

H3-3

堰下流側に形成される跳水の流速分布特性

Characteristics of velocity distribution in hydraulic jumps downstream of weirs

○神戸基秀<sup>1</sup>, 安田陽一<sup>2</sup>, 高橋直己<sup>2</sup>, 佐藤麻衣<sup>3</sup>

\*Motohide Kanbe<sup>1</sup>, Youichi Yasuda<sup>2</sup>, Naoki Takahashi<sup>2</sup>, Mai Satou<sup>3</sup>

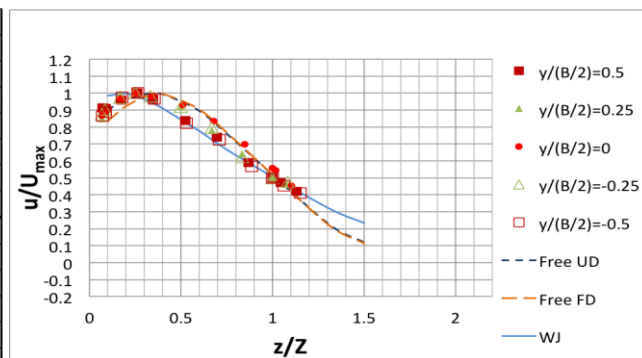
**Abstract:** This report presents the effect of curvature of streamline below a weir on velocity fields in hydraulic jumps. The experimental results yield that the velocity in downstream part of jump region ( $0.65 < x/L_j < 0.86$ ;  $x$ =stream-wise axis from toe of jump,  $L_j$ =jump length) has been distributed like a wall jet. Also, the stream-wise change of the velocity distribution reveals that the flow condition in the downstream part of jump is three-dimensional.

1. まえがき

可動堰や固定堰等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護床工を設置することが義務付けられている<sup>1)</sup>。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<sup>2)</sup>によって異なることが報告されている<sup>3),4)</sup>。しかしながら、堰直下流側に跳水が形成される場合、跳水中の流速分布など不明な点が多い。堰下流側の跳水特性を解明することは減勢工の水理設計を確立する上で重要である<sup>5),6),7)</sup>。ここでは、堰下流側に形成される跳水中の流速特性について実験的な検討を行ない、流線の曲がりの影響について考察した。

Table 1. Experimental conditions

台形堰 ( $\theta=26.6^\circ$ )	H=0.20m(H/d <sub>c</sub> =2.79)			H=0.40m(H/d <sub>c</sub> =5.58)		
	l/d <sub>c</sub> =1.4	l/d <sub>c</sub> =3.5	l/d <sub>c</sub> =6.3	l/d <sub>c</sub> =1.4	l/d <sub>c</sub> =3.5	l/d <sub>c</sub> =6.3
流量Q(m <sup>3</sup> /s)	4.80 × 10 <sup>-3</sup>	4.80 × 10 <sup>-3</sup>	4.80 × 10 <sup>-3</sup>	4.80 × 10 <sup>-3</sup>	4.80 × 10 <sup>-3</sup>	4.80 × 10 <sup>-3</sup>
レイノルズ数Re(=q/ν)	59530	59530	59530	59530	59530	59530
跳水始端のフルード数F <sub>1</sub>	4.22	4.17	4.03	6.22	5.94	5.70
跳水始端水深h <sub>1</sub> (m)	0.0275	0.0277	0.0283	0.0212	0.0219	0.0225
跳水終端水深(実験値)h <sub>2</sub> (m)	0.147	0.146	0.144	0.172	0.169	0.166
跳水長L <sub>j</sub> (m)	0.81	0.81	0.79	0.94	0.93	0.91
鉛直堰 ( $\theta=90^\circ$ )	H=0.20m(H/d <sub>c</sub> =2.79)			H=0.40m(H/d <sub>c</sub> =5.58)		
	l/d <sub>c</sub> =1.4	l/d <sub>c</sub> =3.5	l/d <sub>c</sub> =6.3	l/d <sub>c</sub> =1.4	l/d <sub>c</sub> =3.5	l/d <sub>c</sub> =6.3
流量Q(m <sup>3</sup> /s)	4.80 × 10 <sup>-3</sup>	4.80 × 10 <sup>-3</sup>	4.80 × 10 <sup>-3</sup>	4.80 × 10 <sup>-3</sup>	4.80 × 10 <sup>-3</sup>	4.80 × 10 <sup>-3</sup>
レイノルズ数Re(=q/ν)	59530	59530	59530	59530	59530	59530
跳水始端のフルード数F <sub>1</sub>	4.51	4.34	4.23	5.47	5.57	5.18
跳水始端水深h <sub>1</sub> (m)	0.0263	0.0269	0.0274	0.0231	0.0228	0.0239
跳水終端水深(実験値)h <sub>2</sub> (m)	0.152	0.149	0.147	0.164	0.163	0.160
跳水長L <sub>j</sub> (m)	0.83	0.82	0.81	0.90	0.89	0.88



