

H3-15

階段状水路の skimming flow におけるステップ水平部の棧設置の影響について

Effect of roughness element attached to horizontal steps on characteristics of skimming flows in stepped channels

○田中直哉¹, 高橋正行²

*Naoya Tanaka¹, Masayuki Takahashi²

Abstract: The effect of step roughness on the flow characteristics remain unknown despite the practical relevance to damaged concrete steps. New measurements were conducted in laboratory facility with two step conditions (smooth and rough). Detailed nonaerated flow properties were measured for some flow rate, demonstrating that the inception point of free-surface aeration is located shorter length than for the smooth stepped channel under a given flow rate. In the nonaerated flow region, the velocities on rough-step channels were smaller than those of smooth channel for a given flow rate.

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のときは skimming flow (階段状の隅角部で常に渦が形成される流れ) が形成^[1]される。階段状水路に流入した流れ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る。この位置は inception point (以下 I.P. と略す) と呼ばれる。I.P. より上流側では nonaerated skimming flow が形成され、I.P. より下流側では aerated skimming flow が形成 (Fig.1) される。

棧をステップ水平面に設置したことによる skimming flow の水深、流速、および I.P. の位置の変化を知ることは、ステップ面に設置された棧によって平坦なステップ面に比べて流速を変化させたり、I.P. までの距離を変化させるための方法として、工学的に寄与できるものと考えられる。また、階段状水路を長期間使用していると、磨耗等によってステップ水平面に凹凸を生じることがある。しかしながら、ステップ面に凹凸が生じた場合の階段状流れの水理特性は明らかにされていない。

本報告は、階段状水路のステップ水平面に設置された棧が階段状水路流れの水理特性 (水深、流速、乱れ強さ、および空気混入開始位置) に与える影響について実験的検討を加えたものである。

実験

実験は、水路傾斜角度 $\theta=19^\circ$ 、ステップ高さ $S=6$ (cm)、高さ $H_{\text{dam}}=76$ (cm) の模型を用い、単位幅流量 q を $q=0.0643$ (m^2/s) と $q=0.0990$ (m^2/s) に変化させて行われた。これらのときの相対ステップ高さ S/d_c は $S/d_c=0.8$ と $S/d_c=0.6$ であった。また棧をつけていない場合を case A (Fig.2(a)) とし、ステップ水平面に棧を取り付けた場合を case B (Fig.2(b)) とした。ここに、棧間隔は $L=5.2$ (cm)、棧高さは $k=0.5$ (cm)、棧の幅は $t=0.6$ (cm) を用いた。このとき、 $t/k=1.2$, $L/k=10.4$, $S/k=12$ であった。流速 u の測定には L.D.V. を用い (測定時間 120 sec)、水深 d の測定にはポイントゲージを用いた。また、I.P. の位置は水面において常に空気が水路横断方向に混入する最上流断面と定義し、目視観察によって定めた。

