

投潭水沖擊位置受制上下游渠床坡度影響之探討

黃劭暉 謝俊賢 陳正炎*

摘要 台灣河道大多坡陡流急，縱向沖刷能力大，為達消滅洪水沖刷能力，達到穩定河床，保護跨河、防洪構造物安全及取水供民生、灌溉之目的，設置跌流工、防砂壩或攔河堰等橫向構造物為慣常使用之方法。雖可穩定上游河道，卻因砂石無法向下運送，而淤積於跌水工前河道渠床，導致跌水工上游渠床產生坡度，使水流成超臨界流況沖擊下游渠床，亦是消能工最易受損之處。本研究主要係藉由理論推導與實驗比較，探討投潭水沖擊位置受制跌流工上下游坡度改變之影響。

關鍵詞：沖擊位置、渠床坡度、投潭水。

The Effect of Free Over-fall by Upstream and Downstream Channel Bed Slopes on Impact Position

Jie-Hui Huang Chun-Hsien Hsieh Jen-Yan Chen*

ABSTRACT Most Taiwanese rivers are rapid and steep, with a large capacity for vertical erosion. Hydraulic structures that cross rivers, such as drop structures, check dams and weirs, are widely used to decrease flood erosion, to stabilize riverbeds, to protect structures that cross rivers and to provide public water and irrigation. The hydraulic structures make the upstream channel stable and sediments cannot be transported downstream so they remain in front of the riverbed of drop structures on the other side. These structures usually induce a change in the upstream slope and the super critical flow condition, which produces a large impact force downstream and destroys energy dissipating structures. This paper studies the impact location for different upstream and downstream channel bed slopes and compares a theoretical analysis and experimental results.

Key Words : Impact position, channel bed slopes, free over-fall.

一、前言

為達成河道治理或取水等目標，水利工程師經常於河道中設置跌流工、攔河堰或防砂壩等工程設施。雖可穩定上游河道，但因構造物上下游高度相差過大，使高速水流瞬間沖擊下游面，或稱投潭水流 (free overfall flow) 現象。一旦下游面河床承受鉅大沖擊，間接地產生嚴重局部沖刷坑 (scour hole)，造成水工結構物之破壞。投潭水流消能之過程，為經過一固定跌流高度，因水舌流 (napped flow) 撞擊渠床，導致一部分之水流轉變成為水深較淺且流速較快的超臨界流 (supercritical flow) 向下游竄流，另一則產生迴流壅升形成一個具有渦流結構之水墊區 (pool)，且跌流消能工之水舌沖擊力最大及最具沖刷潛勢，亦導致消能工最易受損之原因。據臺灣千餘座防砂壩資料統計，其上游坡度不大於 6% 約佔全部防砂壩之八成，說明投潭水流工上游段為坡度渠床較符合實際河川情形，至於下游坡度小於等於 9% 者亦已佔大多數，因而渠床坡度將是投潭

水流研究之重要因子。本文先推導理論式，該理論式涵蓋上、下游渠床縱坡因子，可廣泛呈現上、下游渠床為水平或具縱向坡度條件下之沖擊位置，以釐清沖擊位置與渠床坡度之關係。

二、理論分析

本研究以改變不同上下游渠床坡度，對於投潭水流下游段縱向之沖擊位置 L_d 之影響進行探討。投潭水流作用下造成之沖擊現象，非水平式投潭水流示意圖如圖 1 所示，圖中 q 為單寬流量、 Y_0 為上游水深、 H 為跌流高度，以及 α 為上游渠床角度、 β 為下游渠床角度，且上、下游渠床坡度分別為 $S_u (= \tan \alpha)$ 、 $S_d (= \tan \beta)$ 。

1. 沖擊位置

利用牛頓力學原理推導沖擊位置，假設水流離開上游跌流工時之流速為 u_0 ，參酌圖 1 則可知跌落時間 $t = L_d / u_0 \cos \alpha$ ，設

g 為重力加速度，依自由落體可推得垂直跌落高度為：

$$H + L_d \tan \beta + \frac{Y_b}{2} = \frac{1}{2} g t^2 + u_b \sin \alpha \times t \quad (1)$$

