

間歇性河道斜向流之堤防基腳保護水槽試驗

FLUME EXPERIMENTS ON OBLIQUE FLOW-INDUCED TOE PROTECTION FOR THE EMBANKMENT IN
INTERMITTENT RIVERS

經濟部水利署水利規劃試驗所
正工程司、水利技師、工學博士

郭耀麒*
Yao-Chi Kuo

摘 要

臺灣河川流量之間歇性明顯，颱洪引起的斜向流衝擊，經常造成堤防基腳傾倒，甚而破堤致災。為了降低這樣的衝擊損害，對於由河道斜向流引起的堤防基腳保護，在工程設計安全上，為亟需瞭解的課題。本研究於實驗室內，分別建置三個代表性擬似斜向流 30 度、60 度及 75 度水流攻角之動床彎道流試驗渠槽，經由一系列基本試驗組合，包括動床試驗與保護試驗，檢定驗證迴歸得到一通用斜向流攻角之無因次基腳保護布置橫斷面積經驗式，可據以提供現場相關工程規劃、設計之實務應用。

關鍵詞：斜向流、堤防、基腳保護、動床、試驗渠槽。

* 通訊作者，經濟部水利署水利規劃試驗所正工程司、水利技師、工學博士
臺中市霧峰區舊正里北岸路 46-1 號，kuo@wrap.gov.tw

FLUME EXPERIMENTS ON OBLIQUE FLOW-INDUCED TOE PROTECTION FOR THE EMBANKMENT IN INTERMITTENT RIVERS

Yao-Chi Kuo*

Water Resources Planning Institute, Water Resources Agency, Ministry of Economic Affairs

ABSTRACT

The intermittent river-flows in Taiwan are obvious. The oblique flow impact induced by the typhoon floods often causes the toe of the embankment to fall down, and even causing disasters. In order to reduce such impact damage, it is an important issue to understand the oblique flow-induced toe-protection for the river flood-prevention and arrangement. In this study, three representative quasi oblique flows with 30-degree, 60-degree and 75-degree angles of attack, movable-bed experiment flumes were constructed in the laboratory. Through a series of basic experiments (movable-bed test and protection test), a dimensionless cross-sectional area for toe-protection empirical formula with universal oblique flow angle of attack was obtained by verification, which can provide for the practical application of on-site related engineering planning and design.

Keywords: Oblique flow, Embankment, Toe-protection, Movable-bed, Experiment flumes.

一、前言

臺灣間歇性河川流量明顯，颱風豪雨期間所帶來的洪水，每使河道流量遽升且流速湍急，造成嚴重的堤防基腳沖刷、傾倒、甚而破堤致災。經濟部水利署水利規劃試驗所(2016~2017)整理 1963~2013 年中央管河川堤防與護岸歷年破損紀錄發現，蘭陽溪、大安溪、大甲溪、烏溪、濁水溪、以及朴子溪，具有較多的破壞紀錄，其中，又以蘭陽溪員山堤防、紅柴林堤防、以及濁水溪濁水堤防等堤段的致災次數為最多，經統計這些災害發生的原因，係以堤防基礎淘刷所衍生的基腳傾倒破壞為主。綜觀現場堤防基腳傾倒破壞的時機，多發生在河川 2 年至 20 年重現期距洪水流量時，所造成的斜向流衝擊為最明顯(經濟部水利署第三河川局，2005)。水利主管單位於洪氾期間，雖然能夠適時地進行堤防緊急搶險與災後復建工程，但因為缺乏現場洪水時的基腳沖刷調查做為設計時之驗證參考，對於新建與復建完成後的堤防抗洪成效，仍然難以掌握，以至於部分堤段常有重複致災的情況發生。

關於彎道河段的堤防基腳設計，一般多參採國外關於彎道流研究的基腳沖刷深度，如 Chatley (1931)、Blench (1969)、Galay *et al.* (1987)、Thorne (1993)、U.S. Army Corps of Engineers (1994)、Maynard (1996)等。Chang (1992)曾以數值模擬結果，針對彎道凹岸處，提出一個加深基腳深度及過彎後漸變銜接至直線段的基腳深度設計案例。Chang (1992)與 Garcia (2008)，亦均列出大陸型國家河道，多採用拋石工法的堤防邊坡設計方式。然而，臺灣河道的堤防基腳與基腳保護工設計，與大陸型國家不同，為因應短期高流速及多砂與礫石的水流衝擊挑戰，多採用重力式混凝土基腳搭配異型塊或格框塊來施做其基腳保護工。另一方面，比較河道斜向流與彎道流對堤防基腳的沖刷特性，在水理上，相近似而略有不同，郭與謝(2018)認為，近似處為兩者皆會漸次地以曲率方式來改變水流方向，不同處是彎道流的堤防大多為緩變化的平面曲率布置，而斜向流則多發生在近順直堤段，水流係以斜向角度及較為急彎曲率的方式來直接衝擊堤防，相較於彎道流，似具有較為局部集中水流的基腳沖刷潛勢。因此，對於具有這樣複雜流況的斜向流基腳沖刷，亟需建立更為可靠的堤防基腳保護布置方式。

對於斜向流衝擊堤防時，水流之攻角與衝擊轉彎過程所形成水流曲率之關係，仍待進一步探討。經濟部水利署水利規劃試驗所(2016；2019)嘗試以中港溪崁頂寮堤段之斜向流衝擊破堤為例，以 CCHE2D 二維

定床數值模擬結果，劃算出該堤段之斜向流攻角(A_i ：度)與河道曲率(B/R_r ， B ：來流河寬， R_r ：河道曲率半徑)分別為 31.6 度及 0.69，並同樣蒐集大甲溪石岡壩下游河段所得之 8 組模擬結果，得到一迴歸關係式為

$$B/R_r = 0.0058 \times A_i^{1.376} \dots\dots\dots(1)$$

在考慮到現場較常發生破堤之斜向流攻角(約 30 度~60 度)、基腳沖刷與不同斜向流攻角間應具有曲率變化特性及為了擴充斜向流攻角之應用範圍等項需求下，本研究乃依據(1)式，於實驗室內建置三個代表性擬似斜向流攻角(30 度、60 度、75 度)之彎道流試驗矩形渠槽，分別採用不同的試驗流量、均勻底床砂粒徑及底床坡度，進行一系列定量流清水動床與基腳保護等基本試驗組合。其中，(1)式與動床試驗結果，可做為推估斜向流攻角係數(k_i)迴歸經驗式與半經驗式的參考依據，而保護試驗結果搭配斜向流攻角係數(k_i)後，則可做為通用斜向流攻角無因次基腳保護布置橫斷面積經驗式之檢定與驗證。最後，再將水槽試驗用砂及相關水理特性，參考經濟部水利署水利規劃試驗所(2016；2019)之做法，依模型相似理論進行現場原體轉換，並搭配基腳保護布置橫斷面積經驗式，可據以提供現場規劃、設計之實務應用。

二、基本式建立

本研究建立之基本式有三：二組斜向流攻角係數(k_i)基本式及一組基腳保護布置橫斷面積(A_s)基本式，均為因應不同斜向流攻角而設。前二組基本式必須經由三種斜向流攻角動床試驗結果來取得迴歸經驗式或半經驗式，後一組基本式則必須經由三種斜向流攻角保護試驗結果來進行其參數之檢定與驗證。

2.1 斜向流攻角係數

首先定義斜向流攻角係數(k_i)為：以 60 度斜向流攻角(A_{60} ，即 $A_i=60$ ，以下類推)為基準($k_i=1.00$)，在相同的試驗流量、底床砂粒徑及底床坡度下，不同斜向流攻角(A_i)所造成的基腳最大沖刷深度(d_{bs,A_i})與 A_{60} 者($d_{bs,A_{60}}$)之對應組觀測比值之平均。第一組迴歸經驗式之基本式為

$$k_i = \sum \left(\frac{d_{bs,A_i}}{d_{bs,A_{60}}} \right) / N = a_1 \times (A_i + b_1)^{c_1} \dots\dots\dots(2)$$

上式中， N 為 A_i 與 A_{60} 之對應觀測組數， a_1 、 b_1 及 c_1

均為常數，可由本研究之動床試驗觀測值迴歸求得，本式適用於不同斜向流攻角(Ai)之基腳最大沖刷深度保護範圍及斜向流過彎後，基腳保護塊基礎漸變至近順直段尾檻處(A0)之設計參數迴歸估算。其中，針對近順直段或斜向流過彎後尾檻處之斜向流攻角係數(ki,A0)估算，可取為

$$ki_{A0} = \sum \left(\frac{d_{gs,A0}}{d_{bs,A60}} \right) / N \cong \sum \left(\frac{d_{gs,A30}}{d_{bs,A60}} \right) / N \dots\dots\dots (3)$$

(3)式中， $d_{gs,A0}$ 為近順直段之一般沖刷深度，參考郭與謝(2018)關於河道一般沖刷深度之物模動床試驗與現場案例檢驗證結果， $d_{gs,A0}$ 可由本研究 A30 動床試驗來流一般沖刷深度($d_{gs,A30}$)之觀測值近似取代，並與 A60 動床試驗之基腳最大沖刷深度($d_{bs,A60}$)來進行對應組觀測比值之平均以求得 ki_{A0} 值。

第二組基本式係以半經驗的方式來推導，適用於基腳最大沖刷深度之保護範圍。本基本式並未考慮上述斜向流過彎後，近順直段尾檻處之設計，而係以彎道二次流強度參數($SI = q / (U_* R_r)$)， q ：來流單位寬度流量， U_* ：來流剪力速度為依據，假設在相同的來流水理情況下，斜向流攻角係數(ki)與二次流強度參數(SI)(或 R_r 的倒數)之比值具有指數關係，再將(1)式代入，即可推導得到下式

$$ki = \sum \left(\frac{d_{bs,Ai}}{d_{bs,A60}} \right) / N$$

$$= \left(\frac{SI_{Ai}}{SI_{A60}} \right)^{c_2} = \left(\frac{R_{r,A60}}{R_{r,Ai}} \right)^{c_2} = \left(\frac{Ai}{60} \right)^{1.376c_2} \dots\dots\dots (4)$$

上式中， c_2 為常數，可由不同斜向流攻角(Ai)與 A60 各對應組動床試驗基腳最大沖刷深度比值之平均

反推求得。

2.2 基腳保護布置橫斷面積

依經濟部水利署水利規劃試驗所(2019)的研究，對於 60 度斜向流攻角水槽動床試驗結果得知，其基腳最大沖刷深度迴歸經驗式中，主控參數為試驗的單位寬度流量與試驗時間的乘積，其次依序為試驗底床砂之中值粒徑與底床坡度。經考慮現場之河道河床質粒徑與河道底床坡度，依河制理論，具有明顯的相關性。對此，認為河道底床坡度之效應，可予合併，不列為參數。又檢視本研究基腳保護布置方式，與斜向流動床試驗所造成之基腳最大沖刷深度範圍明顯相關。因此，本研究採用基腳保護橫向布置方式的主控影響因素為：來流之洪峰單位寬度流量或試驗之單位寬度流量(q_p)、洪峰之有效稽延時間或保護試驗水流沖刷至前緣保護塊基礎時之時間(t_p)、河床質或試驗底床砂之中值粒徑(d_{50})。又本研究採用的基腳保護工有異型塊及混凝土塊(包括紅色塊與白色塊)，其保護布置方式為保護塊體的橫向排列長度、橫向排放坡度及埋設深度等參數，意即，可視為保護塊體與平均深槽高程間所涵蓋的橫斷面積(A_s)。因此，本研究基腳保護布置橫斷面積之基本式，在經由主控影響因素(q_p 、 t_p 、 d_{50})之因次分析並搭配斜向流攻角係數(ki)後，可以無因次通式表示為

$$\frac{A_s}{d_{50}^2} = ki \times k \left(\frac{q_p t_p}{d_{50}^2} \right)^c \dots\dots\dots (5)$$

