

梢工沉床護坦工於堤防基礎保護之研究

王傳益⁽¹⁾ 吳益裕⁽²⁾ 施漢鵬⁽³⁾ 黃滄隆⁽⁴⁾ 鄭人豪⁽⁵⁾ 陳浩寧⁽⁶⁾

摘要

本研究係於蜿蜒渠道中設置梢工沉床護坦工進行水工試驗，以瞭解護坦工設置前後之河床沖淤變化與機制，並由槽偏量及河道沖淤變化程度等指標判定河岸及河床之穩定性，據以提出兼具安全與生態之護坦配置模式，以供日後相關工程人員設計之參採。

研究結果發現，就河道橫向穩定、最大沖刷深度減緩率及縱向穩定而言，施設護坦工可藉以減緩水流沖刷，保護基礎安全。護坦工內填石粒徑採用較大之粗顆粒，可防止水流攜出，增加糙度而減緩沖刷能量，有助於沖刷深度之減緩，減少基礎淘刷。單護坦工設置高程宜採用與河床面齊平，雙護坦工則以前(上游)高後(下游)低之配置較為理想，主要係因上述配置模式之最大沖刷深度減緩率、槽偏量改善率及縱向相對穩定性較高。因此，梢工沉床護坦工之填石大小、設置高程及設置位置為影響河岸安全及河床穩定之重要參數。

(**關鍵字**：梢工沉床護坦工、槽偏量、最大沖刷深度減緩率)

A Study of Wood-Tip Apron on Embankment Foundation Protection

Chuan-Yi Wang⁽¹⁾, H. N. Chen⁽⁶⁾

Associate Professor⁽¹⁾ and Graduate Student⁽⁶⁾ Department of Water Resources Engineering and Conservation, Feng Chia University, Taichung 407, Taiwan, R.O.C. (Corresponding Author)

Yi-Yu Wu⁽²⁾

Chief, Planning Section, Second River Management office, Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs.

H. P. Shih⁽³⁾, J. H. Cheng⁽⁵⁾

Ph.D. Candidate, Graduate Institute of Civil & Hydraulic Engineering, Feng Chia University

T. L. Huang⁽⁴⁾

Graduate Student⁽⁴⁾ Department of Water Resources Engineering, Feng Chia University

(1) 逢甲大學水利工程與資源保育學系副教授(通訊作者)

(2) 經濟部水利署第二河川局規劃課長

(3) 逢甲大學土木及水利工程研究所博士候選人

(4) 逢甲大學水利工程研究所碩士

(5) 逢甲大學土木及水利工程研究所博士生

(6) 逢甲大學水利工程與資源保育研究所

ABSTRACT

The major objective of this study is to discover the sedimentation variation of riverbed before and after the wood-tip apron is established in meandering channel by hydraulic experiments. The horizontal variation of channel trough-line and the variation of riverbed are used to determine the stability of a river. Accordingly, the arrangement with consideration of structural safety and ecological conditions are recommended. It can be served as a reference of design for relevant engineers in the future.

The results showed that the scour decreased the safety increased of bank foundation by apron. The stuffing stones of wood-tip apron uses big sizes to prevent the stones from being sucked by the flow. Scour energy is retarded because of the increasing roughness. It helped to decrease the scour depth of riverbed and reduce the embankment foundation scour. The elevation of single apron is fit to set up with average elevation of riverbed; dual aprons are fit while the behind apron is set up lower than average elevation of riverbed. The later arrangement offers high value of the retardation rate for maximum scour depth, improves horizontal variation of river trough-line, and gives higher stability of longitudinal variation of riverbed. Therefore, the stuffing stones size and height for wood-tip apron are important parameters for the stability of riverbank and riverbed.

(Keywords : Wood-Tip Apron, The Horizontal Variation of Channel Trough-Line, The Retardation Rate for Maximum Scour Depth)

前言

台灣河川坡陡流急，流況多屬超臨界流，慣性力影響大於重力，於是河川之凹岸容易產生基礎淘空問題，且近年土地超限利用，河川用地被大量開發使用，人與水爭地，造成生態環境莫大衝擊。隨生活品質不斷提升，人們對自然資源保育及生態環境需求日漸重視，因此研發兼具防洪安全與生態需求之工法為當前重要之課題。

本研究則針對堤防基礎保護工—護坦工 (apron) 深入探討，其為縱向結構物，具有束水整流、減少高灘地侵蝕、保護基礎及覆土後可植生美化環境等多項功能。惟以往國內護坦使用目的僅針對洪水災害發生時之搶險或減災防災為前提，並未考慮生態環境之影響，除易造成河床棲地遭受大型機具破壞且容易造成棲地之單調化；因此，為了維持生態環境整體平衡及營造生物棲息地，護坦之設置目的及材料應需加以調整，以達成生態

環境之永續發展。本文欲透過渠槽試驗，清水流流況下探討彎曲河道設置木梢護坦工 (wood-tip apron) 及田字型格框護坦工 (Grid-Shaped apron) 前後之河床沖淤變化與機制，以供日後相關工程人員設計之參採。

研究方法

1. 試驗設備

本試驗係於逢甲大學水工試驗室之傾動式渠槽進行試驗，渠道總長為 430cm、寬 44cm 及高 20cm，鋪砂厚度為 10cm，為減少護甲作用影響，採用均勻粒徑 ($d_m=0.59\text{mm}$)，並採用固定流量 (0.00125cms) 及固定坡度 ($1/100$)，渠槽設備示意圖如圖 1 所示。渠槽內設計 2 處彎曲區，其蜿蜒度恰為 1.5，可視為蜿蜒河道 (Leopold, Wolman and Miller, 1964)，因本試驗水流條件為清水流 ($V/V_c \leq 1$ ，其中 V 為水流流速； V_c 為泥沙起動流速)，在直線渠道中並不會產生一般冲刷

梢工沉床護坦工於堤防基礎保護之研究：王傳益、吳益裕、施漢鵬、黃滄隆、鄭人豪、陳浩寧

(Melville B. W., 1997)，故藉由此設計產生慣性力冲刷，並將試驗結果視為對照組，以進行護坦工設置前後比較之依據。為減少護甲作用所影響冲刷之不準確性，因此渠槽底床中所鋪設之泥砂為均勻泥砂。

