

拋石保護對固床工趾部局部淘刷之影響

吳嘉俊^[1*] 黃炳錡^[2] 廖紋琳^[3] 鐘育靖^[3] 許桐生^[3]

摘要 局部淘刷常發生在橫向河工結構物的趾部，因此，選擇合適的保護措施以保護溪床、減少淘刷是有必要的。本研究將一系列 1:50 縮尺之固床工模型，安裝於半循環式渠槽內，以三種流量、四種坡降、三種拋石粒徑及兩種拋石長度進行水工實驗，試驗過程中並量測最大淘刷深度、拋石結束邊緣至最大淘刷深度之水平距離和淘刷坑之總長；之後對試驗參數進行分析，以研究拋石保護段的長度及拋石大小對減輕溪床淘刷的效益。研究結果顯示，於固床工趾部拋石雖然可以減輕趾部淘刷但並不能完全消除投潭水流對溪床的衝擊。本研究亦推導出無因次關係式，可用以估計拋石保護段長度和拋石粒徑的選擇。

關鍵詞：拋石保護、局部淘刷、拋石長度、固床工。

Riprap Protection in Controlling Local Scour at Toe of Groundsill

Chia-Chun Wu^[1*] Ping-Chi Huang^[2] Wen-Ling Liao^[3]
Yu-Ching Chung^[3] Tung-Sheng Hsu^[3]

ABSTRACT Local scour at the toe of groundsill is always inevitable. Therefore, selecting suitable bed protection measures is necessary to protect channel bed from scouring. An array of 1:50 scaled groundsill models was installed in a semi-circulating flume to study the effectiveness of protection lengths and sizes of riprap. Three flow rates, four channel slopes, three riprap sizes, and two protection lengths were studied in the experiments. Results of this study show that riprap at the toe of a groundsill do not completely eliminate the impact force of plunge flow but is capable of reducing the local scour at the toe. A dimensionless relationship was derived from this study to help estimate the geometry of local scour, which in turns helped select the riprap protection lengths and riprap sizes.

Key Words: Riprap protection, local scour, riprap length, groundsills.

[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工學士

BSc., Dept. of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science and Technology, Pingtung 912, Taiwan

一、前言

依據水土保持手冊工程篇，固床工主要之目的在於防止溪流縱向及橫向侵蝕以穩定溪床和調整水流方向（水土保持手冊 2005），然而，淘刷常發生在固床工下游。對此過去曾嘗試以埋設深基礎的方式去承受固床工破壞的風險，既不符合成本效益，也增加溪流中鋼筋混凝土的用量、提高碳足跡（carbon footprint）。從環境生態的角度看，改變固床工設計（Wu et al. 2004, Lin 2005, He 2007）或添加魚道（Bunt et al. 2001, Pratt et al. 2009）亦為選項之一，其目的為儘量不影響水生生態。

拋石(riprap)過去常被用於防止河岸坡腳的水流下切侵蝕，用於保護河岸坡腳所使用的拋石大小已成為設計過程中的一個重要參數。針對山區洪流所編制的拋石尺寸設計公式，其中包括：美國墾務局方程式（Peterka 1958）、Maynord 法（Maynord et al. 1989）、美國地質調查局方程式（West Consultants 1996）、Isbash 方程式（Maynord et al. 1989, West Consultants 1996）、HEC-11 法（West Consultants 1996）和美國陸軍工程兵團法（USACE 1994）等。然而，上述公式並不適用於以投潭水流（plunge flow）佔主導地位之橫向構造物下游的局部淘刷條件。因此，本研究之目的，為透過水工縮尺實驗探討（1）固床工趾部以拋石保護河床對於局部淘刷的影響，及（2）拋石長度和大小對於減緩固床工趾部局部淘刷的的功效。

二、材料與方法

本研究是在國立屏東科技大學陡坡水工實驗室中進行。實驗為室內縮小模型水工試驗，以 1:50 比例尺的固床工模型安裝在半循環式渠槽中。水槽全長 4.0 m，寬 0.91 m，深 0.3 m，最大可調斜率可以達到 11%。護岸間隔 0.3m，護岸邊坡斜率採用 V:H=1:0.3 的梯形斷面。固床工模型以防水膠合板切割而成，其厚度為 15 mm，寬度 0.3 m，高度 0.15 m。固床工面板上鑽設排水孔一排，設置於固床工模型三分之一的高度處，孔口直徑 3.2 mm，以利潛伏流的流動。之後將固床工模型緊密安裝在渠槽中，相鄰兩固床工間距設定為 0.2 m。本研究所使用的試驗參數列如表 1。

1. 河床質及拋石材料

床砂以平均直徑 0.74 mm 之均勻砂作為河床質材料，拋石材料則採用幾何平均粒徑分別為 21.77 mm、16.75 mm 和 10.40 mm 的碎石，於本文中分別以 RC、RM 和 RF 三種代號表示之。

2. 拋石保護長度

實驗拋石保護長度分為兩種，分別為固床工間距之一半（0.1 m）及四分之一（0.05 m），並以 LH 和 LQ 表示。圖 1 為固床工下游設置拋石保護長度為二分之一固床工間距（LH）及粗拋石（RC）的情況。

3. 試驗坡降

試驗坡降分為四種，即 0.030、0.048、0.066 和 0.085。



圖 1 固床工下游設置粗拋石及固床工間距二分之一長度的鋪設情形

Fig. 1 Riprap installation using coarse riprap and half-length of groundsill interval

表 1 渠槽實驗參數總表

Table 1 Parameters selected for the flume experiment.

