

跳水特性に対する流入射流の空気混入量の影響

日本大学大学院 学 〇小林 純
日本大学理工学部 正 高橋 正行
日本大学理工学部 正 安田 陽一
日本大学理工学部 正 大津 岩夫

1. はじめに

堰やダム等落差を伴う構造物から流下する高速流を減勢させる方法として、一般的に跳水式減勢工が用いられている。跳水現象については従来から流速特性および遷移長について様々な研究¹⁾が行われているものの、それらはいずれも流入射流の空気混入の影響が考慮されていない。実構造物において流入射流が空気混入されている場合が多く見つけられるため、流入射流に空気が混入された場合、跳水内部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。最近、著者らによって水路傾斜角度と下流水深が大きい場合、流入射流に十分空気が混入されたことによって主流が短区間で巻き上げられ、遷移長が大幅に短縮されることを明らかにした²⁾。本報では、傾斜水路における跳水を対象とし流入射流における空気混入量が跳水のフローパターン、跳水内部の流速特性、主流幅の広がり状況、遷移長に及ぼす影響を実験的に検討した。



図 - 1 aerated inflow

2. 実験方法

本実験では、 $\theta = 30^\circ$ における傾斜水路の跳水を対象とした。跳水始端での流入射流のフルード数 F_1 、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量の変化により跳水内部の流速特性および流況特性がどのように変わるかを表 - 1の実験条件のもとで検討を行った。また、下流水深を変化させた場合の流況の変化についても検討した。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。なお、滑面傾斜水路模型を用いて実験を行った場合、non-aerated inflow となるため、aerated inflow を形成させるために階段状水路³⁾を用いた(図 - 1)。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)。水路床付近においてはピトー管を併用して計測した。流入射流における断面平均された空気混入率 C_{mean} および遷移部内部の空気混入率の測定は点電極型ボイド率計を用いた(採取時間 60s 採取間隔 5ms)。

表 - 1 実験条件

non-aerated inflow	aerated inflow
$\theta = 30^\circ$	$\theta = 30^\circ$
$C_{mean}=0$	0.21 C_{mean} 0.39
5.9 F_1 6.5	5.7 F_1 8.0
1.1 h_d/h_2 3.7	0.98 h_d/h_2 4.2
4.4 $d_c(\text{cm})$ 9.0	4.0 $d_c(\text{cm})$ 6.1
41 $H_{dam}(\text{cm})$ 63	$H_{dam}(\text{cm})=152.5$
$S/dc=0$	0.12 S/dc 0.82

3. 流況

$\theta = 30^\circ$ の場合の non-aerated inflow および aerated inflow における下流水深の変化に伴う流況の変化について説明する。non-aerated inflow で、傾斜面と水平面とにまたがって跳水が形成される場合、主流が水路接合部に衝突し、流線の曲がりの影響を大きく受ける。また、下流水深の増加に伴い表面渦の形成領域が大きくなる。さらに下流水深を増加させていくと、主流が水路底面付近に沿って下流側遠方まで続き、逆流域が広範囲にわたって形成される。すなわち大きな循環流を伴った潜流が形成される。

一方、aerated inflow の場合、流入射流の空気混入の影響により気泡が主流に連行されやすくなり、下流水深の増加に伴い気泡の浮力効果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る。流入射流に十分空気 ($C_{mean}=0.38$) が混入され下流水深が十分に大きくなると、傾斜面上で跳水が形成されるようになる。なお、流入射流の空気混入量が減少した状態 ($C_{mean}=0.2$) で、下流水深が大きくなると主流の流速が十分減衰されていない状態で気泡のみが水面に向かって上昇し、主流が底面付近に位置する。

d_c : 限界水深 H_{dam} : ダム高 S : ステップ高

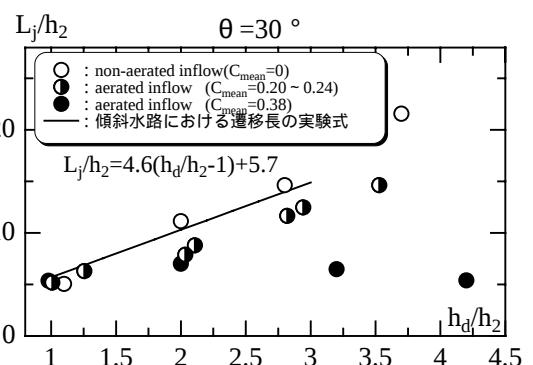


図 - 2 相対下流水深の変化に対する遷移長の変化

4. 遷移長

図 - 2 は、non-aerated inflow と aerated inflow における相対下流水深(h_d/h_2)の変化に対する遷移長(L_j/h_2)の変化を示す。ここに示される遷移長とは始端流入部から終端断面までの水平距離である。なお、遷移部終端断面では、逆流が観測されず流速が十分に減衰されている。水路接合部直下流側で跳水が形成させる場合は空気混入量に関わらず遷移長は大きく変化しない。non-aerated inflow の場合、下流水深を増加させていくと遷移長も増加していく。

aerated inflow の場合、流入射流に十分空気が混入されると ($C_{mean}=0.38$) 浮力の影響により下流水深の変化に対する遷移長の変化は小さい。流入射流の空気混入量が小さくなると、図に示されるように、流速の減衰に対する浮力の影響が小さくなり、下流水深が大きくなるにつれて、遷移長が増加する。