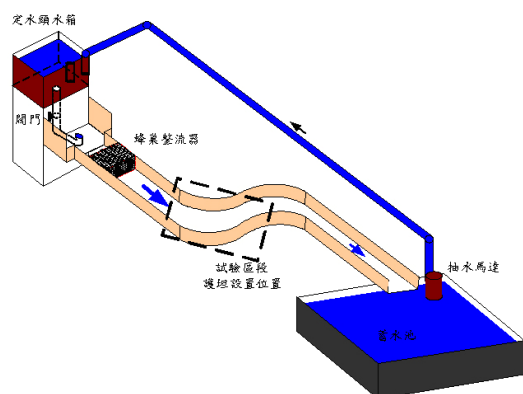


圖 1. 試驗渠道示意圖

Figure 1. Arrangement of flume experiments

本研究採清水流以排除含滓流況之複雜關係，瞭解護坦工周圍泥砂冲刷現象，本研究之水流流速(V)為 0.127m/s ，泥砂起動流速(V_c)為 0.273m/s ，即 $V/V_c = 0.47 < 1$ ，其目的為(1) 簡化流況，使各參數間關係明顯；(2) 可求得最大穩定冲刷深度，供設置依據；(3) 易於試驗，使誤差降低排除一般冲刷。泥砂起動流速可藉由(1)式及(2)式求得(Melville B. W., 1997)：

$$u_{*c} = 0.0115 + 0.0125d_{50}^{1.4} \quad (1)$$

$(0.1\text{mm} < d_{50} < 1\text{mm})$

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

式中 u_{*c} 為臨界剪力速度， y 為水深， d_{50} 為泥沙中值粒徑。

2. 護坦工模型

木梢護坦工模型尺寸乃依據常見之木梢工比例及配合試驗渠槽尺寸決定，長 22cm 、

寬 11cm 、高 3cm ，為求模型外形固定與避免試驗損耗，鋪底之梢龍部分以木板代替，編柵部分則以榕樹氣根代替樹枝，而固定之木樁以鐵釘代替，欄柵編製參照「木梢單床工及柳枝工施工技术教材」(第八河川局，2004)，試驗模型及尺寸如圖 2 所示。

考量提升導流效果及減緩迎水面之冲刷破壞，本研究將原矩形護坦工模型修正為直角梯形(銳角為 45°)，本文稱之變化型木梢單床護坦工，其型式及尺寸如圖 3 所示；亦將台灣常見田字型格框護坦工進行納入試驗比較，其模型及尺寸如圖 4 所示，材質為壓克力製成。

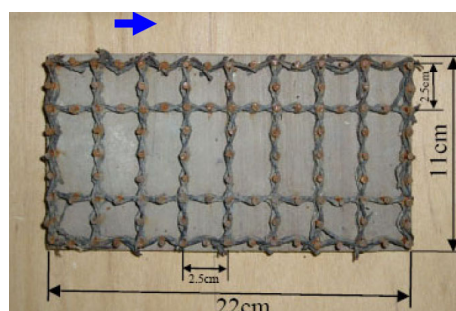


圖 2. 原型梢工沉床護坦工模型

Figure 2. Model of prototype wood-tip apron

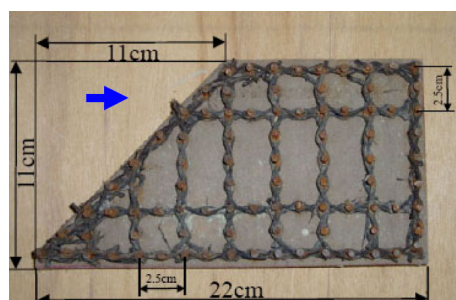


圖 3. 變化型梢工沉床護坦工模型

Figure 3. Model of variation wood-tip apron

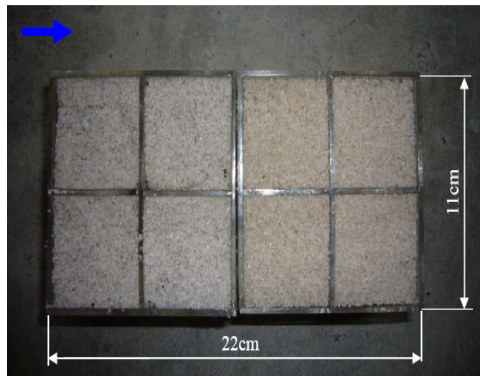


圖 4. 田字型式格框護坦工模型
Figure 4. Model of grid-shaped apron

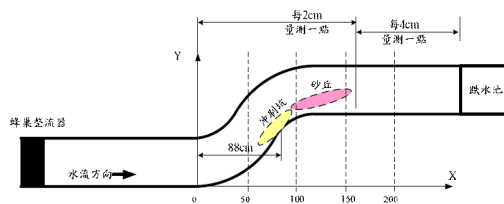


圖 5. 最大冲刷坑位置與量測點位置
示意图(單位：cm)
Figure 5. Locations of maximum scour and
measuring (Unit:cm)

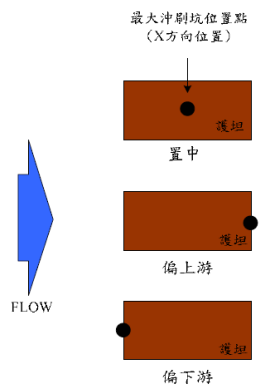


圖 6. 護坦設置位置與最大冲刷坑
位置關係圖
Figure 6. Relationship between apron
location and

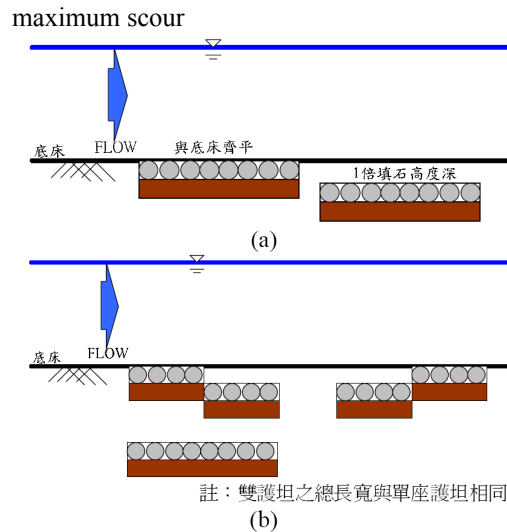


圖 7. 護坦設置高程示意图(a)單護坦
(b)雙護坦
Figure 7 Established elevation of aprons
(a) single apron (b) twin aprons

