H3-5

跳水内部の空気混入率分布に関する検討 Air concentration distributions 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. The maximum air concentration and its location in the advective diffusion region with the fully developed inflow condition is larger than those with the undeveloped inflow condition under a given inflow Froude number. The maximum air concentration and its location in the advective diffusion region increase with increasing Froude number under a given inflow condition. Whereas the air concentration in the breaking region is independent of the inflow condition. Empirical equations are developed for estimating the air concentration both in the advective diffusion and braking regions.

一般にスルースゲート下流側に形成される跳水は,跳水 中に空気が取り込まれ,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への流 入射流は乱流境界層の発達状態(図1参照)によって Undeveloped inflow (以下 UD と略す), Partically developed inflow (PD と略す), および Fully developed inflow (FD と略す)に分けられる.

Wang and Chanson^[1] は PD を対象に 跳水内部の空気混 入率分布を示し,その分布に対して近似式を提案している が,UD と FD についての検討は行われていない.高橋・ 大津 ^{[2],[3]} は跳水始端のフルード数および乱流境界層の発 達状態(UD, PD,および FD)によって跳水内部の空気 混入率 C [=空気の体積/(空気の体積 + 水の体積)]の分 布に違いがあることを示している.しかしながら,乱流境 界層の発達状態およびフルード数が跳水内部の空気混入特 性に与える影響については不明な点が残されている.

本研究は、UD および FD の定常跳水を対象にフルード 数および乱流境界層の発達状態が跳水内部の空気混入特性 におよぼす影響について検討し、長方形断面水平水路にお ける跳水内部の空気混入率分布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=40 cm の長 方形断面水平水路を用いて,レイノルズ数 R_e (V₁h₁/v) を 62000 とし、定常跳水が形成される^[4] ように跳水始端 断面のフルード数 F_{r1} ($V_1/\sqrt{gh_1}$)を 5.2~8.2, UD もしく は FD となるように流量,スルースゲートの開口高,水路 下流端の堰高を調整して実験を行った.ここに,gは重力 加速度, h1 は跳水始端断面の射流水深, V1 は跳水始端断 面の断面平均流速, v は水の動粘性係数である. UD の場 合は x₁=0, FD の場合は x₁ 2x_{cp} となる x₁ 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(図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 δh となる x である.射流の乱流境界層厚 δ と水深 h_1 は Ohstu and Yasuda の方法^[5]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 μmm,長針と短針の間隔 Δℓ=4.259 mm,採取間隔 50µs, 採取時間 20s)を使用した.

跳水内部の空気混入率分布

跳水始端断面のアスペクト比が $B/h_1 \ge 10$, R_e 62000 の 場合,水路中央部 (z 0) での空気混入率 C は次のように 示されるものと考えられる ^[2].

$$C F\left(\frac{x-x_1}{h_1} \text{ or } \frac{x-x_1}{L_j}, \frac{y}{h_1}, F_{r_1}, \frac{\delta}{h_1}\right)$$
(1)

ここに、y は水路床を原点とする鉛直上向きの座標, L_j は 跳水長であり, L_{j} =5.5 h_2 ^[7]で求められている.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 結果の一例を図 3 に示す.流入射流の水面と跳水の表面 渦先端との交点である impingement point (図 1) 付近で取 り込まれた気泡は跳水中で移流・拡散する.そのため,跳 水内部の空気混入率 C の値は底面から 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_s まで減 少し,極小値 C_{min} をとる (図 2).図 2 に示されるように C_{max} , C_{min} が存在する y \leq y_s の領域は advective diffusion region と呼ばれている ^[3].一方, y \geq y_s の領域では,跳 水の表面渦の水面の breaking により空気が取り込まれる ため, y の増加に伴い C の値は 1 に近づく.この領域は breaking region と呼ばれている ^[8].