整理 (1)，得：

$$L_d = \frac{-(\tan \alpha - \tan \beta) + \sqrt{(\tan \alpha - \tan \beta)^2 + g \frac{1 + \tan^2}{u_b^2} (2H + Y_b)}}{g \frac{1 + \tan^2 \alpha}{u_b^2}} \quad (2)$$

分別將 $\tan \alpha = S_u$ 及 $\tan \beta = S_d$ 代入 (2) 式得：

$$L_d = \frac{-(S_u - S_d) + \sqrt{(S_u - S_d)^2 + g \frac{1 + S_u^2}{u_b^2} (2H + Y_b)}}{g \frac{1 + S_u^2}{u_b^2}} \quad (3)$$

式中 $u_b = \frac{q}{Y_b}$ 、 $Y_b = \frac{2Y_0}{F_0^{-2} \cos^2 \alpha + 2}$ ，其中跌流工邊緣水深 Y_b 為徐堯鉉 (2010) 推導之理論式， F_0 為上游福祿數 $F_0 = \frac{u_0}{\sqrt{gY_0}}$ 式中 u_0 為上游流速。(3) 式可視為沖擊位置 L_d 之理論解通式。

2. 坡度效應

(1) 坡度效應比 δ

為顯示坡度對各相對沖擊位置 $\bar{L}_d (= L_d / H)$ 之影響，定義坡度效應比 δ ：

$$\delta = \bar{L}_{d(s>0)} / \bar{L}_{d(s=0)} \quad (4)$$

式中 $\bar{L}_{d(s>0)}$ 代表渠床坡度 $S > 0$ 時之沖擊位置， $\bar{L}_{d(s=0)}$ 代表渠床坡度 $S = 0$ 時之沖擊位置，當坡度效應比中 δ 為正數，即表示該沖擊位置與渠床坡度呈正相關；反之，則為負相關。

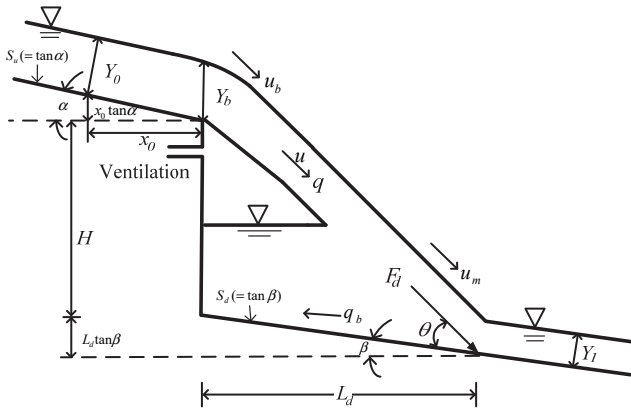


圖 1 非水平式投潭水力學機制示意圖

Fig.1 Mechanical mechanism of a non-horizontal drop structure with free overfall

(2) 坡度影響值 η

分析當坡度相同時，上下游渠床坡度效應之影響程度定義為 η ：

$$\eta = \delta_a / \delta_b \quad (5)$$

式中 δ_a 為改變上游渠床坡度 S_u 且下游為水平時之坡度效應； δ_b 為改變下游渠床坡度 S_d 且上游為水平時之坡度效應，以相對比值來顯示坡度改變對沖擊位置影響若何。當 $\eta > 1$ 時，表示上游坡度 S_u 改變對沖擊位置影響較下游坡度 S_d 改變時大； $\eta < 1$ ，則為下游坡度 S_d 改變較上游坡度 S_u 改變大；若 $\eta = 1$ ，則上下游坡度改變對沖擊位置之影響程度相當。

三、渠槽試驗

依試驗設備、試驗佈置及試驗步驟與條件說明如下。

1. 試驗設備與佈置

(1) 試驗渠槽

本試驗研究之水工渠槽試驗係於中興大學土木工程學系渠力研究室進行，試驗所用之水槽長 11 m，寬 0.3 m 及深 0.4 m，渠槽兩面均鑲有透明玻璃壁，以利試驗進行時觀測變化情形。渠槽底座附有升降螺旋可用以調整上下游渠床坡度。

