

傾斜水路の跳水特性に対する気泡混入射流の影響

EFFECT OF AERATED INFLOWS ON CHARACTERISTICS OF HYDRAULIC JUMPS IN STEEP SLOPING CHANNELS

小林 純¹ ・ 安田 陽一² ・ 大津 岩夫³

Jun KOBAYASHI, Youichi YASUDA and Iwao OHTSU

¹ 学生会員 修(工) 日本大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒101-8303 東京都千代田区神田駿河台 1-8)

² 正会員 博(工) 日本大学助教授 理工学部土木工学科 (〒101-8303 東京都千代田区神田駿河台 1-8)

³ フェロー会員 工博 日本大学教授 理工学部土木工学科 (〒101-8303 東京都千代田区神田駿河台 1-8)

Many researchers investigated jump characteristics in sloping channels, but the effect of an aerated inflow on flow characteristics of hydraulic jumps has not been shown at all. This paper presents the effect of aerated inflow on flow characteristics of hydraulic jumps in steep sloping channels (i.e., 30 and 55 degrees). The experimental investigation reveals the relationship between velocity decay, jump length, and air-concentration distribution in hydraulic jumps under different air-concentration of aerated inflows. Further, an air-concentration distribution in hydraulic jumps has been characterized, and the magnitude and distribution pattern of air-concentration in jumps has been discussed between aerated and non-aerated inflows.

Key Words: *Sloping Channel, Energy Dissipator, Stilling Basin, Hydraulic Jump, Air Concentration, Aerated Inflow*

1. まえがき

堰やダムなどの落差を伴う構造物から流下する高速流のエネルギーを減勢させる方法として、減勢池で跳水現象を起こすことが一般的である。従来、跳水現象に関しては流入射流に気泡が混入されていない場合を対象に、水平水路および傾斜水路における跳水内部の流速特性、跳水長、および跳水上下流端の水深間の関係についての検討^{1)~4)}がなされている。跳水の表面渦から連行される気泡の分布特性や跳水内部の気泡混入特性については、水平水路の場合を対象に Rajaratnam¹⁾、Chanson²⁾によって検討が行われている程度であり、傾斜水路の場合については不明である。さらに、傾斜水路において流入射流に気泡が混入した場合の跳水部の流況特性、最大流速の減衰状況および跳水長を検討した例はない。さらに、現在の跳水式減勢工の水理設計においては流入射流の気泡混入の影響が考慮されていないのが現状である。

著者らは最近、水路傾斜角度 $\theta=30^\circ$ および 55° の傾斜水路における跳水を対象とし流入射流に気泡が混入されている場合の跳水内部の流速特性や跳水長について検

討を行い^{3,7)}、流入射流に気泡が混入されていない場合との違いを明らかにした。

流入射流の気泡混入の有無によって跳水特性の違いが認められることから、跳水現象を利用した水工設計を行う場合、跳水特性に対する流入射流の気泡混入量の影響を知ることが重要である。

本研究では水路傾斜角度 $\theta=30^\circ$ および 55° の傾斜水路の跳水を対象として、流入射流の気泡混入量を変化させて流況、跳水内部の最大流速の減衰状況および遷移長についてそれらの変化特性を実験的に明らかにした。また、跳水内部の気泡混入特性についても実験的に明らかにした。

2. 実験

本実験では水路傾斜角度 $\theta=30^\circ$ 、 55° の長方形断面傾斜水路において射流から常流へ遷移する流況を対象とした。また、表-1に示す実験条件のもとで傾斜水路における流況特性について検討を行った。なお、実験に用いた水路の長さは 5.2m~8.0m であり、流況特性を検討

表一の断面平均された気泡混入率⁵⁾ C_{mean} 、跳水始端での射流のフルード数 F_1 、水平水路上に跳水が形成される場合の共役常流水深 h_2 はそれぞれ(1), (2), (3)式によって算出される。

$$h_2 = \frac{d_1}{2} \left(\sqrt{8F_1^2 \cos \theta + 1} - 1 \right) \quad (3)$$

