

階段状水路における Skimming flow の流速と空気混入率の分布特性

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
日本大学理工学部

学生員 ○明石 慶太
正会員 高橋 正行
正会員 安田 陽一
フェロー会員 大津 岩夫

堰やダムなどの落差を有する構造物から流下する高速流を減勢させる方法として階段状水路の利用が有効である。階段状水路に形成される流れは空気混入を伴う場合が多い。空気混入射流のエネルギーを評価することは水工設計上重要である。最近著者は空気混入射流のエネルギー評価法が提案されている^{1,2)}。この場合、空気混入率および流速分布のモデルを用い、空気混入射流のエネルギー評価を行った^{2,3)}。

ここでは、平衡状態での Skimming flow における流速および空気混入率の分布特性について実験的に検討した。また、空気混入率および流速の測定結果を用いて空気混入射流の全水頭 E と断面平均流速 V_{ave} の算定をした。それらの値と水のみで換算した水深 d_w および水の単位幅流量 q_w から算定した全水頭 E_w と断面平均流速 V_w ($V_w = q_w / d_w$; q_w = 単位幅流量) との比較を行い、 E と E_w との関係および V_{ave} と V_w との関係を示した。

実験条件

クレスト部に WES の標準堤頂を有し、同一のステップ高さを有する階段状水路を用いて表-1 に示す条件のもとで実験を実施した。空気混入率 C [C = 空気量/(空気量+水の量)] と空気混入流の流速測定については二点電極型ボイド率計を用いた。

空気混入射流の空気混入率分布および流速分布

平衡状態の水路中央断面での階段状水路における空気混入率(図-1 参照)は次元解析的考察から次の関係で示されるものと考えられる⁴⁾。なお、平衡状態を同じ流況が繰り返し形成されている状態と定義している。

$$C = F\left(\frac{y}{y_{0.9}}, \frac{S}{d_c}, \theta\right) \quad (1)$$

空気混入率 C を(1)式の関係で整理した一例を図-2(a)に示す。図に示されるように、水路傾斜角度 $\theta = 55^\circ$ 、 $S/d_c = 0.5 \sim 1.0$ の場合の空気混入率分布は、 $y/y_{0.9} < 0.6$ において、隣り合うステップエッジ断面では分布形状の違いが認められる。また、一段おきに同様な分布形状となっている。これは、平衡状態の流れであったとしても、各ステップへの主流の衝突位置が一定ではなく、主流のステップエッジの乗り越え方が異なったため⁵⁾と考えられる。図中実線は気泡の拡散モデル⁶⁾の線(断面平均した空気混入率 $C_m = 0.6$ とした場合)であり、 $y/y_{0.6} < 0.6$ では分布の形状と大きさが実測値と異なる。

水路中央断面での階段状水路における流速分布は平衡状態の場合、次元解析的考察から次の関係で示されるものと考えられる⁴⁾。

$$\frac{\bar{u}}{U_{0.9}} = F\left(\frac{y}{y_{0.9}}, \frac{S}{d_c}, \theta\right) \quad (2)$$

Skimming flow の流速分布を(2)式の関係で整理した一例を図-2(b)に示す。図に示されるように、 $\theta = 55^\circ$ 、 $S/d_c = 0.5 \sim 1.0$ の範囲における流速分布は、 S/d_c によらずほぼ $1/6$ 乗の指数則分布で近似される。

Skimming flow における空気混入射流の全水頭

仮想底面を基準面とした Skimming flow における空気混入射流の全水頭 $E = C_p d_w \cos \theta + C_v V_w^2 / 2g$ と水のみで換算した水深 d_w および水の単位幅流量 q_w から算出した全水頭 $E_w = d_w \cos \theta + V_w^2 / 2g$ との関係は次式によって示される。

表-1 実験条件

θ [deg.]	S/d_c	H_s/d_c	N	R_e [$\times 10^{-4}$]
55	0.5	21.4	38	9.9
55	0.5	21.9	39	9.9
55	0.5	22.4	40	9.9
55	1	21.4	38	3.5
55	1	21.9	39	3.5
55	1	22.4	40	3.5