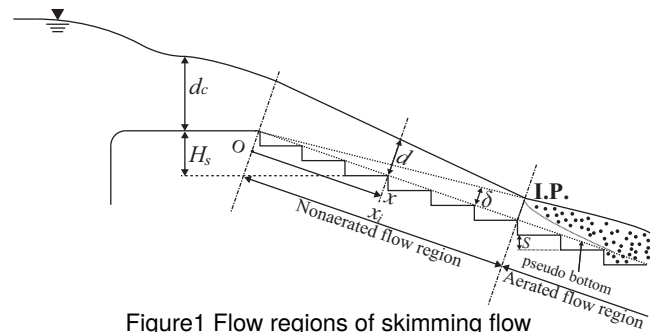


Figure1 Flow regions of skimming flow

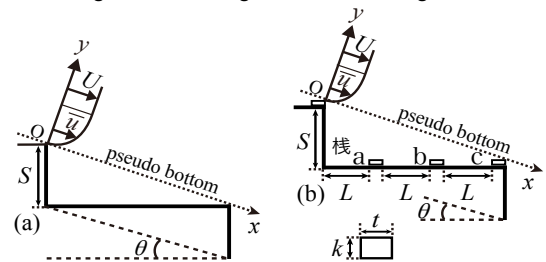


Figure2 Roughness element position

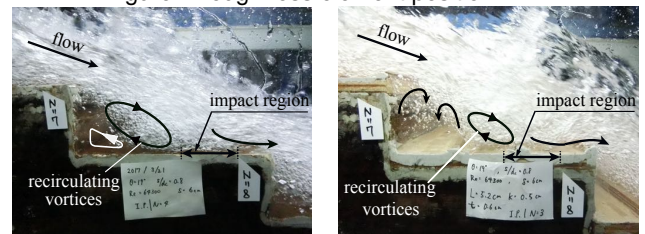


Figure3 Case A : cavity located between step edges Figure4 Case B : cavity located between step edges

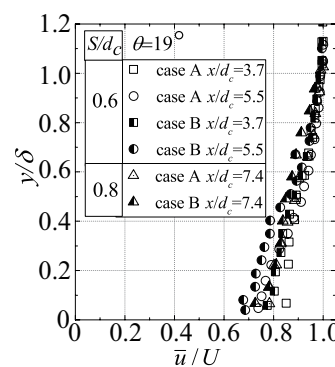


Figure5 Mean velocity

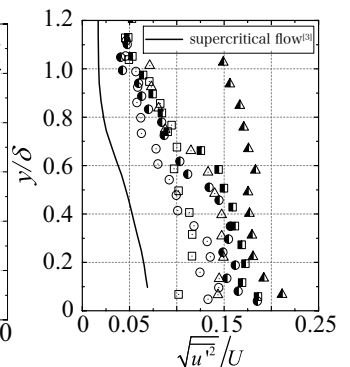


Figure6 Turbulence intensity (symbols as in Fig.5)

1: 日大理工・院 (前)・土木, 2: 日大理工・教員・土木

ステップ隅角部内の流況

Aerated flow 領域での隅角部内の流況の一例として case A の場合を Fig.3 に, case B の場合を Fig.4 に示す. Fig.3 に示されるように, case A の場合, 主流はステップ水平面に impact region で衝突し, 上・下流側に流れが分けられ, 上流側に分けられた流れによって隅角部内に常に渦 (recirculating vortices) が形成されている. case B の場合, Fig.4 に示されるように, impact region で上・下流側に主流は分けられる. 上流側に分けられた流れによって常に渦 (recirculating vortices) が形成されるものの, 棧 a (Fig.2 参照) の下流側で case A の場合よりも狭い領域で形成されている. 棧 a とステップ鉛直面の間の領域では, 形成されている渦の大きさや個数が非定常的に変化し, case A の場合よりも複雑な流況が観察される. また, impact region で下流側に分けられた流れが edge 断面の棧によって上方に曲げられ, edge 断面での主流が乱されている様子が観察される.

流速特性

Fig.5 に nonaerated flow の edge 断面での乱流境界層内の流速分布を $\bar{u}/U=f(y/\delta)$ の関係で整理した一例を示す. ここに, δ は乱流境界層厚, U は境界層外縁流速, \bar{u} は時間平均流速である. また, δ は $\bar{u}=0.99U$ となる厚さと定義している. 与えられた θ , S/d_c , x/d_c に対して, $y/\delta \leq 0.6$ では \bar{u}/U の値が case A と比べて case B の方が小さくなっている.

Fig.6 に nonaerated flow の edge 断面で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示す. ここに, u' は x 方向の変動流速である. Fig.6 に示されるように, case A および case B のどちらの場合の乱れ強さの大きさでも平坦な開水路射流の場合よりも大きくなる. これは, 水路を階段状にしたことで, 階段のステップ上に流れが衝突したことにより乱れ強さが大きくされたためと考えられる. Fig.6 に示されるように, 与えられた θ , S/d_c , x/d_c , y/δ のとき case A よりも case B の $\sqrt{u'^2}/U$ は大きくなる. これはステップ水平面に設置された棧が隅角部内の流況を変化させたことによって edge 断面の乱れ強さを大きくしたためと考えられる. なお, $\theta = 19^\circ$, $S/d_c = 0.8$, $x/d_c = 7.4$ の case B の $\sqrt{u'^2}/U$ の値が $y/\delta \approx 1$ 近くでも大きくなっているのは, I.P. 近くであったためと考えられる.

