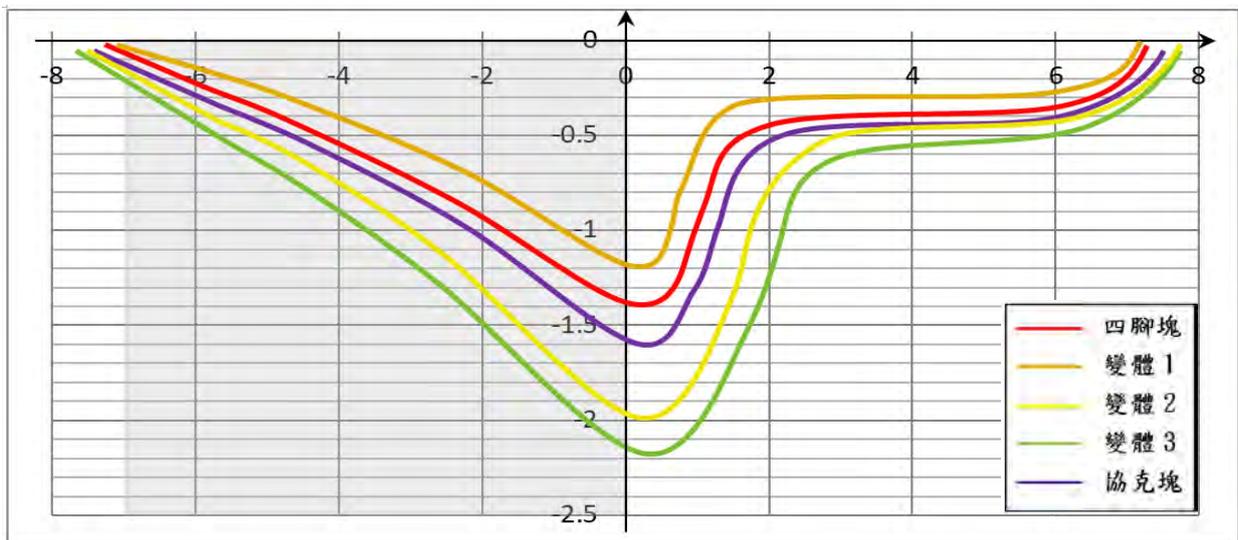
正三角形排列消波塊：

四腳塊			<ol style="list-style-type: none"> 1. 沖刷坑比半圓更大更淺 2. 消波塊輕微傾斜偏移 3. 沖刷坑最深 1.1 公分 4. 橋墩傾斜 1.2 度
變體 1			<ol style="list-style-type: none"> 1. 沖刷坑比半圓更大更淺 2. 消波塊無明顯滑移傾斜 3. 沖刷坑最深 1.0 公分 4. 橋墩傾斜 0.6 度
變體 2			<ol style="list-style-type: none"> 1. 沖刷坑比半圓更大更淺 2. 消波塊輕微傾斜偏移 3. 沖刷坑最深 1.7 公分 4. 橋墩傾斜 1.5 度
變體 3			<ol style="list-style-type: none"> 1. 沖刷坑比半圓更大更淺 2. 消波塊輕微傾斜偏移 3. 沖刷坑最深 1.6 公分 4. 橋墩傾斜 2.0 度
協克塊			<ol style="list-style-type: none"> 1. 沖刷坑比半圓更大更淺 2. 消波塊輕微傾斜偏移 3. 沖刷坑最深 1.0 公分 4. 橋墩傾斜 1.0 度

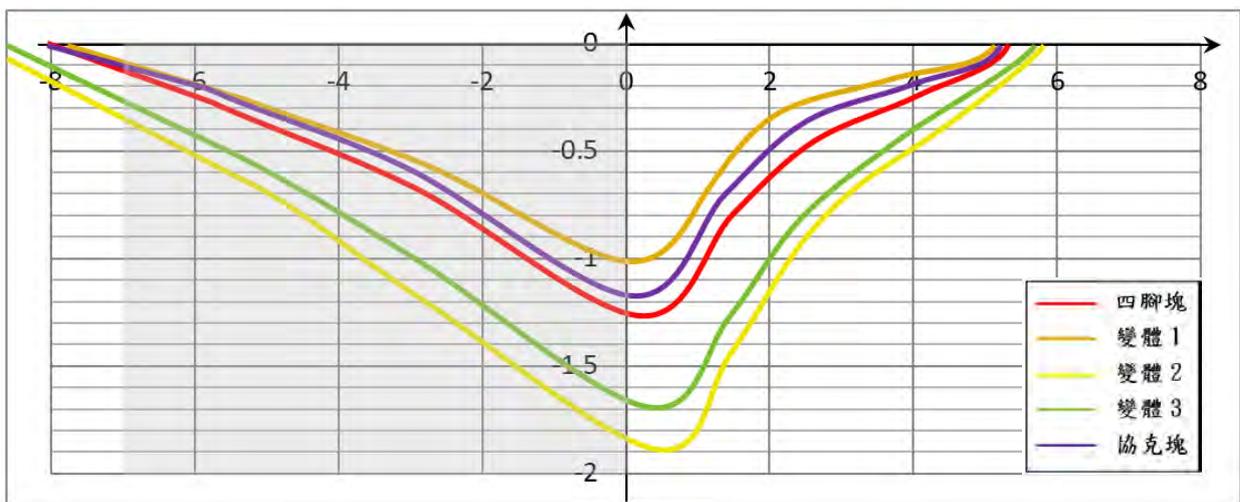
小結：

正三角形排列之淘刷坑**最淺分布範圍最大**，對於沖刷的減緩是**最佳方式**，但缺點是消波塊容易**偏移錯位**，有導致橋墩失去保護的風險，推論是直線排列導致力量傳遞若有偏移，會造成力矩使**消波塊被推移出去**；而半圓形排列在力學上有類似**拱形的傳遞效果**，產生較為堅固的力學構造；為了進一步提升安全性，我們嘗試**增加拋石以防止消波塊偏移錯位**。

