スルースゲート下流側の射流の水面変動と乱流境界層の発達状態との関係

日本大学大学院理工学研究科	学生会員	○佐藤柳言
日本大学大学院理工学研究科	学生会員	内田健太
日本大学理工学部	正会員	高橋正行
日本大学理工学部	フェロー会員	大津岩夫

1. まえがき

一般に跳水中には空気が取り込まれ,多量の気泡が混入 された流れとなっている.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^{1),2)}.ここに,UDはスルースゲート下 流側の縮流部に跳水始端が位置する場合,FDは乱流境界層 が発達中の射流に跳水始端が位置する場合,FDは乱流境界 層が水面まで到達した断面よりも下流側の射流に跳水始端 が位置する場合である.

Takahashi and Ohtsu³⁾は、高速度ビデオカメラを用いた 跳水内部への空気混入状況の観察と跳水内部の空気混入率 C[= 空気の体積 / (空気の体積+水の体積)]の測定値に基 づき, 流入射流の水面と跳水の表面渦先端との交点である impingement point 付近から空気が混入する場合と表面渦の breaking によって空気が混入する場合の両方によって跳水 中に空気が混入することを示した.また,流入射流の乱流 境界層の発達状態が UD と PD (δ/h = 0.5) (PD_{0.5} と略す) の場合(図1(a),図1(b))は流入射流の水面は滑らかで変動 がなく、PD ($\delta/h = 0.8$) (PD_{0.8}と略す)の場合(図 1(c)) は凹凸と変動が間欠的に生じ,FDの場合(図1(d))は凹凸 と変動が常に生じていることを指摘し、流入射流の水面の 凹凸と変動の有無が跳水内の advective diffusion region の空 気混入率 C に影響を与えることを示した.ここに、 δ は乱 流境界層厚さ, h は水深である. しかしながら, 射流水面の 凹凸と変動は定量的に明らかにされておらず、乱流境界層 の発達状態と水面変動との関係に不明な点が残されている.

本研究は、スルースゲート下流側に形成される射流の水 面変動と乱流境界層の発達状態との関係について広範囲の フルード数に対して実験的検討を行い、スルースゲート下 流側の射流の水面変動について定量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 = 0.4 m の滑面 長方形断面水平水路において、表1に示される条件の射流を 対象に行われた.水深 h は超音波水位計(採取間隔 10 ms, 採取時間 200 s, 設置高さは水面より上方の 70 ~ 100 mm) を用いて評価断面の水路横断方向中央部で 10 回測定され た.ここに、 $F_r [= V/\sqrt{gh}]$ はフルード数、g は重力加速 度、V は断面平均流速、 $R_e [= Vh/v]$ はレイノルズ数、v は水の動粘性係数である.評価断面は乱流境界層の発達状 態が UD、PD($\delta/h = 0.3, 0.5, 0.7, 0.75, 0.8, 0.9$)、FD ($x = x_{cp}, 1.5x_{cp}, 1.7x_{cp}, 2x_{cp}$)になる断面を対象とした. なお、UD の場合は x = 0、PD の場合は $\delta/h = 0.3, 0.5,$ 0.7, 0.75, 0.8 および 0.9 となる x、FD の場合は $x = x_{cp},$ $1.5x_{cp}, 1.7x_{cp}, 2x_{cp}$ とした.ここに、xは縮流部から評価 断面までの流下方向距離、 x_{cp} は乱流境界層が水面に到達す る critical point の x である(図 2 参照).

与えられた F_r , R_e , および δ/h (UD, PD, FD) となる x/h_0 を求めるため, Ohtsu and Yasuda の方法⁴⁾を用いて δ , h, xを計算し, 表 1 の条件が得られるように単位幅流量 q, スルースゲートの開口高 a を調整して実験を行った. こ こに, h_0 [= 0.64a] は縮流部 (x = 0) における水深である. なお, R_e は $R_e \ge 6.0 \times 10^4$ のとき, 自由跳水の流況に対す る R_e の影響がない⁵⁾ ことから, $R_e = 6.2 \times 10^4$ を対象と した.

表1 実験条件

Inflow condition	F_r	$R_e \times 10^{-4}$	В	δ/h
	(-)	(-)	(m)	(-)
UD	$4.2 \sim 7.2$	6.2	0.4	0
PD	7.2	6.2	0.4	0.3~0.9
FD	$4.2\sim7.2$	6.2	0.4	1

3. 乱流境界層の発達状態と水面変動との関係

乱流境界層の発達状態 δ/h と射流水深 h の標準偏差 $\sqrt{h'^2}$ との関係および水面変動の流下方向変化を図 3 に示す.ここに, \overline{h} は時間平均された射流水深, $h' [= \overline{h} - h]$ は変動水 深である.

図 3 に示されるように、 $\sqrt{h'^2/h}$ は UD ($\delta/h = 0$) と PD ($0 < \delta/h < 1$)に比べて FD ($\delta/h = 1$)のほうが大きい.す なわち、乱流境界層が発達すると射流水面の凹凸と変動は大 きくなる.UD と PD ($0 < \delta/h \leq 0.7$)の $\sqrt{h'^2/h}$ はほぼ一定 の値を示す.これは、UD と PD ($0 < \delta/h \leq 0.7$)の水面に凹 凸と変動が生じないことを示しており、UD と PD_{0.5}の水面 の凹凸と変動が目視では観察されなかった結果(図 1(a),図 1(b))と対応している.FD ($1.5x_{cp} \leq x \leq 2x_{cp}$)の $\sqrt{h'^2/h}$ はほぼ一定の値を示す.これは、FD ($1.5x_{cp} \leq x \leq 2x_{cp}$)で は乱流境界層が水面に到達した後、水面付近の乱れが十分に