表 1. 試驗條件

Table 1. Conditions of experiments

試驗類別	控制項目	控制內容
對照組	構造物形式	無構造物
	流量	0.00125cms
試驗組	構造物形式	矩形梢工沉床護坦工 變化型梢工沉床護坦工 田字型式格框護坦工
	流量	0.00125cms
	填石粒徑	0.59mm、2.36mm
	埋設高程	1.與底床齊平 2.底床下 1 倍填石高(15mm) 3.上游與底床齊平，下游在底床下 15mm 4.上游在底床下 15mm，下游與底床齊平
	埋設方式	1.位於最大冲刷坑 2.偏上游 1/2 護坦長度 3.偏下游 1/2 護坦長度

3. 試驗條件與方法

本研究試驗控制條件包括:三種護坦工模型，分別為木梢單床護坦工原型、變化型及

梢工沉床護坦工於堤防基礎保護之研究：王傳益、吳益裕、施漢鵬、黃滄隆、鄭人豪、陳浩寧

田字型格框護坦工；三種設置位置，而設置位置乃依據對照組(未設置結構物)之最大沖刷坑位置決定，本研究對照組最大沖刷深位置位於蜿蜒段起始點下游 88cm 處右岸，如圖 5 所示，三種護坦設置位置分別為：與最大沖刷坑齊平、位於最大沖刷坑上游(護坦工下游面與最大沖刷坑對齊)及位於最大沖刷坑下游(護坦工上游面與最大沖刷坑對齊)，如圖 6 所示。

在設置高程方面有四種，分別為單護坦工試驗組兩種(與底床齊平、位於底床下 1 倍填石高深度)，以及雙護坦試驗組兩種(上游護坦與床面齊平，下游護坦位於底床下 1 倍填石高深度)，如圖 7 所示。本項控制變因主要探討當護坦在淤積情況下，再次遭逢洪水時河床之沖淤變化情形。在護坦填石選擇上，採用兩種粒徑進行試驗，一為原試驗底床粒徑($dm=0.59mm$)，另一約為 4 倍底床粒徑($dm=2.36mm$)。本項控制變因可探討填石大小對河床之沖淤影響，試驗條件整理如表 1 所示。

試驗結果與分析討論

本研究試驗共完成 40 種組合之試驗組，其中原型梢工沉床護坦工及田字型格框護坦工各 15 組；變化型梢工沉床護坦工為 9 組以及對照組 1 組，本章節將針對護坦工設置前後之河床縱橫向穩定及沖淤變化進行比較。

1. 試驗條件與編碼

為方便各試驗組進行比較及表示，本研究表示方式乃依據控制變因進行編碼，試驗採用之參數及代號彙整如表 2 所示。

表 2. 控制變因與代碼
Table 2. Control factors and code

控制項目	代碼	控制內容說明
構造物形式	P	矩形梢工沉床
	V	變化型梢工沉床
	G	田字型護坦工
填石粒徑	S0	原河床粒徑
	S1	4 倍原河床粒徑(2.36mm)
設置高程	Y0	與底床齊平
	Y1	底床下 1 倍填石高(15mm)
	Y01	上游與底床齊平，下游在底床下 15mm
	Y10	上游在底床下 15mm，下游與底床齊平
設置位置	U	偏上游 1/2 護坦長度
	C	位於最大沖刷坑
	D	偏下游 1/2 護坦長度

2. 橫向穩定分析

主槽的擺盪對於河型的調整、河工的設計皆具極大的影響(錢寧, 1987)，因此本研究在橫斷面沖刷改善係利用槽偏量(horizontal variation of river trough-line)來分析護坦工挑流後各斷面變化情況，其中主深槽係指斷面最低點與兩旁較高點所構成的河槽，因此無論是順直、蜿蜒或辮狀河道皆會有主深槽存在(謝鑒衡, 1987；張海燕, 1990)，而槽偏量的計算方式係以實測斷面資料做為衡量標準，取其各斷面寬之中點 A 作為基準點，並假設斷面之最低點為主深槽中點 B，如圖 8 所示。透過試驗前後實測資料，推求出各試驗組之 B 點位置，探求 A 點與 B 點間相對距離與相對方向之變化，即可瞭解主深槽擺盪的情況。

以圖 9 為例，圖中顯示，未設置護坦工時(對照組)，主深槽位置偏向右岸，代表有水流迫近右岸問題，可能會產生右岸沖刷。於斷面 160 處，槽偏量 d 趨近於 0，代表主流(主

深槽)已回歸河槽中軸，研判其因乃由彎曲段河道進入直線段河道，因此雖無護坦工作用，水流主深槽因慣性力作用自然會回歸至河道中心軸。因此利用槽偏量來評估護坦設置前後之主深槽變化，若主深槽偏離堤岸而趨近於河槽中軸，表示護坦工設置得宜，即其對護岸基礎保護效果越佳；反之，若主深槽迫近堤岸，則護坦工設置不佳，堤岸基礎可能有淘刷之虞。

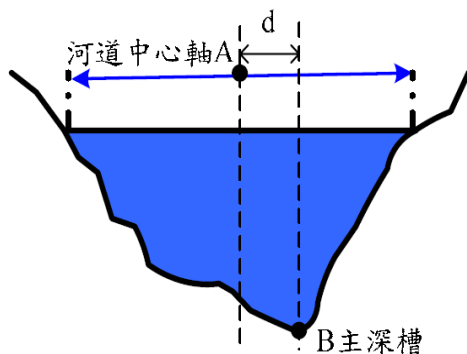


圖 8. 槽偏量推估參數示意圖

Figure 8. Horizontal variation of channel trough-line

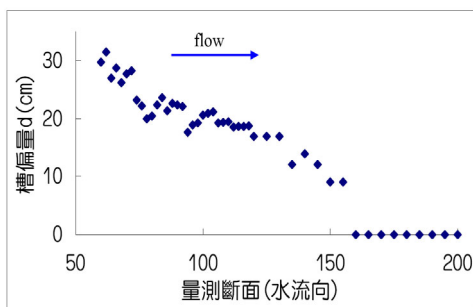


圖 9. 未設置護坦工(對照組)之槽偏量

Figure 9. Horizontal variation of channel trough-line for contrast experiment

因此各組之各斷面平均槽偏量($\bar{d}$)與對照組平均槽偏量($\bar{d}'$)可由式 3 及式 4 表示之，並以槽偏量改善率(dI)做為各試驗組之改

善效果比較依據，如式 5 所示，該值越大表示改善效果越佳，即該型護坦工具有較佳之基礎保護效果。計算各組槽偏量改善率(dI)並整理如表 3 所示。式中 d_N 為斷面 N 之槽偏量， d'_N 為對照組斷面 N 之槽偏量。

