

台形堰下流側に形成される跳水部の流速特性

Velocity characteristics in hydraulic jump at downstream of a trapezoidal weir

日本大学理工学部土木工学科 正会員 安田陽一
日本大学大学院理工学研究科土木工学専攻 学生会員 ○佐藤麻衣

1. まえがき

可動堰や固定堰などの河川構造物を造る際に、河床保護のための水叩きや護床工を設置することが義務付けられている¹⁾。しかし、固定堰直下流側では護床ブロックが下流側へ流されてしまう事例が確認されている。既往の文献から、跳水中の主流の位置が跳水始端での乱流境界層の発達状態によって異なることが報告されている^{2),3)}。しかしながら、台形堰直下流側に跳水が形成される場合(写真 1)、跳水部内の流速特性について不明である。ここでは、台形堰直下に形成される跳水部の流速特性について実験的な検討を行い、流線の曲がりの影響について考察した。

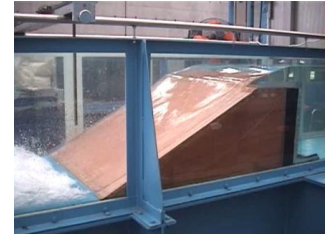


写真 1 跳水始端での流線の曲がりの影響がある場合

2. 実験方法

実験は、水路幅 80 cm、長さ 14.5 m、高さ 60 cm を有する長方形水平断面水路を用いて行った。実験条件を表 1 に示す。台形堰模型直下流側に跳水を形成させた(写真 1)。なお、台形堰の斜面上で境界層が速やかに発達するようにするため、シリコンを毛羽立たせる工夫をした(写真 2)。測定したポイントは図 2 に示すように跳水始端から流下方向に $X = 60 \text{ cm}(65\%)$, $80 \text{ cm}(86\%)$, $100 \text{ cm}(108\%)$, $135 \text{ cm}(146\%)$ (カッコ内の数値は跳水長の長さを 100% とした時の割合で、跳水長 L_j は $L_j = 5.5 \times h_{2*}$ で求めた)の位置で、横断方向へ 10 cm 間隔に 7 ヲ所、それぞれ測定した。また、流下方向と横断方向の流速を計測するため、1 型 2 次元電磁流速計を用いた(採取間隔 50 msec、採取時間を 90 sec)。

3. 台形堰下流側の流速特性

台形堰下流側で形成される跳水内部の流速特性を検討するために、流下方向成分の流速 u を次式の関係で整理した一例を図 3,4 に示す。ただし、図 3 は(1)式の関係で、図 4 は(2)式の関係で整理したものを示す。

$$u/U_{\max} = f(z/Z, y/[(B/2)], x/d_c, X/L_j, F_1) \quad (1) \quad u/U_{\max} = f(z/z_1, y/[(B/2)], x/d_c, X/L_j, F_1) \quad (2)$$

ここに、 d_c は限界水深、 $U_{\max}$ は測定断面での最大流速、 z_1 は底面から $U_{\max}$ が生じる位置までの鉛直高さ、 Z は底面から $U_{\max}/2$ が生じる位置までの鉛直高さ(主流幅)である。

表 1 実験条件

	接合部からの距離 X		
	10cm	25cm	45cm
流量 $Q(\text{m}^3/\text{s}) (=qB)$	4.80×10^{-2}	4.80×10^{-2}	4.80×10^{-2}
$Re = q/\nu$ (レイノルズ数)	48700	48700	48700
Fr (跳水始端のフルード数)	6.29	5.82	5.57
跳水始端水深 $h_1(\text{cm})$	2.104	2.216	2.283
跳水終端水深(実験値) $h_2(\text{cm})$	17.3	16.8	16.6
始端でのアスペクト比 (B/h_1)	38.0	36.1	35.0
終端でのアスペクト比 (B/h_{2*})	4.5	4.7	4.7
跳水長 $L_j = 5.5 h_{2*}(\text{cm})$	97	94	93

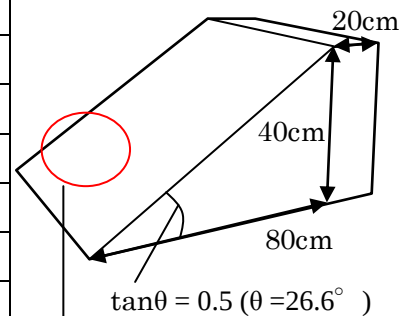
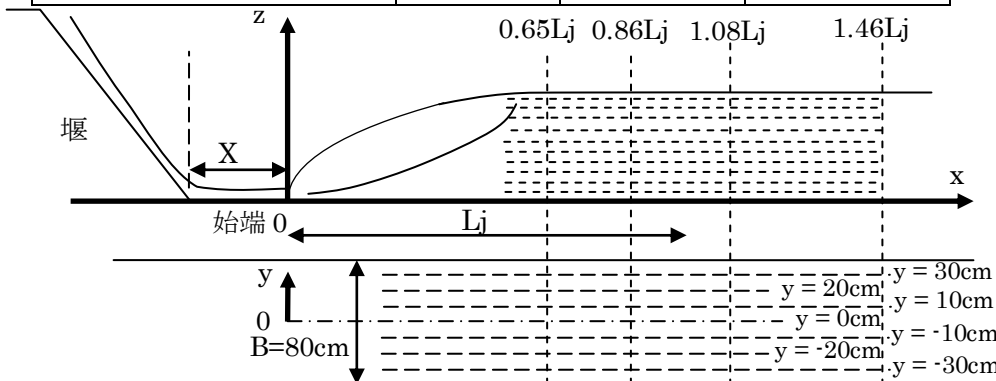


