

低落差部直下流で形成される跳水の流速特性に対する越流面角度の影響

日本大学理工学部土木工学科 学生会員 ○篠崎遼太

日本大学理工学部土木工学科 正会員 安田陽一

1. はじめに

河川に対し、落差を有する横断構造物を設置する場合、落差下流側での河床洗堀を防ぐため水叩きおよび護床工を設置することが設計指針として示されている¹⁾。また、スルース・ゲートやノズルの下流側で形成される跳水(以下、自由跳水とする)について、既往の研究において実験的検討により跳水内部の流速特性、すなわち流速分布や最大流速の生じる位置(以下、主流位置とする)の変化、最大流速の減衰状況等が明らかにされている²⁾。これに対し、落差直下流部で形成される跳水の場合、跳水流入部において、越流水脈による流線の曲がりの影響を受けるため、自由跳水と比較して流入条件および跳水内部の流速特性が異なるものと考えられるが、これまでに十分な検討はなされていない。以上のことから本研究では、落差直下流部で形成される跳水の下流部(跳水長の6割より下流側)を対象に、相対落差 H/dc (H :落差高さ, dc :限界水深), 相対跳水形成位置 ℓ/dc (ℓ :落差直下流部におけるよどみ点から跳水始端までの距離), 越流面角度 θ を系統的に変化させた実験的検討が行われている³⁾。その結果から、落差部背面に Air Pocket が形成されない相対落差 H/dc が小さい場合、主流が下流側遠方まで底面付近に位置し、さらに最大流速は減衰されにくいことが明らかになっている。なお、落差直下流部で形成される跳水の下流部を対象としているため、流速特性の全容の解明には至っていない。また、流線の曲がりによる流入条件に違いに着目した検討であるため、落差部背面での剥離域の形成に着目した検討は行われていない。ここでは、相対落差 H/dc の小さい場合を対象に、越流面角度を変えて落差直下流部で形成される跳水の流速特性の全容を明らかにし、自由跳水の場合の跳水内部の流速特性との比較検討を行った。

2. 実験方法

実験には水路幅 0.80m, 水路高さ 0.60m, 水路長さ 18m を有する長方形断面水平水路を用いた。落差模型について、鉛直堰模型(高さ 0.1m, 幅 0.796m, 長さ 1.0m)および台形堰模型(高さ 0.1m, 幅 0.796m, 長さ 1.1m, 越流面角度 $\theta=45^\circ$)を用い、自由跳水(Free Jump)の場合には同水路を用いてゲートから水を流出させて実験を行った。表 1 に実験条件を示す。ここに、 Q は流量, Re はレイノルズ数, Fr_1 は跳水始端におけるフルード数, h_1 は跳水始端水深(跳水区間を検査領域とした運動量方程式から跳水終端水深 h_2 を与えて算定), h_2 は跳水終端水深(ポイントゲージによる測定), L_j は跳水長($L_j=6h_2$ として算定)を示す。また、流速の測定は流下方向および水路横断方向の流速 u , v を測定するため、I 型プローブを有する二次元電磁流速計を用いた。測定点は水路横断方向に 7 点, 流下方向に 6 点, 水深方向に 4~8 点の測点を設け、測定を行った。なお、流速の採取間隔は 50msec, 採取時間 120sec である。

表 1. 実験条件

θ	$Q(m^3/s)$	H/dc	ℓ/dc	$Re(-)$	$Fr_1(-)$	$h_1(m)$	$h_2(m)$	$L_j(m)$
90°	0.0603	1.20	1.4	81894	2.90	0.0410	0.1466	0.879
45°				78093	2.89	0.0410	0.1466	0.880
Free Jump				78093	2.90	0.0410	0.1467	0.880

