

拋石工法對於固床工下游相對漩渦強度影響之研究

吳嘉俊^[1*] 吳雅筠^[2] 陶承義^[3] 吳科興^[3]

摘要 本研究之目的，在於探討拋石工法對於固床工下游相對漩渦強度與局部淘刷係數的影響。本研究採用動床水工模型試驗，試驗過程中除了重復量測 5 個固床工區間、7 個特定位置的水流深度及渠床砂面高程，並得其平均數值外，當拋石保護段下游的淘刷坑達到動態平衡階段時，本研究使用二維電磁式流速計量測 7 個特定位置的流速剖面。研究結果指出，拋石保護段末端處的 Breusers 相對漩渦強度隨著拋石長度與水深比值的增加而呈現逐漸增強之趨勢；亦即，拋石保護段長度愈長，其所產生的 Breusers 相對漩渦強度愈弱。同樣的，Breusers 相對漩渦強度隨著相對糙度的增加而增強，至於相對糙度的大小則受控於拋石工法所採用的拋石粒徑。換句話說，當細粒徑拋石用於做為拋石工法的材料時，其所形成相對較為光滑的水力界面，將營造出較弱的 Breusers 相對漩渦強度。本研究結果亦顯示，由小粒徑拋石所組成的拋石工法，因為孕育出較高的局部淘刷係數及較強且具侵蝕力的水流，故其對於固床工下游溪床的保護作用相對有限。

關鍵詞：相對漩渦強度、局部淘刷係數、固床工。

Effect of riprap protection to relative turbulence intensity at the downstream of groundsill

Chia-Chun Wu^[1*] Ya-Yun Wu^[2] Cheng-Yi Tao^[3] Ke-Hsing Wu^[3]

ABSTRACT: The objective of this study is to experimentally explore the effect of riprap to relative turbulence intensity and local scour coefficient of at the downstream of groundsills. Measurements of flow depth and channel bed elevation were repeated at five intervals to achieve the average readings. Velocity profile measurements were taken using two-dimensional electromagnetic current meter and they were taken when scour hole reached the equilibrium stage. Research results of this study indicate that Breusers' relative turbulence intensity at the tail end of riprap protection gradually increases with the increases of protection length-flow depth ratio. In other words, long riprap length produces smaller Breusers' relative turbulence intensity. Likewise, Breusers' relative turbulence intensity also increases with respect to the increases of relative roughness that induced by riprap sizes; namely, smaller Breusers' relative turbulence intensity gets, smoother the hydraulic surface becomes. Our findings from this study also suggest that finer the riprap sizes that bed protection constitutes of, higher the local scour coefficient and erosion capacity that stream flow possesses.

Key Words: Relative turbulence intensity, Local scour coefficient, Groundsill

^[1]國立屏東科技大學水土保持系教授 (*通訊作者 E-mail: ccwu@mail.npust.edu.tw)
Professor, Dept. of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science and Technology,
Pingtung 912, Taiwan

^[2]國立屏東科技大學水土保持系碩士生
Graduate student, Dept. of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science and
Technology, Pingtung 912, Taiwan

^[3]國立屏東科技大學水土保持系學生
Undergraduate student, Dept. of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science and
Technology, Pingtung 912, Taiwan

一、前言

固床工為野溪整治工法中所構築的橫向構造物(transverse structures)之一，其主要目的通常為防止渠床嚴重下切、控制水流方向(水土保持手冊 2005)及保持渠道水面高度(Hoffmans and Verheij,1997)。然而，因為固床工下游的局部淘刷(local scour)，使固床工趾部逐漸受到侵蝕，所以在設計固床工之過程面臨許多挑戰；而在水工結構底部造成淘刷的主要原因為漩渦射流之投潭作用(plunge)和滲流(submergence)。(Johnston, 1990；Breusers and Raudkivi, 1991；Mohamed and McCorquodale, 1992；Balachandar et al., 2000；Kells et al., 2001；Deshpande et al., 2007)

Zanke(1978)將淘刷過程分為四個階段：(1)初始階段(2)發展階段(3)穩定階段及(4)平衡階段。在淘刷過程的初始階段，水流侵蝕力相當嚴重；當最大淘刷深度與拋石保護段到發生最大淘刷深度位置的距離比值大約呈現定值時，稱為發展階段；上游淘刷坡度與最大淘刷深度呈現平衡時，稱為穩定階段；當淘刷坑大小不再顯著改變時，定義為平衡階段。

Koloseus (1984)建立了一個理想化的水流境況(flow regime)，以實驗探討跌水工趾部拋石移動所造成的原因。研究指出，在跌水工趾部放置拋石會擴大河床的水頭梯度，增加滲漏的可能性。

Vrijling (1990)歸類拋石保護的四種破壞機制，分別為：(1)在拋石保護段末端處的剪力破壞、(2)拋石保護上的侵蝕作用、(3)水流侵入拋石保護段的底層，及(4)底床基礎材料自拋石保護段洗出。

設計渠床中之固床工的過程，對工程師來說，最重要的淘刷參數莫過於在平衡階段所產生的最大淘刷深度。Dietz (1969)提出一個平均淘刷深度的無因次方程式為：

$$\frac{y_{m,e}}{h_o} = \frac{\omega U_o - U_c}{U_c} \quad (1)$$

式中： $y_{m,e}$ =平均淘刷深度(m)； h_o =初始水流深度(m)； U_c =臨界速度(m/s)； $U_o=Q/A$ ，水流速度； $\omega=1+3r_o$ ，漩渦係數， r_o =相對漩渦強度。

Breusers (1966, 1967) 認為，淘刷坑中的泥砂運移，為最大流速與臨界流速差的函數。在拋石保護段末端，最大流速為局部流速及相對漩渦強度(relative turbulence intensity)的函數。因此，相對漩渦強度($r_o = \sigma_u / U$)定義為對瞬時速度之標準偏差進行時間與斷面水深積分(σ_u)與通水斷面平均流速(U)之比值。在水力界面之粗糙和光滑的條件下，相對漩渦強度(r_o)分別約為0.1和0.05。