$$\bar{d} = \frac{\sum d_N}{N} \quad (3)$$

$$\bar{d}' = \frac{\sum d'_N}{N} \quad (4)$$

$$dI = \frac{\bar{d}' - \bar{d}}{\bar{d}'} \times 100\% \quad (5)$$

由表 3 發現，本研究各試驗組之槽偏量改善率約為 8.4%~29.0%，平均之槽偏量改善率為 13.4%，整體改善效果以護坦工置中時最為理想，其次則為置於上游，而護坦工置於下游處對保護基礎之效果最為不彰。整體而言以護坦工設置於中央(對照組沖刷坑)，即斷面 88 處之槽偏量改善率最佳，而田字型格框護坦工(GS0Y0)試驗組無論設置位置為何，其平均改善效果為各式護坦工中最佳者，且在不同之填石粒徑及設置深度情況下，仍以田字型格框護坦工之槽偏量改善率為最理想，推究其因可能係格框內填礫石之表面平整，水流經該護坦工上方較不易形成亂流，上下層水體動能交換較少，而其不透水特性，造成結構物外緣易於產生向下刷深，因此主深槽偏離堤岸。

而原型及變化型梢工沉床護坦工之槽偏量改善率則約略相當。護坦工內之填石大小對槽偏量之影響不大，而對沖刷坑大小較具影響。且顯示設置各型護坦工較未設置護坦工(對照組)時之槽偏量為小，因此設置護坦工使主深槽遠離堤腳基礎深具效果。又各型護

梢工沉床護坦工於堤防基礎保護之研究：王傳益、吳益裕、施漢鵬、黃滄隆、鄭人豪、陳浩寧

坦工約於斷面 110 至斷面 150 時，其槽偏量 d 值即趨近於 0，而未設護坦工(對照組)則於斷面 160 時 d 值方為 0，此乃表示由於護坦工之設置促使主深槽提早遠離堤腳，發揮保護基礎之效果。

表 3. 各試驗組槽偏量改善率(d_i)
Table 3. Improved horizontal variation rate of channel trough-line

試驗編號	偏上游 U (%)	置中 C (%)	偏下游 D (%)	平均 (%)
PS0Y0	10.2	15.5	11.7	12.5
VS0Y0	13.7	14.7	3.5	10.6
GS0Y0	20.3	29.0	22.8	24.0
PS1Y0	10.3	16.5	8.4	11.7
VS1Y0	10.7	12.2	11.3	11.4
GS1Y0	17.9	18.5	9.3	15.2
PS0Y1	7.6	10.3	6.5	8.1
VS0Y1	8.6	10.7	7.1	8.8
GS0Y1	11.8	17.7	10.1	13.2
PS0Y01	14.3	21.6	12.1	16.0
GS0Y01	12.5	22.2	19.8	18.2
PS0Y10	11.2	10.2	9.1	10.2
GS0Y10	15.9	14.3	13.2	14.5
平均	12.7	16.4	11.1	13.4

無論何型護坦工其設置位置均以斷面 88 處之槽偏量最小，亦即護坦工置中(對照組沖刷坑)對於堤岸基礎最具保護效果。此乃護坦之設置位置對最大沖刷深位置深具影響，若護坦設置偏沖刷坑上游時，沖刷位置會往後平移，進而破壞下游堤腳，而偏下游時，則造成護坦前緣刷深，逕而造成護坦工之捲起破壞。因此，在設置護坦工時，除了考慮沖刷範圍外，對最大沖刷位置應予以加強以減少基礎遭淘刷而破壞之機會。

當護坦工置中且填石粒徑均為河床料時護坦工設置高程與原河床高程齊平時之槽偏量較小，主要係因水流直接沖擊護坦工，由於能量削減無法繼續下刷，故向護坦工旁之河床沖刷，以致其槽偏量較小，促使主流提早偏離右岸，惟其護坦工旁沖刷深度較設置低高程護坦工之情況為大。當護坦工設置高

程較低時，沖刷位置與未設置護坦工時相同，待沖刷至護坦設置高程時，沖刷坑範圍會向四周擴張，其槽偏量改善率雖較低，惟因護坦四周刷深較不明顯，即未產生護坦邊緣刷深破壞。

在雙護坦工試驗方面，以前高後低之配置(前護坦與河床齊平，後護坦埋設於 1 倍填石高度之下)較佳，其中又以田字型格框護坦工較佳；而前低後高(前護坦埋設於 1 倍填石高度之下，後護坦與河床齊平)之配置形式，則因後方(下游)護坦突出迎水面積增大而增加向下射流強度，使其下游基礎遭淘刷裸露進而擴及前方上游護坦基礎造成前後基礎均遭淘刷而可能破壞之狀況。

3. 最大沖刷深度及位置

由沖刷坑的位置及深度，可以瞭解護坦工設置後其可能產生的破壞範圍及主要破壞位置，當沖刷深度大於護坦設置深度且緊臨護坦，可能造成護坦塌陷或捲起破壞；當最大沖刷深度 d_{max} 位置迫近堤防則會產生堤腳基礎沖刷，終致堤防崩落而破壞。由表 4 可知未設置護坦工(對照組)時之平均最大沖刷深度為最大，其次則為田字型格框護坦工(G)，而原型(P)與變化型(V)梢工沉床之單護坦沖刷深度約略相當，為單護坦工中最小者，顯示設置護坦工對於減緩沖刷深度具有功效。而雙護坦則以前高後低之配置時之沖刷深度較小。

