

鉛直堰下流側に形成される跳水中の流速特性

Velocity Characteristics of Hydraulic Jumps below an Abrupt Drop

日本大学理工学部土木工学科 正会員 安田陽一

日本大学理工学部土木工学科 学生会員○佐藤麻衣

1. まえがき

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ブロックを設置することが義務付けられている¹⁾。現在、水叩きの長さは流水や転石による直接衝撃を受ける範囲、その厚さは水叩きにかかる揚圧力に対して安定である厚さとされている。また、護床ブロックの長さは跳水長までとされている¹⁾。しかし、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および流速分布が跳水始端での乱流境界層の発達状態によって異なることが報告されている^{2),3)}。これらの検討結果は水平水路上に形成された跳水であり、跳水始端の上流部で流線の曲がりの影響がない場合で得られたものである。しかしながら、堰下流側に跳水が形成される場合については、流線の曲がりの影響は無視できないため、流線の曲がりの影響がある場合の跳水中の流速の特性を知ることは水工学上重要なことである。

ここでは、鉛直堰下流側に形成される跳水について着目し、鉛直堰からの落下地点から跳水始端までの距離によって流速分布及び跳水中の主流の位置がどのように変化するかについて、表1に示す実験条件のもとで検討を行った。

2. 実験

実験は高さ20cm、幅80cmの鉛直堰模型を長方形断面水平路（幅80cm、高さ60cm、長さ15m）に設置して行い、堰下流側の射流特性および跳水中の流速特性について検討した。射流区間の流速についてはピトー管を用いて測定した。また、跳水中の流速はKENEK製のI型2次元電磁流速計（プローブ径4mm）を用いて計測した（採取間隔50ms、採取時間90sec）。跳水部の測定は $x=0.65L_j$, $0.86L_j$, $1.08L_j$, $1.46L_j$ (cm)の位置で（跳水長は $L_j=5.5 \times h_2$ で²⁾求めた）、横断方向へ10cm間隔に7カ所で行った（図1参照）。

表1 実験条件

鉛直堰	落下地点からの距離 ℓ		
	10cm	25cm	45cm
流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$	4.80×10^{-2}	4.80×10^{-2}	4.80×10^{-2}
レイノルズ数 $Re (= \rho v / \nu)$	59500	59500	59500
跳水始端のフルード数 F_1	4.43	4.36	4.21
跳水始端水深 $h_1(\text{m})$	0.0266	0.0269	0.0275
跳水終端水深(実験値) $h_2(\text{m})$	0.154	0.148	0.146
始端でのアスペクト比(B/h_1)	30.1	29.7	29.1
終端でのアスペクト比(B/h_2)	5.2	5.4	5.5
跳水長 $L_j(\text{m})$	0.85	0.84	0.83