① 電腦控制三維量測系統

本試驗量測系統係採自動化三維量測裝置，架設於試驗渠段正上方之軌道上，其支架具有沿主流方向移動及在垂直於主流方向伸展之功能，且可放置水位計，以量測試驗所需之資料，並採電腦定位控制以擷取試驗資料，達到量測自動化，因而減低人為控制所產生之誤差。

② 水深測定及記錄系統

水深測定系統採用 Keyence 公司之 RPS-401A 型超音波水位計量測水深，其原理為由水位計測頭的發射器射出超音波，當測量波撞及水面後會產生反射現象，而反射回測頭的測量波會被測頭內的接收器接收，藉著發射及反射作用的時間差得到其相應的伏特數，再經由類比數位轉換系統 (A-D Converter) 將所量得的伏特數輸入 PC 電腦記錄之，再利用電腦程式將所量得的伏特數資料轉換成水深。此種水位計之解析度可達 1 mm，其精度為 $\pm 1\%$ ，RPS-401A 型水位計量測範圍為 100~1,000 mm。

(2) 試驗佈置

為確保入流條件的一致性，渠槽前設高平水箱，再利用電腦操控閘門控制入流量之大小，藉由電腦程式的設定，可進行上游流況為定量流或變量流的渠槽試驗。在渠槽後設集水箱收集試驗所用之水，再藉由抽水馬達將所收集的水抽回高平水箱，形成一循環試驗系統，如圖 2 所示。渠道前段進水處設有塑膠吸管做成的整流

工, 以穩定入流的流況。為避免貼壁流的產生及確保自由舌流之穩定性, 並保持自由水舌和跌水工間所形成之氣墊區內之壓力為一大氣壓, 於跌水處的垂直壁上鑽四個孔徑為 1 cm 的通氣孔外接通氣管做為通氣用, 鑽孔處高度以不影響試驗進行時所產生的水墊區水深為原則。同時為了不讓通氣管影響出水狀況, 在許可範圍內盡量將通氣孔靠近渠底並將通氣管壓至渠底, 直到距離跌水處前 3 m 處才露出水面。本試驗在量測單階自由跌水縱向壓力試驗佈置方面, 選用硬度較高的壓克力板做一個符合試驗區大小之矩形模型, 其中間有深 2.5 cm, 寬 9 cm 之凹槽, 內有不同長度之活動壓克力塊, 並將部分壓克力塊中央挖洞埋設壓力計, 以利不同位置之壓力量測。

2. 試驗步驟與條件

(1) 試驗條件與假設

本試驗假設①二維清水定量流, ②水墊區內之壓力為一大氣壓, ③試驗過程中忽略透明玻璃邊壁對水體所產生的邊壁效應, ④水體在流程中與透明玻璃壁、壓克力板相互摩擦所造成的能量損失, 係自由跌水衝擊所耗損。進行水工試驗時, 分別變換上下游渠床坡度 ($S=1\sim6\%$) 及跌水高度 ($H=0.15\sim0.30\text{ m}$), 試驗之單位寬度流量 q 為 $0.00251\sim0.0217\text{ cms/m}$ 、跌水數 D 則介於 $0.391\times 10^{-4}\sim 104.82\times 10^{-4}$ 之間。相關試驗條件詳見表 1。

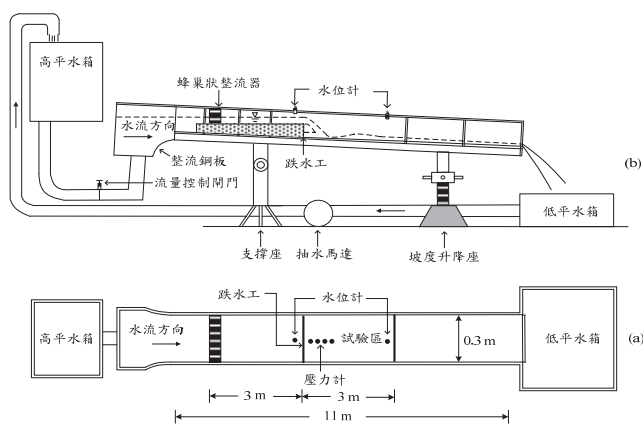


圖 2 渠槽試驗佈置圖 (a) 俯視圖 (b) 側視圖

Fig.2 Experimental configuration in the laboratory flume (a) top view (b) side view

