

スルース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
Effects of Reynolds Number on Air Entrainment in Hydraulic Jumps with Undeveloped Inflow Conditions below a Sluice Gate

○ 佐久間光希¹, 佐藤柳言², 高橋正行²

*Koki Sakuma¹, Ryugen Satoh², Masayuki Takahashi²

Abstract: Air entrainment regions in jumps are divided into the advective diffusion and breaking regions. For the advective diffusion region, the effect of Reynolds number on the air concentration distribution may be negligibly small if the Reynolds number is larger than 4.2×10^4 . The value of the air concentration decreases as the Reynolds number decreases if the Reynolds number is smaller than 3.2×10^4 .

1. まえがき

スルースゲート下流側に形成される射流では縮流部 (vena contracta) が形成され、縮流部では水路床極近傍を除いて流速が一様分布となる^[1]。Fig.1 に示されるように、跳水始端が縮流部に位置する場合は、undeveloped inflow condition (UD と略す) の跳水と呼ばれている^[2]。縮流部の下流側では流下とともに乱流境界層が発達して、やがて水面に到達する^[1]。乱流境界層が水面に到達した断面より下流側に跳水始端が位置する場合は、fully developed inflow condition (FD と略す) の跳水と呼ばれている^[2]。

与えられた跳水始端のフルード数とレイノルズ数に対して、UD の跳水と FD の跳水とでは、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)] の大きさと分布の違いを生じることが明らかにされた^[2]。また、与えられたレイノルズ数に対して、UD と FD における跳水内部の空気混入特性に対する流入射流のフルード数の影響についても示された^[2]。高橋ら^[3]は、FD の跳水における C の値に対するレイノルズ数の影響を無視できるレイノルズ数の条件を示した。しかしながら、UD の跳水における空気混入特性に対するレイノルズ数の影響は明らかにされていない。

本研究は、長方形断面水平水路のスルース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を明らかにしようとしたものである。

2. 実験

実験は、スルースゲートを有する水路幅 $B = 0.600$ m の長方形断面水平水路 (Fig.1 参照) を用いて、Table 1 に示す跳水始端のフルード数 F_{r1} [= $V_1 / \sqrt{gh_1}$] とレイノルズ数 Re [= q / ν] になる UD の跳水を対象に、流量 Q 、スルースゲートの開口高 a を調整して行われた。ここに、 V_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 は単位幅流量、 ν [= μ_w / ρ_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、 x は縮流部を原点とする流下方向の座標、 y は水路床を原点とする鉛直上向きの座標、 z は水路横断方向の座標である。跳水始端が時間平均的に縮流部の断面に位置するように水路下流端の堰高を調整した。縮流部はスルースゲートから流下方向に $2a$ の位置^[4]とした。

跳水内部の空気混入率 C は、二点電極型ボイド率計 (採取間隔 $50 \mu s$ 、採取時間 $45 s$) によって、水路中央面 ($z = 0$) において測定された。また、跳水への空気混入状況を観察するため、デジタルカメラを用いて跳水の流況を記録した。

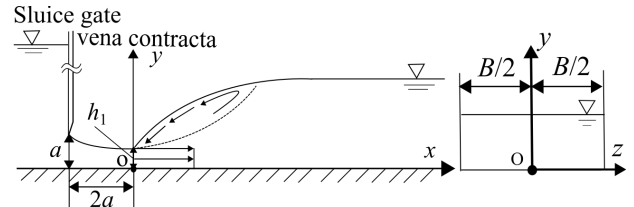


Figure 1 Definition sketch for a jump below a gate

Table 1 Experimental conditions

F_{r1} (-)	$Re \times 10^{-4}$ (-)	B/h_1 (-)	a (m)	q (m ² /s)
7.2	1.2	91	0.010	0.012
7.2	2.2	61	0.015	0.022
7.2	3.2	47	0.020	0.032
7.2	4.2	39	0.024	0.042
7.2	6.2	30	0.031	0.063
7.2	8.2	25	0.037	0.083
7.2	10	22	0.042	0.10

3. 跳水内部の空気混入特性

跳水の流況は、 $B/h_1 \geq 10$ かつ FD の跳水に対して、

$$\text{跳水の流況} = f(F_{r1}, Re) \quad (1)$$

の関係で整理すると、nonbreaking undular jump, breaking undular jump, weak jump, oscillating jump, steady jump に分類される^[3]。