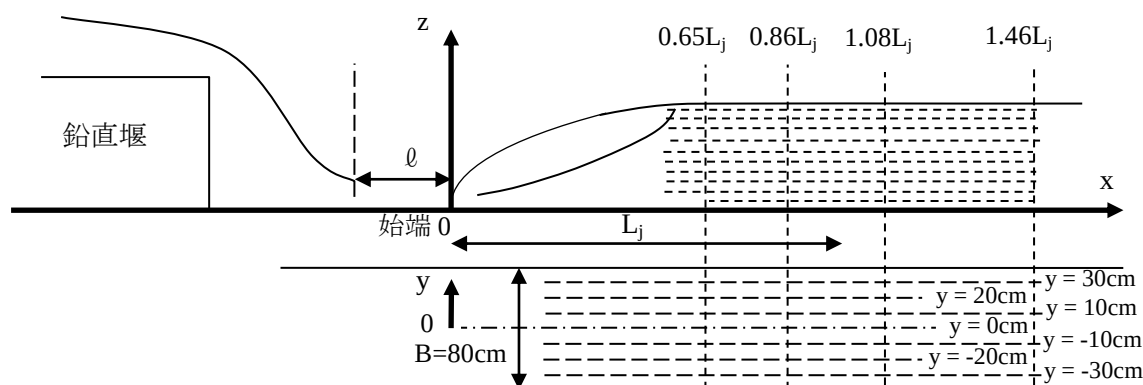


図1 測定位置

キーワード 跳水, 鉛直堰, 減勢工, 主流の位置, 側壁境界層

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

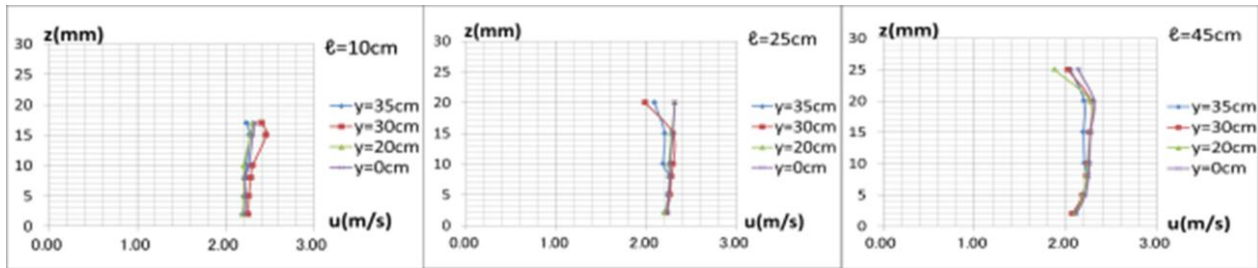


図2 跳水始端設定位置での射流の流速分布 (条件は表1に基づく)

3. 跳水始端設定位置での射流の流速分布

跳水始端の設定位置($l = 10\text{cm}, 25\text{cm}, 45\text{cm}$)での射流の流速分布を図2に示す. 図に示されるように, どの設定位置においても一般的な開水路流に見られる指数則分布⁴⁾にはならなかった. これは, 鉛直堰から落下し衝突した時に流線が大きく曲げられ, その影響が設定位置まで続いたためと考えられる.

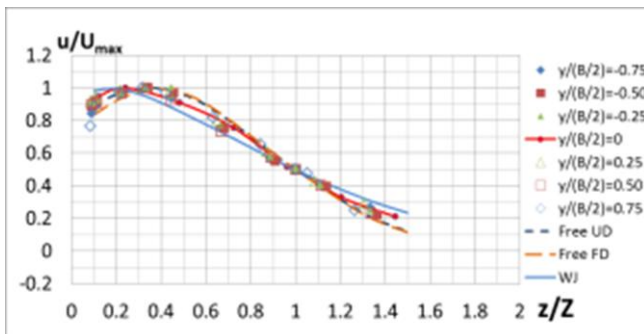
4. 跳水部の流速分布

堰下流側で形成される跳水内部の流速分布の特性を検討するために, 流下方向成分の流速 u を次式の関係で整理したものを図3,4に示す. ただし, 図3は(1)式の関係²⁾で, 図4は(2)式の関係で整理したものを示す.

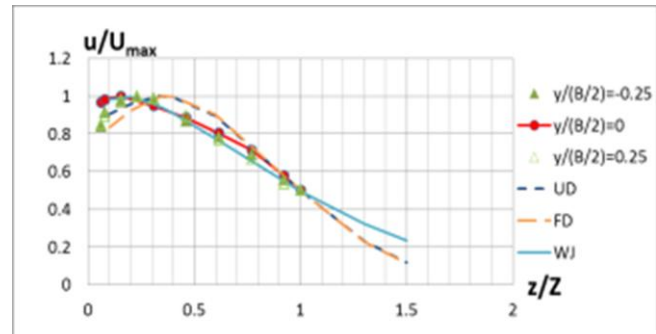
$$u/U_{\max} = f(z/Z, y/[(B/2)], l/d_c, x/L_j, F_1) \quad (1) \quad u/U_{\max} = f(z/z_1, y/[(B/2)], l/d_c, x/L_j, F_1) \quad (2)$$

ここに, d_c は限界水深, $U_{\max}$ は測定断面での最大流速, z_1 は底面から $U_{\max}$ が生じる位置までの鉛直高さ, 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)である. 図中破線は水平水路中に形成された自由跳水内の流速分布の場合²⁾を示し, 青の実線は壁面噴流の場合⁵⁾を示す.