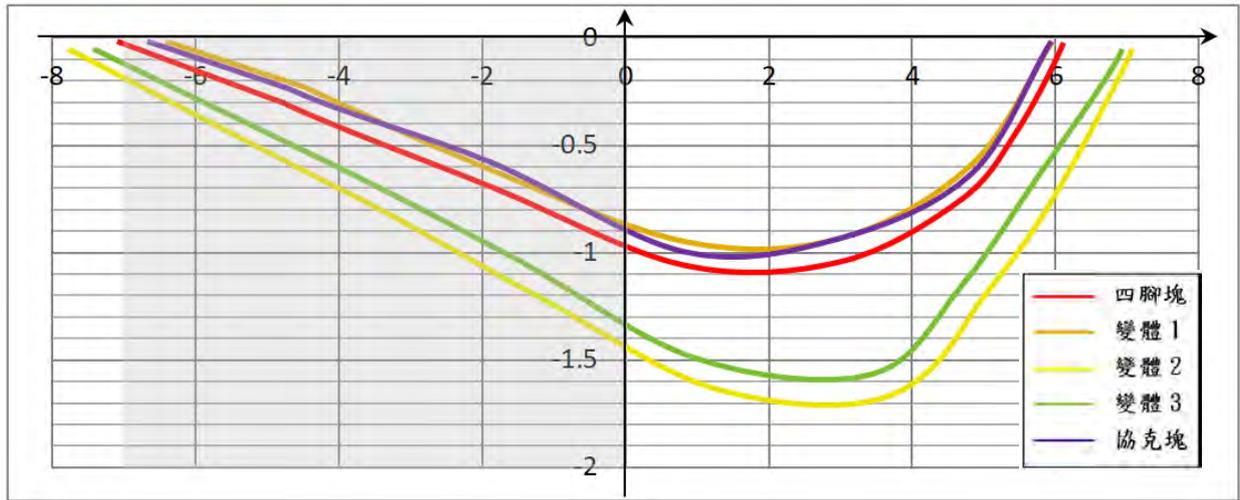
使用 Surfer 軟體進行沖刷坑剖面線的比較，可發現三角形與半圓形排列方式，都可以有效降低沖刷深度，並且讓沖刷坑**最深處遠離橋墩達到保護**的效果，如圖所示。