上式中， k 、 c 均為常數，可由 60 度斜向流攻角保護試驗觀測值迴歸檢定求得。 A_s 為基腳保護布置橫斷面積(m^2)，參見圖 1 之虛線面積= $1/2 \times (dL_1 + dL_2) \times L_1$ 。

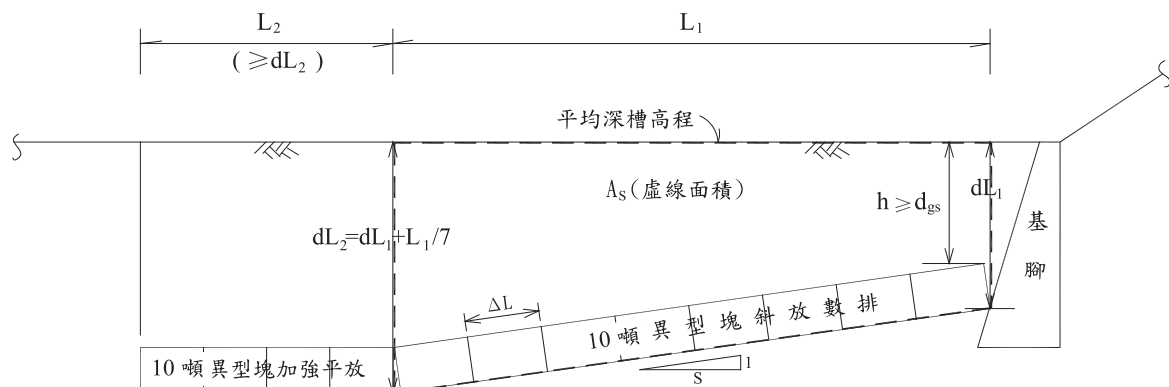


圖 1 斜向流衝擊下之堤防基腳保護工橫斷面設計示意圖

三、試驗建立

實驗室內建置三種代表性擬似斜向流攻角 A30、A60 及 A75 的彎道流動床試驗渠槽，彎道曲率 B/R_r 分別為 0.63、1.62 及 2.21，整體平面布置如圖 2 所示。其中，水體係經由實驗室蓄水池定水頭控制水位後，以鑄鐵管引流至本研究頭水箱，經過率定池與銜接水路後，進入 1.0 m 寬×1.05 m 高×(9.59 m~10.73 m)長之

動床試驗渠槽範圍(包括漸變段 3.07 m~4.50 m、上游來流段 1.50 m、曲率轉彎段 0.65 m~0.83 m 及直線段 3.96 m~4.19 m)，其後試驗渠槽布置成定床(長 9.59 m~10.73 m)，水流乃隨著直線渠槽流經沉砂槽與尾水板後，銜接回水路回流至原蓄水池完成循環。

動床試驗渠槽內採用 5 種底床坡度($S_{75}=1/75$ ，餘類推、S100、S140、S300、S1000)及 6 種經篩選之均勻砂砂做為試驗底床砂(D_i , $i=2-1$ 及 2-6)，其中值粒徑(d_{50})、分布指數(σ_g)及水中比重(Δ)分別為 D6 (3.37 mm，

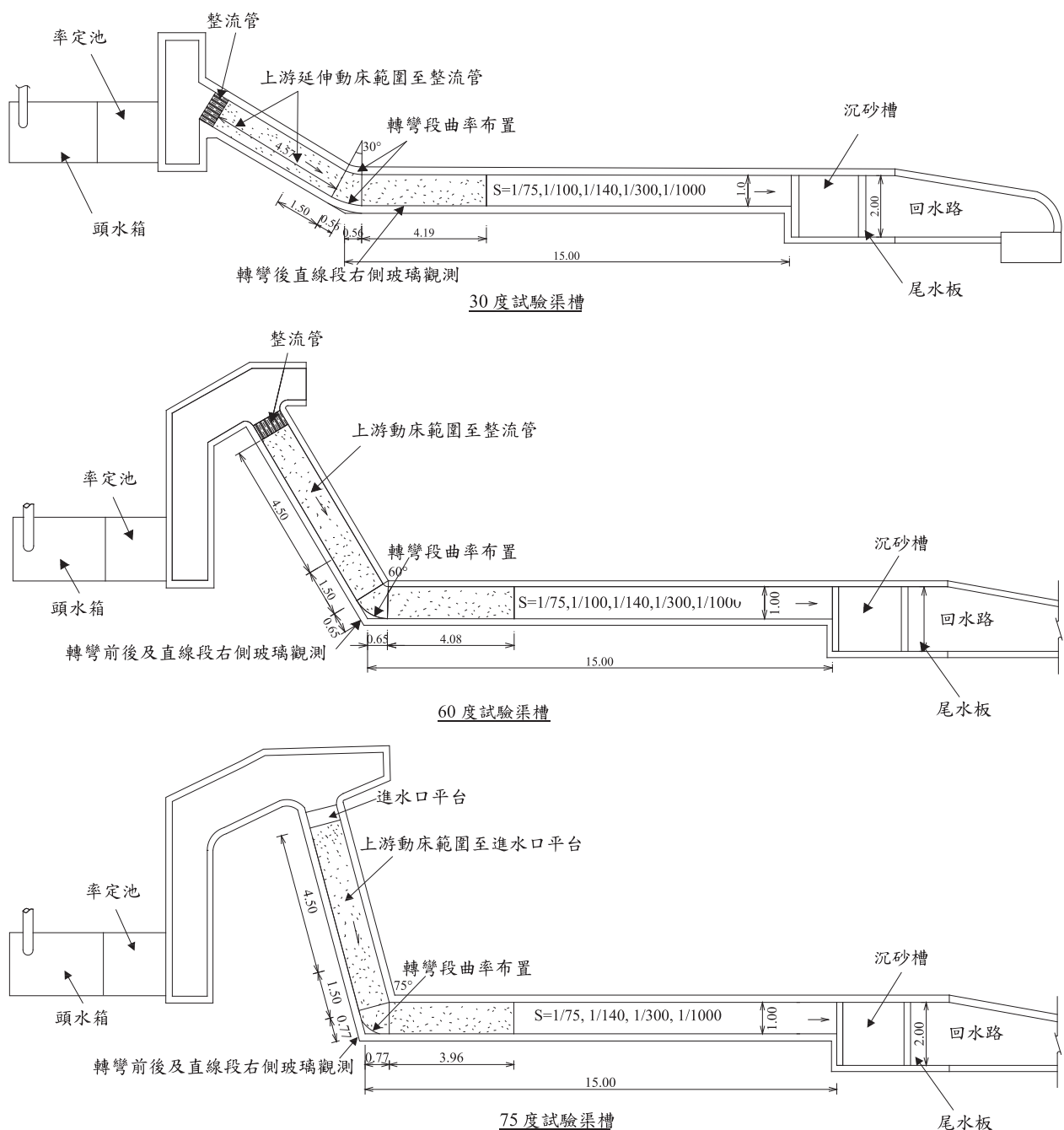


圖 2 試驗渠槽平面布置

試驗量測段全長 5.65 m~5.83 m，水位與底床量測位置如圖 3 所示，其中，水位量測位置計有 13 個主要斷面(S1~S4、S7、S10~S17)，底床量測位置計有 63 個斷面(包括 13 個主要斷面)，水位及底床高程均以測微針水尺量測。15 種試驗流量均採清水定量流施放(Q013=0.013 m³/s，餘類推、Q017、Q019、Q022、

試驗流程如下：(1)鋪設底床：將試驗用砂鋪在動



床試驗渠槽範圍(保護試驗則先將基腳保護塊鋪設於曲率轉彎段至所有直線段),並以抹刀將砂面抹平切齊基準線位置;(2)蓄水浸沒床面至一定水深:調整尾水板高度至設定位置後,由下游回水路抽水注入沉砂槽內,並逐漸蓄水浸沒鋪設好之床面至一定水深,可使底床砂層含水量達飽和狀態及底床面顆粒均勻壓實之效;(3)開始實驗:閘閥逐漸開啟至率定之堰上水位以控制施放流量,俟水流穩定時,緩慢放下尾水板至水平後開始試驗;(4)量測水位:於各試驗時間到達前約 40 分鐘,開始量測各斷面水位,完成量測後,為避免破壞底床床形,先將尾水板升起使水面上升至試驗前高度後,隨即關閉閘閥停水;(5)停水後,打開試驗渠

槽底部排水孔,持續以極小流量排水,待試驗渠槽砂面無水後,即可進行各斷面之底床高程測量;(6)重覆上述步驟(1)~(5),改變不同試驗用砂、底床坡度與試驗流量至完成所有試驗流量為止。

四、結果與討論

4.1 動床與保護試驗結果

56 組動床試驗與 116 組保護試驗冲刷觀測成果,分別列如表 1 及表 2,橫斷面水理因素如圖 4,案例試

表 1 動床試驗 n 值及冲刷深度比較

動床試驗編號	q_p (m^2/s)	T (sec)	x_B (-)	$\frac{d_{bs,Ai}}{d_{bs,A60}}$	$\frac{d_{gs,Ai}}{d_{bs,A60}}$	n
102MA30S140D5Q038	0.038	23,400	1.00	0.752	0.160	0.019
102MA30S140D5Q075	0.075	22,800	0.40	0.642	0.241	0.023
102MA30S75D5Q038	0.038	24,000	0.70	0.851	0.278	0.017
102MA30S75D5Q075	0.075	23,760	0.60	0.669	0.307	0.022
102MA30S140D6Q038	0.038	23,940	0.50	0.713	0.059	0.018
102MA30S140D6Q075	0.075	24,120	0.60	0.533	0.096	0.020
102MA30S75D6Q038	0.038	24,720	0.20	0.817	0.203	0.019
102MA30S75D6Q075	0.075	24,360	0.40	0.618	0.182	0.019
102MA30S140D4Q038	0.038	23,400	0.90	0.611	0.210	0.022
102MA30S140D4Q075	0.075	24,060	0.30	0.731	0.254	0.026
102MA30S100D4Q038	0.038	24,120	0.50	0.836	0.283	0.026
102MA30S100D4Q075	0.075	23,940	0.70	0.794	0.347	0.026
102MA30S75D4Q019	0.019	25,500	0.90	0.723	0.382	0.015
102MA30S75D4Q038	0.038	23,880	1.00	0.789	0.332	0.019
102MA30S75D4Q075	0.075	24,180	0.60	0.882	0.350	0.026
103MA30S300D4Q038	0.038	24,660	0.60	0.777	0.143	0.017
103MA30S300D4Q075	0.075	23,820	0.90	0.778	0.200	0.025
103MA30S300D3Q038	0.038	23,520	0.00	0.630	0.215	0.021
103MA30S300D3Q075	0.075	23,340	0.60	0.693	0.206	0.027
103MA30S1000D3Q038	0.038	23,700	0.40	0.667	0.145	0.020
103MA30S1000D3Q075	0.075	23,760	0.60	0.703	0.202	0.023
104MA60S1000D3Q038	0.038	25,020	0.40	1.000	0.123	0.021
104MA60S1000D3Q075	0.075	23,700	0.20	1.000	0.095	0.026
104MA60S300D3Q038	0.038	24,300	0.90	1.000	0.137	0.023
104MA60S300D3Q075	0.075	24,240	0.30	1.000	0.186	0.024
104MA60S300D4Q038	0.038	24,180	0.30	1.000	0.088	0.023
104MA60S300D4Q075	0.075	24,120	0.10	1.000	0.181	0.034
105MA60S140D4Q019	0.019	25,440	0.30	1.000	0.164	0.020
105MA60S140D4Q038	0.038	24,180	0.90	1.000	0.190	0.026
105MA60S140D4Q075	0.075	24,060	0.30	1.000	0.217	0.032
105MA60S100D4Q019	0.019	23,460	0.40	1.000	0.193	0.015
105MA60S100D4Q038	0.038	23,760	1.10	1.000	0.261	0.022
105MA60S100D4Q075	0.075	23,580	0.20	1.000	0.241	0.021
105MA60S75D4Q019	0.019	24,240	0.50	1.000	0.288	0.019
105MA60S75D4Q038	0.038	24,000	0.30	1.000	0.291	0.021
105MA60S75D4Q075	0.075	23,940	0.10	1.000	0.273	0.026
106MA60S75D5Q038	0.038	24,180	0.40	1.000	0.194	0.019