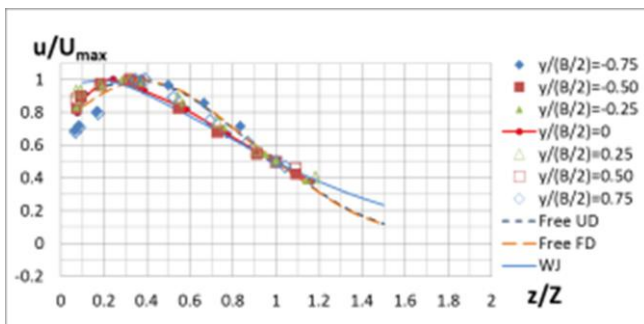
図3に示されるように, $l/d_c = 1.4$ (圧力が静水圧より大きい断面)では, $x/L_j = 0.65, 0.86$ において流速分布は (1)式の関係で示される. $x/L_j = 0.65$ では, $-0.75 \leq y/(B/2) \leq 0.75$ の範囲で(1)式の関係で整理される分布となるが, $x/L_j = 0.86$ では, 側壁の境界層の影響を受けて $-0.25 \leq y/(B/2) \leq 0.25$ の範囲となる. すなわち, 流線の曲がりが大きいく所には跳水始端が位置した状態では, $x/L_j = 0.86$ までジェット性格が続くことが分かる. また, $l/d_c = 3.5$ (圧力が静水圧に回復したばかりの断面) および $l/d_c = 6.3$ (圧力が静水圧になっている断面) において $x/L_j = 0.65$ では, 流速分布は (1)式の関係で示される. $l/d_c = 3.5$ では, $-0.75 \leq y/(B/2) \leq 0.75$ の範囲で $l/d_c = 6.3$ では, $-0.25 \leq y/(B/2) \leq 0.25$ の範囲で (1)式の関係で整理される分布となる. すなわち, 流線の曲がりの影響が小さくなるほど, $x/L_j = 0.65$ では (1)式で示される分布になりにくくなる.



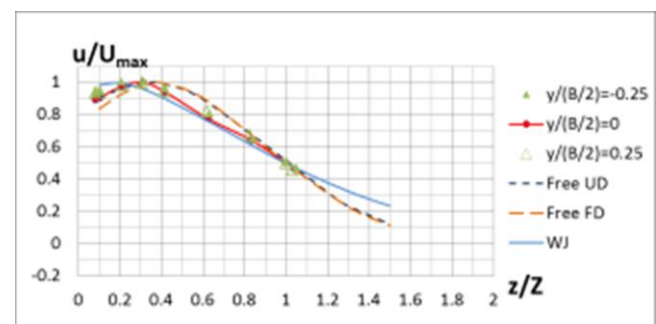
a) $l/d_c = 1.4, x/L_j = 0.65, F_1 = 4.43$ の場合