試驗參數	試驗範圍	現地實物
流量(m ³ /s)	5.8×10^{-4}	10.25
	7.8×10^{-4}	13.79
	9.3×10^{-4}	16.44
坡度(-)	0.03、0.048、0.066、0.085	
拋石粒徑(mm)	10.40	520.0
	16.75	837.5
	21.77	1088.5
拋石長度(m)	0.05	2.5
	0.10	5.0

水深和渠床砂面高程的量測，是當固床工下游局部淘刷和渠床達到穩定狀態後，採沿渠槽中心線進行測量，並重複測量五個固床工間隔，以獲得平均讀數。每個固床工模型間隔內分別量測最大淘刷深度 (y_s)、淘刷坑長度 (λ_s) (如圖 2 所示) 和四個點位的水深。四個點位及量測項目分別為：(1). A 點：位於上游固床工的頂部中央，主要測量水深 (h_A)、(2). E 點：位於拋石保護與床砂交界處，主要測量水深 (h_E)、(3). D 點：位於最大淘刷深度發生的位置，主要測量最大淘刷深度，及(4). F 點：位於淘刷坑結束位置，主要測量水深並同時記錄淘刷坑長度。為表示淘刷坑的幾何特徵，本研究以 y_s 、 λ_m 及 λ_s 三種符號分別表示之；其中，最大淘刷深度 y_s 為原渠床砂面高程至淘刷最深點間之垂直距離、 λ_m 為量測斷面 E 點至淘刷最深 D 點間之水平距離，淘刷坑全長 λ_s 為斷面 E 和 F 之間的距離 (如圖 3 所示)。

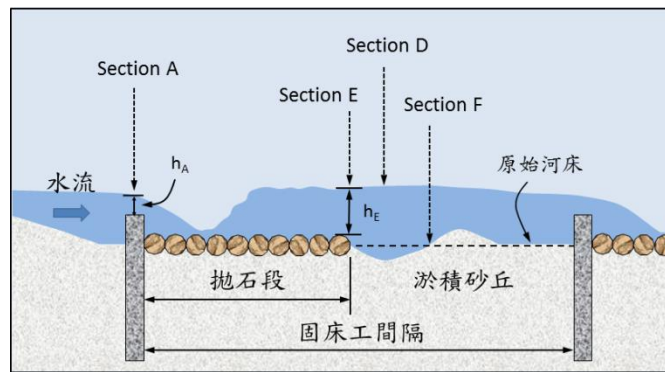


圖 2 水深和高程量測位置

Fig.2 Locations of flow depth and elevation measurement.

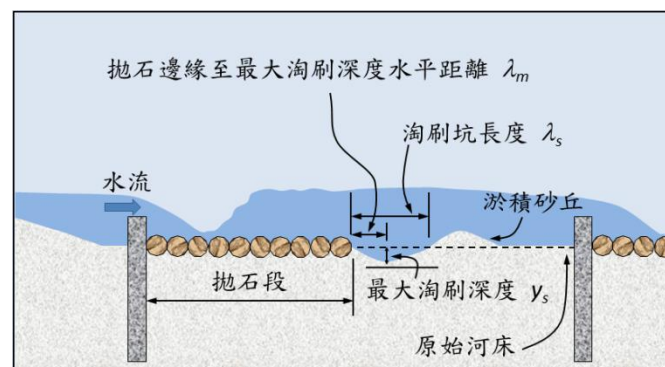


圖 3 量測淘刷的幾何參數

Fig.3 Measured parameters of the scour geometry.

三、結果與討論

本研究水工實驗結果，僅摘錄斷面 A 及 E 之實測水深與計算平均流速，併同最大淘刷深度，淘刷坑中線長度及拋石段終點邊緣至最大淘刷深度之距離，分別列於表 2；而無拋石保護 (S4Q3CON)、部分拋石保護 (S4Q3LQRC、S3Q1LHRM) 的淘刷照片，則摘錄如圖 4。

表 2 渠槽實驗結果摘錄

Table 2 Summary of experiment results.