200 年洪水-8 塊消波塊之沖刷坑剖面圖



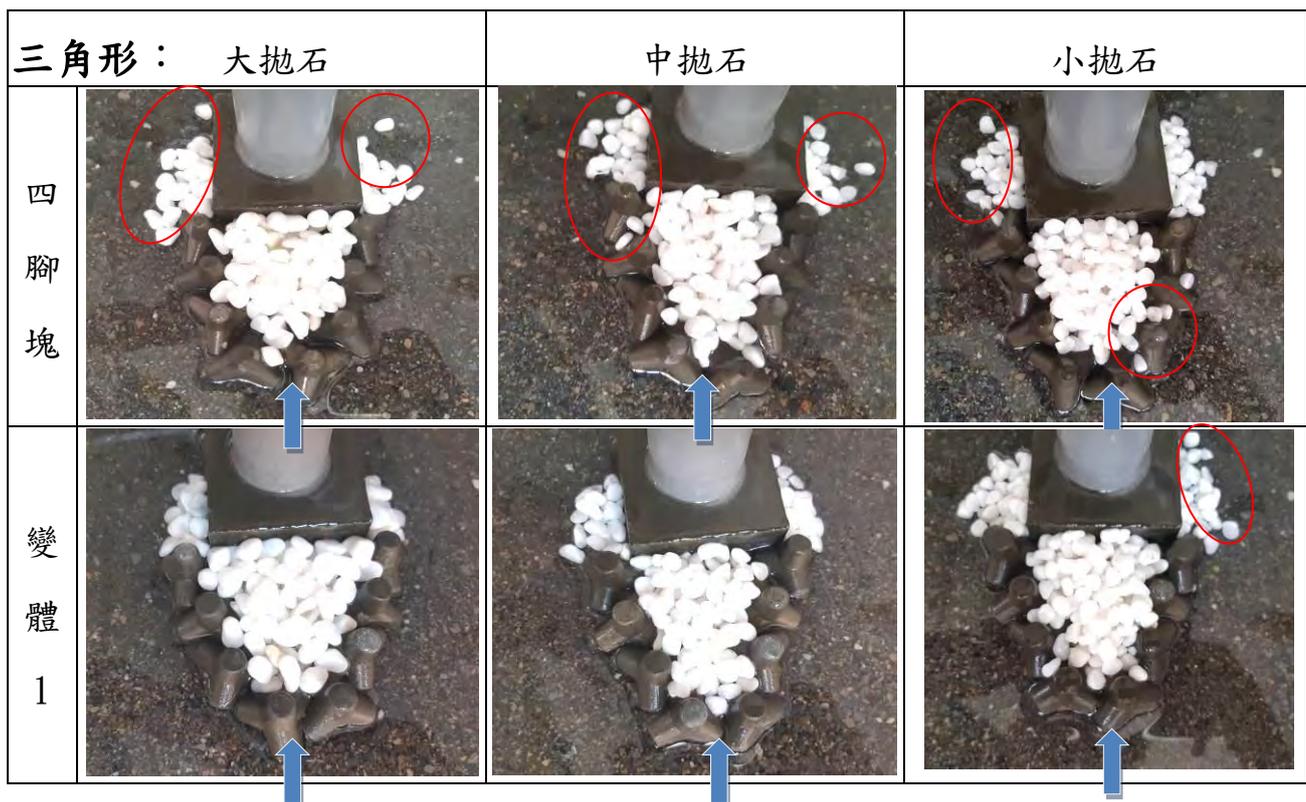
200 年洪水-半圓形排列消波塊之沖刷坑剖面圖

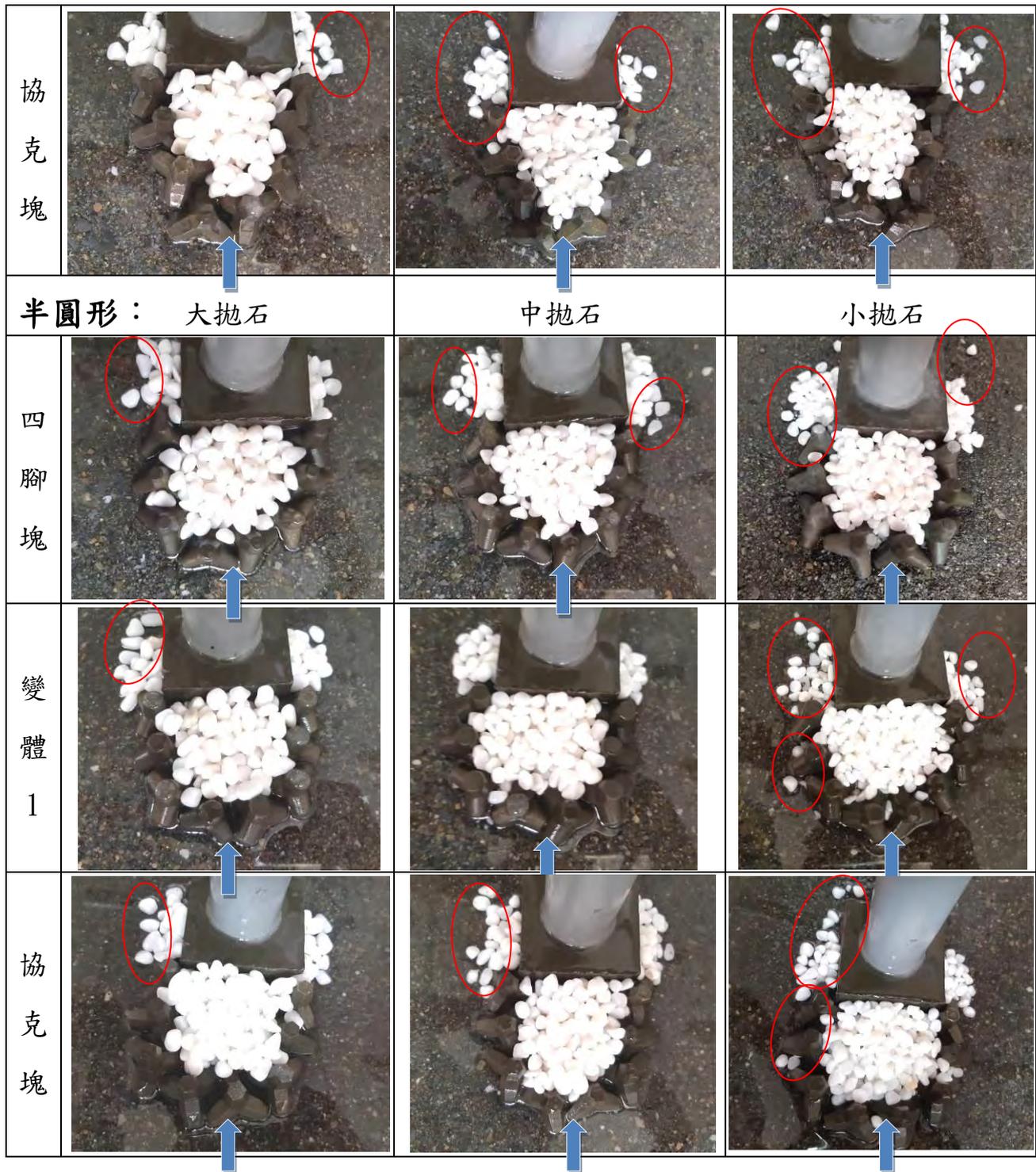


200 年洪水-正三角形排列消波塊之沖刷坑剖面圖

4. 拋石+改良消波塊排列對於橋墩沖刷情況：

由前述實驗可歸納出三角形與半圓形排列方式，都可以有效降低沖刷深度，但缺點是消波塊容易偏移錯位，為了進一步防止消波塊被推移，本報告採用大型(平均粒徑 9mm)、中型(平均粒徑 6mm)、小型(平均粒徑 3mm)三種拋石進行測試，將拋石填入三角形與半圓形空間中，以及橋墩兩側，拋石層厚度約 2cm，再進行 200 年洪水沖刷試驗；另外，前述實驗中防護效果較差的變體 2 及變體 3 消波塊，本階段實驗則加以捨棄。





小結：

由實驗結果發現使用拋石後，消波塊幾乎**沒有偏移錯位**，我們的推論是拋石可以**增加摩擦力**並將洪水的**作用力分散傳遞**，使得整體力學結構更加穩定。

在洪水沖刷下，**部分拋石會被沖散而流失**(紅色圓圈處)，導致**拋石堆逐漸崩壞**，其中又以**小型拋石**因為重量輕，崩壞的情形最嚴重。

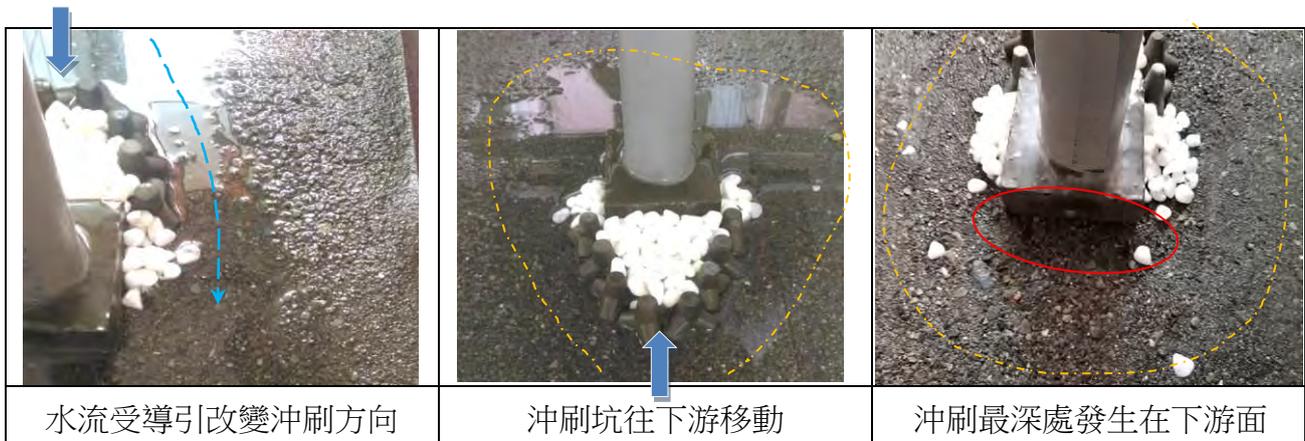
整體而言，綜合考量沖刷深度及消波塊結構穩定，發現最有效的方法為

正三角形排列+變體1消波塊+大拋石穩定結構。

我們由沖刷坑發現，**正三角形排列**可以有效**導引分散水流**，使水流**衝擊方向偏離橋墩**，達到保護橋墩的目標。雖然在空白實驗已證實橋墩沖刷**上游面比下游更為嚴重**，而過度加強**保護橋墩上游面**的結果，卻又**破壞了河道平衡**使**加速沖蝕發生在下游**(沖刷坑往下游移動)，如下圖所示。



