

鉛直堰下流側に形成される跳水部の流速特性

Velocity characteristics of hydraulic jumps below abrupt drop 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 ○神戸基秀

1. はじめに

可動堰や固定堰などの河川構造物の下流側では、跳水を利用して高速流の減勢を行い、跳水区間に護床工を設置するという考え方に基づいて河床保護が行われている¹⁾。長方形断面水平水路においてスルース・ゲートもしくはノズルを用いて形成された自由跳水については、既往の研究において水路中央部を対象とした検討がなされ、諸特性が明らかにされている^{2),3)}。特に跳水始端において乱流境界層⁴⁾が十分に発達している場合、 $x/L_j > 0.60$ (x : 跳水始端から流下方向への距離, L_j : 跳水長 (= $5.5h_2$ ²⁾, h_2 : 跳水終端水深) で主流が水面に向かって上昇することが報告されている²⁾。また、 $x/L_j < 0.60$ で主流が底面近くに存在する場合には、壁面噴流の場合^{5),6)}と同様に近似的に相似な流速分布が得られることが明らかになっている²⁾。しかしながら、堰下流側に跳水が形成される場合、跳水始端における流線の曲がりの影響を無視することができない。構造物下流側での減勢や河床に与える影響を評価し、その対策を検討するためにも、堰下流側における跳水に関する正確な情報を明らかにすることが必要である。

最近の著者らの研究^{7),8)}により、堰下流側における跳水部の流速特性について相対落差、越流面角度、跳水形成位置を変化させた実験的検討が行われ、流線の曲がりの影響を受ける場合、跳水始端において乱流境界層が十分に発達しているにも関わらず跳水長の約90%近くまで壁面噴流と同様な流速分布が続いており、主流が水表面まで上昇していないことが示された。

本研究では、鉛直堰下流側に形成される跳水中の流速特性に対する流線の曲がりの影響について明らかにする。相対落差 $H/d_c = 1.20, 2.79, 5.58$ (H : 堰落差高さ, d_c : 限界水深) の場合を対象に、鉛直堰下流側における最大流速の位置および跳水中の流速分布に対する相対落差の影響を実験的に検討し、それらの諸特性を明らかにした。

2. 実験

実験は、水路幅 $B = 0.80\text{m}$ 、高さ 0.60m 、全長 15m を有する長方形断面水平水路に $H=0.10\text{m}$ の鉛直堰模型を設置し、表-1 に示す実験条件のもとで跳水形成位置 ℓ/d_c を変化させて行った (ℓ : 淀み点から跳水始端までの距離)。既往の長方形断面水平水路における自由跳水に関する研究と比較するため、跳水区間の

表-1 実験条件

H=0.10m (H/d _c =1.20)	跳水形成位置 ℓ/d_c		
	$\ell/d_c=1.4$	$\ell/d_c=3.5$	$\ell/d_c=6.3$
流量Q (m ³ /s)	6.03×10^{-2}	6.03×10^{-2}	6.03×10^{-2}
レイノルズ数Re (=q/v)	73190	73190	73190
跳水始端のフルード数F ₁	2.87	2.91	2.89
跳水始端水深h ₁ (m)	0.0413	0.0410	0.0411
跳水終端水深h ₂ (実験値)(m)	0.147	0.146	0.146
跳水長L _j = 5.5h ₂ (m)	0.81	0.80	0.80
H=0.20m (H/d _c =2.79)	$\ell/d_c=1.4$	$\ell/d_c=3.5$	$\ell/d_c=6.3$
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	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h ₂ (実験値)(m)	0.152	0.149	0.147
跳水長L _j = 5.5h ₂ (m)	0.83	0.82	0.81
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	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h ₂ (実験値)(m)	0.164	0.163	0.160
跳水長L _j = 5.5h ₂ (m)	0.90	0.89	0.88

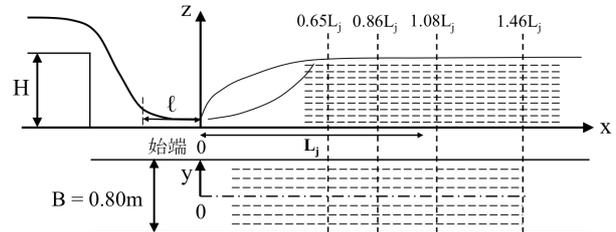


図-1 測定位置

60%より下流側に着目して流速の測定位置を選定した。図-1に示すように、流下方向に $x = 0.65L_j, 0.86L_j, 1.08L_j, 1.46L_j$ の位置で、横断方向へ 0.10m 間隔で測定を行った。また、流下方向流速 u および横断方向流速 v を計測するため、KENEK社製I型2次元電磁流速計(採取間隔 50msec 、採取時間 120sec)を用いた。

