

跳水内部の空気混入特性に対するレイノルズ数の影響 Effect of Reynolds number on air concentration in hydraulic jumps

○内田健太¹, 高橋正行²* Kenta Uchida¹, Masayuki Takahashi²

Abstract: The air entrainment region in jumps is classified into the advective diffusion and the breaking regions. For $Re \gtrsim 4 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4$, the effect of Reynolds number on the air concentration in advective diffusion region is negligible small. For $Re < 4 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4$, The air concentration in the advective diffusion region increase with increasing Reynolds number under a given inflow Froude number. Whereas, the air concentration in the breaking region is independent of Reynolds number.

まえがき

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 (Fig.1) を対象に、跳水始端断面のフルード数 $F_{r1} (= V_1/\sqrt{gh_1})$, 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) と乱流境界層の発達状態 δ/h_1 によって跳水内部の空気混入率 C [=空気の体積/(水の体積+空気の体積)] の分布に違いが生じることが明らかにされ、そのメカニズムが最近解明された^[1]。この実験は、空気混入率 C へのレイノルズ数 $Re (= V_1 h_1/\nu)$, ν は水の動粘性係数) とアスペクト比 B/h_1 の影響が無視できると考えられる条件の下で行われたが、空気混入率 C に対するレイノルズ数 Re の影響が無視できるための条件については明確になされていない。

本研究では、乱流境界層が十分に発達した断面を跳水始端とする場合 (fully developed inflow) を対象に、レイノルズ数が跳水内部の空気混入特性に及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 $B = 0.40$ m の滑面長方形断面水平水路 (Fig.1) を用いて、跳水始端断面のフルード数 $F_{r1} = 6.2$ と一定にし、レイノルズ数 $Re = 1.2 \times 10^4 \sim 11.0 \times 10^4$ の fully developed inflow となるように流量 Q , スルースゲートの開口高 a , 水路下流端

の堰高を調整して実験を行った。なお、 $x_1 = 2x_{cp}$ 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 (Fig.1), x_1 は跳水始端断面の x , x_{cp} は境界層 δ が水面に到達して $\delta = h$ となる x である。射流の乱流境界層厚 δ , 水深 h_1 , x_1 は Ohtsu and Yasuda の方法^[2] 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 (probe 直径 $25 \mu\text{m}$, 採取間隔 $50 \mu\text{s}$, 採取時間 45 s) を使用した。

跳水内部の空気混入率に対するレイノルズ数の影響

Fully developed inflow で $B/h_1 \geq 10$ の場合、長方形断面水平水路における水路中央面 ($z = 0$) での跳水内部の空気混入率 C は、次の関係^[1]

$$C = f\left(\frac{x-x_1}{h_1}, \frac{y}{h_1}, F_{r1}, Re\right) \quad (1)$$

で示されるものと考えられる。

高速度ビデオカメラを用いた跳水の流況の観察によると、impingement point (Fig.1) 付近で取り込まれた気泡は跳水中で移流・拡散する^[1]。空気混入率 C の値は Fig.2 に示されるように水路底面から 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、極小値 C_{min} をとる。Fig.2 に示されるように C_{max} , C_{min} が存在する $y \leq y_{C_{min}}$ の領域は advective diffusion region と呼ばれている^[3]。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

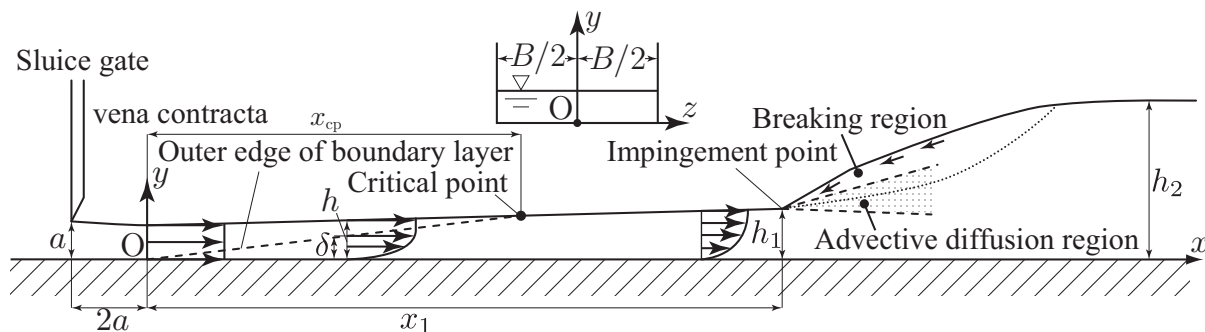


Figure 1 Definition sketch

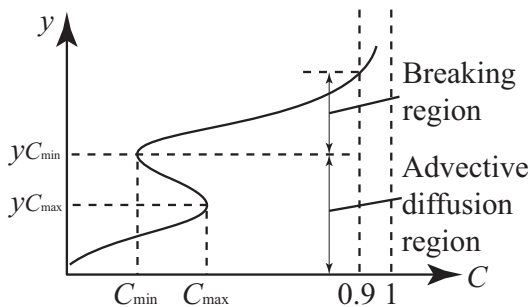


Figure 2 Definition sketch for advective diffusion and breaking regions

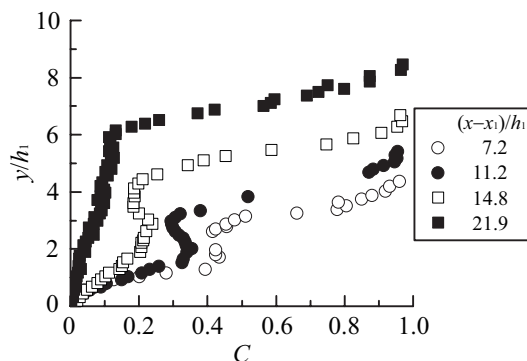


Figure 3 C-distribution for $F_{r1} = 6.1, R_e = 6.2 \times 10^4$

region と呼ばれている [4].

