

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 (図1 参照) 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)。

Takahashi and Ohtsu¹⁾ 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)] の大きさに違いがあることを示した。しかしながら、跳水内部の空気混入率の分布形状については不明な点が多い。

本研究は、UD, PD および FD の定常跳水を対象に跳水始端のフルード数と乱流境界層の発達状態が跳水内部の空気混入率の分布形状におよぼす影響について明らかにしようとしたものである。

実験

実験は、スルースゲートを有する水路幅 $B=0.4\text{ m}$ 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、定常跳水が形成される²⁾ ように跳水始端断面のフルード数 $Fr_1 (= V_1 / \sqrt{gh_1})$ を 5.2~8.2, UD, PD または 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 は跳水始端断面の射流水深、 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 $x_1 \geq 1.7x_{cp}$, PD の場合は $\delta/h_1 = 0.5, 0.8$ となる x_1 とした (x_1 は跳水始端断面の座標、 x_{cp} は境界層厚 δ が水面に達して $\delta = h$ となる座標)。射流の乱流境界層厚 δ と水深 h_1 は Ohstu and Yasuda の方法³⁾ 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 点電極型ボイド率計 (採取間隔 $50\ \mu\text{s}$, 採取時間 $45\ \text{s}$) を使用した。

跳水内部の空気混入率分布

跳水始端断面のアスペクト比が $B/h_1 \geq 10, Re \geq 60000$ の場合、水路中央部 ($z = 0$) での空気混入率 C は次のように示される¹⁾。

$$C = F \left(\frac{x-x_1}{h_1} \text{ or } \frac{x-x_1}{L_j}, \frac{y}{h_1}, Fr_1, \frac{\delta}{h_1} \right) \quad (1)$$

ここに、 x は縮流部を原点とする水路流下方向の座標、 y は水路床を原点とする鉛直上向きの座標、 L_j は跳水長であり、 $L_j=5.5h_2$ ⁴⁾ 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2に示す。図2に示されるように、与えられた $Fr_1, \delta/h_1, y/h_1$ に対して跳水始端断面近くでは空気混入率 C は大きく、下流側に向かうにつれて C の値は小さくなる。

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 $y = y_{C_{min}}$ まで減少し、 $y = y_{C_{min}}$ で極小値 C_{min} をとる (図3)。図3に示されるように $y \leq y_{C_{min}}$ の領域は advective diffusion region と呼ばれている⁵⁾。一方、 $y \geq y_{C_{min}}$ 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⁶⁾。

Advective diffusion region 内の空気混入率分布

Advective diffusion region 内の空気混入率分布は、気泡の拡散モデル⁵⁾ に基づいた

$$C = C_{max} \times \exp \left\{ -\frac{1}{4D^{\#}} \frac{(y/h_1 - y_{C_{max}}/h_1)^2}{(x-x_1)/h_1} \right\} \quad (2)$$