Hoffmans and Booij (1993)論述，如果受固床工保護之渠道符合水平式拋石保護的組合，且水流通過固床工上方為次臨界流(sub-critical flow)時，而拋石保護段之長度大於六倍固床工高度($L > 6D$)時，相對漩渦強度 r_o 能從下式推斷：

$$r_o = \sqrt{0.0225 \left(1 - \frac{D}{h_o}\right)^{-2} \left(\frac{L-6D}{6.67h_o} + 1\right)^{-1.08} + 1.45 \frac{g}{c^2}} \quad (2)$$

式中： C =拋石之謝才係數(Chézy coefficient; $m^{1/2}/s$)； D =固床工高度(m)； $g=9.81m/s^2$ ； L =拋石保護段長度(m)。

Hoffmans and Booij (1993)提出更簡易的局部淘刷係數之方程式：

$$\alpha = 1.5 + 4.4r_o f_c \quad (3)$$

式中： f_c =於拋石上之糙度函數， $f_c=C/C_o$ ； C =謝才係數； $C_o=40m^{1/2}/s$ 。如果 $C < C_o$ ，則 $f_c=1$ 。

de Graauw (1981)及 de Graauw & Pilarczyk (1981)經淘刷研究實驗中得出二維和三維的局部淘刷係數 α (local scour coefficient)，並認為局部淘刷係數 α 可被視為具侵蝕力水流之指標。Hoffmans & Verheij (1997)之研究則發現，若要降低局部淘刷係數 α ，可藉由加長拋石保護段長度或是增加拋石保護段的糙度來達成。

為了因應固床工趾部的局部淘刷，而加深固床工結構的深度既不符合成本效益，且對水棲生態極不友善。在儘可能不影響水生生態為原則之下，可改變固床工的設計(Wu et al. 2004, Lin 2005, He 2007)或在橫向構造物上增設魚道(Bunt et al. 2001, Pratt et al. 2009)。然而，固床工下游處的局部淘刷仍不可避免，因此，在固床工下游處實施拋石保護段仍停留在對策研究之選項中。

本研究主要目的，為探討拋石工法對於固床工下游相對漩渦強度及局部淘刷係數的影響。

二、材料與方法

試驗地點位於國立屏東科技大學水土保持系的陡坡水工實驗室。試驗渠槽為直線式半循環渠槽，渠槽全長 0.4m、渠槽寬度 0.91m、渠槽深度 0.3m，且渠槽坡度可調節達 11%，渠槽內配置斜率為 1:0.3 的可調節式護岸。固床工模型採用 1:50 之縮尺模型，以模擬現地。固床工縮尺模型以每 0.2m 的間隔配置，材質為防水膠合板。固床工模型厚度 15mm、寬度 0.3m 及高度 0.15m。為方便渠槽內的伏流水通過，本研究於固床工模型高度三分之一處橫向鑽一排 $\phi=3.175\text{mm}$ 的排水孔。試驗中使用三種不同幾何平均粒徑的拋石，分別為 21.77mm、16.75mm 與 10.40mm；試驗床砂平均粒徑為 0.74mm。

本研究於水工試驗前先在每個固床工間隔內放置床砂，並使用鏟刀壓實床砂及預留拋石保護段空間。再將所預留的拋石保護段空洞填充拋石，使拋石面、床砂之完成面與固床工的頂緣之間的落差維持 10mm，完成後的試驗段如圖 1 所示。每次試驗完畢之後，則先將拋石撿除，以鏟刀徹底翻動床砂後，重複上述步驟，準備下一次的試驗。



圖 1. 完成前置的試驗渠槽之範例

Figure 1. Example of a finished test channel setup

本研究水工試驗的預設參數包含兩種不同長度拋石保護段，分別為相鄰兩固床工間隔的二分之一與四分之一長度、三種流量、三種拋石粒徑，以及四種渠床坡降，如表 1。

表 1.試驗渠槽參數

Table 1. Parameters selected for the flume experiment

項目	1:50 模擬渠槽	現地
流量(m ³ /s)	5.8×10 ⁻⁴	10.25
	7.8×10 ⁻⁴	13.79
	9.3×10 ⁻⁴	16.44
坡降	0.03, 0.048, 0.066, 0.085	
拋石保護段長度(m)	0.05	2.5
	0.10	5.0
拋石粒徑(mm)	10.40	520.0
	16.75	837.5
	21.77	1088.5

本研究採用動床水工模型試驗，試驗過程中重複量測 5 個固床工區間、7 個特定位置的水流深度及渠床砂面高程，並得其平均值。所量測之數值另包含描述淘刷坑的特徵參數，分別為(1)最大淘刷深度(y_s)、(2)拋石保護段末端至最大淘刷深度的距離(λ_m)，以及(3)拋石保護段末端至淘刷結束的距離(λ_s)，如圖 2 所示。

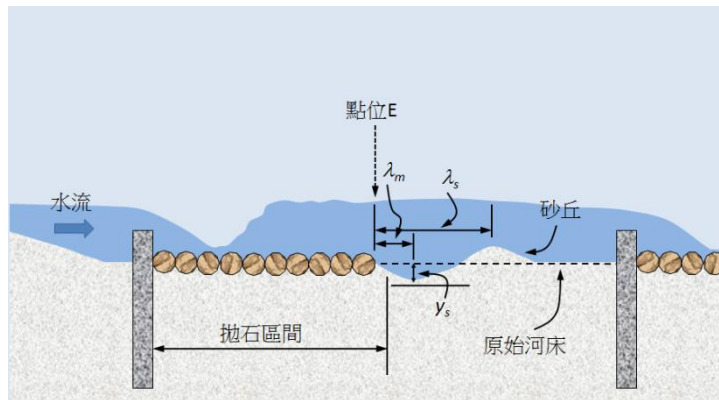


圖 2.特徵參數與流速測量位置

Figure 2. Location of the flow depth and velocity profile measurements

本研究使用二維電磁式流速計(electromagnetic current meter)，以量測前述 7 個特定位置於平衡階段的流速剖面(velocity profile)。二維電磁式流速計提供速度測量範圍從 0 到 250cm/s，準確度±0.5cm/s。每個剖面所量測的點位分別為(1)拋石表面、(2)近水面，以及(3)沿著水流深度軸向的不同位置，每個點位以五秒間隔自動量測並取平均流速，且每個點位至少量測一分鐘。在進行渠槽流速剖面量測時，從預選的五個固床工區間中，選出其中一格固床工區間作為代表，以進行測量及分析。

