

H-12

ゲート直下に形成される定常跳水の流速分布と乱れ強さ分布に関する実験的検討
Experimental Investigation of Velocity and Turbulence Intensity Distributions in Steady Hydraulic Jumps below a Gate

○三井洋平¹, 佐藤柳言², 高橋正行²

*Yohei Mitsui¹, Ryugen Satoh², Masayuki Takahashi²

Abstract: For steady hydraulic jumps with undeveloped inflow conditions, the jump toe is located at the vena contracta section. The time-averaged velocity and the turbulence intensity distributions were obtained experimentally under a given inflow Froude number for hydraulic jumps with undeveloped inflow conditions.

1 まえがき

跳水は、射流から常流に遷移する際に表面渦を伴う現象である。工学的には、ダムや堰などを流下する射流の運動エネルギーを減勢させるために用いられる場合がある。

Resch and Leutheusser^[1] は、流入射流の乱流境界層の発達状態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があることを示した。しかしながら、熱線流速計による計測結果であるため、空気混入水流の測定としては検討の余地がある。Takahashi and Ohtsu^[2] は、跳水内部の空気混入特性に対する流入射流の乱流境界層の発達状態の影響を示した。また、佐藤・高橋^[3] は、二次元電磁流速計による測定結果を用いて、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を示しており、乱れ強さについては今後さらなる検証が必要となる。

本研究は、長方形断面水平水路のスルースゲート直下に形成される定常跳水を対象に、跳水内部の流速と乱れ強さの分布を実験的に明らかにしようとしたものである。

2 実験

実験は、スルースゲートを有する水路幅 $B = 0.600$ m の滑面長方形断面水平水路 (Fig.1) において、跳水始端がゲート直下の縮流部 (vena contracta, Fig.1) に位置する場合の跳水を対象に行われた。Table 1 に示される跳水始端断面のフルード数 $F_1 [= U_1/(gh_1)^{0.5}]$ とレイノルズ数 $R [= q/\nu]$ が得られるように、流量 Q 、ゲートの開口高 a 、水路下流端の堰高を調整した。ここに、 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、 $\nu [= \mu/\rho]$ は水の動粘性係数、 μ は水の粘性係数、 ρ は水の密度、 x は跳水始端断面を原点とする水路床に沿った流下方向の座標、 y は水路床を原点とする鉛直上向きの座標、 z は水路横断方向の座標である。なお、縮流部はゲートから下流に $2a$ の位置^[4] とした。Table 1 の F_1 と R では、左右対称で安定した表面渦が形成され、定常跳水^[5] の流況であることを確認した。

跳水内部の x, y, z 方向の瞬間流速は、三次元電磁流速計 (採取間隔 10 ms, 採取時間 200 s) を用いて測定された。また、水深 h はポイントゲージを用いて測定された。なお、測定は水路中央面 ($z = 0$) を対象に行われた。

3 時間平均流速と跳水の表面渦長

与えられた F_1 と R に対して、時間平均流速 $\bar{V} [= (\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2)^{0.5}]$ を $\bar{V}/U_1 = f(x/h_2, y/h_2, F_1, R)$ の関係で整理した分布の一例を Fig.2 に示す。ここに、 $\bar{u} [= u - u']$, $\bar{v} [= v - v']$, $\bar{w} [= w - w']$ は x, y, z 方向の時間平均流速、 u, v, w は x, y, z 方向の瞬間流速、 u', v', w' は x, y, z 方向の変動流速である。なお、跳水終端水深 h_2 は、跳水上・下流端の水深間の関係としてよく知られている

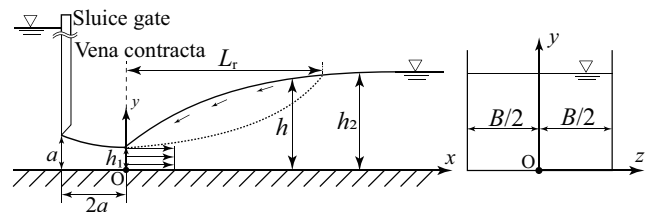


Figure 1. Definition sketch for the jump below a sluice gate

Table 1. Experimental conditions

F_1 [-]	$R \times 10^{-4}$ [-]	B/h_1 [-]	h_1 [m]
5.2	6.2	25	0.024
5.2	10	18	0.033

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{8F_1^2 + 1} - 1 \right) \quad (1)$$

