

H3-7

階段状水路のステップ水平部の棧が skimming flow の流況におよぼす影響

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

○田中直哉<sup>1</sup>, 高橋正行<sup>2</sup>

\*Naoya Tanaka<sup>1</sup>, Masayuki Takahashi<sup>2</sup>

Abstract: New measurements were conducted with three step conditions (smooth and two types of rough conditions). The depth of nonaerated flow were measured for some flow rate, showing that the depths on rough-step channels are larger than those of smooth channel for a given angle of channel slope, step height, and flow rate. Also, the inception point for the rough stepped channels is located more further upstream than that for the smooth stepped channel.

1 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勾配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<sup>[1],[2]</sup>。階段状水路において形成される流況は、水路傾斜角度  $\theta$ 、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) によって変化する。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<sup>[1]</sup>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。

階段状水路を長期間使用しているとステップ面が摩擦等によって凹凸を生じることが想定される。しかしながら、階段状水路のステップ水平面で凹凸が生じた場合の水利特性は明らかにされていない。

本研究は、階段状水路のステップ水平面の凹凸を階段状水路のステップ水平面に設置された棧でモデル化し、ステップ水平面に設置された棧が、階段状水路の流れの流況、水深、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。

2 実験

実験は、水路傾斜角度  $\theta=19^\circ$ 、ステップ一段の高さ  $S=6$  cm、総落差  $H_{\text{dam}}=76$  cm の階段状水路の模型を用い、単位幅流量  $q=0.0643$  m<sup>2</sup>/s と  $q=0.0990$  m<sup>2</sup>/s の条件で行われた。こ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。

全てのステップ水平面に棧をつけていない場合を case A (Fig.2(a)), 階段の全てのステップに棧を設置し、一つのステップ水平面に棧を3つ取り付け付けた場合を case B (Fig.2(b)), 階段の全てのステップエッジのみに棧を取り付けた場合を case C (Fig.2(c)) とした。なお、case B および case C の棧の寸法と設置条件を Table 1 に示す。

水路中央面の水深  $d$  の測定にはポイントゲージを用い、水深  $d$  の測定断面は edge 断面とした (Fig.1 参照)。また、階段状水路の隅角部に形成される渦の観察は空気混入流を対象に高速ビデオカメラを用いて撮影した画像をスロー再生して行われた。なお、I.P. は隅角部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

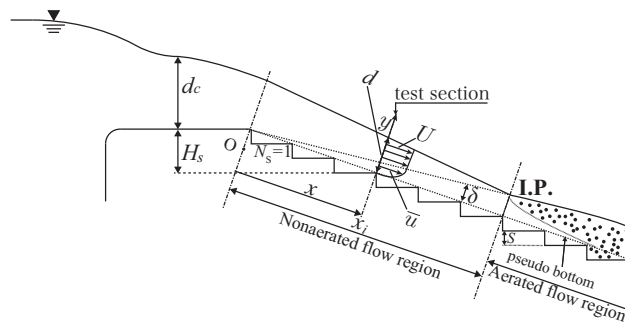


Figure 1. Flow regions of skimming flow

Table 1. Roughness elements conditions of cases B and C

	$\ell$ (cm)	$k$ (cm)	$t$ (cm)	$t/k$	$\ell/k$	$S/k$
case B	5.2	0.5	0.6	1.2	10.4	12
case C	-	0.5	0.6	1.2	-	12

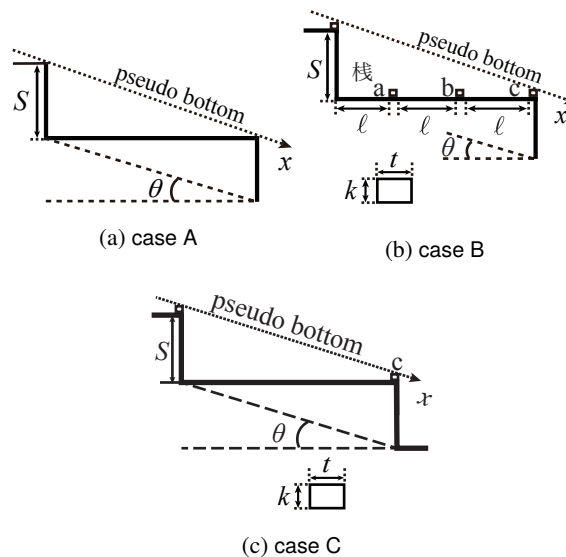


Figure 2. Roughness element position

義し、目視観察によって定めた。

3 ステップ隅角部内の流況

Aerated flow における隅角部内の case A, B, C の流況および impact region を Fig.3(a)~(c) に示す。ここに、 $N_s$  はダム堤頂を 0 段目とした段数、 $L_i$  はステップコーナーから impact region まで長さであり、 $L$  はステップ水平部の長さである。

