

跳水内部の空気混入特性に対する流入射流の影響

日大理工 正会員 ○高橋 正行
 東京電力 正会員 松澤 貴史
 日大理工 フェロー会員 大津 岩夫

1. はじめに

跳水は流入射流の乱流境界層の発達状態によって、乱流境界層が未発達の場合の跳水[Undeveloped inflow(以下UDと略す)], 発達中の場合の跳水[Partially developed inflow(PDと略す)], および十分発達した場合の跳水[Fully developed inflow(FDと略す)]がある. Resch and Leutheusser¹⁾は、UDとFDとで跳水内部の空気混入率および流速特性が異なることを示したが、この測定値は熱線流速計で得られているため測定精度上検討の余地がある. Chanson and Gualtieri²⁾は点電極型ボイド率計を用いてPDの跳水を対象に空気混入特性を示しているが、UDとFDの跳水についての検討はなされていない.

著者ら³⁾⁻⁵⁾は、与えられた跳水始端のフルード数 F_1 、レイノルズ数 R_e 、跳水始端からの距離 $(x-x_1)/h_1$ (図3参照)のもとで、UDとPD($\delta/h_1 \leq 0.5$; δ は境界層厚さ; h_1 は跳水始端水深、図3参照)の跳水内部の空気混入率 C の値がほぼ等しいこと、FDはUDとPDよりもadvective diffusion region内(図1参照)での C の値が大きいこと、PD($\delta/h_1=0.8$)はadvective diffusion region内の C の値がUDとPD($\delta/h_1 \leq 0.5$)よりも大きいもののFDよりも小さいことを明らかにした(図2参照). 一方、Breaking region内(図1参照)の C はFD、PD、およびUDでほぼ等しいことを示した. また、advective diffusion region内の C はimpingement point(図-3参照)付近から跳水中に取り込まれた空気であり、Breaking region内の C は跳水の水面の碎波により取り込まれていることを示した. しかしながら、流入射流の乱流境界層の発達状態の違いによってImpingement point付近から跳水内部へ取り込まれる空気量が変化するメカニズムについては不明である.

ここでは、跳水への流入射流の乱流境界層の発達状態がImpingement point付近から跳水内部へ取り込まれる空気の混入率 C を変化させるメカニズムについて考察を加えた.

2. 実験

長方形断面水平水路の自由跳水への流入射流の乱れ強さを知るため、表-1に示す条件で水路中央断面の射流の流速をレーザー流速計(採取間隔40ms, 採取時間160sec)を用いて測定した. 表-1中の x_1 は縮流部から跳水始端までの距離、 x_{cp} は縮流部から乱流境界層が水面に到達するcritical pointまでの距離、 V_1 は跳水始端断面の断面平均流速($V_1=q/h_1$), g は重力加速度、 q は単位幅流量、 ν は動粘性係数である. また、流入射流の水面の観察に高速ビデオカメラ(露光時間1/2000s, 撮影速度1000fps)を使用した. なお、射流の乱流境界層の発達状態はOhtsu and Yasudaの方法⁶⁾を用いて求めている.

3. 流入射流の乱れ強さ

与えられた $F_1=7.2$ および $R_e=6.2 \times 10^4$ のもとで、流入射流の乱流境界層の発達状態を変化させた場合(UD, PD, およびFD)の流入射流の乱れ強さ $\sqrt{u'^2}/U$ の分布を図-4に示す. ここに、 u は x 方向の流速、 U は乱流境界層外縁流速である. なお、図中の点線は開水路等流(フルード数2.45, レイノルズ数 6.2×10^4)の場合の傾向線⁷⁾を示す. 図-4に示されるように、UDとPD($\delta/h_1 \leq 0.5$)の水面付近の乱れ強さは $\sqrt{u'^2}/U=0.7\%$ である. また、PD($\delta/h_1=0.8$)の水面付近の乱れ強さは $\sqrt{u'^2}/U=0.9\%$ となり、UDとPD($\delta/h_1 \leq 0.5$)よりも僅かに大きい. さらに、FDの水面近くの乱れ強さ $\sqrt{u'^2}/U$ はUD, PDに比べて大きく、開水路等流の乱れ強さと同程度($\sqrt{u'^2}/U=5\%$)の大きさとなる.

