

跳水内部の空気混入率分布に関する検討

日本大学大学院 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 大津岩夫

一般にスルースゲート下流側に形成される跳水は、跳水中に空気を取り込まれ、多量の気泡が混入し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。ここに、UD は縮流部に跳水始端が位置する場合、PD 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 (図 1 参照)。

Wang and Chanson¹⁾ は PD を対象に跳水内部の空気混入率分布を示し、advective diffusion region 内の最大空気混入率 C_{max} および C_{max} が生じる相対高さ $Y_{C_{max}}/h_1$ (h_1 は跳水始端水深)(図 2 参照)の実験式を提案しているが、UD と FD についての検討は行われていない。高橋・大津^{2),3)} は跳水始端のフルード数および乱流境界層の発達状態 (UD, PD, および FD) によって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)] の分布や C_{max} , $Y_{C_{max}}$ の変化傾向について違いがあることを示している。しかしながら、乱流境界層の発達状態 (UD, PD, FD) が跳水内部の空気混入特性に与えるフルード数の影響については不明な点が残されている。

本研究は、UD および FD を対象にフルード数および乱流境界層の発達状態が跳水内部の空気混入特性に及ぼす影響について検討し、長方形断面水平水路における跳水内部の空気混入率分布について明らかにしようとしたものである。

実験方法

実験は、スルースゲートを有する水路幅 $B=40$ cm の長方形断面水平水路を用いて、レイノルズ数 $Re (= V_1 h_1 / \nu)$ を 62000 で一定とし、跳水始端断面のフルード数 $F_{r1} (= V_1 / \sqrt{gh_1})$ を 5.2~8.2, UD もしくは FD となるように流量、スルースゲートの開口高、水路下流端の堰高を調整して実験を行った。ここに、 g は重力加速度、 h_1 は跳水始端断面の水深、 V_1 は跳水始端断面の断面平均流速、 ν は水の動粘性係数である。UD の場合は $x_1=0$, FD の場合は $x_1 = 2x_{cp}$ となる x_1 とした。ここに、 x は縮流部を原点とする水路流下方向の座標軸、 $x = x_1$ は跳水始端断面の座標、 $x = x_{cp}$ は境界層 δ が水面に到達して $\delta = h$ となる限界点の座標である。射流の乱流境界層厚 δ と水深 h_1 は Ohstu and Yasuda の方法⁵⁾ を用いて計算した。跳水内部の空気混入率 C の測定には 2 点電極型ポイド率計 (probe 直径 25 μ mm, 長針と短針の間隔 $\Delta l=4.259$ mm, 採取間隔 50 μ s, 採取時間 20 s) を使用した。

跳水内部の空気混入率分布

流入断面のアスペクト比が $B/h_1 \geq 10$, $Re = 62000$ の場合を対象に水路中央断面 ($z = 0$) での空気混入率 C は次のように示されるものと考えられる^{2),4),6)}。

$$C = F \left(\frac{x-x_1}{h_1} \text{ or } \frac{x-x_1}{L_j}, \frac{y}{h_1}, F_{r1}, \frac{\delta}{h_1} \right) \quad (1)$$

ここに、 y は水路床を原点とする鉛直上向きの座標軸、 L_j は跳水長であり、 $L_j = 5.5h_2^{0.7}$ で求められている。跳水内部の

空気混入率 C の実験値を (1) 式の関係に基づき整理した結果の一例を図 3 に示す。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(図 1) 付近で取り込まれた気泡は跳水中で移流・拡散する。そのため、跳水内部の空気混入率 C の値は底面から y の増加に伴い大きくなり、空気混入率の極大値 C_{max} を経て $y = y_s$ まで減少し、極小値 C_{min} をとる (図 2)。図 2 に示されるように C_{max} , C_{min} が存在する $y \leq y_s$ の領域は advective diffusion region と呼ばれている³⁾。一方、 $y \geq y_s$ の領域では、跳水の表面渦の水面の breaking により空気を取り込まれるため、 y の増加に伴い C の値は 1 に近づく。この領域は breaking region と呼ばれている⁸⁾。

Breaking region の空気混入率分布

Breaking region の空気混入率分布については (2) 式によって近似する方法が提案なされている¹⁾。

$$C = \frac{1}{2} \times \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left(\frac{y - y_{0.5}}{2 \times (x - x_1) \times \sqrt{D^*}} \right) \right\} \quad (2)$$

ここに、 $y_{0.5}$ は空気混入率 $C = 0.5$ となる鉛直高さ y , D^* は breaking region 内の無次元化された乱流拡散係数である。

$C = 0.5$ となる鉛直高さ $y_{0.5}$ の流下方向の変化を図 4a および 4b に示す。なお、図 4a および 4b 中の実線は Ohtsu et al.⁷⁾ により示された跳水水面を目視観察で定めた水深 h の実験式である。

$$\frac{h - h_1}{h_2 - h_1} = 1 - \left(1 - \frac{x - x_1}{L_j} \right)^{1.9} \quad (3)$$

