

H3-4

階段状水路における non-aerated skimming flow の水理特性
Hydraulic Characteristics for Non-Aerated Skimming Flows in Stepped Channels

○大熊稔生¹・高橋正行²・大津岩夫²
*Naruki Ohkuma¹, Masayuki Takahashi², Iwao Ohtsu²

Stepped channels are effective for dissipating the energy of supercritical flow that occurs at steep channels. This report presents velocity profiles, boundary layer developments, and energy dissipations in non-aerated skimming flows for $\theta=30^\circ$, predicting the streamwise variations of specific energy E , average velocity V , and depth d under given channel slope θ and discharge per unit width q . Also, it shows that the energy dissipation for non-aerated skimming flow in stepped channel is larger than that in smooth slipway.

1. まえがき

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 $S/d_c[S$: ステップ高さ, d_c : 限界水深($d_c=(q^2/g)^{1/3}$: 単位幅流量)]によって変化し, skimming flow (隅角部で常に渦が形成される流況), nappe flow (常にエアポケットが形成され, 越流水脈を伴う流況), および両者の遷移流況である transition flow に分類される¹⁾. skimming flow の流れは, 底面から乱流境界層が発達し, ある程度の距離を流下すると乱流境界層が水面に到達する. この断面は Critical point (以下 C.P.と略す)と呼ばれている. C.P.より下流側で乱れが十分に発達すると, 水面から空気が混入し始める (Inception point, 以下 I.P.と略す). I.P.より下流側では空気混入不等流となり, さらにある程度の距離を流下すると擬似等流状態となる. すなわち, 不等流区間は I.P.より上流側の non-aerated flow と I.P.より下流側の aerated flow に区分される (Fig. 1 参照).

階段状副ダムや低落差の embankment dam の階段状洪水吐で出水時に大流量の越流が生じたとき, non-aerated flow への対応が水工設計上必要となる. すなわち, 階段状水路における non-aerated skimming flow の水深, 流速, およびエネルギーを知ることが重要となる.

本報告では, 水路傾斜角度 $\theta = 30^\circ$ の階段状水路を用いて不等流区間の non-aerated skimming flow を対象に流速, 水深, エネルギーの大きさを示した. さらに, 平坦な傾斜水路と階段状水路のエネルギーを比較し, 階段状水路のエネルギー減勢に対する有効性を調べた.

2. 実験

実験は天端長さが広頂堰の堰長となるように調整された水路傾斜角度 $\theta = 30^\circ$ の階段状水路を用い, skimming flow の non-aerated flow の流況を対象に行った. non-aerated flow の水深 d はポイントゲージを用い, 流速 u はピトー管を用いて測定した. また, non-aerated flow の水深, 流速, エネルギーの評価断面をエッジ断面とした (Fig.2 参照).

3. non-aerated flow の流速

non-aerated flow の乱流境界層内の流速 u は次の関係式で整理される.

$$\frac{u}{U} = F\left(\frac{y}{\delta}, \frac{x}{d_c}, \frac{S}{d_c}, \theta\right) \quad (1)$$

ここに, U は評価断面での最大流速, x は傾斜始端からの流下距離, δ は境界層厚さである. (1)式の関係で実験値を整理した一例を Fig.3 に示す. 図に示されるように流速分布は, $1/N$ 乗則 [(2)式] で近似される.

$$\left(\frac{u}{U}\right) = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/N} \quad (2)$$

Fig.3 に示されるように, 与えられた $\theta, S/d_c$ に対して相対流下距離 x/d_c に関わらず N の値はほぼ一定値になっている. また, 与えられた θ に対して, S/d_c の増加にともなう N の値は大きくなる (Fig.4 参照). non-aerated flow の N の値と擬似等流状態の aerated flow の N の値を比較すると, Fig.4 に示されるように non-aerated flow の N の値は擬似等流状態の aerated flow の N の値とほぼ等しい.