3. 堰下流側における各測定断面の主流の位置

堰下流側に形成される跳水を含む領域の最大流速の位置 z_1 の変化傾向について、相対落差による影響について比較検討する。流速測定区間である $0.65 \leq x/L_j \leq 1.46$ における z_1 の変化について(1)の関係で整理した例 ($\ell/d_c=1.4, 6.3$ の場合) を図-2, 3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

キーワード 跳水, 落差工, 流線の曲がり, 流入条件, 流速分布

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

合の自由跳水 (FJ : free jump) の z_1 の変化傾向²⁾を示し, $x/L_j < 0.6 \sim 0.7$ の範囲で適用される. ここでは $x/L_j > 0.6$ の範囲でも噴流の性格が続くため, $0.60 \leq x/L_j \leq 1.46$ の範囲にも直線変化を外挿している. 図中の一点鎖線は壁面噴流 (WJ : wall jet) の場合の z_1 の変化傾向²⁾を示す. また, 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⁴⁾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⁴⁾を示す.

$$z_1/h_1 = f(x/L_j, y/[B/2], H/d_c, \ell/d_c, F_1, \theta) \quad (1)$$

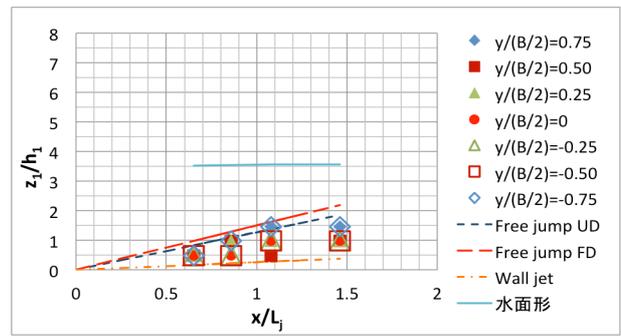
$\ell/d_c = 1.4$ の位置から跳水が形成された場合, 図-2 a) ~ c) に示されるように, $H/d_c = 5.58$ では $x/L_j \leq 1.08$ で, $H/d_c = 2.79$ では $x/L_j \leq 1.46$ で水路中央付近を中心に, z_1 は自由跳水の場合の外挿された破線と同様な傾向を示す. $H/d_c = 1.20$ では, $x/L_j \leq 1.46$ で破線と一点鎖線の間で z_1 が位置しており, $x/L_j \leq 1.08$ で主流が底面近くに位置している. $H/d_c = 1.20$ の場合, $H/d_c = 2.79, 5.58$ の場合に比べて壁面噴流の傾向に近づいているが, これは流入射流の流脈の乱れが小さくなったことによるものと考えられる. このことは流況観察から確認される. このことから, $H/d_c = 1.20$ の場合, $H/d_c = 2.79, 5.58$ の場合に比べて流入射流の流脈の乱れが小さく, 跳水始端における流線の曲がりの影響が大きくなったため, 下流側遠方まで続いたものと考えられる.

$\ell/d_c = 6.3$ の位置から跳水が形成された場合, 図-3 a) ~ c) に示されるように, $H/d_c = 1.20$ では $0.65 \leq x/L_j \leq 1.46, -0.50 \leq y/(B/2) \leq 0.50$ の範囲で z_1 が横断方向に変化しておらず, 底面近くに位置している. $H/d_c = 2.79$ では, z_1 は $-0.25 \leq y/(B/2) \leq 0.25, x/L_j \leq 1.46$ の範囲で自由跳水の場合の外挿線 (破線) と同様な変化を示す. $H/d_c = 5.58$ では, z_1 は $x/L_j = 0.65$ で破線より上昇している. すなわち, 相対落差が小さくなると, 流入射流の流脈の乱れが小さくなるため, $H/d_c = 5.58$ の場合に比べ, $H/d_c = 1.20, 2.79$ の方がより下流側まで z_1 の位置が破線の場合と同様な直線変化を示すか, あるいは破線よりも下に位置している.

