

階段状水路における nonaerated skimming flow の流速特性の実験的検討

日本大学大学院
日本大学理工学部

学生会員 ○藏重 敬輔
正 会 員 高橋 正行

はじめに

階段状水路は、ダムや堰などの落差を伴う構造物や急斜面の水路を流下する高速流を斜面上で減勢させる方法として利用されている^{1),2)}。階段状水路において形成される流況は、水路傾斜角度 θ 、相対ステップ高さ S/d_c (S :ステップ高さ, d_c :限界水深 [$d_c = \sqrt[3]{q^2/g}$], g :重力加速度, q :単位幅流量) により変化する。階段状水路で比較的大流量の越流が生じる場合には skimming flow (階段状の隅角部で常に渦の形成が認められる流況) が形成¹⁾される。階段状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 (以下 I.P. と略す) と呼び、その上流側は nonaerated skimming flow, 下流側は aerated skimming flow に分類される (図 1)。I.P. より下流側では空気混入不等流 (図 1②) となり、ある程度の距離を流下すると擬似等流空気混入流 (図 1③) となる。

山元ら³⁾は階段状水路の nonaerated skimming flow を対象に乱流境界層厚に関する合理式を示し、さらに水面形方程式を導いた。また、 $x/d_c \gtrsim 5$ の nonaerated skimming flow におけるエネルギー減勢は平坦な傾斜水路に比べて大きいことを明らかにした。この場合、乱流境界層内の流速分布は流下方向に変化しないものと仮定している。この仮定について検討するため、本報告では、階段状水路の nonaerated skimming flow の流速分布と乱れ強さの分布の流下方向の変化について実験的検討を加えた。

実験

実験は、nonaerated skimming flow を対象に表 1 に示される実験条件のもとに行われた。ここで、 θ は階段状水路の傾斜角度、 H_{dam} は模型ダム高さ、 R_e はレイノルズ数 ($R_e = q/\nu$; q は単位幅流量, ν は水の動粘性係数) である。瞬間流速 u はレーザードップラー流速計を用いて測定し (測定時間 120 sec)、水深 d はポイントゲージを用いて測定した。

流速分布と乱れ強さ分布の流下方向変化

Edge section (図 1) において、流速分布を $\bar{u}/U = f(y/\delta)$ の関係で整理した一例を図 2(a) に、乱れ強さの分布を $\sqrt{u'^2}/U = f(y/\delta)$ の関係で整理した一例を図 2(b) に示す。ここに、 δ は乱流境界層厚さ、 $\bar{u}$ は時間平均流速、 U は境界層外縁流速、 $\sqrt{u'^2}$ は乱れ強さである。また、 δ は $0.99U \leq \bar{u} < U$ で、乱れ強さの大きさがほぼ一様となる厚さと定義している。図 2(a) より、

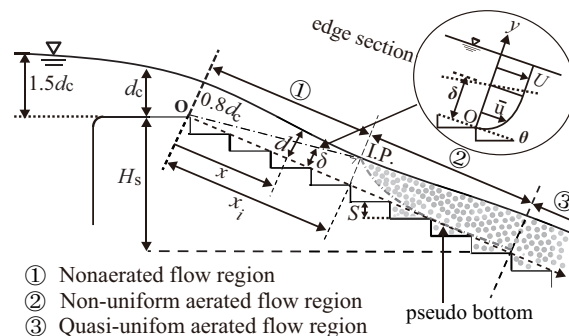
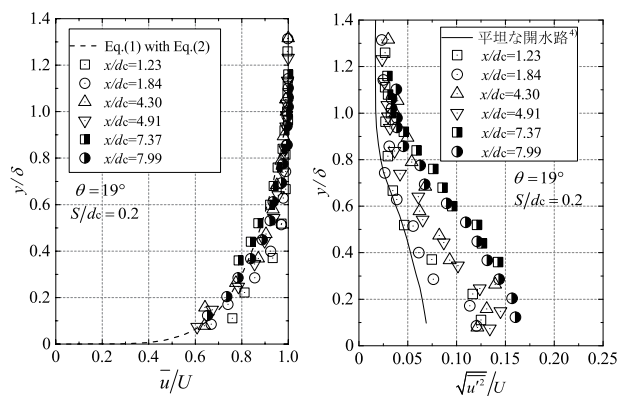