為計算 Breusers 相對漩渦強度(r_o)_B，首先將前述 7 個特定位置之不同水深點位所測得的瞬時速度分別求取標準偏差，再進行水深積分，之後除以此通水斷面的平均流速，就可得到 Breusers 相對漩渦強度(r_o)_B，如公式 4。

$$r_o = \frac{\sigma_u}{U} \quad (4)$$

為了計算 Hoffmans and Booij (1993)相對漩渦強度(r_o)_H，如公式 2 所示，需先進行謝才係數 C 計算，如公式(5)：

$$C = \frac{\sqrt{g}}{\kappa} \ln\left(\frac{12R}{k_s}\right) \quad (5)$$

式中： k_s =Nikuradse 相對糙度(m)，此相對糙度設為拋石之平均粒徑； R =水力半徑(m)； κ = van Kármán 常數=0.4。

至於局部淘刷係數 α ，則藉由 Hoffmans & Booij (1993)所提出的相對漩渦強度 $(r_o)_H$ 進行計算，如公式(3)。

三、結果與討論

如圖 4 為局部淘刷的部分試驗照片。



圖 4.拋石保護段下游的局部淘刷(坡降 S1 =0.030；坡降 S3 =0.066；坡降 S4 =0.085；流量 Q1= 0.00058cms；流量 Q2= 0.00078cms；流量 Q3= 0.00093cms；拋石長度 LQ=0.05m；拋石長度 LH=0.10m；拋石粒徑 RM=16.75mm；拋石粒徑 RC=21.77mm)

Figure 4. Local scour at the downstream of riprap protection (Symbols: S1: channel gradient = 0.030; S3: channel gradient = 0.066; S4: channel gradient = 0.085; Q1: flow rate = 0.00058 cms; Q2: flow rate = 0.00078 cms; Q3: flow rate = 0.00093 cms; LQ: length of riprap protection = 0.05 m; LH: length of riprap protection = 0.10 m; RM: riprap size = 16.75 mm; RC: riprap size = 21.77 mm).

受侵蝕的床砂逃離淘刷坑後繼續往下游運移，在進入下一個固床工前，其命運取決於在下游相鄰固床工與淤積砂丘促發的回水作用(backwater effect)。淤積砂丘的長度與高度，取決於淘刷坑所提供的泥砂產量。D'Agostino (1994)將淤積砂丘分為兩類，即為長砂丘與短砂丘。在實驗中，我們發現通常高含砂產出量的淘刷坑容易形成長砂丘，且長砂丘容易延伸到下游相鄰固床工的上端。因此，長砂丘易於降低回水的產生。另一方面，從低含砂產出量的淘刷坑容易形成短砂丘，有助於限制往上游蔓延的回水作用。

當自由表面水流(free-surface flow)到達拋石保護段的末段時(如圖 2 中，點位 E)，渠床床砂立即產生局部淘刷，而拋石粒徑會影響局部淘刷的最大淘刷深度 (y_s) 與淘刷長度 (λ_s) 。當渠槽坡度條件相同，比較拋石邊緣的淘刷範圍，本研究發現，在長拋石保護段與大拋石粒徑的組合下，產生淘刷深度較深，其次為中拋石粒徑及小拋石粒徑；相同的結果也發生在短拋石保護段中。然而，短拋石保護段隨著流量的增加，短拋石保護段失去防止局部淘刷產生的功能。

從渠槽試驗亦發現，用小拋石粒徑作為拋石保護段時，經常生成淺且緩的淘刷坑滑動面。反之，以大拋石粒徑作為拋石保護段時，則產生較深的淘刷坑與陡峭的滑動面，而且最大淘刷深度的位置經常發生在拋石保護段與床砂附近；即為最接近點位 E 的下游位置。促成不同淘刷特性的原因之一為大拋石粒徑所造成的高度落差。在拋石保護段與床砂的交界處，此高度落差促使潛流投潭(submerged plunge flow)作用。

在淘刷坑的外圍，潛流投潭與泥砂堆積互相影響，此作用不僅支配砂丘的發展，也牽制鄰近固床工形成的回水作用。如果回水作用能夠傳遞至上游方向進而進入潛流投潭流中，水墊效應(cushion effect)因此形成，且能消散具有侵蝕力的潛流投潭流。然而，水墊效應會隨渠道坡降的遞增而消失。

本研究先將瞬時速度數據異常值刪除，表 2 所列即為實驗分析結果。表 2 所列的參數包含: (1) $(r_o)_B$ ，使用 Breusers 相對漩渦強度公式、(2) $(r_o)_H$ ，使用 Hoffmans and Booij 相對漩渦強度公式，以及(3) α ，使用

Hoffmans and Booij 局部淘刷係數公式。

表 2. 實驗結果一覽表: 相對漩渦強度及局部淘刷係數

Table 2. Summary of experiment results, calculated relative turbulence intensity and local scour coefficient

