階段状水路における aerated skimming flow の流速特性 Velocity profiles of aerated skimming flows in stepped channels

○竜沢宗一郎<sup>1</sup>,高橋正行<sup>2</sup>
\*Souichirou Tatsuzawa<sup>1</sup>, Masayuki Takahashi<sup>2</sup>

Abstract: Generally, stepped channel flows are characterized as aerated flows. For the hydraulics design of stepped channels, it is important to know the aerated flow characteristic such as the aerated flow velocity in skimming flows. This study presents velocity distributions of the aerated skimming flow both in non- and quasi-uniform flow regions under a wide range of hydraulic conditions, indicating the effect of relative step height, chute angle, relative drop height, and Reynolds number on the mean velocity profiles of aerated skimming flows.

## 1 まえがき

急傾斜地の水路や堰・ダムを流下する高速流を傾斜面 上で減勢させる方法として階段状水路の利用は有効であ る<sup>[1],[2]</sup>. 階段状水路の skimming flow (各ステップ隅角部 で常に渦の形成される流況<sup>[1]</sup>)では,水路に流入した流れ は平坦な傾斜水路よりも短い流下距離で水面から空気が混 入しはじめる.この位置を inception point と呼び,その下 流側では空気混入流となる (Fig.1).この空気混入流は不 等流区間を経て,各ステップ上の水深と流速が繰り返し同 じ大きさになる擬似等流状態となる (Fig.1).

Boes and Hager は水路傾斜角度  $\theta = 30^{\circ} \sim 50^{\circ}$  の空気混 入 skimming flow を対象に流速分布の変化について実験 的検討を行い,流速分布に対する水路傾斜角度 $\theta$ ,相対ス テップ高 *S*/*d<sub>c</sub>* の影響は小さいものとしている<sup>[3]</sup>. Bung は  $\theta = 18.4^{\circ} \ge 26.6^{\circ}$  の空気混入 skimming flow を対象に 流速分布の変化について実験的検討を行い,流速分布に対 する  $\theta \ge S/d_c$  の影響は小さいものとしている<sup>[4]</sup>. しかし ながら,広範囲の  $\theta \ge S/d_c$  のもとで検討がなされていな いため,流速分布に対する  $\theta \ge S/d_c$  の影響については不 明な点が多い.また,空気混入 skimming flow の流速分布 に対する流下距離およびレイノルズ数 *R<sub>e</sub>* の影響は示され ていない.

本研究では、階段状水路における空気混入流を対象に広範囲の水路傾斜角度 $\theta$ と相対ステップ高さ $S/d_c$ のもとで流速特性を明らかにした.すなわち、流下距離、レイノルズ数 $R_e$ 、水路傾斜角度 $\theta$ 、相対ステップ高さ $S/d_c$ が流速分布に与える影響を示した.

## 2 実験

実験は skimming flow の空気混入流 (Fig.1) を対象に  $\theta = 55^{\circ}$  については Table.1 の条件のもとで実施された. 時間平均空気混入率 C[=空気の体積/(空気の体積+水の体 積)] と流速 u は二点電極型ボイド率計を用いて測定された (測定時間間隔 20 $\mu$ s, 測定時間 20s). また, aerated flow の u, C の評価断面をエッジ断面とした (Fig.1). なお, y は 仮想底面に垂直な距離である.

## 3 Aerated skimming flow の流速特性

階段状水路の空気混入不等流区間の skimming flow において,空気混入流の流速 u は次の関係で整理されるものと 考えられる.



Figure1: Flow regions of the skimming flow

Table1: Experimental conditions

θ	S[cm]	$d_c$ [cm]	$S/d_c$	$R_e \times 10^{-4}$	H <sub>dam</sub> [cm]
55°	1.25	6.3	0.2	5	349
55°	2.5	8.3	0.3	9	349
55°	2.5	5	0.5	4	349
55°	5.0	10.0	0.6	8	349
55°	5.0	7.1	0.7	6	349

 $H_{dam}$ :階段状水路の落差,  $R_e$ :レイノルズ数 ( $R_e = q_w/v_w$ ),  $v_w$ : 水の動粘性係数



(a)  $\theta = 30^{\circ}$  (Boes and Hager<sup>[3]</sup>) (b)  $\theta = 55^{\circ}$ 

Figure 2: Effect of  $H_s/d_c$  on velocity profiles

$$\frac{u}{u_{0.9}} = \operatorname{func}\left(\frac{y}{y_{0.9}}, \frac{S}{d_c}, \theta, \frac{H_s}{d_c}, R_e\right)$$
(1)

ここに、 $u_{0.9}$  は空気混入流水深  $y_{0.9}$  での流速であり、 $y_{0.9}$ は aerated flow depth であり *C*=0.9 となる y の値である. (1) 式の関係で実験値を整理した一例を Fig.2 に示す.図 に示されるように、与えられた  $\theta$ ,  $S/d_c$ ,  $R_e$  に対して、  $u/u_{0.9}$  の分布は  $H_s/d_c$  の影響を受けない.このことから、 (1) 式の関係は、

$$\frac{u}{u_{0.9}} = \operatorname{func}\left(\frac{y}{y_{0.9}}, \frac{S}{d_c}, \theta, R_e\right)$$
(2)

のように示される.