に、与えられた F_1 と h_1 を用いて算出された。Fig.2 に示されるように、同一断面内で y/h_2 の増加に伴い最大流速に達する。さらに y/h_2 が増加すると流速は減少し、やがて逆流を生じる。

時間平均的に逆流の形成される最下流断面までの長さを跳水の表面渦長 L_r (Fig.1 参照) とし、 L_r を時間平均流速の測定結果と流況の目視観察より定めた。跳水の表面渦の相対長さ L_r/h_2 は、与えられた F_1 に対して、 $R = 6.2 \times 10^4$ の場合は $L_r/h_2 \approx 4.0$ [Fig.2(a)], $R = 1.0 \times 10^5$ の場合は $L_r/h_2 \approx 4.4$ [Fig.2(b)] と判定された。

4 乱れ強さの配分率

跳水内部の乱れ強さの大きさや分布は跳水の表面渦の長さに関係しているものと考え、 x, y, z 方向の乱れ強さを $\frac{u'^2}{V'^2}, \frac{v'^2}{V'^2}, \frac{w'^2}{V'^2} = f(x/L_r, y/h, F_1, R)$ の関係で整理した一例を Fig.3 と Fig.4 に示す。ここに、 $V'^2 = \overline{u'^2 + v'^2 + w'^2}$ である。

跳水表面渦終端の上流側 ($0.7 \leq x/L_r \leq 1.0$) においては、Fig.3(a), (b), (c) に示されるように、与えられた F_1 と R に対して、 y/h の増加に伴い、 $\frac{u'^2}{V'^2}$ の値は減少し、 $\frac{v'^2}{V'^2}$ の値は増加し、 $\frac{w'^2}{V'^2}$ の値はわずかに増加した。

跳水表面渦終端の下流側 ($x/L_r > 1.0$) では、Fig.4(a), (b), (c) に示されるように、与えられた F_1 と R に対して、 y/h の値によらず、 x, y, z 方向のそれぞれの乱れ強さの配分率はほぼ一定で、 $\frac{u'^2}{V'^2} \approx 0.57$, $\frac{v'^2}{V'^2} \approx 0.18$, $\frac{w'^2}{V'^2} \approx 0.25$ を示した。これらは、開水路乱流で等流の場合の乱れ強さの配分率^[6]と同程度となった。

1: 日大理工・院 (前)・土木 2: 日大理工・教員・土木

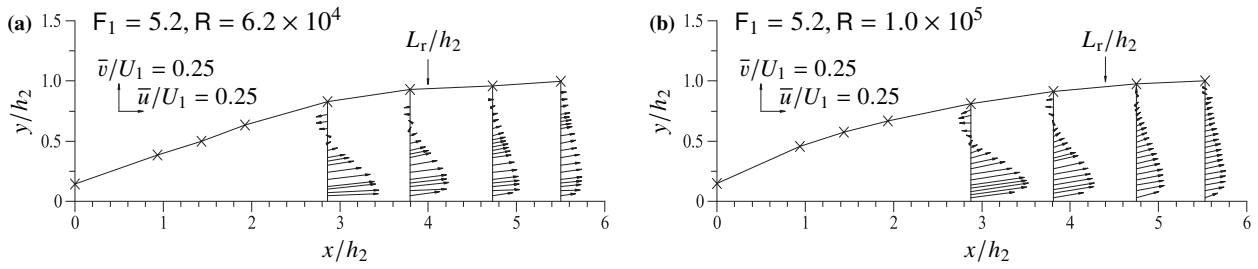


Figure 2. Longitudinal variations in the time-averaged velocity distribution; (x): Experimental values of the relative depth h/h_2