本研究依據護坦工設計規範之最小護坦寬度限制，針對護坦工設置所需最小寬度 B 進行檢驗，式中 θ' 可視為泥砂在水中安息角 ϕ ，即 $B \geq d_{max} / \sin \phi$ ，其中 ϕ 採用泥砂在水

中之安息角，如表 4 顯示本研究各型護坦工之寬度均通過檢驗，亦即皆符合最小寬度之需求，因陷落而破壞之可能性極低。

最大冲刷深度之大小及發生位置，對於堤防基礎安全與否極具影響力，因此設置護坦工後之最大冲刷深度較未設置護坦工時為小，則表護坦工已發揮保護基礎效用；反之，則護坦工之設置毫無作用。

表 4. 各試驗組最大冲刷深度($d_{\max}$)與護坦工最小寬度檢驗

Table 4. Maximum scour and the minimum widthcheck of aprons

試驗編號	偏上游 U(mm)	置中 C(mm)	偏下游 D(mm)	平均 (mm)	最小寬 度檢驗
PS0Y0	-39.1	-36.9	-37.8	-37.9	通過
VS0Y0	-40.4	-36.8	-38.3	-38.5	通過
GS0Y0	-45.3	-42.0	-48.2	-45.2	通過
PS1Y0	-25.5	-24.0	-26.3	-25.3	通過
VS1Y0	-26.2	-24.2	-26.9	-25.8	通過
GS1Y0	-39.1	-35.5	-42.7	-39.1	通過
PS0Y1	-32.1	-30.5	-32.5	-31.7	通過
VS0Y1	-32.9	-30.5	-33.2	-32.2	通過
GS0Y1	-41.6	-29.6	-39.7	-37.0	通過
PS0Y1	-41.0	-38.8	-40.1	-40.0	通過
GS0Y01	-36.5	-33.1	-36.5	-35.4	通過
PS0Y10	-41.5	-39.0	-40.4	-40.3	通過
GS0Y10	-42.3	-40.1	-41.5	-41.3	通過
護坦寬度	110mm		對照組	-64mm	—

因此，本研究以最大冲刷深度減緩率(δ)來研判護坦工設置之成效。當對照組(未設置護坦)時，冲刷深度為最大，故以該值為標準，比較各種護坦之冲刷深度減緩率，以判別何種護坦具有較佳之減緩冲刷功效。其中冲刷深度減緩率 δ 定義如下：

$$\delta = \frac{d'_{\max} - d_{\max}}{d'_{\max}} \times 100\% \quad (6)$$

式中 $d'_{\max}$ 為對照組(未設置護坦)時之最大冲刷深度， $d_{\max}$ 為在不同護坦形式、填石大小及設置深度時之最大冲刷深度。當 δ 值

越高時，表示該種型式護坦工對於減緩冲刷深度具有較大之功效；反之，則功效較為不彰。表 5 顯示本研究之最大冲刷深度約為 25%~62%，其中單護坦工以填石材料為粗顆粒(4 倍河床質粒徑)時可消滅較多之冲刷能量，且因粒料顆粒較大較不易被水流攆出，相對較為穩定；型式上，以變化型式(V)與原型(P)較田字型(G)能減緩冲刷深度；在設置位置方面，以護坦工置中有較佳的抗冲刷能力，以上均可由圖 10 獲得印証。圖 11 係雙護坦工最大冲刷深度減緩率比較圖，該圖顯示以田字型格框前高後低配置護坦工之冲刷深度減緩率較佳，其餘型式之減緩率則約略相當。

將最大冲刷深度與護坦高度(30mm)進行比較，其中護坦填石為河床粒徑(0.59mm)之試驗組，最大冲刷深度皆大於護坦高度，如冲刷深位置迫近護坦，恐造成護坦塌陷或基礎淘空，因此將各組之最大冲刷坑位置點繪於平面上進行比較，如圖 12、圖 13 及圖 14 所示。護坦工設置位置方面，可以發現置中(C)比偏上游(U)或偏下游(D)佳，而偏上游及偏下游之護坦工兩者最大冲刷深度減緩率相當；雙護坦試驗方面，則以前高後低稍比前低後高為佳。

由圖 12~圖 14 比較得知，護坦若位於最大冲刷坑下游(D)，則受冲刷坑破壞最為嚴重，除產生護岸基礎冲刷亦產生護坦淘空情形；而護坦位置若偏最大冲刷坑上游(U)，則次之，因冲刷坑臨近護坦，主要產生破壞形態為下游護坦填石崩落冲刷坑與深槽迫近下游堤腳(右岸)。整體而言，以設置於冲刷坑中央(C)，即斷面 88 處，其最大冲刷坑大致產生於下游 1 倍護坦長度外，對於護坦基礎之威

脅相對較低(槽偏量相對較小)，因此為較理想之配置模式。

表 5. 各試驗組最大冲刷深度減緩率(δ)

Table 5. Retardation rate for maximum scour depth (δ)

試驗編號	偏上游 U(%)	置中 C(%)	偏下游 D(%)	平均(%)
PS0Y0	39	42	41	41
VS0Y0	37	42	40	40
GS0Y0	29	34	25	29
PS1Y0	60	62	59	60
VS1Y0	59	62	58	60
GS1Y0	39	45	33	39
PS0Y1	50	52	49	50
VS0Y1	49	52	48	50
GS0Y1	35	54	38	42
PS0Y01	36	39	37	37
GS0Y01	43	48	43	45
PS0Y10	35	39	37	37
GS0Y10	34	37	35	35
平均(%)	42	47	42	43

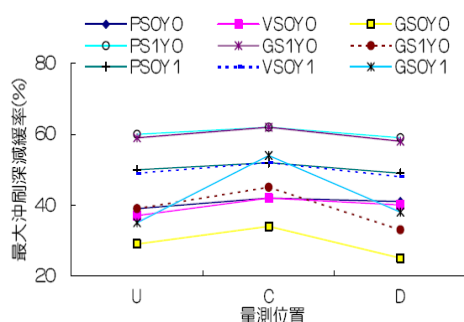


圖 10. 單護坦試驗最大冲刷深度減緩率
Figure 10. Retardation rate for maximum scour depth of single apron