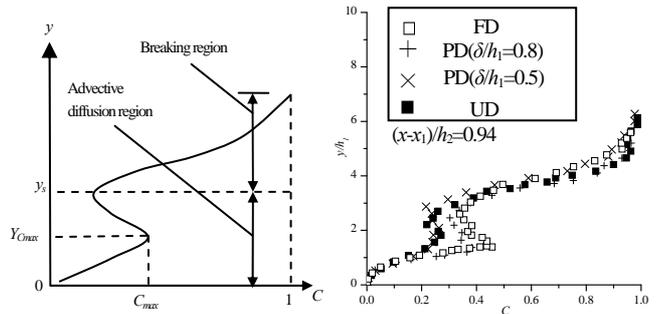


図-1 空気混入率分布概念図 図-2 空気混入率分布

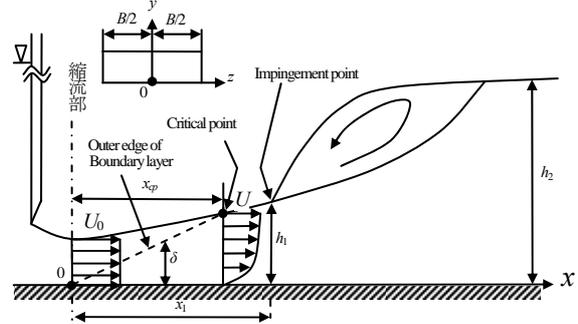
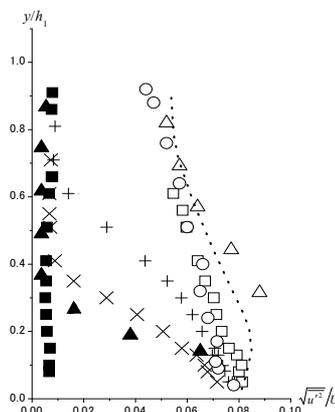


図-3 定義図

表-1 実験条件

乱流境界層の発達状態	δ/h_1	F_1	R_e	x_1 [m]	x_{cp} [m]
Undeveloped inflow	0	7.2	6.2×10^4	0	1.55
Partially developed inflow	0.5	7.2	6.2×10^4	0.43	1.12
Partially developed inflow	0.8	7.2	6.2×10^4	0.75	1.02
Fully developed inflow	1.0	7.2	6.2×10^4	1.74	1.00

$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gh}}$, $R_e = \frac{q}{\nu}$, $B = 40cm$



Inflow condition		
□	FD	$F_1=7.2, R_e=62000$
+	PD($\delta/h_1=0.8$)	$F_1=7.2, R_e=62000$
×	PD($\delta/h_1=0.5$)	$F_1=7.2, R_e=62000$
■	UD	$F_1=7.2, R_e=62000$
○	FD	Ohtsu and Yasuda, $F_1=6.3, R_e=79000$
△	FD	Resch and Leutheusser, $F_1=6.0$
▲	UD	Resch and Leutheusser, $F_1=6.0$
- - -		Tominaga and Nezu

図-4 流入射流の乱れ強さ

キーワード 空気混入特性, 乱流境界層, 跳水, 乱れ強さ

連絡先: 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14, Tel. & Fax. 03-3259-0668