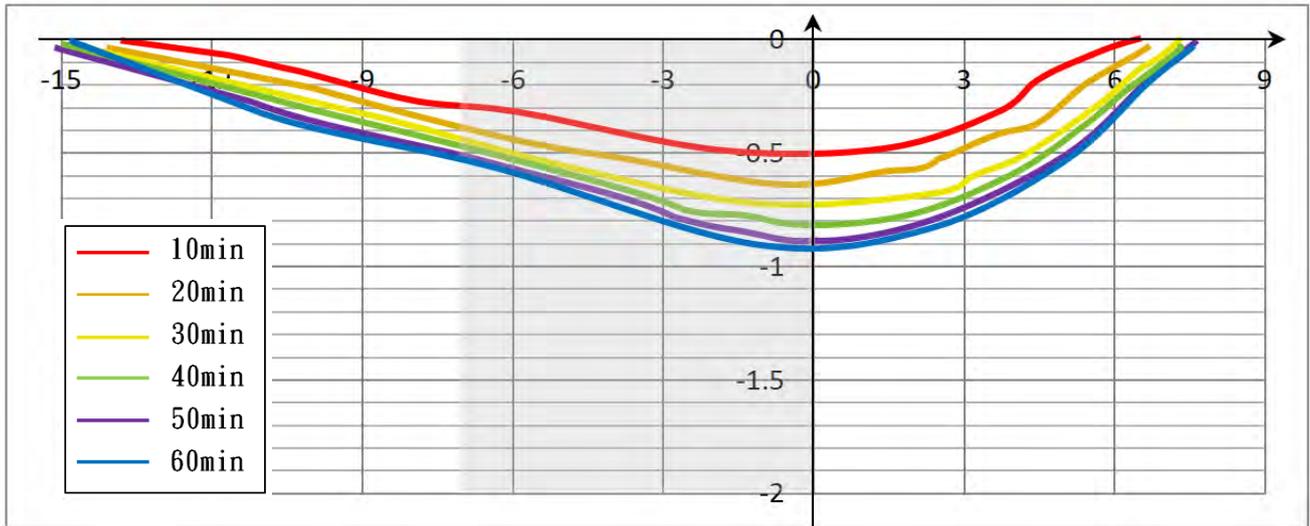
空白實驗-200年洪水冲刷坑



為了達到更完善的保護，我們設計**上下游都排列消波塊**的實驗，經過一連串的實驗組合，發現都採用**正三角形排列+上游用變體1消波塊+下游用協克塊+大拋石**，是沖刷最小的**最佳組合方式**。

我們推論**上游使用變體1**的原因，是因為**體積大**有助**阻擋水流**並且**導引流向**，而**下游使用協克塊**是因為**六角柱形**有助**形成渦流**使尾流區**動能消散**。另外我們也發現**底層拋石**孔隙中有**堆積砂土**，顯示拋石也有**幫助動能消散**的作用。





200 年洪水-正三角形排列+上游變體 1+下游協克塊+大拋石之沖刷坑剖面圖

我們將上述最佳組合之沖刷實驗數值，每 10 分鐘紀錄資料並繪製剖面線，可發現沖刷 **40 分鐘** 過後，沖刷**深度幾乎不再增加**，顯示已經**達到河道平衡**，約等於實際沖刷時間 **6 小時以上即達到穩定**，沖刷坑範圍受消波塊作用拉大至約 20 公分，約等於**實際沖刷坑長度 20 公尺**，而最大沖刷深度則約 0.9 公分，約等於**實際沖刷深度 90 公分**。

八、結論與建議

1. 本報告模擬不同週期洪水對橋墩沖刷變化的影響，以 **3D 立體橋墩與消波塊模型** 搭配沖刷水槽，再利用 Surfer 繪圖軟體繪製沖刷前後之地形變化，進行對比與分析，有相當具體的成果，希望未來能與**實際沖刷情況進行比對**，以獲得更精確的成果。

2. 由實驗結果歸納，水量及流速越高，對橋墩沖刷力量也越強，因此需要越多的消波塊來保護橋墩，原則上 50 年以下的洪水就算沒有任何保護，也不致於造成災害；然而 **100 年洪水** 就需要至少 **4 塊消波塊(排滿一排)**，而 **200 年洪水** 就需要至少 **8 塊消波塊(排滿二排)**，才能發揮足夠保護力。

3. 由沖刷深度顯示，同樣是 200 年 8 塊消波塊，傳統的直線排列(二排)方式防護效果依然有限；我們發現藉由排列方式的改良(如半圓或正三角形)，可以有效使**沖刷改善**，降低到等同於 100 年 4 塊消波塊等值的沖刷結果，顯示消波塊的排列方式也是十分值得研究的問題。

4. 就消波塊的**形式**來說，消波塊**體積越大**時，阻擋水流的面積也越大，因此尾流區的範圍越大，也更能夠**保護後方的橋墩**；而消波塊**重量越重**時，越能穩定而**不易沖走**。由實驗結果亦可驗證減緩沖刷的前三名依次為**變體 1、協克塊、四腳塊**，是可以推薦未來研究參考的。

5. 就消波塊**排列**來說，要減緩 200 年洪水的沖刷，以正三角形及半圓形排列較佳，其中**正三角形**排列可以**有效導引分散水流**，使水流**衝擊方向偏離橋墩**，因此**沖刷深度最淺**，當**增加拋石**穩定結構後，是**最佳的排列方式**。

6. 綜合實驗結果，我們發現保護橋墩的最佳方式為：**正三角形**排列+**上游用變體 1**消波塊+**下游用協克塊**+**大拋石**穩定結構，可防護 200 年以上的洪水。

7. 我們只有設計一層消波塊進行實驗，主要目的是希望**減少人工構造物**在河床中的數量，以達到**環保與生態**工程的目的；此外我們也查閱相關資料，推論**較高的水位**對於橋墩主要破壞是**推力**，真正影響沖刷的是接近河床的那層水流，因此一層消波塊應該對減緩沖刷有相當不錯的效果，我們期待未來有機會進行更多實驗來證實此論點。

九、參考文獻

- 【1】漩渦對橋墩侵蝕與堆積現象之探討，第 12 屆旺宏科學獎。
- 【2】『波淘砂湧』--拋石養灘的探究：第 46 屆高中組科展。
- 【3】橋墩追追追~橋墩抗水能力與砂石淘空情形探討：第 45 屆國中科展。
- 【4】水工模型試驗參考手冊，經濟部水利署水利規劃試驗所，2011。
- 【5】陳宥達，透過式固床工水理特性及抑制淘刷效果之研究，國立屏東科技大學碩士論文，2017。

【評語】 030511

消波塊對橋墩沖刷的影響高雄甲仙區之寶隆大橋為研究主體，並使用縮小模型搭配沖刷水槽，以模擬實際河流對橋墩沖刷之影響，再搭配消波塊探討對橋墩的保護效果。研究題目很有現實意義，實驗做得很精緻，理論與實驗設計安排妥善。對於流場如何觀察，如何量化，沖刷後地形的剖面變化如何定量量測，可以增加說明。是否需要考慮重現周期很長的洪水，還是更經常發生的洪水，結果是否會不同，如何配置符合經濟效益，值得再考慮。