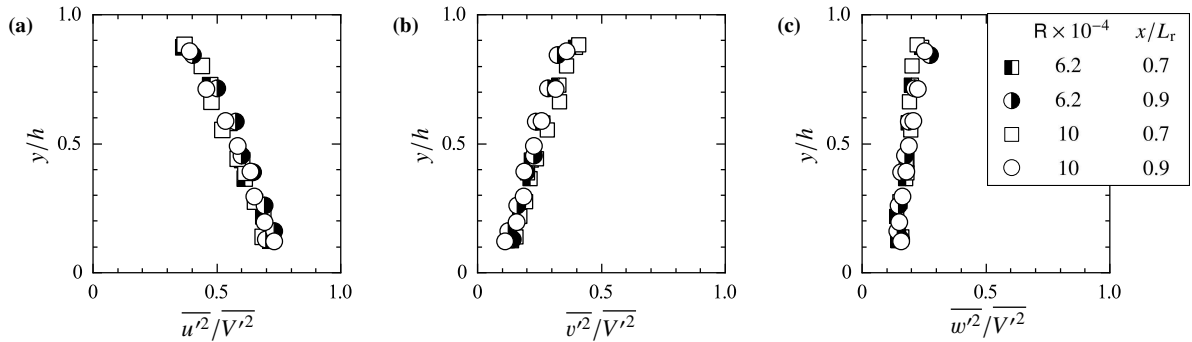


Figure 3. Distributions of the turbulence intensity in the range of $0.7 \leq x/L_r \leq 1.0$ under $F_1 = 5.2$

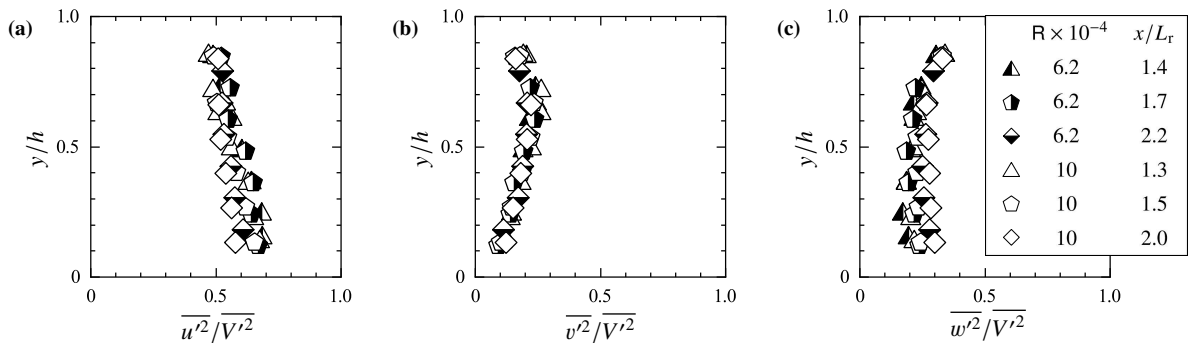


Figure 4. Distributions of the turbulence intensity for $x/L_r > 1.0$ under $F_1 = 5.2$

5 まとめ

長方形断面水平水路のスルースゲート直下に形成される定常跳水を対象に、与えられた跳水始端のフルード数 F_1 とレイノルズ数 R に対して、跳水内部の流速分布と乱れ強さ分布を示した。本研究で得られた結果を以下に示す。

- 跳水内部の時間平均流速の分布と跳水の流況観察の結果より、与えられた F_1 と R に対して、 $R = 6.2 \times 10^4$ の場合と $R = 1.0 \times 10^5$ の場合の跳水の相対的な表面渦長 L_r/h_2 の値は同程度であった。
- 与えられた F_1 と R に対して、跳水の表面渦終端の上流側 ($0.7 \leq x/L_r \leq 1.0$) と下流側 ($x/L_r > 1.0$) とで乱れ強さの配分率の傾向が異なった。跳水表面渦終端の上流側 ($0.7 \leq x/L_r \leq 1.0$) では、 y/h の増加に伴い、 u^2/V^2 は減少し、 v^2/V^2 は増加し、 w^2/V^2 はわずかに増加した。跳水表面渦終端の下流側 ($x/L_r > 1.0$) では、 x, y, z

方向の乱れ強さの配分率は開水路乱流で等流の乱れ強さの配分率と同程度となった。

参考文献

- [1] Resch, F. and Leuthesser, H.: Le ressaut hydraulique: mesures de turbulence dans la région diphasique, *La Houille Blanche*, (4), 279–293, 1972.
- [2] 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.
- [3] 佐藤柳言, 高橋正行: 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, 土木学会論文集 B2(水工学), 78(2), I_631–I_636, 2022.
- [4] Rajaratnam, N.: Free flow immediately below sluice gates, *J. Hydraul. Div.*, 103(4), 345–351, 1977.
- [5] Chow, V. T.: *Open channel hydraulics*, McGraw-Hill, New York, 1959.
- [6] Nezu, I. and Nakagawa, H.: *Turbulence in open-channel flows*, Taylor & Francis, Rotterdam, 1993.