

H3-3

堰下流側に形成される跳水の流速特性に対する越流面角度の影響

The effects of configuration of weirs on velocity characteristics in hydraulic jump below a weir

○神戸基秀¹, 安田陽一²*Motohide Kanbe¹, Youichi Yasuda²

Abstract: This report presents the effects of configurations of weirs on velocity fields in hydraulic jumps below a weir. The experimental results yield that the main flow continues along the channel bottom far downstream, and the velocity profile like a wall jet is distributed until about 90 % of jump length in the jump formation downstream of weirs. Further, it has been concluded that the velocity profile and the development of main flow depend on configurations of weirs and relative drop heights, because of different inflow conditions due to the curvature of streamline and impingement.

1. はじめに

落差を伴う河川構造物の下流側では、河床保護のため跳水区間に護床工を設置すること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^[2] から、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 L_j の 60%より下流側で主流の位置が水面に向かって上昇することが明らかになっている^[2]. しかし、堰下流側に跳水が形成される場合、跳水始端で流線の曲がりの影響を受けた結果、跳水中の流速分布特性や主流の発達状態が従来の場合とは異なる^[3].

最近の著者らの研究^{[3],[4],[5]}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、跳水が堰の下流側に形成される場合、流線の曲がりの影響を受け $0.60L_j$ 以降も主流の位置が底面付近に位置していることが示されている^[3]. また、鉛直堰下流側に形成される跳水の場合、堰の相対落差 H/d_c (H : 堰落差高さ, d_c : 限界水深) によって主流の発達状態が異なることが明らかにされている^[5]. しかし、これまで越流面角度 $\theta = 26.6^\circ$ ($H/d_c = 2.79, 5.58$), 45° ($H/d_c = 5.58$), 90° ($H/d_c = 1.20, 2.79, 5.58$) という条件の下で実験的検討を行ったため、越流面の傾斜角度による流速特性の違いについて検討の余地がある状態である.

ここでは、従来の実験結果^{[3],[4],[5]} に $\theta = 45^\circ$ ($H/d_c = 1.20, 2.79$) の場合の実験結果を加え、堰下流側の跳水中の流速分布および最大流速の発生位置に対する相対落差ごとの越流面角度の影響について検討した.

2. 実験方法

実験は、水路幅 $B = 0.80\text{m}$, 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、Table 1 に示す実験条件のもとで行った. 流速を測定したポイントは Figure 1 に示すように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 $L_j = 5.5h_2$ としている^[2]. なお、 h_2 は跳水終端水深) の位置で、横断方向へ 0.10m 間隔に 7ヶ所で測定を行った. また、流下方向流速 u と横断方向流速 v を計測するため、1 型 2 次元電磁流速計を用いた (採取間隔 50msec , 採取時間 120sec).

3. 堰下流側に形成される跳水中の流速特性に対する越流面角度の影響

解析方法として、堰下流側で形成される跳水部において噴流の性格^[2] が続く領域を明らかにするため、

Table 1. Experimental conditions

$\theta = 45^\circ$ ($H/d_c = 1.20$)	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 $Re (= q/\nu)$	8.98×10^4	8.98×10^4	8.98×10^4
跳水始端のフルード数 F_l	2.89	2.89	2.80
跳水始端水深 h_1 (m)	0.0411	0.0411	0.0420
跳水終端水深 h_2 (実験値) (m)	0.147	0.146	0.144
跳水長 $L_j = 5.5h_2$ (m)	0.81	0.80	0.79
$\theta = 45^\circ$ ($H/d_c = 2.79$)	$\ell/d_c = 1.4$ $\ell/d_c = 3.5$ $\ell/d_c = 6.3$		
	$\ell/d_c = 1.4$	$\ell/d_c = 3.5$	$\ell/d_c = 6.3$
流量 Q (m^3/s)	4.80×10^{-2}	4.80×10^{-2}	4.80×10^{-2}
レイノルズ数 $Re (= q/\nu)$	5.69×10^4	5.69×10^4	5.69×10^4
跳水始端のフルード数 F_l	4.50	4.37	4.30
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

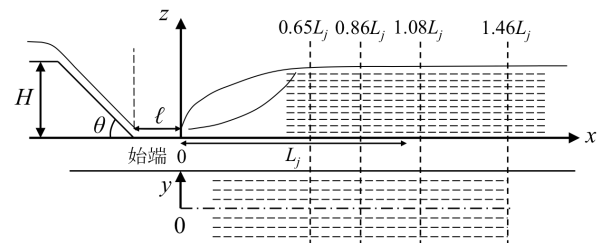


Figure 1. Locations of velocity measurement in jumps

$du/dz < 0$ で $U_{max}/2$ (U_{max} : 各測定断面における最大流速) が得られる領域において流下方向成分の流速 u を (1) の関係で整理した.

