

階段状水路における non-aerated skimming flow のエネルギー特性

日大院理工 学生会員 ○大熊 稔生
 日大理工 正会員 高橋 正行
 日大理工 フェロー 大津 岩夫

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($d_c=(q^2/g)^{1/3}$ q : 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流下方向に発達し, やがて水面に到達した Inception point (以下 I.P.と略す) より下流側では空気混入不等流(gradually varied aerated flow)となる. 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.より上流側の空気混入していない流れ(non-aerated flow)と I.P.より下流側の aerated flow に区分される (図-1 参照).

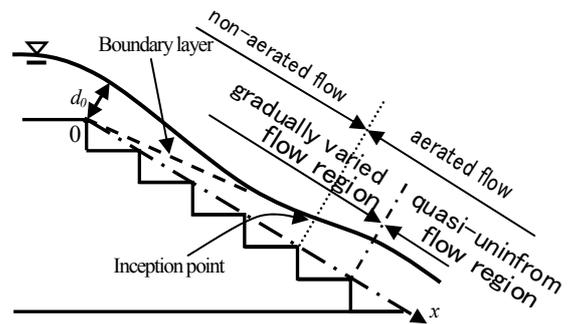


図-1 階段状水路における流れの領域

階段状副ダムや小規模の embankment dam の階段状洪水吐で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.

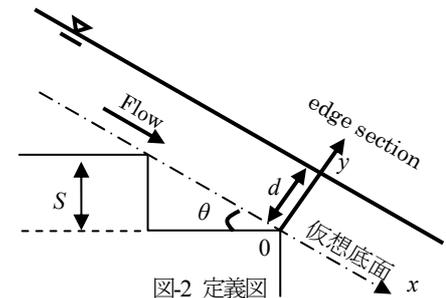


図-2 定義図

階段状水路の non-aerated skimming flow の特性に関して Meireles and Matos による研究²⁾があるが, 階段のエネルギー減勢に対する効果については不明である. このような non-aerated skimming flow の階段状洪水吐への有効性については, さらなる検討の余地がある.

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. また, 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.

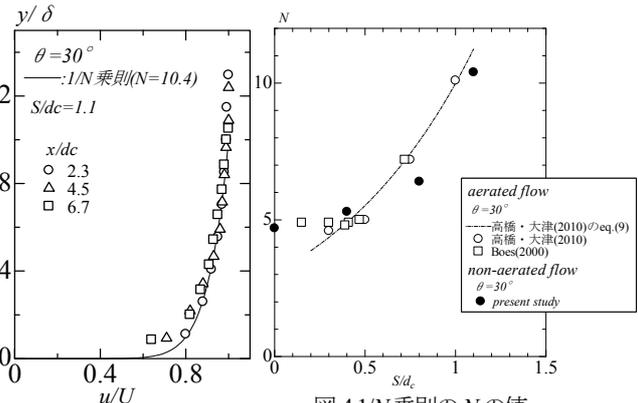


図-3 流速分布($S/d_c=1.1$)

図-4 1/N 乗則の N の値

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, エネルギーの測定評価断面をエッジ断面とした(図-2). なお, y は仮想底面 (x 軸) に垂直な距離である.

流速分布

non-aerated flow の乱流境界層内の流速 u と最大流速 U の関係は (1)式で示される.

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

ここに, 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図-3に示す. 図に示されるように $\theta=30^\circ$, $S/d_c=1.1$ の場合, 流速分布は(1)式の $N=10.4$ で近似される. また, 与えられた θ に対して, S/d_c の増加に伴い N の値は大きくなる (図-4 参照). non-aerated flow と擬似等流状態の aerated flow の N の値を比較すると, 図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図-5に示す. なお, x は傾斜始端からの流下距離, d_0 は傾斜始端での水深である(図-1 参照). 図-5に示されるように境界層厚さ δ/d_0 は x/d_c の増加に伴い増加し, 水深 d/d_0 は小さくなる. $\delta/d_0=d/d_0$ となった断面が限界点(C.P.)である. この C.P.の直下流に空気混入開始断面(I.P.)が位置している(図-5). 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し, 目視観察により定めた(図-6).

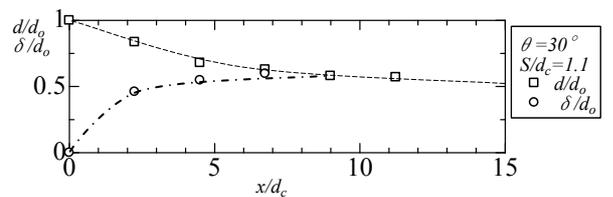


図-5 乱流境界層厚($S/d_c=1.1$)

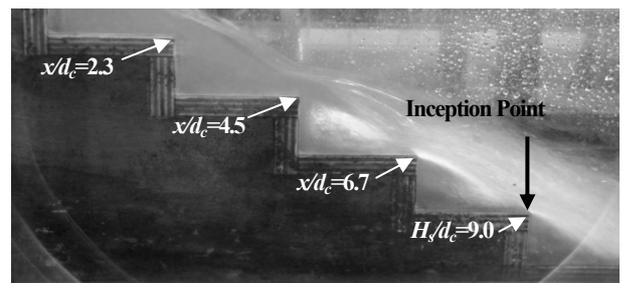


図-6 Inception Point ($S/d_c=1.1$)

キーワード: non-aerated flow, 階段状水路, 比エネルギー, エネルギー損失, 乱流境界層
 連絡先: 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14; Tel.&Fax.: 03-3259-0676

Non-aerated Flow の相対エネルギー E/d_c

non-aerated flow の比エネルギー E は(2)式で求められる。

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

ここに、 α はエネルギー補正係数であり、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 $V(=q/d)$ から α が求められる[(3)式]。