キーワード 跳水, 流線の曲がり, 流速特性, 低落差部, 剥離域

連絡先 東京都千代田区神田駿河台 1-8 TEL.03-3529-0409 E-mail:csry14100@g.nihon-u.ac.jp

3. 実験結果

3-1. 最大流速 u_{max} の減衰状況について

各測定断面における流下方向の最大流速 u_{max} (時間平均流速を指す)と跳水終端の断面平均流速 V_2 の差 $u_{max}-V_2$ を跳水始端の断面平均流速 V_1 で無次元化し、跳水長に対する流下方向の位置 x/L_j (x :流下方向座標, 跳水始端を基準とする)との関係を整理したグラフを図 1, 図 2 に示す. なお, パラメータには水路横断方向位置を示す無次元量 $y/(B/2)$ を用い(y :水路横断方向座標, 水路中央を基準とし, 左岸側を正とする, B :水路幅), マーカーは Free jump における水路横断方向の平均値を示す. 図 1, 図 2 に示すように, 落差直下流部で形成される跳水の場合(越流面角度 $\theta=90^\circ$, 45°), Free Jump の場合に比べて最大流速がより減衰されており, さらに越流面角度 $\theta=45^\circ$ の場合に最大流速が最も減衰されていることがわかる. これは, 図 3, 図 4 に示す流入射流中の流速分布の違いに起因するものと考えられる. Free Jump の場合には縮流部を跳水始端位置に設定しているため, 無次元流下方向流速 u/V_1 は一定値($u/V_1=1$)をとるが⁴⁾, 図 3, 図 4 に示すように落差直下流部で形成される射流の流速分布は速度勾配を有する. したがって, 流入部における流速分布の違い, すなわち流入部での境界層の発達状態の違いが跳水内部の最大流速の減衰状況に影響を及ぼしていると推測される. また, 落差部背面における流況観察(写真 1.)から越流面角度 $\theta=90^\circ$, 45° の両条件において落差部背面で剥離域が形成されているため, 流入部における流速分布の違いは落差部背面での剥離域の形成によって生じているものと考えられる. なお, 越流面角度 $\theta=90^\circ$, 45° の場合, 越流部における斜面の有無によって剥離域の形成状態が異なるため, 最大流速の減衰状況に差異が生じたと考えられる.

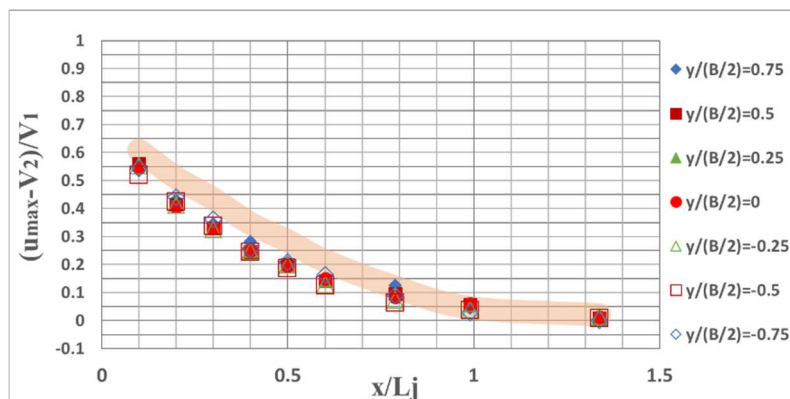


図 1. 最大流速の減衰状況($\theta=90^\circ$ の場合)

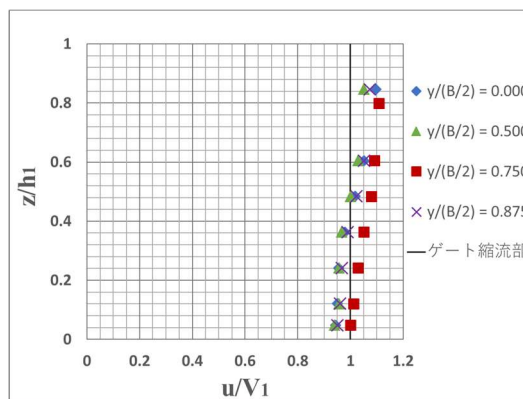


図 3. 流入射流中の流速分布図($\theta=90^\circ$ の場合)

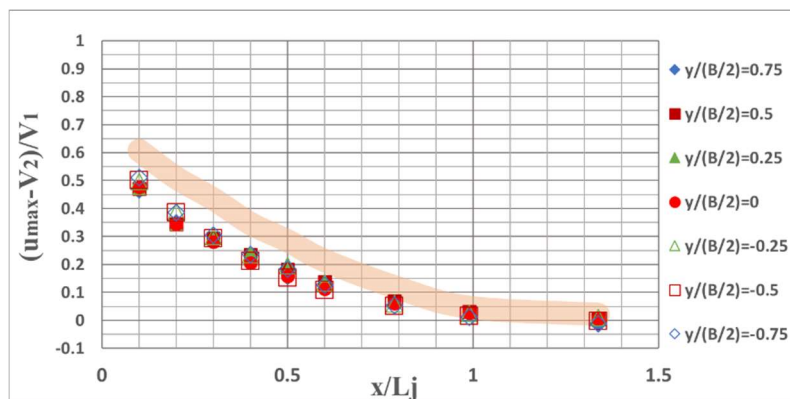


図 2. 最大流速の減衰状況($\theta=45^\circ$ の場合)

