

定常跳水の乱れ強さの特性に対する流入射流の境界層発達状態の影響に関する実験的検討

日本大学大学院理工学研究科
日本大学大学院理工学研究科
日本大学理工学部
日本大学理工学部

学生会員 ○三井洋平
非会員 榊原瑞生
正会員 佐藤柳言
正会員 高橋正行

1. まえがき

跳水は、射流から常流に移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。

スルースゲート下流側に形成される射流は、縮流部 (vena contracta, 図 1) で流速分布が一様となり^{1),2)}, その下流側で乱流境界層が流下とともに発達し、やがて水面に到達する。乱流境界層が水面に到達した断面は、critical point と呼ばれている¹⁾。Critical point より下流側に跳水始端が位置する場合は fully developed inflow condition (FD と略す) と呼ばれ³⁾, 縮流部に跳水始端が位置する場合は undeveloped inflow condition (UD と略す) と呼ばれている³⁾。

Resch and Leutheusser⁴⁾ 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 Ohtsu³⁾ 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⁵⁾ 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た。しかしながら、跳水内部の乱れ強さの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示されていない。

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定常跳水を対象に、跳水内部の乱れ強さの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 (図 1) で行われた。跳水始端断面のフルード数 $F_1 [= U_1/(gh_1)^{0.5}] = 5.2$ とレイノルズ数 $R [= \rho U_1 h_1 / \mu] = 6.2 \times 10^4$ 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。流入射

流の乱流境界層の発達状態を UD と FD のそれぞれの場合に変化させるため、Ohtsu and Yasuda¹⁾ の計算方法を用いて射流の乱流境界層厚 δ , 水深 h , 縮流部から critical point までの長さ ℓ_{cp} を計算した。なお、縮流部はゲートから下流に $2a$ の位置⁶⁾ とし、縮流部の水深は $h_0 = 0.64a$ ⁶⁾ であることを実験で確認した。縮流部から跳水始端断面までの長さ ℓ_1 は、UD の場合は $\ell_1 = 0$, FD の場合は $\ell_1 = 1.7\ell_{cp}$ とした。跳水終端水深 h_2 は、跳水上・下流端の水深間関係としてよく知られている

$$h_2/h_1 = \{(8F_1^2 + 1)^{0.5} - 1\}/2 \quad (1)$$

に、与えられた F_1 と h_1 を用いて算出された。

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. 時間平均流速の分布

与えられた F_1 と R に対して、UD と FD の時間平均流速 $\bar{V} [= (\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2)^{0.5}]$ の分布の一例を図 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。

跳水内部においては、平板に沿う二次元壁面噴流 (wall jet) の流速分布と類似な分布 (図 1) を得られる領域の存在が知られている⁷⁾。Wall jet に類似な流速分布を得られるのは、図 2(a) に示される UD では $x/h_2 \leq 5.5$, 図 2(b) に示される FD では $x/h_2 \leq 3.8$ であった。

常に逆流の形成される最下流断面までの長さである跳水の表面渦長 L_r (図 1 参照) を流速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 と R に対して、UD の場合は $L_r/h_2 \approx 4.0$ [図 2(a)], FD の場合は $L_r/h_2 \approx 3.2$ [図 2(b)] と判定された。すなわち、UD の場合に比べて FD の場合の L_r/h_2 の値は小さい。