表 1 試驗條件

Table 1 Experiment conditions for free overfall

物理量	試驗條件
上游渠床坡度 S_u (%)	1、3、6
下游渠床坡度 S_d (%)	1、3、6
跌流高度 H (cm)	15、20、25、30
單寬流量 q (cms/m)	0.00251~0.0217
跌水數 $D(=q^2/gH^3)(\times 10^{-4})$	0.391~104.82
試驗組數	180

(2) 試驗步驟

- ① 選定一渠床坡度 S 及跌水高度 H 進行試驗。當上游渠床坡度改變時, 下游渠床坡度固定為 0; 同理, 下游渠床坡度改變時, 上游渠床坡度固定為 0。
- ② 控制不同水槽閘門開口大小, 且由超音波水位計量測上下游水深, 並利用總體積法來率定其對應之單寬流量 q 及跌水數 D 。
- ③ 記錄試驗之自由跌水衝擊位置。
- ④ 計算自由跌水衝擊力。
- ⑤ 改變單階自由跌水流量, 並重複步驟③和④。
- ⑥ 變換跌水高度重複步驟③~⑤。
- ⑦ 變更渠床坡度重複步驟③~⑥。

四、結果與討論

茲以徐焱鉉 (2010) 數據進行案例分析, 單寬流量採 $q=0.0216\text{ cms/m}$, 跌流高度為 $H=0.25\text{ m}$, 跌水數為 $D(=q^2/gH^3)=0.00304$, 跌流工上、下游渠床坡度 (S_u 、 S_d) 則分別考慮 0、2、4 及 6%, 對衝擊位置 L_d 及其坡度效應討論如后。

1. 衝擊位置

(1) $S_u = 0\%$, $S_d \neq 0\%$

當跌流工上游渠床坡度 $S_u = 0\%$ 時分別將前述數據代入 (3) 式得:

$$L_d = 0.1 \times u_b^2 \times \left[S_d + \sqrt{S_d^2 + \frac{9.81}{u_b^2} (0.5 + Y_b)} \right] \quad (6)$$

若 $S_d = 6\%$ 時,

$$L_d = 0.1 \times u_b^2 \times \left[0.06 + \sqrt{(0.06)^2 + \frac{9.81}{u_b^2} (0.5 + Y_b)} \right] \quad (7)$$

計算 $Y_b = 0.0235\text{ m}$ 、 $u_b = 0.919\text{ m/s}$ 並代入 (7) 式, 得 $L_d = 0.218\text{ m}$ 。

(2) $S_d = 0\%$, $S_u \neq 0\%$

當跌流工下游渠床坡度 $S_d = 0\%$ 時代入 (3) 式得:

$$L_d = \frac{u_b^2 \times \left[-S_u + \sqrt{S_u^2 + \frac{9.81(1 + S_u^2)}{u_b^2} (0.5 + Y_b)} \right]}{9.81(1 + S_u^2)} \quad (8)$$

若 $S_u = 6\%$ 時,

$$L_d = 0.1 \times u_b^2 \times \left[-0.06 + \sqrt{(0.06)^2 + \frac{9.85}{u_b^2} (0.5 + Y_b)} \right] \quad (9)$$

計算 $Y_b = 0.0147\text{ m}$ 、 $u_b = 1.46\text{ m/s}$ 並代入 (9) 式, 得 $L_d = 0.322\text{ m}$ 。

當跌流工上、下游渠床均為水平時之衝擊位置最近, 當跌流工上、下游渠床均具坡度時之衝擊位置逐漸

增遠；沖擊位置與渠床坡度成正相關，且上游渠床坡度之影響效應較下游渠床坡度為明顯，如圖 3 所示。

將實驗所獲致之跌流沖擊位置 L_d ，以跌流高度 H 將跌流沖擊位置無因次化，並與跌水數 D 及上、下游渠床坡度之試驗值繪製如下圖 4，由圖中可發現相對沖擊位置 $\bar{L}_d (= L_d / H)$ 隨跌水數 D 增加而增大，與理論值呈現相同之趨勢，茲以上、下游渠床坡度分別採 $S_u = 1\%$ 及 $S_d = 1\%$ 為例，並將 4 種跌流高度區分並繪製如圖 5，且由跌水數 $D (= q^2/gH^3)$ 可知相對沖擊位置與跌流高度關係成反比，故由圖中可發現相對沖擊位置隨跌流高度增加而減少之現象。

