

H3-14

階段状水路における nonaerated skimming flow の流速特性の実験的検討
Velocity characteristics of nonaerated skimming flows on stepped channels

○藏重敬輔¹, 高橋正行²

* Keisuke Kurashige¹, Masayuki Takahashi²

Abstract: Skimming flows in stepped spillways are classified into the nonaerated and aerated flow. Most experimental studies for stepped channels have focused on aerated skimming flows, and characteristics of nonaerated skimming flows have not yet been clarified. In order to analytically calculate the boundary layer thickness on stepped channels, it is necessary to know velocity characteristics in the nonaerated skimming flow. This report presents the turbulence intensity and the velocity distribution of the nonaerated skimming flow.

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傾斜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では乱流境界層が発達し、乱流境界層が水面に到達すると水面から空気が混入しはじめ、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 (Fig.1)。I.P. より下流側では空気混入不等流 (Fig.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 (Fig.1③) となる。

Takahashi and Ohtsu^[2] は擬似等流区間における流水抵抗, 空気混入率, 水深, 流速特性を明らかにした。また, 高橋ら^[3] は aerated flow の不等流区間の水面形方程式を導出し, その適用性についても示した。Aerated flow の不等流区間の水面形方程式を用いて解析的に水深と空気混入率を求めるためには, 境界条件として I.P. までの流下距離とそこでの水深が必要である。すなわち, nonaerated flow の水深, 流速, 境界層の発達状態の解明が求められている。現在, 境界層方程式を用いて境界層厚の流下方向変化を解析的に得ることを試みているものの, nonaerated flow の流速特性が明らかにされていない。

本報告では, 階段状水路の nonaerated flow の乱れ強さの分布と流速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 Table.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} はダム高さ, Re_e はレイノルズ数 ($Re_e = q/\nu$; 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 Doppler 流速計 (測定時間 120 sec) を用いて測定した。

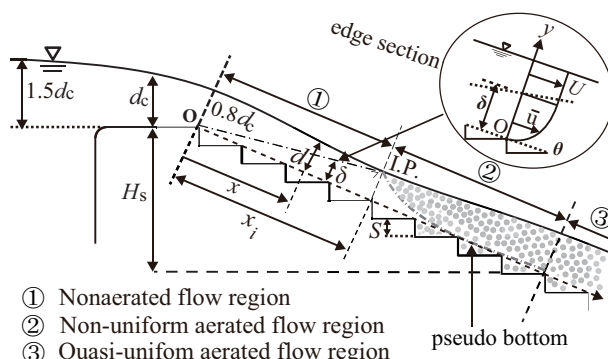
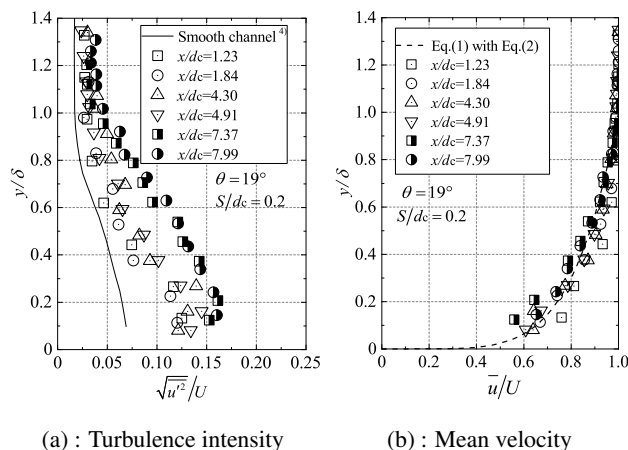


Figure1 : Flow regions of the skimming flow

Table1 : Experimental conditions

$\theta(^{\circ})$	$H_{dam}(cm)$	$S(cm)$	S/d_c	$Re_e * 10^{-4}$
19	60	0.5	0.1	4
		1.5	0.2	6
	76	6.0	0.6	10
			0.8	6



(a) : Turbulence intensity (b) : Mean velocity
Figure2 Velocity characteristics in the nonaerated skimming flow