流量 Q(cms)	渠道 坡降 S(-)	拋石 粒徑 D _R (mm)	拋石 長度 L _R (mm)	水流 深度 h(mm)	平均 流速 U(m/s)	最大淘 刷深度 y _s (mm)	平均淘 刷長度 λ _s (mm)	最大淘刷 深度至拋 石距離 λ _m (mm)	相對漩渦強度		局部淘 刷係數 α
									(r _o) _H	(r _o) _B	
0.00077	0.030	10.4	93.0	23.4	0.158	5.9	51.2	1.2	0.170	0.854	2.379
0.00089	0.030	10.4	93.0	23.2	0.186	8.2	57.8	5.2	0.170	0.679	2.379
0.00089	0.030	10.4	45.0	24.9	0.173	12.1	65.2	22.2	0.170	0.662	2.380
0.00065	0.048	10.4	45.0	13.2	0.239	3.2	28.8	4.2	0.171	1.476	2.372
0.00083	0.048	10.4	45.0	14.6	0.278	4.9	43.6	13.6	0.170	0.609	2.373
0.00096	0.048	10.4	93.0	15.8	0.296	1.9	23.2	3.6	0.170	0.412	2.374
0.00096	0.048	10.4	45.0	20.3	0.230	6.5	85.4	48.0	0.170	0.477	2.377
0.00066	0.066	10.4	93.0	11.1	0.291	6.6	56.2	3.6	0.171	0.340	2.370
0.00065	0.066	10.4	45.0	14.6	0.218	4.1	53.0	6.4	0.170	0.741	2.373
0.00084	0.066	10.4	93.0	13.0	0.318	3.1	39.4	1.4	0.171	0.470	2.372
0.00097	0.066	10.4	45.0	15.7	0.300	8.6	90.0	27.2	0.170	0.592	2.374
0.00057	0.085	10.4	93.0	10.9	0.259	4.9	48.2	30.4	0.171	0.586	2.370
0.00058	0.085	10.4	45.0	15.6	0.183	8.6	69.4	10.4	0.170	0.950	2.374
0.00079	0.085	10.4	93.0	14.8	0.260	7.0	52.2	5.6	0.170	0.338	2.373
0.00093	0.085	10.4	93.0	15.9	0.285	7.5	70.6	23.8	0.170	0.451	2.374
0.00058	0.030	16.8	45.0	6.5	0.441	10.6	42.8	3.0	0.174	0.133	2.313
0.00079	0.030	16.8	93.0	20.7	0.184	6.4	52.8	4.7	0.174	0.637	2.323
0.00078	0.030	16.8	45.0	19.0	0.201	7.0	74.6	25.6	0.174	1.154	2.322
0.00092	0.030	16.8	93.0	28.4	0.155	7.0	48.8	3.6	0.173	0.912	2.328
0.00090	0.030	16.8	45.0	20.8	0.208	15.5	74.2	24.2	0.174	0.421	2.323
0.00063	0.048	16.8	45.0	13.8	0.223	5.2	24.6	6.8	0.174	0.548	2.319
0.00081	0.048	16.8	93.0	14.3	0.279	3.9	14.0	1.4	0.174	0.621	2.319
0.00083	0.048	16.8	45.0	15.5	0.262	4.3	46.6	14.8	0.174	0.528	2.320
0.00096	0.048	16.8	93.0	19.3	0.241	3.9	22.4	7.4	0.174	0.466	2.322
0.00097	0.048	16.8	45.0	19.1	0.246	9.3	81.8	15.4	0.174	0.372	2.322
0.00066	0.066	16.8	93.0	12.5	0.259	3.3	37.2	4.0	0.174	0.449	2.318
0.00066	0.066	16.8	45.0	11.7	0.276	6.7	71.2	21.8	0.174	0.668	2.317
0.00085	0.066	16.8	93.0	11.9	0.349	1.7	37.4	2.6	0.174	0.254	2.317
0.00097	0.066	16.8	45.0	15.6	0.304	5.4	113.0	19.4	0.174	0.969	2.320
0.00077	0.085	16.8	93.0	11.5	0.328	6.6	42.6	1.4	0.174	0.513	2.317
0.00079	0.085	16.8	45.0	13.4	0.288	8.7	85.6	22.4	0.174	0.407	2.318
0.00094	0.085	16.8	93.0	12.2	0.379	10.2	72.0	17.2	0.174	0.251	2.317
0.00077	0.030	21.8	93.0	20.1	0.187	5.1	56.0	0.8	0.176	0.053	2.294
0.00080	0.030	21.8	45.0	22.3	0.173	13.6	58.6	16.0	0.176	0.714	2.295
0.00088	0.030	21.8	93.0	10.5	0.413	7.5	39.4	3.4	0.176	0.154	2.287
0.00091	0.030	21.8	45.0	24.1	0.182	14.6	80.2	23.2	0.176	0.973	2.297
0.00067	0.048	21.8	45.0	17.5	0.158	10.6	41.2	3.6	0.176	0.333	2.294
0.00082	0.048	21.8	93.0	15.2	0.265	3.5	20.0	1.0	0.176	0.441	2.291

表 2.實驗結果一覽表:相對漩渦強度及局部淘刷係數(續)

Table 2. Summary of experiment results, calculated relative turbulence intensity and local scour coefficient (continue)

流量 Q(cms)	渠道 坡度 S(-)	拋石 粒徑 D _R (mm)	拋石 長度 L _R (mm)	水流 深度 h(mm)	平均 流速 U(m/s)	最大淘 刷深度 y _s (mm)	平均淘 刷長度 λ _s (mm)	最大淘刷 深度至拋 石距離 λ _m (mm)	相對漩渦強度 (r _o) _H	相對漩渦強度 (r _o) _B	局部淘 刷係數 α
0.00082	0.048	21.8	45.0	15.1	0.266	8.3	52.6	18.8	0.176	0.576	2.291
0.00095	0.048	21.8	93.0	14.0	0.333	4.3	24.6	10.0	0.176	0.231	2.290
0.00095	0.048	21.8	45.0	20.8	0.221	17.6	74.4	29.2	0.176	0.851	2.294
0.00066	0.066	21.8	93.0	14.2	0.226	20.6	36.0	8.4	0.176	0.694	2.290
0.00066	0.066	21.8	45.0	14.6	0.221	7.0	57.6	9.8	0.176	0.392	2.290
0.00085	0.066	21.8	93.0	16.2	0.254	8.1	46.6	4.2	0.176	0.380	2.291
0.00097	0.066	21.8	45.0	16.5	0.288	6.1	91.6	21.2	0.176	0.483	2.291
0.00057	0.085	21.8	93.0	13.2	0.212	7.1	43.6	21.0	0.176	0.504	2.289
0.00093	0.085	21.8	93.0	17.2	0.264	7.2	55.6	5.6	0.176	0.538	2.292