図 4a および 4b に示されるように、与えられた F_{r1} と $(x - x_1)/L_j$ に対して UD よりも FD の $y_{0.5}$ の値が大きい。また、 $h \approx y_{0.5}$ であることが確かめられた。

本研究による breaking region 内の C の測定値を用いると、(2) 式中の D^* は (4) 式で近似される。

$$D^* = \frac{1}{3200} \times \left\{ \left(\frac{x - x_1}{L_j} \right)^{-1.7} - 1 \right\} \quad (4)$$

Breaking region 内の C は、(3), (4) を (2) 式に用いることで求められる。この計算値の一例を図 3 に示す。図 3 に示されるように、breaking region 内の C の計算値と実験値は、UD の場合 $R^2 = 0.8$, FD の場合 $R^2 = 0.7$ となった。

Advective diffusion region の空気混入率分布

Advective diffusion region の空気混入率分布については、気泡の拡散モデルに基づいた (5) 式によって近似される¹⁾。

$$C = C_{max} \times \exp \left\{ - \frac{1}{4D^\#} \left(\frac{y}{h_1} - \frac{Y_{C_{max}}}{h_1} \right)^2 \right\} \quad (5)$$

ここに、 $D^\#$ は無次元化された乱流拡散係数 [$D^\# = D_t / (V_1 h_1)$]; D_t は空気混入流中の気泡の拡散係数] である。

キーワード: 跳水, 空気混入率, advective diffusion region, breaking region, 乱流境界層, スルースゲート
 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.&FAX. 03-3259-0676

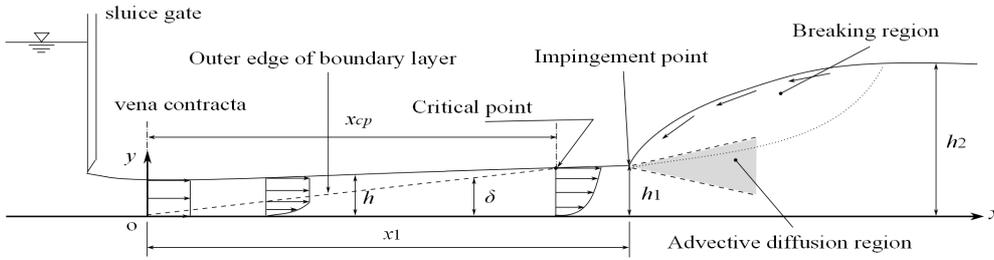


図1 定義図

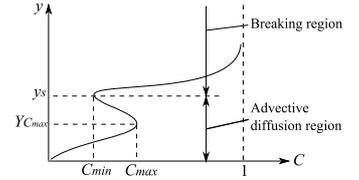


図2 空気混入率分布概念図

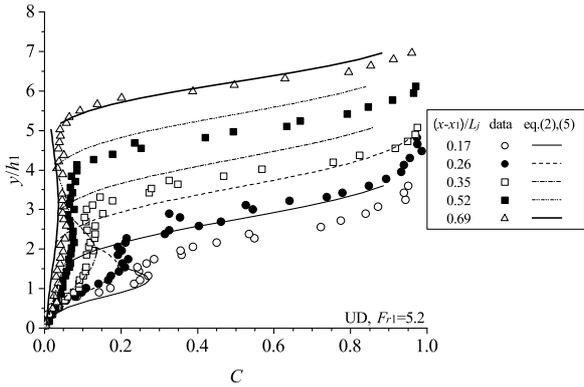


図3 空気混入率分布 ($F_{r1}=5.2, R_e = 62000, UD$)

Advective diffusion region 内の空気混入率の極大値 C_{max} およびその位置 $Y_{C_{max}}$ の流下方向の変化を図4c~図4fに示す。図4cおよび4dに示されるように、与えられた F_{r1}, R_e に対して、 $(x-x_1)/L_j$ の値が増加するにつれて C_{max} の値は減少する。また、与えられた $F_{r1}, (x-x_1)/L_j$ に対して UD よりも FD の C_{max} の値が大きい。 C_{max} の実験式は UD の場合 (6) 式, FD の場合 (7) 式のように示される。

$$C_{max} = 0.53 \times \exp \left\{ -\frac{8\sqrt{F_{r1} + 1.2}}{F_{r1}} \times \frac{x-x_1}{L_j} \right\} \quad \text{for UD} \quad (6) \quad (R^2 = 0.9)$$

$$C_{max} = (0.498 + 0.012F_{r1}) + (-1.16 + 0.036F_{r1}) \times \frac{x-x_1}{L_j} \quad \text{for FD} \quad (R^2 = 0.9) \quad (7)$$