4. 乱れ強さの配分率

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

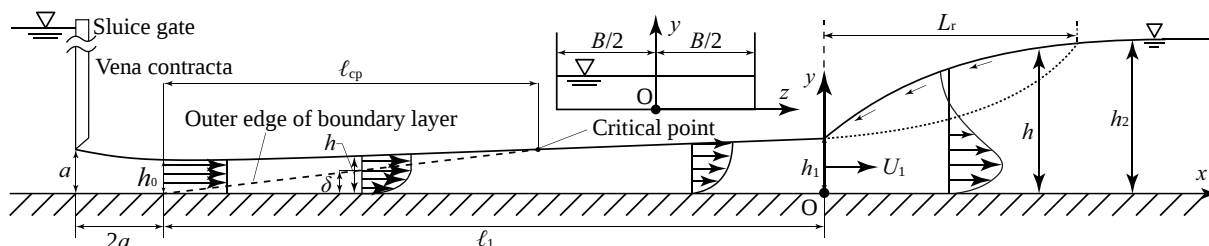


図 1 スルースゲート下流側に形成される自由跳水の定義図

キーワード：定常跳水, 乱れ強さ, 乱流境界層の発達状態, 表面渦長, 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. 03-3259-0676

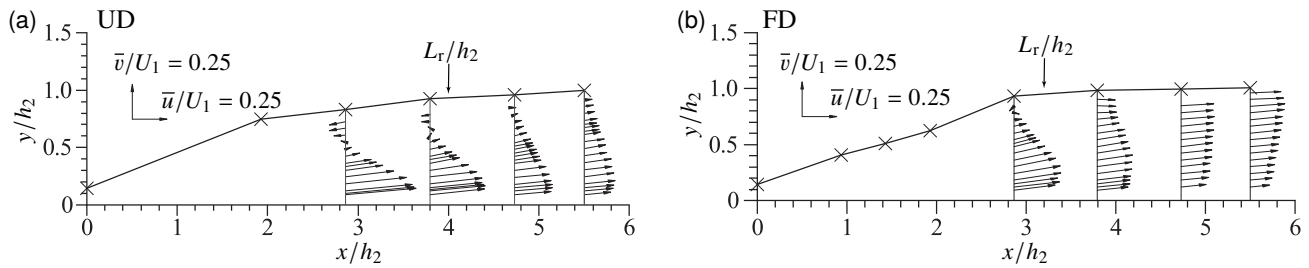


図2 時間平均流速の分布 ($F_1 = 5.2, R = 6.2 \times 10^4$) ; $\times$: 相対水深 h/h_2 の実験値

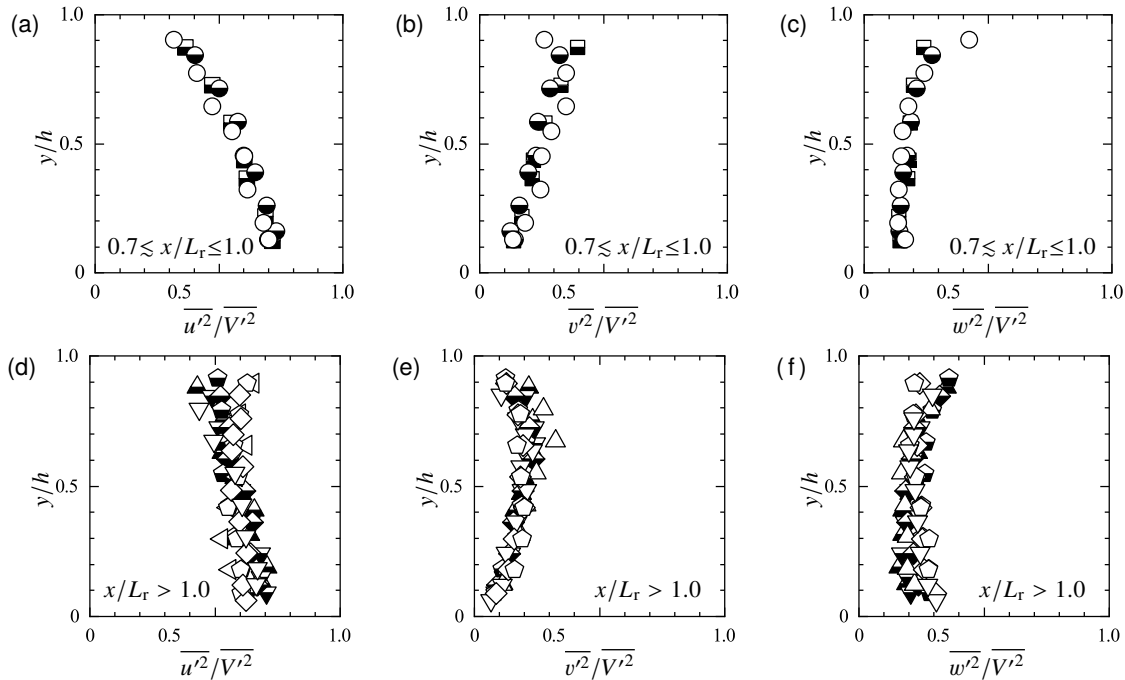


図3 乱れ強さの配分率 ($F_1 = 5.2, R = 6.2 \times 10^4$) ; UD [$x/L_r = (\blacksquare)0.7, (\bullet)0.9, (\blacktriangle)1.2, (\nabla)1.4, (\diamond)1.9, (\circ)2.2$], FD [$x/L_r = (\circ)0.9, (\triangle)1.2, (\nabla)1.5, (\diamond)2.1, (\circ)2.7$]

跳水表面渦終端の上流側 ($0.7 \leq x/L_r \leq 1.0$) では、図3(a), (b), (c) に示されるように、 x, y, z 方向の乱れ強さの配分率のそれぞれの分布形は、与えられた F_1 と R に対して、流入射流の境界層発達状態によらず、 y/h の増加に伴い、 $\overline{u^2}/V'^2$ は減少し、 $\overline{v^2}/V'^2$ は増加し、 $\overline{w^2}/V'^2$ はわずかに増加した。なお、水面付近 ($y/h \approx 0.9$) では、 $\overline{u^2}/V'^2 \approx \overline{v^2}/V'^2 \approx \overline{w^2}/V'^2$ となった。

跳水表面渦の下流側 ($x/L_r > 1.0$) では、図3(d), (e), (f) に示されるように、 x, y, z 方向のそれぞれの乱れ強さの配分率は、与えられた F_1, R 、流入射流の境界層発達状態、 y/h によらず、ほぼ一定で、 $\overline{u^2}/V'^2 \approx 0.55, \overline{v^2}/V'^2 \approx 0.17, \overline{w^2}/V'^2 \approx 0.28$ を示した。これらは、開水路乱流で等流の乱れ強さの配分率⁸⁾と同程度となった。

5. まとめ