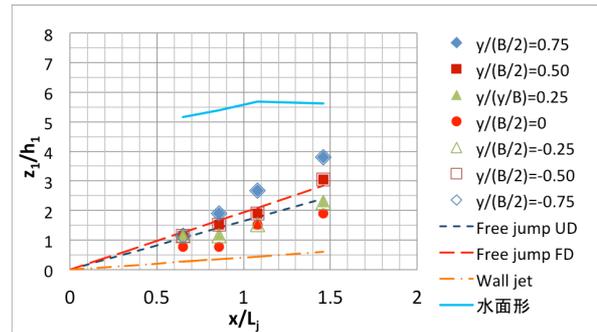
4. 跳水中の流速分布

堰下流側で形成される跳水部において噴流の性格が続く領域を明らかにするため, 流下方向成分の流速 u について, 次元解析により得られた(2)の関係で整理できる領域と流速分布の特徴を表-2 にまとめ, その一例 ($\ell/d_c = 1.4$ の場合) を図-4 に示す.

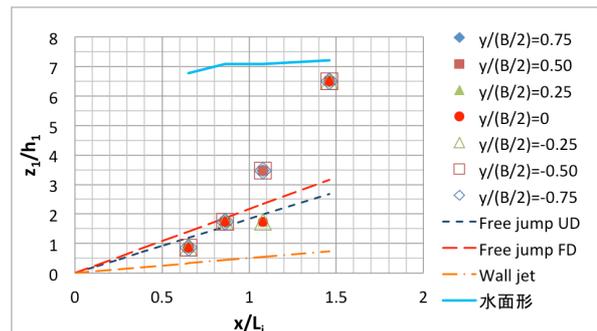
$$u/U_{max} = f(z/Z, y/[B/2], H/d_c, \ell/d_c, x/L_j, F_1, \theta) \quad (2)$$



a) $H/d_c = 1.20$

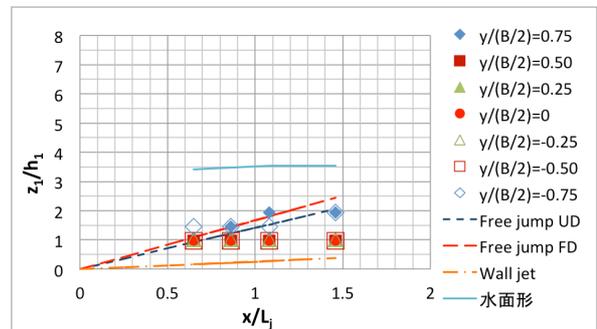


b) $H/d_c = 2.79$



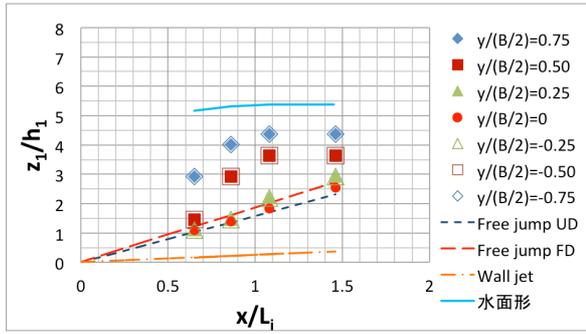
c) $H/d_c = 5.58$

図-2 最大流速の発生位置 ($\ell/d_c = 1.4$ の場合)

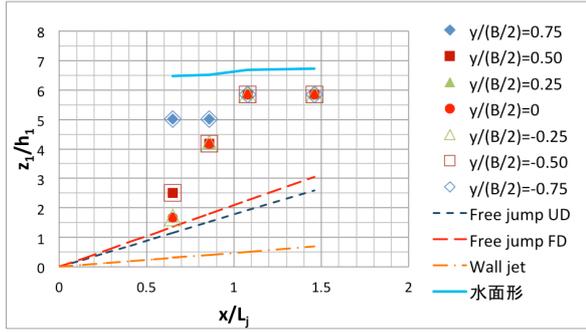


a) $H/d_c = 1.20$

図-3 最大流速の発生位置 ($\ell/d_c = 6.3$ の場合)