Advective diffusion region の空気混入率分布

Advective diffusion region の空気混入率分布は、気泡の 拡散モデルに基づいた

$$C \ C_{\max} \times \exp\left\{-\frac{1}{4D^{\#}} \frac{\left(\frac{y}{h_{1}} - \frac{y_{C_{\max}}}{h_{1}}\right)^{2}}{\frac{x - x_{1}}{h_{1}}}\right\}$$
(2)

によって近似される^[1]. ここに, $D^{#}$ は無次元化された乱 流拡散係数 [$D^{#} D_{t}/(V_{1}h_{1})$; D_{t} は空気混入流中の気泡の 拡散係数] である. Advective diffusion region 内の最大空 気混入率 C_{max} およびその位置 $y_{C_{max}}/h_{1}$ の流下方向の変化 を図 4 に示す. 図 4a および 4b に示されるように, 同一 の F_{r1} , R_{e} に対して, $x - x_{1}/L_{j}$ の値が増加するにつれて C_{max} の値は減少する. また, 同一の F_{r1} , $x - x_{1}/L_{j}$ に対し て UD よりも FD の C_{max} の値が大きい. C_{max} の実験式は UD の場合 (3) 式, FD の場合 (4) 式のように示される.

$$C_{\max} \quad 0.53 \times \exp\left\{-\frac{8\sqrt{F_{r1}} \quad 1.2}{F_{r1}} \times \frac{x - x_1}{L_j}\right\} \quad \begin{array}{c} \text{for UD} \\ (R^2 \quad 0.9) \end{array} (3)$$
$$C_{\max} \quad 0.498 \quad 0.012F_{r1} \quad -1.16 \quad 0.036F_{r1} \times \frac{x - x_1}{L_j}$$

for FD
$$(R^2 \ 0.9)$$
 (4)

図 4c および 4d に示されるように、同一の F_{r1} , R_e に 対して、 $x - x_1/L_j$ の値の増加に伴い $y_{C_{max}}/h_1$ は増加する. また、 $x - x_1/L_j \ge 0.2$ の場合、同一の F_{r1} 、 $x - x_1/L_j$ に対し て UD よりも FD の $y_{C_{max}}/h_1$ の値が大きい. $y_{C_{max}}/h_1$ の実 験式は UD の場合 (5) 式、FD の場合 (6) 式のように示さ れる.

^{1:}日大・院(前)・土木, 2:日大理工・教員・土木



$$\frac{y_{C_{\text{max}}}}{h_1} = -0.386 \ 0.191 F_{r_1} \ 3.63 \times \frac{x - x_1}{L_j} \ \begin{array}{c} \text{for UD} \\ (R^2 \ 0.9) \end{array} \tag{5}$$

$$\frac{y_{C_{\text{max}}}}{h_1} \ 1 \ 0.52 \ 0.7 F_{r_1} \times \frac{x - x_1}{L_j} \ \begin{array}{c} \text{for FD} \\ R^2 \ 0.8) \end{array} \tag{6}$$

本研究による advective diffsuion region 内の C の測定値 を用いると, D[#] は UD の場合 (7) 式, FD の場合 (8) 式で 近似される.

$$D^{\#}$$
 0.00192 0.0637 × $\frac{x - x_1}{L_j}$ for UD (7)

$$D^{\#} 0.00125 \ 0.126 \times \frac{x - x_1}{L_j} \text{ for FD}$$
 (8)

Advective diffusion region 内のCは、UDのとき(3)、(5)、 (7) 式を(2) 式に用い, FD のとき(4),(6),(8) 式を(2) 式 に用いることで求められる.この計算値の一例を図3の各 線に示す. Advective diffusion regon 内の C の計算値と実 験値は, UD の場合 R^2 0.8, FD の場合 R^2 0.9 となった.