H/d<sub>c</sub>=2.79, l/d<sub>c</sub>=1.4, x/L<sub>j</sub>=0.86, θ=26.6°

Figure 1. Velocity distribution in jump below a weir

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検討を行った。測定は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  $L_j = 5.5 \times h_2$  で求めた<sup>3)</sup>) の位置で、横断方向へ 0.10m 間隔に 7ヶ所で行った。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特性

堰下流側で形成される跳水内部の流速分布の相似性<sup>3),8)</sup>を検討するために、流下方向成分の流速  $u$  を(1)の関係で示した一例を Fig.1 に示す。また、本実験条件で(1)の関係で整理できる流速分布の特性を Table 2 に示す。

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

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

台形堰および鉛直堰の場合、Table 2 に示されるように、 $1.4 \leq l/d_c \leq 6.3$  の範囲で  $x/L_j > 0.6$  において流速分布

が(1)の関係で表示できる  $y/(B/2)$  の範囲が存在し、遷移部終端付近 ( $x/L_j < 1.0$ ) まで噴流の影響が及んでいることを示した。

4. 跳水中の主流の位置の変化

台形堰および鉛直堰下流側に形成される跳水を含んだ領域での最大流速の位置  $z_1$  の流下方向の変化を(2)の関係で示した一例を Fig.2 に示す。a)は台形堰 ( $H/d_c = 2.79$ )、b)は鉛直堰 ( $H/d_c = 2.79$ ) の場合について示している。図中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<sup>3)</sup>であり、式(3)で表示され  $x/L_j < 0.6 \sim 0.7$  の範囲で適用される。式中の UD(Undeveloped inflow)は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た状態を示す。ここでは、比較のため  $0.6 \leq x/L_j < 1.5$  まで外装して示している。

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

$$z_1/h_1 = (0.110F_1^{0.5})x/h_1 \quad (\text{UD}) \quad (3)-1$$

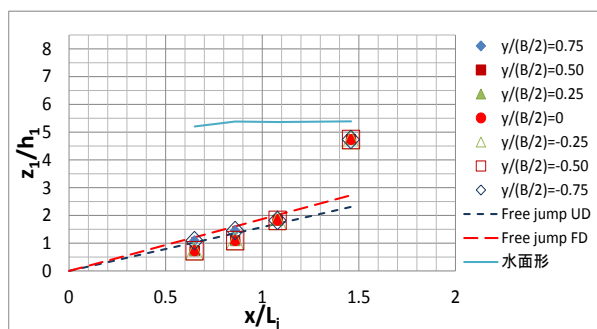
$$z_1/h_1 = (0.130/F_1^{0.5})x/h_1 \quad (\text{FD}) \quad (3)-2$$

$H/d_c=2.79$  の場合、台形堰と鉛直堰のいずれも、 $1.4 \leq l/d_c \leq 6.3$ ,  $-0.25 \leq y/(B/2) \leq 0.25$  の範囲において、 $x/L_j < 1.5$  で、 $z_1$  の変化は破線と同様な変化傾向となる。