図 1: Skimming flow における流れの領域図

表 1: 実験条件

$\theta(^{\circ})$	$S(\text{cm})$	$H_{\text{dam}}(\text{cm})$	S/d_c	R_e
19	0.5	60	0.1	35000
	1.5		0.2	64000
	6.0	76	0.6	99000
			0.8	64000



(a) 流速分布

(b) 乱れ強さの分布

図 2: 流下方向の変化 [$\theta = 19^{\circ}$, $S/d_c = 0.2$]

乱流境界層内の流速分布は (1) 式に示す指数則

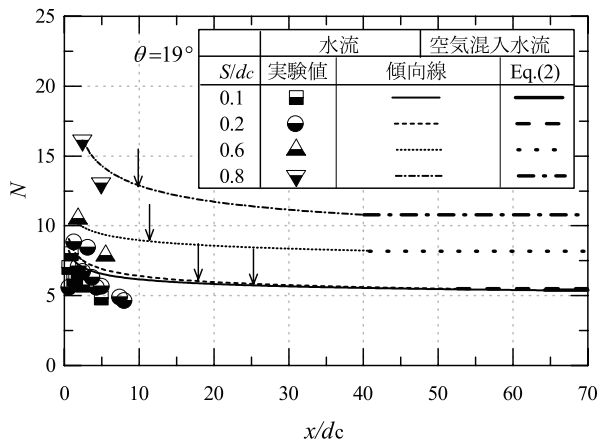
$$\frac{\bar{u}}{U} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{(1/N)} \quad (0 \leq y/\delta \leq 1) \quad (1)$$

で近似される。

Takahashi and Ohtsu⁵⁾ は aerated skimming flow の擬似等流空気混入区間における N の値を求める実験式を次のように提案している。

キーワード: 階段状水路, nonaerated skimming flow, 流速, 乱れ強さ

連絡先: 〒 101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8 日本大学理工学部土木工学科 Email: masayuki@civil.cst.nihon-u.ac.jp

図 3: N の流下方向の変化 (↓: I.P.)

$$N = 14\theta^{-0.65} \frac{S}{d_c} \left(\frac{100}{\theta} \frac{S}{d_c} - 1 \right) - 0.041\theta + 6.27 \quad (2)$$

(1), (2) 式より得られた $\bar{u}/U$ を図 2(a) の破線に示す. 図 2(a) に示されるように, 破線に対して $x/d_c \lesssim 5$ での流速分布の N の値はいくぶん大きくなっている. 一方, $x/d_c \gtrsim 5$ での流速分布は (1), (2) 式より得られた結果をおおむね満足している.

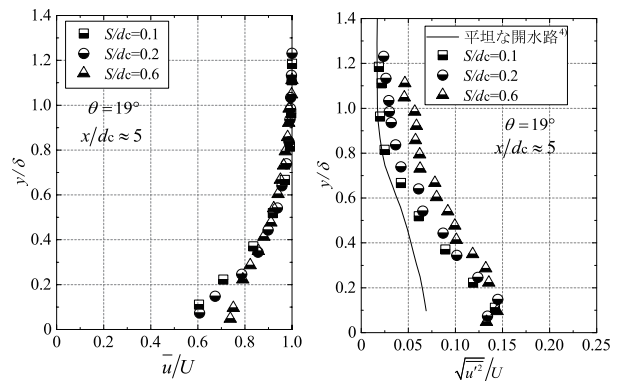
Nonaerated skimming flow 区間での N の実験値の流下方向変化を図 3 に示す. (2) 式で得られる擬似等流空気混入流における N の値を図 3 の太線で示す. 図 3 に示されるように, 与えられた $\theta, S/d_c$ に対して $x/d_c \lesssim 5$ での N の値は (2) 式から得られる値より, いくぶん大きな値を示す. また, $x/d_c \gtrsim 5$ での N の値はおおむね (2) 式を満足する.