b) $H/d_c=2.79$

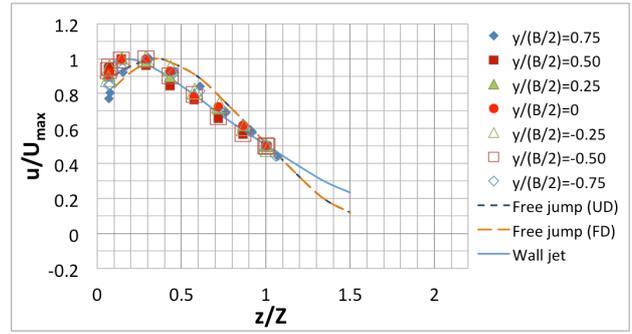


c) $H/d_c=5.58$

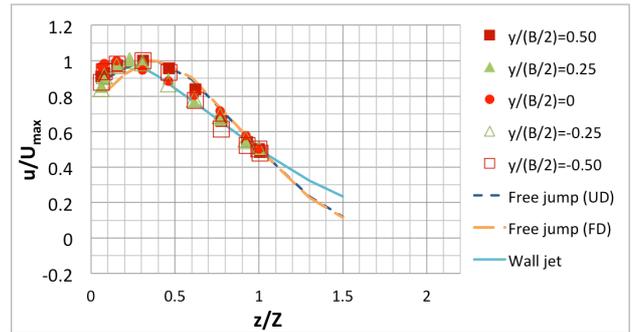
図-3 最大流速の発生位置 ($l/d_c=6.3$ の場合)

表-2 (2)の関係で整理できる領域とその特徴

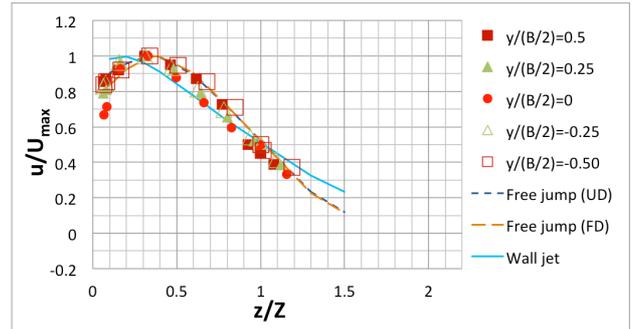
$H/d_c=1.20$			
l/d_c	x/L_j	$y/(B/2)$	流速分布の傾向と範囲
1.4	0.65	$-0.75 \leq y/(B/2) \leq 0.75$	FJとWJの間
	0.86	$-0.75 \leq y/(B/2) \leq 0.75$	$y/(B/2) = \pm 0.75$ FJとWJの間
			$-0.50 \leq y/(B/2) \leq 0.50$ WJ
3.5	0.65	$-0.75 \leq y/(B/2) \leq 0.75$	FJ
	0.86		
6.3	0.65	$-0.75 \leq y/(B/2) \leq 0.75$	FJ
	0.86		
$H/d_c=2.79$			
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	$-0.75 \leq y/(B/2) \leq 0.75$	$y/(B/2) = \pm 0.75$ FJ
	0.86		$-0.50 \leq y/(B/2) \leq 0.50$ WJ
6.3	0.65	$-0.50 \leq y/(B/2) \leq 0.50$	$y/(B/2) = \pm 0.25$ から0に向かってWJに近づく
	0.86		
$H/d_c=5.58$			
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	$-0.50 \leq y/(B/2) \leq 0.50$	$y/(B/2) = \pm 0.50$ 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		



a) $H/d_c=1.20, l/d_c=1.4, x/L_j=0.86$



b) $H/d_c=2.79, l/d_c=1.4, x/L_j=0.86$



c) $H/d_c=5.58, l/d_c=1.4, x/L_j=0.86$

図-4 鉛直堰下流側 ($x/L_j=0.86$) の流速分布

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、 $du/dz < 0$) までの鉛直高さ (噴流幅)、 θ は越流面角度である。

図中破線は、自由跳水の流速分布として示された場合²⁾、実線は壁面噴流の流速分布として示された場合²⁾を示す。

u を(2)の関係で整理することができる流速分布特性について、跳水設定位置 (l/d_c) ごとに、相対落差 H/d_c による影響について比較検討した結果を以下に述べる。

$l/d_c = 1.4$ の位置から跳水が形成された場合、表-2 および図 4 a) ~ c) に示されるように、相対落差に関わらず $x/L_j \leq 0.86$ で(2)の関係で整理できる流速分布 (相似な流速分布) が得られる。流速分布の傾向を比較すると、 $x/L_j = 0.65$ では $H/d_c = 1.20$ の場合、 $H/d_c = 2.79, 5.58$ の場合に比べてより壁面噴流の流速分布に近い傾向となっていることが分かる。また、 $x/L_j = 0.86$