表 1 動床試驗 n 值及沖刷深度比較

動床試驗編號	q_p (m^2/s)	T (sec)	x_B (-)	$\frac{d_{bs,Ai}}{d_{bs,A60}}$	$\frac{d_{gs,Ai}}{d_{bs,A60}}$	n
106MA60S75D5Q075	0.075	23,640	0.30	1.000	0.184	0.027
106MA60S140D5Q038	0.038	24,540	0.30	1.000	0.115	0.019
106MA60S140D5Q075	0.075	23,820	0.20	1.000	0.216	0.026
106MA60S140D6Q038	0.038	23,640	0.30	1.000	0.031	0.023
106MA60S140D6Q075	0.075	23,580	0.20	1.000	0.043	0.021
106MA60S75D6Q038	0.038	23,700	0.30	1.000	0.116	0.021
106MA60S75D6Q075	0.075	23,700	0.40	1.000	0.089	0.022
107MA75S140D5Q038	0.038	23,640	0.00	1.073	0.084	0.020
107MA75S140D5Q075	0.075	23,460	0.10	1.151	0.127	0.026
107MA75S75D5Q038	0.038	23,280	0.00	1.181	0.169	0.021
107MA75S75D5Q075	0.075	23,400	0.00	1.205	0.211	0.020
107MA75S75D6Q038	0.038	23,100	0.00	1.081	0.096	0.020
107MA75S75D6Q075	0.075	23,220	0.00	1.052	0.094	0.024
108MA75S140D6Q038	0.038	24,480	0.10	1.039	0.016	0.020
108MA75S140D6Q075	0.075	24,480	0.10	1.099	0.053	0.022
108MA75S140D4Q019	0.019	24,480	0.20	1.128	0.113	0.017
108MA75S140D4Q038	0.038	24,480	0.30	1.135	0.131	0.023
108MA75S140D4Q075	0.075	24,480	0.10	1.106	0.186	0.026
108MA75S300D4Q075	0.075	24,480	0.20	1.213	0.140	0.029

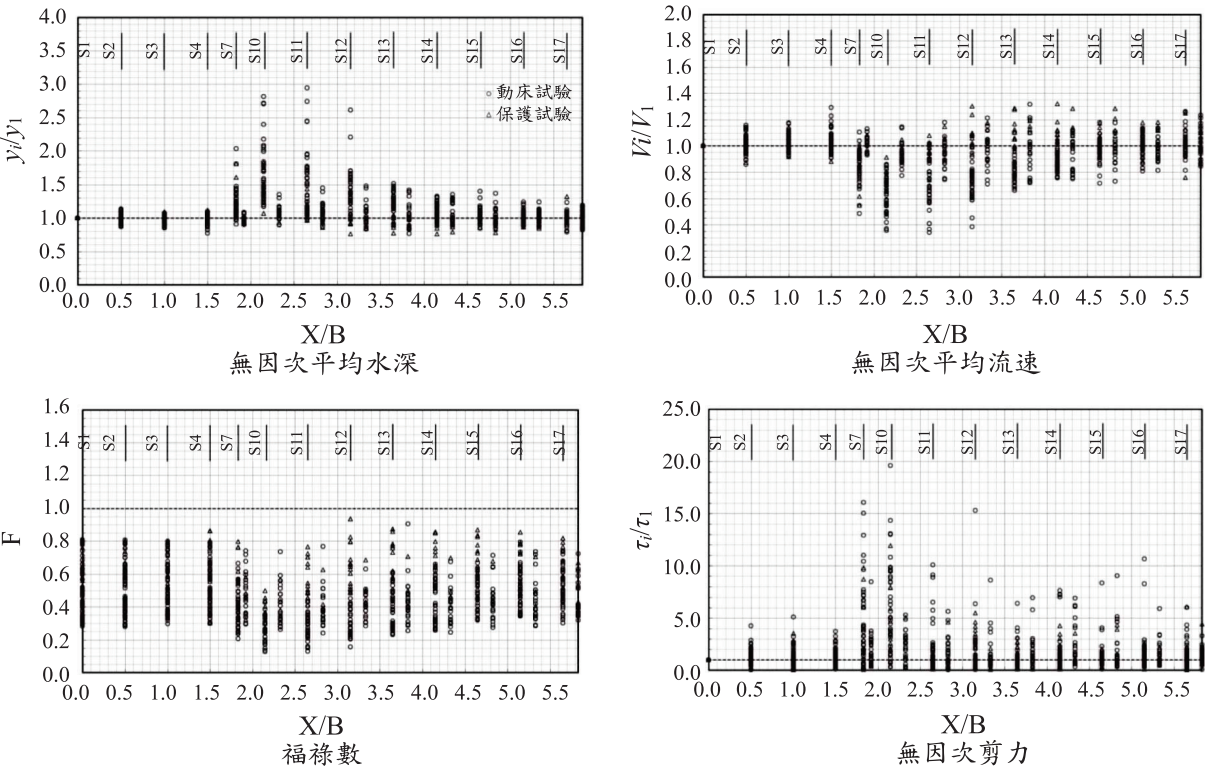


圖 4 主要斷面無因次水力因素比較

驗 10 分鐘時水理流況、試驗後底床及沖淤分布如圖 5 及圖 6 所示，動床試驗及保護試驗水理因素比較組，列如表 1 及表 3，試驗量測結果針對水理流況(水位、水深、流速、福祿數、底床剪力、底床糙度)及底床沖淤變化分布分述如下：

4.1.1 水位與水深

曲率轉彎段與直線段只有在試驗初期一段時間內會產生明顯的水面波動(圖 5)，這樣的水面波動現象，在試驗中、後期已不復存在，水位均呈現平穩狀態。A30、A60、A75 斜向流攻角動床試驗對應組列如表 1，

表 2 基腳保護布置方式及分析參數

項次	保護試驗編號	基腳保護布置方式	L_1 (m)	dL_1 (m)	dL_2 (m)	A_s (m ²)	d_{50} (m)	q_p (m ² /s)	T (sec)	t_p (sec)	d_{bs} (m)	x_B (-)	$\left(\frac{A_s}{d_{50}^2}\right)_r$
1	104P2MA60S1000D3Q038	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.060	0.090	0.0158	0.00042	0.038	25,580	12,789	-	-	0.888
2	104P5MA60S300D3Q038	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.087	0.117	0.0214	0.00042	0.038	24,000	20,752	-	-	1.038
3	104P6MA60S300D4Q038	8 排異型塊 1:7 斜放	0.280	0.069	0.109	0.0249	0.00084	0.038	23,700	22,321	0.115	0.20	1.016
4	104P8MA60S1000D4Q038	8 排異型塊 1:7 斜放	0.280	0.047	0.087	0.0188	0.00084	0.038	24,120	19,817	-	-	1.204
5	105P1MA60S140D4Q038	8 排異型塊 1:7 斜放	0.280	0.123	0.163	0.0400	0.00084	0.038	24,120	29,825	0.131	0.10	0.834
6	105P3MA60S140D4Q038	8 排異型塊 1:7 斜放	0.280	0.091	0.131	0.0311	0.00084	0.038	23,580	22,404	0.137	0.10	0.817
7	105P4MA60S75D4Q038	8 排異型塊 1:7 斜放	0.280	0.119	0.159	0.0389	0.00084	0.038	23,700	28,367	0.132	0.60	0.818
8	105P5MA60S75D4Q038	8 排異型塊 1:7 斜放	0.280	0.099	0.139	0.0333	0.00084	0.038	23,820	26,321	0.125	0.30	0.889
9	105P7MA60S75D4Q019	5 排異型塊 1:7 斜放	0.175	0.082	0.107	0.0165	0.00084	0.019	18,900	20,265	0.099	0.50	0.719
10	105P8MA60S75D4Q013	4 排異型塊 1:7 斜放	0.140	0.065	0.085	0.0105	0.00084	0.013	16,980	23,073	0.062	1.80	0.892
11	105P9MA60S140D4Q038	8 排異型塊 1:7 斜放	0.280	0.075	0.115	0.0266	0.00084	0.038	23,280	24,181	0.110	0.30	1.027
12	105P10MA60S140D4Q019	5 排異型塊 1:7 斜放	0.175	0.059	0.084	0.0125	0.00084	0.019	23,340	21,173	0.092	0.70	0.991
13	105P11MA60S140D4Q013	5 排異型塊 1:7 斜放	0.175	0.048	0.073	0.0106	0.00084	0.013	23,580	22,805	0.075	1.20	0.875
14	105P12MA60S100D4Q038	8 排異型塊 1:7 斜放	0.280	0.086	0.126	0.0297	0.00084	0.038	23,580	24,602	0.120	0.50	0.936
15	106P1MA60S100D4Q013	8 排紅色塊 1:7 斜放	0.144	0.061	0.082	0.0103	0.00084	0.013	23,580	21,587	0.089	0.60	0.853
16	106P3MA60S100D4Q013	12 排紅色塊 1:7 斜放	0.216	0.047	0.078	0.0135	0.00084	0.013	24,000	23,850	0.078	0.60	0.716
17	106P5MA60S1000D3Q013	12 排紅色塊 1:7 斜放	0.216	0.020	0.051	0.0077	0.00042	0.013	23,700	12,538	-	-	0.642
18	106P6MA60S1000D3Q019	13 排白色塊 1:7 斜放	0.286	0.032	0.073	0.0150	0.00042	0.019	23,580	30,007	0.057	0.50	1.085
19	106P7MA60S75D5Q013	14 排紅色塊 1:7 斜放	0.252	0.044	0.080	0.0156	0.00168	0.013	24,060	25,168	0.076	0.30	0.692
20	106P9MA60S140D5Q038	8 排異型塊 1:7 斜放	0.280	0.057	0.097	0.0216	0.00168	0.038	23,880	22,133	0.104	0.40	1.237
21	106P10MA60S140D5Q038	6 排異型塊 1:5.25 斜放+2 排加強塊	0.280	0.057	0.097	0.0230	0.00168	0.038	23,760	19,409	-	-	1.024
22	106P11MA60S140D5Q019	5 排異型塊 1:7 斜放+2 排加強塊	0.245	0.043	0.068	0.0145	0.00168	0.019	23,880	22,412	0.072	1.90	0.961
23	106P13MA60S140D5Q028	16.64 排白色塊 1:7 斜放	0.366	0.040	0.092	0.0242	0.00168	0.028	23,520	21,500	0.100	0.30	0.801
24	106P14MA60S140D5Q019	12.73 排白色塊 1:7 斜放	0.280	0.033	0.073	0.0148	0.00168	0.019	23,820	20,092	0.086	0.40	0.844
25	106P16MA60S140D5Q038	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.080	0.110	0.0200	0.00168	0.038	23,580	16,845	0.153	0.10	1.029
26	106P17MA60S140D5Q038	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.067	0.097	0.0172	0.00168	0.038	23,520	13,568	-	-	0.970
27	106P18MA60S75D6Q038	8 排異型塊 1:7 斜放	0.280	0.056	0.096	0.0213	0.00337	0.038	23,640	7,972	-	-	0.501
28	106P19MA60S75D6Q038	8 排異型塊 1:7 斜放	0.280	0.078	0.118	0.0274	0.00337	0.038	23,640	28,575	0.097	0.50	1.318
29	106P20MA60S75D6Q038	8 排異型塊 1:7 斜放	0.280	0.072	0.112	0.0258	0.00337	0.038	23,520	27,265	0.096	0.60	1.342
30	106P21MA60S75D6Q038	8 排異型塊 1:7 斜放	0.280	0.062	0.102	0.0230	0.00337	0.038	23,640	23,038	0.104	0.30	1.282
31	106P22MA60S75D6Q038	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.072	0.102	0.0183	0.00337	0.038	23,520	12,133	-	-	0.872
32	106P23MA60S75D6Q038	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.078	0.108	0.0195	0.00337	0.038	23,640	17,385	-	-	1.151
33	106P24MA60S75D6Q038	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.088	0.118	0.0216	0.00337	0.038	23,580	25,365	0.109	0.60	1.492
34	106P25MA60S75D6Q019	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.067	0.097	0.0172	0.00337	0.019	23,580	11,635	-	-	0.458
35	106P26MA60S75D6Q057	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.106	0.136	0.0254	0.00337	0.057	23,340	17,521	0.180	0.40	1.314
36	106P27MA60S75D6Q024	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.073	0.103	0.0185	0.00337	0.024	23,400	14,913	-	-	0.677
37	107P1MA60S75D6Q028	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.078	0.108	0.0195	0.00337	0.028	23,580	12,646	-	-	0.634
38	107P2MA60S75D6Q033	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.083	0.113	0.0206	0.00337	0.033	23,460	26,340	0.100	0.50	1.420
39	107P3MA60S75D6Q033	4 排異型塊 1:4.67 斜放	0.140	0.083	0.113	0.0137	0.00337	0.033	23,340	19,308	-	-	1.583
40	107P4MA60S75D6Q033	4 排異型塊 1:4.67 斜放	0.140	0.098	0.128	0.0158	0.00337	0.033	23,400	22,545	0.132	0.50	1.592
41	107P5MA60S75D6Q045	4 排異型塊 1:4.67 斜放	0.140	0.113	0.143	0.0179	0.00337	0.045	23,460	18,727	0.178	0.80	1.583
42	107P6MA60S75D6Q057	4 排異型塊 1:4.67 斜放	0.140	0.126	0.156	0.0197	0.00337	0.057	23,340	4,658	-	-	0.476
43	107P8MA60S75D6Q057	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.106	0.136	0.0254	0.00337	0.057	23,460	21,276	0.149	-0.38	1.582
44	107P9MA60S100D6Q033	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.076	0.106	0.0191	0.00337	0.033	23,280	21,697	0.113	0.40	1.271
45	107P10MA60S100D6Q057	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.095	0.125	0.0231	0.00337	0.057	23,280	8,955	-	-	0.760
46	107P11MA60S100D6Q057	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.106	0.136	0.0254	0.00337	0.057	23,280	20,295	0.155	0.70	1.512
47	107P12MA60S140D6Q033	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.068	0.098	0.0174	0.00337	0.033	23,280	26,054	0.087	0.90	1.660
48	107P13MA60S140D6Q057	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.084	0.114	0.0208	0.00337	0.057	23,100	13,571	-	-	1.258