流量	坡降	拋石粒徑	拋石長度	水深		流速		最大 淘刷深度	淘刷坑 長度	拋石段終點邊緣 至最大淘刷深度 之水平距離
				Sec. A	Sec. E	Sec. A	Sec. E			
Q (cms)	S (-)	D _R (mm)	L _R (mm)	h _A (mm)	h _E (mm)	U _A (m/s)	U _E (m/s)	y _s (mm)	λ _s (mm)	λ _m (mm)
0.00058	0.030	21.77	93	9.1	7.7	0.315	0.373	8.3	25.8	3.6
0.00058	0.030	10.40	93	8.8	8.4	0.323	0.339	7.7	48.0	1.0
0.00058	0.030	16.75	93	8.8	6.6	0.326	0.435	1.9	23.8	0.8
0.00059	0.030	21.77	45	9.0	4.7	0.324	0.623	10.9	47.0	0.2
0.00056	0.030	10.40	45	8.8	5.9	0.312	0.472	9.9	39.0	2.0
0.00058	0.030	16.75	45	8.3	6.5	0.344	0.441	10.6	42.8	3.0
0.00077	0.030	21.77	93	10.0	20.1	0.381	0.187	5.1	56.0	0.8
0.00077	0.030	10.40	93	9.8	23.4	0.384	0.158	5.9	51.2	1.2
0.00079	0.030	16.75	93	10.0	20.7	0.386	0.184	6.4	52.8	4.7
0.00080	0.030	21.77	45	10.0	22.3	0.394	0.173	13.6	58.6	16.0
0.00081	0.030	10.40	45	9.5	18.1	0.420	0.218	9.5	52.4	17.8
0.00078	0.030	16.75	45	9.4	19.0	0.411	0.201	7.0	74.6	25.6
0.00088	0.030	21.77	93	11.3	10.5	0.384	0.413	7.5	39.4	3.4
0.00089	0.030	10.40	93	10.8	23.2	0.406	0.186	8.2	57.8	5.2
0.00092	0.030	16.75	93	11.1	28.4	0.406	0.155	7.0	48.8	3.6
0.00091	0.030	21.77	45	10.4	24.1	0.430	0.182	14.6	80.2	23.2
0.00089	0.030	10.40	45	10.9	24.9	0.403	0.173	12.1	65.2	22.2
0.00090	0.030	16.75	45	10.6	20.8	0.415	0.208	15.5	74.2	24.2
0.00067	0.048	21.77	93	8.3	19.5	0.399	0.167	8.5	26.2	0.6
0.00067	0.048	10.40	93	7.7	18.0	0.428	0.180	6.6	14.8	0.4
0.00066	0.048	16.75	93	8.0	19.8	0.409	0.163	9.5	8.6	16.6
0.00067	0.048	21.77	45	7.8	20.5	0.423	0.158	10.6	41.2	3.6
0.00065	0.048	10.40	45	8.1	13.2	0.392	0.239	3.2	28.8	4.2
0.00063	0.048	16.75	45	7.8	13.8	0.398	0.223	5.2	24.6	6.8
0.00082	0.048	21.77	93	9.9	15.2	0.410	0.265	3.5	20.2	1.0
0.00082	0.048	10.40	93	9.1	17.1	0.443	0.233	7.9	19.0	0.4
0.00081	0.048	16.75	93	9.4	14.3	0.427	0.279	3.9	14.0	1.4
0.00082	0.048	21.77	45	9.6	15.1	0.421	0.266	8.3	52.6	18.8
0.00083	0.048	10.40	45	9.2	14.6	0.445	0.278	4.9	43.6	13.6
0.00083	0.048	16.75	45	9.4	15.5	0.435	0.262	4.3	46.6	14.8
0.00095	0.048	21.77	93	10.1	14.0	0.465	0.333	4.3	24.6	10.0
0.00096	0.048	10.40	93	9.8	15.8	0.481	0.296	1.9	23.2	3.6
0.00096	0.048	16.75	93	10.3	19.3	0.457	0.241	3.9	22.4	7.4
0.00095	0.048	21.77	45	10.1	20.8	0.463	0.221	17.6	74.4	29.2
0.00096	0.048	10.40	45	9.9	20.3	0.478	0.230	6.5	85.4	48.0
0.00097	0.048	16.75	45	10.3	19.1	0.462	0.246	9.3	81.8	15.4
0.00066	0.066	21.77	93	7.5	14.2	0.433	0.226	20.6	36.0	8.4
0.00066	0.066	10.40	93	7.8	11.1	0.417	0.291	6.6	56.2	3.6
0.00066	0.066	16.75	93	7.7	12.5	0.424	0.259	3.3	37.2	4.0
0.00066	0.066	21.77	45	7.9	14.6	0.412	0.221	7.0	57.6	9.8
0.00065	0.066	10.40	45	7.4	14.6	0.435	0.218	4.1	53.0	6.4
0.00066	0.066	16.75	45	7.9	11.7	0.411	0.276	6.7	71.2	21.8
0.00085	0.066	21.77	93	9.4	16.2	0.443	0.254	8.1	46.6	4.2
0.00084	0.066	10.40	93	8.8	13.0	0.472	0.318	3.1	39.4	1.4
0.00085	0.066	16.75	93	9.4	11.9	0.443	0.349	1.7	37.4	2.6
0.00084	0.066	21.77	45	9.5	15.5	0.439	0.267	4.9	69.4	33.6
0.00084	0.066	10.40	45	9.3	12.2	0.446	0.339	5.6	103.8	18.6
0.00084	0.066	16.75	45	9.2	13.9	0.452	0.297	6.1	102.2	24.6
0.00097	0.066	21.77	93	10.2	20.4	0.466	0.230	8.4	67.2	7.8
0.00097	0.066	10.40	93	9.7	12.8	0.492	0.371	2.7	66.6	18.2
0.00097	0.066	16.75	93	9.8	13.6	0.488	0.350	5.5	54.6	19.4
0.00097	0.066	21.77	45	10.2	16.5	0.470	0.288	6.1	91.6	21.2
0.00097	0.066	10.40	45	9.4	15.7	0.506	0.300	8.6	90.0	27.2
0.00097	0.066	16.75	45	10.1	15.6	0.473	0.304	5.4	113.0	19.4

表 2 渠槽實驗結果摘錄(續)

Table 2 Summary of experiment results(continue).

