

傾斜水路における跳水特性に対する空気混入射流の影響

Effect of Aerated Inflow on Jump Characteristics in a Sloping Channel

日本大学理工学部 正 安田 陽一 日本大学大学院 学 ○小林 純
日本大学理工学部 正 大津 岩夫 日本大学理工学部 正 高橋 正行

1. はじめに

堰やダム等落差を伴う構造物を流下する高速流を減勢させるために一般的に跳水式減勢工が用いられる場合がある。跳水の特性については様々な研究が行われているが、それらはいずれも流入射流に空気が混入しておらず、流入射流における空気混入の影響が考慮されていない。しかし、実構造物において、流入射流に多量の空気が混入されているため、流入射流に空気が混入されたことによって跳水の特性がどのように変化するかを知ることは水工設計上重要である。本研究では、傾斜水路における跳水を対象に、流入射流に空気が混入される場合と混入されない場合の跳水長、跳水内部の流速特性、空気混入特性について実験的に比較・検討を行った。

2. 実験方法

実験では、水路傾斜角度 $\theta = 30^\circ$ を対象とし、相対下流水深 h_d/h_2 を同一にした状態で流入射流の空気混入の有無により表 - 1 の実験条件のもとで跳水の特性がどのように異なってくるのかを検討した。ここでは流入射流に空気が混入された場合を aerated inflow、空気が混入されていない場合を non-aerated inflow とする。aerated inflow を形成させるために階段状水路¹⁾を用い、跳水始端直上流側から下流側では滑面水路とした。なお、空気混入率の測定については点電極型ボイド率計を用いた（採取時間 60s 採取間隔 5s）。また、流速測定においては2成分電磁流速計を用いた（採取時間 120s 採取間隔 50ms）。水路床付近の流速測定においてはピトー管を併用して計測した。

表 - 1 実験条件

	θ (deg.)	F_1	d_c (cm)	C_{mean}	h_d/h_2
aerated inflow	30	5.66	6.10	0.39	1.1
non-aerated inflow	30	5.92	8.98	0	1.1
aerated inflow	30	5.80	4.00	0.38	2.0
non-aerated inflow	30	5.80	5.14	0	2.0
aerated inflow	30	5.80	4.00	0.38	4.2
non-aerated inflow	30	6.56	4.37	0	3.7

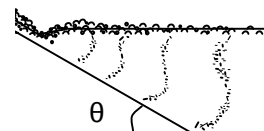


図 - 1 aerated inflow

3. 流況の説明

水路傾斜角度 θ 、流入射流のフルード数 $F_1 (F_1 = V_1 / (g d_1 \cos \theta)^{1/2}, d_1$: 流入射流の水のみに換算した水深) が一定のもとで、non-aerated inflow および aerated inflow について下流水深の変化に伴う流況の変化を図 - 2 に示す。non-aerated inflow の場合、図 - 2 (a) の状態から下流水深を大きくしていくと、傾斜面と水平面とにまたがって跳水が形成され（図 - 2 (b)）、さらに下流水深を増加させ、 $h_d/h_2 > 3$ となると跳水の形成が認められなくなる²⁾（図 - 2 (c)）。

一方、aerated inflow の場合、下流水深の大小に関わらず常に跳水が形成される。特に、下流水深が大きく $h_d/h_2 > 3$ となっても水路傾斜面上で跳水の形成が認められる。

4. 跳水長

相対下流水深 h_d/h_2 の変化に対する相対跳水長 L_j/h_2 の変化を図 - 3 に示す。ここに示される h_d は下流水深、 h_2 は $h_2 = d_1 ((8 F_1^2 \cos \theta + 1)^{1/2} - 1)/2$ であり、 C_{mean} とは流入射流の断面平均された空気混入率で、式(1)を用いて求められる。

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

また、跳水長 L_j は跳水始端から逆流が観察されなくなった最初の断面までの水平距離と定義し、跳水終端では流速が十分に減衰されている³⁾。水路傾斜角度 θ 、流入射流のフルード数 F_1 が一定のもとで水路接合部直下流側で跳水が形成される場合は空気混入の有無に関わらず跳水長に違いは認められない。non-aerated inflow の場合、下流水深の増加に伴い跳水長も増加する²⁾。一方、aerated inflow の場合、下流水深が増加しても跳水長の変化は小さい。

