

H3-10

堰下流側に形成される跳水の流速特性に関する実験的検討

Experimental investigation on velocity characteristics in hydraulic jumps downstream of a weir

○津田大輔¹, 神戸基秀², 安田陽一³

*Daisuke Tsuda¹, Motohide Kanbe², Youichi Yasuda³

Abstract: The report presents the effect of configuration of weirs on velocity fields in hydraulic jumps below weirs. The experimental results yield that the velocity distribution like a wall jet has been kept until about 90 % of jump length in the jump formation downstream of weirs, and the main flow flows along the bottom far downstream. In these cases, velocity profile and development of main flow depend on configuration of weirs because of different inflow condition due to impingement.

1. はじめに

可動堰や固定堰などの河川構造物を設置する際に、河床保護のための水叩きや跳水区間に護床工を設置することが義務付けられている¹⁾。既往の研究²⁾から流入射流の流線の曲がない自由跳水の場合、跳水始端での境界層の発達状況により主流の位置が異なることが示されている²⁾。堰下流側に形成される跳水の場合は跳水始端で流線の曲がりの影響を受けるため、跳水内の主流の発達がどのようなようになるのか不明な点が多い。

最近、本研究室では、堰下流側に形成される跳水の流速分布や主流の発達に対する流線の曲がりの影響について検討している^{3),4)}。越流面角度 $\theta=90^\circ$ の鉛直堰(相対落差 $H/d_c=2.79, 5.58$)、 $\theta=26.6^\circ$ の台形堰 ($H/d_c=2.79, 5.58$) (H : 堰落差高さ, d_c : 限界水深) を対象に堰下流部に形成される跳水中の流速特性について検討したところ、流線の曲がりの影響がない場合に比べて、噴流の性格が跳水区間の約 90% まで及んでいることを示した^{3),4)}。しかし、越流面角度が 26.6° と 90° の 2 種類で実験を行ったため、越流面の傾斜角度による流速特性の違いについて検討の余地がある状態である。

ここでは、 $H/d_c=5.58, \theta=45^\circ$ の台形堰の場合を加えて跳水形成位置を変化させ、堰直下流側に形成される跳水中の流速特性について実験的検討を行い、同一の相対落差 $H/d_c(=5.58)$ における跳水中の流速分布、主流の発達に対する越流面角度の影響を明らかにした。

2. 実験方法

実験は、水路幅 0.80m、長さ 14.5m、高さ 0.60m を有する長方形断面水平水路に堰模型を設置し、Table 1 に示す実験条件のもとで行った。流速を測定したポイントは Figure 1 に示すように跳水始端から流下方向に $x=0.65L_j, 0.86L_j, 1.08L_j, 1.46L_j$ (跳水長は $L_j = 5.5h_2$ としている²⁾) の位置で、横断方向へ 0.10m 間隔に 7 ケ所で測定を行った。また、流下方向と横断方向成分の流速を計測するため、I 型 2 次元電磁流速計を用いた (採取間隔 50msec, 採取時間 90sec)。

3. 堰下流側の跳水中の流速分布

堰下流側で形成される跳水部において噴流の性格²⁾ が続く領域を明らかにするため、流下方向成分の流速 u を(1)の関係で整理できる領域とその分布の特徴を Table 2 にまとめ、その一例を Figure 2 に示す。

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

ここに、 U_{max} は測定断面での最大流速、 Z は底面から $U_{max}/2$ が生じる位置 (ただし、 $du/dz < 0$) までの鉛

Table 1. Experimental conditions

台形堰 (越流面角度 $\theta = 45^\circ$)	H=0.40m ($H/d_c=5.58$)		
	$\ell/d_c=1.4$	$\ell/d_c=3.5$	$\ell/d_c=6.3$
流量 Q (m ³ /s)	4.80×10^{-2}	4.80×10^{-2}	4.80×10^{-2}
レイノルズ数 Re (=q/v)	59530	59530	59530
跳水始端のフルード数 F_1	6.27	6.17	6.14
跳水始端水深 h_1 (m)	0.0211	0.0213	0.0214
跳水終端水深 h_2 (実験値) (m)	0.173	0.171	0.171
跳水長 $L_j = 5.5h_2$ (m)	0.95	0.94	0.94

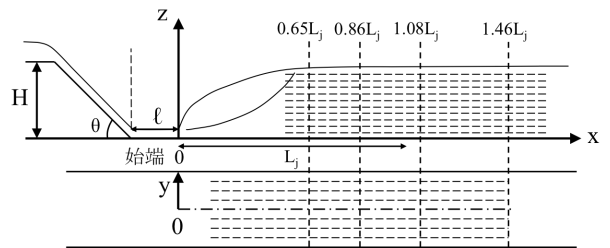
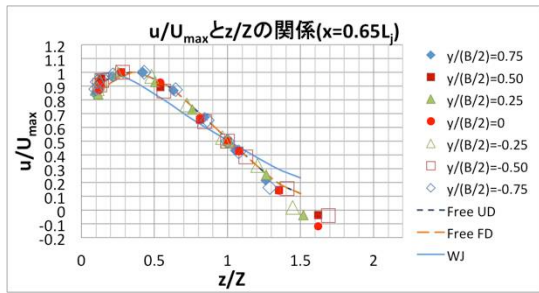


