

## 長方形断面水平水路に形成される自由跳水の流速特性に対する流入射流の境界層発達状態の影響

日本大学理工学部 正会員 ○佐藤柳言  
日本大学理工学部 正会員 高橋正行

表1 実験条件

Inflow condition	$F_1$ [-]	$R \times 10^{-4}$ [-]	$B/h_1$ [-]	$\delta/h_1$ [-]
UD	7.2	6.2	16 ~ 22	0
PD	7.2	6.2	21	0.5
	7.2	6.2	22	0.8
FD	7.2	6.2	16 ~ 22	1

## 1. まえがき

スルースゲート下流側に形成される跳水への流入射流は、乱流境界層の発達状態によって undeveloped inflow (以下、UD と略す)、partially developed inflow (PD と略す)、および fully developed inflow (FD と略す) に分けられる<sup>1)</sup>。ここに、UD はスルースゲート直下流側の縮流部 (vena contracta, 図1参照) に跳水始端が位置する場合、PD は乱流境界層が発達中の断面に跳水始端が位置する場合、FD は乱流境界層が水面に到達した断面 (critical point) より下流側に跳水始端が位置する場合である。

Resch and Leutheusser<sup>2)</sup> は、UD と FD によって跳水内部の流速特性および空気混入特性に違いのあることを示した。しかしながら、熱線流速計による計測結果であるため、測定精度上検討の余地がある。最近、Takahashi and Ohtsu<sup>1)</sup> は、流入射流の乱流境界層の発達状態が跳水内部の空気混入特性に与える影響を示した。また、Felder et al.<sup>3)</sup> は、跳水の水面形状に対する流入射流の乱流境界層の発達状態の影響を検討した。しかしながら、跳水の流速特性に対する流入射流の境界層発達状態の影響は示されていない。佐藤ら<sup>4)</sup> は UD と FD の跳水の流速特性を示しているが、PD の跳水については検討されておらず、跳水の流速特性に対する流入射流の境界層発達状態の影響については不明な点が多い。

本研究は、長方形断面水平水路のスルースゲート下流側に形成される自由跳水を対象に、跳水の流速特性に対する流入射流の境界層発達状態の影響について検討したものである。

## 2. 実験

実験は、スルースゲートを有する水路幅  $B = 0.400$  m の滑面長方形断面水平水路 (図1) において、表1に示す跳水始端断面のフルード数  $F_1 [= U_1/(gh_1)^{0.5}]$ 、レイノルズ数  $R [= q/\nu]$ 、アスペクト比  $B/h_1$  のもとで行われた。ここに、 $x$  は縮流部を原点とする流下方向座標、 $y$  は水路床を原点とする鉛直方向座標、 $U_1$  は跳水始端の断面平均流速、 $g$  は重力加速度、 $h_1$  は跳水始端水深、 $q [= Q/B]$  は単位幅流量、 $Q$  は流量、 $\nu [= \mu/\rho]$  は動粘性係数、 $\mu$  は水の粘性係数、 $\rho$  は水の密度である。同一な  $F_1$  と  $R$  のもとで流入射流の乱流境界層の発達状態を変化させるため、Ohtsu and Yasuda<sup>5)</sup> の方法を用いて射流の乱流境界層厚  $\delta$  と水深  $h$  を求め、表1の  $F_1$  と  $R$  が得られるように  $Q$ 、ゲートの開口高  $a$ 、水路下流端の堰高を調整した。縮流部から跳水始端断面までの長さ  $\ell_1$  について、UD の場合は  $\ell_1 = 0$ 、PD の場合は  $\delta/h_1 = 0.5$  (PD<sub>0.5</sub>