乱流境界層の発達状態および水面形

Nonaerated flow の水深を $d/d_c=f(x/d_c, \theta, S/d_c, \text{case A or case B})$ の関係で, 乱流境界層厚さを $\delta/d_c=f(x/d_c, \theta, S/d_c, \text{case A or case B})$ の関係で整理した結果を Fig.7 に示す. また, case A の nonaerated skimming flow の乱流境界層厚の合理式と水面形方程式は山元ら^[4] によって示されており, それらの方法を用いると Fig.7 の各線のように求められる. Fig.7 に示されるように, 与えられた θ , S/d_c に対して, x/d_c の値が大きくなると δ/d_c の値は大きくなる. また, 与えられた θ , S/d_c , x/d_c に対して, δ/d_c および d/d_c の値は case A に比べて case B の方が大きくなる. すなわち, case B の場合, 棧設置によって主流の乱れが大きくなり δ/d_c が短区間で大きくなったものと考えられる. さらに, case B の乱れは case A よりも大きいため,

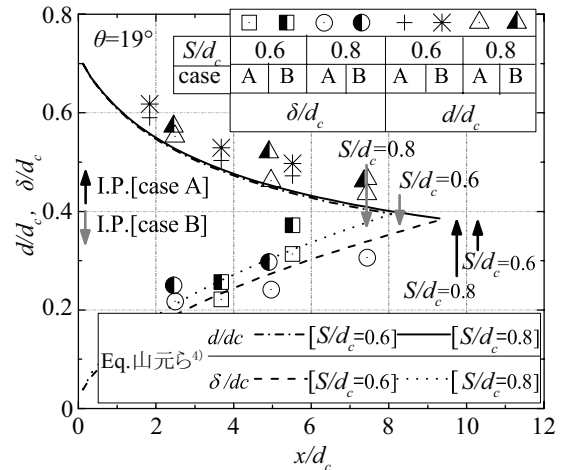


Figure7 Free surface and boundary layer profile

case B の d/d_c は case A の d/d_c よりも大きくなったものと考えられる.

Case A と case B の I.P. を Fig.7 に示す. Fig.7 より, 与えられた θ , S/d_c に対して, case B の I.P. は case A の I.P. よりも上流側に移動している. これは, ステップ水平面に設置された棧の影響によって乱流境界層が短区間で発達するようになり, I.P. が上流側に移動したためと考えられる.

おわりに

水路傾斜角度 $\theta = 19^\circ$ で相対ステップ高さ $S/d_c = 0.6$ および 0.8 の階段状水路を対象に, ステップ水平部が平坦な場合 (case A) とステップ水平部に棧を設置した場合 (case B) の水理特性について検討した. すなわち, ステップ水平面の棧が隅角部内の流況, 水深, 流速, 乱れ強さ, および乱流境界層の発達状態に与える影響について調べた. 棧を設置したことで, 隅角部内での recirculating vortices の形成領域が狭くなることが観察され, 主流の乱れが大きくなることが示された. また, case B の場合は case A の場合に比べて, nonaerated flow 領域でのエッジ断面での乱流境界層内の速度勾配は大きく, 相対乱れ強さも大きくなり, 水深は大きくなることが示された. さらに, 乱流境界層が発達して水面に到達し空気混入する断面である inception point は棧設置によって上流側に移動することが示された.

謝辞: 著者の一人 (高橋正行) は本研究の一部に科研費 (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., and 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] Ohtsu, I., Yasuda, Y. : "Characteristics of supercritical flow below sluice gate." , *J. Hydraul. Eng.*, Vol.120, No.3, pp332–346, 1994.
- [4] 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), Vol72, No. 4, pp. I_ 589-I_ 594, 2016.