

# 投潭水沖擊位置受制上下游渠床坡度影響之探討

黃劭暉<sup>[1]</sup> 謝俊賢<sup>[2]</sup> 陳正炎<sup>[3\*]</sup>

## 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。)

## Effect on Impact Position of Free Overfall by Upstream and Downstream Channel Bed Slopes

*Jie-Hui Huang<sup>[1]</sup> Chun-Hsien Hsieh<sup>[2]</sup> Jen-Yan Chen<sup>[3\*]</sup>*

## ABSTRACT

Most of Taiwan rivers are rapid and steep with large capacity of vertical erosion. The hydraulic structures crossing the river such as drop structures, check dams and weirs have been widely used to decrease the flood erosion, stabilize riverbed, protect structures crossing the river, and provide civil water and irrigation. The hydraulic structures make upstream channel stable while the sediments cannot be transported downstream and stay in front of riverbed of drop structures on the other way. These structures usually induce the change of upstream slope and super critical flow condition which makes a large impact force on the downstream with the result of destroying energy dissipation structures. This paper aims at studying the theoretical analysis and experimental compared of impact location with the variation of upstream and downstream channel bed slopes.

(**Key Words**: Impact position, channel bed slopes, free overfall.)

---

[1] 國立中興大學土木工程學系碩士班研究生

Masteral graduate student, Dept. of Civil Engineering, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan

[2] 國立中興大學土木工程學系博士班研究生

Doctoral graduate student, Dept. of Civil Engineering, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan

[3] 國立中興大學土木工程學系教授 (\* 通訊作者 E-mail: [jychen@dragon.nchu.edu.tw](mailto:jychen@dragon.nchu.edu.tw))

Professor, Dept. of Civil Engineering, National Chung Hsing University, Taichung 402, Taiwan



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

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  $u_b = \frac{q}{Y_b}$ 、 $Y_b = \frac{2Y_0}{F_0^{-2} \cos^2 \alpha + 2}$ ，其中上游福

祿數  $F_0 = \frac{u_0}{\sqrt{gY_0}}$ 。(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 $\delta$

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  $\delta$ ：

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

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  $\delta$  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。

### (2) 坡度影響值 $\eta$

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  $\eta$ ：

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

式中  $\delta_a$  為改變上游渠床坡度  $S_u$  且下游為水平時之坡度效應； $\delta_b$  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。

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。

### 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。

### 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

## 三、渠槽試驗

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成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。

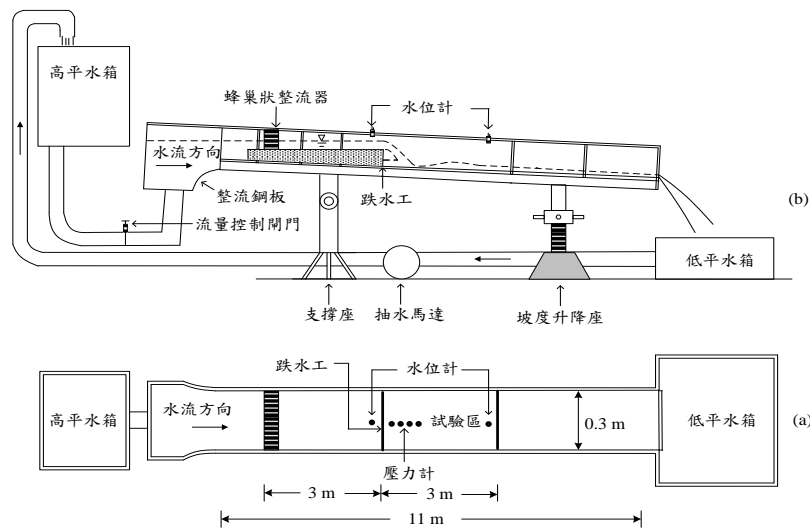


圖 2 渠槽試驗佈置圖(a)俯視圖(b)側視圖

Fig 2 Experimental configuration in the laboratory flume

## 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，係自由跌水沖擊所耗損。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。

### (2) 試驗步驟

- i. 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。
- ii. 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 $D$ 。
- iii. 記錄試驗之自由跌水沖擊位置。
- iv. 計算自由跌水沖擊力。
- v. 改變單階自由跌水流量，並重覆步驟③和④。
- vi. 變換跌水高度重覆步驟③~⑤。
- vii. 變更渠床坡度重覆步驟③~⑥。

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

#### 四、結果與討論

茲以徐堯鉉(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%，對沖擊位置 $L_d$ 及其坡度效應討論如后。

##### 1. 沖擊位置

(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沖擊位置最近，當跌流工上、下游渠床均具坡度時之沖擊位置逐漸增遠；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。