Table 1 に示される条件の跳水をデジタルカメラで水路上部から撮影した静止画の一例を Fig.2 に示す。Fig.2 に示されるように、 Re の大きさによらず、左右対称で安定的な表面渦が形成され、steady jump の流況が観察された。 $Re \geq 3.2 \times 10^4$ の場合 [Fig.2(a), Fig.2(b), Fig.2(c) 参照]、跳水内部の空気混入量の多くなっていることが観察された。一方、 $Re \leq 2.2 \times 10^4$ の場合 [Fig.2(d), Fig.2(e) 参照]、跳水中の空気混入量が減少している。

跳水内部の空気混入率 C の分布の概略図を Fig.3 に示す。Fig.3 に示されるように、 C の値は y の増加に伴い大きくなり、空気混入率の極大値 C_{max} をとる。さらに y が増加すると、 C の値は減少し、極小値 C_{min} をとる。Fig.3 のように、 C_{max} と C_{min} が存在する $y \leq y_{C_{min}}$ ($y_{C_{min}}$ は C_{min} の生じる y) の領域は、advective diffusion region と呼ばれている^[5]。

長方形断面水平水路の跳水における跳水内部の空気混入率 C は、代表長さに跳水始端水深 h_1 、代表流速に跳水始端の断面平均流速 V_1 を選ぶと、

$$C = f\left(\frac{x}{h_1}, \frac{y}{h_1}, \frac{z}{B/2}, F_{r1}, Re, \frac{\delta}{h_1}, \frac{B}{h_1}, We\right) \quad (2)$$