表 2 基腳保護布置方式及分析參數

項次	保護試驗編號	基腳保護布置方式	L_1 (m)	dL_1 (m)	dL_2 (m)	A_s (m ²)	d_{50} (m)	q_p (m ² /s)	T (sec)	t_p (sec)	d_{bz} (m)	x_B (-)	$\left(\frac{A_s}{d_{50}^2}\right)_r$
49	107P14MA60S140D6Q057	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.095	0.125	0.0231	0.00337	0.057	23,160	15,940	-	-	1.320
50	107P15MA60S140D6Q057	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.106	0.136	0.0254	0.00337	0.057	23,280	24,385	0.129	0.70	1.802
51	107P17MA60S140D5Q033	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.078	0.108	0.0195	0.00168	0.033	23,220	21,856	0.114	0.20	1.179
52	107P18MA60S140D5Q057	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.098	0.128	0.0237	0.00168	0.057	23,280	12,862	-	-	0.985
53	107P19MA60S140D5Q057	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.112	0.142	0.0267	0.00168	0.057	23,340	18,894	-	-	1.266
54	107P20MA60S140D5Q057	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.126	0.156	0.0296	0.00168	0.057	23,100	22,804	0.157	0.40	1.366
55	107P22MA60S140D5Q043	6 排紅色塊 1:7 斜放	0.111	0.130	0.146	0.0153	0.00168	0.043	16,680	7,480	-	-	0.694
56	107P23MA60S140D5Q043	6 排紅色塊 1:7 斜放	0.111	0.160	0.176	0.0186	0.00168	0.043	16,980	10,933	-	-	0.820
57	107P25MA60S140D5Q043	6 排紅色塊 1:7 斜放	0.111	0.175	0.191	0.0203	0.00168	0.043	16,980	15,092	0.213	-0.05	1.024
58	107P26MA60S140D5Q028	6 排紅色塊 1:7 斜放	0.111	0.109	0.125	0.0130	0.00168	0.028	16,980	13,900	-	-	0.982
59	107P27MA60S140D5Q028	6 排紅色塊 1:7 斜放	0.111	0.119	0.135	0.0141	0.00168	0.028	16,980	14,812	-	-	0.962
60	107P28MA60S140D5Q028	6 排紅色塊 1:7 斜放	0.111	0.129	0.145	0.0152	0.00168	0.028	16,980	15,348	0.159	-0.16	0.922
61	104P3MA60S100D3Q038	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.085	0.115	0.0210	0.00042	0.038	23,760	24,242	0.112	0.40	1.227
62	106P2MA60S100D4Q013	8 排紅色塊 1:7 斜放	0.144	0.047	0.068	0.0083	0.00084	0.013	23,340	17,091	-	-	0.848
63	106P4MA60S100D4Q019	10 排白色塊 1:7 斜放	0.225	0.054	0.086	0.0158	0.00084	0.019	23,940	20,058	0.102	0.30	0.747
64	106P12MA60S140D5Q057	10.5 排異型塊 1:7 斜放	0.368	0.077	0.130	0.0380	0.00168	0.057	23,520	22,015	0.138	0.00	1.027
65	106P15MA60S140D5Q038	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.090	0.120	0.0221	0.00168	0.038	23,640	20,880	0.135	0.30	1.142
66	106P28MA60S75D6Q057	8 排異型塊 1:7 斜放	0.280	0.077	0.117	0.0272	0.00337	0.057	23,340	19,661	0.138	0.20	1.371
67	107P7MA60S75D6Q033	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.083	0.113	0.0206	0.00337	0.033	23,400	25,507	0.103	0.10	1.376
68	107P16MA60S140D5Q017	6 排紅色塊 1:7 斜放	0.111	0.061	0.077	0.0077	0.00168	0.017	16,980	14,726	0.088	0.70	1.091
69	107P24MA60S140D5Q043	6 排紅色塊 1:7 斜放	0.111	0.190	0.206	0.0220	0.00168	0.043	16,980	15,206	0.228	-0.11	0.953
70	107P29MA60S140D5Q022	6 排紅色塊 1:7 斜放	0.111	0.105	0.121	0.0125	0.00168	0.022	16,980	18,346	0.111	-0.16	1.052
71	107P31MA60S140D5Q019	6 排紅色塊 1:7 斜放	0.111	0.076	0.092	0.0093	0.00168	0.019	16,980	18,655	0.083	0.80	1.250
72	107P34MA60S140D5Q022	6 排紅色塊 1:7 斜放	0.111	0.090	0.106	0.0109	0.00168	0.022	16,980	16,072	0.111	-0.27	1.069
73	107P35MA60S140D5Q026	6 排紅色塊 1:7 斜放	0.111	0.090	0.106	0.0109	0.00168	0.026	16,980	15,787	0.113	0.10	1.233
74	107P36MA60S140D5Q029	6 排紅色塊 1:7 斜放	0.111	0.090	0.106	0.0109	0.00168	0.029	17,280	6,611	-	-	0.595
75	102P3MA30S140D5Q038	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.057	0.087	0.0151	0.00168	0.038	21,900	31,538	0.060	1.10	2.474
76	102P4MA30S75D4Q038	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.057	0.087	0.0151	0.00084	0.038	24,060	18,246	-	-	1.380
77	102P5MA30S75D4Q038	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.104	0.134	0.0250	0.00084	0.038	24,660	25,659	0.128	0.60	1.157
78	103P1MA30S300D4Q038	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.054	0.084	0.0145	0.00084	0.038	24,720	15,975	-	-	1.268
79	103P2MA30S300D4Q038	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.061	0.091	0.0160	0.00084	0.038	23,820	21,757	0.099	0.70	1.547
80	103P3MA30S300D3Q038	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.074	0.104	0.0187	0.00042	0.038	24,900	28,286	0.091	0.70	1.599
81	103P4MA30S100D3Q038	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.061	0.091	0.0160	0.00042	0.038	23,460	26,188	0.081	0.80	1.740
82	103P5MA30S100D2Q038	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.088	0.118	0.0216	0.00008	0.038	25,500	27,443	0.109	2.40	1.163
83	103P6MA30S300D2Q038	6 排異型塊 1:7 斜放	0.210	0.106	0.136	0.0254	0.00008	0.038	23,160	26,297	0.119	1.30	0.950
84	107P1MA75S140D5Q019	6 排紅色塊 1:7 斜放	0.111	0.093	0.109	0.0112	0.00168	0.019	16,980	14,559	0.126	-0.21	0.821
85	107P2MA75S140D5Q019	8 排紅色塊 1:7 斜放	0.150	0.064	0.085	0.0112	0.00168	0.019	16,980	11,726	0.122	0.10	0.670
86	107P3MA75S75D5Q019	6 排紅色塊 1:7 斜放	0.111	0.093	0.109	0.0112	0.00168	0.019	16,980	14,794	0.124	-0.21	0.834
87	107P4MA75S75D5Q019	8 排紅色塊 1:7 斜放	0.150	0.064	0.085	0.0112	0.00168	0.019	16,260	9,679	-	-	0.557
88	107P5MA75S75D5Q019	8 排紅色塊 1:7 斜放+水平鋪石	0.150	0.071	0.093	0.0123	0.00168	0.019	16,080	13,398	-	-	0.691
89	107P6MA75S75D5Q019	8 排紅色塊 1:7 斜放+3 排加強塊	0.150	0.064	0.085	0.0112	0.00168	0.019	16,980	13,246	0.108	0.30	0.752
90	108P1MA75S75D6Q028	8 排紅色塊 1:7 斜放	0.150	0.105	0.126	0.0173	0.00337	0.028	16,980	12,852	0.165	0.00	0.726
91	108P2MA75S75D6Q028	6 排紅色塊 1:7 斜放	0.111	0.148	0.164	0.0173	0.00337	0.028	15,960	14,232	-	-	0.800
92	108P3MA75S75D6Q028	6 排紅色塊 1:7 斜放+5 排加強塊	0.111	0.148	0.164	0.0173	0.00337	0.028	16,980	17,144	0.161	0.40	0.957
93	108P4MA75S75D6Q038	8 排紅色塊 1:7 斜放+9 排加強塊	0.150	0.143	0.164	0.0230	0.00337	0.038	16,980	17,693	0.156	-0.38	0.993
94	108P5MA75S75D6Q038	10 排紅色塊 1:7 斜放+8 排加強塊	0.186	0.111	0.138	0.0232	0.00337	0.038	16,980	18,145	0.128	-0.38	1.011
95	108P6MA75S75D6Q028	15 排紅色塊 1:7 斜放+5 排加強塊	0.279	0.042	0.082	0.0173	0.00337	0.028	15,060	9,953	-	-	0.569
96	108P7MA75S75D6Q028	12 排紅色塊 1:7 斜放+5 排加強塊	0.223	0.062	0.094	0.0174	0.00337	0.028	14,940	11,627	-	-	0.657

