

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

日本大学大学院理工学研究科
日本大学大学院理工学研究科
日本大学理工学部
日本大学理工学部

学生会員
非会員
正会員
正会員

○佐久間光希
酒井悠輔
佐藤柳言
高橋正行

1. まえがき

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、fully developed inflow (以下FDと略す)、partially developed inflow (PDと略す)、un-developed inflow (UDと略す)に分けられる^{1),2)}。ここに、FDは乱流境界層が水面に到達した状態、PDは乱流境界層が発達中の状態、UDは乱流境界層が未発達の状態である。

ゲート下流側の自由跳水を対象に、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)] は、跳水始端のフルード数と流入射流の乱流境界層の発達状態によって違いを生じることが明らかにされた²⁾。また、高橋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条件を示した。さらに、Chachereau and Chanson⁴⁾はPDの跳水における C に対するレイノルズ数の影響を示している。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不明である。

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 (図1参照) を用いて、表1に示す跳水始端のフルード数 Fr_1 [= $V_1/\sqrt{gh_1}$] 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。跳水の表面渦の先端が時間平均的に縮流部 (vena contracta, 図1) 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⁵⁾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 $50 \mu\text{s}$ 、採取時間 40 s) によって、水路中央面 ($z = 0$) において測定された。また、跳水の流況はデジタルカメラを用いて記録された。

3. 跳水内部の空気混入特性

跳水内部の空気混入率 C の分布の概略図を図2に示す。図2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。図2のように、 $C_{\max}$ と $C_{\min}$ が存在する $y \leq y_{C_{\min}}$ の領域は、advective diffusion region と呼ばれている⁶⁾。ここに、 $y_{C_{\min}}$ は $C_{\min}$ の生じる y である。一方、 $y > y_{C_{\min}}$ では、跳水の表面渦のbreakingにより空気を取り込まれるため、 y の増加に伴い C の値は増加して1に近づく。この領域は、breaking region と呼ばれている¹⁾。

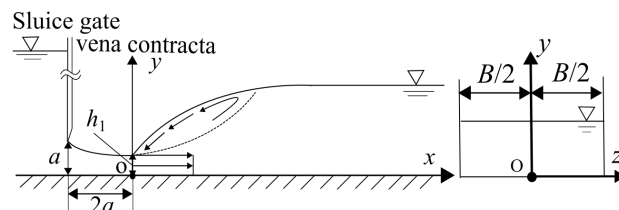


図1 定義図

表1 実験条件

Fr_1 (-)	$Re \times 10^{-4}$ (-)	B/h_1 (-)	a (m)	q (m ² /s)
7.2	1.2	91	0.007	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

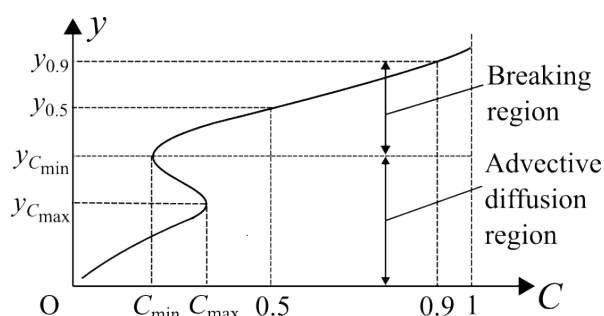


図2 跳水内部の空気混入率分布の概略図

長方形断面水平水路のUDの跳水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、代表長さ跳水始端水深 h_1 、代表流速に跳水始端の断面平均流速 V_1 を選ぶと、

$$C = f(Fr_1, Re, We, B/h_1, x/h_1, y/h_1) \quad (1)$$

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 [= $g \mu_w^4 / (\rho_w \sigma_{wa}^3)$]⁷⁾を用いると、

$$We = \left(\frac{g \mu_w^4}{\rho_w \sigma_{wa}^3} Fr_1^2 Re^4 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

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⁷⁾ため、 We は Fr_1 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⁸⁾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。すなわち、式(1)は、

$$C = f(Fr_1, Re, x/h_1, y/h_1) \quad (3)$$

の関係となる。

キーワード：跳水、レイノルズ数、空気混入率、流況

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. 03-3259-0676

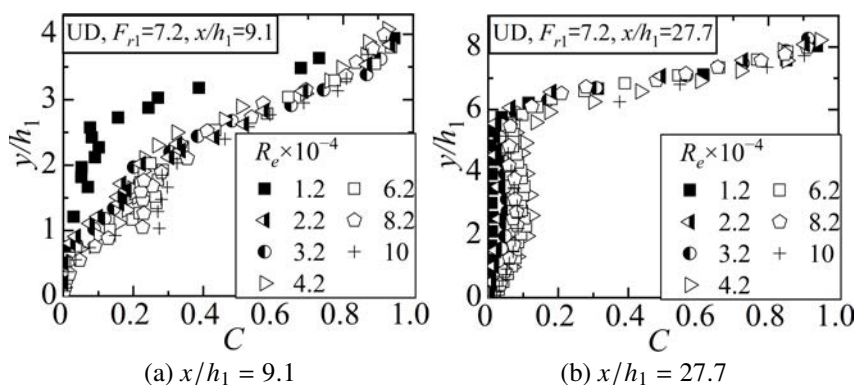


図3 跳水内部の空気混入率分布に対するレイノルズ数の影響 ($F_{r1} = 7.2$)