流量	坡降	拋石粒徑	拋石長度	水深		流速		最大 淘刷深度	淘刷坑 長度	拋石段終點邊緣 至最大淘刷深度 之水平距離
				Sec. A	Sec. E	Sec. A	Sec. E			
Q (cms)	S (-)	D _R (mm)	L _R (mm)	h _A (mm)	h _E (mm)	U _A (m/s)	U _E (m/s)	y _s (mm)	λ _s (mm)	λ _m (mm)
0.00057	0.085	21.77	93	7.6	13.2	0.371	0.212	7.1	43.6	21.0
0.00057	0.085	10.40	93	7.6	10.9	0.373	0.259	4.9	48.2	30.4
0.00058	0.085	16.75	93	7.6	12.8	0.379	0.223	6.3	56.0	0.4
0.00058	0.085	21.77	45	7.8	21.5	0.370	0.131	11.9	63.4	11.8
0.00058	0.085	10.40	45	7.5	15.6	0.386	0.183	8.6	159.4	10.4
0.00058	0.085	16.75	45	7.2	13.5	0.399	0.211	8.8	87.6	21.2
0.00076	0.085	21.77	93	9.3	15.0	0.403	0.248	8.8	63.4	18.2
0.00079	0.085	10.40	93	8.8	14.8	0.441	0.260	7.0	52.2	5.6
0.00077	0.085	16.75	93	8.6	11.5	0.440	0.328	6.6	42.6	1.4
0.00078	0.085	21.77	45	8.4	19.8	0.458	0.191	11.2	95.8	34.0
0.00079	0.085	10.40	45	8.9	14.7	0.514	0.309	6.8	101.8	35.4
0.00079	0.085	16.75	45	8.9	13.4	0.436	0.288	8.7	85.6	22.4
0.00093	0.085	21.77	93	9.8	17.2	0.468	0.264	7.2	55.6	5.6
0.00093	0.085	10.40	93	10.3	15.9	0.443	0.285	7.5	70.6	23.8
0.00094	0.085	16.75	93	10.4	12.2	0.446	0.379	10.2	72.0	17.2
0.00093	0.085	21.77	45	8.8	27.3	0.524	0.164	12.7	122.2	29.0
0.00093	0.085	10.40	45	9.5	15.9	0.481	0.284	7.9	102.6	27.8
0.00094	0.085	16.75	45	9.6	17.2	0.482	0.266	9.5	109.4	32.2



圖 4 固床工下游之局部冲刷 (S3 : 坡降=0.066; S4 : 坡降=0.085; Q1 : 流量=0.00058 cms; Q3 : 流量=0.00093 cms; LQ : 拋石長度=0.05 m; LH : 拋石長度= 0.1 m; RM : 拋石粒徑=16.75 mm; RC : 拋石粒徑=21.77 mm;和 CON: 對照組)。

Fig.4 Local scour at the downstream of ground sill (Symbols: S3: channel gradient = 0.066; S4: channel gradient = 0.085; Q1: flow rate = 0.00058 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; and CON: control).

當固床工下游無拋石保護時,投潭水流之能量大部分用於淘刷渠床,使得渠床發生較嚴重的局部淘刷(如圖 4 中的 S4Q3CON 所示)。根據本研究的水工試驗量測發現,局部淘刷的規模和最大淘刷深度與流量和坡度成正比。當水流通過固床工時,水流於投潭過程中會形成兩股方向相反的循環渦流;其中一股渦流朝下游方向觸及渠床,而另一股渦流朝上游方向溢流而出(Bennett et al 2000)。朝向上游方向的渦流,其主要的的作用在於侵蝕渠床床砂及抵抗投潭水流,使淘刷坑上游滑動面維持動態平衡(dynamic equilibrium)。另一方面,朝下游方向的渦流,其大部分能量消耗於淘刷渠床及攜帶淘刷坑中的泥砂,同時保持淘刷坑下游滑動面的動態平衡。

本研究利用螢光染劑將上述的兩股異向渦流進行可視化(圖 5),藉由螢光染劑顯示出渦流向下游及上游方向循環之流動過程。本研究於試驗觀察中發現,在投潭水流進入淘刷坑的投潭地點附近時,大多數朝向下流旋轉的渦流通常能夠從極為紊亂的淘刷坑中脫逃而出,而成為流動於渠床之表面流的一部分,並攜帶著所淘刷的泥砂向下游流動。