キーワード:空気混入率,射流水面,水面変動,乱流境界層の発達状態 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



発達した状態になることを示している.また, FD $(x = x_{cp})$ の $\sqrt{h'^2}/\overline{h}$ はFD $(1.5x_{cp} \lesssim x \lesssim 2x_{cp})$ に比べて小さい.こ れは, FD (x = x_{cp}) は乱流境界層が水面に到達する critical point の断面であり, FD $(1.5x_{cp} \lesssim x \lesssim 2x_{cp})$ に比べて水面 付近の乱れが十分に発達していないためと考えられる. PD $(0.8 \leq \delta/h < 1)$ では, 乱流境界層の発達に伴って $\sqrt{h'^2}/\overline{h}$ は 増加する.これは、射流水面の凹凸と変動は PD ($\delta/h \approx 0.8$)

付近で生じ始めることを示しており、PD0.8の水面に間欠的 な凹凸と変動が観察された結果(図1(c))に対応している. このことは、平板上の乱流境界層において、 $y = 1.2\delta$ まで 乱流境界層内の乱れが間欠的に影響を及ぼすこと⁶⁾と類似 な現象が生じ、 $y = 1.2\delta = 1.2 \times 0.8h = 0.96h \simeq h$, つまり 水面付近まで乱流境界層内の乱れの影響を受けたものと考 えられる.

4. 乱流境界層の発達状態と水面変動との関係に 対するフルード数 *F*_r の影響

乱流境界層の発達状態と水面変動との関係に対するフ ルード数 Fr の影響を図4に示す.また、参考のため中山ら 7)の実験結果も併せて示す.ただし、中山らが対象とした 射流は $R_e = 1.3 \times 10^4$, 3.0×10^4 であるため, 実験値に R_e の影響が含まれることに注意されたい.

図4に示されるように, UDの場合, Fr の変化によらず $\sqrt{h'^2/h}$ はほぼ一定の値を示す.これは, UD の水面に凹凸が 生じないためと考えられる. 一方, FD $(1.5x_{cp} \lesssim x \lesssim 2x_{cp})$ の場合, F_r が大きくなると $\sqrt{h'^2}/\overline{h}$ は大きくなる. これは, F_r の増加に伴って水面付近の v 方向の乱れ強さ $\sqrt{v'^2}$ [v': y方向の変動流速]が大きくなることが影響したものと考 えられる. つまり, FD の場合, 水面付近の無次元乱れ強さ $\sqrt{u'^2}/U$ [u': x 方向の変動流速, $\sqrt{u'^2}: x$ 方向の乱れ強さ, U: 乱流境界層外縁流速]は Fr の大きさに関わらず一定値 を示す^{3),8)}ため,与えられた射流水深hに対して,Frの 増加に伴い断面平均流速 V は大きくなり、 $\sqrt{u'^2}$ は大きくな る. また, $\sqrt{v'^2} = 0.55 \sqrt{u'^2}$ である ⁹ ことから, *Fr* の増加 に伴い $\sqrt{v'^2}$ が大きくなる.

5. まとめ

スルースゲート下流側に形成される射流の水面変動と乱 流境界層の発達状態との関係について定量的検討を行った 結果;①乱流境界層の発達に伴い射流水面の凹凸と変動は大 きくなる; ② F_r = 7.2 の場合, PD (0.7 $\leq \delta/h \leq 0.8$) で射流 水面に凹凸と変動が生じ始める;③水面が十分に発達した状 態の射流は FD $(x \ge 1.5x_{cp})$ である; ④ UD では F_r の変化 によらず水面に凹凸は生じない; ⑤ FD ($1.5x_{cp} \lesssim x \lesssim 2x_{cp}$) では Fr の増加に伴って水面の凹凸と変動が大きくなる,こ とが示された.



図3 射流の水面変動の流下方向変化



図4 UDと FDの射流の水面変動に対するフルード数の影響

参考文献

- 1) 高橋正行,大津岩夫:跳水内部の空気混入特性,土木学 会論文集 B1(水工学), 71(4), I_529-I_534, 2015.
- 2) 高橋正行,大津岩夫:跳水内部の空気混入特性に対する 流入射流の影響,水工学論文集, 53, 985–990, 2009. 3) Takahashi, M. and Ohtsu, I.: Effects of inflows on air en-
- trainment in hydraulic jumps below a gate, J. Hydr. Res., 55(2), 259–268, 2017.
- 4) Ohtsu, I. and Yasuda, Y.: Characteristics of supercritical flow below sluice gate, J. Hydr. Engrg., 120(3), 332-346, 1994.
- 5) 持田俊, 安田陽一, 高橋正行, 大津岩夫: 自由跳水の流 況形成に対するレイノルズ数の影響, 土木学会年次学術 講演会概要集, 65, Ⅱ 部門, 391–392, 2010.
 6) Klebanoff, P.S.: Characteristics of turbulence in boundary
- layer with zero pressure gradient, NACA Rep., 1247, 1955.
- 7) 中山昭彦, 中瀬幸典, 横嶋哲, 藤田一郎: 水面変動をパ ラメータとした開水路乱流計算のための 2 方程式モデル の改良,応用力学論文集, 3, 745–752, 2000. 8) Tominaga, A. and Nezu, I.: Velocity profiles in steep open-
- channel flows, J. Hydr. Engrg., 118(1), 73-90, 1992.
- 9) Auel, C., Albayrak, I. and Boes, R. M.: Turbulence char-acteristics in supercritical open channel flows: effects of Froude number and aspect ratio, J. Hydr. Engrg., 140(4), 04014004-16, 2014.