乱流境界層の発達状態を Fig.5 に示す. なお, d_0 は傾

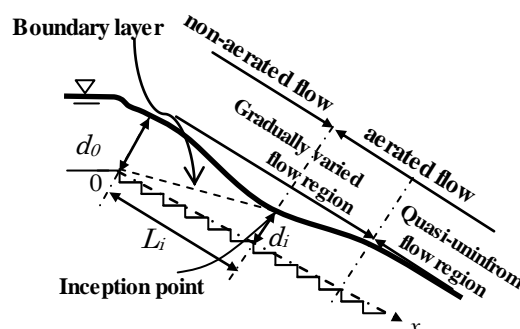


Figure1. Flow region of skimming flow

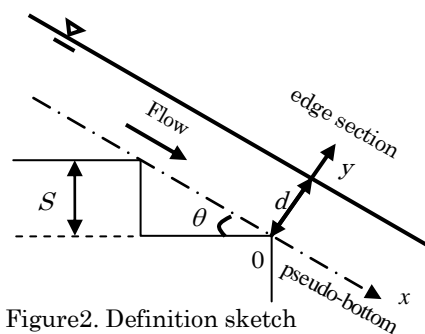


Figure2. Definition sketch

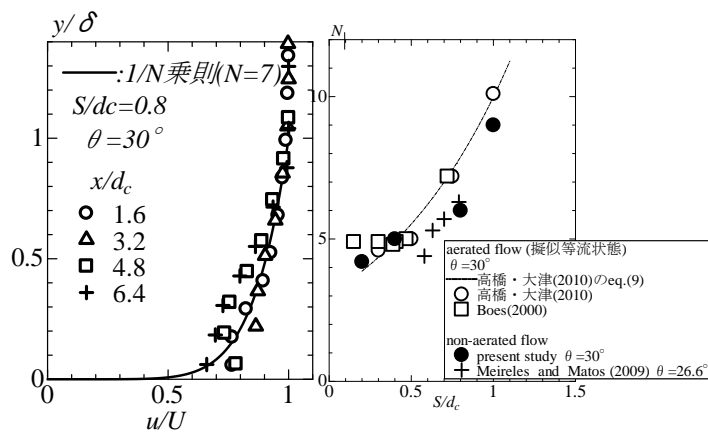


Figure3. Velocity distribution Figure4. Change in N with S/d_c

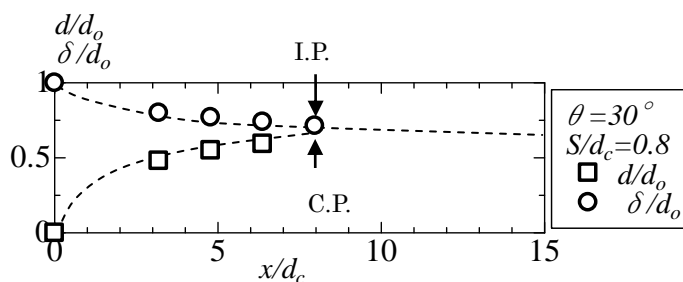


Figure.5 Boundary layer development

斜始端での水深である(Fig.1 参照). Fig.5 に示されるように境界層厚さ δ/d_o は x/d_c の増加にともない増加し, 水深 d/d_o は小さくなる. $\delta/d_o = d/d_o$ となった断面が限界点(C.P.)である. また, 空気混入開始断面(I.P.)と C.P.の位置はほぼ等しい(Fig.5 参照). ここに, I.P.は水路横断方向全体に空気混入し始めた断面と定義されている.

I.P.までの距離 L_i と, I.P.の水深 d_i を L_i/k , $d_i/k = f(F_{r*})$ で整理すると Fig.6 が得られる. L_i と d_i を Meireles et al.が提案した(3), (4)式²⁾により求めると Fig.6 の実線が得られる.

$$\frac{L_i}{k} = 6.75 F_{r*}^{0.76} \quad (3) \quad , \quad \frac{d_i}{k} = 0.35 F_{r*}^{0.59} \quad (4)$$

ここに, F_{r*} は roughness Froude number [$F_{r*} = q / \sqrt{g \sin \theta k^3}$], であり, k は [$k = S \cos \theta$] である. 図に示されるように, F_{r*} の増加に伴い L_i/k , d_i/k の値は大きくなる. また, Meireles et al.が提案した実験式²⁾と実験値はほぼ一致している. このことから, 与えられた q , S , θ に対して傾斜始端から I.P.までの距離 L_i と I.P.断面の水深 d_i が算定可能となった.

4. non-aerated flow の相対エネルギー損失 $\Delta E/E_{max}$

階段状水路堤頂から x 流下したときのエネルギー損失 ΔE を求めるため, 評価断面の底面を水平基準面にしたときの堤頂断面と評価断面の間でベルヌーイの定理を適用すると次式が得られる.

$$\left(\frac{\Delta E}{E_{max}} \right) = 1 - \frac{E/d_c}{H_s/d_c + 1.5} \quad (5)$$

ここに, E_{max} は評価断面の底面を水平基準面にしたときの堤頂断面の全水頭 ($E_{max} = H_s + 3d_c/2$), E は評価断面での比エネルギー [$E = d \cos \theta + \alpha V^2 / (2g)$], V : 断面平均流速 ($= q/d$), α : エネルギー補正係数] である. 相対比エネルギー E/d_c は次式で示される.

$$\left(\frac{E}{d_c} \right) = \frac{d}{d_c} \cos \theta + \frac{\alpha}{2} \left(\frac{d_c}{d} \right)^2 \quad (6)$$

なお, エネルギー補正係数 α は, 実験により得られた流速 u (y), 水深 d , および断面平均流速 V から α が求められる [(7)式].

