

鉛直堰下流側に形成される跳水の流速特性に対する相対落差の影響

The effects of relative drop height on velocity characteristics in hydraulic jump below an abrupt drop

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落差を伴う河川構造物下流側では、跳水を利用した高速流の制御と、跳水区間に護床工を設置するという考え方に基づいた河床保護が義務付けられている¹⁾。ノズルやスルース・ゲートを用いて形成された自由跳水については、既往の研究で諸特性が明らかにされている^{2),3)}。特に跳水始端で乱流境界層が十分に発達している場合、跳水区間の60%より下流側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⁾。堰下流側で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。よって、構造物下流側での流速の減衰状況や河床に与える影響を考える上では、堰下流側に形成される跳水の流速特性について十分に検討する必要がある。

最近の著者らの研究^{4),5)}では堰下流側の跳水部の流速特性について堰の相対落差、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てきた。その結果、跳水始端で流線の曲がりの影響を受ける場合、主流は跳水区間の60%以降も底面付近に位置していることが示されている。また、堰を越流した後の流脈の乱れや衝撃波の形成状況が相対落差によって異なっていたことから、相対落差によって流線の曲がりの影響が変化することが推論される。したがって、堰下流側の跳水部を含む領域の流速特性に対する相対落差の影響を検討する必要がある。

ここでは、鉛直堰下流側に形成される跳水部を含む領域を対象に、流速特性に対する相対落差の影響を明らかにする。そのため、相対落差 $H/d_c = 2.79, 5.58$ (H : 堰落差高さ, d_c : 限界水深) の実験結果^{4),5)}に $H/d_c = 1.20$ の場合の実験結果を加え、堰下流側における最大流速の発生位置および跳水中の流速分布について検討した。

2. 実験

実験は、水路幅 $B = 0.80\text{m}$ 、高さ 0.60m 、全長 14.5m 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行った。測定は、図1に示すように $x = 0.65L_j, 0.86L_j, 1.08L_j, 1.46L_j$ ($L_j = 5.5h_2$ としている²⁾; h_2 は跳水終端水深) の位置で、横断方向へは 0.10m 間隔で行った。また、流下方向流速 u と横断方向流速 v を計測するため、KENEK社製I型2次元電磁流速計を用いた(採取間隔 50msec 、採取時間 120sec)。

3. 各測定断面における最大流速の発生位置

堰下流側の跳水部を含む各測定断面での最大流速の位置 z_1 の変化傾向に対する相対落差の影響を検討する。 z_1 について(1)の関係で整理した例 ($l/d_c = 1.4$ の場合) を図2に示す。図中破線は跳水始端で流線の曲がりの影響を受けない場合の自由跳水(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 $0.60 \leq x/L_j \leq 1.46$ にも直線変化を外挿している。また、UD (undeveloped inflow) は跳水始端で乱流境界層が発達していない状態、FD (fully developed inflow) は始端で乱流境界層が十分に発達している状態を示す。図中一点鎖線は壁面噴流(WJ: wall jet)の場合の z_1 の

キーワード 落差工, 跳水, 流線の曲がり, 相対落差, 流入条件

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

表1 実験条件

$H = 0.10\text{ m}$ ($H/d_c = 1.20$)	跳水形成位置 l/d_c		
	$l/d_c = 1.4$	$l/d_c = 3.5$	$l/d_c = 6.3$
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

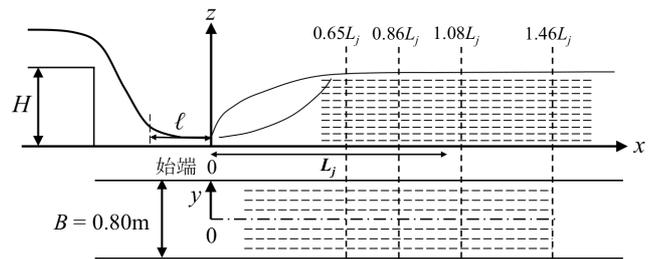


図1 測定位置

変化傾向²⁾を示す。

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

$l/d_c = 1.4$ の場合、図2 a)に示されるように、 $H/d_c = 5.58$ では $x/L_j \leq 1.08$ 、 $H/d_c = 2.79$ では $x/L_j \leq 1.46$ で水路中央付近を中心に破線と同様な変化傾向を示す。 $H/d_c = 1.20$ 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、 $H/d_c = 5.58, 2.79$ に比べてWJに近い傾向を示している。これは、 $H/d_c = 1.20$ の場合、流入射流の流脈の乱れが最も小さく、跳水始端における流線の曲がりの影響が大きくなり、下流側遠方まで続いたものと考えられる。このように、相対落差が小さくなるにつれてより下流側まで 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という傾向は、 $l/d_c = 3.5, 6.3$ の場合にも見られた(ここでは、紙面の都合で割愛する)。

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、流下方向流速 u について以下の(2)の関係で整理することができる領域と、流速分布の特徴を表2に示す。また、(2)の関係で整理した結果の一例として、各相対落差の場合の水路中央部における流速分布 ($l/d_c = 1.4, x/L_j = 0.86$ の場合) を図3に示す。