壹、前言

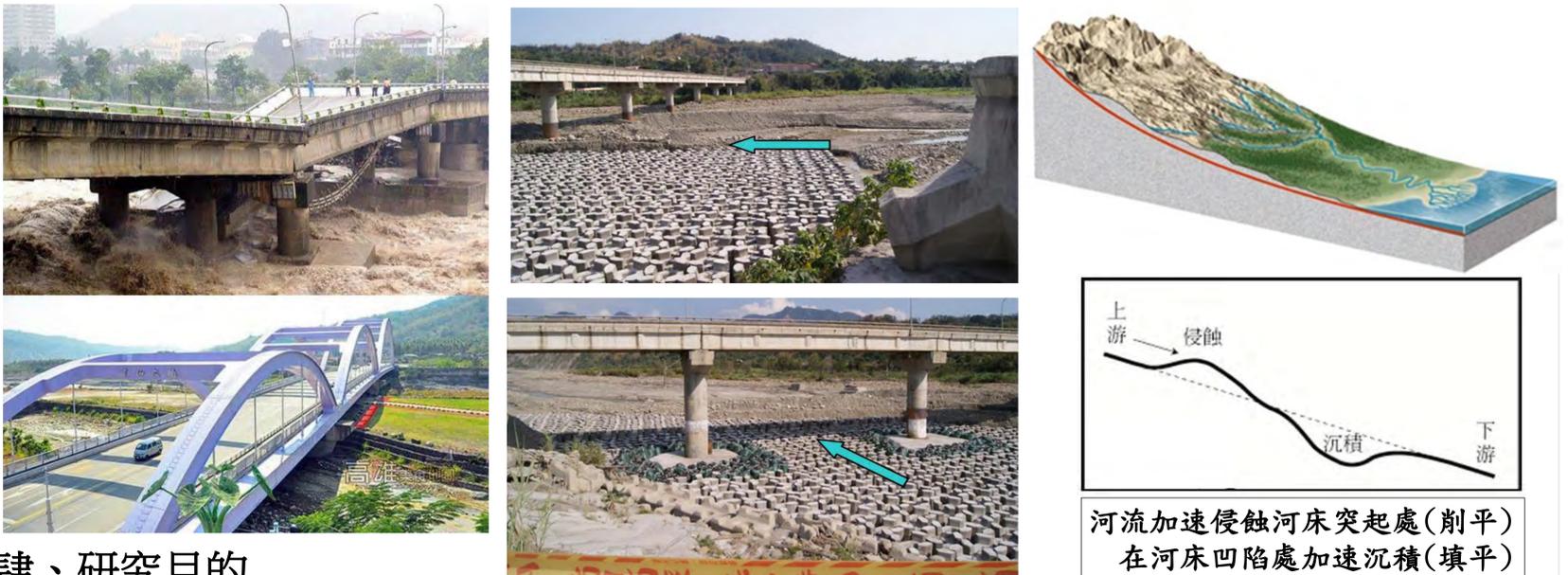
台灣位處颱風路徑上，每年往往受到強風豪雨的襲擊，加上先天地形坡陡流急，集水區雨量快速集中，導致河流洪水暴漲沖刷加劇，對橋樑橋墩造成相當不利的因素。台灣傳統橋樑多為重力式，橋墩採用混凝土沉箱搭配樁基礎設計，一旦沖刷太深導致沉箱底完全外露，可能導致橋墩傾斜或斷裂，因此有關橋墩沖刷的研究一直是相當重要課題，本報告的重點即為研究 **1.流場 2.消波塊 3.橋墩沖刷** 三者之間的相關性。

貳、研究動機

去甲仙遊玩時經過「甲仙大橋」，漂亮的紫色鐵橋搭配奇特造型吸引了我的注意，爸爸說其實以前是水泥橋，因為2008年辛樂克颱風被沖毀，才重建現在的新鐵橋，當時甲仙幾乎變成孤島，有很長時間要繞很遠的路才能進去。正好回家時經過下游的「寶隆大橋」，發現橋墩周圍擺了很多消波塊保護，讓我更好奇消波塊真的能保護橋墩嗎？該怎麼擺最好呢？也使我們決定進行這次的科展研究。

參、河道平衡理論

根據「河道平衡」理論，自然河道最終會達到沖蝕→搬運→堆積的平衡狀態，當河道樹立橋墩時，就是破壞河道平衡的障礙物，水流會往兩側繞過障礙物並加速沖刷，造成橋樑等構造物的沖刷甚至破壞



肆、研究目的

一、了解消波塊對**流場**的影響 二、各**洪水量**對橋墩沖刷的影響 三、消波塊**排列方式**對沖刷的影響

伍、水工模型理論

由於縮小模型與原型間存在不少物理上的差異，因此水工試驗必須能反應原型中各種因素影響下發生的力學現象，故水工模型與原型之間應滿足：**1.幾何相似(geometrical similarity)**、**2.運動相似(kinematic similarity)**、**3.動力相似(dynamic similarity)**；試驗中要使模型各種參數均與原型相等相當困難，試驗時應選**最重要之參數**來決定模型的相似，其他不重要者可以**忽略不計**。因此本次科展採用**福祿數相似**原理來進行實驗設計與計算，說明如下。

(一)幾何相似：指模型(m)與原型(p)間之**幾何尺寸成比例**，而比尺則以 λ 符號代表之。 其中，

$$\text{長度比尺} = \lambda_L = \frac{L_m}{L_p} \quad \text{面積比尺} = \lambda_A = \frac{L_m^2}{L_p^2} = \lambda_L^2 \quad \text{體積比尺} = \lambda_V = \frac{L_m^3}{L_p^3} = \lambda_L^3$$

L_p =原型長度
 L_m =模型長度

(二)運動相似：指模型與原型間相對應點之**速度與加速度成比例**，在運動性相似中，時間及長度為控制之因素，在模型試驗中運動性相似所包括之項目為速度、加速度、流量等，說明如下。

$$\text{時間比尺} = \lambda_T = \frac{T_m}{T_p} \quad \text{速度比尺} = \lambda_V = \frac{V_m}{V_p} \quad \text{流量比尺} = \lambda_Q = \frac{Q_m}{Q_p} \quad \text{加速度比尺} = \lambda_a = \frac{a_m}{a_p}$$

(三)動力相似：指模型與原型間相對應點所受之各種**外力成比例**，此比值可由牛頓運動第二定律推導

$$\frac{(F)_m}{(F)_p} = \frac{M_m a_m}{M_p a_p} = \frac{(F_p + F_G + F_V + F_T + F_E)_m}{(F_p + F_G + F_V + F_T + F_E)_p}$$

