

階段状水路における Non-aerated skimming flow のエネルギー特性

日大院理工 学正会員 大熊稔生
 日大理工 正会員 高橋正行
 日大理工 フェロー 大津岩夫

1. まえがき

高速流のエネルギー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¹⁾。

階段状水路において形成されるskimming flowの流況は、底面から乱流境界層が発達し、ある程度の距離を流下した断面で乱流境界層が水面に到達する。この断面はcritical point (以下C.P.と略す)と呼ばれている。C.P.より下流側で乱れが十分に発達すると、水面から空気が混入し始める。この断面をinception point(略I.P.)という。I.P.より下流側では空気混入不等流(gradually varied aerated flow)となり、さらにある程度の距離を流下すると擬似等流(quasi-uniform flow)となる。すなわち、不等流区間はI.P.より上流側のnon-aerated flowとI.P.より下流側のaerated flowに区分される。Aerated flowの水理特性については、最近の研究によってかなり解明されてきた^{1)~3)}。

Non-aerated flow については、低落差の階段状洪水吐で大流量時に生じ、この特性を知ることが水工設計上必要となる。すなわち、non-aerated skimming flow の水深、流速、および比エネルギーの大きさを知ることが重要である。

本研究では、水路傾斜角度 $\theta=19^\circ, 30^\circ, 55^\circ$ の階段状水路を対象に不等流区間のnon-aerated skimming flow の比エネルギーの特性を示した。すなわち、乱流境界層の発達に伴って相対比エネルギー E/d_c に対する水路傾斜角度 θ および相対ステップ高 S/d_c の影響が大きくなることを示した。

2. 実験

実験は、天端が広頂堰の堰長となるように調整された階段状水路を用い、表-1 の条件のもとで行われた。non-aerated flow の水深 d はポイントゲージ、流速 u はピトー管を用いて測定された。I.P.の空気混入率 C [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 μ sec, 測定時間20sec)。なお、水深、流速、空気混入率、比エネルギーの評価断面をエッジ断面とした(図-2 参照)。

3. non-aerated flow の水理特性

non-aerated flow の乱流境界層内の流速 u を $u/U = f(y/\delta)$ の関係で整理した一例を図-2 に示す。

ここに、 δ は乱流境界層厚さ、 U は乱流境界層外縁流速、 x は傾斜始端からの流下距離である。なお、 δ は流速 u の値が乱流境界層外縁流速 U の99%の値となる高さとして定義されている。図-2から乱流境界層内の流速分布は $1/N$ 乗則 $[u/U = (y/\delta)^{1/N}]$ で近似される。この図に示されるように、与えられた θ と S/d_c に対して相対流下距離 x/d_c に関わらず N の値はほぼ一定値になっている。 N の値については、Takahashi and Ohtsu は擬似等流空気混入流を対象に実験式[(1)式]を提案²⁾している。

$$N = 14\theta^{-0.65} \frac{S}{d_c} \left(\frac{100}{\theta} \frac{S}{d_c} - 1 \right) - 0.041\theta + 6.27 \quad (\theta \text{ in deg.}) \quad (1)$$

(1)式から N の値を求め、 $1/N$ 乗則 $[u/U = (y/\delta)^{1/N}]$ を用い

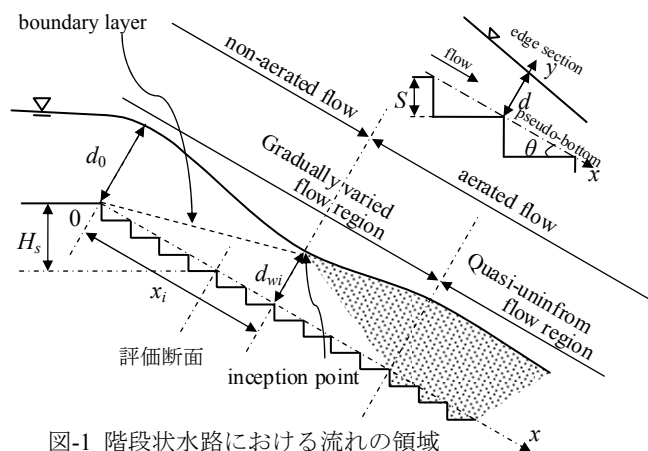


図-1 階段状水路における流れの領域

表-1 実験条件

$\theta(^{\circ})$	$S(\text{cm})$	$H_{\text{dam}}(\text{cm})$	S/d_c
19, 30	0	36	0
	1.5	36	0.2~0.3
	3	36	0.4~0.5
	6	36	0.8~0.9
55	0.3	60	0.034
	2.5	60	0.3