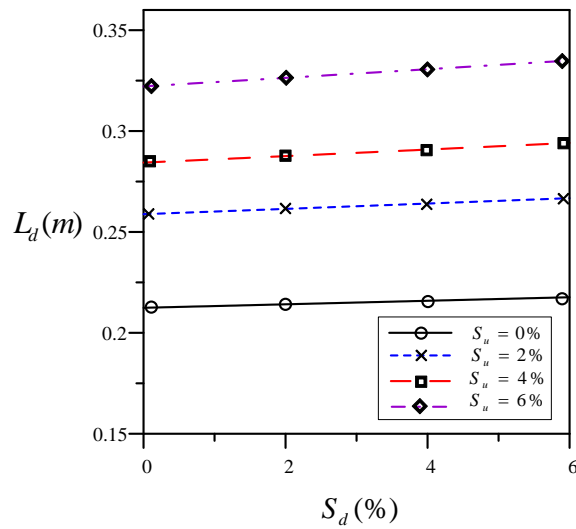


圖 3 沖擊位置 $L_d$ 與上、下游渠床坡 $S_u$ 、 $S_d$ 之關係圖( $D = 0.00304$ )

Fig 3 Upstream and downstream channel bed slopes with impact position graph

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，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。

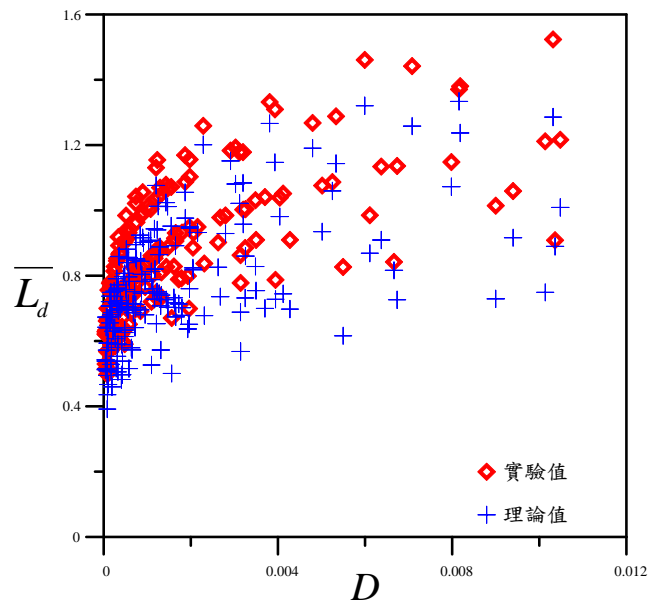


圖 4 相對沖擊位置 $\bar{L}_d (= L_d/H)$ 實驗值、理論值與跌水數 $D$ 之關係圖

Fig 4 Dimensionless impact position experimental and theoretical values with Drop numerical graph

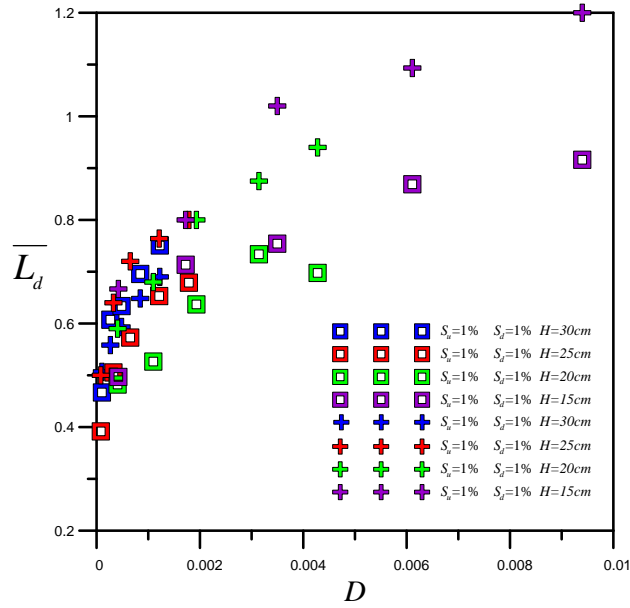


圖 5 相對沖擊位置 $\bar{L}_d(=L_d/H)$ 實驗值、理論值與跌水數 $D$ 之關係圖( $S_u、S_d = 1\%$ )

Fig 5 Dimensionless impact position experimental and theoretical values with drop numerical graph( $S_u、S_d = 1\%$ )