b) $l/d_c = 1.4, x/L_j = 0.86, F_1 = 4.43$ の場合

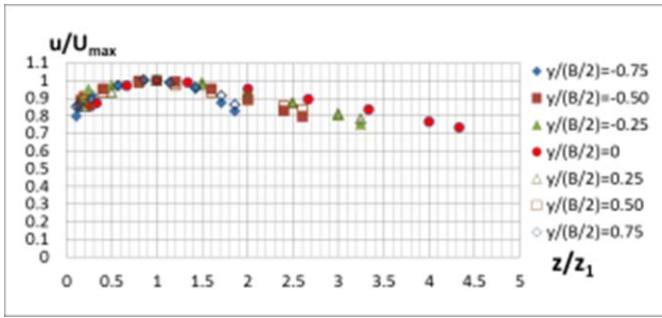


c) $l/d_c = 3.5, x/L_j = 0.65, F_1 = 4.36$ の場合

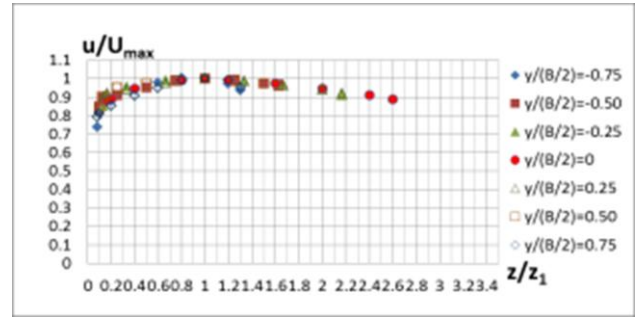


d) $l/d_c = 6.3, x/L_j = 0.65, F_1 = 4.21$ の場合

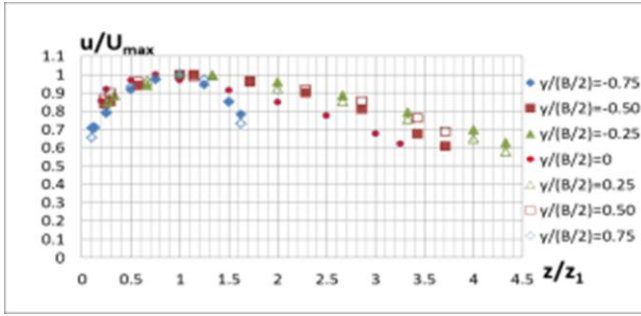
図3 (1)式の関係で整理された流速分布



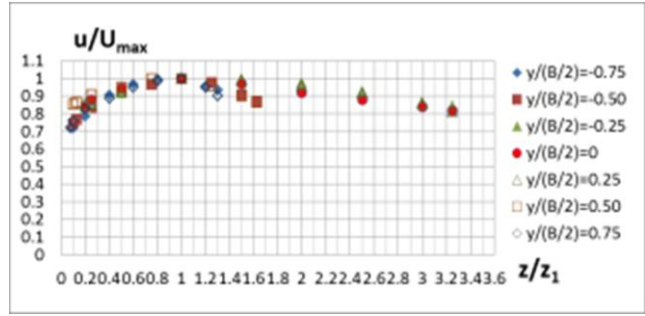
a) $l/d_c=1.4, x/L_j=1.08, F_1 = 4.43$ の場合



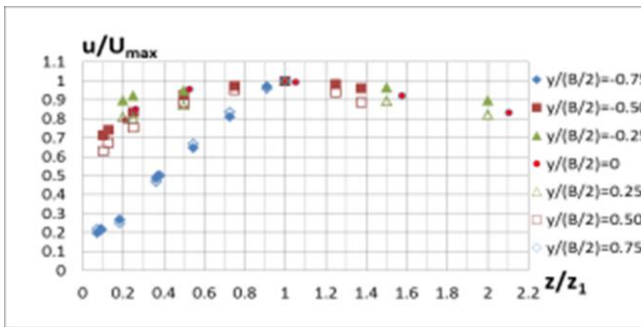
b) $l/d_c=1.4, x/L_j=1.46, F_1 = 4.43$ の場合