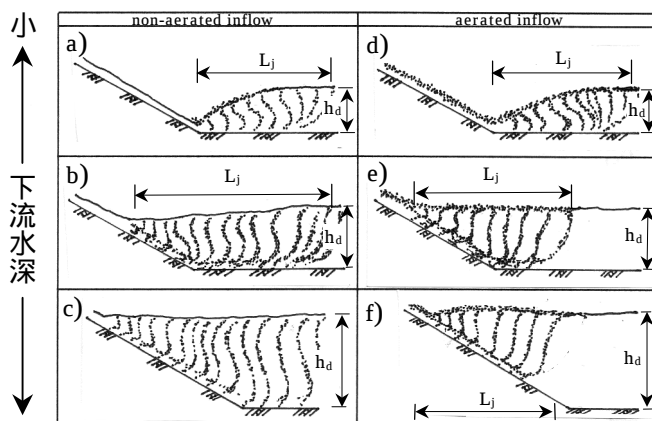
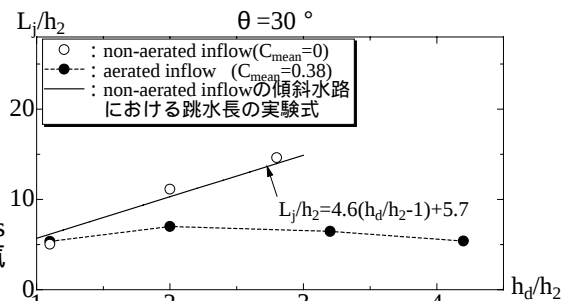
図 - 2 流況図 ($\theta = 30^\circ$)

図 - 3 下流水深の変化に対する跳水長の変化

キーワード：洪水吐 エネルギー減勢工 減勢池 跳水 空気混入 射流

〒101-8303 東京都千代田区神田駿河台 1-8 TEL. 03-3259-0668 FAX. 03-3259-0409

5. 跳水内部の流速特性

θ 、 F_1 、 h_d/h_2 を同一にし、流入射流の空気混入の有無の違いによる跳水中の最大流速の減衰状況の変化を知るため、式(2)に基づき実験値を整理したものを図-4に示す。

$$U_m/V_1 = f(x/d_1, F_1, h_d/h_2, \theta, C_{mean}) \dots (2)$$

ただし、 U_m は任意の断面での最大流速、 V_1 は跳水始端での断面平均流速、 x は跳水始端から水路床に沿った流下距離を示す。

5-1) 水路接合部直下流側で跳水が形成される場合

図4-aに示されるように最大流速の減衰状況は、流入射流の空気混入の有無に関わらず壁面噴流の場合³⁾(図-4中実線)よりも短区間で減衰されFree jumpの場合³⁾(図-4中一点鎖線)と同様となる。すなわち、最大流速の減衰に対する流入射流の空気混入の影響が小さい。

5-2) 下流水深を十分大きくした場合

相対下流水深 h_d/h_2 が十分に大きい場合の一例として $h_d/h_2=4.2$ の場合について示す。aerated inflow が non-aerated inflow よりも U_m は短区間で減衰している(図4-b)。これは最大流速の減衰に対する流入射流の空気混入の影響が大きい考えられる。

6. 跳水内部における主流幅の広がり状況

跳水内部において主流幅 Y ($du/dy < 0$ かつ $u=U_m/2$ となる y の値)の広がり状況を図-5に示す。non-aerated inflow の場合、下流水深が大きくなるにつれて主流幅の広がり状況は Free jump の場合³⁾(図-5中破線)から壁面噴流の場合^{2),3)}(図-5中実線)に移り変わる。一方、aerated inflow 場合、下流水深の大小に関わらず主流幅の広がり状況は Free jump の場合⁴⁾(図-5中破線)と同様な傾向を示す。

最大流速の減衰状況と主流幅の広がり状況から、今回対象とした水路傾斜角度 $\theta=30^\circ$ において流入射流が空気混入されたことによって下流水深の大小に関わらず、常に跳水が形成される。

7. aerated inflow の場合の跳水内部の空気混入特性

θ 、 F_1 、 C_{mean} を一定にして底面から主流幅 Y ($du/dy < 0$ かつ $u=U_m/2$ となる y の値)までの空気混入率の平均値 C_Y が断面の位置 x/L_j 、下流水深 h_d/h_2 によってどのような変化をするかを示したものを図-6に示す。なお、平均された空気混入率 C_Y は式(3)から求めている。

$$C_Y = \frac{1}{Y} \int_0^Y C dy \dots (3)$$

$h_d/h_2=4.2$ の場合、跳水始端付近に多量の空気が混入されているのに比べ、水路接合部直下流側で跳水が形成される場合 ($h_d/h_2=1.09$ の場合) 空気の混入が少ないことがわかる。このことから、流入射流の断面平均された空気混入率 C_{mean} が同一でも、下流水深が大きくなるにつれて跳水始端付近の主流幅内に多くの空気が残ることによって、主流の巻き上げに対する気泡の浮力の影響が大きく、跳水長が短縮されたものと考えられる。