図4eおよび4fに示されるように、与えられた F_{r1}, R_e に対して、 $(x-x_1)/L_j$ の値の増加に伴い $Y_{C_{max}}/h_1$ は増加する。また、 $(x-x_1)/L_j \geq 0.2$ の場合、与えられた $F_{r1}, (x-x_1)/L_j$ に対して UD よりも FD の $Y_{C_{max}}/h_1$ の値が大きい。 $Y_{C_{max}}/h_1$ の実験式は UD の場合 (8) 式, FD の場合 (9) 式のように示される。

$$\frac{Y_{C_{max}}}{h_1} = (-0.386 + 0.191F_{r1}) + 3.63 \times \frac{x-x_1}{L_j} \quad \text{for UD} \quad (8) \quad (R^2 = 0.9)$$

$$\frac{Y_{C_{max}}}{h_1} = 1 + (0.52 + 0.7F_{r1}) \times \frac{x-x_1}{L_j} \quad \text{for FD} \quad (R^2 = 0.8) \quad (9)$$

本研究による advective diffusion region 内の C の測定値を用いると、(5) 式中の $D^\#$ は UD の場合 (10) 式, FD の場合 (11) 式で近似される。

$$D^\# = 0.00192 + 0.0637 \times \frac{x-x_1}{L_j} \quad \text{for UD} \quad (10)$$

$$D^\# = 0.00125 + 0.126 \times \frac{x-x_1}{L_j} \quad \text{for FD} \quad (11)$$

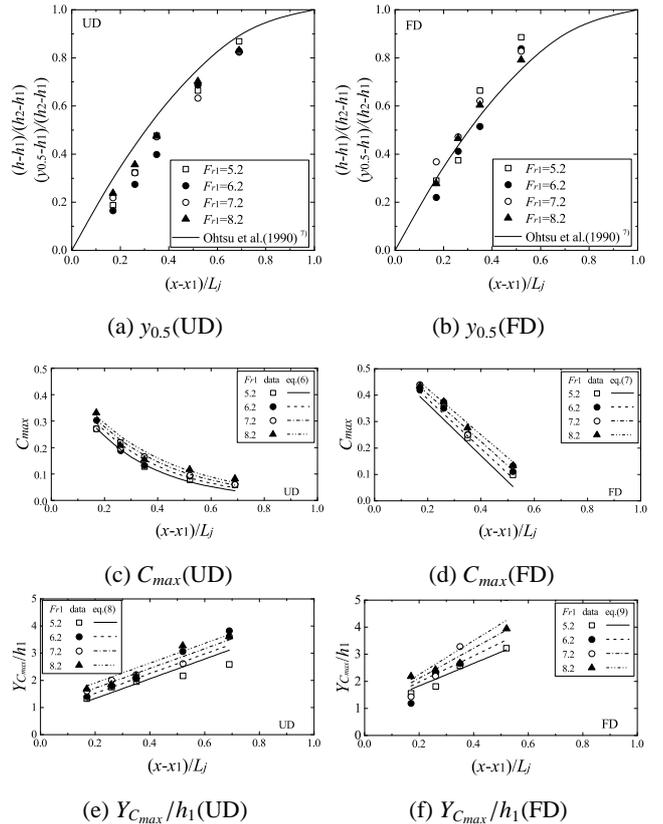


図4 $C_{max}, Y_{C_{max}}, y_{0.5}$ の流下方向変化

Advective diffusion region 内の C は、UD のとき (6), (8), (10) 式を (5) 式に用い、FD のとき (7), (9), (11) 式を (5) 式に用いることで求められる。この計算値の一例を図3の各線に示す。Advective diffusion region 内の C の計算値と実験値は、UD の場合 $R^2 = 0.8$, FD の場合 $R^2 = 0.9$ となった。

参考文献

- 1) Wang, H., Chanson, H.: Experimental study of turbulent fluctuations in hydraulic jumps. *J. Hydraul. Eng.*, 141(7), 04015010-1 - 04015010-10, 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, 1, 985 - 1, 990, 2009.
- 3) 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 BI(水工学), 71(4), 529-534, 2015.
- 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, 年次講演会概要集, 65, II 部門, 391-392, 2010.
- 5) Ohtsu, I., Yasuda, Y.: Characteristics of supercritical flow below sluice gate, *J. Hydr. Eng.*, 120(3), 332-346, 1994.
- 6) Ohtsu, I., Yasuda, Y., Gotoh, H.: Flow conditions of undular hydraulic jumps in horizontal rectangular channels, *J. Hydr. Eng.*, 129(12), 948-955, 2003.
- 7) Ohtsu, I., Yasuda, Y., Awazu, S.: Free and submerged hydraulic jumps in rectangular channels., *Report of Res. Inst. of Sci. and Tech.*, Nihon Univ., 35, 1-50, 1990.
- 8) Takahashi, M., Ohtsu, I.: Effect of inflow condition on air entrainment characteristics in hydraulic jumps., *Proc. 33rd IAHR Congress*, 4917-4924, 2009.