

# 傾斜水路の跳水特性に対する流入射流における気泡混入量の影響

日本大学大学院理工学研究科 学生員 ○ 小林 純  
 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

## はじめに

従来、流入射流に気泡が混入されていない場合 (non-aerated inflow) において水平水路および傾斜水路における跳水特性に関する実験的検討が行われている<sup>1)~3)</sup>。最近、著者らは傾斜水路の跳水を対象とし流況、流速特性、および跳水長について流入射流の気泡混入の有無によって違いが生じることを示した<sup>4),5)</sup>。河川横断構造物から流下する高速流には気泡が混入されていることが多いことから、流入射流に気泡が混入されている場合 (aerated inflow) の跳水特性を知ることは水工設計上重要である。本研究では水路傾斜角度  $\theta=30^\circ$  および  $55^\circ$  の傾斜水路において射流から常流へ遷移する流れを対象とし、流入射流における気泡混入量による流況、最大流速の減衰状況および遷移長の変化について実験的に検討を行った。その結果、aerated inflow において遷移長の短縮に有効な流入射流の気泡混入量を明らかにした。また、流入射流における気泡混入量を考慮した遷移長の実験式を提案した。

## 実験方法

$\theta=30^\circ$ 、 $55^\circ$  の傾斜水路において射流から常流へ遷移する流れを対象とし、表-1 に示す実験条件のもとで流入射流の気泡混入量による流況特性について実験を行った。ただし、ここで示される流入射流の気泡混入量とは断面平均された気泡混入率  $C_{mean}$  を表している。なお、aerated inflow を形成させるために階段状水路<sup>6)</sup>を用いた。遷移部内の水路底面付近における流下方向の流速測定はピトー管を用いた。また、遷移部内の平均流速の測定は 2 成分電磁流速計を用いた (採取時間 120s、採取間隔 50ms)。流入射流および遷移部内における断面平均された気泡混入率  $C_{mean}$  は点電極型ボイド率計を用いて測定した (採取時間 60s、採取間隔 5ms)。

## 流況

$\theta=30^\circ$ 、 $55^\circ$  において流入射流の断面平均された気泡混入率  $C_{mean}$  を変化させた場合の流況の変化を以下に説明する。ただし、水路傾斜角度  $\theta$  および相対下流水深  $h_d/h_2$  が大きい場合の流況を対象とする。 $C_{mean}$  が小さく 0.3 未満の場合、主流には気泡がほとんど混入されず主流の巻き上げに対する気泡の浮力効果はほとんどない。このため  $C_{mean}=0$  の場合と同様に、主流が水路底面付近に沿って下流側遠方まで流下する<sup>3)</sup>。 $C_{mean}$  の値が 0.3~0.4 以上になると、水路底面付近に位置している主流に気泡が連行されるようになり、 $C_{mean}$  の増加に伴い浮力効果によって主流が巻き上げられ、逆流域の長さが短縮される。さらに、流入射流に十分気泡が混入されると、水路傾斜面上から主流が水面に向かって上昇し、水路傾斜面上で跳水が形成される流況<sup>4)</sup>となる。

## 最大流速の減衰状況

次元解析的考察から遷移部内の最大流速の減衰状況は(1)式で整理されるものと考えられる。 $C_{mean}$  による最大流速の減衰状況の比較を図-1 に示す。また、各測定断面 ( $X/d_1$ ) の最大流速が生じる位置での気泡混入率  $C_{mv}$  の変化を図-2 に示す。ただし、図-1 および図-2 は同一の水理条件のもとで比較したものである。

$$U_m/V_1 = f(X/d_1, F_1, h_d/h_2, \theta, C_{mean}) \quad (1)$$

ここで、 $U_m$  は任意の断面での最大流速、 $X$  は遷移部始端からの水平距離を示す。また、図中矢印は遷移部終端の位置を示す。

流入射流の気泡混入量  $C_{mean}$  が増加するにつれて、最大流速  $U_m$  は短区間で減衰されるようになる (図-1)。また、図-2 に示されるように、 $C_{mean}=0.38$  の場合、 $X/d_1 \leq 15$  で最大流速が生じる位置の気泡混入率  $C_{mv}$  は 10%~22% となる。すなわち、流入射流の気泡混入量  $C_{mean}$  が増加するにつれて、 $X/d_1 \leq 15$  の範囲で主流に気泡が混入されるようになり、最大流速が短区間で減衰されたものと推定される。

