

水平水路のゲート直下に形成される跳水の空気混入特性

Air Entrainment Characteristics of Hydraulic Jumps below Gates in Horizontal Channels

○佐藤柳言¹, 佐久間光希², 高橋正行¹

*Ryugen Satoh¹, Kouki Sakuma², Masayuki Takahashi¹

Abstract: For hydraulic jumps with undeveloped inflow conditions, the air entrainment characteristics in the jumps are shown under a wide range of Reynolds and inflow Froude numbers. The air entrainment mechanism in the breaking region is explained. It is confirmed that the amount of air bubbles into the advective diffusion region increases with the amount of air bubbles entrained by the breaking of water surface.

1. まえがき

一般に、自由跳水は表面渦を伴う空気混入流になる。跳水内部の空気混入領域は、跳水中に取り込まれた空気泡が移流・拡散する領域 (advective diffusion region) と水表面での breaking による空気混入領域 (breaking region) とに大別されている^[1]。流入射流の乱流境界層が十分発達している場合 (fully developed inflow condition) の跳水については、流入射流の水面の凹凸間の空気が impingement point (Fig. 1) 付近から跳水中に取り込まれ、流入射流の乱流境界層が未発達の場合 (undeveloped inflow condition, UD と略す) の跳水よりも跳水内部の advective diffusion region の空気混入率 [= 空気の体積 / (水の体積 + 空気の体積)] は大きくなることが示されている^[2]。しかしながら、水表面での breaking による空気混入機構には不明な点が多い。

本研究では、長方形断面水平水路の UD の跳水を対象に、跳水内部の空気混入特性を系統的に示した。

2. 実験

実験は、スルースゲートを有する水路幅 B の長方形断面水平水路を用いて、Table 1 に示される跳水始端のフルード数 $F_1 [= U_1 / (gh_1)^{0.5}]$ とレイノルズ数 $R [= q / \nu_w]$ とアスペクト比 B/h_1 の範囲で行われた。ここに、 x は跳水始端断面を原点とする流下方向座標、 y は水路床を原点とする鉛直方向座標、 z は水路横断方向座標、 U_1 は跳水始端の断面平均流速、 g は重力加速度、 h_1 は跳水始端水深、 $q [= Q/B]$ は単位幅流量、 Q は流量、 $\nu_w [= \mu_w / \rho_w]$ は水の動粘性係数、 μ_w は水の粘性係数、 ρ_w は水の密度である。与えられた F_1 と R が得られ、ゲート直下の縮流部 (vena contracta, Fig. 1) を始端とする UD の跳水が形成されるように、流量 Q 、ゲートの開口高 a 、水路下流端の堰高を調整した。

水路中央面 ($z = 0$) での空気混入率 C を測定するため、二点電極型ポイド率計 (採取時間 45 s, 採取間隔 50 μ s, probe 直径 25 μ m) を用いた。

3. 跳水内部の空気混入特性

長方形断面水平水路の UD の跳水について、 $B/h_1 > 10$ の場合、水路中央面での空気混入率 C は、

$$C = f(F_1, R, x/h_1, y/h_1) \quad (1)$$

の関係で示される^[3]。 C の測定値の一例を Fig. 2 に示す。与えられた F_1 と R に対して、跳水始端近くの x/h_1 では、 y/h_1 の増加とともに C は増加し、 C の極大値 C_{max} [Fig. 3(a)] が得られる。 $y/h_1 \geq y_{C_{max}}/h_1$ ($y_{C_{max}}$ は C_{max}

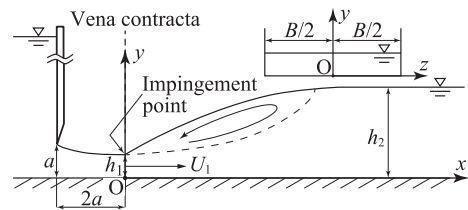


Figure 1. Definition sketch of the UD jump below a gate

Table 1. Experimental conditions

	F_1 (-)	$R \times 10^{-4}$ (-)	B/h_1 (-)	B (m)
UD jump	2.4-7.2	1.2-10	11-91	0.600

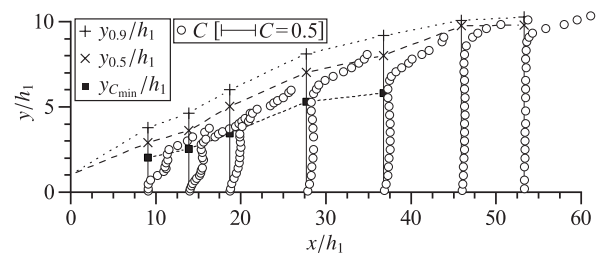


Figure 2. Air concentration distributions of the UD jump for $F_1 = 7.2$ and $R = 6.2 \times 10^4$