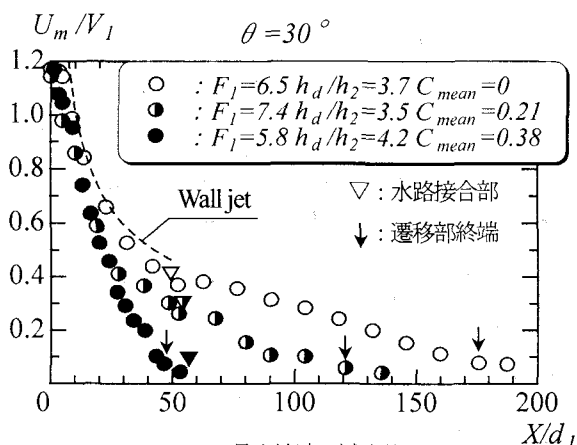


図-3 最大流速の減衰状況

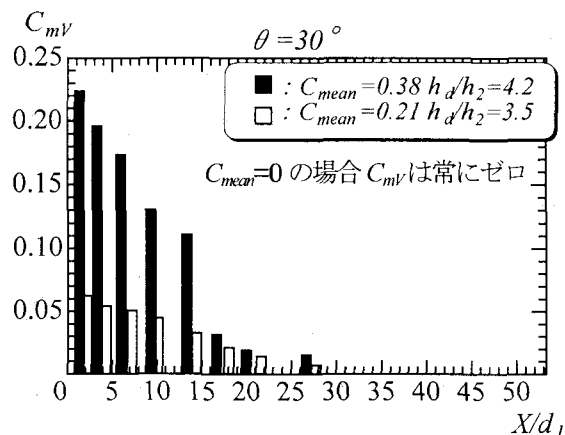


図-4 C_{mv} の C_{mean} および X/d_1 による変化

広範囲にわたって形成され、潜流が形成される⁴⁾。一方、流入射流に十分気泡が混入すると ($\theta=30^\circ$ の場合 $C_{mean}=0.38$, $\theta=55^\circ$ の場合 $C_{mean}=0.53$)、流入射流の気泡混入の影響により気泡が主流に連行されやすくなり、主流の巻き上げに対する気泡の浮力の影響によって短区間で主流が水路床から水面に向かって上昇しやすくなり、傾斜面上で跳水が形成されるようになる⁹⁾。

流入射流の断面平均された気泡混入率 C_{mean} を変化した場合の流況変化を図-2に示す。ただし、水路傾斜角度 θ 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} が小さい場合(図-2(b)), 遷移部内部に気泡の混入は認められるものの水路底面に沿った主流には気泡が混入されず主流の巻き上げに対する浮力の効果が得られない。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。 C_{mean} の値を小さい値から徐々に大きくしていくと、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} の増加に伴い主流の巻き上げに対する浮力の効果が大きくなり、逆流域の長さが短縮される。さらに、 C_{mean} を増加させ流入射流に十分気泡が混入されると(図-2(c)), 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となる。

4. 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(4)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-3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-4に示す。ただし、図-3および4は同一の水理条件のもとで比較したものである。