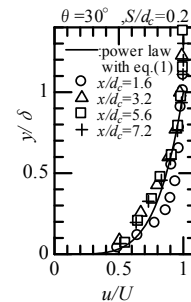


図-2 流速分布

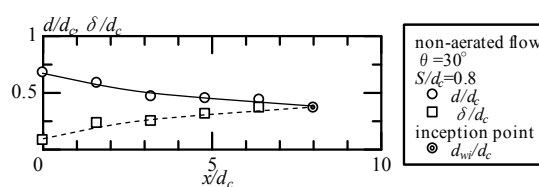


図-3 水面形状と乱流境界層厚さの一例

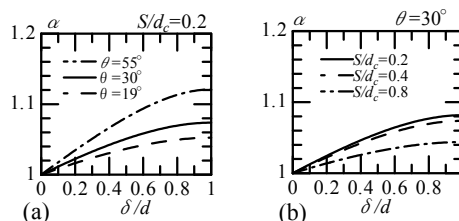


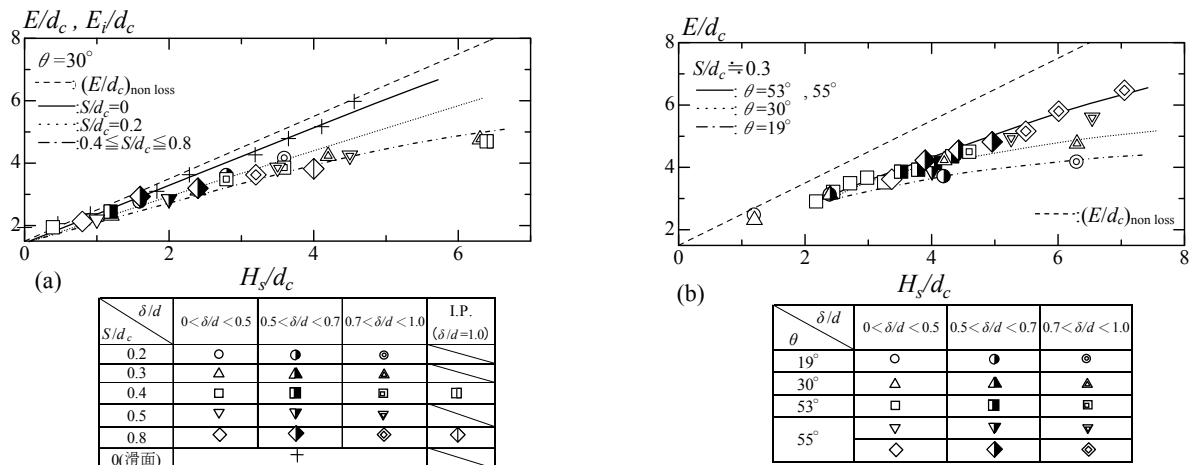
図-4 エネルギー補正係数 α : (a) $S/d_c=0.2$, (b) $\theta=30^\circ$

て得られた u/U を図-2の実線に示す。図に示されるように、実線と実測値はほぼ一致している。すなわち、本実験範囲(表-1)において N の値はaerated flowおよびnon-aerated flowに関わらず(1)式によって定まることが示された。

図-3にnon-aerated flowの水面形状と乱流境界層の発達状態の一例を示す。図に示されるように乱流境界層厚さ δ/d_c は流下方向に増加し、水深 d/d_c は流下方向に減少する。

キーワード 階段状水路, 比エネルギー, skimming flow, 乱流境界層

連絡先: 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14 Tel. & Fax. 03-3259-0676

図-5 相対比エネルギー E/d_c (a) $\theta=30^\circ$, (b) $S/d_c=0.3$

なお, $\delta/d_c=d/d_c$ となった断面は限界点(C.P.)であり, 本実験結果では空気混入開始断面(I.P.)とC.P.の位置はほぼ等しい. また, $x/d_c=0$ のときの d/d_c は θ と S/d_c に関わらず $d/d_c \approx 0.7$ となっている. さらに δ/d_c は, 傾斜始端($x=0$)で $0.06 \leq \delta/d_c \leq 0.09$ となっていることが認められる.