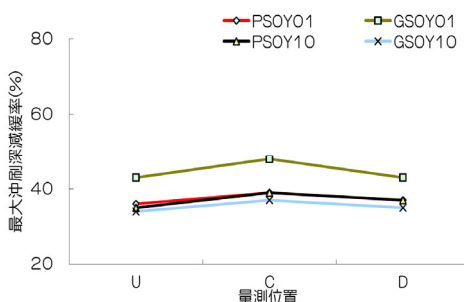


圖 11. 雙護坦試驗最大冲刷深度減緩率
Figure 11. Retardation rate for maximum scour depth of twin aprons

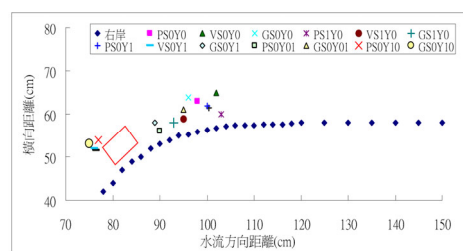


圖 12. 最大冲刷坑位置(設置位置U)
Figure 12. Location of maximum scour (apron set in upstream of maximum scour)

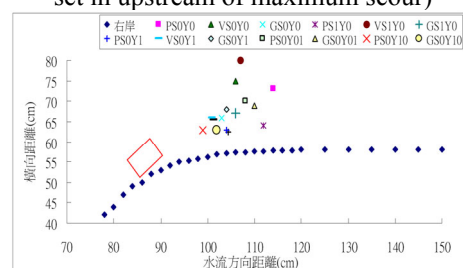


圖 13. 最大冲刷坑位置(設置位置C)
Figure 13. Location of maximum scour (apron correct maximum scour)

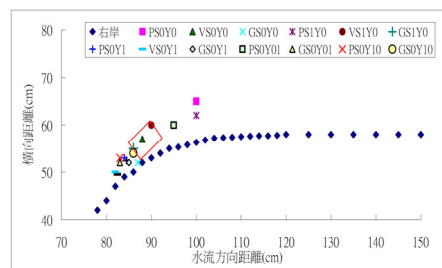


圖 14. 最大冲刷坑位置(設置位置D)
Figure 14. Location of maximum scour (apron set in downstream of maximum scour)

4. 縱向穩定分析

錢寧(1958、1987)認為河床穩定程度取決於水流對河床的作用力與河床泥砂的抵抗力間之對比關係，因此提出河道縱向穩定指標(f_1)，作為分析河床穩定的重要參數，其定義如下：

$$f_l = \frac{d_m}{S} \quad (7)$$

式中， d_m = 泥砂平均粒徑(mm)； S = 河道坡度。一般而言， f_l 愈大表示河床愈穩定。本研究採用單一粒徑，因此縱向穩定指標 f_l 隨坡度 S 變小而變大，將各組試驗之縱向穩定指標 f_l 與對照組進行比較，則可令其比值為相對穩定 K_s 指標，公式如下：

$$K_s = \left(\frac{d_{50}}{S_n} \right) / \left(\frac{d_{50}}{S_x} \right) = \frac{S_x}{S_n} \quad (8)$$

其中： S_n 為某組試驗組之平均河道坡度； S_x 為對照組之平均河道坡度。

各組之相對穩定 K_s 值整理如表 4-6 所示，當 $K_s > 1$ ，即設置護坦之效果較未設置護坦工時之河床縱向穩定性為佳，而 $K_s < 1$ 時，則代表設置護坦工效果不彰。由表 6 得知，護坦工之設置對河床縱向穩定有明顯之改善，各組之 K_s 均大於 1，其中又以填石材料為粗顆粒(S1)時，平均相對穩定 K_s 值為最大，此與其糙度大較能減緩水流冲刷能量有關，因此整體之平均冲刷深較小。在設置位置方面，以置中時相對穩定 K_s 值最大；偏下游(D)次之，偏上游(U)最小。護坦設置高程方面，以設置高程與原河床齊平情況下之 K_s 值略高於埋設於河床下之護坦工之 K_s 。

雙護坦試驗方面，以前高後低比前低後高佳。以其與單護坦比較，則以單護坦較雙護坦為佳，經研判得知，雙護坦之銜接處，容易造成水流混亂，產生冲刷、穴蝕等侵蝕，因此保護基礎效果較單一護坦差。為比較其間之差異，將各試驗之平均冲刷深整理如表 7 所示，表中顯示無論設置何種型式之單護坦工或雙護坦工其平均冲刷深度均低於未設置

護坦工(對照組)之情況。顯見護坦工確有減緩基礎淘刷之功效，其中又以填石粒徑為粗顆粒時效果最為顯著。

表6. 各試驗組之相對穩定 K_s 值Table 6. Relatively stable K_s of all experiments

試驗編號	偏上游 U	置中 C	偏下游 D	平均
PS0Y0	1.34	2.21	1.69	1.75
VS0Y0	1.28	2.09	1.87	1.75
GS0Y0	1.32	2.13	2.01	1.82
PS1Y0	2.21	3.02	2.43	2.55
VS1Y0	2.14	2.99	2.38	2.51
GS1Y0	1.98	2.85	2.15	2.33
PS0Y1	1.19	2.00	1.67	1.62
VS0Y1	1.25	2.01	1.93	1.73
GS0Y1	0.94	2.36	1.61	1.64
PS0Y01	1.26	2.00	1.60	1.62
GS0Y01	1.45	2.28	1.75	1.83
PS0Y10	1.24	1.99	1.58	1.61
GS0Y10	1.21	1.95	1.54	1.57
平均	1.45	2.30	1.86	1.87

