H3-18

スルースゲート下流側の射流の水面変動と乱流境界層厚さとの関係 Effects of boundary layer thickness on water surface fluctuation of supercritical flows below a sluice gate

○佐藤柳言¹, 関口堅也¹, 内田健太², 高橋正行³

*Ryugen Satou¹, Kenya Sekiguchi¹, Kenta Uchida², Masayuki Takahashi³

Abstract: This report presents effects of boundary layer thickness on the water surface fluctuation of supercritical flows below a sluice gate. The water surface for the undeveloped flow (UD) or the partially developed flow with $\delta/h = 0.5$ (PD_{0.5}) are smooth, glass-like, and transparent, where δ = boundary layer thickness and h = water depth. The free-surface fluctuation is large in the fully developed flow (FD). This is because the turbulent boundary layer for the FD reaches the water surface and is fully developed. For the partially developed flow with $\delta/h = 0.8$ (PD_{0.8}), the water surface fluctuation is smaller than that for the FD and is intermittent. It is considered that the turbulent boundary layer intermittently reaches the water surface for the PD_{0.8}, causing intermittent fluctuations of the water surface.

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 condition (以下, UD と略す), Partially developed inflow condition (PD と略す),および Fully developed inflow condition (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を位置させた場 合, PD は乱流境界層発達中の射流に跳水始端を位置させ た場合, 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を位置させた場合である.

高橋・大津^{[1],[2]}は、UD と PD の跳水内部の空気混入 率 *C*よりも FD の跳水内部の *C*が大きいことを示した. また、FD の場合,流入射流の水面に凹凸と変動が形成さ れ、この凹凸間の空気が跳水内部に取り込まれていること を示した. さらに、PD ($\delta/h = 0.5$) (PD_{0.5} と略す)の場 合の跳水内部の *C*は UD の場合とほぼ同じ値になること を示し、PD ($\delta/h = 0.8$) (PD_{0.8} と略す)の場合の跳水内 部の *C*は FD と PD_{0.5} の中間の値を示すことを明らかに した. ここに、 δ は評価断面における乱流境界層厚さ、*h* は水深である.しかし、射流水面の凹凸と変動の生じ始め る位置については明らかにされていない.

本研究は、スルースゲート下流側の射流を対象に広範囲 なフルード数に対して射流の水面変動と乱流境界層厚さと の関係について明らかにしようとしたものである.

2 実験方法

実験は、スルースゲートを有する水路幅 B = 0.4 m の長 方形断面水平水路を用いた。射流水面の凹凸と変動の開始 位置を定性的に明らかにするため、PD ($\delta/h = 0.5 \sim 0.8$) でのフルード数 $F_r = 4 \sim 8$, レイノルズ数 $R_e = 6.2 \times 10^4$ の射流を対象に、高速度ビデオカメラ(撮影速度 1000 fps) を用いて PD ($\delta/h = 0.5 \sim 0.8$)の範囲の水面観察を行っ 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。射流の水面変動を定量的に知るた め、Table1 に示される条件の射流を対象に、超音波水位計 (採取間隔 10 ms, 採取時間 200 s, 設置高さ 70 ~ 100 mm) を用いて水路横断方向中央部で水深を測定した。ここに、 x は縮流部から評価断面までの距離、T は水温である。評 価断面は乱流境界層の発達状態が UD, PD ($\delta/h = 0.5$, 0.7, 0.75, 0.8), FD になる断面を対象とした. なお, UD の場合は x = 0, FD の場合は $x = 2x_{cp}$, PD の場合は $\delta/h = 0.5$, 0.7, 0.75, および 0.8 となる x とした. ここ に, x_{cp} は乱流境界層が水面に到達する critical point の x である (Fig.1 参照).

評価断面において, 与えられた $F_r \ge R_e$ のもとで乱流境 界層の発達状態を UD, PD, FD に変化させるため, Ohtsu and Yasuda の方法 ^[3] を用いて δ , h, x を計算し, 対象と する射流が形成さ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.