図 1 台形堰模型



写真 2 シリコンを毛羽立たせた状態



$$L_j = 5.5 h_{2*} \quad \frac{h_{2*}}{h_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{8F_1^2 + 1} - 1 \right)$$

図 2 測定位置(跳水部下流側を主に測定)

キーワード 跳水, 台形堰, 減勢工, 主流の位置, 側壁境界層

連絡先 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8, TEL&FAX: 03-3259-0409, E-mail: yokyas@civil.cst.nihon-u.ac.jp

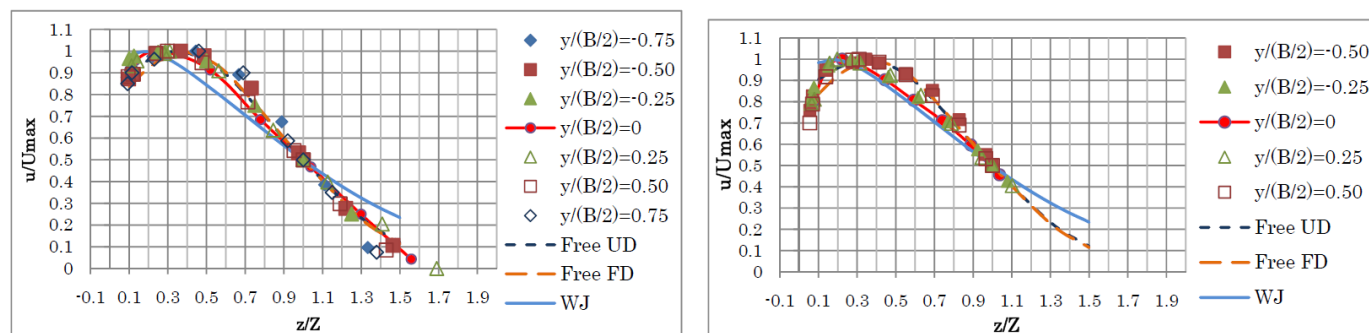


図3 (1)式の関係で整理された台形堰下流側の跳水部の流速分布

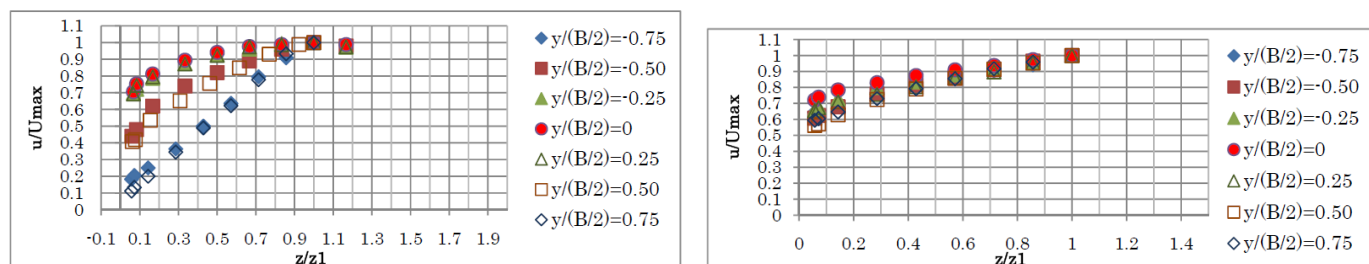
(a) $F_1=6.29$, $X/d_c=1.4$, $x/L_j=0.65$ の場合(b) $F_1=6.29$, $X/d_c=1.4$, $x/L_j=0.86$ の場合

図4 (2)式の関係で整理された台形堰下流側の跳水部の流速分布

(a) $F_1=5.57$, $X/d_c=6.3$, $x/L_j=1.08$ の場合(b) $F_1=5.57$, $X/d_c=6.3$, $x/L_j=1.46$ の場合