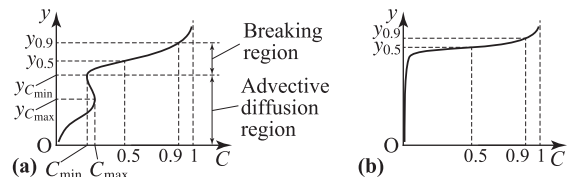


Figure 3. Definition sketches for the air concentration distribution in the jumps

の生じる y) では、 y/h_1 の増加とともに C は減少して極小値 C_{min} をとる。Fig. 2 と Fig. 3(a) に示されるように、 $y/h_1 \leq y_{C_{min}}/h_1$ ($y_{C_{min}}$ は C_{min} の生じる y) の領域は advective diffusion region と呼ばれている^[1]。 $y/h_1 > y_{C_{min}}/h_1$ では、 y/h_1 の値の増加とともに C の値は 1 に近づく。この領域は breaking region [Fig. 3(a)] と呼ばれている^[4]。なお、Fig. 2 の $x/h_1 \geq 46$ に示されるように、advective diffusion region が形成されなくなると、 C_{max} と C_{min} が得られない C 分布 [Fig. 3(b)] となる。

Advective diffusion region の形成領域の流下方向長さを L_{ad} とする。 L_{ad}/h_1 と R との関係を図 4 に示す。Fig. 4 に示されるように、与えられた F_1 に対して、 $R \geq 4.2 \times 10^4$ の場合、 R の値によらず L_{ad}/h_1 は一定値を示す。一方、 $R < 4.2 \times 10^4$ の場合、 R の減少に伴い L_{ad}/h_1 の値は小さくなる。なお、与えられた R に対して、 F_1 の減少に伴い L_{ad}/h_1 の値は小さくなっている。こ

1: 日大理工・教員・土木 2: 八千代エンジニアリング株式会社

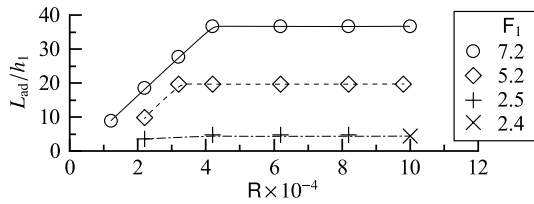


Figure 4. Relationship between R and L_{ad}/h_1

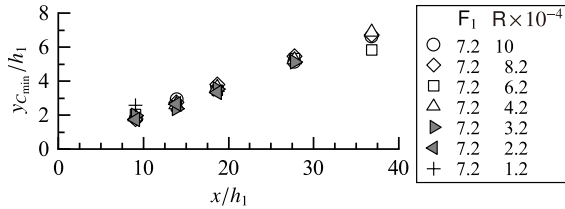


Figure 5. Effects of R on $y_{C_{min}}/h_1$ for $F_1 = 7.2$

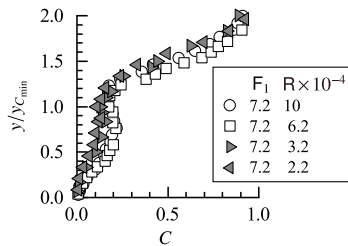


Figure 6. Effects of R on the air concentration distributions for $F_1 = 7.2$ and $x/h_1 = 14$

れは、 F_1 が小さくなると、跳水中に気泡混入しづらくなる流況に変化することと関連している。

$y_{C_{min}}/h_1$ に対する R の影響を Fig. 5 に示す。Fig. 5 より、与えられた F_1 と x/h_1 に対して、 $y_{C_{min}}/h_1$ への R の影響は小さいことから、相対的な advective diffusion region の y 方向の形成範囲は R の変化の影響を受けていない。

与えられた F_1 と x/h_1 に対して、 $C = f(y/y_{C_{min}}, R)$ の関係で整理した一例を Fig. 6 に示す。Fig. 6 に示されるように、breaking region ($y/y_{C_{min}} > 1$) では、同一の $y/y_{C_{min}}$ に対して、 $R \geq 4.2 \times 10^4$ の場合よりも $R < 4.2 \times 10^4$ の場合のほうが C の値は小さくなっている。Advective diffusion region ($y/y_{C_{min}} \leq 1$) では、 $R \geq 4.2 \times 10^4$ の場合、 R の値によらず C の値と分布形はほぼ一致している。一方、 $R < 4.2 \times 10^4$ の場合、 R の減少とともに、advective diffusion region における同一の $y/y_{C_{min}}$ での C の値は小さくなっている。これは、 R が減少すると breaking region に空気を取り込まれづらくなり、breaking region から impingement point 付近へ運ばれる空気量が減少したためと考えられる。以上より、UD の跳水の空気混入特性に対する R の影響を無視するためには、 $R \geq 4.2 \times 10^4$ の条件を選定する必要がある。