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

ここに、 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) である.

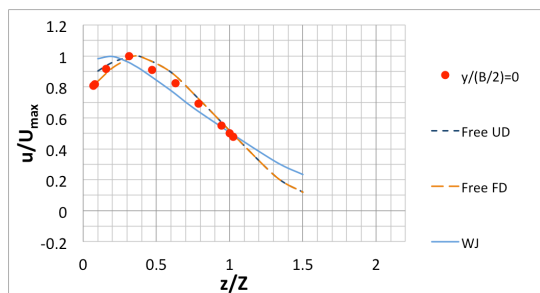
また、各測定断面での最大流速の発生位置 z_l については (2) の関係で整理を行った.

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

以下に、堰下流側の跳水中の流速特性に対する相対落差ごとの越流面角度 θ の影響を以下に示す.

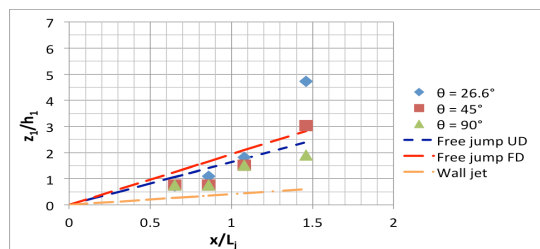
3-1) $H/d_c = 5.58$ の場合

これまでの研究^[4] により、越流面角度によって跳水中の流速分布および最大流速の発生位置が異なることが示されている. 特に $\ell/d_c = 1.4$ の場合、流速分布を (1) の関係で整理できる領域は θ に関わらず $x/L_j \leq 0.86$ であったが、 $x/L_j = 0.86$ では $\theta = 45^\circ, 90^\circ$ の方が $\theta = 26.6^\circ$ に比べて壁面噴流の流速分布^[2] に近い傾向を示す^[4].



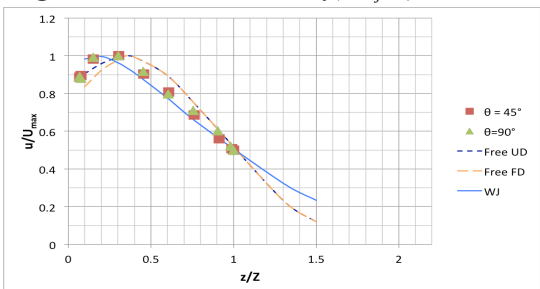
$H/d_c = 2.79, \theta = 45^\circ, \ell/d_c = 6.3, x/L_j = 0.86$

Figure 2. Velocity distribution in hydraulic jump downstream of a weir



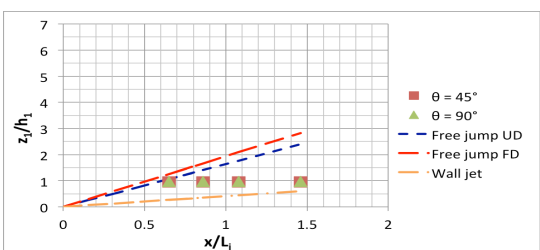
$H/d_c = 2.79, \ell/d_c = 1.4, y/(B/2) = 0$