では、 $H/d_c = 1.20, 2.79$ の方が $H/d_c = 5.58$ の場合に比べて壁面噴流の傾向を示す範囲が大きい。いずれの場合も、流速分布は相対落差が小さい方がより壁面噴流に近い傾向を示している。相対落差が小さくなるにつれて流入射流の流脈の乱れが小さくなり、跳水始端で流線の曲がりの影響を大きく受け、流速分布が壁面噴流の傾向に近くなったものと考えられる。なお、相対落差に関わらず $x/L_j = 0.65$ より $x/L_j = 0.86$ の方が、流速分布が壁面噴流の傾向に近づいている。これは、表面渦が形成されている領域よりも下流側でありながら主流の位置が底面近くに存在しており、気泡混入を伴った表面渦の影響が小さいため、壁面噴流に近い傾向を示す分布形状となったものと考えられる。

$H/d_c = 5.58, l/d_c \geq 3.5$ の場合を除いた場合において主流の位置 z_1 は $x/L_j > 0.90$ の領域でも自由跳水の場合と同様な直線変化を示すか、壁面噴流の場合に近い変化傾向を示すにも関わらず、相似な流速分布が得られる領域は $x/L_j < 0.90$ である。これは、いずれの相対落差においても流線の曲がりによって流入射流の流脈が乱され、跳水部の主流の流速が減衰されやすくなり、 $U_{max}/2$ が示されるほど流速差が生じなかったためと考えられる。また、図-4および表-2に示されるように、流速分布の変化傾向は横断方向によって異なっており、3次元的になっている。これは越流水脈の衝突点から形成された衝撃波が跳水部内の流れに影響を及ぼしたものと考えられる。この場合、跳水の流速特性は水路中央部での平均流速によって代表することはできず、3次元的な検討が必要であるものと考えられる。

5. まとめ

相対落差 $H/d_c = 1.20, 2.79, 5.58$ の場合について、鉛直堰下流側における最大流速の位置、跳水中の流速分布に対する相対落差の影響を表-1に示す条件のもとで実験的に検討した。得られた結果を以下にまとめる。

1. 堰下流側に形成される跳水部を含む領域における各測定断面の最大流速が生じる位置 z_1 の変化について、相対落差 H/d_c の影響を検討した結果、跳水始端で流線の曲がりの影響を受ける場合、 $x/L_j = 0.60$ 近くでは主流が水表面に向かって上昇していないことを示した。また、相対落差が小さくなるにつれて流入射流の流脈の乱れが小さくなるが、跳水始端における流線の曲がりの影響が大きいので、 $x/L_j > 0.90$ であっても z_1 が底面近くに位置していることを示した。

2. 堰下流側に形成される跳水部において、流下方向成分の流速 u を(2)の関係で整理することができる領域の流速分布について、その特徴を表-2に示した。特に、 $0.60 < x/L_j < 0.90$ の領域で噴流の性格を有した相似な流速分布が得られることを示した。また、 $H/d_c = 5.58, l/d_c \geq 3.5$ の場合を除いて、最大流速が生じる位置 z_1 は $x/L_j > 0.90$ の領域でも自由跳水内の $x/L_j < 0.60$ で示される主流の変化を外挿した場合、または壁面噴流の主流の変化に近い傾向を示す一方、流入射流の流脈が乱され、主流の流速が減衰されやすくなったため、相似な流速分布が得られる領域は $x/L_j < 0.90$ であることを示した。さらに、堰下流側に形成される衝撃波の影響により流速分布の変化傾向は横断方向によって異なり、3次元的になっていることを示した。

参考文献

- 1) 建設省河川局監修：改訂新版 河川砂防技術基準(案) 同解説・設計編[1]，第15刷，技法堂出版，2012。
- 2) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Awazu, S.: Free and Submerged hydraulic Jumps in Horizontal Rectangular Channel, Report of the Research in Horizontal Rectangular Channel, Report of the Research Institute of Science and Technology, Nihon University, No. 35, pp. 1-50, 1990.
- 3) Wu, S. and Rajaratnam, N.: Free Jump, Submerged Jump, and Wall Jets, Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol. 33, No. 2, pp. 197-212, 1995.
- 4) Ohtsu, I. and Yasuda, Y.: Characteristics of Supercritical Flow below Sluice Gate, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 120(3), pp. 332-346, 1994.
- 5) Rajaratnam, N.: Turbulent Jets, Developments in water science, vol.5, pp.210-225, 1976.
- 6) Schwarz, W. H. and Cosart, W. P.: The two-dimensional turbulent wall-jet, Journal of Fluid Mechanics, Vol.10, Part 4, 1961.
- 7) 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分布特性, 第68回土木学会年次学術講演会, II-054, CD-ROM, 2013.
- 8) 神戸基秀, 安田陽一: 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, 第69回土木学会年次学術講演会, II-166, CD-ROM, 2014.