$$U_m/V_1 = f(X/d_1, F_1, h_d/h_2, \theta, C_{mean}) \quad (4)$$

ここで、 U_m は任意の断面での最大流速、 X は遷移部始端

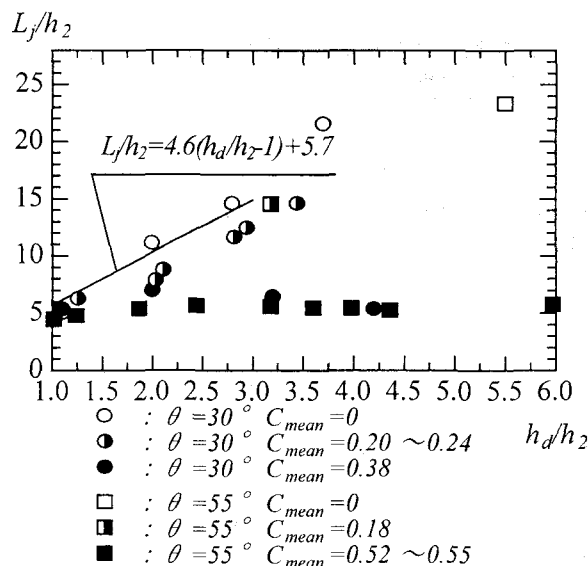


図-5 相対下流水深 h_d/h_2 による遷移長 L_j/h_2 の変化

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。

図-3に示されるように $C_{mean}=0$ の場合、最大流速の減衰状況は傾斜面上では壁面噴流の場合¹⁰⁾と同様な傾向を示す。このように壁面噴流と同様な減衰状況になることについては、 $\theta > 23^\circ$, $h_d/h_2 > 3.0$, $4 \leq F_1 \leq 14$ で認められ、既に Ohtsu and Yasuda によって明らかにされている⁴⁾。 C_{mean} が 0.21 および 0.38 の場合、図-3に示されるように壁面噴流の場合より、最大流速の減衰が大きくなる。また、流入射流の気泡混入量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-3)。 $C_{mean}=0.38$ の場合、図-4に示されるように、 $X/d_1 \leq 15$ で最大流速が生じる位置で気泡混入率が 10%~22%となる。

すなわち、流入射流の気泡混入量が増加するにつれて、主流の最大流速が $0.5 < U_m/V_1 < 1.0$ の範囲で気泡が十分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。

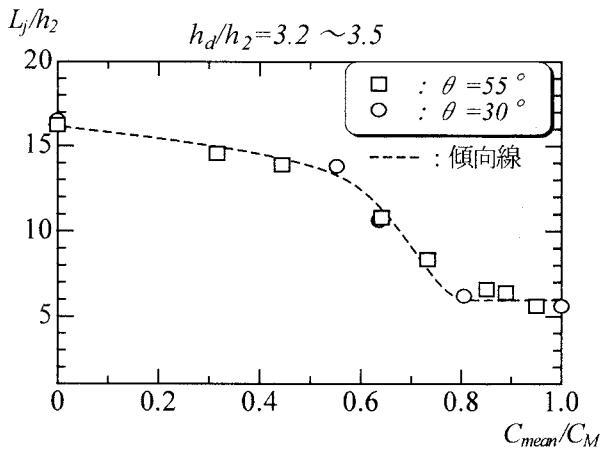


図-6 C_{mean}/C_M による遷移長の変化

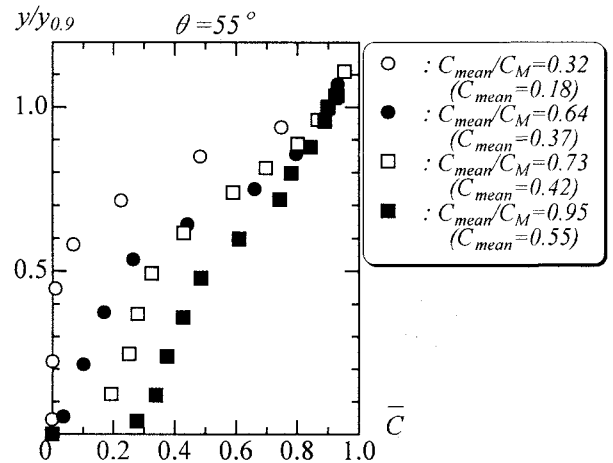


図-7 遷移部始端での気泡混入率の分布($\theta=55^\circ$)

