

階段状水路の空気混入流の水深

Aerated flow depth on stepped chutes

○高橋正行*、佐藤柳言*

○ Masayuki TAKAHASHI and Ryugen SATOH

1. はじめに

「防災重点農業用ため池に係る防災工事等の推進に関する特別措置法」が令和2年10月1日に施行された。プレキャスト化による迅速なため池改造技術を開発するため、プレキャスト部材を階段状に設置することで容易かつ迅速に放水路部の構築は可能になると報告されている¹⁾。しかしながら、階段式放水路では水流に空気が混入するため、水面の膨張等についての数値計算は困難であると指摘されている¹⁾。

階段状水路において形成される流況はskimming flow（階段状水路のステップ隅角部で常にエアーポケットを形成せず、渦の形成が認められる流況、図1a）、nappe flow（常にエアーポケットが形成され、越流水脈を伴う流況、図1c）、およびtransition flow（図1b）である²⁾。

出水などの比較的大流量のときに形成されるskimming flowでは、平坦な傾斜水路よりも短い流下距離で水面から空気混入しはじめる。空気混入開始位置はinception point (I.P.と略す)と呼ばれている³⁾。その下流側では、図2に示されるように、空気混入流となり、不等流区間を経て擬似等流となる。著者らは、広範囲な水路傾斜角度の階段状水路における空気混入特性を検討してきた^{2),3)}。また、農業土木の分野では、排水路を対象に階段状水路上の水深の算定式⁴⁾が示されている。ここでは、skimming flowの空気混入状況の一例を説明する。また、空気混入流水深算定法を示す。さらに、階段状水路における空気混入流水深の物理的意味を紹介し、農業土木分野で従来用いられている算定式との関係を示す。

2. 実験

実験は、水路傾斜角度 $\theta = 19^\circ$ 、ステップ高さ $S = 0.030\text{m}$ 、模型高さ $H_{dam} = 0.600\text{m}$ の階段状水路模型を幅 $B = 0.400\text{m}$ の長方形断面水路（図2）に設置して行われた。堰頂長さは、広頂堰となるように調整されている。流量 Q については、skimming flowが形成される相対ステップ高さ $S/d_c = 0.6$ となるように調整された。ここに、 $d_c [= \sqrt[3]{q^2/g}]$ は限界水深、 $q [= Q/B]$ は単位幅流量、 g は重力加速度である。なお、skimming flowが形成される上限の S/d_c の値 $(S/d_c)_s$ を求める実験式が提案²⁾されており、農業用ため池の放水路の設計実績の放水路勾配 $i = \tan \theta = 1 : 1.5 \sim 1 : 2.5$ の範囲¹⁾では、 $(S/d_c)_s = 1.1 \sim 1.0$ である。水路中央面 $(z=0)$ のedge断面（図2参照）を対象に、空気混入率 C [= 空気の体積/(水の体積+空気の体積)]は二点電極型ボイド率計（測定時間60s、測定時間間隔20kHz）を用いて測定された。ここに、 z は水路横断方向の座標である（図2参照）。また、水のみの流れの水深 d はポイントゲージを用いて測定された。

3. 空気混入流水深

階段状水路に流入した水流は、乱流境界層が水面に到達した断面より下流側で空気混入（white water）し、aerated skimming flowになる（図3）。図3に示されるように、水面近くの空気混入率 C の大きい領域では、水滴となって流下することが観察され、水面の位置を目視によって確定することは困難である。ここに、 δ は乱流境界層厚、 $y_{0.9}$ は $C = 0.9$ となる y である。なお、 d と δ は佐藤ら⁵⁾の測定値である。

Aerated skimming flowの空気混入率 C は、次元解析的考察より、 $C = f(y/y_{0.9}, x/d_c, S/d_c, \theta)$ の関係で表示される^{2),3)}。Skimming flowの流況と空気混入率分布を図3に示している。

混入している空気を水面から取り除いた、水のみに換算した水深（clear water depth） d_w は、

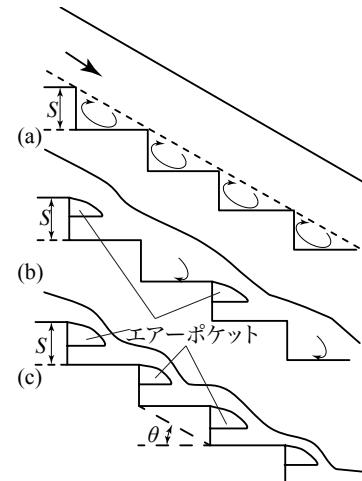


図1 階段状水路上の流況
[(a) skimming flow; (b) transition flow; (c) nappe flow]
Flow conditions on stepped chutes

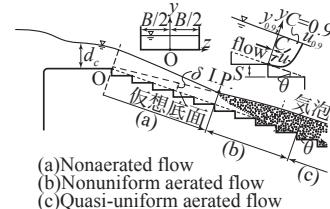


図2 Skimming flowの流況
Flow conditions of skimming flow

所属 *日本大学理工学部、College of Science and Technology, Nihon University

キーワード 管・開水路流れ、流体力学一般、水利構造物

$$d_w = \int_0^{y_{0.9}} (1 - C) dy = (1 - C_m) y_{0.9} \quad (1)$$

で求められる^{2),3)}。ここに、 $C_m (= \frac{1}{y_{0.9}} \int_0^{y_{0.9}} C dy)$ は断面平均空気混入率である。また、空気混入流の代表水深として $C = 0.99$ となる y の $y_{0.99}$ や $y_{0.9}$ を用いることもある⁶⁾。図3に示されるように、流下に伴い d_w/d_c は小さくなるものの擬似等流になると一定値になる。一方、空気混入することで $y_{0.9}/d_c$ は流下とともに大きくなり、擬似等流になると一定値になる。