如果淘刷坑中的土砂可以順利逃脫上述渦流的控制,則這些土砂會向下游繼續其運移的旅程。至於是否可以進入下一個固床工,其命運就取決於下游固床工所產生的回水效應(backwater effect)了。下游相鄰固床工所造成的回水,使得水流流速降低,改變了水流的輸砂容量(sediment transport capacity),而靠近淘刷坑的土砂淤積則創造了多樣化的淤積砂丘(deposition dune),如圖 2 所示。

淤積砂丘的長度和高度,取決於淘刷坑的產砂量。D'Agostino(1994)將淤積砂丘分成兩類;即長砂丘和短砂丘。高泥砂產量之淘刷坑往往於其下游發展出長砂丘,由於高泥砂產量,使得長砂丘之長度往往朝下游方向延伸到下一個障礙物;即相鄰的固床工,導致所得到的砂丘外貌往往與固床工頂部齊平。長砂丘之發展,有助於降低回水效應;而另一方面,低泥砂產量的淘刷坑則產出短砂丘,而短

砂丘的形成，可侷限回水效應的傳播。

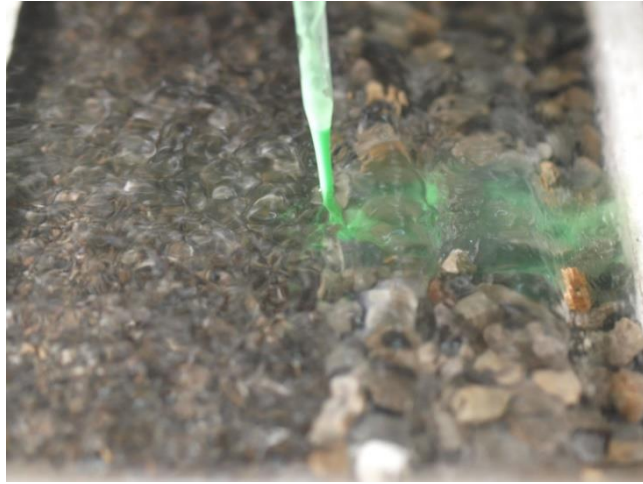


圖 5 流動狀態可視化（水流由右至左）

Fig.5 Flow visualization (Flow is from right to left).

於固床工下游採用拋石，以保護溪床，主要是藉由拋石，以減少投潭水的能量、抑制局部淘刷的發展。然而，應用拋石於固床工趾部並不能完全消除投潭水流之衝擊力，且拋石改變了溢過固床工頂部的水流由投潭水流轉變為潛流水躍（submerged hydraulic jump）的水力境況（hydraulic regime），最後導致渠床局部淘刷在規模及深度上出現明顯減少的結果。選用細拋石作為固床工下游渠床的保護材料時，往往造成較淺的淘刷坑和平緩的滑動坑面；相反的，粗拋石則產生較深的淘刷坑和陡峭的滑動坑面。之所以造成淘刷特性上的差異，除了粗拋石與渠床砂之間具備較大的抗蝕性（erodibility）和運移性（mobility）差異外，粗拋石亦在拋石與渠床交界面間營造出較大的落高，較高的落差促使了潛流投潭流（submerged plunge flow）的形成。潛流投潭流與在淘刷坑下游邊緣的淤積砂丘之間不斷地相互作用著，此種相互作用決定了淤積砂丘的發展，也限制了相鄰固床工下游所引起的回水。倘若回水能夠傳遞到上游潛流投潭流的進入點，其所形成的水力境況將進一步形成消散潛流投潭流衝擊力的水墊效應（cushion effect），但水墊效應會隨著渠床坡度的增加而漸減。

拋石保護的長度不僅直接影響到消能效益，而且也控制了渦流的發展。本研究於實驗中發現，在試驗所設定的參數範圍內，投潭水流對於渠床衝擊點的範圍大多數落在固床工間隔的前 25~35% 位置。因此，短拋石保護長度（記為 L_Q ），不僅提供渠床足夠的保護，也限制了前述朝上游方向發展的渦流的形成，以便朝下游的渦流可以自由發展。然而，當流量增加時，短拋石保護長度並不能防止局部淘刷的發生，主要是由於高流量所產生更長的溢流投潭水軌跡，而投潭水流對於渠床衝擊點的範圍落在短拋石保護段之外所致。

由實驗觀察及量測局部淘刷的結果顯示，最大淘刷深度（ y_s ）和淘刷坑長度（ λ_s ）是受拋石粒徑大小所影響。倘若將坡度保持恆定，試驗結果發現，粗粒徑拋石在長拋石保護的組合下，產生較深的淘刷深度，其次為中粒徑拋石及細粒徑拋石，類似的結果也發生在短拋石保護的條件。

若將拋石保護段終點邊緣（圖 2，Section E）的平均流速（ U_E ）、平均水深（ h_E ）及重力加速度（ g ）選取為重複變數，並透過因次分析（dimensional analysis），其結果可表示為

$$\frac{y_s}{\lambda_m} = \left(Fr, \frac{D_R}{h_E}, \frac{L_R}{h_E}, S \right) \quad (1)$$