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定常跳水を対象に、与えられた跳水始端断面のフルード数 F_1 とレイノルズ数 R に対して、跳水内部の乱れ強さの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検討した。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、UD の場合よりも FD の場合の相対的な表面渦長 L_r/h_2 の値は小さくなる。
- 与えられた F_1 と R に対して、流入射流の乱流境界層の発達状態によらず、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る。上流側 ($0.7 \leq x/L_r \leq 1.0$) では、 y/h の増加に伴い、 $\overline{u^2}/V'^2$ は減少し、 $\overline{v^2}/V'^2$ は増加し、 $\overline{w^2}/V'^2$ はわずかに増加した。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。

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) Ohtsu, I. and Yasuda, Y.: Characteristics of supercritical flow below sluice gate, *J. Hydraul. Eng.*, 120(3), 332–346, 1994.
- 2) Roth, A. and Hager, W. H.: Underflow of standard sluice gate, *Exp. Fluids*, 27(4), 339–350, 1999.
- 3) 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.
- 4) Resch, F. and Leutheusser, H.: Le ressaut hydraulique : mesures de turbulence dans la région diphasique, *La Houille Blanche*, (4), 279–293, 1972.
- 5) 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.
- 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(5), 107–132, 1965.
- 8) Nezu, I. and Nakagawa, H.: *Turbulence in open-channel flows*, Taylor & Francis, Rotterdam, 1993.