8. まとめ

傾斜水路の跳水を対象とし、流況、跳水長、跳水内部の流速特性および空気混入特性に対する流入射流の空気混入の影響について実験的に検討を行った結果、次の知見が得られた。流況においては、non-aerated inflow の場合、 $\theta > 23^\circ$ では傾斜面上での跳水の形成は認められない。しかし、aerated inflow の場合、 $\theta=30^\circ$ において傾斜面上での跳水の形成が認められることを初めて明らかにした。傾斜水路接合部直下流側で跳水が形成される場合(図-2(a),(b))、流入射流の空気混入の有無によらず最大流速の減衰状況および跳水長については大きな違いは認められなかった。一方、下流水深が増加すると(図-2(f))、aerated inflow の場合、下流水深が大きくなるにつれて主流(底面から主流幅付近まで)に多量の空気が連行され、主流の巻き上げに対する浮力の影響により、短区間で跳水内部の最大流速が減衰されるようになり、その結果傾斜面上で跳水が形成されるようになることを明らかにした。

参考文献

- 1) Y. Yasuda and I. Ohtsu, (1999), "Flow Resistance of Skimming Flows in Stepped Channels." Proc. 28th IAHR Congress, Graz, Austria, Session B14 (CD-ROM).
- 2) I. Ohtsu and Y. Yasuda, (1991), "Hydraulic Jump in Sloping Channels." Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 117(7), pp. 905-921.
- 3) I. Ohtsu, Y. Yasuda and S. Awazu, (1990), "Free and Submerged Hydraulic Jump in Rectangular Channels." Report of the Research Institute of Science and Technology, Nihon Univ., No. 35, pp. 1-50.
- 4) 安田、高橋、小林、大津、(2002)、"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.

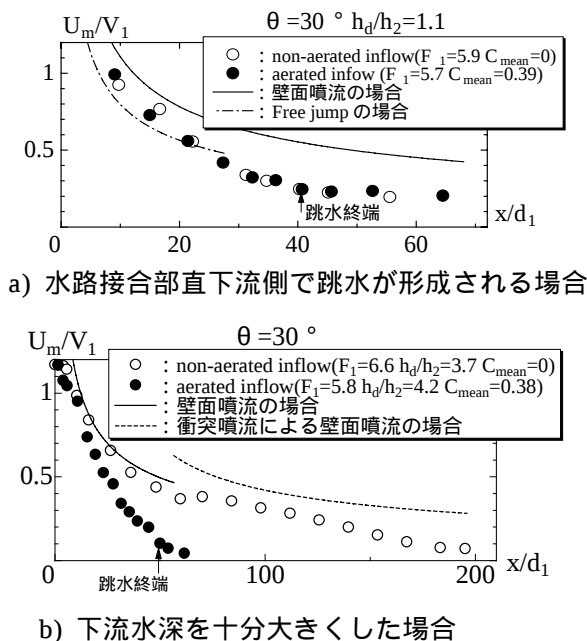


図-4 最大流速の減衰状況

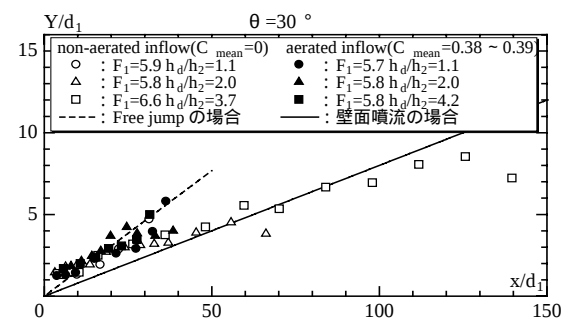


図-5 跳水内部における主流幅の広がり状況

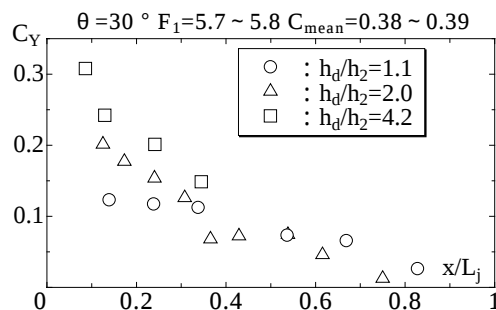


図-6 主流幅内の断面平均された空気混入率