与えられた水路傾斜角度  $\theta$ ,相対ステップ高さ  $S/d_c$ に対してレイノルズ数  $R_e$ を変化させた場合の流速分布の一例を Fig.3 に示す.図に示されるように、与えられた  $\theta$ ,  $S/d_c$ に対して、 $R_e \gtrsim 4 \times 10^4$ のとき、流速分布は  $R_e$ の影響を受けない.このことから、(2)式の関係は、

$$\frac{u}{u_{0.9}} = \operatorname{func}\left(\frac{y}{y_{0.9}}, \frac{S}{d_c}, \theta\right)$$
(3)

のように示される. Fig.4 に流速分布  $u/u_{0.9}$  対する  $\theta$  の 影響を示す.図に示されるように,与えられた  $S/d_c$  と  $y/y_{0.9}$  に対して, $\theta$ の減少に伴い $u/u_{0.9}$  は増加する. Fig.5 に示されるように,与えられた $\theta$  と $y/y_{0.9}$  に対して  $S/d_c$ が大きくなると $u/u_{0.9}$  は大きくなる. これらは, $\theta$ が小さ くなるもしくは $S/d_c$  が大きくなるとステップ水平面への 主流による impact が大きくなり,エッジ断面の流速分布 に影響を与えたためと考えられる.

Fig.2~5 より,aerated skimming flow の流速分布は,

$$u/u_{0.9} = (y/y_{0.9})^{\frac{1}{N}} \tag{4}$$

で示される 1/N 乗則を用いて近似できるものと考えられる. 擬似等流空気混入流の場合 N の値の実験式<sup>[2]</sup>,

$$N = 14\theta^{-0.65} \frac{S}{d_c} \left(\frac{100}{\theta} \frac{S}{d_c} - 1\right) - 0.041\theta + 6.27$$
 (5)

が提案されている. 流速分布に対する  $H_s/d_c$  の影響を 無視できることから, (5) 式を不等流区間に適用をする.  $\theta = 18.4^\circ \sim 55^\circ$  の実験値に対する予測値の決定係数は  $R^2=0.83$ になり,良い相関が得られた.

以上より,擬似等流区間の N の実験式 [(5) 式]<sup>[2]</sup> は不 等流区間においても適用できる.すなわち, $\theta = 18.4^{\circ} \sim$ 55°,  $R_e \gtrsim 4 \times 10^4$  の skimming flow の空気混入流の流速  $u/u_{0.9}$  が (4), (5) 式を用いることで予測可能となった.

## 4 まとめ

水路傾斜角度  $\theta$  = 18.4°~55°,相対ステップ高さ S/d<sub>c</sub>=0.2~0.7 の階段状水路における不等流区間の aerated skimming flow の流速分布に対する流下距離,レイノ ルズ数  $R_e$ ,水路傾斜角度  $\theta$ ,相対ステップ高さ S/d<sub>c</sub> の影 響について明らかにした.また, $R_e \gtrsim 4 \times 10^4$ のとき流速 分布は (4) 式と (5) 式を用いて予測される.



Figure3: Effect of Reynolds number on velocity profiles



Figure 4: Effect of  $\theta$  on velocity profiles



Figure 5: Effect of  $S/d_c$  on velocity profiles

参考文献

- Ohtsu, I., Yasuda, Y., Takahashi, M.: "Flow characteristics of skimming flows in stepped channels.", *J. Hydraul. Engrg.*, Vol.130, No.9, pp.860-869, 2004.
   Takahashi, M., Ohtsu, I.: "Aerated flow characteristics"
- [2] Takahashi, M., Ohtsu, I.: "Aerated flow characteristics of skimming flow over stepped chutes.", J. Hydraul. Res., Vol.50, No.4, pp.427-434, 2012.
- [3] Boes, R.M., Hager, W.H.:Two-phase flow characteristics of stepped spillways, J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol.129, No.9, pp.661 – 670, 2003.
- [4] Bung, D. B.: Developing flow in skimming flow region on embankment stepped spillways, J. Hydraul. Res., , Vol.49, No.5, pp.639 – 648, 2011.