表-1 実験条件

$\theta=30^\circ$	$\theta=55^\circ$
$0 \leq C_{mean} \leq 0.38$	$0 \leq C_{mean} \leq 0.55$
$5.8 \leq F_1 \leq 7.4$	$7.1 \leq F_1 \leq 13$
$1.0 \leq h_d/h_2 \leq 4.2$	$1.0 \leq h_d/h_2 \leq 6.0$
$4.0\text{cm} \leq d_c \leq 8.0\text{cm}$	$4.0\text{cm} \leq d_c \leq 8.3\text{cm}$

$F_1, C_{mean}, h_2$  の定義

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gd_1 \cos \theta}} = \frac{q_w}{\sqrt{gd_1 \cos \theta d_1}}$$

$$C_{mean} = \frac{1}{y_{0.9}} \int_0^{y_{0.9}} \bar{C} dy$$

$$h_2 = \frac{d_1}{2} \left( \sqrt{8F_1^2 \cos \theta + 1} - 1 \right)$$

$\bar{C}$ :  $y=y$  における気泡混入率<sup>6)</sup>、  
 $d_c$ : 限界水深、 $d_1$ : 遷移部始端での水のみへ換算した水深、 $F_1$ : 流入射流のフルード数、 $g$ : 重力加速度、  
 $h_d$ : 下流水深、 $q_w$ : 単位幅流量、  
 $V_1$ : 遷移部始端での断面平均流速 ( $V_1=q_w/d_1$ )、 $y$ : 水路床からの垂直距離、 $y_{0.9}$ : 遷移部始端での  $C=90\%$  となる  $y$  の値

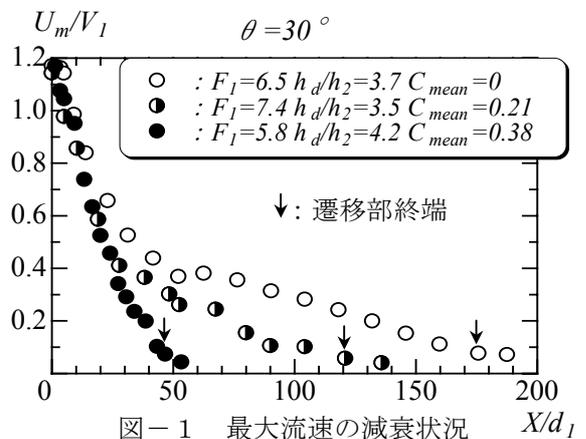


図-1 最大流速の減衰状況

キーワード: 減勢工、洪水吐、傾斜水路、減勢池、気泡混入、跳水

連絡先: 〒101-8303 東京都千代田区神田駿河台 1-8; Tel.&Fax.: 03-3259-0668; E-mail: yokyas@civil.cst.nihon-u.ac.jp