茲沖擊位置採無因次表示，以期能達廣泛應用。換言之，將相對沖擊位置 $\bar{L}_d (= L_d / H)$ 進行結果分析。根據研究之試驗條件如表 1 所示，迴歸得沖擊位置分別與渠床坡度 S 及跌水數 D 之相關經驗式：

$$\bar{L}_d = 1.799D^{0.143}e^{6.655S_u + 1.051S_d} \quad (R^2 = 0.962) \quad (10)$$

由 (10) 式之判定係數 R^2 值為 0.962，顯示上述經驗模式相關性極高，且顯現相對沖擊位置 \bar{L}_d 與跌水數 D 、上、下游渠床坡度 S_u 、 S_d 呈正相關。

2. 坡度效應

將 (10) 式經驗式配合 (4) 式可得相對沖擊位置 \bar{L}_d 之坡度效應比 δ ，如下所述：

(1) 坡度效應比 δ

由 (10) 式中分別探討上、下游渠床坡度 S_u 、 S_d 之坡度效應，得：

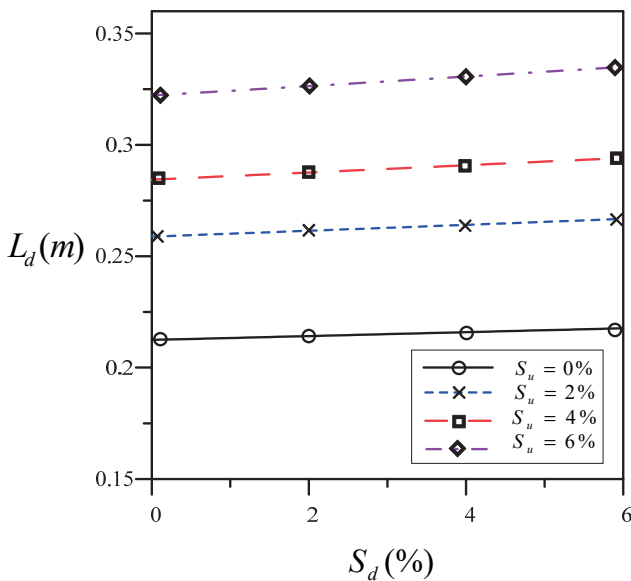


圖 3 沖擊位置 L_d 與上、下游渠床坡 S_u 、 S_d 之關係圖 ($D = 0.00304$)

Fig.3 Relationship between upstream/downstream channel bed slope S_u/S_d with impact position $L_d(D = 0.00304)$