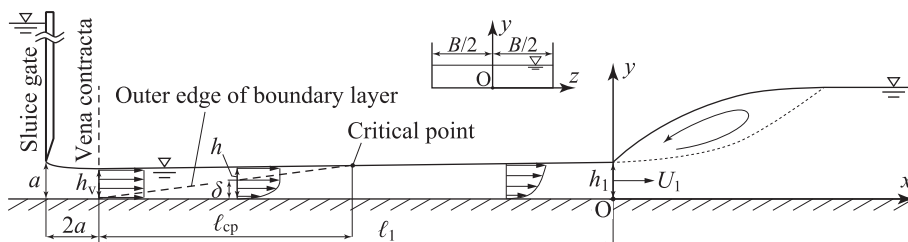


図1 スルースゲート下流側に形成される自由跳水の定義図

と略す) および 0.8 (PD<sub>0.8</sub> と略す) となる  $\ell_1$ 、FD の場合は  $\ell_1 = 1.7\ell_{cp}$  とした。縮流部はゲートから下流に  $2a$  の位置<sup>5),6)</sup> とし、縮流部の水深  $h_v$  を  $h_v = 0.64a$  とした<sup>5),6)</sup>。

流速は、二次元電磁流速計 (採取間隔 20 Hz, 採取時間 100 s) で測定された。ただし、二次元電磁流速計で測定できない水路底面付近の流速は、プラントル型ピトー管 (管径 3 mm, JIS-B8330) で測定された。水深  $h$  はポイントゲージで測定された。なお、測定は水路中央面 ( $z = 0$ ,  $z$ : 水路横断方向の座標) を対象とした。

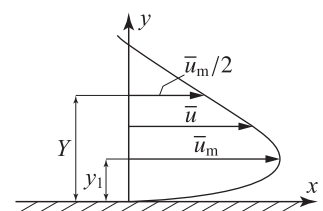
## 3. 跳水内部の流速分布

図2のように、断面内の  $x$  方向流速  $\bar{u}$  の最大値を  $\bar{u}_m$  とし、 $\bar{u} = \bar{u}_m$  となる  $y$  を  $y_1$ 、 $y > y_1$  で  $\bar{u} = \bar{u}_m/2$  となる  $y$  を半値幅  $Y$  と定義する。与えられた  $F_1$  と  $R$  に対する跳水内部の流速分布の一例を図3に示す。図3より、与えられた  $x/h_1$  に対して、跳水内部の相対流速  $\bar{u}/\bar{u}_m$  の分布は平板に沿う二次元壁面噴流 (wall jet) の流速分布と類似している。

4.  $y_1$  と  $Y$  の流下方向変化

与えられた  $F_1$  と  $R$  に対して、最大流速が生じる相対高さ  $y_1/h_1$  の流下方向変化を図4に示す。  $0 < x/h_1 \leq 46$  では、同一の  $x/h_1$  に対して、 $y_1/h_1$  の値は FD と PD<sub>0.8</sub> のほうが PD<sub>0.5</sub> と UD よりも大きい。これは、FD と PD<sub>0.8</sub> のほうが PD<sub>0.5</sub> と UD よりも跳水内部の主流が短区間で上昇していることを示している。また、 $x/h_1 \geq 62$  では、 $y_1/h_1$  の値は流入射流の乱流境界層の発達状態によらず同程度である。

与えられた  $F_1$  と  $R$  に対する相対半値幅  $Y/h_1$  の流下方向変化を図5に示す。同一の  $x/h_1$  において、 $Y/h_1$  の値は FD と PD<sub>0.8</sub> のほうが PD<sub>0.5</sub> と UD よりも大きい。また、 $Y/h_1$  の値は、FD では  $x/h_1 \gtrsim 30$ 、PD<sub>0.8</sub> では  $x/h_1 \gtrsim 40$ 、PD<sub>0.5</sub> と UD では  $x/h_1 \gtrsim 50$  で得られない。これらは、FD と PD<sub>0.8</sub> のほうが PD<sub>0.5</sub> と UD よりも主流が短区間で拡がることを示している。

図2  $y_1$  と  $Y$  の定義図

キーワード：自由跳水、流速特性、乱流境界層の発達状態、スルースゲート、射流

連絡先：〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8-14 日本大学理工学部土木工学科 TEL. 03-3259-0528