5. 遷移長の変化に対する流入射流での気泡混入の影響

水路傾斜角度 $\theta=30^\circ$, 55° における相対下流水深 h_d/h_2 による遷移長 L_j/h_2 の変化を図-5に示す。ここで遷移長 L_j は遷移部始端から終端までの水平距離であり、遷移部終端断面を水表面の逆流が常に観察されなくなった最初の鉛直断面として定めている(図-1)。また、終端断面では流速が十分に減衰し、流下方向に対し最大流速の変化が小さくなる最初の鉛直断面に対応している。なお、図-5中実線は流入射流に気泡が混入されない場合($C_{mean}=0$)の遷移長の実験式⁴⁾を示している。

流入射流の気泡混入量が小さい場合($C_{mean} \approx 0.2$)、図-5に示されるように主流の減衰に対する浮力の影響が小さくなり、non-aerated inflow の場合($C_{mean}=0$ の場合)と同様に下流水深が大きくなるにつれて遷移長が増加する。 C_{mean} の大きさが大きくなるとある段階で、遷移長 L_j/h_2 は下流水深の大きさにほとんどよらず、結果的に水平水路上に形成される跳水の長さ($L_j/h_2 \approx 5.7$)²⁾と同じ大きさを示した。

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-6に示す。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 C_{mean}/C_M が0.6以下の場合、 C_{mean}/C_M による L_j/h_2 の変化は小さく、 L_j/h_2 の値は大きい。これは、流入射流に含まれる気泡が短区間で水面に向かって上昇するため、底面付近に位置する主流の減衰に対する気泡の影響が小さかったものと考えられる。また、図-7に示されるように、遷移部始端付近において底面近くの気泡混入率は小さい。 C_{mean}/C_M が0.6~0.8の範囲にある場合、 C_{mean}/C_M による L_j/h_2 の変化が大きくなる。また、 C_{mean}/C_M の値が0.8以上になると、 L_j/h_2 は水平水路上に形成される自由跳水の長さ²⁾とほぼ同じ値を示す。このことから、 C_{mean}/C_M が0.6以上となると

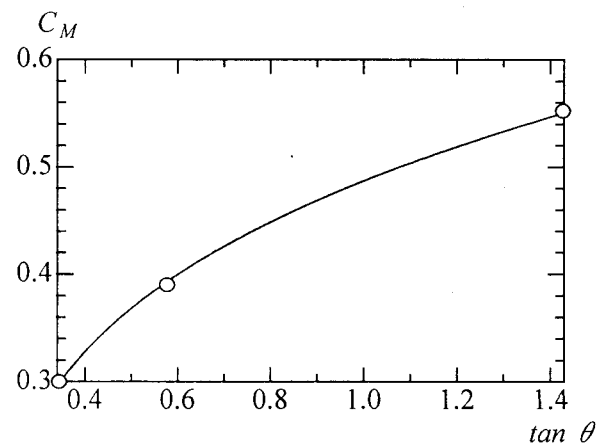


図-8 水路勾配による C_M 変化

主流の減衰に対する気泡混入の影響が大きくなるものと考えられる。図-7に示されるように、 C_{mean}/C_M が0.6以上になると底面付近の気泡混入が認められる。

水路勾配の変化による C_M の変化を図-8に示す。図に示されるように、水路傾斜角度 θ が大きくなるにつれて C_M の値が大きくなり、実験的に次式で示される。

$$C_M = \left(\frac{\tan \theta - 0.20}{10} \right)^{0.29} \quad (5)$$

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

$$30000 \leq R_e \leq 300000$$

なお、 $\theta=19^\circ$ の場合の C_M は文献9)の実験値を用いている。

6. 遷移部内部の気泡混入特性

遷移部内部の気泡混入率の変化を図-9に示す。ただし、遷移部始端での気泡混入率 C_{mean} が C_M となる場合を対象とする。また、 C_o は遷移部内部の各測定断面において $y=0$ から $y=y_{0.9}$ までの平均された気泡混入率を表している。図に示されるように、 C_o/C_M は水路傾斜角度 θ 、相