1: 日大理工・院 (前)・土木 2: 日大理工・教員・土木

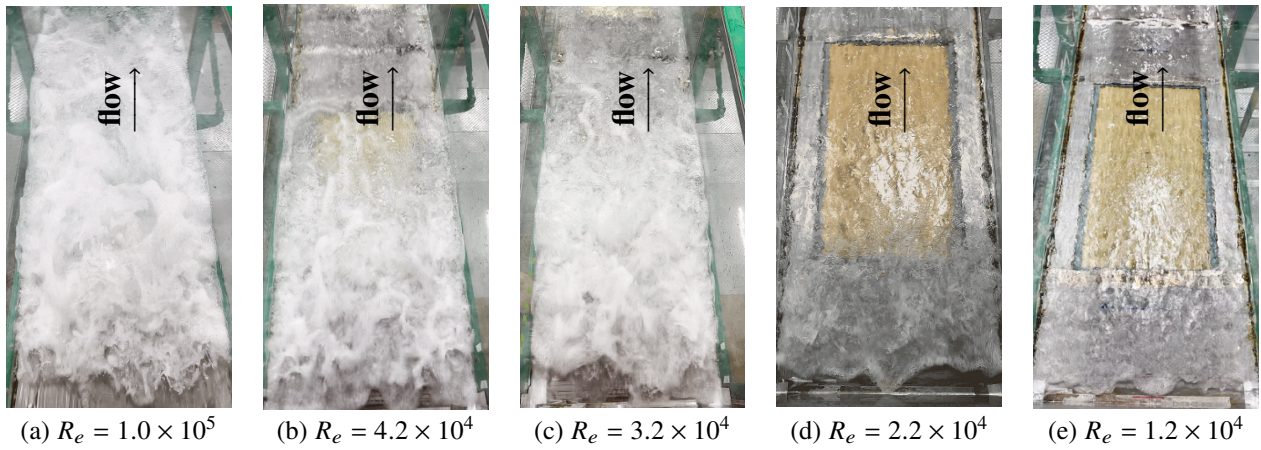


Figure 2 Effect of Reynolds number on flow condition for $F_{r1} = 7.2$

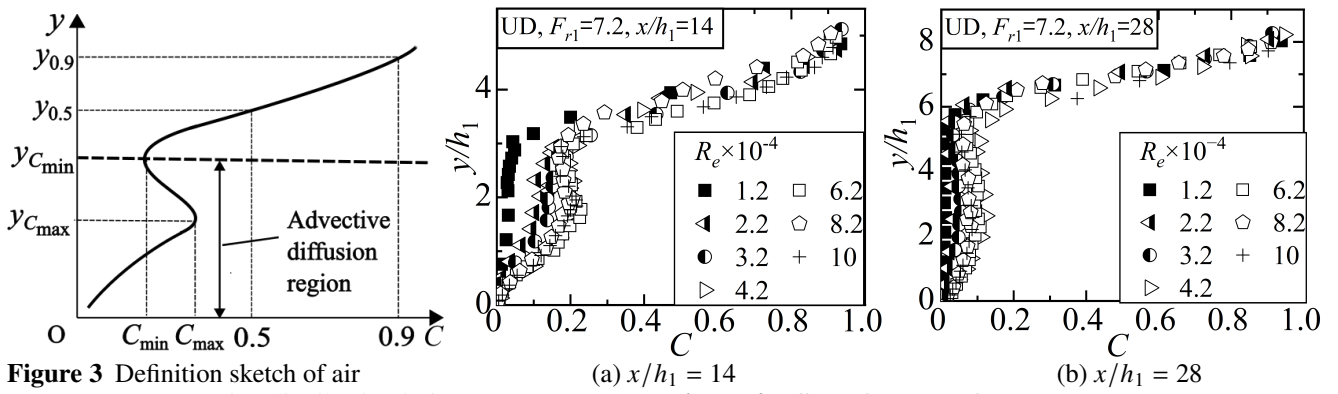


Figure 3 Definition sketch of air concentration distribution in jump

Figure 4 Effect of R_e on C for $F_{r1} = 7.2$

の関係で示されるものと考えられる。ここに、 $We = [\rho_w V_1^2 h_1 / \sigma_{wa}]$ はウェバー数、 σ_{wa} は水の表面張力である。 We は liquid parameter $[= g \mu_w^4 / (\rho_w \sigma_{wa}^3)]^{1/3}$ [6] を用いると、

$$We = \left(\frac{g \mu_w^4}{\rho_w \sigma_{wa}^3} F_{r1}^2 Re^4 \right)^{1/3} \quad (3)$$

のように示される。Liquid parameter は水と空気の物性と重力加速度から決まり、一般的な開水路流れの水温においてはほぼ一定値を示す [6] ため、 We は F_{r1} と Re で示される。また、 $B/h_1 \geq 10$ のとき、波状跳水の流況に対する B/h_1 の影響は認められない [7] ことから、 B/h_1 が自由跳水の流況におよぼす影響は小さいものと考えられる。さらに、UD ($\delta/h_1 \approx 0$) の跳水の水路中央面 [$z/(B/2) = 0$] を対象とすると、式 (2) は、

$$C = f\left(\frac{x}{h_1}, \frac{y}{h_1}, F_{r1}, Re\right) \quad (4)$$

の関係となる。

式 (4) の関係に基づき整理した C の分布の一例を Fig.4 に示す。Fig.4 に示されるように、与えられた x/h_1 に対して、 $Re \geq 4.2 \times 10^4$ の場合、 Re の値によらず advective diffusion region 内の C の分布の形状と値の大きさは同程度である。一方、 $Re \leq 3.2 \times 10^4$ の場合、 Re の値が小さくなると advective diffusion region 内の C の値は小さくなる。これらは、 Re の減少に伴い粘性の影響が大きくなり、跳水内部に空気を取り込まれにくくなったためと考えられる。

4. まとめ

跳水始端が縮流部に位置する場合の跳水を対象に、与えられた跳水始端のフルード数 $F_{r1} = 7.2$ に対して、跳水内部の空気混入特性に対するレイノルズ数 Re の影響を検討した。本研究で得られた結果を以下に示す。

- 跳水の流況について、 $1.2 \times 10^4 \leq Re \leq 1.0 \times 10^5$ の場合、steady jump が観察された。
- $Re \geq 4.2 \times 10^4$ の場合、advective diffusion region 内の C の値に対する Re の影響は認められない。 $Re \leq 3.2 \times 10^4$ の場合、 Re が小さくなると advective diffusion region 内の C の値は小さくなる。

謝辞：著者の一人（高橋正行）は本研究の一部に科研費 (19K04624) の助成を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] Ohtsu, I. and Yasuda, Y.: Characteristics of supercritical flow below sluice gate, *J. Hydraul. Eng.*, 120(3), 332–346, 1994.
- [2] 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.
- [3] 高橋正行, 内田健太, 大津岩夫: 跳水の流況と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 B1 (水工学), 74(4), I.625–I.630, 2018.
- [4] Rajaratnam, N.: Free flow immediately below sluice gates, *J. Hydraul. Div.*, 103(4), 345–351, 1977.
- [5] Chanson, H.: *Air bubble entrainment in free surface turbulent shear flows*, Academic Press, London, 1996.
- [6] Wood, I. R.: *Air entrainment in free-surface flows*, Balkema, Rotterdam, 1991.
- [7] Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Gotoh, H.: Flow conditions of unidirectional hydraulic jumps in horizontal rectangular channels, *J. Hydraul. Eng.*, 129(12), 948–955, 2003.