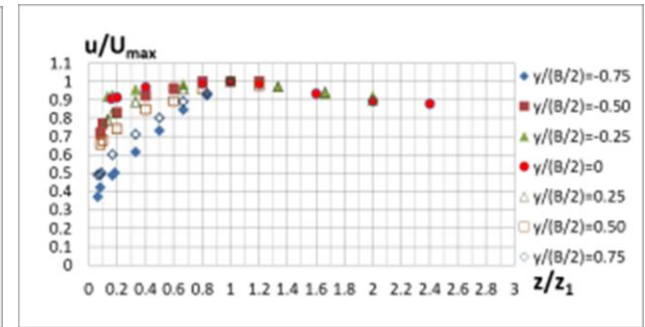
c) $l/d_c=3.5, x/L_j=0.86, F_1 = 4.36$ の場合



d) $l/d_c=3.5, x/L_j=1.08, F_1 = 4.36$ の場合



e) $l/d_c=6.3, x/L_j=0.86, F_1 = 4.21$ の場合



f) $l/d_c=6.3, x/L_j=1.08, F_1 = 4.21$ の場合

図4 (2) 式の関係で整理した流速分布

$l/d_c = 1.4$ の場合 $x/L_j \geq 1.08$ で, $l/d_c = 3.5, 6.3$ の場合 $x/L_j \geq 0.86$ で(1)式の関係が成立しなくなる. 図4に示されるように, $0.86 \leq x/L_j \leq 1.46$ の流速分布について, (2)式の関係で整理すると, 流線の曲がりの影響を受けて主流の位置は水面付近にないことがわかる. また, l/d_c が大きくなるにつれて, 側壁からの境界層の発達が大きくなり流速分布が横断方向に変化する.

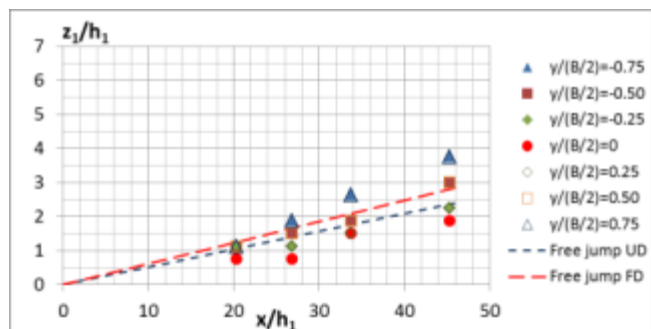
5. 跳水中の主流の位置

跳水中の測定断面における最大流速が生じている位置 z_1 について, 次式の関係で整理したものを図5に示す.

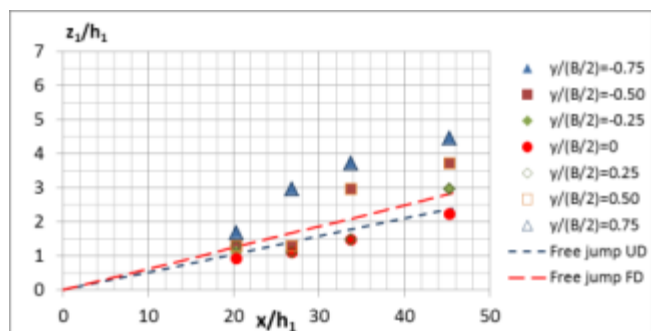
$$z_1/h_1 = f(x/h_1, y/(B/2), l/d_c, F_1) \quad (3)$$

図中の破線は自由跳水中の最大流速の位置 z_1 の変化傾向²⁾を示す. この変化傾向を示す線は, $0.1 \sim 0.2 \leq x/L_j \leq 0.6 \sim 0.7$ の範囲で適用されているものであり, $0.1 \sim 0.2 \leq x/L_j \leq 0.6 \sim 0.7$ では z_1 はこの直線より水面に向かって上昇する. ここではこの直線変化を $x/L_j \geq 0.65$ の領域に外装して示している.