表7. 各試驗組之平均冲刷深度

Table 7. Average scour depth of all experiments

試驗編號	偏上游 U (mm)	置中 C (mm)	偏下游 D (mm)	平均 (mm)
PS0Y0	-9.9	-9.2	-8.6	-9.2
VS0Y0	-8.8	-7.9	-7.8	-8.1
GS0Y0	-9.3	-9.3	-8.9	-9.2
PS1Y0	-7.8	-8.3	-8.5	-8.2
VS1Y0	-7.2	-8.4	-7.1	-7.6
GS1Y0	-7.5	-9.0	-8.6	-8.3
PS0Y1	-8.7	-8.3	-8.5	-8.5
VS0Y1	-8.5	-8.8	-8.5	-8.6
GS0Y1	-8.6	-8.5	-8.6	-8.5
PS0Y01	-10.0	-9.5	-9.0	-9.5
GS0Y01	-9.9	-9.1	-9.1	-9.4
PS0Y10	-10.3	-9.8	-9.0	-9.7
GS0Y10	-10.5	-9.2	-9.0	-9.6
平均	-9.0	-8.9	-8.5	-8.8
對照組平均冲刷深度(mm)			-11.8	

所謂局部冲刷坑體積，係指對堤防基礎危害最迫切的範圍內所包含之冲刷坑體積，本研究於不同之護坦形式、填石大小及設置深度下，探討護坦對冲刷坑體積減緩之效用。當對照組(未設置護坦)時，冲刷坑體積為

梢工沉床護坦工於堤防基礎保護之研究：王傳益、吳益裕、施漢鵬、黃滄隆、鄭人豪、陳浩寧

最大，故以該值為標準，比較各種護坦之沖刷坑體積減緩率，以判別何種護坦具有較佳之減緩沖刷功效。其中沖刷坑體積減緩率 λ 定義如下：

$$\lambda = \frac{V - V_f}{V} \times 100\% \quad (9)$$

式中 V 為對照組(未設置護坦)時之沖刷坑體積， V_f 為在不同護坦形式、填石大小及設置深度時之沖刷坑體積。當 λ 值越高時，表示該種型式護坦工對於減緩沖刷範圍避免危及基礎，具有較大之功效；反之，則功效較為不彰。

表 8 顯示由於護坦工之設置，沖刷坑體積減緩效果約為 18%~36%，由表中可以發現，以填石材料為粗顆粒時可減低較多之沖刷能量，此結果與前述分析一致；型式上，以變化型式(V)較原型(P)及田字型(G)更具消減沖刷能量之效果；在設置位置方面，以設置偏下游有較佳消能效果，對於基礎較具保護能力。

表8. 各試驗組之沖刷坑體積減緩率(λ)
Table 8. Retardation rate for scour volume (λ)

試驗編號	偏上游 U(%)	置中 C(%)	偏下游 D(%)	平均
PS0Y0	16	22	27	22
VS0Y0	26	33	34	31
GS0Y0	22	22	24	22
PS1Y0	34	29	28	31
VS1Y0	39	29	40	36
GS1Y0	37	24	28	29
PS0Y1	27	30	28	28
VS0Y1	28	25	28	27
GS0Y1	27	28	27	28
PS0Y01	15	19	24	19
GS0Y01	16	23	23	21
PS0Y10	13	17	24	18
GS0Y10	11	22	24	19
平均	24	25	28	25

依據設置位置分別繪製縱向河床平均高

程變化，如圖 15~圖 17 所示。圖中顯示由於斷面 60 恰處於彎道，因此未設置護坦工時之平均河床高程均為最低，顯示沖刷最為嚴重，對基礎較無保護效果。而其他各型護坦工中以填石粒徑為粗顆粒(S1)者之平均河床高程為最高，顯見護坦工內回填粗顆粒，因其粗糙度增大且因較平整不易挑起亂流，因此沖刷較輕微，對於基礎保護效果為最理想。當水流漸次運行至斷面 140 以後，因河道已逐漸轉型為直線段，因此由慣性力及離心力所形成之二次流(secondary flow)已不復存在，因此平均高程上升且維持一固定範圍，不再向下刷深。

結論與建議

本研究係探討梢工沉床護坦工及田字型格框護坦工於蜿蜒河段設置前後對河床穩定及堤岸基礎安全之影響，在定量流況下，針對不同護坦工種類、設置位置、設置高程及填石大小進行水工試驗，經由研究分析獲致以下之結論，並提出相關建議。

(一) 結論

1.就河道橫向穩定、最大沖刷深度減緩率及縱向穩定而言，無論設置何種護坦工，與未設置護坦工(對照組)相較其對於河床穩定及基礎保護均深具效果，因此施設護坦工可藉以減緩水流沖刷，保護基礎安全。

2.護坦型式方面

由橫向穩定、最大沖刷深度及縱向穩定分析中發現，橫向穩定係透過槽偏量改善率來研判，其中以田字型格框護

坦工之槽偏量改善率最佳，該型護坦工設置後迫使主深槽遠離堤腳基礎最具效果；最大冲刷深度減緩率則以梢工沉床護坦工(含原型及變化型)較佳，對於減緩水流冲刷深度具有較大之功效，因此降低基礎遭刷深而破壞之機會；就縱向穩定而言，三者之相對穩定指標 K_s 值均大於 1，且約略相當，較不易遭捲起破壞或塌陷。

3. 填充材料方面

由橫向穩定分析中可知，填石粒徑大小對槽偏量之影響較小，惟其對於冲刷深度減緩率則深具效果，即填石粒徑較大之粗顆粒(4 倍河床質粒徑)糙度較大可減緩較多之冲刷能量；而於相對穩定指標上，粗顆粒填充護坦工之縱向穩定最佳，且其粒料顆粒較大較不易遭水流攜出，因此平均冲刷深度較小。

4. 設置高程方面

單護坦工設置高程與原河床高程齊平時之槽偏量最小，且其縱向河床穩定性(K_s)相對較高，主要係因水流直接沖擊護坦，由於能量消滅無法繼續下刷而增加其穩定性。而雙護坦工則以前高後低之配置最佳，而前低後高之配置形式，因後方(下游)護坦突出增大了迎水面面積而增加向下射流強度造成前後(上下游)基礎均遭淘刷之情況。