図3に示されるように、 $1.4 \leq X/d_c \leq 6.3$ の範囲において、 $x/L_j \geq 0.6$ でも、領域によって相似な流速分布が得られ、(a)の関係で表示できる。すなわち、 $X/d_c=1.4$ の場合、 $x/L_j=0.65$ ($-0.75 \leq y/(B/2) \leq 0.75$)、 $x/L_j=0.86$ ($-0.5 \leq y/(B/2) \leq 0.5$) で相似な流速分布が得られる。また、 $X/d_c=3.4$ の場合、 $x/L_j=0.65$ ($-0.5 \leq y/(B/2) \leq 0.5$)、 $x/L_j=0.86$ ($-0.25 \leq y/(B/2) \leq 0.25$) で相似な分布が得られる。さらに、 $X/d_c=6.3$ の場合、 $x/L_j=0.65$ ($-0.25 \leq y/(B/2) \leq 0.25$) で相似な分布が得られる。これは台形堰下流側の跳水部に流入する射流の流速分布が流線の曲がりの影響を受けるため、ジェット特性が下流側まで続いたものと考えられる。なお、 X/d_c が大きくなるにつれて堰直下での流線の曲がりの影響が小さくなり、相似な流速分布が得られる領域が小さくなる。

$x/L_j=0.65$ で相似な分布が得られる場合、自由跳水の流速分布として示された(3)式(UD: undeveloped inflow, FD: fully developed inflow)²⁾と同様な傾向となる。その一方、 $x/L_j=0.86$ の中央部($y/(B/2)=0$)を中心に流速分布は壁面噴流で示される(4)式^{2),4)}と同様な傾向となる。これは、 $x/L_j=0.65$ では気泡混入を伴う渦の形成の影響を受けているが $x/L_j=0.86$ ではその影響を受けにくくなったため、自由水面の影響のない壁面噴流の場合に近い分布になったものと考えられる。なお、 $x/L_j=0.86$ の中央部以外で相似な分布が得られる領域では、(3)式と同様な傾向を示す。これは、跳水始端から再発達する側壁境界層の影響を受けたものと考えられる。

$$u/U_{\max} = (z/Z)^{1/n} \quad (0 < z/Z < z_1/Z) \quad n=12 \text{ for UD}, n=7 \text{ for FD} \quad (3)-1$$

$$u/U_{\max} = \text{EXP}\{0.5[1.177(1-z/Z)/(1-k)]^2\} \quad (z_1/Z < z/Z < 1.5) \quad k=0.333 \text{ for UD}, k=0.351 \text{ for FD} \quad (3)-2$$

$$u/U_{\max} = 1.48(z/Z)^{1/7}\{1 - \text{erf}(0.68z/Z)\} \quad (z/Z > 0) \quad (4)$$

(2)式の関係で整理した図4に示されるように、 $x/L_j=1.08$ の場合、横断方向に流速分布が変化する。これは跳水始端から再発達する側壁境界層の影響を受けたものと考えられる。また、 $x/L_j=1.46$ の場合、その影響が小さくなり、横断方向の変化が小さくなる。

4. まとめ

図1に示される台形堰模型を用い堰下流側に形成される跳水を対象に、表1に示す実験条件のもとで流速特性を検討した結果、 $1.4 \leq X/d_c \leq 6.3$ の範囲において、 $x/L_j \geq 0.6$ でも、台形堰下流側の跳水部に流入する射流の流速分布が流線の曲がりの影響を受けるため、領域によって相似な流速分布が得られ、(1)の関係で表示できることを示した。また、 $x/L_j=0.65$ では気泡混入を伴う渦の形成の影響を受け、自由跳水の流速分布として示された(3)式と同様な傾向となり、 $x/L_j=0.86$ では気泡混入を伴う渦の形成の影響を受けにくくなったため、中央部($y/(B/2)=0$)を中心に流速分布は壁面噴流で示される(4)式と同様な傾向となることを示した。 $x/L_j=1.08$ の場合、跳水始端から再発達する側壁境界層の影響を受け、横断方向に流速分布が変化するが、 $x/L_j=1.46$ の場合、その影響が小さいことを示した。

参考文献

- 1) 建設省河川局監修、改訂新版建設省河川砂防技術基準(案) 同解説・設計編[II]技法堂出版、1999。
- 2) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Awazu, S., Free and Submerged hydraulic Jumps in Horizontal Rectangular Channel, Report of the Research Institute of Science and Technology, Nihon University, No.35, 1990, pp.1-50.
- 3) 松澤貴士, 高橋正行, 大津岩夫, 跳水内部の空気混入率及び流速分布に対する流入射流の影響, 第52回日本大学工学部学術研究報告会, 土-2-10, 2009, pp.102-105.
- 4) Wu, S. and Rajaratnam, N., Free jump, Submerged jump, and Wall jets, Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol.33, No.2, 1995, pp. 197-212.
- 5) 佐藤麻衣, 安田陽一, 台形堰下流側に形成される跳水中の流速特性, 第38回土木学会関東支部第II部門, 2011, CD-ROM.