首先將分析後的 Breusers 相對漩渦強度(r_o)_B與 Hoffmans and Booij 相對漩渦強度(r_o)_H進行比較,如圖 5 所示。從圖中可清楚地判斷 Breusers 相對漩渦強度(r_o)_B分布較廣於 Hoffmans & Booij 相對漩渦強度(r_o)_H,主要原因為(r_o)_B取決於所量測的瞬時速度,而(r_o)_H取決於藉由拋石粒徑所產生的相對糙度。

如公式(2)與(4), Hoffmans and Booij 相對漩渦強度(r_o)_H的函數分別為固床工高度、拋石保護段的長度,以及水流深度; Breusers 相對漩渦強度(r_o)_B定義為對瞬時速度之標準偏差進行時間與斷面水深積分(σ_t)與通水斷面平均流速(U)之比值。因為本研究僅探討低水頭(low head)固床工,因此研究結果指出,(r_o)_H在本研究之實驗條件下顯示較小的靈敏度。然而,圖 5 中的(r_o)_H呈現因拋石粒徑而成群的特殊特徵,從中發現,小拋石粒徑產生較小的(r_o)_H,其次為中拋石粒徑及大拋石粒徑。

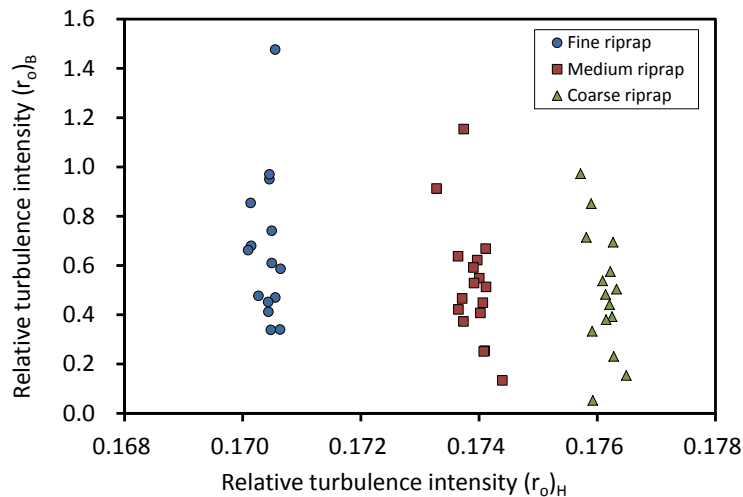


圖 5.相對漩渦強度的對比

Figure 5. Comparison of relative turbulence intensities.

本研究更進一步分別繪製 Hoffmans and Booij 相對漩渦強度(r_o)_H與拋石保護段長度及平均水深之比值(L_R/h)以及相對漩渦強度與相對糙度(D_R/h),如圖 6 及圖 7 所示。研究結果發現,在拋石保護段末端處,相對漩渦強度隨著(L_R/h)和(D_R/h)而遞增。然而,Hoffmans & Booij 相對漩渦強度(r_o)_H在本研究所使用的拋石粒徑條件下呈現非常小的數值。

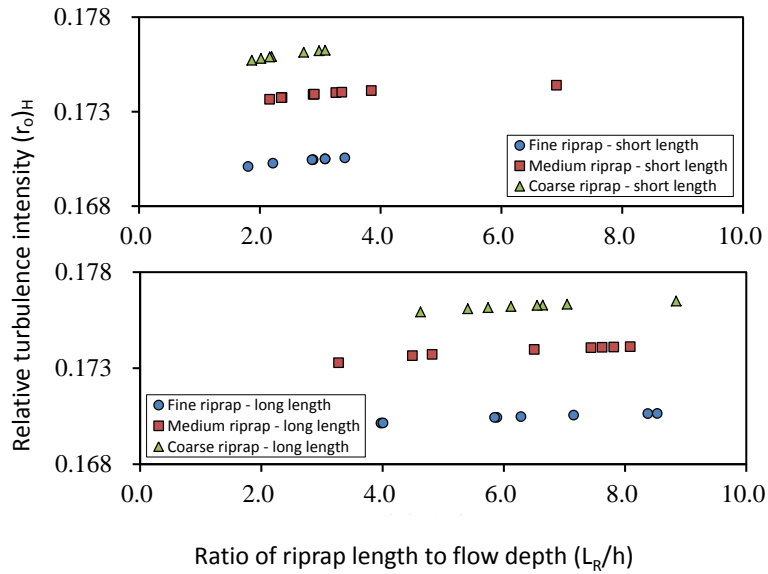


圖 6. Hoffmans and Booij 相對漩渦強度 $(r_o)_H$ 與拋石保護段長度及平均水深之比值 (L_R/h)

Figure 6. Scattered plot of Hoffmans and Booij relative turbulence intensity $(r_o)_H$ against riprap protection length to flow depth ratio (L_R/h)

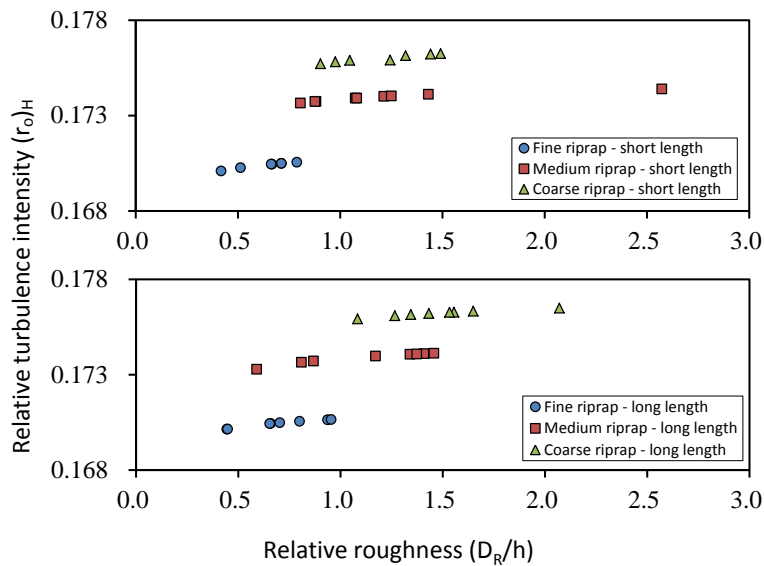


圖 7. Hoffmans and Booij 相對漩渦強度 $(r_o)_H$ 與相對糙度 (D_R/h)