其中 (y_s / λ_m) = 最大淘刷深度與拋石段終點邊緣至最大淘刷深度間的水平距離比，亦代表淘刷坑朝上游方向坑面的斜率（圖 3）； Fr = 拋石段終點邊緣之福祿數； D_R = 拋石粒徑； L_R = 拋石保護段長度； h_E = 拋石段終點邊緣之平均水深； S = 水力坡降。

接著將數據中的異常值刪除，再依序進行對數轉換及複迴歸分析，並保留 p -值小於 0.05 的無因次項，得到迴歸變異數分析 (ANOVA)，如表 3 所示。表 3 中所採用的縮寫符號分別代表 (1) df = 自由度，(2) SS = 平方和，(3) MS = 均方，(4) F -stat. = F 統計量，(5) $Sig. F$ = F 顯著性 (6) $Coeff.$ = 係數，(7) $Std. Err$ = 標準誤差，及 (8) t -stat. = t 統計量。

將得到的無因次項和實驗所測量之數據繪製成圖，結果如圖 6 中所示，而迴歸方程式可寫如式 (2)：

$$\frac{y_s}{\lambda_m} = 0.002 \left(\frac{U_E}{\sqrt{gh_E}} \right)^{-1.434} \left(\frac{L_R}{h_E} \right)^{1.814} S^{-1.036} \quad (2)$$

而代表相對糙度的 (D_R/h_E)，因為 p -值大於 0.05，故被剔除。由表 3 之結果顯示，具有非常低 p -值顯著 (即 $p < 0.05$) 的三個無因次變數為福祿數、拋石長度與水深比 (L_R/h_E) 及水力坡降 (S)，而式 (2) 之複迴歸分析結果顯示，淘刷坑朝上游方向坑面的斜率 (y_s/λ_m) 與 (L_R/h_E) 呈正相關，但與福祿數 ($\frac{U}{\sqrt{gL}}$) 及水力坡降 (S) 呈負相關。

參照實驗過程中的觀察及前述的討論，我們認為，拋石粒徑的大小確實影響發生在拋石保護段終點邊緣潛流投潭流的誘發。此外，取 (y_s/λ_m) 為無因次變數來描述局部淘刷坑的幾何形狀；例如淘刷坑朝上游方向坑面的斜率是不太理想的，因為不同的水力境況極有可能產生類似的局部淘刷坑幾何特徵。因此，本研究改選最大淘刷深度與淘刷坑總長度之比值 (y_s/λ_s) 做為無因次變數，並重複相同的分析流程。結果總結於表 4 和圖 7，而複迴歸模型可寫如式 (3)：

表 3 依據拋石段終點邊緣水深 h_E 所做的變異數分析結果

Table 3 Summary of analysis of variance based on flow depth measured at the edge of riprap (h_E).

	df	SS	MS	F-stat.	Sig. F
Regression	3	45.01	15.00	17.10	2.53E-08
Residual	66	57.91	0.88		
Total	69	102.92			
	Coeff.	Std. Err.	t-stat.	p-value	
Intercept	-6.403	1.001	-6.395	1.90E-08	
Froude Number	-1.434	0.364	-3.946	1.96E-04	
L_R/h_E	1.814	0.295	6.1530	5.03E-08	
Channel gradient	-1.036	0.296	-3.506	8.23E-04	

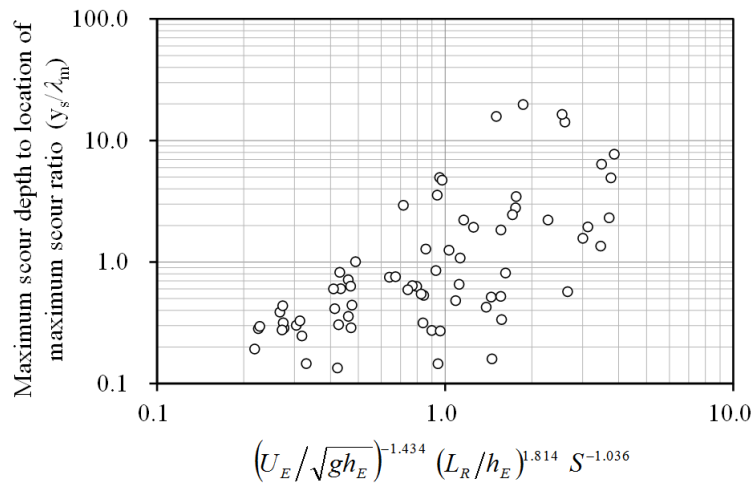


圖 6 最大淘刷深度與拋石段終點邊緣至最大淘刷深度之水平距離比，為福祿數、拋石長度與水深比和水利坡降之函數 (水深取於拋石段終點邊緣)

Fig.6 Maximum scour depth to location of maximum scour ratio as function of Froude Number, riprap length to flow depth ratio, and channel gradient (flow depth taken at the edge of riprap protection).

