

階段状水路における空気混入射流のエネルギー評価

日本大学理工学部 土木工学科 正会員 ○高橋正行
 日本大学理工学部 土木工学科 正会員 安田陽一
 日本大学理工学部 土木工学科 フェロー会員 大津岩夫

階段状水路は急傾斜水路で生じる高速流を減勢させる方法として有効である。一般的に設計流量における階段状水路で見られる流況は Skimming flow であり¹⁾、水工設計のためには Skimming flow の空気混入流のエネルギーの大きさを知ることが重要である。

最近、Skimming flow の空気混入率 C が測定され、水のみに換算した水深 d が求められている^{1)~4)}。また著者らによって、水のみに換算した水深 d と流量とを用いることで、Skimming flow の全水頭 E_w が求められ^{1)~4)}、さらに空気混入射流の全水頭 E の評価法が示されている¹⁾。しかしながら、 E と E_w との関係については明確にされているとは言えない。ここでは、水のみに換算した水深 d を用いて評価した全水頭 E_w と空気混入射流の全水頭 E との対応を明確にした。

実験方法

実験はクレスト部に WES の標準堤頂を有し、同一なステップ高さを有する階段状水路を用いて表 1 に示す条件の下で実施した。空気混入率 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(採取間隔 $20 \mu \text{ sec}$ 、採取時間 20 sec)。なお、測定は擬似等流状態の edge section (図 1 参照) を対象に行った。

表 1 実験条件

θ (deg.)	B (cm)	S (cm)	d_c (cm)	H_{dam} (cm)	Sd_c	Re [$\times 10^4$]
55	50	10	10	250	1.0	9.8
55	50	5	10	250	0.5	7.6

B : Channel width, H_{dam} : Drop height of stepped channel

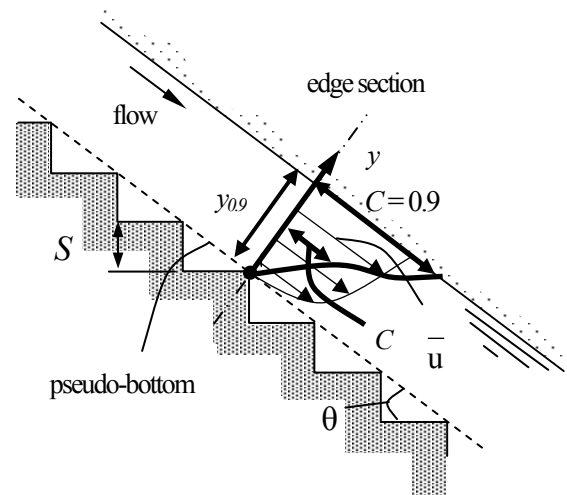


図 1 定義図

Skimming flow における空気混入射流の全水頭

Skimming flow における空気混入射流の仮想底面上の全水頭は空気混入率 C の変化を密度変化として表すと次式によって示される。

$$E = C_p d \cos \theta + C_v \frac{V_w^2}{2g} \quad ; \quad d = \int_0^{y_{0.9}} (1 - C) dy \quad (1)$$

ここに、 C_p と C_v とは補正係数である⁵⁾。また、水のみに換算した水深 d は測定された空気混入率 C から求められる。

また、 $y/y_{0.9} = y^+$ and $\bar{u}/U_{0.9} = u^+$ と置くと補正係数 C_p と C_v は次式で表示される。

$$C_p = \frac{\int_0^1 \left[(1 - C) y^+ + \int_{y^+}^1 (1 - C) dy^+ \right] u^+ dy^+}{\left(1 - \int_0^1 C dy^+ \right) \int_0^1 (1 - C) u^+ dy^+} \quad (2a) \quad C_v = \frac{\left(1 - \int_0^1 C dy^+ \right)^2 \int_0^1 (1 - C) u^{+3} dy^+}{\left[\int_0^1 (1 - C) u^+ dy^+ \right]^3} \quad (2b)$$

空気混入率の分布形状については Chanson によって提案された気泡の拡散モデル³⁾を用いると、断面平均した空気混入率 C_m を与えることで空気混入率の分布形状を近似することができる。また、空気混入射流の流速分布は $1/N$ 乗則(3)式で近似できる⁵⁾。

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

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

$$\frac{\bar{u}}{U_{0.9}} = \left(\frac{y}{y_{0.9}} \right)^{\frac{1}{N}} \quad (3)$$

著者らの実験結果から水路傾斜角度が $19^\circ \sim 55^\circ$ で相対ステップ高さ S/d_c が 0.25 以上の Skimming flow の場合、 $C_m=0.2 \sim 0.55$ 、 $N=6 \sim 9$ である¹⁾⁴⁾⁵⁾。この実験結果を用いて C_v および C_p を算定すると、 $C_v=1.04 \sim 1.16$ 、 $C_p=1.05 \sim 1.92$ となる。