Figure 7. Scattered plot of Hoffmans and Booij relative turbulence intensity $(r_o)_H$ against relative roughness (D_R/h)

圖 8 為 Breusers 相對漩渦強度 $(r_o)_B$ 與拋石保護段長度及平均水深之比值 (L_R/h) ，由圖中可看出，在拋石粒徑群中，呈現較差的相關性。儘管如此，Breusers 相對漩渦強度 $(r_o)_B$ 與拋石保護段長度及平均水深之比值 (L_R/h) 之間依舊呈現總體的趨勢關係。當固床工趾部實施短拋石保護段時，與長拋石保護段相比，短拋石保護段的 Breusers 相對漩渦強度 $(r_o)_B$ 分散較廣的範圍，而且長拋石保護段產生較小的 Breusers 相對漩渦強度 $(r_o)_B$ 。此乃因為長拋石保護段形成相對較為光滑的水力界面，進而營造出較弱的 Breusers 相對漩渦強度。

同樣地，Breusers 相對漩渦強度 $(r_o)_B$ 與相對糙度 (D_R/h) 的關係在拋石粒徑群中，也呈現鮮少的規則性，如圖 9 所示。當在固床工趾部實施長拋石保護段時，小拋石粒徑產生較高的 Breusers 相對漩渦強度 $(r_o)_B$ ，

其次為中拋石粒徑及大拋石粒徑。

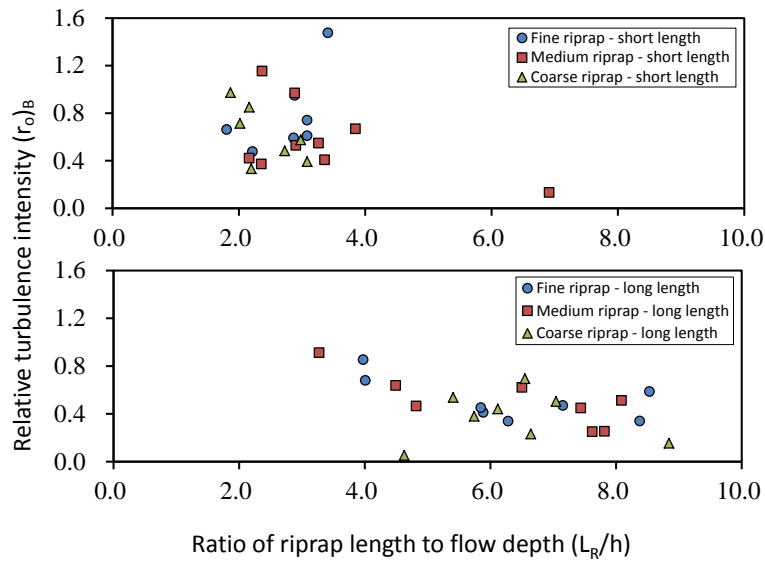


圖 8. Breusers 相對漩渦強度(r_o)_B 與拋石保護段長度及平均水深之比值(L_R/h)

Figure 8. Scattered plot of relative turbulence intensity (r_o)_B against riprap protection length to flow depth ratio (L_R/h)

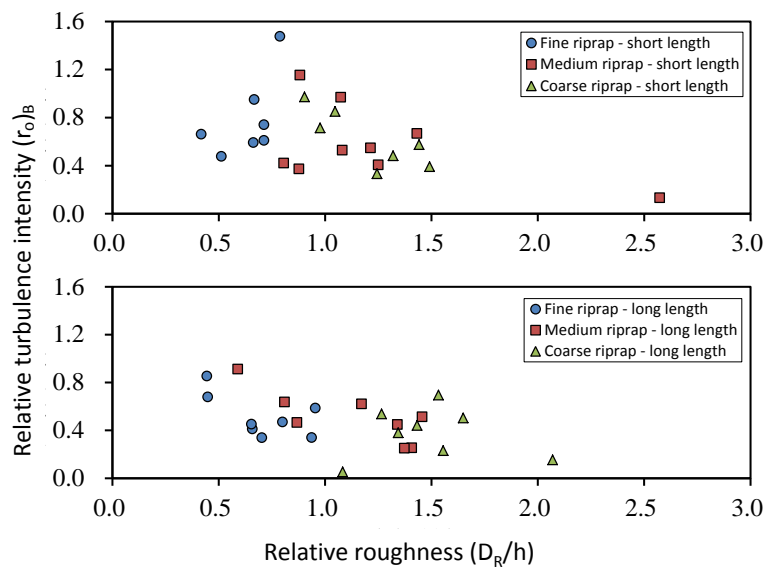


圖 9. Breusers 相對漩渦強度(r_o)_B 與相對糙度(D_R/h)

Figure 9. Scattered plot of Breusers' relative turbulence intensity (r_o)_B against relative roughness (D_R/h)

圖 10 為局部淘刷係數 α 與拋石保護段長度及平均水深之比值(L_R/h)的結果；圖 11 為局部淘刷係數 α 與相對糙度(D_R/h)的結果。從圖可清楚得知，象徵著具侵蝕力之水流的局部淘刷係數隨著(L_R/h) 及(D_R/h)的遞增而減小。除此之外，由大拋石粒徑組成的拋石保護段削弱局部淘刷係數(如圖 11)，而由小拋石粒徑組成的拋石保護段則產生較高的局部淘刷係數及較具侵蝕力的水流。此發現驗證了 Hoffmans & Verheij(1997)的論述：『一個平滑的河床保護造成快速的淘刷過程，因為在平滑河床上的水流比在粗糙河床上的水流具有更大的動量(A smooth bed protection results in a faster scour process because the flow above a smooth bed has greater momentum than the flow above a rough bed.)。』