表 2 基腳保護布置方式及分析參數

項次	保護試驗編號	基腳保護布置方式	L_1 (m)	dL_1 (m)	dL_2 (m)	A_s (m ²)	d_{50} (m)	q_p (m ³ /s)	T (sec)	t_p (sec)	d_{62} (m)	x_B (-)	$\left(\frac{A_s}{d_{50}^2}\right)_r$
97	108P8MA75S75D6Q028	10 排紅色塊 1:7 斜放+6 排加強塊	0.186	0.080	0.107	0.0174	0.00337	0.028	16,980	17,315	0.104	0.10	0.962
98	108P9MA75S75D6Q028	9 排異型塊 1:7 斜放+3 排加強塊	0.315	0.054	0.099	0.0241	0.00337	0.028	24,000	30,271	0.078	0.20	1.184
99	108P10MA75S75D6Q028	11 排紅色塊 1:7 斜放+6 排加強塊	0.205	0.071	0.100	0.0175	0.00337	0.028	17,280	15,432	0.111	0.30	0.855
100	108P11MA75S75D6Q028	11 排紅色塊 1:7 斜放+6 排加強塊+尾檻	0.205	0.071	0.100	0.0175	0.00337	0.028	17,280	16,009	0.107	0.10	0.885
101	108P12MA75S140D6Q028	9 排紅色塊 1:7 斜放+7 排加強塊+尾檻	0.168	0.093	0.117	0.0176	0.00337	0.028	17,280	18,220	0.110	-0.32	0.995
102	108P13MA75S140D6Q028	9 排異型塊 1:7 斜放+3 排加強塊+尾檻	0.315	0.055	0.100	0.0244	0.00337	0.028	24,480	32,013	0.076	0.50	1.233
103	108P14MA75S140D6Q028	11 排紅色塊 1:7 斜放+6 排加強塊+尾檻	0.205	0.071	0.100	0.0175	0.00337	0.028	17,280	18,620	0.092	0.60	1.023
104	108P16MA75S140D6Q057	9 排異型塊 1:7 斜放+3 排加強塊+尾檻	0.315	0.057	0.102	0.0250	0.00337	0.057	12,240	9,787	0.126	0.10	0.764
105	108P17MA75S140D4Q028	9 排紅色塊 1:7 斜放+6 排加強塊+尾檻	0.168	0.079	0.103	0.0153	0.00084	0.028	17,280	16,965	0.104	0.10	0.951
106	108P18MA75S140D4Q028	11 排紅色塊 1:7 斜放+5 排加強塊+尾檻	0.205	0.060	0.089	0.0153	0.00084	0.028	17,280	13,373	0.114	0.20	0.758
107	108P19MA75S140D4Q028	9 排異型塊 1:7 斜放+3 排加強塊	0.315	0.045	0.090	0.0213	0.00084	0.028	24,480	19,906	0.110	0.20	0.797
108	108P21MA75S140D4Q056	9 排異型塊 1:7 斜放+4.5 排加強塊	0.315	0.108	0.153	0.0411	0.00084	0.056	24,480	26,781	0.139	-0.43	1.062
109	108P22MA75S300D4Q028	9 排紅色塊 1:7 斜放+6 排加強塊+尾檻	0.168	0.079	0.103	0.0153	0.00084	0.028	17,280	18,004	0.098	0.20	1.006
110	108P23MA75S300D4Q028	11 排紅色塊 1:7 斜放+6 排加強塊+尾檻	0.205	0.070	0.100	0.0174	0.00084	0.028	17,280	19,033	0.090	0.90	0.931
111	108P24MA75S300D4Q028	9 排異型塊 1:7 斜放+3 排加強塊	0.315	0.045	0.090	0.0213	0.00084	0.028	24,480	24,603	0.089	0.10	0.976
112	108P25MA75S300D4Q057	9 排異型塊 1:7 斜放+4.5 排加強塊+尾檻	0.315	0.110	0.155	0.0417	0.00084	0.057	24,480	26,372	0.143	-0.49	1.048
113	108P26MA75S1000D2-1Q028	9 排紅色塊 1:7 斜放+6 排加強塊+尾檻	0.168	0.070	0.094	0.0138	0.00031	0.028	17,280	13,881	0.116	0.30	0.799
114	108P27MA75S1000D2-1Q028	11 排紅色塊 1:7 斜放+6 排加強塊+尾檻	0.205	0.053	0.082	0.0138	0.00031	0.028	17,280	13,378	0.105	0.30	0.768
115	108P28MA75S1000D2-1Q028	9 排異型塊 1:7 斜放+3 排加強塊	0.315	0.039	0.084	0.0194	0.00031	0.028	24,480	25,547	0.080	0.20	1.018
116	108P29MA75S1000D2-1Q057	9 排異型塊 1:7 斜放+4.5 排加強塊+尾檻	0.315	0.098	0.143	0.0380	0.00031	0.057	24,480	26,763	0.130	-0.05	1.072
117	108P11MA75S75D6Q028	直線段尾檻 4 排紅色塊 1:7 斜放	0.075	0.037	0.048	0.0032	0.00337	0.028	17,280	24,184	0.034	-	7.221
118	108P12MA75S140D6Q028	直線段尾檻 4 排紅色塊 1:7 斜放	0.075	0.031	0.042	0.0027	0.00337	0.028	17,280	18,448	0.039	-	6.490
119	108P13MA75S140D6Q028	直線段尾檻 4 排異型塊 1:7 斜放	0.140	0.048	0.068	0.0081	0.00337	0.028	24,480	39,391	0.042	-	4.521
120	108P14MA75S140D6Q028	直線段尾檻 4 排紅色塊 1:7 斜放	0.075	0.031	0.042	0.0027	0.00337	0.028	17,280	18,448	0.039	-	6.490
121	108P16MA75S140D6Q057	直線段尾檻 4 排異型塊 1:7 斜放	0.140	0.048	0.068	0.0081	0.00337	0.057	12,240	15,810	0.052	-	3.726
122	108P17MA75S140D4Q028	直線段尾檻 4 排紅色塊 1:7 斜放	0.075	0.041	0.052	0.0035	0.00084	0.028	17,280	19,364	0.046	-	4.730
123	108P19MA75S140D4Q028	直線段無尾檻時 4 排異型塊 1:7 斜放	0.140	0.045	0.065	0.0077	0.00084	0.028	24,480	33,648	0.047	-	3.634
124	108P24MA75S300D4Q028	直線段無尾檻時 4 排異型塊 1:7 斜放	0.140	0.045	0.065	0.0077	0.00084	0.028	24,480	37,654	0.042	-	4.047
125	108P26MA75S1000D2-1Q028	直線段尾檻 4 排紅色塊 1:7 斜放	0.075	0.027	0.038	0.0024	0.00031	0.028	17,280	13,284	0.049	-	4.328
126	108P27MA75S1000D2-1Q028	直線段尾檻 4 排紅色塊 1:7 斜放	0.075	0.027	0.038	0.0024	0.00031	0.028	17,280	19,145	0.034	-	6.140
127	108P28MA75S1000D2-1Q028	直線段無尾檻時 4 排異型塊 1:7 斜放	0.140	0.039	0.059	0.0069	0.00031	0.028	24,480	31,899	0.045	-	3.555
128	108P29MA75S1000D2-1Q057	直線段尾檻 4 排異型塊 1:7 斜放	0.140	0.053	0.073	0.0088	0.00031	0.057	24,480	27,751	0.064	-	4.777

註：試驗編號中，粗黑體者為試驗後塊體傾倒者；項次欄中，1~60 列為 A60 檢定點，61~74 列為 A60 驗證點，75~83 列為 A30 驗證點，84~116 列為 A75 驗證點，117~128 列為 A75 斜向流過彎後直線段尾檻處 A0 驗證點。

各橫斷面之整體水位差都很小，平均值分別為 0.0043 m、0.0060 m 及 0.0061 m，但在相同斜向流攻角、底床粒徑及底床坡度下，各試驗組橫斷面之整體水位差有隨著試驗流量加大而增大的變化趨勢；以斷面 S1 之平均水深(y_1)為基準，進行表 1 及表 3 各對應組之無因次斷面平均水深(y_i/y_1)點繪， y_i ($i=1\sim17$)為各主要斷面之平均水深，結果如圖 4 所示，分布值介於 0.76~2.95，局部高值多出現在斷面 S10~S12，為試驗渠槽過彎後直線段 1.0 倍渠槽寬度的範圍。

4.1.2 流速與福祿數

以斷面 S1 之平均流速(V_1)為基準，進行表 1 及

表 3 各對應組之無因次斷面平均流速(V_i/V_1)點繪， V_i ($i=1\sim17$)為各主要斷面之平均流速，結果如圖 4 所示，分布值介於 0.34~1.32，局部低值亦多出現在斷面 S10~S12。各橫斷面之整體福祿數都小於 1，意即，在不同的底床坡度、流量及底床粒徑下，由於底床之可沖刷性，在水流作用下都將調整成亞臨界流況。

4.1.3 底床剪力與糙度

以斷面 S1 之平均剪力(τ_1)為基準，進行表 1 及表 3 各對應組之無因次剪力(τ_i/τ_1)點繪， τ_i ($i=1\sim17$)為各主要斷面之平均剪力，結果如圖 4 所示，分布值介於 0.02~19.6，局部高值多出現在斷面 S7~S11。各組試驗