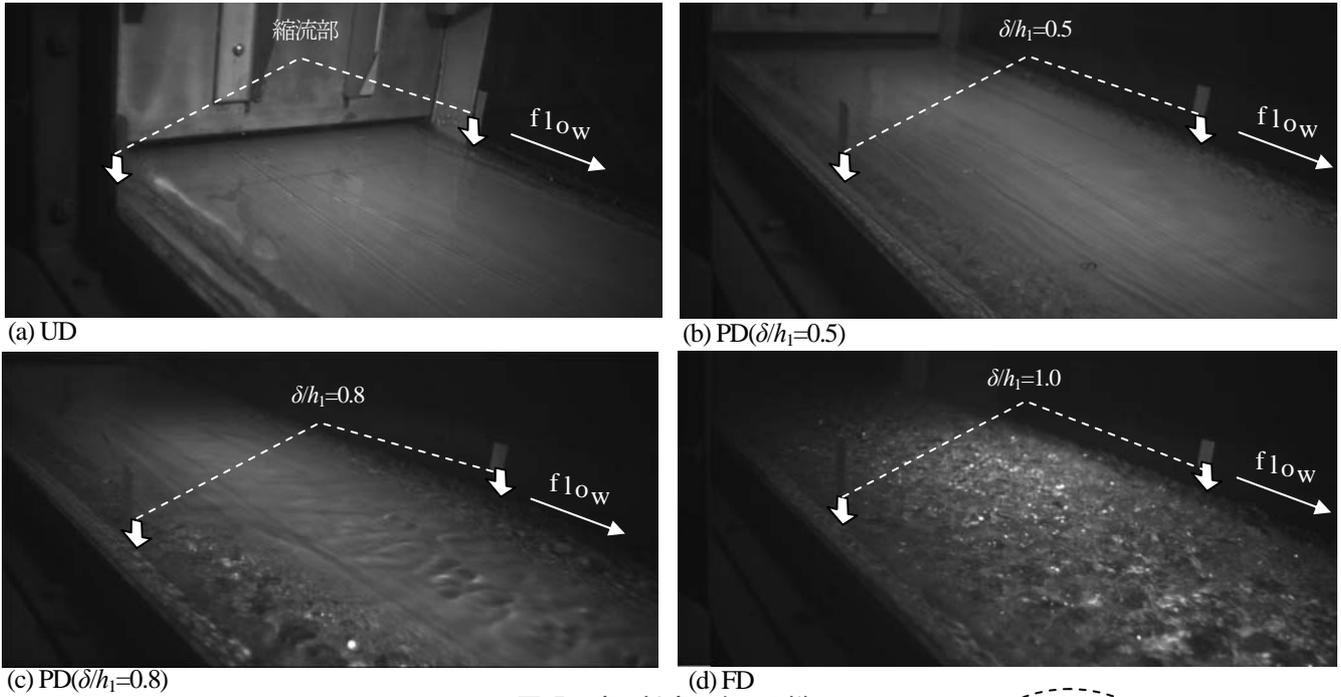


図-5 流入射流の水面の様子

4. 跳水内の空気混入率への流入射流の効果

高速ビデオカメラを用いて撮影した射流の水面を図-5に示す。図-5に示されるようにUDとPD($\delta/h_1=0.5$)の場合は、水面が滑らかで凹凸と変動がない(図-5(a),(b))。これは、UDでは乱流境界層が未発達で乱れ強さ $\sqrt{w^2}/U$ が非常に小さく、PD($\delta/h_1 \leq 0.5$)では境界層内の乱れが水面まで影響をおよぼさないためと考えられる。一方、FDの場合は、水面の凹凸と変動が大きい(図-5(d))。これは境界層が水面まで到達し、水面近くの速度変動も大きいため、水面の凹凸と変動を誘起したためと考えられる。また、PD($\delta/h_1=0.8$)の場合はFDの場合よりも水面の凹凸は小さく変動が間欠的である(図-5(c))。これは、PD($\delta/h_1=0.8$)の場合は境界層内の乱れが間欠的に水面まで達し、水面の凹凸と変動を誘起したためと考えられる。このことは平板上の乱流境界層において、乱流境界層内の乱れが $y=1.2\delta$ まで間欠的に影響をおよぼすこと⁸⁾と類似な現象であるものと考えられる。