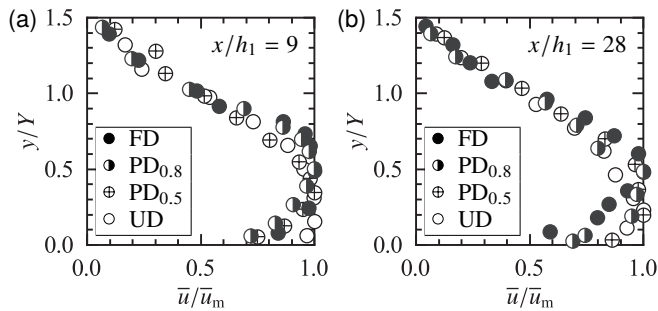


図3 跳水内部の流速分布 ( $F_1 = 7.2, R = 6.2 \times 10^4$ )

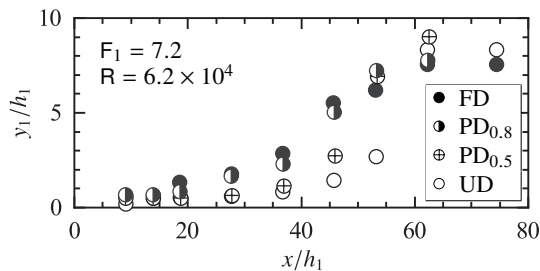


図4 最大流速が生じる相対高さ  $y_1/h_1$  の流下方向変化

Wall jet の  $Y$  の流下方向変化<sup>7)</sup> は、

$$Y/a_j = 0.50 + 0.065x_j/a_j \quad (1)$$

で与えられる ( $a_j$ : ノズルの開口高,  $x_j$ : ノズル開口部を原点とした平板に沿う流下方向座標). 式(1)で  $a_j = h_1, x_j = x$  とした場合の計算値を図5に実線で示す. 図5より, UDと wall jet の  $Y/h_1$  の値は同程度であるため,  $x/h_1 \lesssim 37$  の UD の跳水内部の主流は wall jet と同様な拡がりを示している.

図4と図5より, FDとPD<sub>0.8</sub>では  $y_1/Y \approx 0.44$ , PD<sub>0.5</sub>とUDでは  $y_1/Y \approx 0.29$  となる. すなわち,  $y_1/Y$  の値はFDとPD<sub>0.8</sub>のほうがPD<sub>0.5</sub>とUDよりも大きい. これは, FDとPD<sub>0.8</sub>のほうがPD<sub>0.5</sub>とUDよりも advective diffusion region の空気混入率が大きく<sup>1)</sup>, 気泡の浮力効果によって主流が短区間で拡がりながら上昇したためと考えられる.

### 5. 最大流速の減衰状況

与えられた  $F_1$  と  $R$  に対する  $\bar{u}_m/U_1$  の減衰状況を図6に示す.  $\bar{u}_m/U_1$  は  $x/h_1$  の増加とともに小さくなり,  $x/h_1 \gtrsim 53$  では  $x/h_1$  によらず概ね一定となる. また, 同一の  $x/h_1$  において,  $\bar{u}_m/U_1$  の値は流入射流の乱流境界層の発達状態によらず同程度となっている. すなわち,  $\bar{u}_m/U_1$  の減衰状況に対する流入射流の乱流境界層の発達状態の影響は小さい.

Wall jet の  $\bar{u}_m$  の減衰状況<sup>7),8)</sup> は, ノズル開口部での断面平均流速  $U_j$  と  $a_j$  を用いて、

$$\bar{u}_m/U_j = 3.45(x_j/a_j)^{-0.5} \quad (2)$$

で与えられる. 式(2)で  $U_j = U_1, x_j = x, a_j = h_1$  とした場合の計算値を図6に実線で示す. 跳水の場合(プロット)と wall jet の場合(実線)を比べると, 図6に示されるように,  $0 < x/h_1 \lesssim 20$  では, 跳水の  $\bar{u}_m/U_1$  は wall jet の  $\bar{u}_m/U_1$  と同程度の値を示す.  $x/h_1 \gtrsim 20$  では, 跳水の  $\bar{u}_m/U_1$  は wall jet の  $\bar{u}_m/U_1$  よりも小さくなっている. これは, 跳水の表面渦の効果によるものと考えられる.

### 6. まとめ

長方形断面水平水路のスルースゲート下流側の自由跳水の流速特性に対する流入射流の乱流境界層の発達状態の影響について, 跳水始端のフルード数  $F_1 = 7.2$  かつレイノルズ数  $R = 6.2 \times 10^4$  の場合を検討し, 以下の結果が示された.