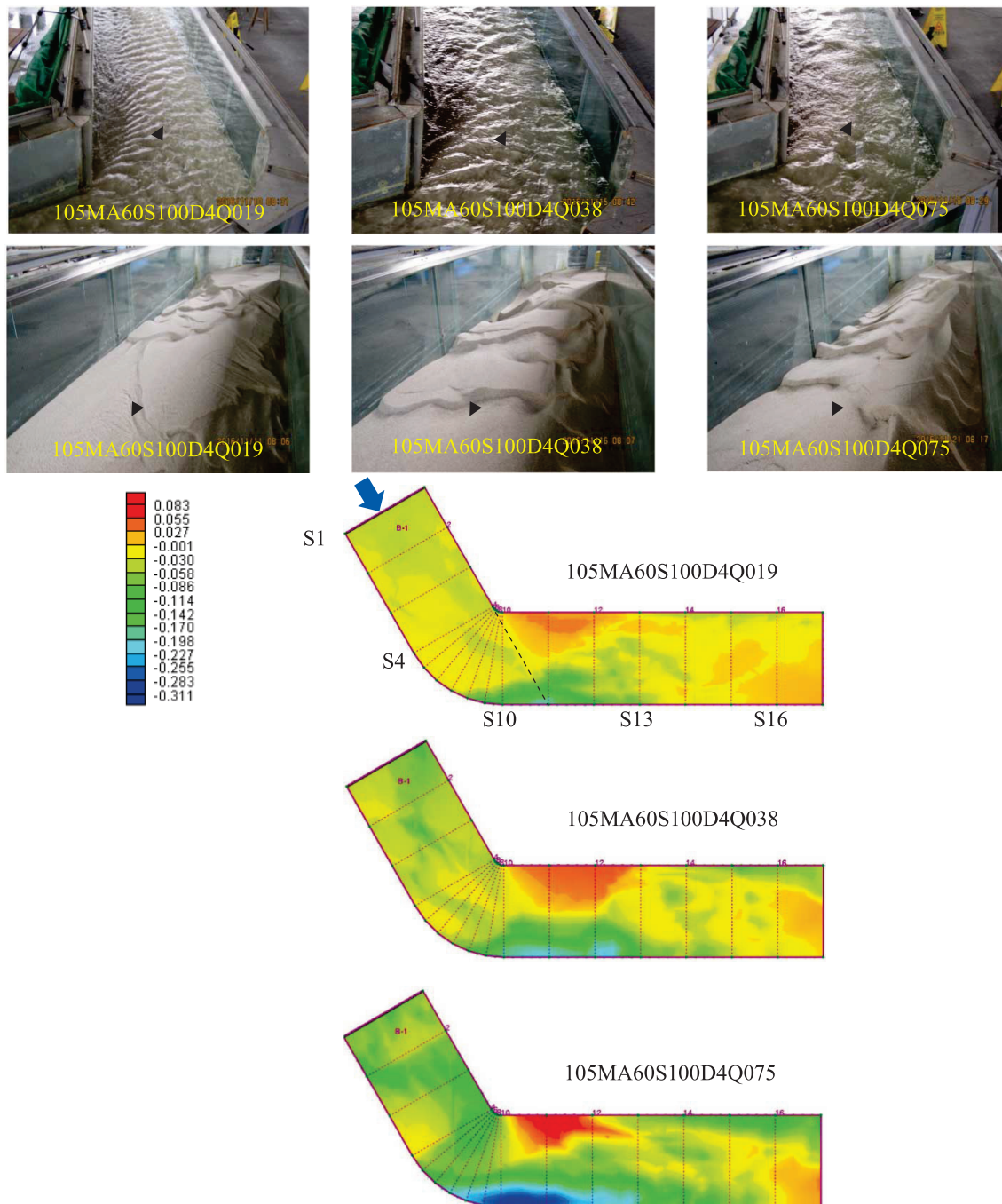


圖 5 動床試驗 10 分鐘時水理流況、試驗後底床及沖淤變化案例(60 度斜向流)

底床糙度估算結果，D3、D4、D5、D6 底床粒徑之平均 n 值分別為 0.0237、0.0222、0.0208 及 0.0207，相較於依照 Strikler 經驗式($n = d_{50}^{1/6} / 21.1 \cdot d_{50} : m$) (Raudkivi, 1998) 估算所得之 n 值(0.0130、0.0146、0.0163、0.0184)都來得大，其比值分別為 1.82、1.52、1.28 及 1.13，隨著底床粒徑加大而減小，這意味對於動床試驗之底床糙度估算，除了依照 Strikler 經驗式估算所得之 n 值外，另外亦需加入由底床型態(bed form)與基腳沖刷坑所

引起的 n 值增量，才能較合乎實際流況之描述。

4.1.4 底床沖淤變化分布

表 1 及表 3 各對應組之不同底床粒徑最大沖淤(負數為沖刷，正數為淤積)範圍，分別為 D3 (-0.355 m~0.120 m)、D4 (-0.387 m~0.093 m)、D5 (-0.400 m~0.071 m)、D6 (-0.456 m~0.092 m)。整體而言，除了上游來流過彎後直線段左側會產生部分淤積外，由於

表 3 保護試驗後塊體完整者 n 值及與動床試驗之基腳最大冲刷深度比值

保護試驗編號	d_{bs} 比值	n	保護試驗編號	d_{bs} 比值	n
A30			107P4MA60S75D6Q033	0.569	0.019
102P3MA30S140D5Q038*	0.305	0.017	107P7MA60S75D6Q033	0.444	0.020
102P5MA30S75D4Q038*	0.656	0.023	107P8MA60S75D6Q057	0.476	0.019
103P2MA30S300D4Q038*	0.535	0.019	107P9MA60S100D6Q033	0.454	0.019
103P3MA30S300D3Q038*	0.659	0.028	107P11MA60S100D6Q057	0.481	0.020
103P4MA30S1000D3Q038*	0.509	0.024	107P12MA60S140D6Q033	0.410	0.018
103P5MA30S1000D2Q038	0.419	0.028	107P15MA60S140D6Q057	0.398	0.019
103P6MA30S300D2Q038	0.564	0.026	A60 平均值=	0.482	
A30 平均值=	0.521		A75		
A60			107P1MA75S140D5Q019	0.689	0.016
104P6MA60S300D4Q038*	0.483	0.020	107P2MA75S140D5Q019	0.667	0.016
105P1MA60S140D4Q038*	0.520	0.022	107P3MA75S75D5Q019	0.656	0.017
105P3MA60S140D4Q038	0.544	0.020	107P6MA75S75D5Q019	0.571	0.019
105P4MA60S75D4Q038*	0.534	0.020	108P1MA75S75D6Q028	0.556	0.023
105P5MA60S75D4Q038*	0.506	0.022	108P3MA75S75D6Q028	0.542	0.021
105P7MA60S75D4Q019*	0.518	0.019	108P4MA75S75D6Q038*	0.576	0.025
105P8MA60S75D4Q013	0.413	0.021	108P5MA75S75D6Q038*	0.472	0.021
105P9MA60S140D4Q038*	0.437	0.018	108P8MA75S75D6Q028	0.350	0.019
105P10MA60S140D4Q019*	0.472	0.015	108P9MA75S75D6Q028	0.263	0.020
105P11MA60S140D4Q013	0.532	0.017	108P10MA75S75D6Q028	0.374	0.026
105P12MA60S100D4Q038*	0.531	0.022	108P11MA75S75D6Q028	0.360	0.019
106P1MA60S100D4Q013	0.669	0.015	108P12MA75S140D6Q028	0.442	0.017
106P3MA60S100D4Q013	0.586	0.015	108P13MA75S140D6Q028	0.305	0.017
106P4MA60S100D4Q019	0.531	0.017	108P14MA75S140D6Q028	0.369	0.019
106P7MA60S75D5Q013	0.342	0.017	108P17MA75S140D4Q028	0.406	0.020
106P9MA60S140D5Q038*	0.397	0.020	108P18MA75S140D4Q028	0.445	0.016
106P15MA60S140D5Q038*	0.515	0.018	108P19MA75S140D4Q028	0.430	0.019
106P16MA60S140D5Q038*	0.584	0.019	108P22MA75S300D4Q028	0.397	0.018
106P19MA60S75D6Q038*	0.386	0.020	108P23MA75S300D4Q028	0.364	0.017
106P20MA60S75D6Q038*	0.382	0.019	108P24MA75S300D4Q028	0.360	0.016
106P21MA60S75D6Q038*	0.414	0.019	108P25MA75S300D4Q057	0.444	0.023
106P24MA60S75D6Q038*	0.434	0.020	108P26MA75S1000D2-1Q028	0.475	0.022
106P26MA60S75D6Q057	0.575	0.020	108P27MA75S1000D2-1Q028	0.430	0.020
106P28MA60S75D6Q057	0.441	0.022	108P28MA75S1000D2-1Q028	0.328	0.022
107P2MA60S75D6Q033	0.431	0.020	108P29MA75S1000D2-1Q057	0.323	0.024
			A75 平均值=	0.446	
			(A30,A60,A75)平均值=	0.472	
			(A30,A60,A75)標準偏差=	0.100	

註：保護試驗編號中，標示*者之水理因素，列於圖 4。

是清水冲刷，整體水槽觀測段都呈現冲刷形態。其中，上游來流段之一般冲刷深度(d_{gs} ：斷面 S1 之平均冲刷深度)相對較小，最大的冲刷深度(d_{bs})絕大多數都發生在過彎後(斷面 S10)之直線段 x_B 倍渠槽寬度的右側。由表 1 及表 2 之 x_B 觀測值統計結果可知，不同斜向流攻角動床試驗組 x_B 的平均值與標準偏差分別為 A30 (0.590, 0.261)、A60 (0.382, 0.259)、A75 (0.092, 0.100)，

保護試驗組則為 A30 (1.086, 0.631)、A60 (0.422, 0.432)、A75 (0.098, 0.324)。顯示，動床試驗組之 x_B 值會隨著斜向流攻角加大而減小，而保護試驗組相較於動床試驗組，又均會增加其 x_B 值，且其發生位置絕大多數都會落在上游來流 S4 斷面左側 12.5 度擴散角投射點的範圍內(A30 ($x_B=3.09$), A60 ($x_B=0.87$), A75 ($x_B=0.52$))。



註：圖中虛線圈起者，為塊體傾倒案例，餘為塊體完整者。

圖 6 保護試驗後塊體完整與傾倒案例

4.1.5 保護試驗後塊體情況與效果

116 組保護試驗之基腳保護布置方式列如表 2，主要保護塊體之布置排數介於 4 排~16.64 排，橫向排放坡度之水平與垂直比值介於 1:4.67~1:7。對於 A75 斜向流攻角之保護布置，除了原有主要保護塊以外，並增加 3 排~9 排水平加強塊之排放(寬度為 L_2 ，如圖 1 所示)，目的在加強主要保護塊前緣因為形成局部冲刷坑時之塊體穩定，類似拋石工法之設計方式(Chang, 1992)。本項加強塊施設，經水理試驗後，允許其產生局部傾倒，唯其傾倒後之影響，在不造成主要保護塊之傾倒情況下，仍判定為塊體完整之試驗組。總計表 2 所列保護試驗結果，塊體完整者計有 84 組，塊體傾倒者有 32 組，塊體案例情況如圖 6 所示。

65 組保護試驗後塊體完整者與相同斜向流攻角動床試驗對應組之基腳最大冲刷深度比值，列如表 3，比值範圍介於 0.263~0.689，不同斜向流攻角之平均比值分別為 A30 (0.521)、A60 (0.482)及 A75 (0.446)，隨著斜向流攻角加大而減小，而整體之平均比值與標準偏差則分別為 0.472 與 0.100。顯示，相較於無基腳保護設施的情況，在經由適當的基腳保護塊布置後，則能夠有效地降低其基腳前之最大冲刷深度至約一半的效果。

4.2 無因次基腳保護布置橫斷面積經驗式

由(5)式可知，無因次基腳保護布置橫斷面積基本

式，等號左邊主要參數之基腳保護塊布置橫斷面積 (A_s)，包括保護塊的橫向布置長度 (L_1)、緊鄰基腳的保護塊基礎深度 (dL_1) 及前緣保護塊的基礎深度 (dL_2)，列如表 2 所示。等號右邊主要參數之水流冲刷至前緣保護塊基礎時之估算時間 (t_p) 及斜向流攻角係數 (k_i)，其估算方式分述如下：