$$\text{Case a}(S_d = 0\%, S_u \neq 0\%) : \delta_a = e^{6.655S_u} \quad (11a)$$

$$\text{Case b}(S_u = 0\%, S_d \neq 0\%) : \delta_b = e^{1.051S_d} \quad (11b)$$

將坡度效應比 δ 與坡度之關係會於圖 6，由圖中顯示當坡度越大相對沖擊位置也越大，亦即與坡度之關係成正

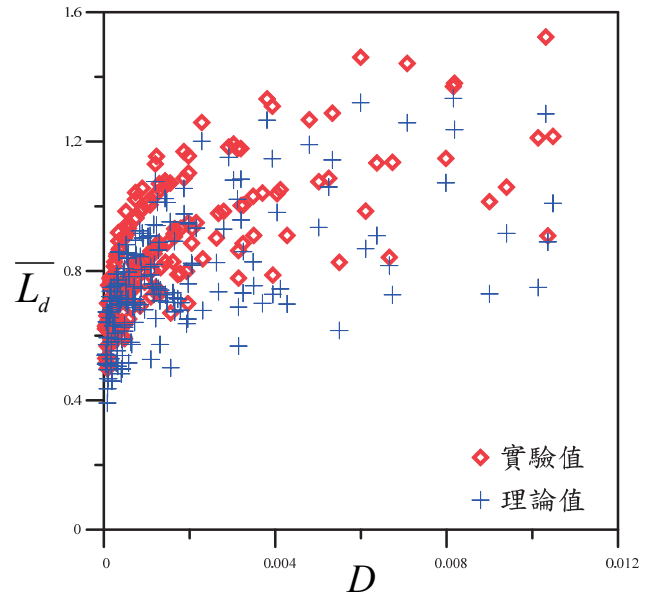


圖 4 相對沖擊位置 $\bar{L}_d (= L_d / H)$ 實驗值、理論值與跌水數 D 之關係圖

Fig.4 Relationship between dimensionless impact position \bar{L}_d experimental and theoretical values with drop number D

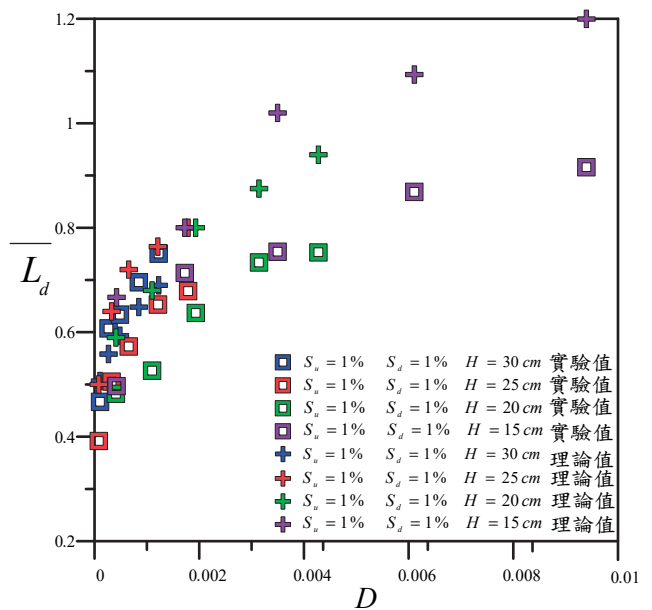


圖 5 相對沖擊位置 $\bar{L}_d (= L_d / H)$ 實驗值、理論值與跌水數 D 之關係圖 ($S_u = S_d = 1\%$)

Fig.5 Relationship between dimensionless impact position \bar{L}_d experimental and theoretical values with drop number $D (S_u = S_d = 1\%)$

相關,且改變上游坡度 S_u 對沖擊位置之影響較改變下游 S_d 大。而當改變上游坡度 S_u ($S_d = 0\%$) 時與徐 (2010) 相同, 改變下游坡度 S_d ($S_u = 0\%$) 時則與張 (2008) 時相同。

(2) 坡度影響值 η

為探討上下游渠床坡度效應對水力參數影響之程度, 因此將相對沖擊位置 \bar{L}_d 之坡度效應採以 (5) 式之坡度影響值 η 表示, 即:

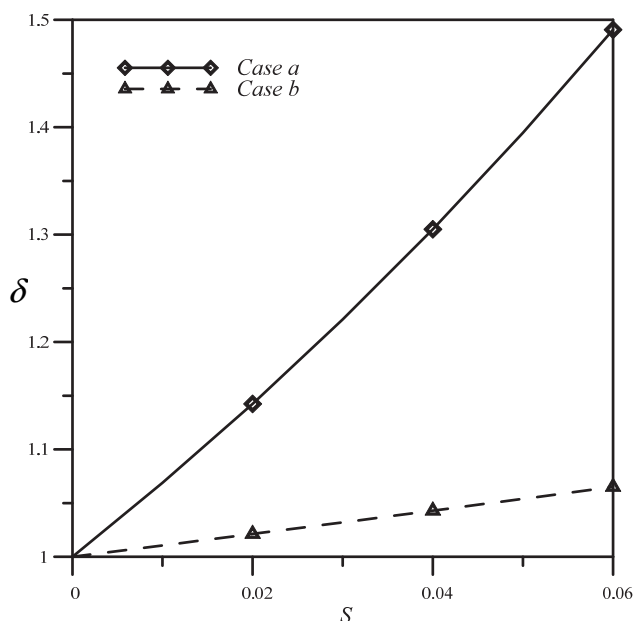


圖 6 坡度效應比 δ 與渠床坡度 S 之關係圖 (相對沖擊位置 \bar{L}_d)