擬似等流状態のskimming flowにおける抵抗係数 f は、clear water depth d_w を用いて、

$$f = 8(d_w/d_c)^3 \sin \theta \quad (2)$$

で評価される。広範囲な θ ($19^\circ \leq \theta \leq 55^\circ$) と S/d_c ($0 \leq S/d_c \leq (S/d_c)_S$) のもとで、 f の実験式は、

$$f = (-9.2\theta \times 10^{-4} + 0.12) \tanh(4S/d_c) + 3.8\theta^2 \times 10^{-5} - 4.4\theta \times 10^{-3} + 0.135 \quad (\theta \text{ in deg.}) \quad (3)$$

で示され³⁾、また C_m の実験式³⁾は、

$$C_m = (6.9/\theta - 0.12)(S/d_c) + 0.656 \left\{ 1 - e^{-0.0356(\theta-10.9)} \right\} + 0.073 \quad (\theta \text{ in deg.}) \quad (4)$$

で示されている。式(2)より、擬似等流状態のskimming flowの相対的なclear water depth、

$$d_w/d_c = \sqrt[3]{f/(8 \sin \theta)} \quad (5)$$

が得られる。実験的に $y_{0.99} = 1.4y_{0.9} \sim 1.55y_{0.9}$ が示され⁶⁾ており、 $y_{0.99} = 1.55y_{0.9}$ と式(1)・式(5)から、

$$y_{0.99}/d_c = 1.55/(1 - C_m) \sqrt[3]{f/(8 \sin \theta)} \quad (6)$$

の関係が得られる。

農業用ため池の設計実績の*i*の範囲かつskimming flowの形成される S/d_c の範囲を対象に、式(2)と式(4)の値を式(5)と式(6)に代入して得られた d_w/d_c と $y_{0.99}/d_c$ を図4に示す。図4に示されるように、*i* = 1 : 1.5 ~ 1 : 2.5の擬似等流状態のskimming flowでは $d_w/d_c \approx 0.19 \sim 0.38$ 、 $y_{0.99}/d_c \approx 0.45 \sim 0.95$ である。なお、階段式水路側壁高の算定に用いられる計算水深 h_w の実験式が示されている⁴⁾。その式を d_c で無次元化すると、

$$h_w/d_c = 0.7 \left[(d_c/S)^{\frac{2}{3}} + 0.1(d_c/S) + 0.4 \right] \times S/d_c \quad (7)$$

となる。式(7)では*i*は1/5以上の急勾配とされているため、求めた結果を図4に示す。図4に示されるように、式(7)で求められた値は $y_{0.99}/d_c$ と同程度の大きさのため、 h_w は水滴の飛翔高さを表していたものと考えられる。

参考文献

- 1)小菅達也, 松浦正一, 野田康太郎. ため池におけるプレキャスト階段式洪水吐の水理模型実験. 2023年度第72回農業農村工学会大会講演会講演要旨集, pp. 715–716, 2023.
- 2)Iwao Ohtsu, Youichi Yasuda, and Masayuki Takahashi. Flow characteristics of skimming flows in stepped channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 130, No. 9, pp. 860–869, 2004.
- 3)Masayuki Takahashi and Iwao Ohtsu. Aerated flow characteristics of skimming flow over stepped chutes. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 50, No. 4, pp. 427–434, 2012.
- 4)農林水産省農村振興局監修. 土地改良事業計画設計基準及び運用・解説計画「ほ場整備（畑）」. 社団法人農村工学会.
- 5)佐藤柳言, 高橋正行, 大津岩夫. 階段状水路におけるnonaerated skimming flowの流速特性と局所摩擦抵抗係数に与える相対ステップ高さの影響. 土木学会論文集B1(水工学), Vol. 77, No. 2, pp. I-835–I-840, 2021.
- 6)高橋正行, 竜沢宗一郎, 大津岩夫. 階段状水路のskimming flowにおける空気混入不等流の水理特性. 土木学会論文集B1(水工学), Vol. 73, No. 4, pp. I-721–I-726, 2017.

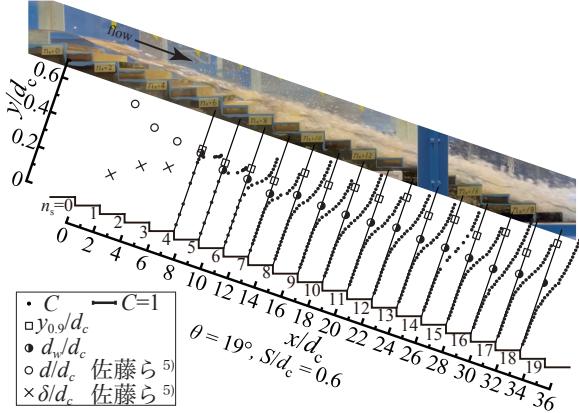


図3 Skimming flow の流況と空気混入率分布
Photo of skimming flow and void fractions

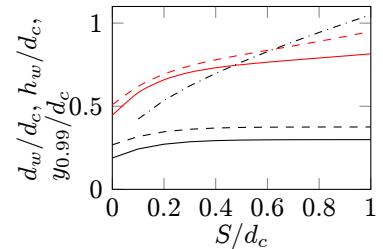


図4 擬似等流状態の空気混入流水深; — $y_{0.99}/d_c$ [Eq.(6) for $i=1/1.5$]; - - - $y_{0.99}/d_c$ [Eq.(6) for $i=1/2.5$]; — d_w/d_c [Eq.(5) for $i=1/1.5$]; - - - d_w/d_c [Eq.(5) for $i=1/2.5$]; - - - h_w/d_c [Eq.(7)]
Aerated flow depth in quasi-uniform flows