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

ここに、 U_{max} は各測定断面における最大流速、 Z は噴流幅(底面から $du/dz < 0$ で $U_{max}/2$ が生じる位置までの鉛直高さ)である。表2および図3から分かるように、いずれの相対落差の場合でも $x/L_j > 0.60$ で(2)の関係で整理することができる流速分布が得られた。また、主流の位置 z_1 が底面近くに存在していながら、流速分布は(2)の関係で整理できない領域が存在することがわか

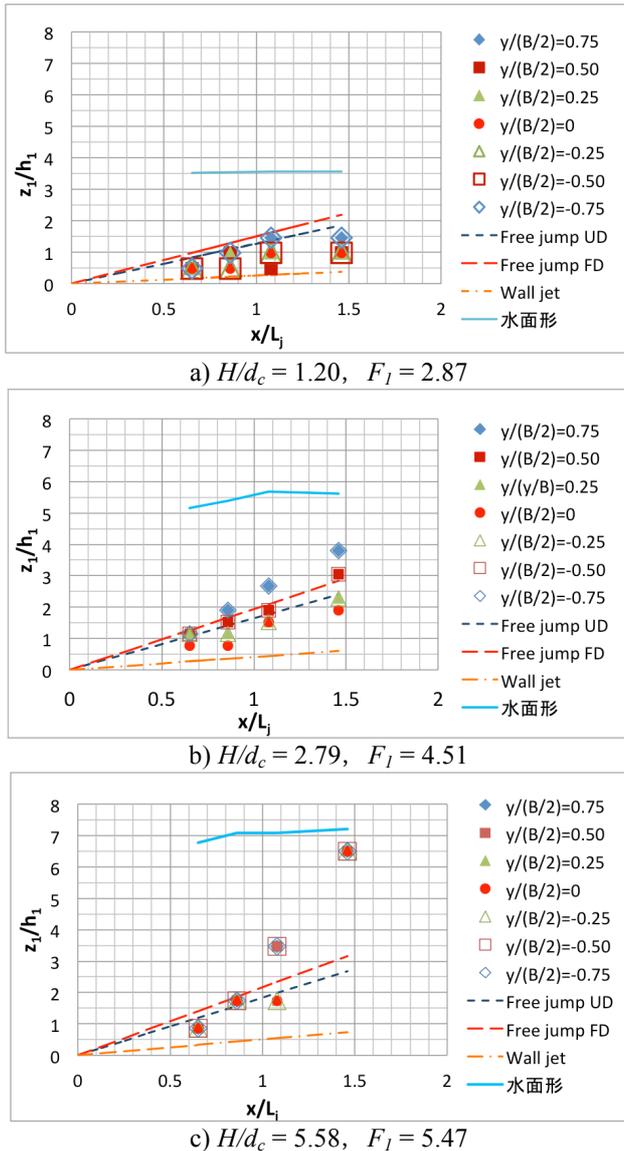


図2 最大流速の発生位置 ($\ell/d_c = 1.4$ の場合)

った。一例として、 $\ell/d_c = 1.4, H/d_c = 1.20$ の場合の z_1 の変化傾向を示した図 2 a)では跳水区間以降も z_1 は底面近くに位置しているが、流速分布を(2)の関係で整理することができるのは $x/L_j \leq 0.86$ の範囲である。これは、いずれの相対落差においても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り、 $du/dz < 0$ の範囲で $U_{max}/2$ が示されるほど流速差が生じなかったためだと考えられる。

5. まとめ

鉛直堰下流側における最大流速の位置の変化、跳水中の流速分布に対する相対落差の影響について、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要約して示す。

堰下流側の跳水部を含む領域について、相対落差が小さく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ため、跳水区間より下流側であっても z_1 が底面近くに位置していることを示した。跳水中の流速分布については、いずれの相対落差の場合でも、 $0.60 < x/L_j < 0.90$ の範囲で流下方向流速 u を(2)の関係で整理できる流速分布となっていることを示した。また、 z_1 が底面近くに位置しているにもかかわらず、流速分布は(2)の関係で整理することができない断面が存在する。

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		

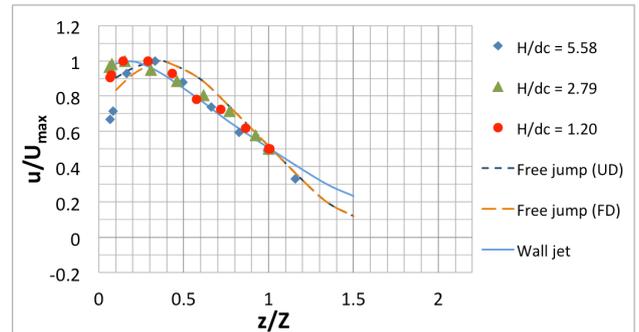


図3 水路中央部での流速分布 ($\ell/d_c = 1.4, x/L_j = 0.86$)

以上のことから、跳水区間内の流速分布が $du/dz < 0$ となる $U_{max}/2$ が存在する流速分布となる一方、相対落差が小さくなるにつれて、跳水区間より下流側においても最大流速が生じる位置が底面近くに存在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 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 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) 安田陽一，高橋直己，佐藤麻衣，神戸基秀：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。
- 5) 安田陽一，神戸基秀：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。