1: 日大理工・院(前)・土木, 2: 日大理工・教員・土木

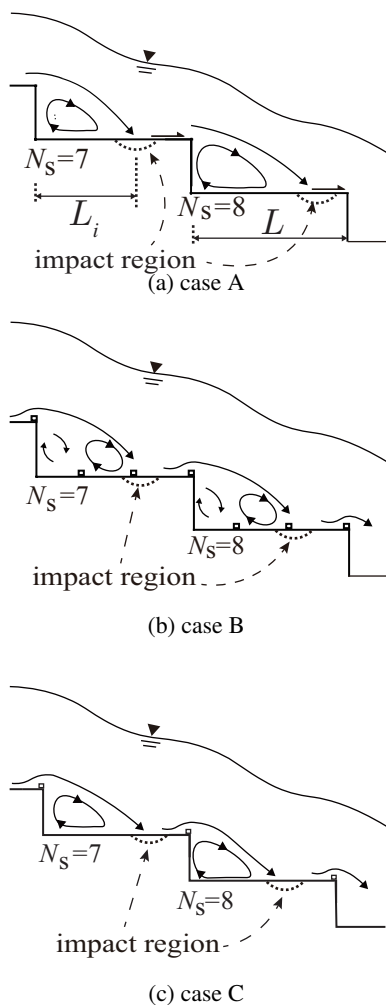


Figure 3. Flow conditions of aerated skimming flow

Case A の場合, Fig.3(a) に示されるように, 主流はステップ水平面で衝突し, 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に常に渦が形成される. 下流側に分けられた流れは, ステップ水平面に沿って流れている様子が観察される. 主流がステップ水平面に衝突する領域は impact region と呼ばれている<sup>[2]</sup>. また, Fig.3(a) に示されるように, impact region は  $N_s=7$  では  $0.5 < L_i/L < 0.7$  で形成され,  $N_s=8$  では  $0.7 < L_i/L < 0.85$  で形成される. このように impact region の形成される範囲が偶数段と奇数段とで異なる現象は, さらに下流側のステップでも確認された.

Case B の場合, Fig.3(b) に示されるように, 主流は impact region で上・下流側に分けられる. 上流側に分けられた流れによって渦が棧 a と棧 b の間に常に形成された. すなわち, case A の場合よりも狭い領域で渦が形成されている. 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. 下流側に分けられた流れは, 棧 c によって上方に曲げられている. また, Fig.3(b) に示されるように, impact region は,  $N_s=7$  および  $8$  とともに  $0.6 < L_i/L < 0.9$  で形成される. これは, 隅角部の渦の形成される範囲が棧 a と棧 b の間になったためと考えられる.

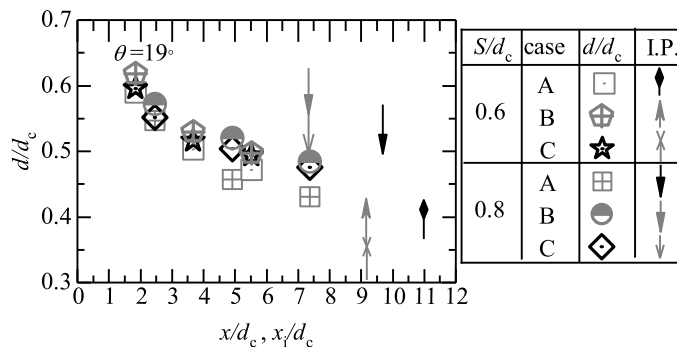


Figure 4. Depth and inception point of skimming flow

Case C の場合, Fig.3(c) に示されるように, 主流はステップ水平面で衝突し, 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に常に渦が形成される. 下流側に分けられた流れは, 棧 c によって上方に曲げられている様子が観察された. また, Fig.3(c) に示されるように, impact region は  $N_s=7$  では  $0.75 < L_i/L < 0.9$  で形成され,  $N_s=8$  では  $0.5 < L_i/L < 0.8$  で形成される. このように impact region の形成される範囲が偶数段と奇数段とで異なる現象は, さらに下流側のステップでも確認された. これは, case C の場合, 棧 a と棧 b がステップ水平面に設置されていないため, 偶数段と奇数段で隅角部に形成される渦の範囲が異なったためと考えられる.

#### 4 空気混入開始位置

Fig.4 に各 case の空気混入開始位置 (I.P.) までの流下距離  $x_i/d_c$  を示す. なお,  $x_i$  はダム堤頂 ( $N_s=0$  段目のステップ) から空気混入開始位置までの距離である (Fig.1 参照). Fig.4 に示されるように, 与えられた  $\theta$  と  $S/d_c$  に対して, case B と case C の  $x_i/d_c$  の値は case A の  $x_i/d_c$  の値よりも小さい. これは, ステップ水平面に設置された棧によって主流が乱され, 乱流境界層が短区間で発達したためと考えられる. また, case B と case C の  $x_i/d_c$  の値はほぼ一致している.

#### 5 水面形

Nonaerated flow の水深を  $d/d_c = f\{x/d_c, \theta, S/d_c, \text{case}\}$  の関係で整理した結果を Fig.4 に示す. Fig.4 に示されるように, 与えられた  $\theta, S/d_c, x/d_c$  に対して,  $d/d_c$  の値は case A に比べて case B および case C の方がわずかに大きくなる. さらに, 与えられた  $\theta, S/d_c, x/d_c$  に対して, case B の  $d/d_c$  の値と case C の  $d/d_c$  の値はほぼ一致する.

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., 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.