によって、定常跳水の場合は近似されることを確認した。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。

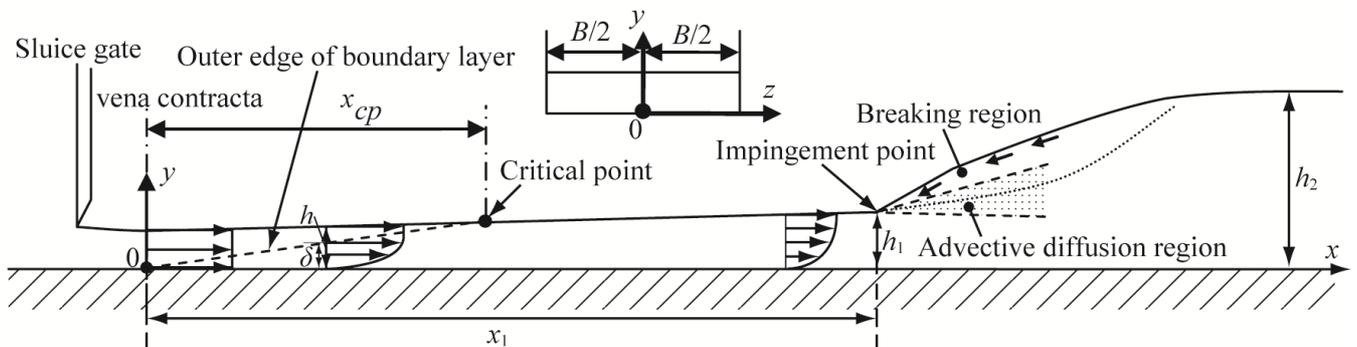


図1 定義図

キーワード：跳水, 空気混入率, advective diffusion region, 最大空気混入率

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. 03-3259-676

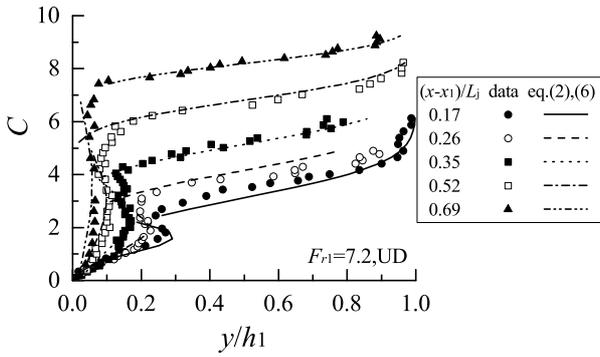


図2 空気混入率分布 ($F_{r1} = 7.2$, UD)

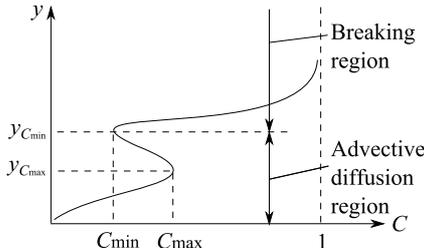


図3 空気混入率分布概略図

Advective diffusion region 内の最大空気混入率 C_{max} の流下方向の変化を図 4(a) に示す。図 4(a) に示されるように、同一の F_{r1} 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、同一の F_{r1} 、 $(x-x_1)/L_j$ に対して UD と PD_{0.5} よりも FD の C_{max} の値が大きい。PD_{0.8} は UD と FD の中間の値を示す。以上を考慮し、 C_{max} の実験式は以下のように示される。

$$C_{max} = 0.5 \exp \left\{ -a \left(\frac{x-x_1}{L_j} \right)^b \right\} \quad (3)$$

$$a = \frac{\sqrt{8F_{r1}^2 + 1} - 1}{F_{r1} - 1} \left\{ 0.34 \tanh \left(16 \frac{\delta}{h_1} - 15 \right) + 1.34 \right\} \quad (3a)$$

$$b = 0.57 \tanh \left(11 \frac{\delta}{h_1} - 10 \right) + 1.57 \quad (3b)$$

C_{max} の生じる位置 $y_{C_{max}}/h_1$ の流下方向の変化を図 4(b) に示す。図 4(b) に示されるように、同一の F_{r1} に対して、 $(x-x_1)/L_j$ の値の増加に伴い $y_{C_{max}}/h_1$ の値は増加する。また、 $(x-x_1)/L_j \geq 0.2$ の場合、同一の F_{r1} 、 $(x-x_1)/L_j$ に対して UD と PD_{0.5} よりも FD と PD_{0.8} の $y_{C_{max}}/h_1$ の値が大きい。以上を考慮し、 $y_{C_{max}}/h_1$ の実験式は以下のように示される。

$$\frac{y_{C_{max}}}{h_1} = 1 + \frac{\sqrt{8F_{r1}^2 + 1} - 1}{3.3} \left\{ 0.35 \left(\frac{\delta}{h_1} \right)^2 + 0.65 \right\} \frac{x-x_1}{L_j} \quad (4)$$

本研究による advective diffusion region 内の C の測定値を用いると、 $D^\#$ は (5) 式で近似される。

$$D^\# = \left\{ 0.2 * \tanh \left(4 \frac{\delta}{h_1} - 2 \right) + 1.2 \right\} \times \left\{ 0.001 + 0.012 (1.6 + F_{r1}) \frac{x-x_1}{L_j} \right\} \quad (5)$$

Advective diffusion region 内の C は、(3)、(4)、(5) 式を (2) 式に用いることで求められる。この計算値の一例を図 2 の各線に示す。Advective diffusion region 内の C の実験値と計算値は、 $R^2 = 0.87$ となった。