跳水上・下流側の水深間の関係式 (Bélanger の式) :

$$h_2/h_1 = \{(8F_1^2 + 1)^{0.5} - 1\} / 2 \quad (2)$$

より、 $h_2/h_1 = f(F_1)$ の関係であるから、 $R \geq 4.2 \times 10^4$ の条件を選定すると、式 (1) は、

$$C = f(F_1, x/h_2, y/h_1) \quad (3)$$

となる。ここに、 h_2 は跳水終端水深である。 $C = 0.9$ となる高さ $y_{0.9}$ を水表面の代表水深とし、式 (3) に基づいて $y_{0.9}/h_1 = f(F_1, x/h_2)$ の関係で整理した結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7 に示されるように、与えられた R と x/h_2 に対して、 F_1 の増加とともに $y_{0.9}/h_1$ の x/h_2 に対する変化

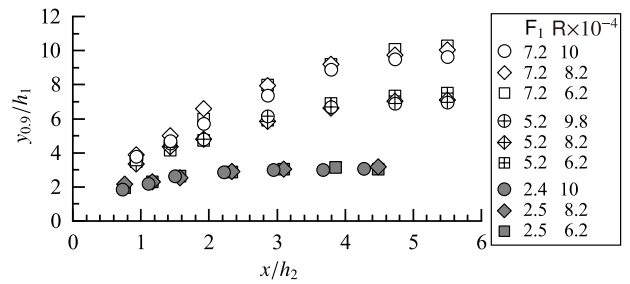


Figure 7. Effects of F_1 on $y_{0.9}/h_1$

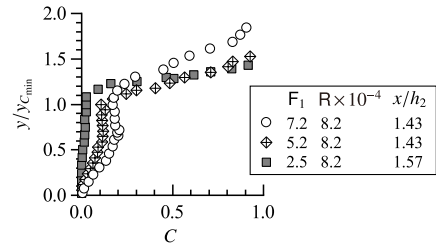


Figure 8. Effects of F_1 on the air concentration distributions for $R = 8.2 \times 10^4$

が大きくなっている。すなわち、与えられた h_1 に対して、 F_1 の増加とともに式 (2) で求められる h_2 が大きくなり、水表面の勾配は大きくなる。このことは、 F_1 の増加に伴い水表面での breaking による空気混入量が多くなることに影響しているものと考えられる。

与えられた R と x/h_2 に対して、 $C = f(y/y_{C_{min}}, F_1)$ の関係で整理した一例を Fig. 8 に示す。Fig. 8 に示されるように、 F_1 の増加に伴い相対的な breaking region の厚さ $(y_{0.9} - y_{C_{min}})/y_{C_{min}}$ は大きくなっている。これは、 F_1 の増加とともに、水表面での breaking によって取り込まれる空気量が多くなることに対応している。Advective diffusion region ($y/y_{C_{min}} \leq 1$) では、 F_1 の増加とともに同一の $y/y_{C_{min}}$ での C の値は大きくなっている。これは、与えられた h_1 に対して、 F_1 が大きくなると、breaking の生じる層厚が大きくなるとともに、breaking region に取り込まれる空気量が多くなり、表面渦の逆流によって impingement point 付近に運ばれる空気量が多くなったためと考えられる。

4. まとめ

水平水路のゲート直下に形成される UD の跳水の空気混入特性を検討した。跳水内部の空気混入特性に対する R の影響を無視するためには、 $R \geq 4.2 \times 10^4$ の条件を選定する必要があることが示された。 $R \geq 4.2 \times 10^4$ の場合、 F_1 の増加とともに breaking によって取り込まれる空気量は多くなり、これに伴い advective diffusion region の C の値は大きくなることが示された。

参考文献

- [1] Chanson, H.: *Air bubble entrainment in free-surface turbulent shear flows*, Academic Press, London, U.K., 1996.
- [2] Takahashi, M. and Ohtsu, I.: Effects of inflows on air entrainment in hydraulic jumps below a gate, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 55, No. 2, pp. 259–268, 2017.
- [3] 佐藤柳言, 高橋正行: ゲート直下に形成される跳水の空気混入特性に対するレイノルズ数の影響, *土木学会論文集*, Vol. 80, No. 16, 23-16046, 2024.
- [4] Takahashi, M. and Ohtsu, I.: Effect of inflow condition on air entrainment characteristics in hydraulic jump, *Proceedings of the 33rd IAHR Congress*, pp. 4917–4924, Vancouver, BC, Canada, 2009.