4.2.1 估算 t_p 時間

本研究保護試驗估算 t_p 時間之情況有二：(1) 當試驗結束後，主要保護塊體保持完整且塊體前緣之底床最低高程低於 (或高於) 塊體基礎高程時， t_p 值為試驗時

間 (T) 扣除 (或加上) 產生該高程差之時間，採用的平均冲刷深度速率 = 基腳最大冲刷深度 / 試驗時間。(2) 當試驗過程中，主要保護塊體傾倒時，先由縮時攝影研判主要保護塊體傾倒時的發生時間， t_p 值為在此時間點扣除產生塊體臨界傾倒深度 (Δh_c) 之時間，而決定不同塊體與不同底床粒徑之塊體臨界傾倒深度 (Δh_c)，係以試驗砂之水中安息角 (Raudkivi, 1998) 並考量水流效應估算求得 (參見表 4)，採用的平均冲刷深度速率 = (前緣塊體基礎深度 (dL_2) + 塊體臨界傾倒深度 (Δh_c)) / 塊體傾倒時之試驗時間。

表 4 基腳保護塊體臨界傾倒深度 (Δh_c) 與底床粒徑關係估算

單位：m

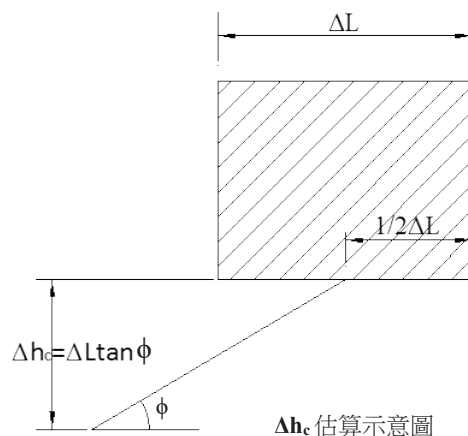
底床粒徑 d_{50} (m)	安息角 ϕ (度)	異型塊 $\Delta L=0.035\text{m}$	白色塊 $\Delta L=0.022\text{m}$	紅色塊 $\Delta L=0.018\text{m}$
0.00337	27	0.0178	0.0112	0.0092
0.00168	24	0.0156	0.0098	0.0080
0.00084	20	0.0127	0.0080	0.0066
0.00042	17	0.0107	0.0067	0.0055
0.00031	16	0.0098	0.0062	0.0051
0.00008	13	0.0081	0.0051	0.0042

註：基腳保護塊體尺寸如下

異型塊：0.035m 寬×0.027m 高×0.051m 長

白色塊：0.022m 寬×0.017m 高×0.033m 長

紅色塊：0.018m 寬×0.014m 高×0.026m 長



以上述方式估算每組保護試驗之 t_p 時間，結果列如表 2， t_p 估算值介於 4,658 秒~39,391 秒。其中，項次 117~128 列中，為近順直段尾檻處之布置，均採用 4 排保護塊排放，且表中之 d_{bs} 為該尾檻處之底床最大冲刷深度，與項次 1~116 列不同，因此，不標 x_B 值。

4.2.2 不同斜向流攻角之冲刷深度比值

56 組不同斜向流攻角 (A30 (21 組)，A60 (23 組)，A75 (12 組)) 之動床試驗來流一般冲刷深度 (d_{gs}) 與基腳最大冲刷深度 (d_{bs})，觀測成果列如表 1，計算不同斜向

流攻角各對應組 (具相同的試驗單位寬度流量、底床粒徑與底床坡度) 之冲刷深度比值 ($d_{bs,Ai}/d_{bs,A60}$ 與 $d_{gs,Ai}/d_{bs,A60}$)，同列於表 1，並統計其比值之平均值與標準偏差結果， $d_{bs,Ai}/d_{bs,A60}$ 分別為 A30 (0.725, 0.090) 與 A75 (1.122, 0.058)，顯示，A30、A60、A75 之斜向流攻角係數 (k_i)，分別可以 0.725、1.000 及 1.122 來做為其代表參考值。 $d_{gs,Ai}/d_{bs,A60}$ 之比值則分別為 A30 (0.228, 0.085)、A60 (0.170, 0.075) 及 A75 (0.118, 0.055)，平均值隨著斜向流攻角加大而明顯減小，依據 (3) 式，擇取 $k_{i,A0} = 0.228$ 做為分析 A0 時 k_i 之參考值。

4.2.3 斜向流攻角係數

以 4.2.2 節分別所得之 A0、A30、A60、A75 斜向流攻角係數(k_i)=0.228、0.725、1.000 及 1.122 為參考值，進行基本式(2)式及(4)式之迴歸與係數推算，得到 $a_1=0.123$ ， $b_1=2.866$ ， $c_1=0.507$ ， $c_2=0.3415$ ，經驗式及半經驗式分別為

$$k_i = 0.123 \times (A_i + 2.866)^{0.507} \dots\dots\dots (6)$$

$$k_i = \left(\frac{A_i}{60} \right)^{0.470} \dots\dots\dots (7)$$

(6)式與(7)式之 A_i 與 k_i 關係，展繪如圖 7，顯示，(7)式之半經驗式與(6)式之經驗式，兩者在 $A_{15} \sim A_{75}$ 間之曲線相當吻合，可驗證本研究 2.1 節所提出的假設，即不同斜向流攻角係數(k_i)與二次流強度參數(S_f)之比值具有指數關係(適用於 $A_{15} \sim A_{75}$)。又(7)式在應用上，僅可針對於基腳最大冲刷深度範圍之基腳保護，並未能考慮到其後銜接近順直段具尾檻情況時之基腳保護設計，而(6)式，已考慮到這樣的設計需求，斜向流過彎後，進入到近順直段時，雖然部分水流會開始沿程產生反射至對岸，再次形成其蜿蜒流態，而部分水流仍然會偏向於堤防側並沿著堤防流動。因此，本項近順直段尾檻之斜向流攻角係數採用(6)式，不同斜向流攻角 A_0 、 A_{15} 、 A_{30} 、 A_{45} 、 A_{60} 、 A_{75} 計算所得之 k_i 值分別為 0.21、0.53、0.72、0.87、1.00 及 1.12。

4.2.4 無因次基腳保護布置橫斷面積經驗式

首先，依基本式(5)式，進行 60 組 A60 斜向流攻角保護試驗之無因次基腳保護布置橫斷面積經驗式參數迴歸檢定，結果列如圖 8 及表 2 之項次 1~60 列。其中， $(A_s / d_{50}^2)_r$ 一欄，為計算值與觀測值之比值，平均比值為 1.048，檢定迴歸式為

$$\frac{A_s}{d_{50}^2} = 7.39 \times 10^{-5} \left(\frac{q_p t_p}{d_{50}^2} \right)^{0.957} \dots\dots\dots (8)$$

上式迴歸結果之相關性良好， $r^2=0.94$ ，相對於(5)式之係數，其 $k_i = 1.000$ 、 $k = 7.39 \times 10^{-5}$ 、 $c = 0.957$ 。其次，針對(8)式，進行 14 組 A60 斜向流攻角保護試驗之驗證比對，結果亦同列如圖 8 及表 2， $(A_s / d_{50}^2)_r$ 一欄之平均值為 1.070，與檢定值(1.048)相近，據此，(8)式可做為與 A30、A75 及 A0 等不同斜向流攻角者之比較基準式。

將 9 組 A30、33 組 A75 及 12 組 A0 等不同斜向

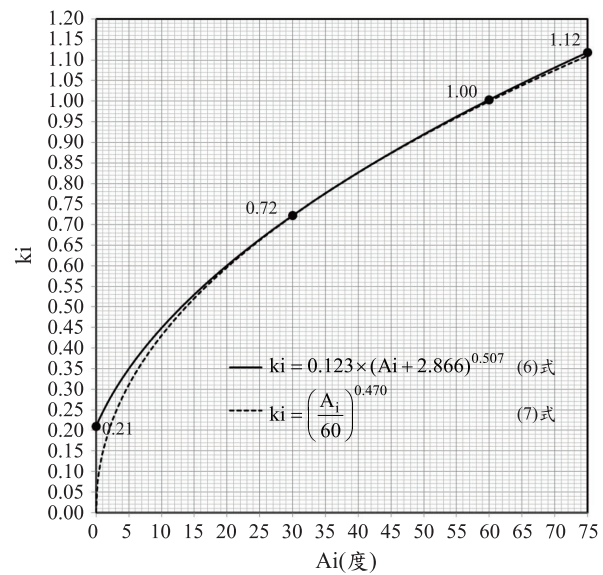


圖 7 A_i - k_i 關係圖

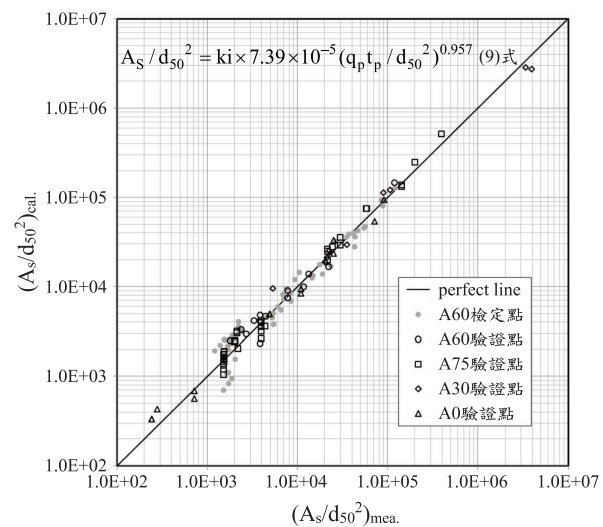


圖 8 無因次基腳保護布置橫斷面積經驗式檢定與驗證

流攻角保護試驗之相關參數(q_p 、 t_p 、 d_{50})分別代入(8)式中，結果列如表 2。其 $(A_s / d_{50}^2)_r$ 一欄之平均比值分別為 A60 檢定均值的 1.407 倍、0.841 倍及 4.760 倍，意即，其無因次基腳保護布置橫斷面積分別可縮小(或增大)的比值，分別為這些倍數的倒數。其中，A30 者之縮小比值為 0.711，與由(6)式之計算值 $k_i = 0.72$ 極為吻合；A75 者之增大比值為 1.189，大於(6)式之計算值 $k_i=1.12$ ，原因在於各保護布置時，雖然係以約 1.12 倍進行驗證設計，而絕大多數之試驗組，均已另外加入水平加強塊之設計所致，估計本項水平加強塊之增大效應約為 0.077 倍；A0 者(A75 斜向流過彎後近順直段尾檻處)之縮小比值為 0.210，與由(6)式之 k_i 計算值

相同。將表 2 項次 75~83 列、84~116 列、117~128 列中 $(A_s / d_{50}^2)_r$ 欄之值，分別乘上 0.711、1.189 及 0.210，結果點繪如圖 8 所示，計算值與觀測值驗證具有良好的一致性，據此，本研究提出通用斜向流攻角之無因次基腳保護布置橫斷面積經驗式為

$$\frac{A_s}{d_{50}^2} = ki \times 7.39 \times 10^{-5} \left(\frac{q_p t_p}{d_{50}^2} \right)^{0.957} \dots\dots\dots (9)$$