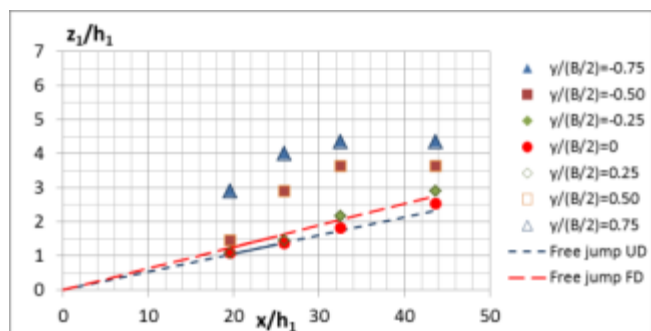
図に示されるように, $l/d_c = 1.4$ の場合, $0.65 \leq x/L_j \leq 1.46$ の範囲でも直線的に変化し, 図中の破線と同様な傾向が得られる. $l/d_c = 3.5, 6.3$ の場合, $y/(B/2) = \pm 0.5, 0.75$ を除いては, $l/d_c = 1.4$ の場合と同様な傾向となる. すなわち, 流線の曲がりの影響を受けない場合と異なる変化傾向となる. $y/(B/2) = \pm 0.5, 0.75$ の場合, 側壁からの境界層の発達の影響を受けて, $x/L_j \geq 0.65$ では直線変化しない. また, 主流の位置が水面付近に向かうことはない. $l/d_c = 1.4$ では, $x/L_j = 1.46$ において主流が水深の半分程度に位置する. また, $l/d_c = 3.5$



(a) $l/d_c = 1.4$ の場合 ($F_1 = 4.43$)



(b) $l/d_c = 3.5$ の場合 ($F_1 = 4.36$)



(c) $l/d_c = 6.3$ の場合 ($F_1 = 4.21$)

図 5 (3) 式の関係で整理した跳水中の主流の発達

では $x/L_j = 1.08$ において主流が水深の 3 分の 1 程度に位置する. さらに, $l/d_c=6.3$ では $x/L_j=1.08$ において主流が水深の半分程度に位置する. これは, 跳水に流入する射流の流速分布の水深方向の流速差が小さいため, その影響を受けて跳水中の主流が水面に向かうまでの上昇に至らなかったものと考えられる.

6. まとめ

鉛直堰下流側に形成される跳水を対象に, 表 1 に示す実験条件に基づいて流速分布の特性について検討した. 得られた結果を簡潔にまとめたものを以下に示す.

1. 鉛直堰から落下し衝突した時に流線が大きく曲げられ, その影響が設定位置まで続いたため, どの設定位置においても一般的な開水路流に見られる指数則分布にはならなかった.

2. $l/d_c=1.4$ (圧力が静水圧より大きい断面) では, $x/L_j=0.65, 0.86$ において流速分布は (1) 式の関係で示され, 流線の曲がり大きいところに跳水始端が位置した状態では, $x/L_j=0.86$ までジェット性格が続くことが分かった.
3. $l/d_c=3.5$ (圧力が静水圧に回復したばかりの断面) および $l/d_c=6.3$ (圧力が静水圧になっている断面) において $x/L_j=0.65$ では流速分布は (1) 式の関係で示される. なお, 流線の曲がりの影響が小さくなるほど, (1) 式で示す分布になる $y/(B/2)$ の範囲が小さく水路中央近くとなる.
4. 鉛直堰下流側に形成される跳水中の流速分布については従来の知見とは異なる傾向が見られるため, 更なる水理特性の解明が必要である. また, 最大流速の位置についても, $0.6 \leq x/L_j$ の範囲であるにも関わらず水路底面付近を沿う傾向にあり, それが跳水終端以降にまで及ぶことから, 現在の減勢工の設計基準については改良の必要がある.

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., 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) 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, pp. 102 - 105, 2009.12.
- 4) Ohtsu, I. and Yasuda, Y., Characteristics of Supercritical Flow below Sluice Gate, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 3, pp.332-346, 1994.
- 5) 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.
- 6) 佐藤麻衣, 安田陽一, 台形堰下流側に形成される跳水中の流速特性, 第 38 回土木学会関東支部第 2 部門, CD-ROM, 2011.03.