

# 階段状水路における不等流区間の空気混入流特性

日本大学理工学部土木工学科 学生会員 ○海上 真吾  
 日本大学理工学部 正会員 高橋 正行  
 日本大学理工学部 フェロー会員 大津 岩夫

## 1. まえがき

ダム、堰などの落差を伴う構造物や急傾斜地の水路を流下する流れのエネルギー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。階段状水路で形成される流れは空気混入射流となることが多く、この流れの特性を知ることは水工設計上重要である。

従来、空気混入射流の内部特性は擬似等流での検討が多く<sup>1)~6)</sup>、不等流状態については空気混入率  $C$  の分布形状の変化に関する研究のみがある<sup>7)</sup>。ここでは、不等流区間の空気混入射流の内部特性の変化傾向について検討をした。また、空気混入流の内部特性から擬似等流状態となる水理条件を示した。

## 2. 実験方法

階段状水路において観察される流況は *skimming flow*, *transition flow* および *nappe flow* がある(図-1 参照)。これらの流況のうち *skimming flow* を対象とし、水路傾斜角度  $\theta=55^\circ$ , 相対ステップ高さ  $S/d_c=0.2$  ( $S$ : ステップ高さ,  $d_c$ : 限界水深,  $d_c=(q_w^2/g)^{1/3}$ ,  $q_w$ : 単位幅流量 [ $q_w = \int_0^{y_{0.9}} (1-C)u dy$ ],  $u$ : 流速,  $g$ : 重力加速度) の流れについて  $H_s$  (クレストから測定断面までの鉛直距離) を変化させて  $C$ ,  $u$  の測定を行った。測定範囲は inception point (空気混入開始位置  $H_s/d_c=9$ ) より下流部の  $9 \leq H_s/d_c \leq 62$  とした。空気混入率  $C$  [ $C$ =空気の体積/(空気の体積+水の体積)] と流速  $u$  は二点電極型ボイド率計を用いて測定した(採取時間間隔 20 $\mu$ sec, 測定時間 20sec)。また, aerated flow の  $C$ ,  $u$ , およびエネルギーの評価断面をエッジ断面(図-2 参照)とした。

## 3. 空気混入率分布

Takahashi et al.<sup>3,4)</sup> は  $Re \geq 3 \times 10^4$  [ $Re$ : レイノルズ数 ( $Re=q_w/\nu_w$ ;  $\nu_w$ : 水の動粘性係数)] の擬似等流状態の *skimming flow* において、空気混入率  $C$  は  $Re$  の影響を受けないことを示している。不等流状態においても  $Re \geq 3 \times 10^4$  で  $C$  は  $Re$  の影響を受けないものとし、 $C$  を次の関係で整理する。

$$C = F\left(\frac{H_s}{d_c}, \frac{y}{y_{0.9}}, \frac{S}{d_c}, \theta\right) \quad (1)$$

(1) 式の関係で空気混入率  $C$  の実験値を整理すると図-3 が得られる。図-3 に示されるように、inception point より下流側では水面より空気が混入し、 $H_s/d_c$  が大きくなるにつれて仮想底面近くまで空気混入している。また  $H_s/d_c \geq 50$  の場合、空気混入率分布は  $H_s/d_c$  の値に関わらず同一な分布形状を示す。

次式で定義される断面平均空気混入率  $C_m$  の値を図-4 に示す。

$$C_m = \frac{1}{y_{0.9}} \int_0^{y_{0.9}} C dy \quad (2)$$

図-4 に示されるように、 $C_m$  は inception point から  $H_s/d_c$  の増加とともに大きくなり、 $H_s/d_c \geq 50$  で  $C_m$  の値が一定となっている。

## 4. Aerated flow depth

Inception point から下流側の aerated flow depth  $y_{0.9}$  の変化を図-5 に示す。ここに、 $y_{0.9}$  は aerated flow depth であり、 $C=0.9$  の生じる  $y$  の値である。また、 $y$  は仮想底面に垂直な距離である(図-2 参照)。図-5 より  $y_{0.9}/d_c$  は  $H_s/d_c$  の増加とともに大きくなる。また、 $H_s/d_c \geq 50$  で  $y_{0.9}/d_c$  の値が一定となっている。