$$\frac{y_s}{\lambda_s} = 0.009 \left(\frac{U_E}{\sqrt{gh_E}} \right)^{-0.753} \left(\frac{D_R}{h_E} \right)^{0.531} \left(\frac{L_R}{h_E} \right)^{0.404} S^{-0.567} \quad (3)$$

所有無因次獨立變數皆通過變異數分析，其 p -值遠小於 0.05，使得拋石粒徑大小及拋石保護段長度兩者之影響在統計學 95% 信賴區間內皆可以獲得解釋。式 (3) 中的無因次變量 (y_s/λ_s) 除了描述局部淘刷坑在拋石保護下的幾何形狀外，更發現與相對糙度 (D_R/h_E) 及拋石長度與水深比 (L_R/h_E) 呈正相關。

相對糙度 (D_R/h_E) 影響水流的水力條件及前述所討論之拋石和渠床間的有效落高，而拋石保護段長度與水深之比值 (L_R/h_E) 則反

映拋石保護從流動水流中不斷消耗水流能量；亦即，反映拋石保護有效性之程度。從式（3）中亦發現，相對糙度（ D_R/h_E ）較拋石保護長度與水深比值（ L_R/h_E ）具有更高的指數值，表示相對糙度在塑造淘刷坑時比拋石保護長度與水深比發揮更大的作用。

表 4 依據拋石段終點邊緣水深 h_E 所做的變異數分析結果

Table 4 Summary of analysis of variance based on flow depth measured at the edge of riprap (h_E).

	df	SS	MS	F-stat.	Sig. F
Regression	4	7.67	1.92	9.48	4.43E-06
Residual	64	12.95	0.20		
Total	68	20.61			
	Coeff.	Std. Err.	t-stat.	p-value	
Intercept	-4.619	0.485	-9.534	6.69E-14	
Froude Number	-0.753	0.195	-3.861	2.66E-04	
D_R/h_E	0.531	0.168	3.159	2.42E-03	
L_R/h_E	0.404	0.145	2.784	7.04E-03	
Channel gradient	-0.567	0.142	-3.989	1.73E-04	

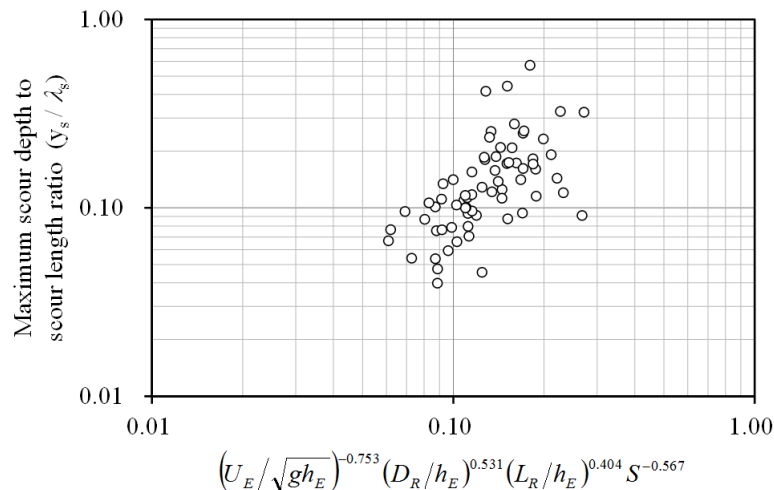


圖 7 最大淘刷深度與淘刷坑長度之比值，為福祿數、相對糙度、拋石長度與水深之比值和水力坡降之函數（水深取於拋石段終點邊緣）

Fig.7 Maximum scour depth to scour length ratio as function of Froude Number, relative roughness, riprap length to flow depth ratio, and channel gradient (flow depth taken at the edge of riprap protection).

從應用的角度來看，式（3）的主要缺點，在於計算以拋石保護段終點邊緣為基準的福祿數及平均水深。因此，我們再次運用相同的分析流程，選用上游固床工頂緣中點水深 h_A （如圖 2 Section A 所示）及以其為基準所計算的福祿數，結果列如表 5 及圖 8。由於福祿數於複迴歸分析中 p-值偏高，因此予以排除，但其他無因次變數之統計顯著均在 95%信賴水準之內。複迴歸模型可以表示如式（4）。

$$\frac{y_s}{\lambda_s} = 0.007 \left(\frac{D_R}{h_A} \right)^{0.583} \left(\frac{L_R}{h_A} \right)^{0.367} S^{-0.654} \quad (4)$$

從式（4）可看出，拋石粒徑與上游固床工頂緣中點水深之比（ D_R/h_A ），在描述淘刷坑之幾何形狀上發揮更佳的作用，但是拋石保護段長度與上游固床工頂緣中點水深之比（ L_R/h_A ）則較差。據此，本研究認為，拋石保護段長度的主要功能在於協助消耗投潭水流之能量，但前提是拋石保護段的長度在不同流量和水力坡降的組合下必須能夠涵蓋投潭水流的衝擊範圍，如果固床工趾部下游有足夠長度的拋石保護，以應付不同流量下投潭水流的下切軌跡，則拋石段長度將有助於營造和維護水流流場，但水流流場特性則主要是由拋石粒徑大小所決定。