上式中，ki 為斜向流攻角係數，採用(6)式之經驗式，做為現場相關規劃設計時之案例應用。

4.3 現場規劃設計案例應用

本研究以模型相似律進行各組保護試驗，採用等比模型比例尺有 1/50、1/80 及 1/100，對應的保護塊體分別為異型塊(原體為 10 噸)、白色塊及紅色塊。當設定現場原體時間為 48 小時(2,880 分鐘)，依福祿律相似轉換之試驗時間分別約為 408 分鐘、322 分鐘及 288 分鐘。當前述等比模型比例尺均以 1/50 來看待時，紅色塊採用試驗時間為 288 分鐘，換算成原體時間約為 34 小時，意即，本研究相關分析適用於現場原體時間為 34~48 小時，擇取保守值為 36 小時~48 小時。

本研究對於模型與現場估算 t_p 時間採用的方式雖然略有不同，分別係在模型定量流與現場變量流情況下所做之估算，後者必須新增現場河床質臨界起動流量(Q_c)之界定後，才能夠開始計入 t_p 時間，而其共通性均在估算斜向流冲刷至主要塊體基礎之時間，前者之定量流估算結果保守，適合於現場河防需求。

現場規劃、設計時，對於斜向流攻角(Ai)、斜向流攻角係數(ki)、來流河寬(B)、洪峰單位寬度流量(q_p)、洪峰有效稽延時間(t_p)及河床質 d_{50} 等，均需為基本已知。其中，斜向流攻角(Ai)及來流河寬(B)，可參考經濟部水利署水利規劃試驗所(2016；2019)之二維定床數值模擬方式劃設得到，進而再依(6)式計算其斜向流攻角係數(ki)； q_p 為河道洪峰單位寬度流量，經統計臺灣主要河川水利署轄管河段洪峰流量在 $28 \text{ m}^2/\text{s}$ 以下者，一般可設定為該河段 2 年至 10 年重現期距洪水量($Q_2 \sim Q_{10}$)搭配來流河寬(B)求得；決定 t_p 時，應先確知該河段河床質 d_{50} 之臨界起動流量(Q_c)。經濟部水利署水利規劃試驗所(2013~2014；2017~2018)曾以無線追蹤粒子的觀測方式來推得現場近順直河段河床質 d_{50} 之臨界起動流量(Q_c)，並提出 6 組現場不同近順直河段之觀測值供參，本項 t_p 參數值為河床質 d_{50} 臨界起動流量(Q_c)至河道洪峰(Q_p)之時間稽延。上述參數俱

全後，即可依(9)式估算得到設計河段堤防基腳所需的保護布置橫斷面積(A_s)。

以中港溪崁頂寮堤防、大安溪水尾堤防、大甲溪豐洲堤防及濁水溪水底寮堤防為規劃、設計案例，這些堤防都曾發生過颱風致災乃至破堤情況。依前述方式估算 t_p 分別在 36 小時與 48 小時及不同河道洪峰單位寬度流量(q_p)時之堤防基腳保護布置橫斷面積(A_s)，如圖 9 所示。

估算得到 A_s 後，可以進一步布置異型塊基腳保護工，設計參考如圖 1 所示，適用於不同斜向流攻角(A0~A75)之水流衝擊，其中，主要保護塊的橫向斜放坡度均採 1：7 設計，且均布設數排平放的加強塊(寬度為 L_2 ， $L_2 \geq dL_2$)。對於緊鄰基腳主要保護塊基礎深度(dL_1)的設計原則為： dL_1 至少須大於來流一般冲刷深度(d_{gs}) + 保護塊高度(約 1.35 m)，來流一般冲刷深度(d_{gs})可依郭與謝(2018)或經濟部水利署水利規劃試驗所(2016)之經驗式推得。另對於基腳保護塊體的縱向布置範圍，參考 4.1.4 節之基腳最大冲刷深度發生位置分析結果，建議採用全部轉彎段及過彎後 2 倍來流河寬範圍，其後再以 1.5 倍來流河寬漸變至近順直段尾檻處的布置方式。綜上所述，可據以提供做為現場堤防基腳保護規劃、設計時之應用參考。

五、結論與建議

本研究在實驗室內，經由一系列試驗渠槽基本試驗及分析主導參數之檢定與驗證，迴歸得到一組通用斜向流攻角之無因次基腳保護布置橫斷面積經驗式((9)式+(6)式)，搭配圖 1 之基腳保護工橫斷面設計，可據以提供現場堤防基腳保護布置之規劃、設計等實務應用參考。建議的適用範圍為：斜向流攻角(Ai)介於 0~75 度，河道洪峰單位寬度流量(q_p)小於 $28 \text{ m}^2/\text{s}$ ，洪峰有效稽延時間(t_p)介於 36 小時~48 小時(129,600 sec~172,800 sec)，河床質粒徑(d_{50})介於 8 mm~337 mm。

河道洪峰流量及斜向流攻角，為現場堤防基腳保護布置的重要設計依據。斜向流攻角有可能會隨著時間而變大(如大甲溪豐洲堤防)，也有可能變小(如大安溪水尾堤防)，古經驗亦提到：小水走彎，大水走直。意即，斜向流攻角會隨著過大的洪水而改變。因此，設計時，建議應參考該河段歷年的洪水流量及其造成的河道流路變遷與破壞位置，決定增加適當的加強保護布置範圍，並搭配本研究的基腳保護布置方式，如此，即可以有效降低颱風斜向流衝擊時的基腳傾倒破壞機率，進而提高堤防的安全性。

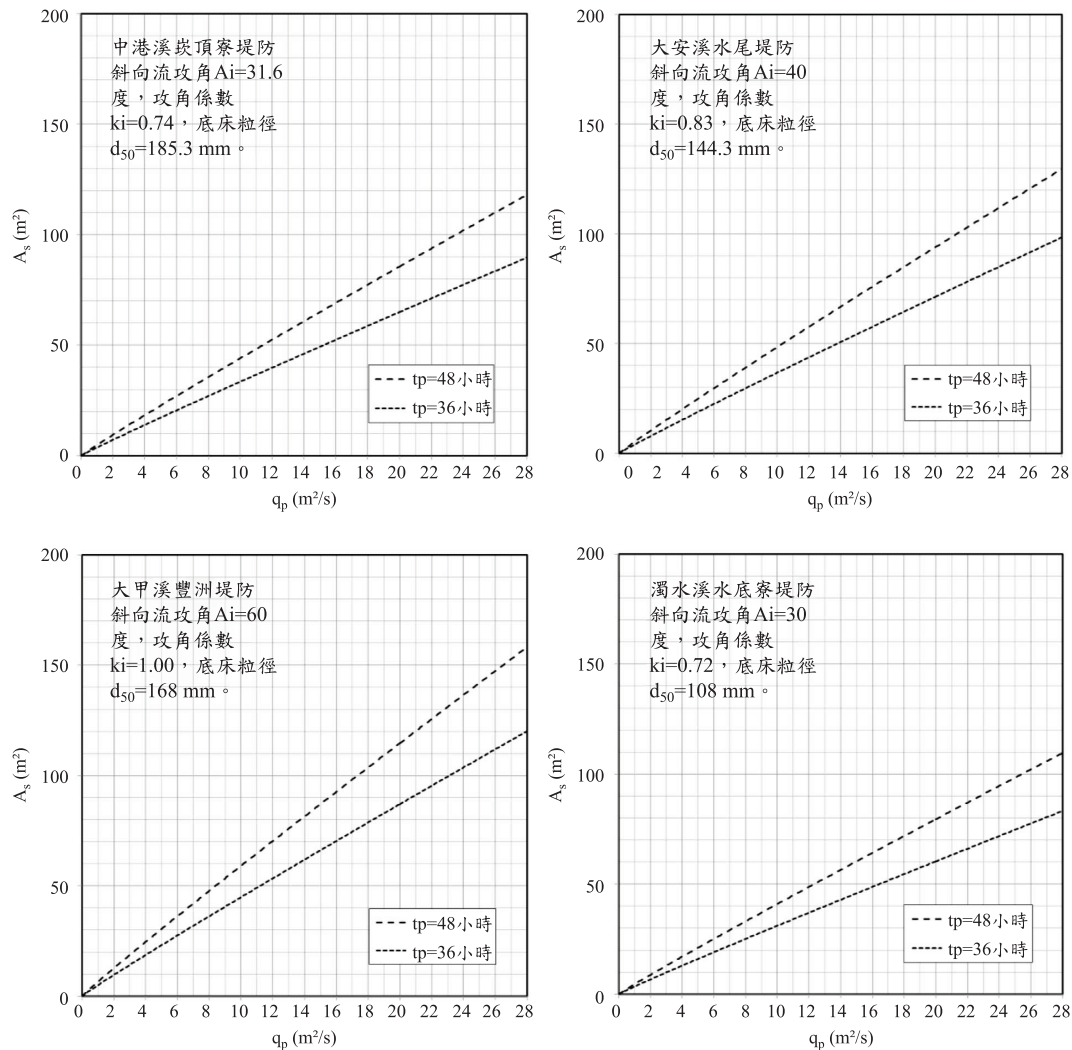


圖 9 斜向流衝擊下之堤防基腳保護布置橫斷面積規劃設計案例參考

參考文獻

1. Blench, T., "Mobile-Bed Fluviology," The University of Alberta Press, Edmonton, Canada, 1969.
2. Chang, H.H., "Fluvial Processes in River Engineering," San Diego State University, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 1992.
3. Chatley, H. "Curvature Effects in Open Channels," Engineering, London, England, Vol. 131, 1931.
4. Galay, V.J., Yaremko, E.K. and Quazi, M.E., "River Bed Scour and Construction of Stone Riprap Protection," Sediment transport in gravel-bed rivers, edited by C.R. Thorne, J.C. Bathurst and R.D. Hey, John Wiley & Sons, Inc., New York, U.S.A., pp.353-379, 1987.
5. Garcia, M.H., "Sedimentation Engineering," ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 110, 2008.
6. Maynard, S.T., "Toe-Scour Estimation in Stabilized Bendways," *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 122(8), pp.460~464, 1996.
7. Raudkivi, A.J., "Loose Boundary Hydraulics," University of Auckland, N.Z., A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1998.
8. Thorne, C.R. and Abt, S.R., "Velocity and Scour Prediction in River Bends," Contract Rep. HL-93-1, U.S. Army Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, U.S.A., 1993.
9. U.S. Army Corps of Engineers (USACE), "Hydraulic Design of Flood Control Channels," Engineer manual 1110-2-1601, Washington, D.C., 1994.
10. 經濟部水利署第三河川局, 「大安、大甲溪災害原因

調查及治理對策檢討與改善」，2005。

11. 經濟部水利署水利規劃試驗所，「颱洪河道短期一般冲刷之觀測研究」(1/2)~(2/2)，2013~2014。
12. 經濟部水利署水利規劃試驗所，「河道堤防之基腳冲刷與保護試驗研究」(第 1 期)，2016。
13. 經濟部水利署水利規劃試驗所，「彎道堤防基腳冲刷之動態觀測」(1/2)~(2/2)，2017~2018。
14. 經濟部水利署水利規劃試驗所，「易致災河段潛勢分析及安全監測之研究」(1/2)~(2/2)，2016~2017。
15. 郭耀麒、謝天元：「間歇性河道之短期一般冲刷與斜向流基腳最大冲刷估算」，農業工程學報，第 64 卷第 4 期，pp. 23~43，2018。
16. 經濟部水利署水利規劃試驗所，「河道堤防之基腳冲刷與保護試驗研究」(第 2 期)，2019。

收稿日期：民國 109 年 01 月 03 日

修正日期：民國 109 年 04 月 23 日

接受日期：民國 109 年 05 月 04 日