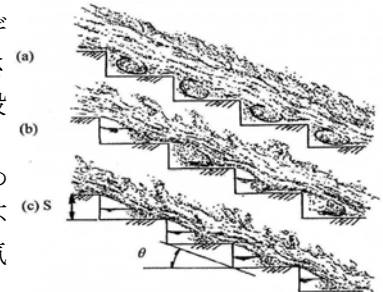


図-1 階段状水路の流況

(a) skimming flow, (b) transition flow  
(c) nappe flow

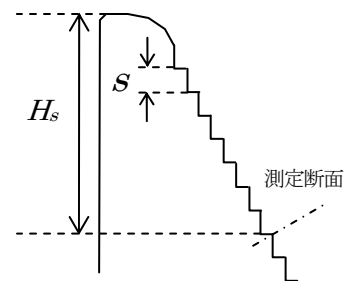


図-2 定義図

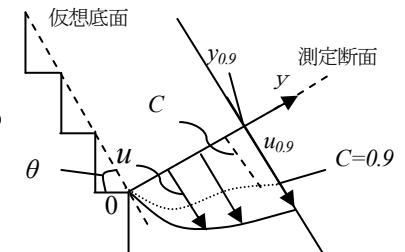


図-3 測定断面の定義図

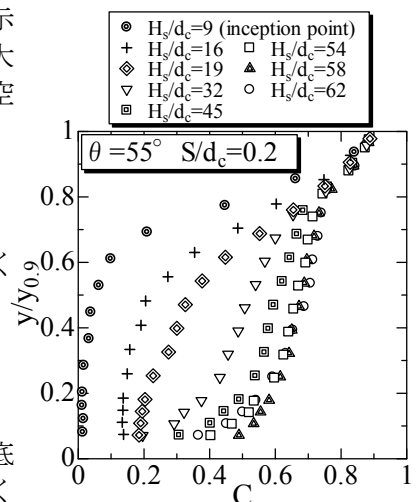


図-4 空気混入率分布

キーワード 階段状水路, 空気混入流, エネルギー減勢構造物, Skimming flow

連絡先: 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14, Tel. & Fax. 03-3259-0668

## 5. 流速分布

高橋らは  $Re \geq 3 \times 10^4$  の擬似等流状態の *skimming flow* において,  $u/u_{0.9}$  は  $Re$  の影響を受けないことを示している<sup>4)</sup>. 不等流状態においても  $Re \geq 3 \times 10^4$  で流速  $u/u_{0.9}$  は  $Re$  の影響を受けないものとし,  $u/u_{0.9}$  を次の関係で整理する.

$$\frac{u}{u_{0.9}} = F\left(\frac{H_s}{d_c}, \frac{y}{y_{0.9}}, \frac{S}{d_c}, \theta\right) \quad (3)$$

ここに,  $u_{0.9}$  は  $y=y_{0.9}$  での流速である. (3)式の関係で実験値を整理すると 図-6 が得られる. また, 図に示されるように  $u/u_{0.9}$  の  $H_s/d_c$  による変化は見られない. さらに,  $u/u_{0.9}$  は次の指数測[ $N=4.5$ ]で近似できる.

$$\frac{u}{u_{0.9}} = \left(\frac{y}{y_{0.9}}\right)^{\frac{1}{N}} \quad (4)$$

図-7 に  $V_{ave}/V_c$  [ $V_{ave}$ :断面平均流速( $V_{ave} = \frac{1}{y_{0.9}} \int_0^{y_{0.9}} u dy$ ),  $V_c$ :限界流速( $V_c = q_w/d_c$ )] の実験値を整理したものとする. 図-7 より,  $V_{ave}/V_c$  は  $H_s/d_c$  の増加にともない大きくなる. また  $H_s/d_c \geq 50$  の場合,  $V_{ave}/V_c$  の値は一定となっている.

## 6. 空気混入流のエネルギー水頭

*Skimming flow* のエネルギー水頭の評価方法は Ohtsu et al.<sup>1)2)</sup>によって次式のように提案されている.

$$\frac{E}{d_c} = C_p \frac{d_w}{d_c} \cos\theta + \frac{C_v}{d_c} \frac{V_w^2}{2g} \quad (5)$$

ここに,  $E$  は空気混入流のエネルギー水頭,  $C_p$  および  $C_v$  は  $C$ ,  $u$  から求められる補正係数<sup>1)2)</sup>,  $d_w$  は clear water depth [ $d_w = (1 - C_m)y_{0.9}$ ] である. また,  $C_p$  と  $C_v$  は  $C$  分布と  $u/u_{0.9}$  分布によって求められ, 次の関係で示される<sup>2)</sup>.

$$C_p = f(N, C_m), C_v = f(N, C_m) \quad (6)$$

すなわち,  $E/d_c$  は次の関係で示される.

$$\frac{E}{d_c} = f\left(C_m, \frac{y_{0.9}}{d_c}, N\right) \quad (7)$$

(7)の関係で示されるように,  $C_m$ ,  $y_{0.9}/d_c$ , および  $N$  の値が一定になると  $E/d_c$  の値も一定値を示すことが理解される.  $H_s/d_c \geq 50$  の場合,  $C_m$ ,  $y_{0.9}/d_c$ , および  $N$  が  $H_s/d_c$  に関わらず一定値となっていることから, 図-8 に示されるように  $E/d_c$  も  $H_s/d_c \geq 50$  で一定値になる.