N : クレストから測定位置までの階段の段数、
 $R_e = q_w / \nu$ ($\nu = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

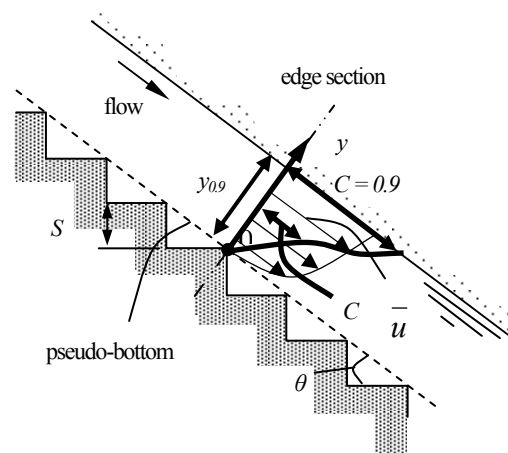


図-1 定義図

キーワード：階段状水路、Skimming flow、空気混入射流、エネルギー

連絡先：〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8, Tel. & Fax.: 03-3259-0668, e-mail: masayuki@civil.cst.nihon-u.ac.jp

$$\frac{E}{E_w} = \frac{C_p \left(\frac{d_w}{d_c} \right) \cos \theta + \frac{C_v}{2} \left(\frac{d_c}{d_w} \right)^2}{\left(\frac{d_w}{d_c} \right) \cos \theta + \frac{1}{2} \left(\frac{d_c}{d_w} \right)^2} \quad (3)$$

ここに、 C_p と C_v は補正係数であり、空気混入率と流速分布から求められる¹⁻³⁾。 $\theta=55^\circ$ 、 $S/d_c=0.5 \sim 1.0$ での E/E_w について図-3に示す。図に示されるように、 E/E_w の値は1.12～1.18となる。なお、図中実線は次に述べるモデルと実験式を用いて示している。 C_p と C_v の値については空気混入率の分布形状を気泡の拡散モデル⁶⁾を用いて近似し、流速分布については1/6乗則を用いて近似した。また、 d_w/d_c の値については、Ohtsu et al.が提案している実験式¹⁾を用いて算定した。

空気混入率および流速の実測値から算定した E/E_w の値は気泡の拡散モデルと1/6乗則を用いて計算された値と比べ+8%以内の差となっている（図-3参照）。

Skimming flowにおける空気混入射流の断面平均流速

空気混入射流中の aerated flow depth 内の断面平均流速 V_{ave} を次のように定義する¹⁻⁴⁾。

$$V_{ave} = \frac{1}{y_{0.9}} \int_0^{y_{0.9}} \bar{u} dy \quad (4)$$

空気混入射流の断面平均流速 V_{ave} と水のみに換算された水深 d_w および水の単位幅流量 q_w から求められる断面平均流速 $V_w (=q_w/d_w)$ との比は $Y=y/y_{0.9}$ および $U=\bar{u}/U_{0.9}$ を用いて次式で表示される^{3,4)}。

$$\frac{V_{ave}}{V_w} = \frac{\left(1 - \int_0^1 C dY \right) \int_0^1 U dY}{\int_0^1 (1-C) U dY} \quad (5)$$

$\theta=55^\circ$ 、 $S/d_c=0.5 \sim 1.0$ での V_{ave}/V_w について図-4に示す。図に示されるように、 V_{ave}/V_w の値は1.05～1.09となる。なお、空気混入率の分布形状については気泡の拡散モデル⁶⁾を用いて近似し、流速分布については1/6乗則を用いて近似すると V_{ave}/V_w の値は図中実線のように示される。また、空気混入率および流速の実測値から算定した V_{ave}/V_w の値と気泡の拡散モデルと1/6乗則を用いて計算された値と比べ+3%以内の差となっている（図-4参照）。