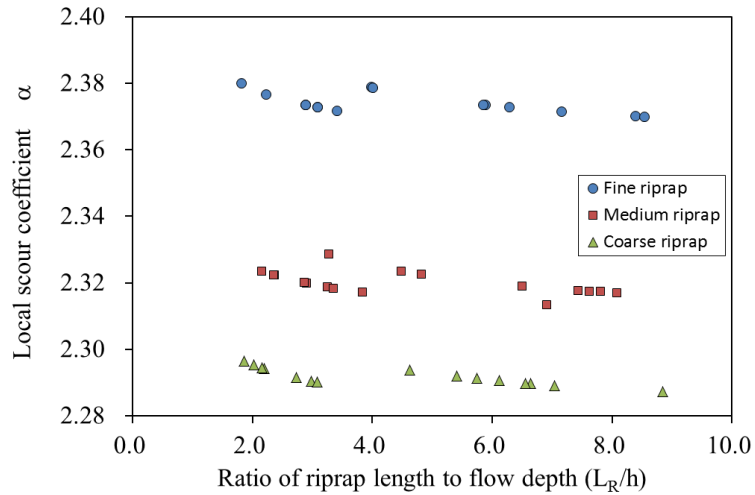


圖 10. 局部淘刷係數 α 與拋石保護段長度及平均水深之比值 (L_R/h)

Figure 10. Scattered plot of local scour coefficient (α) against riprap protection length to flow depth ratio (L_R/h)

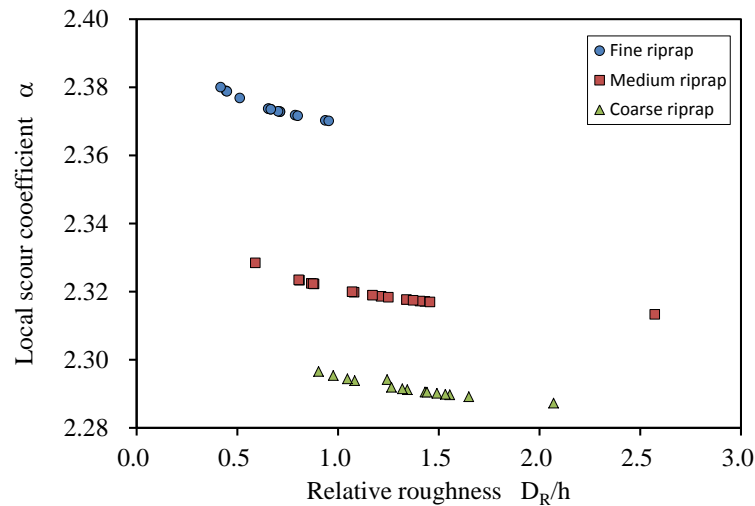


圖 11. 局部淘刷係數 α 與相對糙度 (D_R/h)

Figure 11. Scattered plot of local scour coefficient (α) against relative roughness (D_R/h)

圖 12 為局部淘刷係數與最大淘刷深度及淘刷長度的比值之散佈圖。從圖可清楚得知：(1)拋石粒徑產生屬於自己獨特的局部淘刷係數、(2)小拋石粒徑之數據群緊密聚集在範圍狹小的位置，而大拋石粒徑的數據群則散佈在較寬的範圍。在散佈的 (y_s/λ_s) 數值中，本研究發現，當水流離開拋石保護段時，水流從浸入的投潭流變回具有侵蝕河床的水流。因此，本研究的結果無法支持 Hoffmans and Verheij (1997) 所提出『局部淘刷係數等同於水流具侵蝕能力之基準 (the notion of local scour coefficient α as a measure of flow erosion capacity)』的理念。

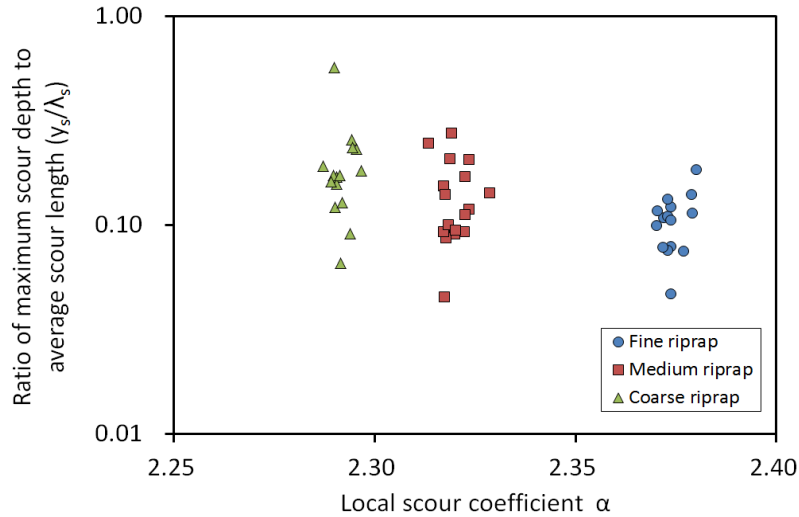


圖 12. 局部淘刷係數(α)與最大淘刷深度及淘刷長度的比值(y_s/λ_s)之散佈圖

Figure 12. Scattered plot of ratio of maximum scour depth to average scour length (y_s/λ_s) against local scour coefficient (α)

四、結論

本研究主要探討拋石工法對於固床工下游相對漩渦強度的影響，研究結果可歸納成以下幾點：

- (1) 拋石長度有助於消耗投潭流通過固床工的能量，而拋石粒徑則決定水流流場之特性。
- (2) 拋石保護段末端處的 Breusers 相對漩渦強度隨著拋石長度與水深比值的增加而呈現逐漸增強之趨勢；亦即，拋石保護段長度愈長，其所產生的 Breusers 相對漩渦強度愈弱。換句話說，當細粒徑拋石用於作為拋石工法的材料時，其所形成相對較為光滑的水力界面，將營造出較弱的 Breusers 相對漩渦強度。
- (3) Breusers 相對漩渦強度隨著相對糙度的增加而增強，至於相對糙度的大小則受控於拋石工法所採用的拋石粒徑。由小粒徑拋石所組成的拋石工法，因為孕育出較高的局部淘刷係數及較強且具侵蝕力的水流，故其對於固床工下游溪床的保護作用相對有限。
- (4) 本研究結果亦驗證 Hoffmans and Verheij (1997)所提及的論述。然而，本研究認為，僅用局部淘刷係數未能完全描述固床工趾部的淘刷型態。因此，本研究建議，未來仍需進一步確認其他相關的水力與泥沙參數，以便更能掌握固床工趾部的淘刷型態，以控制淘刷坑的發展。