水のみに換算した水深 d を用いると全水頭 E_w は次式によって求められる。

$$E_w = d \cos \theta + \frac{V_w^2}{2g} \quad (4)$$

ここに、 $V_w = q_w/d$ である。擬似等流状態の場合、 E_w/d_c は次式によって示される。

$$\frac{E_w}{d_c} = \left(\frac{f}{8 \sin \theta} \right)^{1/3} \cos \theta + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8 \sin \theta} \right)^{-2/3} \quad (5)$$

(5) 式中の抵抗係数 $[f=8 \sin \theta (d/d_c)^3]$ については、著者によって広範囲な水理条件の下で適用可能な実験式が提案されている¹⁾。

空気混入射流の相対全水頭 E/d_c についても、(5) 式と同様にして表すことができ、次式のように示される。

$$\frac{E}{d_c} = C_p \left(\frac{f}{8 \sin \theta} \right)^{1/3} \cos \theta + \frac{C_v}{2} \left(\frac{f}{8 \sin \theta} \right)^{-2/3} \quad (6)$$

空気混入射流の全水頭 E と水のみに換算した水深から求められる全水頭 E_w との関係を知るため、 E/E_w は (5) 式と (6) 式から次のように示される。

$$\frac{E}{E_w} = \frac{C_p \left(\frac{f}{8 \sin \theta} \right)^{1/3} \cos \theta + \frac{C_v}{2} \left(\frac{f}{8 \sin \theta} \right)^{-2/3}}{\left(\frac{f}{8 \sin \theta} \right)^{1/3} \cos \theta + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8 \sin \theta} \right)^{-2/3}} \quad (7)$$

$C_m \left[= \frac{1}{y_{0.9}} \int_0^{y_{0.9}} C dy \right]$ と N の値の変化に伴う E/E_w の変化の一例を図 2 に示す。ここで、(7) 式中の C_p と C_v の値は $C_m = F_1(S/d_c, \theta)$ と N から求まり⁵⁾、抵抗係数 f の値は著者が提案した実験式 $[f = F_2(S/d_c, \theta)]$ ¹⁾ から求まる。なお、 C_m の値については、著者が提案した実験式¹⁾ から求められた値の ± 0.1 の範囲について考慮している。与えられた θ と S/d_c に対して、 N が大きくなるにつれて E/E_w の値は 1 に近づく。また、 C_m の値が大きくなるに伴い、 E/E_w の値も大きくなる。さらに、 $0.2 \leq C_m \leq 0.6$ 、 $6 \leq N \leq 9$ 、 $19^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$ の場合、 E/E_w の値は 1.03 ~ 1.12 となる。すなわち、 E_w/d_c の大きさを求めると空気混入射流の相対全水頭 E/d_c の大きさを知ることができる。

参考文献

- 1) I., Ohtsu, Y., Yasuda, and M., Takahashi, 2004, Flow Characteristics of Skimming Flows in Stepped Channels, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol.130, No.9, pp.860-869.
- 2) I., Ohtsu, Y., Yasuda, and M., Takahashi, 2000, Discussion of Characteristics of Skimming Flow over Stepped Spillways, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol.126, No.11, pp.869-871.
- 3) H., Chanson, 2001, *The Hydraulics of stepped chutes and spillways*, Balkema, Lisse.
- 4) R.M., Boes, and W.H., Hager, 2003, Hydraulic Design of Stepped Spillways, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol.129, No.9, pp.761-679.
- 5) 高橋正行、安田陽一、大津岩夫、2005 年 2 月、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.

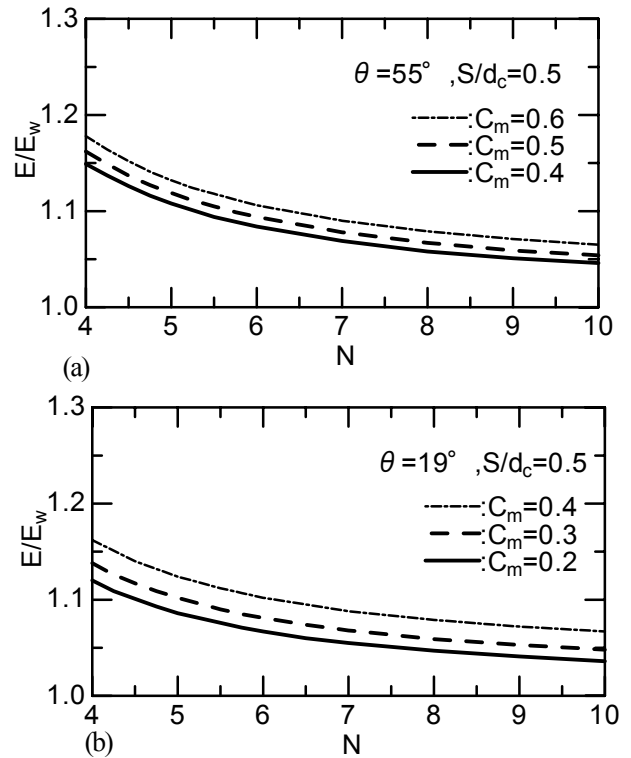


図 2 N と C_m の変化に伴う E/E_w の変化