Table1: Experimental conditions for measurements of water depth

Inflow	F_r	$R_e \times 10^{-4}$	δ/h	h	x	Т
condition	(-)	(-)	(-)	(m)	(m)	(°C)
UD	7.2	6.2	0	0.0175	0	28
PD	7.2	6.2	0.5	0.0180	0.406	26
	7.2	6.2	0.7	0.0177	0.613	27
	7.2	6.2	0.75	0.0177	0.669	27
	7.2	6.2	0.8	0.0177	0.726	27
FD	7.2	6.2	1.0	0.0175	1.861	28

3 射流の水面形状

評価断面の $F_r = 7.2$, $R_e = 6.2 \times 10^4$ の射流水面を高速 度ビデオカメラで撮影した一例を Fig.2 に示す. Fig.2 に 示されるように, UD (Fig.2(a)) と PD_{0.5} (Fig.2(b)) の場 合は,射流水面は滑らかで凹凸と変動が認められない. こ れは, UD では乱流境界層が未発達であり, PD_{0.5} では境 界層内の乱れが水面まで影響を及ぼさないためと考えら れる. 一方, FD の場合 (Fig.2(d)) は,水面の凹凸と変動 が大きい. これは,境界層が水面に到達し,水面での乱 れが大きくなったためと考えられる. また, PD_{0.8} の場合 (Fig.2(c)) は FD の場合よりも水面の凹凸が小さく変動は 間欠的である. これは,境界層内の乱れが間欠的に水面ま で達し,水面の凹凸と変動を誘起したためと考えられる.

なお,上記結果を含む $F_r = 4 \sim 8$, $R_e = 6.2 \times 10^4$ の射流水面の観察の結果, $\delta/h \approx 0.7 \sim 0.8$ で射流水面に凹凸が生じ始めることが確認された.

1:日大理工・学部・土木 2:日大理工・院(前)・土木 3:日大理工・教員・土木



Figure1: Definition sketch





(b) PD_{0.5}









4 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 $\delta/h \geq$ 射流水深 h の標準偏差 $\sqrt{h'^2} \geq o$ 関係を Fig.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, $\sqrt{h'^2/h}$ は無次元水面 変動である.Fig.3 に示されるように, $0 \leq \delta/h \leq 0.7$ の場 合, $\sqrt{h'^2/h}$ はほぼ一定の値である.これは UD (Fig.2(a)) \geq PD_{0.5} (Fig.2(b)) の水面の凹凸と変動が小さいことに 対応している.また, $\delta/h = 1.0$ ($x = 2x_{cp}$) の $\sqrt{h'^2/h}$ は $0 \leq \delta/h \leq 0.7$ の $\sqrt{h'^2/h}$ に比べて大きい.これは UD \geq PD_{0.5} の水面の凹凸と変動は小さく (Fig.2(a), 2(b)), FD の水面の凹凸と変動が大きい (Fig.2(d)) ことに対応して いる. $\delta/h \gtrsim 0.7 \sim 0.8$ の場合, δ/h の増加に伴い $\sqrt{h'^2/h}$



Figure3: Relationship between water surface fluctuations and boundary layer developments

は増加する. これは, $PD_{0.8}$ 付近の射流水面に間欠的な凹 凸と変動が観察された結果 (Fig.2(c)) と対応している. こ のことは, $PD_{0.8}$ の場合は境界層内の乱れが間欠的に水面 まで達し,水面の凹凸と変動を誘起したためと考えられ る. すなわち,平板上の乱流境界層においては, $y = 1.2\delta$ まで間欠的に影響を及ぼすこと ^[5] と類似な現象が生じ, $y = 1.2\delta = 1.2 \times 0.8h = 0.96h \simeq h$, つまり水面近くまで 乱流境界層の影響を受けたものと考えられる.

5 まとめ

スルースゲート下流側において $F_r = 4 \sim 8$, $R_e = 6.2 \times 10^4$ の射流の水面変動と乱流境界層厚さとの関係について定性的かつ定量的に検討した.高速度ビデオカメラによって得られた射流水面の映像と超音波水位計によって得られた水面変動の結果に基づき;①乱流境界層が十分に発達すると射流水面の凹凸と変動は大きくなる;②射流水面の凹凸と変動が生じ始める断面の乱流境界層の発達状態は 0.7 $\lesssim \delta/h \lesssim 0.8$ である,ことが示された.

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] Ohtsu, I. and Yasuda, Y.: Characteristics of supercritical
- [3] Ohtsu, I. and Yasuda, Y.: Characteristics of supercritical flow below sluice gate, J. Hydr. Engrg., 120(3), 332– 346, 1994.
- [4] 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 講演会概要集,65,II 部門,391–392,2010.
 [5] Klebanoff, P.S.: Characteristics of turbulence in bound-
- [5] Klebanoff, P.S.: Characteristics of turbulence in boundary layer with zero pressure gradient, *NACA Rep.*, 1247, 1955.