參考文獻

- [1] 水土保持手冊 (2005)，行政院農業委員會水土保持局，工-2-26
- [2] 何國勇 (2007)，「近直線弧型開口式固床工應用於野溪治理之研究」，國立屏東科技大學水土保持學系碩士論文。(He, K.Y. (2007). Mountain stream training using open-slot near-linear arc groundsills. MSc. thesis. National Pingtung University of Science and Technology. (in Chinese))
- [3] 林原巧 (2005)，「開口式固床工應用於野溪整治之研究」，國立屏東科技大學水土保持學系碩士論文。(Lin, Y.C. (2005). Applicability of open-slot groundsills in torrent control. MSc. thesis. National Pingtung University of Science and Technology. (in Chinese))
- [4] Balachandar, R., Kells, J.A., and Thiessen, R.J. (2000). "The effect of tail water depth on the dynamics of local scour." *Can. J. Civil Engng.*,27(1),138–150.
- [5] Breusers, H.N.C. (1966). Conformity and time scale in two-dimensional local scour. *Proc. Symposium on*

model and prototype conformity, 1-8, Hydraulic Research Laboratory, Poona.

- [6] Breusers , H.N.C. (1967). Time scale of two-dimensional local scour. *Proc. 12th IAHR-congress, Fort Collins, Colorado*,275-282.
- [7] Breusers , H.N.C. & Raudkivi, A.J. (1991). *Scouring*. Hydraulic Structures Design Manual 2, International Association for Hydraulic Research, A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- [8] Bunt, C.M., Van Poorten, B.T. and Wong, L.(2001), “Denil fish-way utilization patterns and passage of several warmwater fish species relative to seasonal, thermal, and hydraulic dynamics. “ *Ecology of Freshwater Fish* ,10(4),212-219.
- [9] D’Agostino, V. (1994).” Indagine sullo scavo a valle di opera trasversali mediante modello fisico a fondo mobile.” *Energ. Elettr.* ,71(2), 37-51. (in Italian).
- [10] de Graauw, A.F.F. (1981).” *Scour*.” Report M1001 Delft Hydraulics, Delft. (in Dutch).
- [11] de Graauw, A.F.F. and Pilarczyk, K.W. (1981). “Model-prototype conformity of local scour in non-cohesive sediments beneath overflow dam.”, *19th IAHR-congress, New Delhi*.
- [12] Deshpande, N., Balachandar, R. and Mazurek, K.A. (2007).” Effects of submergence and test startup conditions on local scour by plane. “, *Journal of Hydraulic Research*, 45(3),370-387.
- [13] Dietz, J.W. (1969). *Kolkbildung in feinen oder leichten Sohl-materialien bei strömenem Abfluß*, *Mitteilungen* ,Heft 155, Universität Fridericiana Karlsruhe.
- [14] Food and Fertilizer Technology Center for the Asian and Pacific Region (FFTC) (1995). *Soil Conservation Handbook.* , Taipei: Council of Agriculture, Soil and Water Conservation Bureau and Chinese Soil and Water Conservation Society.
- [15] Hoffmans, G.J.C.M. and Booij, R. (1993). “The influence of up-stream turbulence on local scour hole.” , *Proc. 25th IAHR-congress, Tokyo*.
- [16] Hoffmans, G.J.C.M. and Verheij, H.J. (1997). *Scour Manual.* , Balkema, Rotterdam, the Netherlands.
- [17] Johnston, A.J. (1990). “Scour hole developments in shallow tailwater.” , *Journal of Hydraulic Research*, 28(3), 341–354.
- [18] Kells, J.A., Balachandar, R. and Hagel, K.P. (2001).” Effect of grain size on local channel scour below a sluice gate.”, *Can. J. Civil Engng.* ,28, 440–451.
- [19] Koloseus, H.J. (1984).” Scour due to riprap and improper filters.”, *Journal of Hydraulic Engineering* ,110(10),1315-1324.
- [20] Mohamed, M.S. and McCorquodale, J.A. (1992) “Short-term local scour.”, *Journal of Hydraulic Research* ,30(5), 685–699.
- [21] Pratt, T.C., O’Connor, L.M., Hallett, A.G., McLaughlin, R.L., Katopodis, C., Hayes, D.B. and Bergstedt, R.A. (2009). Balancing aquatic habitat fragmentation and control of invasive species: enhancing selective fish passage at sea lamprey control barriers. , *Transactions of the American Fisheries Society* ,138,652-665.
- [22] Vrijling, J.K. (1990). Probabilistic design of flood defences. , In K.W. Pilarczyk (ed.), *Costal protection, Proc. Short course, Delft: 39-99, Balkema, Rotterdam*.
- [23] Wu, C.C., Lin, J.J., Lin, Y.C. and Yeh, C.M. (2004).The applicability of open-slot groundsills in trained river to encourage the formation of meandering, In Jessica L. D'Ambrosio (ed.), *Self-sustaining solutions for*

streams, watersheds & wetlands, Sept. 1, 2004, St. Paul, Minnesota, USA, 183-190.

- [24] Zanke, U. (1978). Zusammenhänge zwischen Strömung und Sedimenttransport, Teil 1: Berechnung des Sedimenttransportes, -allgemeiner Fall-, Teil 2: Berechnung des Sedimenttransportes hinter befestigten Sohlenstrecken, -Sonderfall zweidimensionaler Kolk-, Mittelingen des Franzius-Instituts der TU Hannover, Heft 47, 48.