(四)福祿定律： **V/\sqrt{gL}** 稱為福祿數，為模型**慣性力與重力之比值**，應用在一般河流狀況之水理現象，此參數必須相等；亦即模型與原型間**慣性力與重力之比值必須相等**，其他力量則略去不計。

$$\lambda_Q = \lambda_A \lambda_V = \lambda_L^2 \sqrt{\lambda_g \lambda_L} = (\lambda_L)^{5/2} (\lambda_g)^{1/2} \quad \text{因為 } \lambda_g = 1, \text{ 所以 } \text{流量比尺為幾何比尺的} \mathbf{2.5} \text{次方。}$$

經過福祿數相似之推導，本報告整理相關結果之比例尺如下表

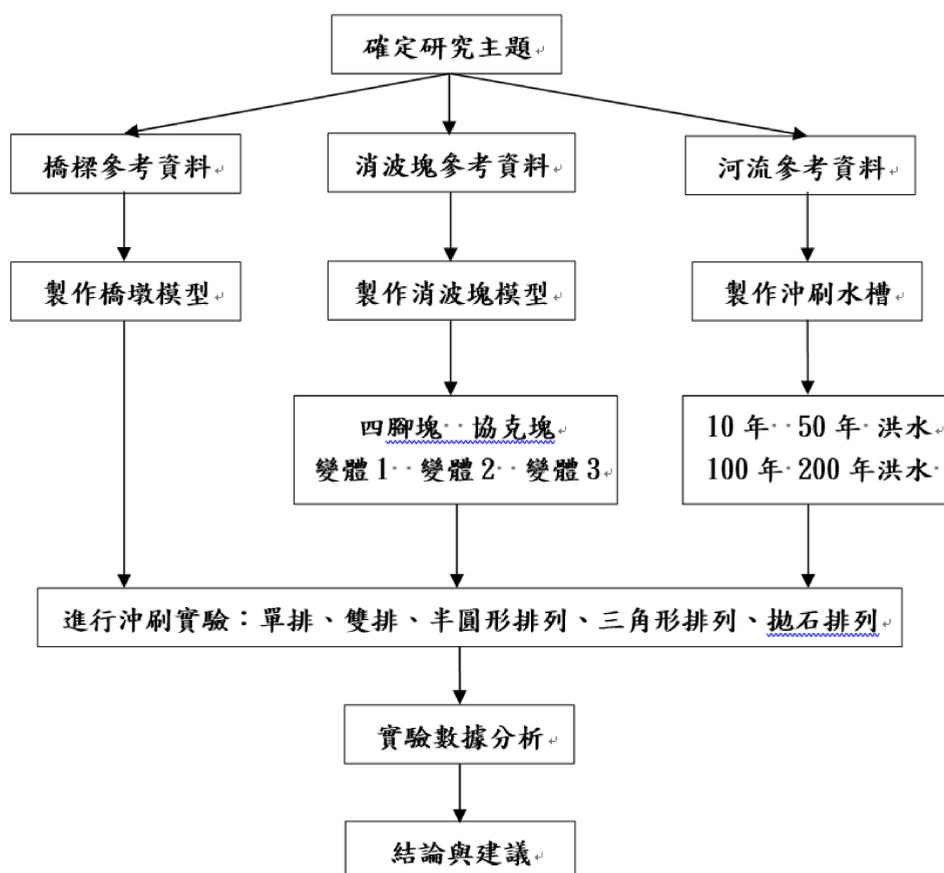
模型比尺	幾何比尺	流速比尺	時間比尺	流量比尺
代號	λ_L	λ_V	λ_T	λ_Q
關係式	λ_L	$\lambda_L^{1/2}$	$\lambda_L^{1/2}$	$\lambda_L^{5/2}$

陸、研究方法

- 一、沖刷水槽：寬35cm、長120cm之壓克力水槽進行實驗，前方設置30cm靜水槽，擋水板用來控制水位與流速。
- 二、橋墩及消波塊模型：1:100之橋墩模型，圓柱型橋墩直徑3.5cm，沉箱基礎尺寸長×寬×深=7×7×5cm，消波塊1:100之幾何比尺，3D列印再使用水泥灌注。四腳塊以及協克塊之外，再設計出3種變體消波塊：變體1-將四腳塊之圓柱正投影圓面積增加一倍，變體2-將四腳塊之漸縮圓柱，依照末端圓面積，變體為直筒圓柱，變體3-將變體2之直筒型圓柱，變體為六角形柱，比較六角形與直筒型的差異。



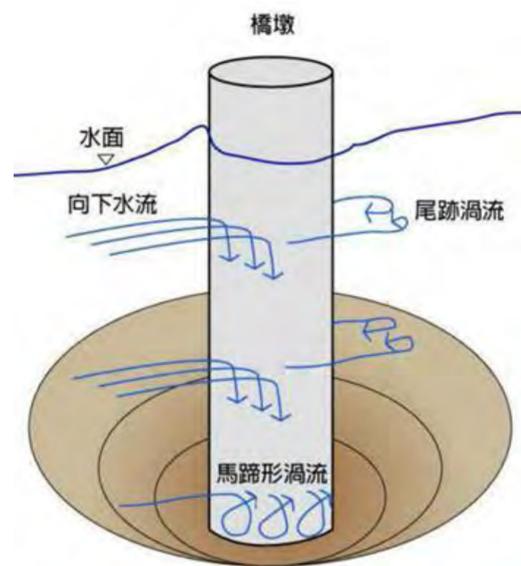
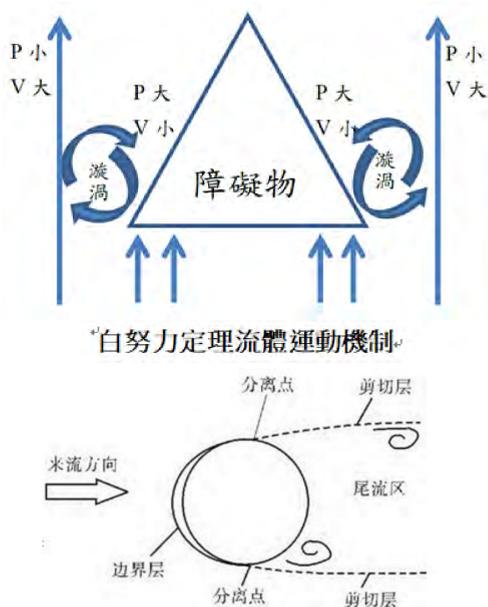
3D 列印-四腳塊 變體1 變體2 變體3 協克塊