Edge section における乱流境界層内での乱れ強さの大きさは, 図 2(b) に示されるように, x/d_c が大きくなるにしたがい大きくなる. また, 仮想底面近くでは, 平坦な開水路の乱れ強さ (図 2(b) 実線) に比べておよそ 2 倍の大きさになった. これは, 水路を階段状にしたことによって, 階段のステップ上に流れが衝突したことでステップエッジ断面での乱れ強さの大きさに影響をおよぼしたためと考えられる. なお, 乱流境界層外での乱れ強さの大きさは, 流下距離によらず一定の値となった.

流速分布と乱れ強さ分布への相対ステップ高さによる影響

与えられた $\theta, x/d_c$ に対する相対流速 $\bar{u}/U$ 分布の相対ステップ高さ S/d_c による変化を図 4(a) に, 相対乱れ強さ $\sqrt{u'^2}/U$ 分布の S/d_c による変化を図 4(b) に示す.

図 4(a) に示されるように, 与えられた $\theta, x/d_c$ に対して, S/d_c が大きくなるにつれて, N の値は大きくなっている. また, 図 4(b) に示されるように, 与えられた $\theta, x/d_c$ に対して, S/d_c が大きくなると $y/\delta < 0.3$ で乱れ強さの大きさが大きくなっている. これらは S/d_c の変化に伴い, ステップ水平部への主流の衝突領域 (impact region) の位置が変化し, ステップエッジ



(a) 流速分布

(b) 乱れ強さの分布

図 4: 相対ステップ高さの変化 [$\theta = 19^\circ, x/d_c \approx 5$]

断面での流速や乱れ強さの大きさに影響を与えたためと考えられる.

おわりに

水路傾斜角度 $\theta = 19^\circ$, 相対ステップ高さ $S/d_c = 0.1 \sim 0.8$ の階段状水路における nonaerated skimming flow を対象に edge section での流速分布と乱れ強さの分布の流下方向変化について検討した結果を以下に示す.

- 乱流境界層内の流速分布を指数則 (1) 式で表すと, $x/d_c \lesssim 5$ では N の値は (2) 式から得られる値より, いくぶん大きな値を示す. 一方, $x/d_c \gtrsim 5$ では N の値はおおむね (2) 式と一致する.
- 与えられた $\theta, S/d_c$ に対して, 乱流境界層内の相対乱れ強さ $\sqrt{u'^2}/U$ の大きさは x/d_c が大きくなるにしたがい大きくなり, 平坦な開水路の場合に比べておよそ 2 倍の大きさになった. 乱流境界層外の乱れ強さの大きさについては x/d_c によらず一定となった.

謝辞: 著者の一人 (高橋正行) は本研究の一部に科研費 (16K06518) 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., Takahashi, M.: "Flow characteristics of skimming flows in stepped channels.", *J. Hydraul. Engrg.*, Vol. 130, No. 9, pp.860-869, 2004.
- 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) 山元雄生, 高橋正行, 大津岩夫: "階段状水路における non-aerated skimming flow の特性", 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 72, No. 4, pp. I_589-I_594, 2016.
- 4) Ohtsu, I., Yasuda, Y.: "Characteristics of supercritical flow below sluice gate" *J. Hydraul. Eng.*, Vol.120, No. 3, pp. 332-346, 1994.
- 5) Takahashi, M., Ohtsu, I.: "Aerated flow characteristics of skimming flow over stepped chutes", *J. Hydraul. Res.*, Vol. 50, No. 4, pp. 427-434, 2012.