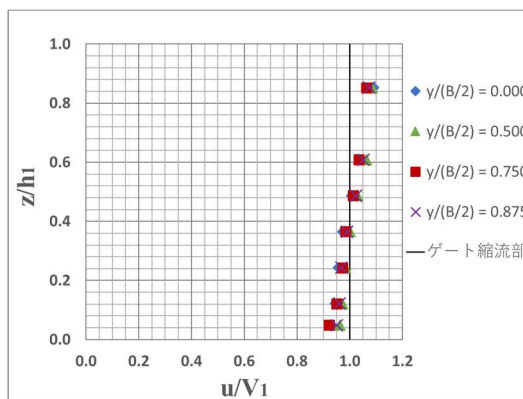


図 4. 流入射流中の流速分布図($\theta=45^\circ$ の場合)

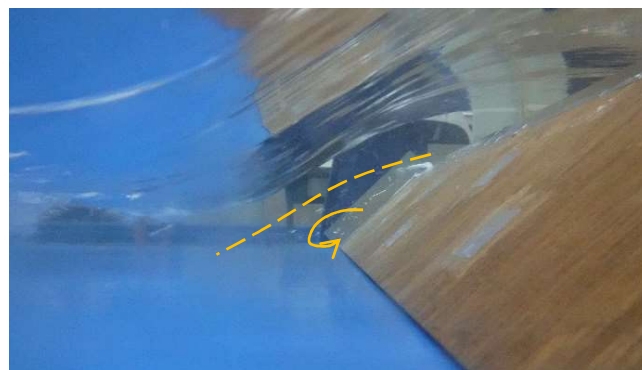
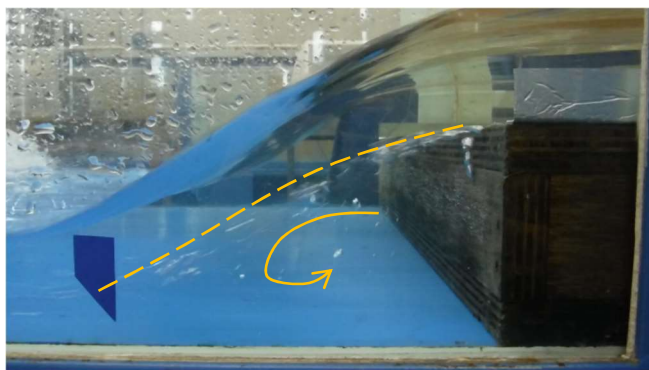


写真 1. 落差部背面における剥離域の形成の様子(左:θ=90° の場合, 右:θ=45° の場合)

3-2. 主流位置 z_1 の変化について

流下方向の各測定断面における主流位置 z_1 を跳水始端水深 h_1 で無次元化し, 跳水長に対する流下方向の位置 x/L_j との関係を整理したグラフを図 5 に示す. なお, マーカーは Free jump における水路横断方向の平均値を示す. 図 5 に示されるように主流位置の流下方向に対する変化について, 落差直下流部で形成される跳水(θ=90° , θ=45°)と Free Jump との間に大きな差異は認められない. これは, 既存研究^[3]において相対落差 H/dc を大きくした場合に, 主流が速やかに上昇すると報告されていることから, 主流位置の変化は落差形状による影響に比べ, 相対落差 H/dc による影響が卓越しているものと考えられる.

