

階段状水路における空気混入流特性

日本大学理工学部	正 会 員	○高橋 正行
日本大学理工学部	正 会 員	安田 陽一
日本大学理工学部	フェロー会員	大津 岩夫

急勾配水路を流下する高速流を減勢させる方法として階段状水路の利用が有効である^{1),2)}。一般に、階段状水路の流況は *skimming flow*, *transition flow*, および *nappe flow* とに分類されている³⁾。また、階段状水路流れは空気混入流として特徴づけられる。

階段状水路における空気混入流特性を知ることは水工設計上重要である。すなわち、空気混入流中の空気混入率と流速分布とを知ることが重要である。これまで、著者は *skimming flow* を対象に空気混入流の空気混入率分布および流速分布について検討を行ってきた⁴⁾。しかし、*transition flow* および *nappe flow* については不明な点が多い。

ここでは水路傾斜角度 $\theta=19^\circ$ で平衡状態の流れを対象に、広範囲な相対ステップ高さ S/d_c のもとで、空気混入流の空気混入率および流速の分布特性について実験的検討を行った。その結果、空気混入率および流速分布から *skimming*, *transition*, および *nappe flow* の各流況を特徴づけることができた。

実験条件

実験は水路傾斜角度 $\theta=19^\circ$ ，相対ステップ高さ $S/d_c=0.55\sim 5.5$ (S : ステップ高さ, d_c : 限界水深 ($= (q^2/g)^{1/3}$; q : 単位幅流量; g : 重力加速度), 相対落差 $H_s/d_c=11\sim 78$ (H_s : 落差) の下で行われた。ステップエッジ近く ($x/L=0.97$; 図1 参照) の空気混入率 C と空気混入流の流速 u は二点電極型ボイド率計⁵⁾を用いて測定された (プローブ先端直径 $\phi=0.025\text{mm}$, 採取時間間隔 $50\mu\text{sec}$, 測定時間 20sec)。なお、空気混入率 C と流速 u の測定は平衡状態の領域²⁾において行われた。

空気混入率分布

水路傾斜角度 $\theta=19^\circ$ に対して, *skimming flow* は $0 \leq S/d_c \leq 0.97$, *transition flow* は $0.97 \leq S/d_c \leq 1.5$, *nappe flow* は $S/d_c \geq 1.15$ において形成される^{2),3)}。

平衡状態における *skimming flow* において, レイノルズ数 $Re \geq 3.0 \times 10^4$ ($Re=q/\nu_w$; ν_w : 水の動粘性係数) の場合, 空気混入率 C は次の関係で表示される^{6),7)}。

$$C = F(y/y_{0.9}, S/d_c, \theta) \quad (1)$$

ここに, y はステップ水平面からの鉛直座標 (図1) であり, $y_{0.9}$ は aerated flow depth であり $C=0.9$ のときの y として定義される。

transition flow および *nappe flow* の場合についても, 空気混入率は(1)の関係で表示されるものと考えられる。(1)の関係を用いて, *skimming*, *transition*, および *nappe flow* の空気混入率 C を整理したものを図2に示す。図2に示されるように, $S/d_c < 3.0$ の場合, 与えられた $y/y_{0.9}$ に対して S/d_c の増加に伴い C の値は大きくなる。また, $3.0 \leq S/d_c \leq 5.5$ の場合, 空気混入率 C に対する S/d_c の影響は小さい。

図2の各線は気泡の拡散モデルより得られた結果である。図2に示されるように, *skimming flow* の空気混入率分布は気泡の拡散モデルによって近似できる。*nappe flow* の場合, 気泡の拡散モデルで近似することはできない。

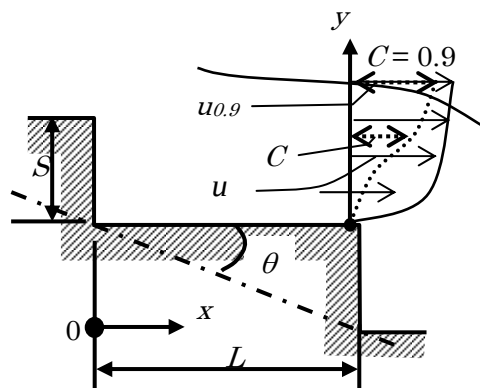


図1 定義図

キーワード： 空気混入流, 階段状水路, 空気混入率, 流速分布

連絡先： 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8 Tel. & Fax. 03-3259-0668

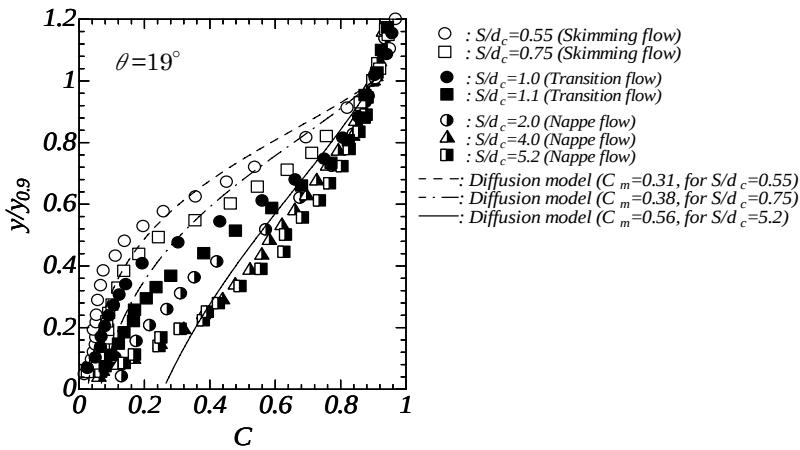


図2 空気混入率分布

断面平均空気混入率 C_m は次式によって示される。

$$C_m = \int_0^{y_{0.9}} C dy \quad (2)$$

水路傾斜角度 $\theta = 19^\circ$ に対して, $S/d_c < 3.0$ の場合, 平衡状態における断面平均空気混入率 C_m は S/d_c の増加に伴い大きくなる (図3). $3.0 \leq S/d_c < 5.5$ の nappe flow の場合, C_m の値は S/d_c の増加に伴い 0.6 に近づいていく。