- 三、沖刷模擬：由於我們的河道、橋墩、消波塊均採用1:100之幾何比尺，因此依據福祿數相似定理，水位須符合1:100之幾何比尺，也就是水深為原型的100分之1，流速與沖刷時間只要原型的10分之1，而流量更只需要原型的10萬分之1。

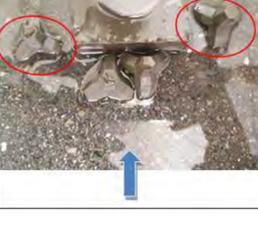
柒、研究結果與討論

變體1		<ol style="list-style-type: none"> 1. 淘刷坑第1大。 2. 尾流區第1大。 3. 渦流第3強。
協克塊		<ol style="list-style-type: none"> 1. 淘刷坑第4大。 2. 尾流區第2大。 3. 渦流最強烈(第1)。



- ◎當消波塊體積越大時，如變體1與協克塊，阻擋水流通水面積也越大，因此尾流區的範圍越大，更能夠保護後方的橋墩。
- ◎六角柱體的消波塊，如變體3與協克塊，相對於圓柱形更容易形成渦流，推論是因多角形態擾動水流更容易產生渦流，在後方尾流區更容易形成堆積。

200年洪水-4塊消波塊

四腳塊		<ol style="list-style-type: none"> 1. 右側消波塊流失。 2. 左側消波塊傾斜沉陷。 3. 最終沖刷深度 3.0 公分。 4. 橋墩傾斜 4.8 度。
變體1		<ol style="list-style-type: none"> 1. 右側消波塊滑移沉陷。 2. 最終沖刷深度 2.3 公分。 3. 橋墩傾斜 3.5 度。
變體2		<ol style="list-style-type: none"> 1. 兩側消波塊流失。 2. 最終沖刷深度 3.5 公分。 3. 橋墩傾斜 6.0 度。
變體3		<ol style="list-style-type: none"> 1. 兩側消波塊流失。 2. 最終沖刷深度 3.7 公分。 3. 橋墩傾斜 6.8 度。
協克塊		<ol style="list-style-type: none"> 1. 兩側消波塊滑移沉陷。 2. 最終沖刷深度 2.6 公分。 3. 橋墩傾斜 4.0 度。

200年洪水-8塊消波塊

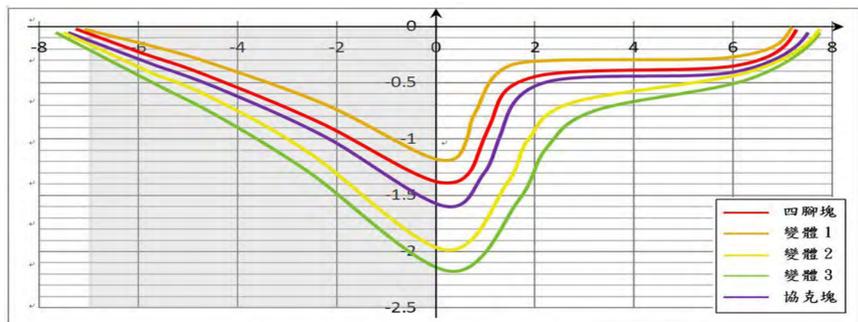
四腳塊		<ol style="list-style-type: none"> 1. 淘刷坑範圍變大變淺。 2. 沖刷最深 1.4 公分。 3. 橋墩傾斜 2.0 度。
變體1		<ol style="list-style-type: none"> 1. 淘刷坑範圍變大變淺。 2. 沖刷最深 1.2 公分。 3. 橋墩傾斜 1.8 度。
變體2		<ol style="list-style-type: none"> 1. 淘刷坑範圍變大變淺。 2. 消波塊輕微錯動沉陷。 3. 沖刷最深 2.0 公分。 4. 橋墩傾斜 2.5 度。
變體3		<ol style="list-style-type: none"> 1. 淘刷坑範圍變大變淺。 2. 消波塊輕微錯動沉陷。 3. 沖刷最深 2.2 公分。 4. 橋墩傾斜 2.6 度。
協克塊		<ol style="list-style-type: none"> 1. 淘刷坑範圍變大變淺。 2. 消波塊輕微錯動。 3. 沖刷最深 1.6 公分。 4. 橋墩傾斜 1.8 度。

200年洪水-半圓形排列消波塊

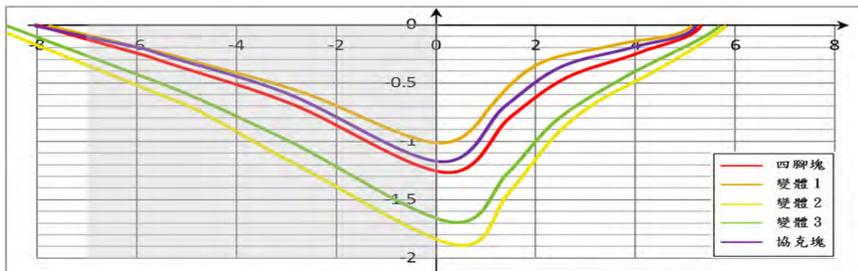
四腳塊			<ol style="list-style-type: none"> 1. 淘刷坑比8塊更大更淺。 2. 消波塊無明顯滑移傾斜。 3. 沖刷最深1.3公分。 4. 橋墩傾斜1.4度。
變體1			<ol style="list-style-type: none"> 1. 淘刷坑比8塊更大更淺。 2. 消波塊無明顯滑移傾斜。 3. 沖刷最深1.0公分。 4. 橋墩傾斜0.8度。
變體2			<ol style="list-style-type: none"> 1. 淘刷坑比8塊更大更淺。 2. 消波塊輕微傾斜。 3. 沖刷最深1.9公分。 4. 橋墩傾斜1.7度。
變體3			<ol style="list-style-type: none"> 1. 淘刷坑比8塊更大更淺。 2. 消波塊輕微傾斜偏移。 3. 沖刷最深1.7公分。 4. 橋墩傾斜2.2度。
協克塊			<ol style="list-style-type: none"> 1. 淘刷坑比8塊更大更淺。 2. 消波塊無明顯滑移傾斜。 3. 沖刷最深1.2公分。 4. 橋墩傾斜1.1度。