Fig.6 Relationship between slope effect ratio δ with channel bed slope S (dimensionless impact location \bar{L}_d)

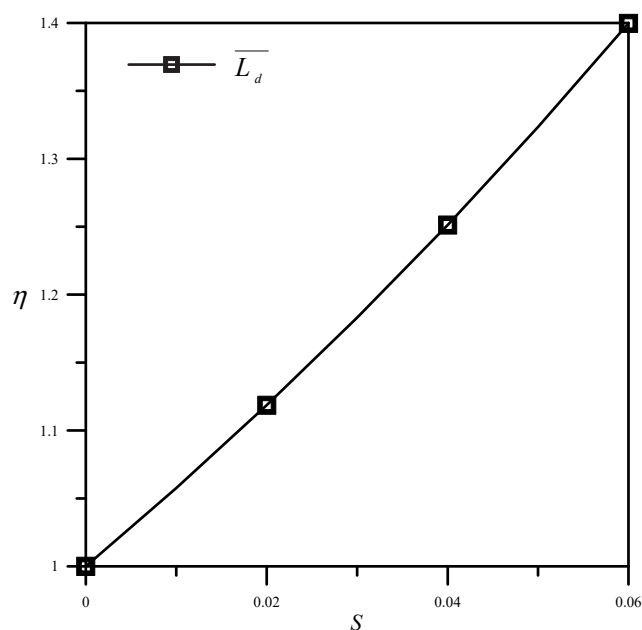


圖 7 坡度影響值 η 與渠床坡度 S 之關係圖

Fig.7 Relationship between slope effect value η with channel bed slope S

$$\eta = e^{5.604S} \tag{12}$$

式中 η 表示相對沖擊位置 \bar{L}_d 。進行改變渠床坡度 $S = 2\%$ 、 4% 及 6% 探討分析之, 當渠床坡度 $S = S_u = S_d = 2\%$ 時, $\eta = 1.119$; 當 $S_u = S_d = 4\%$ 時, $\eta = 1.251$; 當 $S_u = S_d = 6\%$ 時, $\eta = 1.400$ 。將渠床坡度 S 與 Case a 及 Case b 坡度效應比之比值 η 繪於圖 7。因所得之坡度影響值皆大於 1, 且由圖可知沖擊位置為改變上游渠床坡度 S_u 之影響較改變下游渠床坡度 S_d 來的大, 且有坡度越大影響越大之趨勢, 並整理於表 2。

五、結 論

本研究針對上、下游渠床均具坡度之情形進行探討, 推導改變跌流工上、下游坡度後之沖擊位置之影響, 獲致以下幾點結論陳述如后。

1. 於投潭水流條件相同時, 即相同跌水數 D 作用下, 當上、下游渠床均具坡度 S 時與沖擊位置 L_d 呈正相關且沖擊位置 L_d 之上游渠床坡度 S_u 對其影響程度分別大於下游渠床坡度 S_d 。
2. 文中相對沖擊位置 $\bar{L}_d (= L_d / H)$ 隨跌水數 D 增加而增大, 與理論值呈現相同之趨勢且相對沖擊位置隨跌流高度增加而減少之現象。
3. 於實驗條件相同時, 相對沖擊位置 \bar{L}_d 與上、下游坡度之關係成正相關。當渠床坡度 $S = 6\%$ 時相對沖擊位置 \bar{L}_d 之坡度效應比 $\delta_a = 1.491$ 、 $\delta_b = 1.065$ 屬遞增。且當上游坡度越大影響越顯著, 當 $S = 6\%$ 、 $\eta = 1.4$ 時, 顯示對相對沖擊位置 \bar{L}_d 而言上游坡度 S_u 較下游坡度 S_d 影響約大 40%。