流速分布

$Re \geq 3.0 \times 10^4$ の平衡状態における skimming, transition, および nappe flow の空気混入流の流速 $u/u_{0.9}$ は次の関係で表示されるものと考えられる⁷⁾。

$$u/u_{0.9} = F(y/y_{0.9}, S/d_c, \theta) \quad (3)$$

ここに, $u_{0.9}$ は $y = y_{0.9}$ での流速である。

$u/u_{0.9}$ を (3) 式の関係で整理した典型的な例を図4に示す。skimming flow および transition flow の場合, 流速分布は $1/N$ 乗則で近似でき, N の値については skimming flow の場合は 6~9 程度となり, transition flow の場合は 9~11 程度となる。また nappe flow の場合, skimming flow および transition flow の場合と比べ底面近くの $u/u_{0.9}$ の値が大きくなっている。これは nappe flow の場合, step edge 近くの断面では曲線流となっているためと考えられる。

参考文献

- 1) 高橋正行, 安田陽一, 大津岩夫: 階段状水路の流水抵抗と水理設計法, 第4回流体力の評価とその応用に関するシンポジウム講演集, 土木学会基礎水理部会, pp.57-64, 2006.
- 2) I. Ohtsu, Y. Yasuda, and M. Takahashi: Flow characteristics of skimming flows in stepped channels, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol.130, No.9, pp.860-869, 2004.
- 3) I. Ohtsu and Y. Yasuda: Characteristics of flow condition on stepped channels, *Proc. 27th IAHR Congress*, IAHR San Francisco, pp.583-588, 1997.
- 4) 明石慶太, 高橋正行, 安田陽一, 大津岩夫: 階段状水路における Skimming flow の流速と空気混入率の分布特性, 土木学会第61回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, pp.601-602, 2006.
- 5) H. Chanson: Air-water flow measurements with intrusive, phase-detection probes: Can we improve their interpretation?, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol.127, No.3, pp.252-255.
- 6) I. Ohtsu, Y. Yasuda, and M. Takahashi: Energy head of aerated flows in stepped channels, *Proc. 31st IAHR Congress*, IAHR, Seoul Korea, pp.2890-2899.
- 7) 高橋正行, 安田陽一, 大津岩夫: 階段状水路における空気混入射流の特性に対するレイノルズ数の影響, 水工学論文集, 土木学会, 50 巻, pp.871-876.

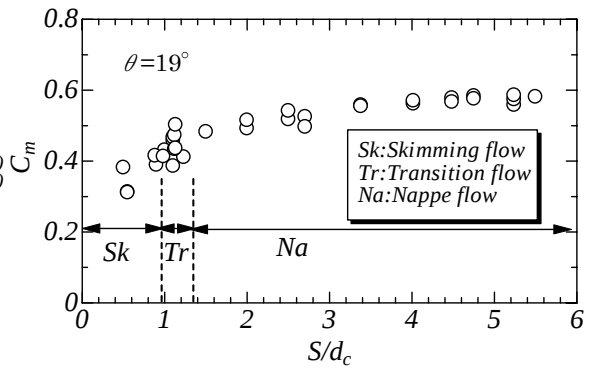
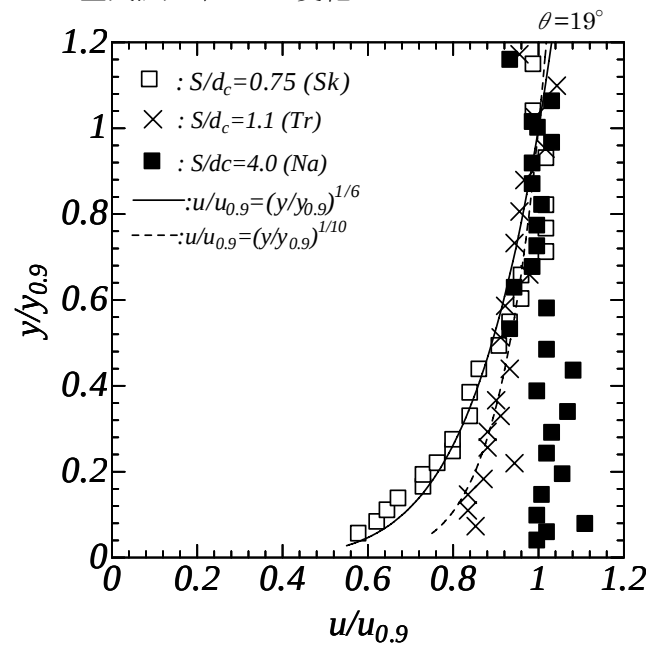
図3 相対ステップ高さ S/d_c による断面平均空気混入率 C_m の変化

図4 空気混入流の流速分布