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：

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

## 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 $\delta$ ，如下所述：

(1) 坡度效應比 $\delta$

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：

Case a( $S_d = 0\%$ ， $S_u \neq 0\%$ )：

$$\delta_a = e^{6.655S_u} \quad (11a)$$

Case b( $S_u = 0\%$ ， $S_d \neq 0\%$ )：

$$\delta_b = e^{1.051S_d} \quad (11b)$$

將坡度效應比 $\delta$ 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。

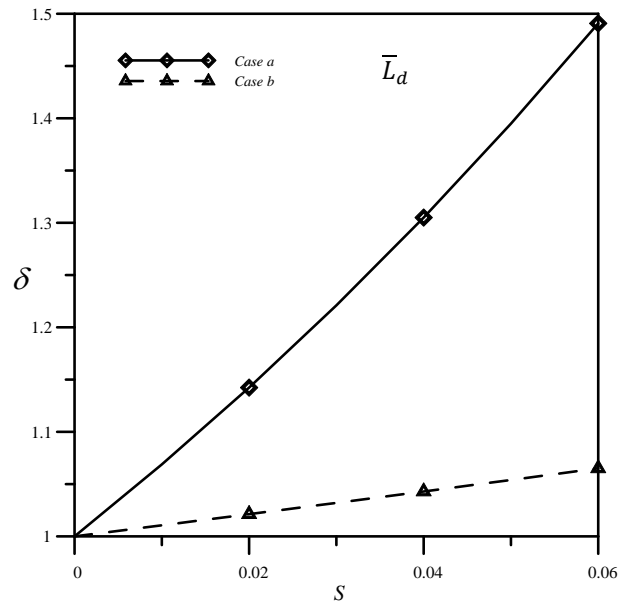


圖 6 坡度效應比 $\delta$ 與渠床坡度 $S$ 之關係圖 (相對沖擊位置 $\bar{L}_d$ )

Fig 6 Relationship between slope effect ratio  $\delta$  and channel bed slope  $S$  (dimensionless impact location  $\bar{L}_d$ )

(2) 坡度影響值 $\eta$

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 $\eta$ 表示，即：

$$\eta = e^{5.604S} \quad (12)$$

式中 $\eta$ 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 $\eta$ 繪於圖 7。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。

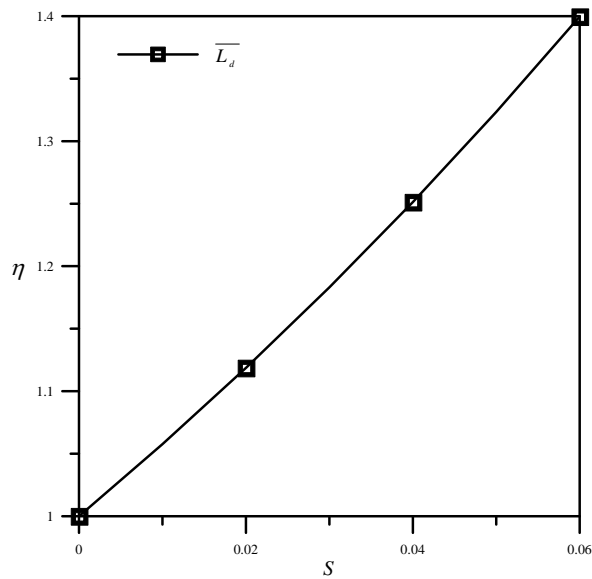


圖 7 坡度影響值 $\eta$ 與渠床坡度 $S$ 之關係圖

Fig 7 Relationship between slope effect value  $\eta$  and channel bed slope  $S$



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

水力參數		相對沖擊位置 $\bar{L}_d$		
坡度效應	渠床坡度			
$\delta$	$S_u$	$e^{6.655S_u}$		
	$S_d$	$e^{1.051S_d}$		
	$S_u$	2%	1.142	
		4%	1.305	
		6%	1.491	
	$S_d$	2%	1.021	
		4%	1.043	
		6%	1.065	
	$\eta$	$\delta_a/\delta_b$	$e^{5.604S}$	
$S = 2\%$		1.119		
$S = 4\%$		1.251		
$S = 6\%$		1.400		
相關性		+		
註： (1) $\delta = A_{(S>0)}/A_{(S=0)}$ 、 $\eta = \delta_a/\delta_b$ ( $\delta_a =$ 改變上游時之坡度效應比、 $\delta_b =$ 改變下游時之坡度效應比) (2) $S =$ 渠床坡度、 $S_u =$ 上游渠床坡度、 $S_d =$ 下游渠床坡度。 (3) 相關性符號“+”表示遞增，“-”表示遞減。				

## 五、結 論

本研究針對上、下游渠坡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。

- 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 $S_d$ 。
- 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。
- 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%。

## 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

- 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。

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。
3. 陳正炎、蔡建文(1995),「堰壩投潭水流衝擊力之研究」,中華水土保持學報,26(2),135-144。
4. 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。
5. 張幘禎(2008),「單階自由跌水作用下坡度渠床衝擊特性之試驗研究」,國立中興大學土木工程學系,碩士論文。
6. 蕭品彥(2011),「超臨界自由跌流衝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。
7. Ippen, P. J. (1943). Engineering Hydraulic, John Wiley and Sons, Inc., New York, 570.
8. White, M.P. (1943). "Discussion on Energy Loss at the Base of a Free Over-fall," Transactions, ASCE, 108, 1361-1364.