Figure 1. Location of velocity measurement in jumps

Table 2. Velocity distributions in jumps below weirs

台形堰 ($H/d_c=5.58, \theta=45^\circ$)			
ℓ/d_c	x/L_j	$y/(B/2)$	流速分布の傾向と範囲
1.4	0.65	$-0.75 \leq y/(B/2) \leq 0.75$	FJ
	0.86	$-0.50 \leq y/(B/2) \leq 0.50$	$y/(B/2) = \pm 0.50$ FJ $y/(B/2) = \pm 0.25$ から0に向かって WJに近づく
3.5	0.65	$-0.50 \leq y/(B/2) \leq 0.50$	FJ
	0.86	$-0.25 \leq y/(B/2) \leq 0.25$	$y/(B/2) = \pm 0.25$ FJ $y/(B/2) = 0$ WJ
6.3	0.65	$-0.50 \leq y/(B/2) \leq 0.50$	FJ
	0.86		
台形堰 ($H/d_c=5.58, \theta=26.6^\circ$)			
ℓ/d_c	x/L_j	$y/(B/2)$	流速分布の傾向と範囲
1.4	0.65	$-0.75 \leq y/(B/2) \leq 0.75$	FJ
	0.86	$-0.50 \leq y/(B/2) \leq 0.50$	$y/(B/2) = \pm 0.50$ FJ $-0.25 \leq y/(B/2) \leq 0.25$ WJ
3.5	0.65	$-0.50 \leq y/(B/2) \leq 0.50$	FJ
	0.86	$-0.25 \leq y/(B/2) \leq 0.25$	$y/(B/2) = \pm 0.25$ FJ $y/(B/2) = 0$ WJ
6.3	0.65	$-0.50 \leq y/(B/2) \leq 0.50$	FJ
	0.86		
鉛直堰 ($H/d_c=5.58, \theta=90^\circ$)			
ℓ/d_c	x/L_j	$y/(B/2)$	流速分布の傾向と範囲
1.4	0.65	$-0.75 \leq y/(B/2) \leq 0.75$	FJ
	0.86	$-0.50 \leq y/(B/2) \leq 0.50$	$y/(B/2) = \pm 0.50$ FJ $y/(B/2) = \pm 0.25$ から0に向かって WJに近づく
3.5	0.65	$-0.50 \leq y/(B/2) \leq 0.50$	FJ
	0.86		
6.3	0.65	$-0.50 \leq y/(B/2) \leq 0.50$	FJ
	0.86		

1:日大理工・学部・土木, 2:日大理工・院(前)・土木, 3:日大理工・教員・土木



$H/d_c=5.58, \theta=45^\circ, \ell/d_c=1.4, x/L_j=0.65$
Figure 2. Velocity distribution in hydraulic jump downstream of trapezoidal weir

直高さ（噴流幅）である。図中破線は、自由跳水(FJ: free jump)の流速分布²⁾を示し、実線は壁面噴流(WJ: wall jet)の流速分布²⁾を示す。なお、凡例中のUD(undeveloped inflow)は跳水始端での乱流境界層が発達していない状態を示し、FD(fully developed inflow)は乱流境界層が十分に発達している状態を示す。

$\ell/d_c=1.4$ の位置から跳水が形成された場合、Table 2 に示されるように、 $x/L_j=0.65$ では、 θ による違いは見られず $-0.75 \leq y/(B/2) \leq 0.75$ の範囲で(1)の関係で示され、自由跳水の流速分布と同様な傾向となる。 $x/L_j=0.86$ では $-0.25 \leq y/(B/2) \leq 0.25$ の範囲において $\theta=26.6^\circ$ と $\theta=45^\circ, 90^\circ$ との間で流速分布の変化傾向に違いが生じている。これは、 $\theta=45^\circ, 90^\circ$ の場合、流線の曲がり角が $\theta=26.6^\circ$ の場合より大きく、流脈が乱れやすくなったためと考えられる。

$\ell/d_c=3.5$ の場合、 $x/L_j=0.86$ でも噴流の性格が得られたのは台形堰の場合のみであった。これは、 $\theta=90^\circ$ の場合、越流水脈の衝突角度が大きく、流脈が乱れやすいため流速が減勢されやすく、噴流の性格が続かなかったものと考えられる。

$\ell/d_c=6.3$ の場合、堰堤からの流れが衝突した位置から離れたため、流線の曲がりの影響が小さくなり、 θ に関わらず $x/L_j=0.65, -0.50 \leq y/(B/2) \leq 0.50$ で自由跳水と同様な分布となる。