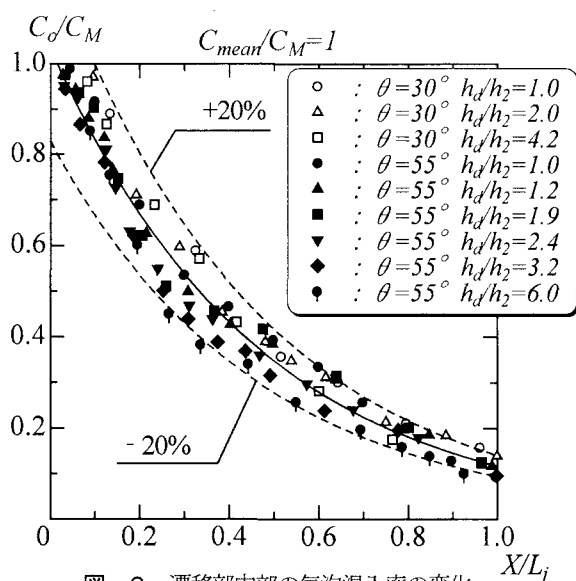


図-9 遷移部内部の気泡混入率の変化

対下流水深 h_d/h_2 によらず XL_j によって整理される。このことから、与えられた水路傾斜角度 θ および流入射流の条件に対して相対下流水深 h_d/h_2 が大きくなるほど跳水内部の気泡混入量が大きくなることが理解される。なお、図-9において水路傾斜角度による違いが生じなかったことは、各測定断面において断面平均された気泡混入率 C_o と C_M との比 C_o/C_M および水平下距離 X を遷移長 L_j で無次元化したもの XL_j を用いたためと考えられる。 XL_j による C_o/C_M の変化を表す実験式を以下に示す。

$$\frac{C_o}{C_M} = e^{0.0353 - 2.18 \frac{X}{L_j}} \quad (6)$$

水路傾斜角度 $\theta=30^\circ$ および 55° の傾斜水路と水平水路との水路接合部直下流側で跳水が形成される流況を対象とし、遷移部内部の気泡混入率の変化を図-10に示す。図に示されるように、与えられた θ , F_l に対して遷移部始端流入部($XL_j=0$)付近を除いて遷移部内部における C_o の変化は流入射流の気泡混入量に関わらず同様な傾向を示す。これは、水路接合部直下流側で跳水が形成される場合、跳水始端での気泡混入の有無に関わらず表面渦の形成は同様となり、さらに表面渦の形成によって取り込まれる気泡混入量が流入射流の気泡混入量に比べて多いため C_{mean} による跳水内部の断面平均された気泡混入率の変化に違いが生じなかったものと考えられる。

Chanson によって水平水路における Free jump 内の気泡混入率が測定されている⁵⁾。図-10と同様な整理方法で本実験結果と比較すると、図に示されるように同一の F_l に対して同様な傾向が得られる。

これらのことから、跳水内部の気泡混入量は流入射流の気泡混入量にほとんど影響されないことが理解される。

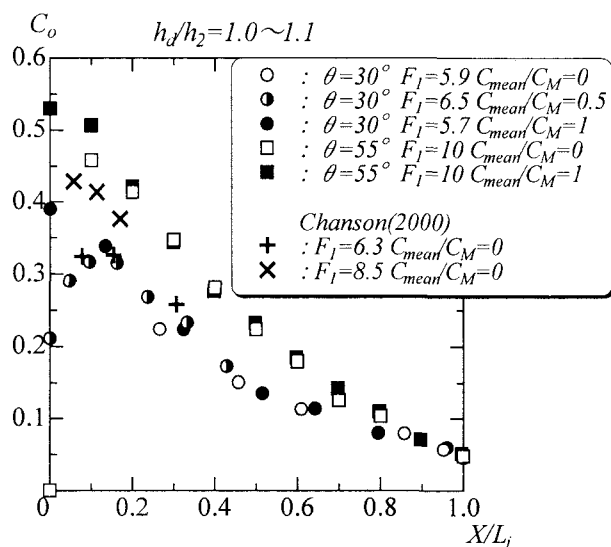


図-10 遷移部内部の気泡混入率の変化
(水路接合部の直下流側で跳水が形成される場合)