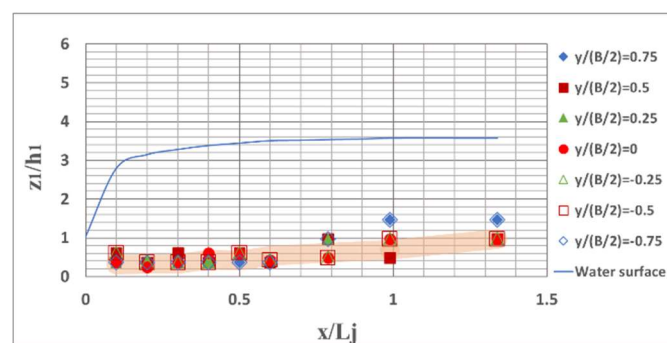
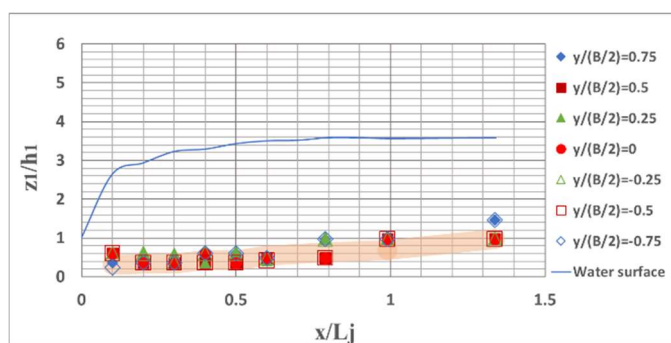


図 5. 主流位置の流下方向に対する変化(左:θ=90° の場合, 右:θ=45° の場合)

3-3. 水路底面付近の流下方向の乱れ強さ $\sqrt{u_b'^2}$

流速の測定から水路底面への負担を評価し, 落差直下流部で形成される跳水の場合と自由跳水の場合とで比較を行うため, 底面付近 $z/h_1=0.25$ (z :水路床を基準とした鉛直方向座標)における流下方向流速 u_b (時間平均流速を指す)と流下方向乱れ強さ $\sqrt{u_b'^2}$ の測定の結果を以下に示す. 図 6, 図 7 は底面付近 $z/h_1=0.25$ における流下方向流速 u_b および流下方向乱れ強さ $\sqrt{u_b'^2}$ を跳水始端の断面平均流速 V_1 で無次元化し, 跳水長に対する流下方向の位置 x/L_j との関係を整理したグラフを示している. なお, 図 6, 図 7 におけるマーカーは Free jump における水路横断方向の平均値を表している. 図 6 から底面流速 u_b についても最大流速 u_{max} の減衰状況と同様の傾向, すなわち Free Jump の場合に比べ, 落差直下流部で形成される跳水(越流面角度 θ=90° , 45°)の方が大きな減衰効果が得られている. また, 越流面角度 θ=45° とした場合, θ=90° の場合に比べてより減衰されていることがわかる. 次に流下方向乱れ強さ $\sqrt{u_b'^2}$ について, 図 7 に示されるように落差直下流部で形成される跳水(越流面角度 θ=90° , 45°)と Free Jump との間に大きな差異は生じていない. 以上から, 越流面角度 θ=45° とした場合に θ=90° および Free Jump の場合と比べ, 底面における流速が減衰されるが, 底面付近における乱れ強さについてはどの場合も同等となる. これらのことから, 落差形状を越流面角度 θ=45° とした場合に底面への負担が軽減できるものと考えられる.

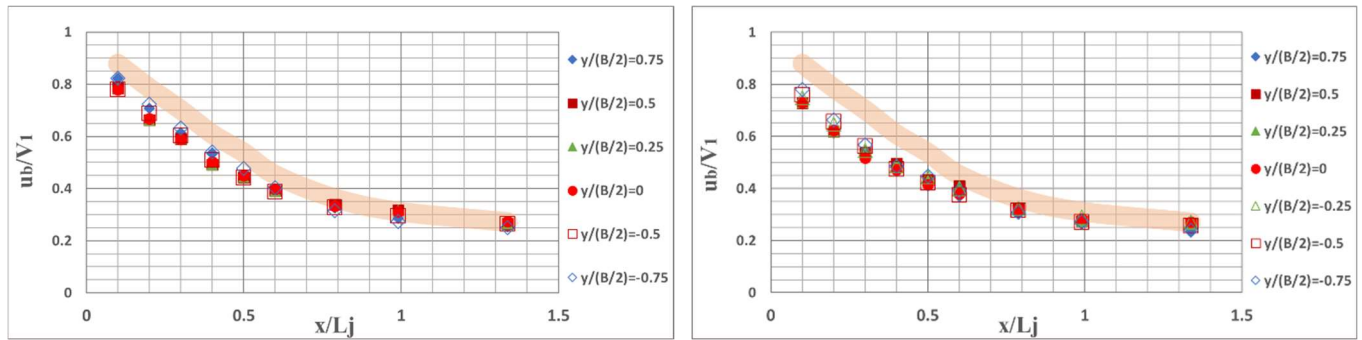


図 6. 底面流速 u_b の減衰状況(左: $\theta=90^\circ$ の場合, 右: $\theta=45^\circ$ の場合)