5. 設置位置方面

設置位置對於流向及最大深度發生位置之影響較為明顯，當設置偏於下游，則容易產生護坦工及護岸之基礎局部冲刷，而若偏於上游，則容易造成護

坦下游面填充塊石之崩坍。大體而言，各型護坦工其設置位置均以斷面 88(即對照組之冲刷坑)處，即以設置中較佳，對於堤岸基礎最具保護效果。

6. 在護坦工面積相等情況下，就相對穩定度、最大冲刷深度及冲刷坑體積減緩率而言，單護坦工提供河床、河岸之保護較雙護坦工佳。

(二) 建議

1. 本試驗由於受限於試驗場地，在渠寬與護坦寬之比例設計上及渠道彎曲段設計上未盡理想，未來建議採用較合理之比例進行探討。
2. 爾後進行相關試驗研究，可與其他工法搭配布置，如丁壩、固床工等，期能與天然河川治理工法呼應，以求工法間之相互結合，達到綜合治水之目標。
3. 未來可將水理條件(如變量流)納入控制變因，以探討護坦工之穩定性及其破壞之機制，供相關工程人員設計之參考。

誌謝

感謝行政院國家科學委員會計畫 NSC96-2815-C-035-018-E 經費補助，使本研究得以完成，特此致謝。

參考文獻

1. 張海燕(1990) 「河流演變工程學」，科學出版社。
2. 第八河川局(2004) 「木梢單床工及柳枝工施工技術教材」，經濟部水利署。

梢工沉床護坦工於堤防基礎保護之研究：王傳益、吳益裕、施漢鵬、黃滄隆、鄭人豪、陳浩寧

3. 錢寧(1958) 「沖積河流穩定性指標的商榷」,地理學報,第24卷,第2期,128-144。
4. 錢寧、張仁、周志德(1987) 「河床演變學」,科學出版社。
5. 謝鑒衡、丁君松、王運輝(1987) 「河床演變與整治」,水利電力出版社。
6. Leopold, Luna B., Wolman, M.G, and Miller, J.P., (1964) Fluvial Processes in Geomorphology, San Francisco, W.H. Freeman and Co..
7. Melville B. W., (1997) “Pier and Abutment Scour: Intergrated Approach,” Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.123, No.2, pp.125-136.

96 年 11 月 10 日 收稿

96 年 12 月 12 日 修改

96 年 12 月 20 日 接受

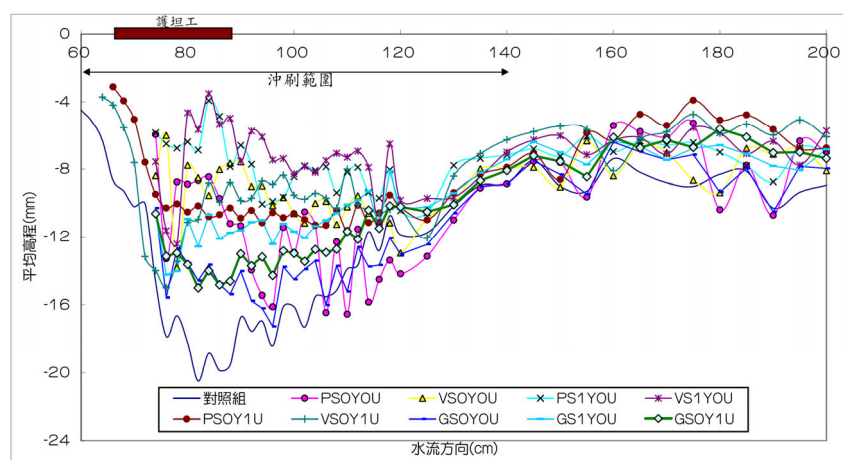


圖15. 平均底床高程比較(設置位置U)

Figure 15. Comparison of average elevation (upstream of maximum scour)

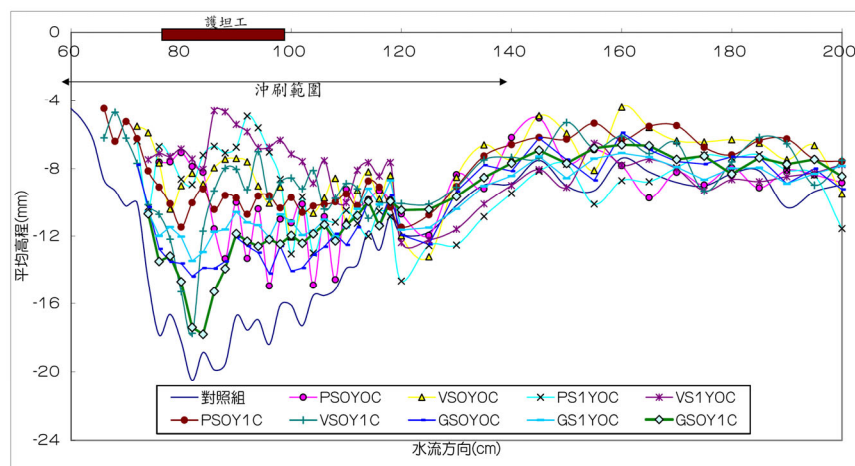


圖16. 平均底床高程比較(設置位置C)

Figure 16. Comparison of average elevation (correct maximum scour)

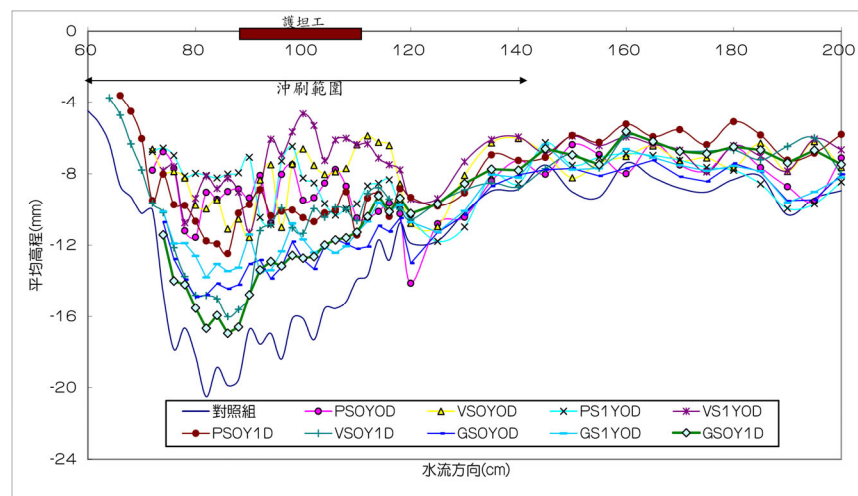


圖17. 平均底床高程比較(設置位置D)

Figure 17. Comparison of average elevation (downstream of maximum scour)