$$\alpha = \frac{1}{d} \int_0^d \left(\frac{u}{V} \right)^3 dy \quad (7)$$

skimming flow の相対エネルギー損失 $\Delta E/E_{max}$ は(6)式から得られた相対比エネルギー E/d_c と $H_s/d_c [= (x/d_c) \sin \theta]$ を(5)式に代入することで求められ Fig.8 が得られる. 図に示されるように, 与えられた θ と S/d_c に対して x/d_c の増加にともない相対エネルギー損失 $\Delta E/E_{max}$ の値は増加する. また, $S/d_c = 0$ の平坦な傾斜水路から S/d_c を大きくしていくと, S/d_c の増加にともない $\Delta E/E_{max}$ は増加するが, $S/d_c \geq 0.4$ では $\Delta E/E_{max}$ に対する S/d_c の影響は小さくなる. さらに, 階段状水路のエネルギー損失 ΔE と平坦な傾斜水路 ($S/d_c = 0$) のエネルギー損失 $\Delta E_{nonstep}$ との比は, $\Delta E/\Delta E_{nonstep} = 1.2 \sim 3.0$ となり, 平坦な傾斜水路 ($S/d_c = 0$) と比べて階段状水路のエネルギー減勢効果は大きいことが示された.

5. まとめ

水路傾斜角度 $\theta = 30^\circ$ の non-aerated skimming flow を対象に流速, 水深, エネルギーの大きさを検討した結果を以下に示す.

- ① non-aerated flow の乱流境界層内の流速分布は $1/N$ 乗則で近似され, N の値は擬似等流状態の aerated flow の N の値と等しいことを示した.
- ② 傾斜始端から I.P.断面までの距離 L_i と水深 d_i は(3), (4)式によって決められる. このことから, 与えられた q , S , θ に対して傾斜始端から I.P.断面までの距離 L_i と I.P.断面の水深 d_i が算定可能となった.
- ③ $\Delta E/E_{max}$ の値が示された. その結果を用いると与えられた θ , S , q , H_s (もしくは x) に対して比エネルギー E , 流速 V , 水深 d が算定可能となった.
- ④ 階段状水路のエネルギー損失 ΔE と平坦な傾斜水路 ($S/d_c = 0$) のエネルギー損失 $\Delta E_{nonstep}$ との比は, $\Delta E/\Delta E_{nonstep} = 1.2 \sim 3.0$ となる. すなわち, 平坦な傾斜水路 ($S/d_c = 0$) と比べて階段状水路のエネルギー減勢効果は大きいことが示された.

参考文献

- 1) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Takahashi, M. : "Flow Characteristics of Skimming Flows in Stepped Channels.", *J. Hydraul. Engrg.*, ASCE, Vol.130, No.9, pp.860-869, 2004.
- 2) Meireles, I., Renna, F., Matos, J., Bombardelli, F. : "Skimming, non-aerated flow on stepped spillways over Rcc Dams.", *J. Hydraul. Engrg.*, ASCE, 2012. (to be published)
- 3) Meireles, I., Matos, J. : "Skimming Flow in the Non-aerated Region of Stepped Spillways over Embankment Dams.", *J. Hydraul. Engrg.*, ASCE, pp.685-689, 2009.
- 4) 高橋, 大津: "階段状水路の空気混入流特性に対する水傾斜角度の影響", 水工学論文集, 第 54 巻, pp.1057-1062, 2010.

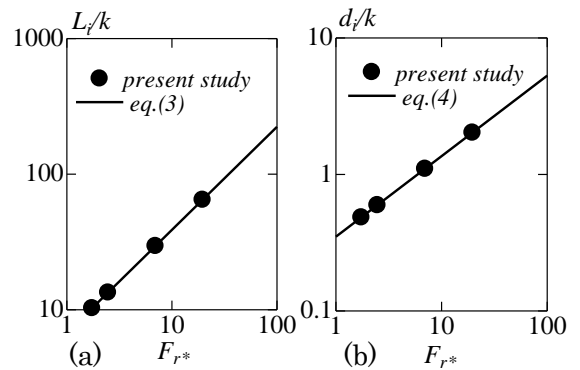


Figure.6 Flow properties at the inception point: a) location, b) clear-water depth

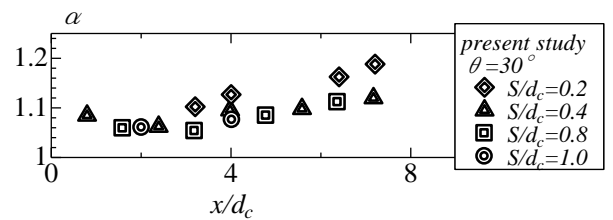


Figure.7 Energy correction coefficient

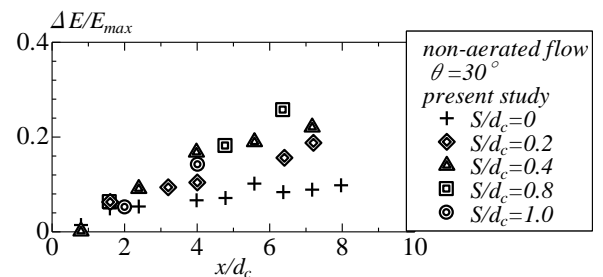


Figure.8 Energy dissipation