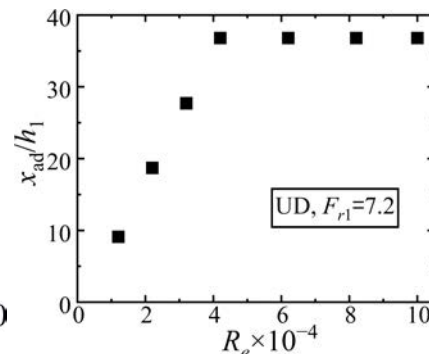


図4 x_{ad}/h_1 に対するレイノルズ数の影響 ($F_{r1} = 7.2$)

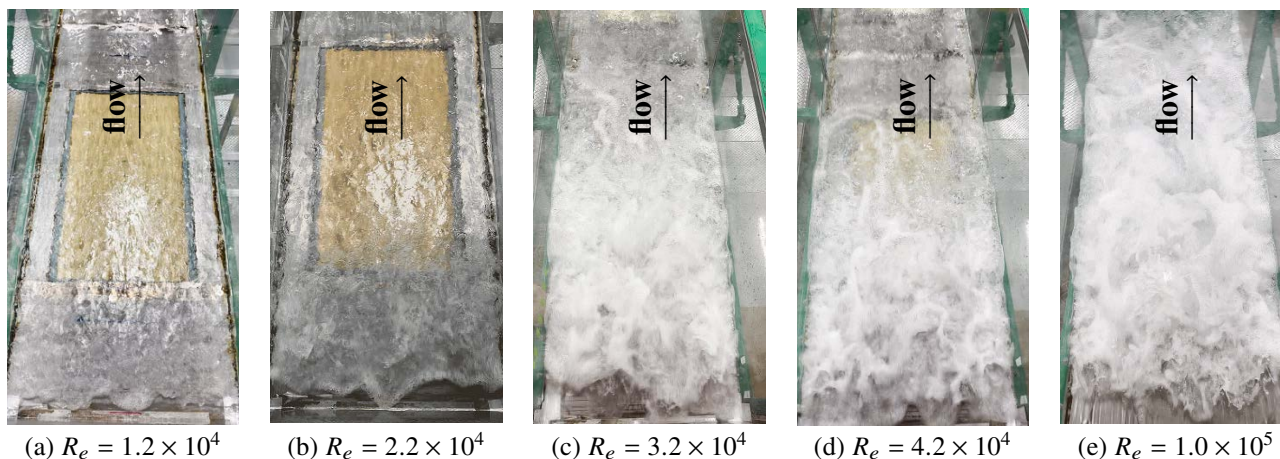


図5 跳水の流況に対するレイノルズ数の影響 ($F_{r1} = 7.2$)

式(3)の関係に基づき整理した C の分布の一例を図3に示す。図3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。また、 x/h_1 が大きくなると advective diffusion region 内の C の値は小さくなる。

与えられた F_{r1} に対して、 x_{ad}/h_1 に対する Re の影響を図4に示す。ここに、 x_{ad} は advective diffusion region が形成される最下流断面の x である。図4に示されるように、 $Re \geq 4.2 \times 10^4$ の場合、 Re の値によらず x_{ad}/h_1 の値は一定である。一方、 $Re \leq 3.2 \times 10^4$ の場合、 Re の値が小さくなると x_{ad}/h_1 の値は小さくなる。

与えられた F_{r1} と Re に対する跳水の流況を図5に示す。図5に示されるように、 $Re \geq 3.2 \times 10^4$ の場合と比べて $Re \leq 2.2 \times 10^4$ の場合では、跳水内部に気泡があまり混入していないように見える。これらは、 Re の減少に伴い粘性の影響が大きくなり、advective diffusion region 内に空気を取り込まれにくくなったためと考えられる。

Breaking region 内については、図3に示されるように、与えられた x/h_1 に対して、 $Re \geq 2.2 \times 10^4$ の場合、 Re の大きさによらず C の分布の形状と値の大きさは同程度である。これは、breaking region 内での空気は表面渦の breaking によって取り込まれたものであることから、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。 $Re = 1.2 \times 10^4$ の場合、図3(a)では、与えられた y/h_1 に対する breaking region 内の C の値は、 $Re \geq 2.2 \times 10^4$ の場合と比べて小さい。これは、 $Re \geq 2.2 \times 10^4$ の場合に比べて $Re = 1.2 \times 10^4$ の場合の x_{ad}/h_1 は小さいことが影響したためと考えられる。

4. まとめ

乱流境界層が未発達の入流射流の跳水を対象に、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。

- $Re \geq 4.2 \times 10^4$ 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。
- $Re \geq 2.2 \times 10^4$ の場合、breaking region 内の C の値に対する Re の影響は小さい。

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) Takahashi, M. and Ohtsu, I.: Effect of inflow condition on air entrainment characteristics in hydraulic jump, *Proc. 33rd IAHR World Congress*, Vancouver, BC, Canada, 4917–4924, 2009.
- 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) Chachereau, Y. and Chanson, H.: Air entrainment and scale effects in hydraulic jumps with small Froude numbers, *Proc. 34th IAHR World Congress*, Brisbane, QLD, Australia, 2388–2395, 2011.
- 5) Rajaratnam, N.: Free flow immediately below sluice gates, *J. Hydraul. Div.*, 103(4), 345–351, 1977.
- 6) Chanson, H.: *Air bubble entrainment in free surface turbulent shear flows*, Academic Press, London, 1996.
- 7) Wood, I. R.: *Air entrainment in free-surface flows*, Balkema, Rotterdam, 1991.
- 8) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Gotoh, H.: Flow conditions of undular hydraulic jumps in horizontal rectangular channels, *J. Hydraul. Eng.*, 129(12), 948–955, 2003.