**流入射流の気泡混入量の変化に対する遷移長の変化**

相対下流水深が  $h_d/h_2=3.2\sim 3.5$  の場合を対象に、流入射流の断面平均された気泡混入率  $C_{mean}$  による遷移長の変化を図-3に示す。ここで、遷移長  $L_j$  とは遷移部始端から逆流が常に観察されなくなった断面までの水平距離を示し、遷移部終端では流速が十分減衰している<sup>4)</sup>。図中の  $C_M$  は表-1に示す  $C_{mean}$  の最大値を示している。図に示されるように水路傾斜角度  $\theta$  に関わらず、 $C_{mean}/C_M \leq 0.6$  で  $L_j/h_2 \approx 14\sim 16$  となり  $0.6 < C_{mean}/C_M \leq 0.8$  で  $L_j/h_2$  は大きく減少し、 $C_{mean}/C_M > 0.8$  で  $L_j/h_2=5\sim 6$  となり水平水路に形成される自由跳水の長さ<sup>2)</sup>とほぼ同じ値を示す。図-4に示されるように、 $C_{mean}/C_M \leq 0.6$  では遷移部始端の底面近くの気泡混入率は小さく、 $C_{mean}/C_M \geq 0.8$  では底面付近の気泡混入率  $\bar{C}$  が大きくなっている。

なお、 $C_M$  の値は水路傾斜角度  $\theta$  によって変化し(図-5)、著者らの実験によって次式で示される。

$$C_M = \left( \frac{\tan \theta - 0.20}{10} \right)^{0.29} \quad (2)$$

$$0.34 \leq \tan \theta \leq 1.4 \quad (19^\circ \leq \theta \leq 55^\circ)$$

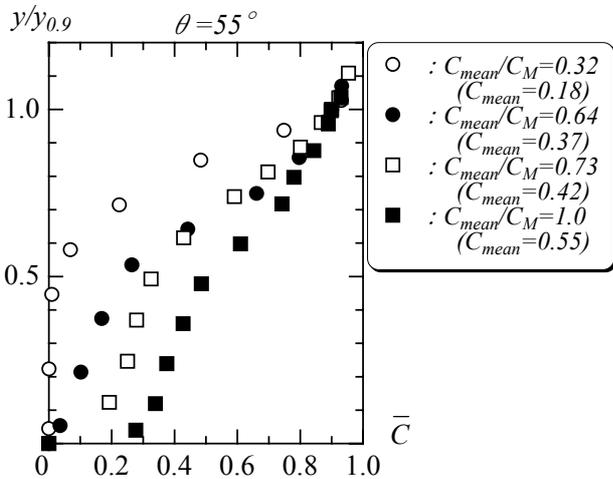


図-4 遷移部始端での気泡混入率の分布 ( $\theta=55^\circ$ )

流入射流の気泡混入量  $C_{mean}$ 、水路傾斜角度  $\theta$  および相対下流水深  $h_d/h_2$  の変化を考慮し、水路傾斜角度  $\theta > 23^\circ$ <sup>3)</sup>において遷移長  $L_j/h_2$  の実験式を以下に提案する。

$$\left. \begin{aligned} L_j/h_2 &= (4.6 - 2.1 C_{mean}/C_M)(h_d/h_2 - 1) + 5.7 & (0 \leq C_{mean} < 0.6) \\ L_j/h_2 &= 16.8(0.8 - C_{mean}/C_M)(h_d/h_2 - 1) + 5.7 & (0.6 \leq C_{mean} < 0.8) \\ L_j/h_2 &= 5.7 \sim 6.0 & (0.8 \leq C_{mean} \leq 1.0) \end{aligned} \right\} (3)$$

(2)、(3)式により流入射流の気泡混入量を考慮した減勢池の長さが決定できる。

**まとめ**

水路傾斜角度  $\theta=30^\circ$  および  $55^\circ$  における傾斜水路における射流から常流へ遷移する流れを対象とし、流入射流の気泡混入量による遷移部内の流況、最大流速の減衰状況および遷移長の変化について実験的に検討を行った結果、下流水深が十分大きい場合、流入射流の気泡混入量の増加に伴い最大流速が短区間で減衰され、遷移長が短縮されることを明らかにした。また、 $C_{mean}/C_M$  の値が 0.6 以上の場合、主流の減衰に対する気泡混入の影響が大きくなることを明らかにし、流入射流の気泡混入量  $C_{mean}$  および相対下流水深  $h_d/h_2$  を考慮した遷移長  $L_j/h_2$  の実験式を提案した。