200年洪水-正三角形排列消波塊

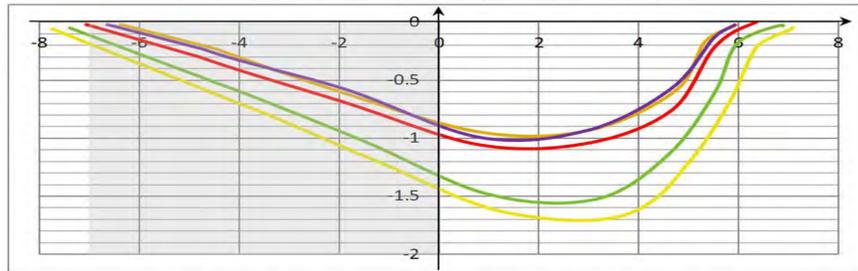
四腳塊			<ol style="list-style-type: none"> 1. 淘刷坑比半圓更大更淺。 2. 消波塊輕微傾斜偏移。 3. 沖刷最深1.1公分。 4. 橋墩傾斜1.2度。
變體1			<ol style="list-style-type: none"> 1. 淘刷坑比半圓更大更淺。 2. 消波塊無明顯滑移傾斜。 3. 沖刷最深1.0公分。 4. 橋墩傾斜0.6度。
變體2			<ol style="list-style-type: none"> 1. 淘刷坑比半圓更大更淺。 2. 消波塊輕微傾斜偏移。 3. 沖刷最深1.7公分。 4. 橋墩傾斜1.5度。
變體3			<ol style="list-style-type: none"> 1. 淘刷坑比半圓更大更淺。 2. 消波塊輕微傾斜偏移。 3. 沖刷最深1.6公分。 4. 橋墩傾斜2.0度。
協克塊			<ol style="list-style-type: none"> 1. 淘刷坑比半圓更大更淺。 2. 消波塊輕微傾斜偏移。 3. 沖刷最深1.0公分。 4. 橋墩傾斜1.0度。



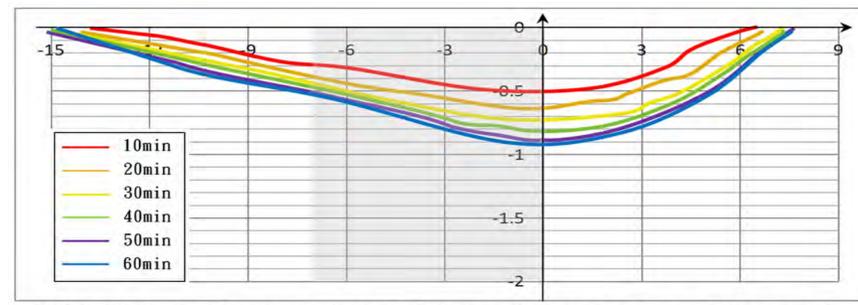
200年洪水-8塊消波塊之沖刷坑剖面圖。



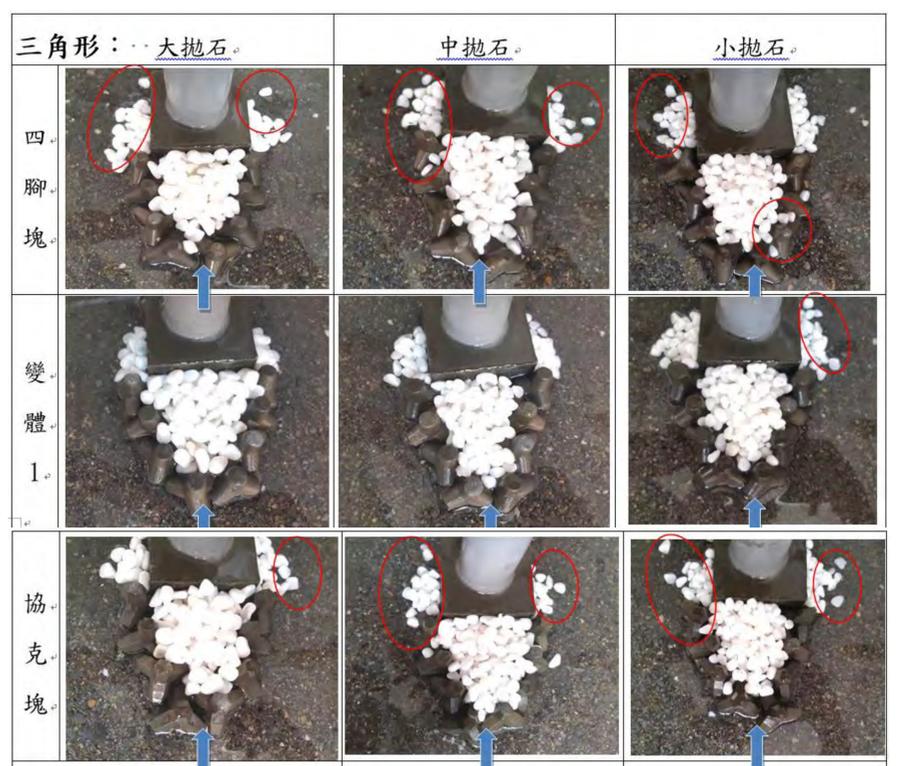
200年洪水-半圓形排列消波塊之沖刷坑剖面圖。



200年洪水-正三角形排列消波塊之沖刷坑剖面圖。



200年洪水-正三角形排列+上游變體1+下游協克塊+大拋石之沖刷坑剖面圖。



正三角形排列+上游變體1+下游協克塊+大拋石



捌、結論與建議

- ◎採用100年沖刷水量時，使用3塊消波塊效果已明顯不足，使用4塊消波塊仍然處於安全範圍內。
- ◎採用200年沖刷水量時，使用4塊消波塊效果也明顯不足，消波塊大多在實驗開始10分鐘以內即被沖走，必須採用8塊消波塊密集排列，才能保護橋墩免於破壞。
- ◎要減緩200年洪水的沖刷，以正三角形及半圓形排列較佳，其中正三角形排列可以有效導引分散水流，使水流衝擊方向偏離橋墩，因此沖刷深度最淺，當增加拋石穩定結構後，是最佳的排列方式。
- ◎本報告發現保護橋墩的最佳方式為：正三角形排列+上游用變體1消波塊+下游用協克塊+大拋石穩定結構，可防護200年以上的洪水。
- ◎我們發現藉由排列方式的改良(如半圓或正三角形)，可以有效使沖刷改善，200年洪水降低到等同於100年4塊消波塊等值的沖刷結果，顯示消波塊的排列方式也是十分值得研究的問題。
- ◎就消波塊的形式來說，消波塊體積越大時，阻擋水流的面積也越大，因此尾流區的範圍越大，也更能夠保護後方的橋墩；而消波塊重量越重時，越能穩定而不易沖走。由實驗結果亦可驗證減緩沖刷的前三名依次為變體1、協克塊、四腳塊，是可以推薦未來研究參考的。