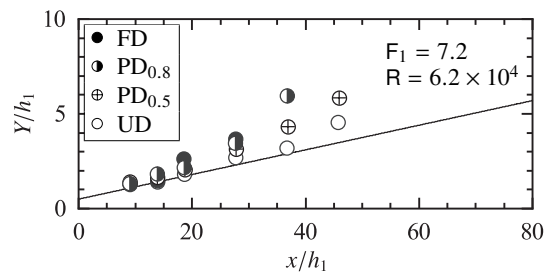


図5 相対半値幅  $Y/h_1$  の流下方向変化 [(—): Eq.(1) with  $a_j = h_1$  and  $x_j = x$ ]

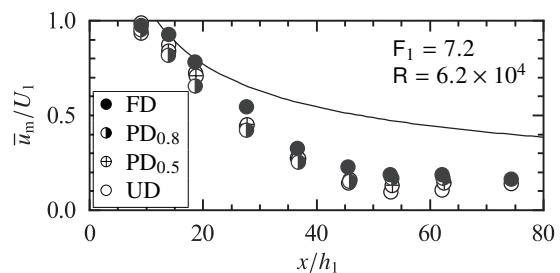


図6 最大流速の減衰状況 [(—): Eq.(2) with  $U_j = U_1, x_j = x$ , and  $a_j = h_1$ ]

- 与えられた  $x/h_1$  に対して, 跳水内部の相対流速  $\bar{u}/\bar{u}_m$  の分布は wall jet の流速分布と類似する.
- 跳水内部で最大流速が生じる相対高さ  $y_1/h_1$  および相対半値幅  $Y/h_1$  は, それぞれFDとPD<sub>0.8</sub>のほうがPD<sub>0.5</sub>とUDよりも大きい. すなわち,  $y_1/h_1$  および  $Y/h_1$  の流下方向変化に対して, 流入射流の乱流境界層の発達状態が影響する.
- 最大流速  $\bar{u}_m/U_1$  は, 同一の  $x/h_1$  において流入射流の乱流境界層の発達状態によらず同程度の値を示す. すなわち,  $\bar{u}_m/U_1$  の減衰状況に対して, 流入射流の乱流境界層の発達状態の影響は小さい. また,  $x/h_1 \gtrsim 20$  における跳水の  $\bar{u}_m/U_1$  は, wall jet の  $\bar{u}_m/U_1$  よりも小さい.

謝辞: 著者の一人(高橋正行)は本研究の一部に科研費(19K04624)の助成を受けた. ここに記して謝意を表します.

### 参考文献

- 1) Takahashi, M. and Ohtsu, I.: Effects of inflows on air entrainment in hydraulic jumps below a gate, *J. Hydraul. Res.*, 55(2), 259–268, 2017.
- 2) Resch, F. and Leutheusser, H.: Le ressaut hydraulique : mesures de turbulence dans la région diphasique, *La Houille Blanche*, (4), 279–293, 1972.
- 3) Felder, S., Montano, L., Cui, H., Peirson, W., and Kramer, M.: Effect of inflow conditions on the free-surface properties of hydraulic jumps, *J. Hydraul. Res.*, 59(6), 1004–1017, 2021.
- 4) 佐藤柳言, 高橋正行, 大津岩夫: 長方形断面水平水路の跳水の長さエネルギー損失との関係, 土木学会論文集A2(応用力学), 77(2), I\_457–I\_466, 2021.
- 5) Ohtsu, I. and Yasuda, Y.: Characteristics of supercritical flow below sluice gate, *J. Hydraul. Eng.*, 120(3), 332–346, 1994.
- 6) Rajaratnam, N.: Free flow immediately below sluice gates, *J. Hydraul. Div.*, 103(4), 345–351, 1977.
- 7) Rajaratnam, N.: The hydraulic jump as a wall jet, *J. Hydraul. Div.*, 91(HY5), 107–132, 1965.
- 8) Sigalla, A.: Measurements of skin friction in a plane turbulent wall jet, *J. Roy. Aeron. Soc.*, 62(576), 873–877, 1958.