**参考文献**

- 1) W. H., Hager.: "Energy Dissipators and Hydraulic Jump", Water Science and Technology Library, vol.8, KLUWER, 1992.
- 2) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Awazu, S.: Free and Submerged Hydraulic Jump in Rectangular Channels, Report 35, Research Institute of Science and Technology, Nihon University, pp.1-50, 1990.
- 3) Ohtsu, I. and Yasuda, Y.: "Hydraulic Jump in Sloping Channels", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 117(7), pp.905-921, 1991.
- 4) 安田, 高橋, 小林, 大津: "傾斜水路の跳水特性に対する空気混入射流の影響", 水工学論文集, 土木学会, 第46巻, pp.601-605, 2002.
- 5) 小林, 安田, 大津: "傾斜水路の跳水特性に対する気泡混入の影響", 土木学会第59回年次学術講演会, pp.259-260, 2004.
- 6) Ohtsu, I., Yasuda, Y., and Takahashi, M.: "Flow Characteristics of Skimming Flows in Stepped Channels", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.30, No.9, pp.860-869, 2004.

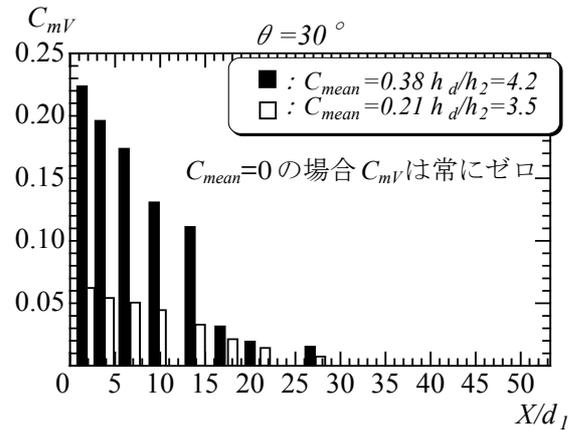


図-2  $C_{mv}$  の  $C_{mean}$  および  $X/d_1$  による変化

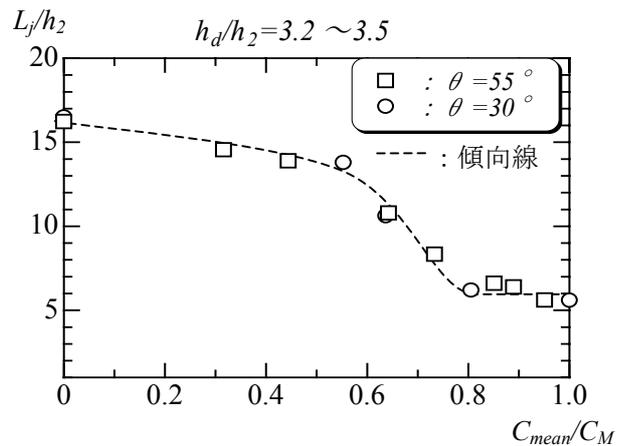


図-3  $C_{mean}/C_M$  による遷移長の変化

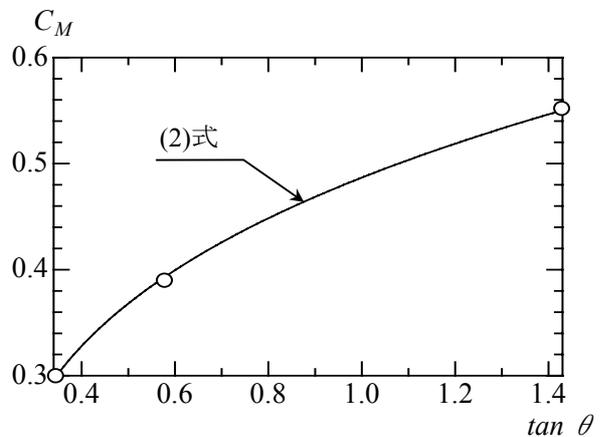


図-5 水路勾配による  $C_M$  変化