4. 跳水中の最大流速の位置

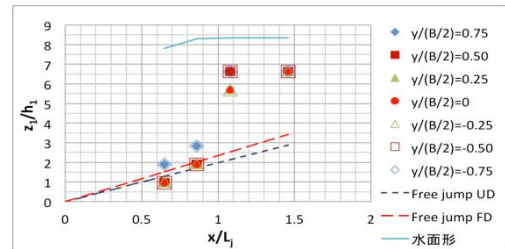
$0.65 \leq x/L_j \leq 1.46$ における最大流速の位置 z_1 について(2)の関係で整理した結果の一例を Figure 3 に示す。図中の破線は跳水始端で流線の曲がりの影響がない場合の z_1 の変化傾向²⁾を示す。ここでは $x/L_j > 0.6$ でも噴流の性格が続いているため、 $0.60 \leq x/L_j \leq 1.46$ の範囲にも直線変化を外挿している。

$$z_1/h_1 = f(x/L_j, y/[B/2], H/d_c, \ell/d_c, F_1, \theta) \quad (2)$$

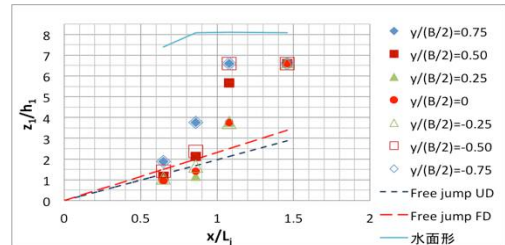
$\ell/d_c=1.4$ の位置から跳水が形成された場合、Figure 3 a), b) に示されるように、 $x/L_j \leq 0.86$ の領域で破線と同様な変化を示す。 $x/L_j=0.86$ では、 $-0.25 \leq y/(B/2) \leq 0.25$ の範囲で $\theta=45^\circ$ と比べて $\theta=26.6^\circ$ の方が z_1 の値が小さくなっている。これは、 $\theta=26.6^\circ$ の方が、跳水中の流速分布が壁面噴流で近似できる範囲が広いことと対応している。 $\theta=90^\circ$ では、Figure 3 c) に示されるように、 $x/L_j \leq 1.08$ で破線と同様な変化を示す。これは、鉛直堰の場合、越流水脈の衝突角度が大きく、流線の曲がりの影響が大きいためであると考えられる。

$\ell/d_c=3.5$ の場合、紙面の都合で割愛するが $\ell/d_c=1.4$ と同様に、堰の越流形状によって z_1 の変化が異なる。

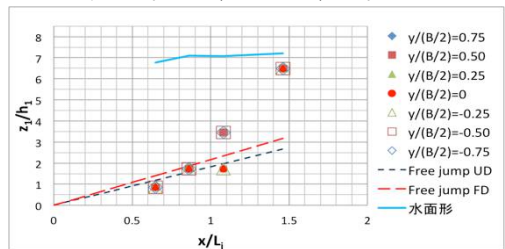
$\ell/d_c=6.3$ の場合、跳水始端での流線の曲がりの影響が小さくなるため、 θ に関わらず $x/L_j \leq 0.65$ で破線と同様な変化が得られた。



a) $H/d_c=5.58, \theta=45^\circ, \ell/d_c=1.4$



b) $H/d_c=5.58, \theta=26.6^\circ, \ell/d_c=1.4$



c) $H/d_c=5.58, \theta=90^\circ, \ell/d_c=1.4$

Figure 3. Relation of $z_1/h_1 = f(x/L_j, y/(B/2))$

5. まとめ

$H/d_c=5.58, \theta=45^\circ$ の台形堰の場合を加えて、同一の相対落差における台形堰($\theta=26.6^\circ$)、鉛直堰の場合との比較を行い、跳水中の流速分布、主流の発達に対する越流面角度の影響について、跳水形成位置ごとに検討して得られた結果を以下に示す。

$\ell/d_c=1.4$ では、 θ に関わらず $x/L_j \leq 0.86$ まで噴流の性格が続いていることを示した。 $x/L_j=0.86$ では、 $-0.25 \leq y/(B/2) \leq 0.25$ の範囲で θ によって異なる変化傾向が得られた。主流の位置については、鉛直堰の方が台形堰より流線の曲がりの影響が大きくなるため、より下流側まで直線変化していることを示した。 $\ell/d_c=3.5$ では、台形堰の場合の方が鉛直堰に比べて流脈が乱れにくいため、下流側まで噴流の性格が維持されていることを示した。 $\ell/d_c=6.3$ では、流線の曲がりの影響が小さくなるため、 θ に関わらず噴流の性格が続いている領域は $x/L_j \leq 0.65$ であることを示した。

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 [I]，改訂版第 15 刷，技法堂出版，251 pages，2012.
- 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, pp.1-50, 1990.
- 3) 佐藤麻衣, 安田陽一：堰下流側に形成される跳水部の流速特性，第 67 回土木学会年次学術講演会，第 II 部門，II-066，CD-ROM，2012.
- 4) 神戸基秀, 安田陽一, 高橋直己, 佐藤麻衣：堰下流側に形成される跳水の流速特性，第 68 回土木学会年次学術講演会，第 II 部門，II-054，CD-ROM，2013.