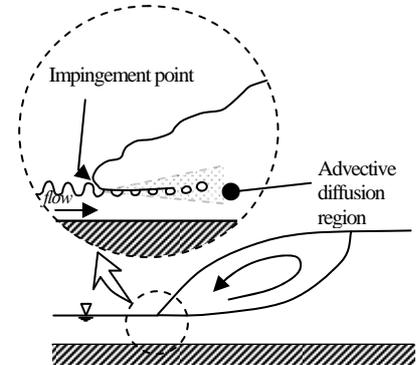


図-6 FDとPD($\delta/h_1=0.8$)の跳水内部への空気混入状況

以上図-2、図-5より、流入射流の水面の凹凸と変動が大きくなると、advective diffusion region内の空気混入率 C も大きくなる。これは、図-6に示されるように、流入射流の水面の凹凸の間の空気が跳水内部に取り込まれたためと考えられる。すなわち、UDとPD($\delta/h_1 \leq 0.5$)では水面の凹凸と変動が生じていない(図-5(a),(b))ため、UDとPD($\delta/h_1 \leq 0.5$)のadvective diffusion region内の空気混入率 C の値が同一の大きさであったものと考えられる。また、PD($\delta/h_1=0.8$)では間欠的に水面の凹凸と変動が生じている(図-5(c))ため、advective diffusion region内の空気混入率 C の値はUDとPD($\delta/h_1 \leq 0.5$)よりも大きくなったものと考えられる。さらに、FDでは水面の凹凸と変動がUDとPDよりも大きい(図-5(d))ため、advective diffusion region内の空気混入率 C の値はUDとPDよりも大きくなったものと考えられる。Ervine and Falvey⁹⁾はpoolに突入するwater jetの乱れ強さが大きくなるとpoolに混入する空気量が多くなることを示している。また、Wilhelms and Gulliver¹⁰⁾は急勾配水路からの流れが水路下流側のpoolに突入(plunging)するとき、水面の凹凸の間の空気が突入点(impingement point)から気泡となり、pool内に取り込まれることを指摘している。これらのことは、流入射流の水面の凹凸の間の空気が跳水内部に取り込まれることと類似な現象であると考えられる。

5. まとめ

流入射流がimpingement point付近から取り込まれる空気混入量におよぼす影響について実験的に検討した結果、流入射流の水面の凹凸と変動の大きさがadvective diffusion region内の空気混入率 C の大きさに影響を与えているものと考えられる。また、流入射流の水面の凹凸と変動が生じる原因を乱流境界層の発達状態と関連付けて説明した。

参考文献

- 1) Resch, F.J., and Leutheusser, H. J.: Le ressaut hydraulique: mesures de turbulence dans la region diphasique, La Houille Blanche, 4, 279-293, 1972.
- 2) Chanson, H., and Gualtieri, C.: Similitude and scale effects of air entrainment in hydraulic jumps, J. Hydr. Res., IAHR, 46(1), pp.35-44, 2008.
- 3) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Takahashi, M.: Discussion of Similitude and Scale Effects of Air Entrainment in Hydraulic Jumps, J. Hydr. Res., IAHR, 47(2), 285-287, 2009.
- 4) Takahashi, M. and Ohtsu, I.: Effect of Inflow Condition on Air Entrainment Characteristics in Hydraulic Jump, Proc. the 33rd IAHR Cong. IAHR, 4917-4924, 2009.
- 5) 松澤 高橋, 大津: 跳水内部の空気混入率分布および流速分布に対する流入射流の影響, 第64回年次学術講演会, 土木学会, II-068, CD-ROM, 2009.
- 6) Ohtsu, I., and Yasuda, Y.: Characteristics of supercritical flow below sluice gate, J. Hydr. Eng., ASCE, 120(3), 332-346, 1994.
- 7) Tominaga, A., and Nezu, I.: Velocity profiles in steep open-channel. J. Hydr. Eng., ASCE, 118(1), 73-90, 1992.
- 8) Klebanoff, P.S.: Characteristics of turbulence in boundary layer with zero pressure gradient, NACA Rep., 1247, 1955.
- 9) Ervine, D. A., and Falvey, H. T.: Behaviour of turbulent water jets in the atmosphere and in plunge pools, Proc. Inst. Civ. Eng., Part 2, 83, 295-314, 1987.
- 10) Wilhelms, S.C., and Gulliver, J.S.: Bubbles and waves description of self-aerated spillway flow, J. of Hydr. Res., IAHR, Vol.43, No.5, pp.522-531, 2005.