

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

日本大学理工学部土木工学科 正会員 安田陽一, 正会員 高橋直己
電源開発株式会社 佐藤麻衣
日本大学理工学部土木工学科 学生会員 ○神戸基秀

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²⁾によって異なることが報告されている^{3),4)}。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。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い、流線の曲がりの影響について考察した。

表 1 実験条件

台形堰	H=0.20m(H/d _c =2.79)		
	ℓ/d _c =1.4	ℓ/d _c =3.5	ℓ/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	4.22	4.17	4.03
跳水始端水深h ₁ (m)	0.0275	0.0277	0.0283
跳水終端水深(実験値)h ₂ (m)	0.147	0.146	0.144
跳水長 L _j = 5.5 h ₂ (m)	0.81	0.81	0.79
台形堰	H=0.40m(H/d _c =5.58)		
	ℓ/d _c =1.4	ℓ/d _c =3.5	ℓ/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	6.22	5.94	5.70
跳水始端水深h ₁ (m)	0.0212	0.0219	0.0225
跳水終端水深(実験値)h ₂ (m)	0.172	0.169	0.166
跳水長 L _j = 5.5 h ₂ (m)	0.94	0.93	0.91
鉛直堰	H=0.20m(H/d _c =2.79)		
	ℓ/d _c =1.4	ℓ/d _c =3.5	ℓ/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	4.51	4.34	4.23
跳水始端水深h ₁ (m)	0.0263	0.0269	0.0274
跳水終端水深(実験値)h ₂ (m)	0.152	0.149	0.147
跳水長 L _j = 5.5 h ₂ (m)	0.83	0.82	0.81
鉛直堰	H=0.40m(H/d _c =5.58)		
	ℓ/d _c =1.4	ℓ/d _c =3.5	ℓ/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	5.47	5.57	5.18
跳水始端水深h ₁ (m)	0.0231	0.0228	0.0239
跳水終端水深(実験値)h ₂ (m)	0.164	0.163	0.160
跳水長 L _j = 5.5 h ₂ (m)	0.90	0.89	0.88

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、表 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×h₂^{*} で求めた²⁾) の位置で、横断方向へ 0.10m 間隔に 7 ヲ所で行った。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 50 msec, 採取時間を 90 sec)。

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を検討するために、流下方向成分の流速 u を(1)の関係で整理できた結果を表 2, 3 に示す。紙面の都合から図示した一例は参考文献 5),6),7)を参照していただきたい。

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

ここに、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)、θ は越流面角度である。

台形堰および鉛直堰の場合、表 2, 3 に示されるように、1.4 ≤ ℓ/d_c ≤ 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)の範囲が存在する。

台形堰と鉛直堰とを比較すると、H/d_c = 2.79 については、鉛直堰の方が、壁面噴流(WJ)の流速分布⁸⁾と同様な傾向が得られやすい。これは、鉛直堰の方が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と考えられる。H/d_c = 5.58 については、台形堰より鉛直堰の方が相似な分布が得られにくい。これは、H/d_c が大きい場合、鉛直堰下流側で跳水に流入する射流の乱れが大きく、主流が上昇し易い傾向になるためと考えられる。

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 z₁ の流下方向の変化を(2)の関係で示した一例を図 1~2 に示す。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 z₁ の変化傾向²⁾であり、式(3)で表示され x/L_j < 0.6 ~ 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 ≤ x/L_j < 1.5 まで外装して示している。

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

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

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

H/d_c = 2.79 の場合、台形堰と鉛直堰のいずれも、1.4 ≤ ℓ/d_c ≤ 6.3, -0.25 ≤ y/(B/2) ≤ 0.25 の範囲において x/L_j < 1.5 で、z₁ の変化は破線と同様な変化傾向となる。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ため、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_c = 5.58 の場合、台形堰と鉛直堰のいずれも、ℓ/d_c ≤ 3.5 の範囲において x/L_j ≤ 0.86 で、ℓ/d_c = 6.3 では x/L_j ≤ 0.65 で z₁ の変化は破線と同様な変化傾向を示す。また、x/L_j ≥ 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。

キーワード 落差工, 減勢工, 跳水, 局所流, 流線の曲がり

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

上記のことから、 z_1 の変化傾向は相対落差 H/d_c によって異なることがわかる。 $H/d_c=5.58$ より $H/d_c=2.79$ の場合、 z_1 が直線変化する傾向にある。これは、相対落差の小さい方が、越流水脈の衝突後の射流の乱れが相対落差の大きい場合と比べて小さいため、跳水中でも流線の曲りの影響が下流側遠方に続いたものと考えられる。

表 2 (1)の関係で整理できる範囲(台形堰)