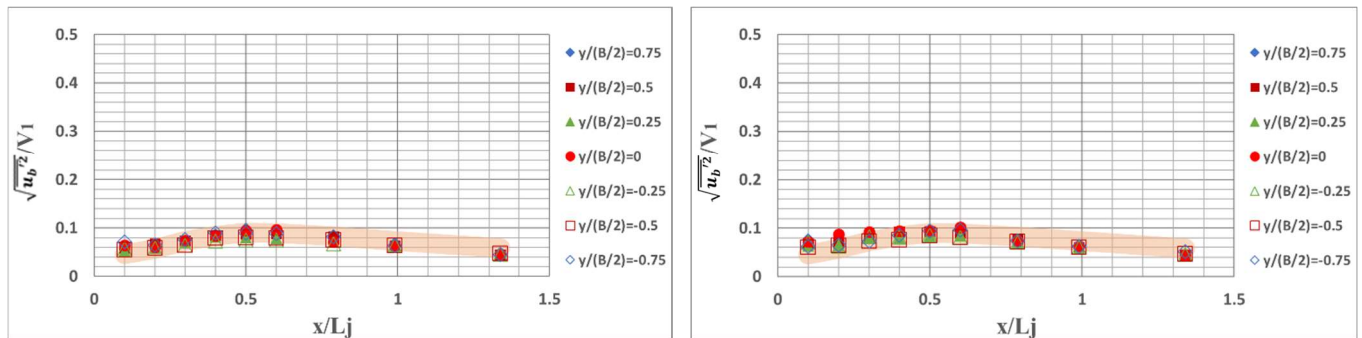


図 7. 底面付近における乱れ強さ $\sqrt{u_b'^2}$ の変化(左: $\theta=90^\circ$ の場合, 右: $\theta=45^\circ$ の場合)

4. まとめ

落差部背面に Air Pocket が形成されない相対落差 H/dc の小さい場合を対象に, 落差直下流部で形成される跳水の流速特性について実験的に検討を行った. その結果, 落差部背面における剥離域の形成により自由跳水の場合と比べて, 流入条件が異なるため, 最大流速の減衰状況に違いが生じることがわかった. さらに, 落差直下流部で形成される跳水について, 落差形状(越流面角度 θ)の違いによる落差部背面での剥離域の形成状態の違いが最大流速の減衰状況に影響を及ぼしていると考えられる. 今後は, 相対落差 H/dc の小さい場合にも主流を上昇させ, すなわち, 最大流速をより減衰させるためには, どのような落差形状が最も適切か, また落差部背面における剥離域の形成状態が跳水内部の流速特性にどのように影響するのかを明らかにするため, 越流面角度 θ をより小さくし, 剥離域を形成させない場合や落差部にステップを設けた場合などの多様な落差形状を対象とした検討を行う必要がある.

参考文献

- 1) 建設省河川局監修: 建設省河川砂防技術基準(案) 同解説・設計編[I], 改定新版, 技法堂出版, 2012, pp.48-60.
- 2) Ohtsu, I., Yasuda, Y. and Awazu, S., "Free and Submerged Jumps in Rectangular Channels," *Report of the Research Institute of Science and Technology, Nihon University*, No. 35, 1990, pp. 1-50.
- 3) Yasuda, Y., "Characteristics of hydraulic jumps below drop structures," *E-proceedings of the 37th IAHR Congress*, August, 2017, Kuala Lumpur, Malaysia
- 4) Rajaratnam, N., "Free flow immediately below sluice gates," *J. Hydr. Div., ASCE*, Vol.103, 1977, pp.345-351.
- 5) 安田陽一, 篠崎遼太: 落差下流部で形成される跳水の流速特性に対する落差形状の影響, 第 61 回理工学部学術講演会, H3-9, 2017.