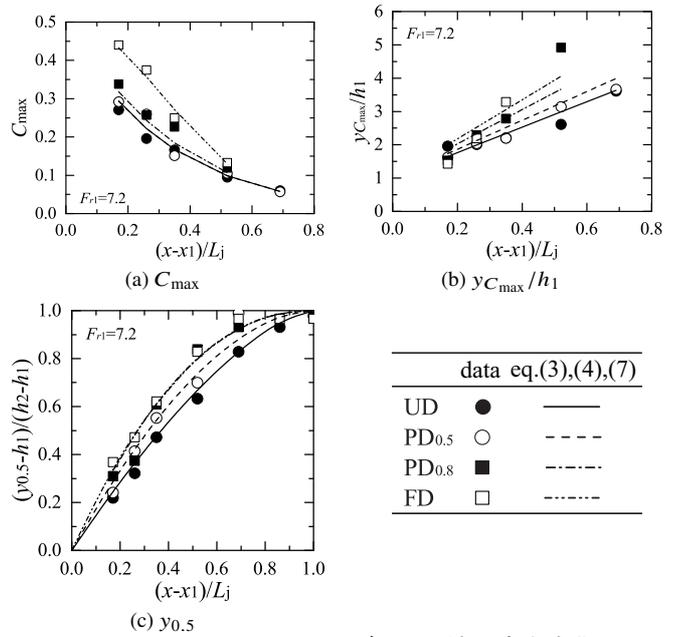


図4 C_{max} 、 $y_{C_{max}}/h_1$ 、および $y_{0.5}$ の流下方向変化

Breaking region 内の空気混入率分布

Breaking region 内の空気混入率分布は (6) 式によって近似する方法が提案なされている⁷⁾。

$$C = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left\{ \frac{(y-y_{0.5})/h_1}{2 \times \sqrt{(x-x_1)/h_1 \times D^*}} \right\} \right] \quad (6)$$

ここに、 $y_{0.5}$ は空気混入率 $C = 0.5$ となる y 、 D^* は breaking region 内の無次元化された乱流拡散係数 [$D^* = D_r' / (V_1 h_1)$]; D_r' は breaking region における乱流拡散係数] である。

$y_{0.5}$ の流下方向の変化を図 4(c) に示す。図 4(c) に示されるように、同一の $(x-x_1)/L_j$ と F_{r1} に対して $(x-x_1)/L_j \geq 0.2$ では、UD と PD_{0.5} の場合に比べ、FD と PD_{0.8} の $y_{0.5}$ の値が大きい。 $y_{0.5}$ の実験式は以下のように示される。

$$\frac{y_{0.5} - h_1}{h_2 - h_1} = 1 - \left(1 - \frac{x-x_1}{L_j} \right)^{0.35 \tanh \left(6 \frac{\delta}{h_1} - 3.1 \right) + 1.85} \quad (7)$$

本研究による breaking region 内の C の測定値を用いると、 D^* は (8) 式で近似される。

$$D^* = \frac{1}{100} \left\{ \left(\frac{x-x_1}{L_j} \right)^{-1.1} - 1 \right\} \quad (8)$$

Breaking region 内の C は、(7)、(8) 式を (6) 式に用いることで求められる。この計算値の一例を図 2 に示す。Breaking region 内の C の実験値と計算値は、 $R^2 = 0.78$ となった。

参考文献

- 1) Takahashi, M. and Ohtsu, I.: Effect of inflows on air entrainment in hydraulic jumps below a gate, *J. Hydraul. Res.*, 55(2), 259-268, 2017.
- 2) 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.
- 3) Ohtsu, I. and Yasuda, Y.: Characteristics of supercritical flow below sluice gate, *J. Hydr. Eng.*, 120(3), 332-346, 1994.
- 4) Ohtsu, I., Yasuda, Y. and Awazu, S.: Free and submerged hydraulic jumps in rectangular channels, *Report of Res. Inst. of Sci. and Tech.*, Nihon Univ., 35, 1-50, 1990.
- 5) Chanson, H.: *Air bubble entrainment in free surface turbulent shear flow*, Academic Press, London, U.K., 1997.
- 6) Takahashi, M. and Ohtsu, I.: Effect of inflow condition on air entrainment characteristics in hydraulic jumps, *Proc. 33rd IAHR Congress*, 4917-4924, 2009.
- 7) Murzyn, F., Mouaze, D. and Chaplin, J.R.: Optical fibre probe measurements of bubbly flow in hydraulic jumps, *Int. J. Multiphase Flow*, 31(1), 141-154, 2005.