Breking region の空気混入率分布

Breakig region の空気混入率分布は (9) 式によって近似 する方法が提案なされている [1].

$$C \quad \frac{1}{2} \times \left\{ 1 \quad \operatorname{erf}\left(\frac{y - y_{0.5}}{2 \times x - x_1 \times \sqrt{D^*}}\right) \right\} \tag{9}$$

ここに, y_{0.5} は空気混入率 C 0.5 となる鉛直高さ y, D* は breaking region 内の無次元化された乱流拡散係数である.

y0.5の流下方向の変化を図5に示す.なお、図5中の実 線は Ohtsu et al.^[7] により示された跳水水面を目視観察で 定めた水深hの実験式

$$\frac{h-h_1}{h_2-h_1} \quad 1 - \left(1 - \frac{x-x_1}{L_j}\right)^{1.9} \tag{10}$$

である.図 5a および 5b に示されるように,同一の F_{r1} と $x - x_1/L_j$ に対して UD よりも FD の $y_{0.5}$ の値が大きいも のの, $h \approx y_{0.5}$ であることが確かめられた.

本研究による breaking region 内の C の測定値を用いる と, D*は(11)式で近似される.

(c) $y_{C_{\text{max}}}/h_1$ for UD (d) $y_{C_{\text{max}}}/h_1$ for FD Figure4 Longitudinal variations on C_{max} and $y_{C_{\text{max}}}/h_1$ UD FD 0. 0.8 $(h-h_1)/(h_2-h_1)$ (y0.5-h_1)/(h2-h_1) 9'0 9'0 $(h-h_1)/(h_2-h_1)$ (y0.5-h1)/(h2-h1 0.6 $F_{r1}=6.2$ $F_{r1}=7.2$ $F_{r1}=8.2$ $F_{r1}=6.2$ $F_{r1}=7.2$ $F_{r1}=8.2$ 0 ▲ 0. . Ohtsu et al.(1990 Ohtsu et al.(1990) 0.6 0.6 0.8 $(x-x_1)/L_i$ $(x-x_1)/L_i$

Figure5 Surface on jump roller for (a) UD and (b) FD

(b) FD

$$D^* = \frac{1}{3200} \times \left\{ \left(\frac{x - x_1}{L_j} \right)^{-1.7} - 1 \right\}$$
 for UD and FD (11)

Breaking region 内の C は, (10), (11) を (9) 式に用い ることで求められる.この計算値の一例を図3に示す. Breaking regon 内の C の実験値と計算値は, UD の場合 R^2 0.8, FD の場合 R^2 0.7 となった.

参考文献

(a) UD

- Wang, H., Chanson, H.: Experimental study of turbulent fluctuations in hydraulic jumps. J. Hydraul. Eng., 141(7), 04015010-1 04015010-10, 2015.
- 大津岩夫:跳水内部の空気混入特性に対する流入射流の 高橋正行, [2] 影響,水工学論文集, 53, I_985 - I_990, 2009.
- [3] 高橋正行,大津岩夫:跳水内部の空気混入特性,土木学会論文集 B1
- (水工学), 71 (4),529-534,2015. 持田俊,安田陽一,高橋正行,大津岩夫:自由跳水の流況形成に対 するレイノルズ数の影響,土木学会年次講演会概要集,65,Ⅱ部門, [4] 391-392, 2010.
 [5] Ohtsu, I., Yasuda, Y.: Characteristics of supercritical flow below sluice
- Ohtsu, I., Yasuda, Y., Gotoh, H.: Flow conditons of undular hydrailic
- [6] jumps in horizontal rectangular channels, J. Hydr. Eng., 129(12), 948-955, 2003.
- [7] Ohtsu, I., Yasuda, Y., Awazu, S.: Free and submaerged hydraulic jumps in rectangular channels., *Report of Res. Inst. of Sci. and Tech.*, [8] Takahashi, M., Ohtsu, I.: Effect of inflow conditon on air entrain-
- ment characteristics in hydraulic jumps., Proc. 33rd IAHR Congress, 4917-4924, 2009.