7. まとめ

水路傾斜角度 $\theta=30^\circ$, 55° の傾斜水路における跳水を対象とし、流入射流の気泡混入量の変化による流況特性、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した。また、遷移部内の気泡混入特性についても実験的に検討した。得られた結果を以下にまとめる。

- ① 流入射流の断面平均された気泡混入率が小さい場合、遷移部には気泡の混入は認められるものの主流が水路底面を沿って下流側まで流下する。一方、流入射流の断面平均された気泡混入率が増加するにつれて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、主流の巻き上げに対する浮力の効果が大きくなる。
- ② 相対下流水深が十分大きい場合、流入射流の断面平均された気泡混入率が増加するにつれて遷移部内の各測定断面で最大流速が生じる位置の気泡混入率が大きくなり、主流の減衰に対する気泡の浮力の影響が大きくなる。これらのことから、最大流速が短区間で減衰される。
- ③ 流入射流の断面平均された気泡混入率が小さい場合、遷移長 L_j/h_2 は non-aerated inflow の場合よりわずかながら短くなり、下流水深が大きくなるにつれて遷移長が増加する。また、遷移部始端での気泡混入率が大きくなると、特に $C_{mean}/C_M \geq 0.8$ の範囲では、水路傾斜角度 θ および相対下流水深 h_d/h_2 の変化に関わらず遷移長 L_j/h_2 がほぼ一定になり自由跳水長と一致する。

- ④ 相対下流水深が $h_d/h_2=3.2\sim 3.5$ の場合、流入射流の断面平均された気泡混入率 C_{mean} と流入射流の断面平均された気泡混入率の最大値 C_M との比で遷移長について整理すると、水路傾斜角度の大きさに関わらず遷移長 L_j/h_2 が C_{mean}/C_M によって変化する。
- ⑤ $C_{mean}=C_M$ の場合、遷移部内の各測定断面における平均された気泡混入率 C_o と C_M との比 C_o/C_M は、水路傾斜角度および相対下流水深に関わらず XL_j で整理される。
- ⑥ 水路接合直下流側で跳水が形成される場合、流入射流の断面平均された気泡混入率に関わらず C_o は同様な傾向を示し、跳水内部の気泡混入量が流入射流の気泡混入量にほとんど影響されない。

参考文献

- 1) Rajaratnam, N.: Hydraulic jumps, *Advances in Hydrosience*, Vol.4, Academic Press, New York, pp. 197-280, 1967.
- 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) W. H., Hager : *Energy Dissipators and Hydraulic Jump*, Water Science and Technology Library, Vol.8, KLUWER, Dordrecht, 1992.
- 4) Ohtsu, I. and Yasuda, Y.: Hydraulic Jump in Sloping Channels, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.117, No.7, pp.905-921, 1991.
- 5) Chanson, H.: *Air Bubble Entrainment in Free Surface Turbulent Shear Flows*, Academic Press, New York, 1996.
- 6) 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.
- 7) 小林、高橋、安田、大津: 跳水特性に対する流入射流の空気混入量の影響, 第 30 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, CD-ROM, 2003.
- 8) Yasuda, Y. and Ohtsu, I.: Flow Resistance of Skimming Flows in Stepped Channels, *Proceeding of 28th IAHR Congress*, Graz, Austria, Session of B14 (CD-ROM), 1999.
- 9) 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.
- 10) Rajaratnam, N.: *Turbulent Jets*, Developments in Water Science, Vol.5, Elsevier Pub. Co., 1976.

(2004. 9. 30 受付)