在式(4)中，由於水深替換為在上游固床工頂緣中點之水深，因此，無因次項 (D_R/h_A) 不能再以慣用的相對糙度表示其物理意義。但從實務的角度來看，上游固床工頂緣中點之水深可被認定為臨界水深 (critical depth)，且為流量的函數。式(4)中，拋石粒徑項 (D_R) 反映了在摩擦的作用下拋石對水流所做的功，而固床工頂緣之臨界水深則反映了自由溢流水流的下切潛能。

表 5 依據上游固床工頂緣中點水深 h_A 所做的變異數分析結果

Table 5 Summary of analysis of variance based on flow depth measured at the apron of ground sill (h_A).

	df	SS	MS	F-stat.	Sig. F
Regression	3	7.00	2.33	11.03	5.67E-06
Residual	67	14.19	0.21		
Total	70	21.19			
	Coeff.	Std. Err.	t-stat.	p-value	
Intercept	-4.998	0.555	-9.007	3.72E-13	
D_R/h_A	0.583	0.173	3.372	1.24E-03	
L_R/h_A	0.367	0.149	2.467	1.62E-02	
Channel gradient	-0.654	0.142	-4.605	1.90E-05	

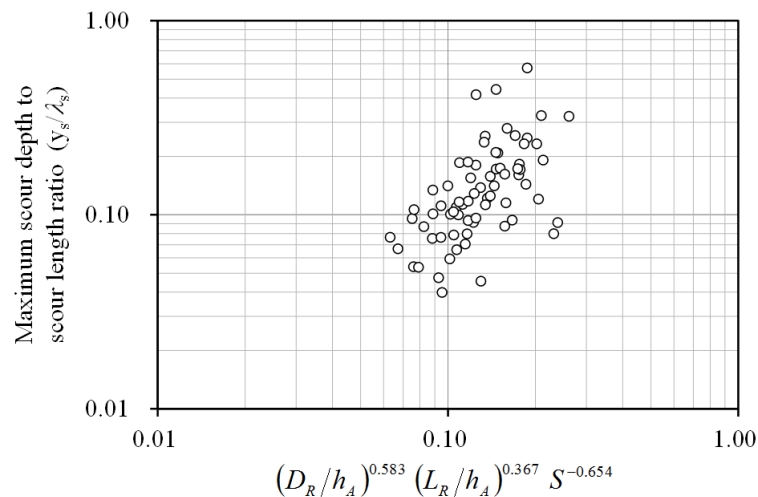


圖 8 最大淘刷深度與淘刷坑長度之比值，為拋石粒徑與水深比、拋石長度與水深比和水力坡降之函數（水深取於上游固床工頂緣中點）

Fig.8 Maximum scour depth to scour length ratio as function of riprap size to flow depth ratio, riprap length to flow depth ratio, and channel gradient (flow depth taken at the apron of upstream ground sill).

四、結 論

本研究經由水工縮尺模型試驗，證實採用拋石做為渠床保護以降低固床工下游局部淘刷的可行性，但是，卻無法完全消除固床工趾部的局部淘刷。本研究之分析結果發現，拋石保護段的長度有助於消耗溢流投潭水之能量及營造和維護渠床的水流流場，但是必須要在有足夠的拋石保護長度，以面對不同流量下投潭水流軌跡的前提下，而水流流場特性則主要是由拋石粒徑大小所決定。否則，無論所採用的拋石粒徑為何，固床工趾部的局部淘刷控制效益將較為有限。

本研究亦推導出無因次關係式，可用以估計固床工下游局部淘刷的幾何形狀，甚至可進一步用於拋石保護段長度和拋石粒徑的選擇，建議未來的研究還需要考慮渠床材料的移動性。

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] Bennett, S.J., Alonso, C.V., Prasad, S.N., and Römken, M.J.M. (2000). Experiments on headcut growth migration in concentrated flows typical of upland areas. *Water Resour. Res.*, 36(7), 1911-1922.
- [5] Bunt, C.M., Van Poorten, B.T., and Wong, L. (2001). Denil fishway utilization patterns and passage of several warmwater fish species relative to seasonal, thermal, and hydraulic dynamics. *Ecology of Freshwater Fish*, 10(4), 212-219.
- [6] D'Agostino, V. (1994). Indagine sullo scavo a valle di opera trasversali mediante modello fisico a fondo mobile. *Energ. Elettr.*, 71(2), 37-51.
- [7] Maynard, S.T., Ruff, J.F., and Abt, S.R. (1989). Riprap design. *J. Hydraul. Eng.*, 115(7), 937-949.
- [8] Peterka, A.J. (1958). Hydraulic design of stilling basins and energy dissipaters. Engineering Monograph No. 25, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colo., 222.
- [9] 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.
- [10] U.S. Army Corps of Engineers (USACE). (1994). Hydraulic design of flood control channels. EM-1110-2-1601, Washington, D.C.
- [11] West Consultants, Inc. (1996). Riprap design system. Carlsbad, Calif., 72.
- [12] 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.