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 Fig.3 に示す. Fig.3 に示されるように, 跳水始端断面近くの C_{max} は大きく, $(x-x_1)/h_1$ の増加にともない C_{max} の値は小さくなり, $(x-x_1)/h_1$ がさらに大きくなると advective diffusion region は存在しなくなる [1].

与えられた $F_{r1} = 6.2$ と $(x-x_1)/h_1$ に対して, R_e を変化させたときの跳水内部の空気混入率 C の分布の一例を Fig.4 に示す. Fig.4 に示されるように, $R_e = 4.2 \times 10^4$, $R_e = 6.2 \times 10^4$, および $R_e = 11 \times 10^4$ の場合, R_e の値に関わらず advective diffusion region 内の空気混入率 C の値は変化していない. 一方, $R_e = 2.2 \times 10^4$ と $R_e = 1.2 \times 10^4$ の場合のように, R_e の値が小さくなると advective diffusion region 内の空気混入率 C の値は小さくなる. これは, R_e の減少にともない粘性の影響が大きくなり, impingement point 付近から跳水内部へ空気を取り込まれ難くなったためと考えられる.

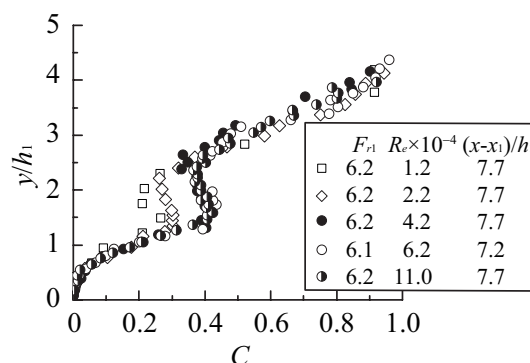


Figure 4 Effect of Reynolds number on the air concentration

Advective diffusion region 内の空気混入率の極大値 C_{max} およびその高さ $y_{C_{max}}/h_1$ の R_e による変化を Fig.5 に示す. Fig.5a に示されるように, $R_e \geq 4 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4$ の場合, 与えられた F_{r1} と $(x-x_1)/h_1$ に対して R_e の変化に関わらず C_{max} の値は一定の値を示す. 一方, $R_e < 4 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4$ では, R_e の値が 2.2×10^4 , 1.2×10^4 と減少するにともない C_{max} の値は小さくなっている. これは, $R_e < 4 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4$ の範囲では, R_e の値が減少するにつれて表面渦が小さくなることに対応している. なお, $y_{C_{max}}/h_1/h_1$ の変化については, Fig.5b のように, 与えられた F_{r1} と $(x-x_1)/h_1$ に対して, R_e の値が変化しても $y_{C_{max}}/h_1$ の値はほぼ一定値を示している.

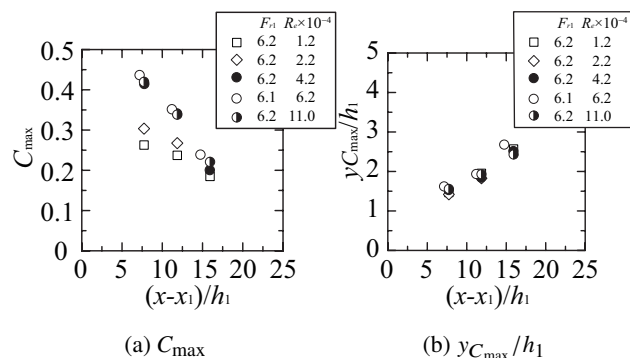


Figure 5 Effect of Reynolds number on C_{max} and $y_{C_{max}}/h_1$

Breaking region 内の空気混入率 C については, Fig.4 に示されるように, 与えられた F_{r1} , $(x-x_1)/h_1$, および y/h_1 に対して C の値は R_e の変化に関わらずほぼ一定の値を示している. これは, breaking region 内での空気泡は砕波によって取り込まれたものであること [1] から, 粘性の影響に比べて重力の影響が大きかったためと考えられる.

まとめ

流入射流のアスペクト比 $B/h_1 \geq 10$ で跳水への流入射流の乱流境界層が十分に発達している場合 (fully developed

inflow) を対象に, 跳水内部の空気混入率に対するレイノルズ数 R_e の影響を検討した結果, advective diffusion region 内の C の大きさは, レイノルズ数 $R_e \geq 4 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4$ のとき, R_e の影響を受けない. 一方, $R_e < 4 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4$ のとき, R_e の値が小さくなるほど C の値が小さくなる. また, breaking region 内の C の大きさは, 重力の影響が支配的であり, レイノルズ数 R_e の変化に関わらず一定である.

参考文献

[1] 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.
 [2] Ohtsu, I. and Yasuda, Y.: Characteristics of supercritical flow below sluice gate, *J. Hydr. Eng.*, 120(3), 332–346, 1994.
 [3] Chanson, H.: *Air bubble entrainment in free surface turbulent shear flow*, Academic Press, London, U.K., 1997.
 [4] Takahashi, M. and Ohtsu, I.: Effect of inflow condition on air entrainment characteristics in hydraulic jumps, *Proc. 33rd IAHR Congress*, 4917–4924, Vancouver, BC, Canada, 2009.