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

図-7 に示されるように、与えられた水路傾斜角度 $\theta (=30^\circ)$ と相対流下距離 x/d_c に対して、相対ステップ高さ S/d_c が大きくなると α は小さくなる。また、与えられた S/d_c に対して x/d_c の増加に伴い α は大きくなる。

(2)式より得られた相対エネルギー E/d_c を $E/d_c = f(S/d_c, x/d_c, \theta)$ の関係で整理したものを図-8 に示す。図-8 に示されるように与えられた $\theta (=30^\circ)$ と S/d_c に対して、 x/d_c の増加に伴い E/d_c は大きくなっている。また、与えられた x/d_c に対して S/d_c が大きくなると E/d_c は小さくなっている。

Non-aerated Flow の相対エネルギー損失

階段状水路によるエネルギー損失 ΔE を求めるため、階段状水路直上流断面と測定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。

$$\left(\frac{\Delta E}{E_{max}}\right) = 1 - \frac{E/d_c}{H_s/d_c + 1.5} \quad (4)$$

ここに、 E_{max} は階段状水路直上流断面の全水頭 ($E_{max} = H_s + 3d_c/2$) である。skimming flow の相対エネルギー損失 $\Delta E/E_{max}$ は(2)式から得られた相対エネルギー E/d_c と $H_s/d_c [= (x/d_c) \sin \theta]$ を(4)式に代入することで求められる。図-9 が得られる。図-9 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、与えられた θ と x/d_c に対して S/d_c が大きくなると $\Delta E/E_{max}$ の値は大きくなる。さらに、図-9 には平坦な傾斜水路 ($S/d_c = 0$) の場合の相対エネルギー損失 $\Delta E/E_{max}$ の値を示した。図に示されるように、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、 $\Delta E/\Delta E_{nonstep} = 1.2 \sim 2.0$ 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。

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 $1/N$ 乗則の 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 non-aerated flow の相対エネルギー E/d_c については、与えられた水路傾斜角度 θ と相対流下距離 x/d_c に対して相対ステップ高さ S/d_c が大きくなると E/d_c は小さくなることが示された。また、与えられた θ と S/d_c に対して x/d_c が大きくなると E/d_c は大きくなる。
- ③ 与えられた水路傾斜角度 θ と相対流下距離 x/d_c に対して相対ステップ高さ S/d_c が大きくなると相対エネルギー損失 $\Delta E/E_{max}$ は大きくなる。すなわち、non-aerated flow においても階段状水路によってエネルギー損失が大きくなることが示された。
- ④ 平坦な傾斜面を流下するエネルギー損失 $\Delta E_{nonstep}$ に比べ階段状水路のエネルギー損失 ΔE は大きくなり、 $\Delta E/\Delta E_{nonstep} = 1.2 \sim 2.0$ であることを定量的に示した。すなわち、non-aerated flow の階段状水路はエネルギー減勢構造物として有効である。

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) I.Meireles, J.Matos.: "Skimming Flow in the Nonaerated Region of Stepped Spillways over Embankment Dams.", J. Hydraul. Engrg., ASCE, pp.685-689, 2009.
 3) 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.
 4) Boes, R.M.: *Zweiphasenströmung und Energieumsetzung auf Großkaskaden.*, Ph. D thesis, ETH, Zürich, Switzerland. (In German), 2000.

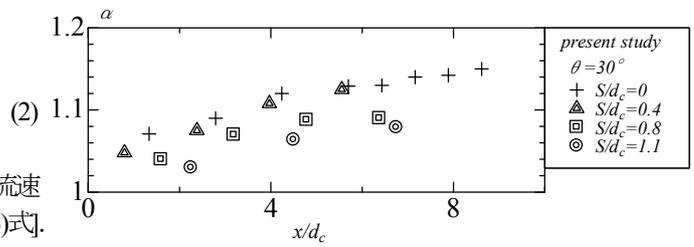


図-7 エネルギー補正係数 α

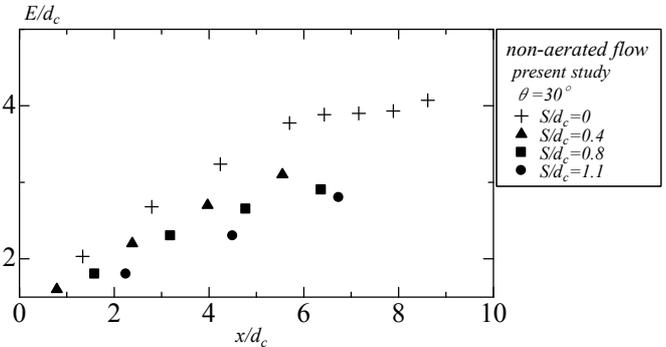


図-8 Non-aerated Flow の相対エネルギー E/d_c

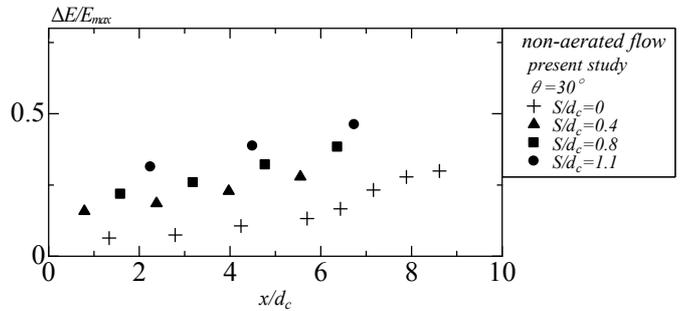


図-9 Non-aerated Flow の相対エネルギー損失 $\Delta E/E_{max}$