評価断面をエッジ断面(図-1 参照)と定義すると non-aerated flow の比エネルギー E は次式で示される.

$$E = d \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

ここに, V は断面平均流速($V = q/d$), α はエネルギー補正係数であり(3)式によって求められる.

$$\alpha = \int_0^d \left(\frac{u}{V} \right)^3 \frac{dA}{A} \quad (3)$$

さらに, α は $1/N$ 乗則と(3)式より次式で示される.

$$\alpha = \frac{1}{d} \left\{ \int_0^{\delta} \left(\frac{u}{V} \right)^3 dy + \int_{\delta}^d \left(\frac{U}{V} \right)^3 dy \right\} = \frac{\left(1 - \frac{3}{N+3} \frac{\delta}{d} \right)}{\left(1 - \frac{1}{N+1} \frac{\delta}{d} \right)^3} \quad (4)$$

また, (1)式から求めた N の値を(4)式に代入することにより, 図-4の各線が得られる. 図に示されるように, 与えられた θ と S/d_c に対して δ/d が増加すると α も増加する. また, 図-4(a)に示されるように, 与えられた S/d_c と δ/d に対して θ が大きくなると α は大きくなる. さらに, 図-4(b)に示されるように与えられた θ と δ/d に対して S/d_c が大きくなると α は小さくなる.

non-aerated flow の相対比エネルギー E/d_c は(5)式で示される.

$$\left(\frac{E}{d_c} \right) = \frac{d}{d_c} \cos \theta + \frac{\alpha}{2} \left(\frac{d_c}{d} \right)^2 \quad (5)$$

クレスト天端から評価断面までの鉛直距離を H_s とし(図-1 参照), 各 H_s における d と δ の測定値を用いて(1), (4), (5)式から求まる E/d_c を $[E/d_c = f(\theta, S/d_c, H_s/d_c)]$ の関係で整理したものを図-5に示す. なお, 図-5中の破線はポテンシャル流とした場合の相対比エネルギー $(E/d_c)_{\text{non-loss}}$ を示す. 図-5に示されるように, 与えられた θ と S/d_c に対して H_s/d_c の増加に伴い相対エネルギー E/d_c は増加する.

図-5(a)に示されるように, $\delta/d < 0.5$ では与えられた θ と H_s/d_c に対して, S/d_c の E/d_c への影響は小さく, $(E/d_c)_{\text{non-loss}}$ の値と実験値は近い値を示している. $0.5 < \delta/d < 0.7$ では $(E/d_c)_{\text{non-loss}}$ の値よりも E/d_c は小さい値を

示し, E/d_c に対して S/d_c の影響がある程度効いてくる. さらに, $\delta/d > 0.7$ では E/d_c に対する S/d_c の影響が大きくなる. なお, 図-5におけるI.P.の空気混入流の比エネルギー E_i はTakahashi and Ohtsuの方法²⁾を用いて求められた.

図-5(b)に相対比エネルギー E/d_c の流下方向変化(H_s/d_c)に対する水路傾斜角度 θ の影響を示す. 図に示されるように乱流境界層が発達し $\delta/d > 0.7$ になると, 与えられた H_s/d_c と S/d_c に対して θ が小さいほど E/d_c は小さくなる. これは, θ を小さくすると相対流下距離 x/d_c が増加するためエネルギー損失が大きくなり, E/d_c は小さくなったものと考えられる. また, θ が大きくなると流れがステップ水平面に衝突しにくくなり, 流水抵抗が小さく, E/d_c が大きくなったためと考えられる.

4. まとめ

水路傾斜角度 $\theta = 19^\circ, 30^\circ, 55^\circ$ の non-aerated skimming flow を対象に比エネルギー E の大きさを検討した結果を以下に示す.

- ① non-aerated flow の乱流境界層内の流速分布は $1/N$ 乗則で近似され, N の値は擬似等流の aerated flow の N の値と等しく, (1)式によって求められる.
- ② 乱流境界層発達中のエネルギー補正係数 α は(4)式によって求められる. すなわち, 与えられた N と δ/d に対して乱流境界層発達中のエネルギー補正係数 α が算定可能となった.
- ③ 図-5 から $\delta/d < 0.5$ では相対比エネルギー E/d_c に対する θ と S/d_c の影響は小さい. また, ポテンシャル流として求めた $(E/d_c)_{\text{non-loss}}$ の値と実験値は近い値を示す. 一方, $\delta/d > 0.7$ では E/d_c に対する θ と S/d_c の影響が大きくなる. すなわち, 乱流境界層厚さ δ/d の発達に伴って相対比エネルギー E/d_c に対する水路傾斜角度 θ および相対ステップ高 S/d_c の影響が大きくなることが明らかにされた.

謝辞

著者の一人(高橋正行)は本研究の一部に科研費(24560628)の助成を受けた. ここに記して謝意を表します.

参考文献

- 1) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Takahashi, M.: "Flow characteristics of skimming flows in stepped channels.", *J. Hydr. Eng.*, 130(9), 860-869, 2004.
- 2) Takahashi, M., Ohtsu, I.: "Aerated flow characteristics of skimming flow over stepped chutes.", *J. Hydr. Res.*, 50(4), 427-434, 2012.
- 3) 高橋, 大津: "階段状水路における空気混入不等流解析", 土木学会論文集 B1(水工学), 69(4), I_913-I_918, 2013.