参考文献

- 1) I. Ohtsu, Y. Yasuda, and M. Takahashi: Flow characteristics of Skimming flow in stepped channels, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol.130, No.9, pp.860-869, 2004.
- 2) 高橋, 安田, 大津: 階段状水路における空気混入射流の特性, *水工学論文集*, 土木学会, 第49巻, pp.829-834, 2005.
- 3) I. Ohtsu, Y. Yasuda, and M. Takahashi: Energy head of aerated flows in stepped channels, *Proc. of the 31st IAHR Cong.*, IAHR, pp.2890-2899, Seoul, Korea, 2005.
- 4) 高橋, 安田, 大津: 階段状水路における空気混入射流の特性に対するレイノルズ数の影響, *水工学論文集*, 土木学会, 第50巻, pp.871-876, 2006.
- 5) I. Ohtsu, and Y. Yasuda: Characteristics of Flow Conditions on Stepped Channels, *Proc of the 27th IAHR Cong.*, IAHR, San Francisco, USA, pp.583-588, 1997.
- 6) H. Chanson: The hydraulics of stepped chutes and spillways, Balkema, Lisse, 2001.

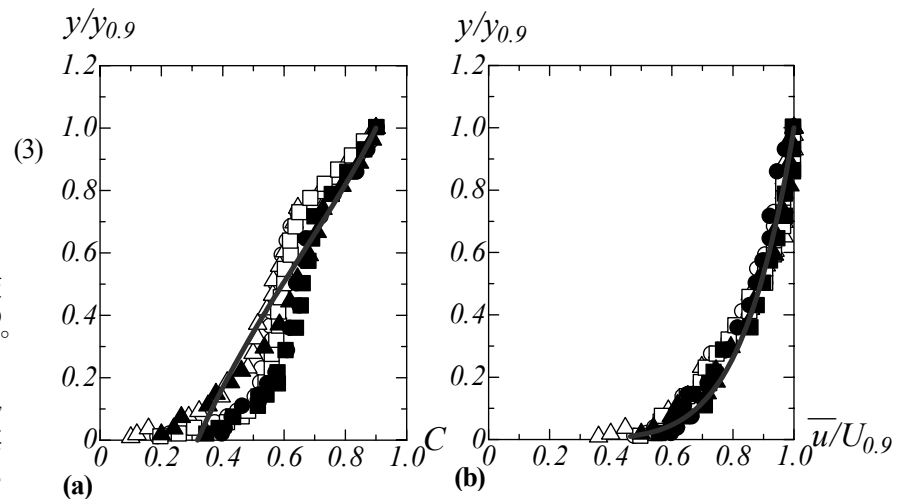


図-2 Skimming flow の空気混入分布と流速分布

symbol	θ [deg.]	S/d_c	$R_e \times 10^{-4}$	H_s/d_c	N	C_m
○	55	0.5	9.9	21.4	38	0.66
△	55	0.5	9.9	21.9	39	0.57
□	55	0.5	9.9	22.4	40	0.62
●	55	1	3.5	21.4	38	0.61
▲	55	1	3.5	21.9	39	0.61
■	55	1	3.5	22.4	40	0.66

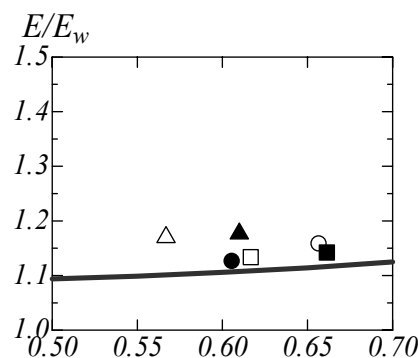


図-3 空気混入射流の全水頭

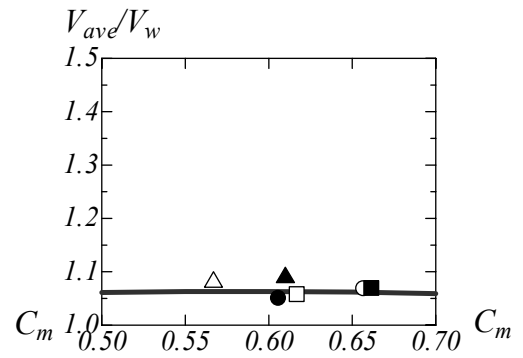


図-4 空気混入射流の平均流速