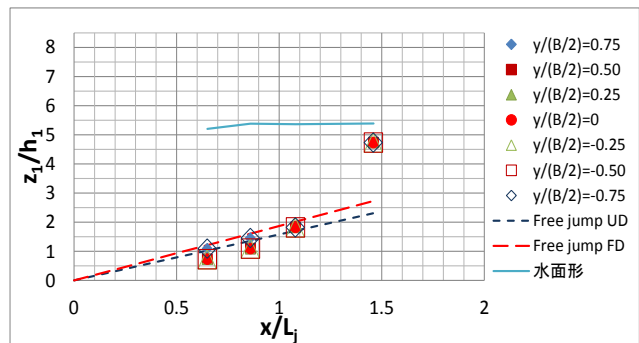
台形堰($H/d_c=2.79$)				
l/d_c	x/L_j	$y/(B/2)$	流速分布の傾向と範囲	
1.4	0.65	$-0.75 \leq y/(B/2) \leq 0.75$		FJ
	0.86	$-0.50 \leq y/(B/2) \leq 0.50$	$y/(B/2)=\pm 0.50$ $-0.25 \leq y/(B/2) \leq 0.25$	WJ FJ
3.5	0.65	$-0.75 \leq y/(B/2) \leq 0.75$		FJ
	0.86			
6.3	0.65	$-0.50 \leq y/(B/2) \leq 0.50$		FJ
	0.86			
台形堰($H/d_c=5.58$)				
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	$-0.50 \leq y/(B/2) \leq 0.50$	$y/(B/2)=\pm 0.50$ $-0.25 \leq y/(B/2) \leq 0.25$	FJ WJ
3.5	0.65	$-0.50 \leq y/(B/2) \leq 0.50$		FJ
	0.86	$-0.25 \leq y/(B/2) \leq 0.25$	$y/(B/2)=\pm 0.25$ $y/(B/2)=0$	FJ WJ
6.3	0.65	$-0.50 \leq y/(B/2) \leq 0.50$		FJ
	0.86			

表 3 (1)の関係で整理できる範囲(鉛直堰)

鉛直堰($H/d_c=2.79$)				
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	$-0.50 \leq y/(B/2) \leq 0.50$		WJ
3.5	0.65	$-0.75 \leq y/(B/2) \leq 0.75$	$y/(B/2)=\pm 0.75$ $-0.50 \leq y/(B/2) \leq 0.50$	FJ WJ
	0.86			
6.3	0.65	$-0.25 \leq y/(B/2) \leq 0.25$	$y/(B/2)=\pm 0.25$ から0に向かつてWJに近づく	
	0.86			
鉛直堰($H/d_c=5.58$)				
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	$-0.50 \leq y/(B/2) \leq 0.50$	$y/(B/2)=\pm 0.50$ $y/(B/2)=\pm 0.25$ から0に向かつてWJに近づく	FJ
3.5	0.65	$-0.75 \leq y/(B/2) \leq 0.75$		FJ
	0.86			
6.3	0.65	$-0.50 \leq y/(B/2) \leq 0.50$		FJ
	0.86			

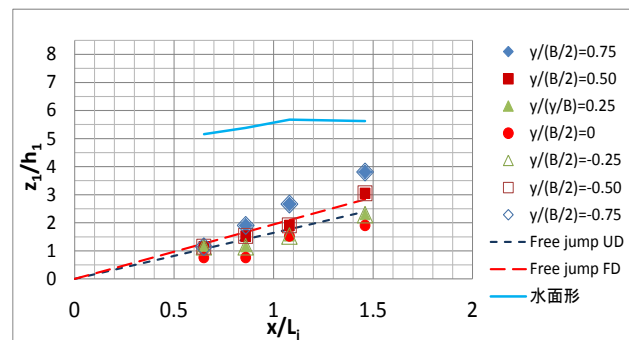
5. まとめ

堰模型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跳水中の流速を検討した。その結果、 $1.4 \leq l/d_c \leq 6.3$ 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 $x/L_j > 0.60$ でも、流速が(1)の関係で整理できる領域が存在し、噴流の性格が得られることを示し、その結果を表 2, 3 に



a) $l/d_c=1.4$, $F_1=4.22$, $\theta=26.6^\circ$

図 1 台形堰下流側の最大流速の位置($H/d_c=2.79$)



a) $l/d_c=1.4$, $F_1=4.51$, $\theta=90^\circ$

図 2 鉛直堰下流側の最大流速の位置($H/d_c=2.79$)

まとめた。また、最大流速の位置 z_1 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 $x/L_j > 0.60$ 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 回日本大学理工学部学術講演会, 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.