## 7. まとめ

$\theta=55^\circ$ ,  $S/d_c=0.2$  の階段状水路における不等流区間の aerated flow の内部特性について次のことが示された. 空気混入率分布の  $H_s/d_c$  による変化傾向から inception point より下流側では水面より空気が混入し,  $H_s/d_c$  が大きくなるにつれて仮想底面近くまで空気混入している. また  $H_s/d_c \geq 50$  の場合, 空気混入率分布は  $H_s/d_c$  の値に関わらず同一な分布形状を示す. (3)の関係で  $u$  を整理すると, 与えられた  $y/y_{0.9}$  に対して  $u/u_{0.9}$  は  $H_s/d_c$  の影響を受けない. また,  $u/u_{0.9}$  は  $N=4.5$  の指数測で近似される.  $y_{0.9}/d_c$ ,  $C_m$ ,  $V_{ave}/V_c$ , および  $E/d_c$  は  $H_s/d_c$  の増加にともない大きくなり,  $H_s/d_c \geq 50$  ではそれらが一定値となり, 擬似等流状態となる.

## 参考文献

- 1) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Takahashi, M.: "Flow Characteristics of Skimming Flows in Stepped Channels", *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol.130, No.9, pp.860-869, 2004.
- 2) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Takahashi, M.: "Energy Head of Aerated Flows in Stepped Channels", *Proc. the 31st IAHR Cong.*, IAHR, pp.2890-2899, 2005.
- 3) Takahashi, M., Yasuda, Y., and Ohtsu, I.: "Effect of Reynolds Number on Characteristics of Skimming Flow in Stepped Channels", *Proc. the 31st IAHR Cong.*, pp.2880-2899, 2005.
- 4) 高橋, 安田, 大津: "階段状水路における空気混入射流に対するレイノルズ数の影響", *水工学論文集*, 土木学会, 第50巻, pp.871-876, 2006.
- 5) Takahashi, M., Yasuda, Y., and Ohtsu, I.: "Characteristics of Aerated Flows in Skimming, Transition, and Nappe Flows", *Proc. the 32nd IAHR Cong.*, CD-ROM, 2007.
- 6) 高橋, 安田, 大津: "階段状水路における空気混入流特性", *水工学論文集*, 土木学会, 第52巻, pp.787-792, 2008.
- 7) Boes, R. M. and Hager, W. H.: "Hydraulic Design of Stepped Spillways", *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol.129, No.9, pp.671-679, 2003.

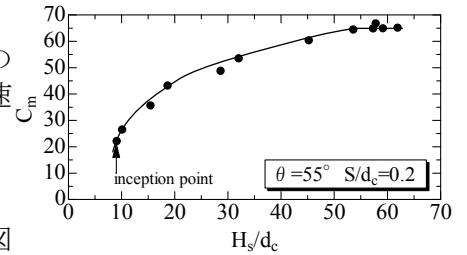


図-5 断面平均空気混入率

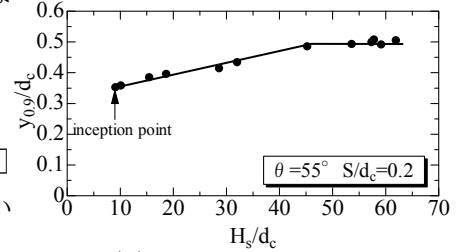


図-6 Aerated flow depth

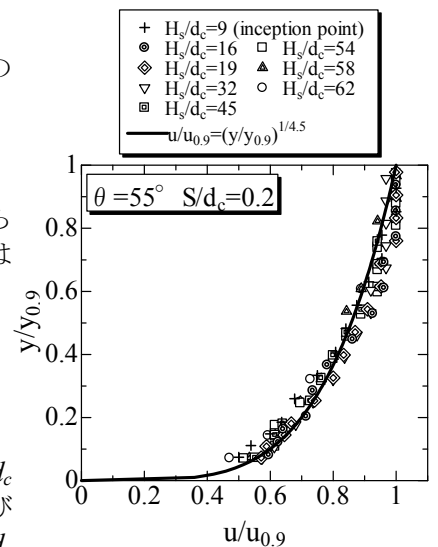


図-7 流速分布

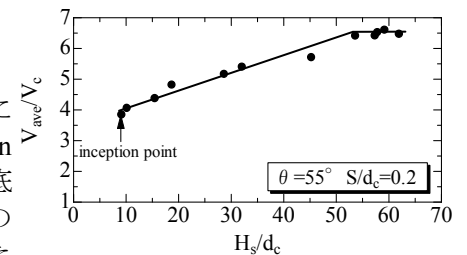


図-8 断面平均流速

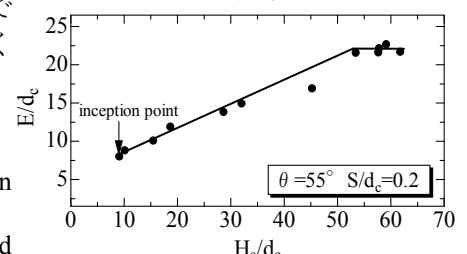


図-9 エネルギー水頭