Figure 3. Relation of $z_l/h_l = f(x/L_j, \theta)$



$H/d_c = 1.20, \ell/d_c = 6.3, y/(B/2) = 0$

Figure 4. Velocity distribution in hydraulic jump downstream of a weir



$H/d_c = 1.20, \ell/d_c = 6.3, y/(B/2) = 0$

Figure 5. Relation of $z_l/h_l = f(x/L_j, \theta)$

これは、前者の場合、後者に比べて越流水脈の突入角度が大きいためであると考えられる。

3-2) $H/d_c = 2.79$ の場合

跳水形成位置、および越流面角度によって (1) の関係で整理できる領域が異なる。一例として $\ell/d_c = 6.3$ の場合、 $\theta = 26.6^\circ, 90^\circ$ では (1) の関係で整理できる領域は $x/L_j \leq 0.65$ であった^[3]。一方、 $\theta = 45^\circ$ では、Figure 2 に示されるように、 $y/(B/2) = 0$ において $x/L_j = 0.86$ でも相似な流速分布が得られた (図中破線は自由跳水の場合の流速分布^[2]、実線は壁面噴流の場合の流速分布^[2]を示す)。これは、 $\theta = 45^\circ$ の場合、 $\theta = 26.6^\circ$ と比較して越流水脈の突入角度が大きく、また $\theta = 90^\circ$ と比較して流入射流の流脈の乱れが小さいため、流線の曲がりの影響が大きくなり、より下流側に広範囲な x/L_j で相似な流速分布が得られたものと考えられる。

最大流速の発生位置 z_l について、ここでは水路中央部に着目した場合の一例を Figure 3 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の z_l 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。図中一点鎖線は壁面噴流の場合の z_l の変化傾向^[2] を示す。図に示されるように、 $\theta = 45^\circ, 90^\circ$ の方が $\theta = 26.6^\circ$ に比べてより下流側まで z_l が直線変化を示している。これは、 $\theta = 45^\circ, 90^\circ$ の場合、 $\theta = 26.6^\circ$ に比べて越流水脈の衝突角度が大きいためであると考えられる。

3-3) $H/d_c = 1.20$ の場合

$H/d_c = 1.20$ では、 $\theta = 45^\circ$ と 90° の場合を対象に比較検討を行った。その結果、流速分布を (1) の関係で整理できる領域については、 $\theta, \ell/d_c$ に関わらず $x/L_j \leq 0.86$ であった。水路中央部に着目した一例を Figure 4 に示す。また z_l の位置について、 $\theta, \ell/d_c$ に関わらず $x/L_j \leq 1.46$ において底面近くに位置している。ここに、 $\ell/d_c = 6.3$ における水路中央部の z_l の位置を Figure 5 に示す。この場合、 $x/L_j \geq 0.86$ では z_l は破線よりも下に位置している。すなわち、 $H/d_c = 1.20$ の場合には越流面角度による影響は小さいことがわかる。これは、相対落差が小さくなることによって流脈の乱れが小さくなったためであると考えられる。

4. まとめ

既往の実験結果に $\theta = 45^\circ, H/d_c = 1.20, 2.79$ の場合を加えて、 $\theta = 26.6^\circ$ ($H/d_c = 2.79, 5.58$)、 $\theta = 90^\circ$ ($H/d_c = 1.20, 2.79, 5.58$) の場合との比較を行い、堰下流側に形成される跳水の流速特性に対する越流面角度の影響について検討した。その結果を以下に要約して示す。

$H/d_c = 2.79, 5.58$ については越流面角度によって跳水中の流速分布、最大流速の位置が異なる傾向を示すことがわかった。特に $H/d_c = 2.79$ の場合、 $\theta = 45^\circ$ の台形堰は $\theta = 26.6^\circ$ の台形堰よりも流線の曲がりが大きく、鉛直堰よりも流脈の乱れが小さいため、下流側に広範囲な x/L_j で相似な流速分布が得られる。

$H/d_c = 1.20$ の場合、他の H/d_c と比べて越流面角度による影響は小さく、 $\theta = 45^\circ, 90^\circ$ とともに ℓ/d_c に関わらず $0.60 < x/L_j < 0.90$ の範囲で相似な流速分布が得られることを示した。また、 $\theta, \ell/d_c$ に関わらず、他の H/d_c と比べてより下流側まで z_l が底面近くに位置していることを示した。

5. 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]，改訂新版，技法堂出版，251 pages，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] 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特性，第 68 回土木学会年次学術講演会，II-054，CD-ROM，2013.
- [4] 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対する実験的検討，第 69 回土木学会年次学術講演会，II-166，CD-ROM，2014.
- [5] 安田陽一，神戸基秀：鉛直堰下流側に形成される跳水部の流速特性，第 42 回土木学会関東支部技術研究発表会，II-088，CD-ROM，2015.