乱れ強さ分布と流速分布の流下方向変化

Edge section(Fig.1) の乱れ強さの分布を $\sqrt{u'^2}/U=f(y/\delta)$ の関係で整理した一例を Fig.2a に、流速分布を $\bar{u}/U=f(y/\delta)$ の関係で整理した一例を Fig.2b 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 $u=0.99U$ となる高さで定義されている。

Fig.2a に示されるように、 $x/d_c \leq 5$ での edge section における乱流境界層内での乱れ強さの大きさは、与えられた $\theta, S/d_c$ に対して x/d_c が大きくなるにしたがい大きくなる。また、 $x/d_c \geq 5$ での乱れ強さの大きさと分布は x/d_c の影響を受けず、ほぼ同一になっている。 $x/d_c \geq 5$ の仮想底面近くでは、平坦な開水路の乱れ強さ (Fig.2a 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。

乱流境界層内 ($y \leq \delta$) の流速分布は、Fig.2b より、

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

で近似される。Fig.2b に示されるように、与えられた $\theta, S/d_c$ に対して $x/d_c \leq 5$ での流速は仮想底面付近まで大きくなっており、この条件では $N \approx 8$ 程度になっている。また、 x/d_c が大きくなるにしたがい、 N の値は小さくなっていき、 $x/d_c \geq 5$ になると x/d_c の影響を受けず、ほぼ同じ流速分布形状を示している。Takahashi and Ohtsu^[5] は aerated skimming flow の擬似等流空気混入流区間における N の値を求める実験式を次のように提案している。

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

(1), (2) 式より得られた \bar{u}/U を Fig.2b の破線に示す。すなわち、流下距離がある程度大きくなり、流速分布の形状の変化が小さくなると、擬似等流区間の流速分布とほぼ等しくなる。

階段状水路における N の実験値の流下方向変化を Fig.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 Fig.3 の太線で示す。Fig.3 に示されるように、与えられた $\theta, S/d_c$ に対して $x/d_c \leq 5$ 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 が大きくなるにしたがい、 N の値は小さくなっている。一方、 $x/d_c \geq 5$ での N の値の流下方向変化は小さくおおむね (2) 式を満足する。これは、階段状水路に流入したばかりの領域では、流速分布に対して流入部の形状の影響があったためと考えられる。

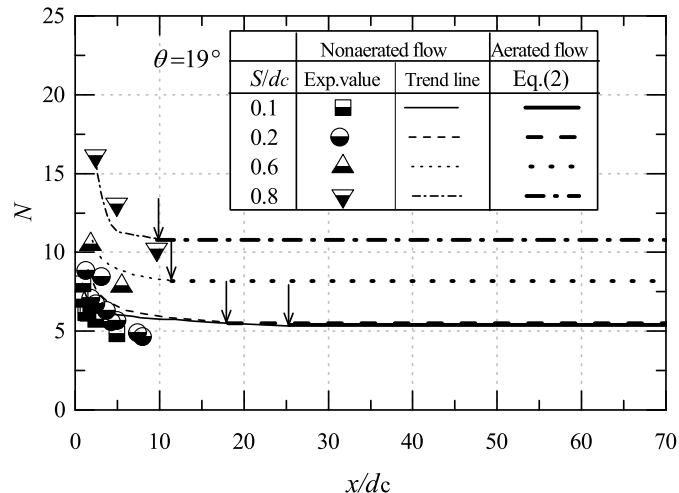


Figure3 : Change in N with x/d_c (↓ : I.P.)

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実験的検討した結果を以下に示す。

- 与えられた $\theta, S/d_c$ に対して、 $x/d_c \leq 5$ での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る。一方、 $x/d_c \geq 5$ では乱れ強さの大きさと分布はほぼ同一になり、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。
- 乱流境界層内の流速分布を (1) 式で表すと、 $x/d_c \leq 5$ では N の値は (2) 式から得られる値よりいくぶん大きく、 x/d_c の増加に伴い N の値は小さくなる。一方、 $x/d_c \geq 5$ では N の値はおおむね (2) 式と一致する。

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] 高橋正行, 竜沢宗一郎, 大津岩夫: "階段状水路の skimming flow における空気混入不等流の水力特性", 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 73, No. 4, pp. I_721-I_726, 2017.
- [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.