表 2 投潭水流沖擊位置坡度效應比較一覽表

Table 2 Comparison of slope effects of hydraulic impact position of free overfall

坡度效應	水力參數		相對沖擊位置 \bar{L}_d	
	渠床坡度			
δ	S_u		$e^{6.65S_u}$	
	S_d		$e^{1.051S_d}$	
	S_u	2%		1.142
		4%		1.305
		6%		1.491
	S_d	2%		1.021
4%			1.043	
6%			1.065	
η	δ_a/δ_b		$e^{5.604S}$	
	$S = 2\%$		1.119	
	$S = 4\%$		1.251	
	$S = 6\%$		1.400	
相關性			+	

註: $\delta = \bar{L}_d(s>0) / \bar{L}_d(s=0)$ 、 $\eta = \delta_a/\delta_b$

($\delta_a =$ 改變上游時之坡度效應比、 $\delta_b =$ 改變下游時之坡度效應比)

$S =$ 渠床坡度、 $S_u =$ 上游渠床坡度、 $S_d =$ 下游渠床坡度。

相關性符號 “+” 表示遞增, “-” 表示遞減。

4. 本研究進行投潭水渠槽試驗獲得試驗資料，由理論推導及因次分析針對沖擊水力參數與上、下游渠床坡度 S_u 、 S_d 及跌水數 $D(=q^2/gH^3)$ 兩者關係，其相關分析結果為：

$$\bar{L}_d = 1.799D^{0.143} e^{6.655S_u + 1.051S_d} \quad (R^2 = 0.962) \quad (10)$$

由 (10) 式之判定係數 R^2 值，顯示上述經驗模式相關性極高，且顯現相對沖擊位置 \bar{L}_d 與跌水數 D 、上、下游渠床坡度 S_u 、 S_d 呈正相關。

誌 謝

本文研究期間承蒙中興大學土木工程學系盧昭堯教授、黃添坤教授及逢甲大學王傳益教授悉心指導及中興大學土木工程學系碩士班研究生張詠昌，協助實驗與文稿整理，使本文得以順利完成，特表謝忱之意。

參考文獻

- [1] 徐堯鉉 (2010)，「超臨界自由跌流沖擊水力特性之研究」，國立中興大學土木工程學系，碩士論文。(Hsu, Y.H. (2010). *Study on Hydraulic Characteristics of Free Overfall-Impacted Supercritical Flows*, Masters Thesis, National Chung Hsing University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [2] 陳正炎 (1988)，「堰壩投潭水躍消能近似解析之研究」，台灣水利季刊，36(4)，72-80。(Chen, J.Y. (1988). "A Study on the Asymptotic Solution for Energy Dissipation of Hydraulic Jump by Free Overfall." *Taiwan Water Conservancy*, 36(4),72-80. (in Chinese))
- [3] 黃宏信 (2010)，「自由跌水作用下坡度渠流之水力特性研究」，國立中興大學土木工程學系，博士論文。(Huang, H.S. (2010). *Hydraulic Characteristics of Free Overfall-Impacted Channel Flow over Sloping Bed*, Doctoral Dissertation, National Chung Hsing University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [4] 張幀禎 (2008)，「單階自由跌水作用下坡度渠床沖擊特性之試驗研究」，國立中興大學土木工程學系，碩士論文。(Chang, C.C. (2008). *Hydraulic Characteristics of Flow over Sloping Bed Impacted by the Free Overfall*, Masters Thesis, National Chung Hsing University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [5] 蕭品彥 (2011)，「超臨界自由跌流沖擊流場機制研究與視窗化應用」，國立中興大學土木工程學系，碩士論文。(Hsiao, P.Y. (2011). *Characteristics of Free Overfall-Impacted Supercritical Flows and Its Windows-Based Application*, Masters Thesis, National Chung Hsing University, Taiwan, ROC. (in Chinese))
- [6] Rand, W. (1955). "Flow geometry at straight drop spillways." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 81, 1-13.

2014 年 12 月 24 日 收稿

2015 年 04 月 09 日 修正

2015 年 06 月 16 日 接受

(本文開放討論至 2016 年 6 月 30 日)