

階段状水路におけるステップ水平部の棧粗度設置の影響について

日本大学大学院 学生会員 ○田中 直哉
日本大学理工学部 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れ) が形成¹⁾される。階段状水路の skimming flow において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 (図1) される。

棧粗度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粗度要素によって平坦なステップ面よりも流速を遅くさせたり、I.P. までの距離を短く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。

本報告は、階段状水路のステップ水平面に設置された棧粗度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

実験は表 1, 2 に示される条件のもとで行われた。ここで、 H_{dam} は模型ダム高さ、 q は単位幅流量、 L は粗度間隔、 k は粗度高さ、 t は棧粗度の幅、 t/k は棧粗度の高さとの比であり、 L/k は棧粗度の間隔と粗度高さの比である (図 2)。棧粗度をつけていない場合を case A (図 2(a)) とし棧粗度をつけた場合を case B (図 2(b)) とする。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。

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 の場合を図 3 に、case B の場合を図 4 に示す。図 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、図 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、棧粗度 a (図 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。棧粗度 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

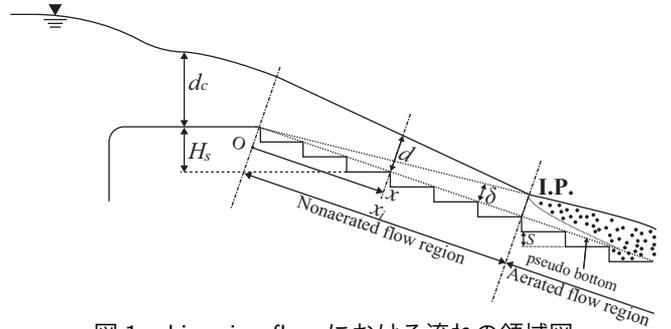


図 1: skimming flow における流れの領域図

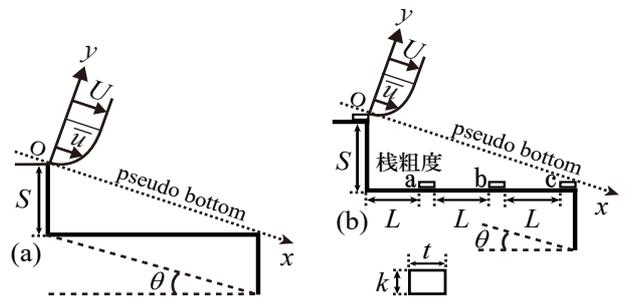


図 2: 棧粗度の設置位置

表 1: 実験条件

| $\theta(^{\circ})$ | $S(\text{cm})$ | $H_{dam}(\text{cm})$ | S/d_c | $q(\text{m}^2/\text{s})$ |
|--------------------|----------------|----------------------|---------|--------------------------|
| 19 | 6.0 | 76 | 0.6 | 0.0990 |
| | | | 0.8 | 0.0643 |

表 2: 棧粗度諸元

| $L(\text{cm})$ | $k(\text{cm})$ | $t(\text{cm})$ | t/k | L/k | S/k |
|----------------|----------------|----------------|-------|-------|-------|
| 5.2 | 0.5 | 0.6 | 1.2 | 10.4 | 12 |

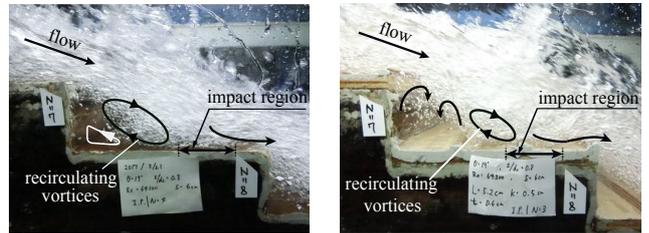


図 3: case A のステップ隅角部内の流況 図 4: case B のステップ隅角部内の流況

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 断面の棧粗度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。

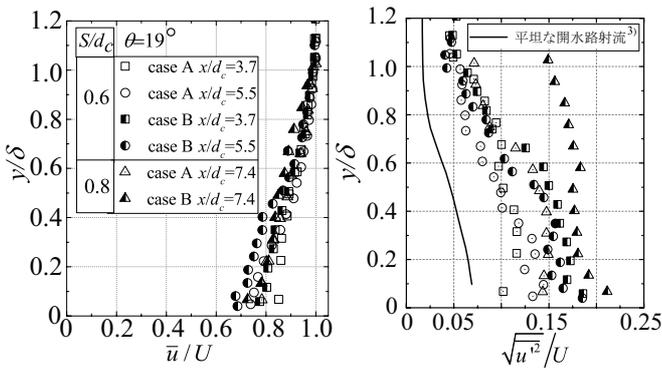


図 5: 流速分布

図 6: 乱れ強さ分布 (凡例は図 5 と同じ)

流速分布

図 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 $\theta, S/d_c, x/d_c$ 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。

乱れ強さ分布

図 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。図 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。図 6 に示されるように、与えられた $\theta, S/d_c, x/d_c, y/\delta$ 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栈粗度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 caseB 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図 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図 7 の各線のように求められる。図 7 に示されるように、与えられた $\theta, S/d_c$ 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 $\theta, S/d_c, x/d_c$ 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、栈粗度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、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

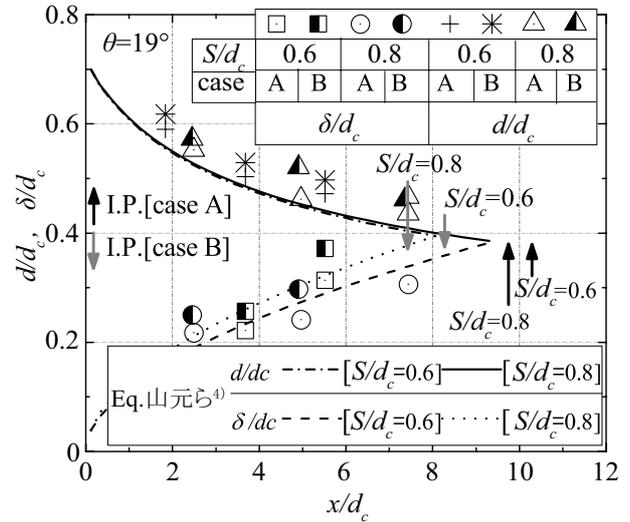


図 7: 水面形状と境界層

られる。

Case A と case B の I.P. を図 7 に示す。図 7 より、与えられた $\theta, S/d_c$ 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栈粗度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栈粗度を設置した場合 (case B) の水理特性について検討した。すなわち、ステップ水平面の栈粗度が隅角部内の流況、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。栈粗度を設置したことで、隅角部内での recirculating vortices の形成領域が狭くなり、主流が大きく乱されていることが観察された。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 は栈粗度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

- 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.
- Takahashi, M., Ohtsu, I.: "Aerated flow characteristics of skimming flow over stepped chutes.", *J. Hydraul. Res.*, Vol.50, No.4, pp.427-434, 2012.
- Ohtsu, I., Yasuda, Y.: "Characteristics of supercritical flow below sluice gate.", *J. Hydraul. Eng.*, Vol.120, No.3, pp.332-346, 1994.
- 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.