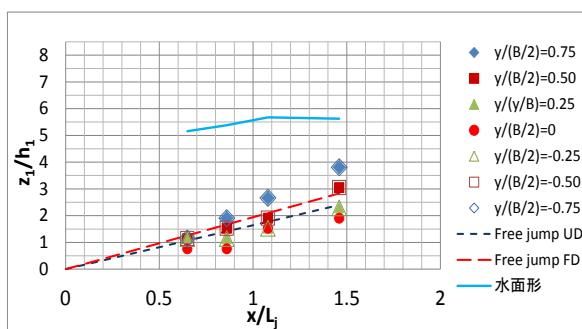
1:日大理工・学部・土木, 2:日大理工・教員・土木, 3:電源開発株式会社

Table2. Velocity distribution in jump below weirs

台形堰(H/d <sub>c</sub> =2.79)					鉛直堰(H/d <sub>c</sub> =2.79)				
ℓ/d <sub>c</sub>	x/L <sub>j</sub>	y/(B/2)	流速分布の傾向と範囲		ℓ/d <sub>c</sub>	x/L <sub>j</sub>	y/(B/2)	流速分布の傾向と範囲	
1.4	0.65	-0.75 ≤ y/(B/2) ≤ 0.75	FI		1.4	0.65	-0.75 ≤ y/(B/2) ≤ 0.75	FI	
	0.86	-0.50 ≤ y/(B/2) ≤ 0.50	y/(B/2)=±0.50 -0.25 ≤ y/(B/2) ≤ 0.25	WJ FI		0.86	-0.50 ≤ y/(B/2) ≤ 0.50	WJ	
3.5	0.65	-0.75 ≤ y/(B/2) ≤ 0.75	FI		3.5	0.65	-0.75 ≤ y/(B/2) ≤ 0.75	y/(B/2)=±0.75 -0.50 ≤ y/(B/2) ≤ 0.50	FI WJ
	0.86	[Diagram showing velocity profile]				0.86	[Diagram showing velocity profile]		
6.3	0.65	-0.50 ≤ y/(B/2) ≤ 0.50	FI		6.3	0.65	-0.25 ≤ y/(B/2) ≤ 0.25	y/(B/2)=±0.25から0に向かってWJに近づく	
	0.86	[Diagram showing velocity profile]				0.86	[Diagram showing velocity profile]		
台形堰(H/d <sub>c</sub> =5.58)					鉛直堰(H/d <sub>c</sub> =5.58)				
ℓ/d <sub>c</sub>	x/L <sub>j</sub>	y/(B/2)	流速分布の傾向と範囲		ℓ/d <sub>c</sub>	x/L <sub>j</sub>	y/(B/2)	流速分布の傾向と範囲	
1.4	0.65	-0.75 ≤ y/(B/2) ≤ 0.75	FI		1.4	0.65	-0.75 ≤ y/(B/2) ≤ 0.75	FI	
	0.86	-0.50 ≤ y/(B/2) ≤ 0.50	y/(B/2)=±0.50 -0.25 ≤ y/(B/2) ≤ 0.25	FI WJ		0.86	-0.50 ≤ y/(B/2) ≤ 0.50	y/(B/2)=±0.50 y/(B/2)=±0.25から0に向かってWJに近づく	FI WJ
3.5	0.65	-0.50 ≤ y/(B/2) ≤ 0.50	FI		3.5	0.65	-0.75 ≤ y/(B/2) ≤ 0.75	FI	
	0.86	-0.25 ≤ y/(B/2) ≤ 0.25	y/(B/2)=±0.25 y/(B/2)=0	FI WJ		0.86	[Diagram showing velocity profile]		
6.3	0.65	-0.50 ≤ y/(B/2) ≤ 0.50	FI		6.3	0.65	-0.50 ≤ y/(B/2) ≤ 0.50	FI	
	0.86	[Diagram showing velocity profile]				0.86	[Diagram showing velocity profile]		



a) ℓ/d<sub>c</sub>=1.4, F<sub>1</sub>=4.22, θ=26.6°



b) ℓ/d<sub>c</sub>=1.4, F<sub>1</sub>=4.51, θ=90°

Figure 2. Change of z<sub>1</sub> (z = z<sub>1</sub> at u = U<sub>max</sub>) with x/L<sub>j</sub>

また、台形堰より鉛直堰の方が越流水脈の衝突角度が大きい為、流線の曲がりが大きく、下流側遠方まで直線変化する。

H/d<sub>c</sub> = 5.58 の場合、ℓ/d<sub>c</sub> = 1.4 の範囲において、台形堰より鉛直堰の方が下流側遠方まで直線変化する。これは、鉛直堰において射流が乱れる前に跳水に流入するため、流線の曲がりの影響を大きく受けたものと考えられる。ℓ/d<sub>c</sub> = 6.3 では、台形堰・鉛直堰ともに、x/L<sub>j</sub> ≤ 0.65 で z<sub>1</sub> の変化は破線と同様な変化傾向を示す。また、x/L<sub>j</sub> ≥ 0.86 では破線の直線変化から外れて水面に向かって上昇するようになる。

上記のことから、z<sub>1</sub> の変化傾向は、H/d<sub>c</sub>=2.79 の場合、越流面角度による影響が顕著であることがわかる。また H/d<sub>c</sub> = 5.58 の場合、z<sub>1</sub> の変化傾向について、跳水形成位置による影響が顕著であることがわかる。

### 5. まとめ

堰模型下流側に形成される跳水を対象に、Table 1 に示す実験条件のもとで跳水中の流速を検討した。その結果、1.4 ≤ ℓ/d<sub>c</sub> ≤ 6.3 の範囲において、堰下流側の流入射流が流線の曲がりの影響を受け、跳水中の 0.60 < x/L<sub>j</sub> < 1.0 の範囲でも流速が(1)の関係で整理できる領域が存在し、噴流の影響が及んでいることを示した。また、その結果を Table 2 にまとめた。

最大流速の位置 z<sub>1</sub> の変化については、流入射流の流線の曲がりの影響がない自由跳水中に見られる直線変

化が x/L<sub>j</sub> > 0.60 でも見られることを示し、跳水中の主流の変化に対して堰の越流面角度、相対落差、跳水形成位置が影響することを明らかにした。

### 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. and Yasuda, Y.(1994), Characteristics of Supercritical Flow below Sluice Gate, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.120, No.3, pp.332 - 346.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 佐藤麻衣, 安田陽一(2012), 第 39 回土木学会関東支部関東支部技術研究発表会, 第 II 部門, II -92, CD-ROM.
- 6) 佐藤麻衣, 安田陽一(2012), 第 67 回土木学会年次学術講演会, 第 II 部門, II -066, CD-ROM.
- 7) 佐藤麻衣, 安田陽一(2012), 第 56 回日本大学工学部学術講演会, H3-2, CD-ROM.
- 8) 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.