5. 遷移部の流速特性

遷移部における最大流速の減衰状況を知るため、式(1)に基づき実験値を整理したものを図-3に示す。

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

ただし、 U_m は任意の断面での最大流速、 V_1 は遷移部始端での断面平均流速、 x は遷移部始端から水路床に沿った流下距離、 F_1 は遷移部始端における流入射流のフルード数 ($F_1 = V_1 / (g d_1 \cos \theta)^{1/2}$)、 d_1 は遷移部始端における水のみで換算した水深、 θ は水路傾斜角度、 h_d は下流水深、 h_2 は $h_2 = d_1((8 F_1^2 \cos \theta + 1)^{1/2} - 1)/2$ を示す。図中、矢印は遷移部終端断面の位置を示す。

5-1) 水路接合部直下流側で跳水が形成される場合 (図3-)

最大流速の減衰状況は、自由跳水の場合⁵⁾(図-3中一点鎖線)と同様になる。また、壁面噴流の場合⁴⁾(図-3中実線)より短区間で流速が減衰され流入射流の空気混入量の変化による違いはほとんど見られない。すなわち、最大流速の減衰に対する流入射流の気泡混入の影響は小さかったものと考えられる。

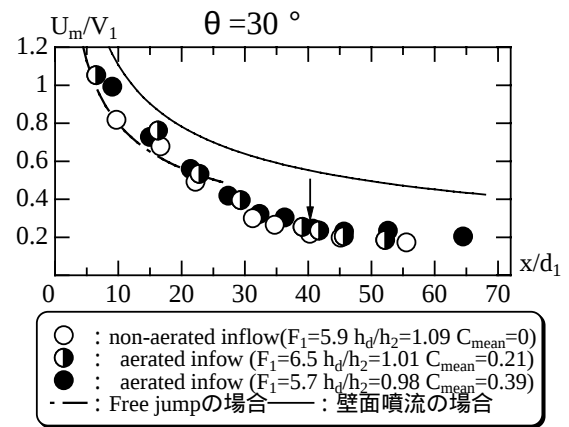
5-2) 下流水深が十分に大きい場合

$C_{mean}=0.38$ 、 $h_d/h_2=4.2$ の場合、 U_m は短区間で減衰される(図3-)。これは、主流が気泡混入による浮力の影響を受け傾斜面上で巻き上げられたためと考えられる。また、図3-に示されるように、与えられた θ に対して、 $C_{mean}=0.38$ の場合の方が $C_{mean}=0.21$ の場合よりも U_m は短区間で減衰していることが示される。

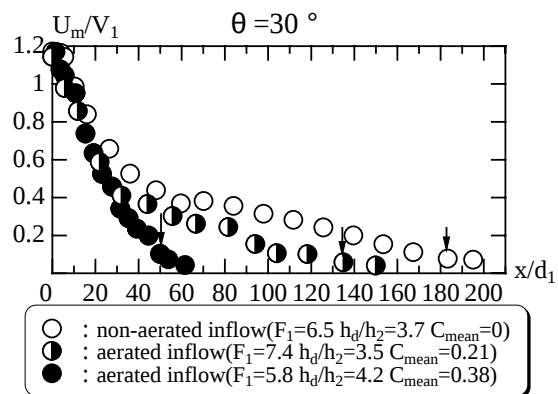
6. 遷移部における主流幅の広がり状況

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-4に示す。non-aerated inflowの場合、水路接合部直下流側で跳水が形成されると主流幅の広がり状況は Free jump の場合⁵⁾(図-4中一点鎖線)と同様な傾向を示し、下流水深が大きくなるにつれて主流幅の変化は壁面噴流の場合と同様な傾向となる。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⁵⁾(図-4中一点鎖線)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 $\theta=30^\circ$ において流入射流に十分空気が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。

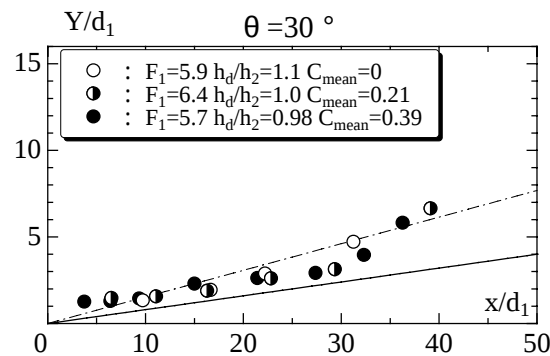


水路接合部直下流側で跳水が形成される場合

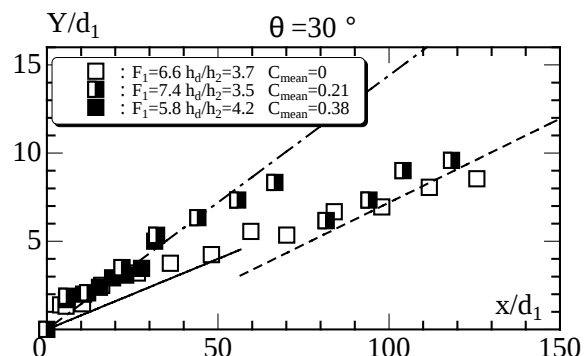


下流水深を十分大きくした場合

図-3 最大流速の減衰状況



水路接合部直下流側で跳水が形成される場合



下流水深が十分大きい場合

(Free jump の場合：一点鎖線 壁面噴流の場合：実線 衝突噴流による壁面噴流の場合：破線)

図-4 主流幅の広がり状況

7. まとめ

傾斜水路の跳水を対象として、流入射流の空気混入量の変化による遷移部の流速特性、主流幅の広がり状況、遷移長の変化について実験的に検討を行った結果、以下のような知見が得られた。水路接合部直下流側で跳水が形成される場合、流入射流の空気混入量による最大流速の減衰状況および遷移長の違いは見られなかった。一方、下流水深が増加し傾斜面と水平面にまたがって跳水が形成されるようになると、流入射流の空気混入量が増加するにつれて最大流速が短区間で減衰し、遷移長も短縮されることを明らかにした。また、主流幅の広がり状況から $\theta=30^\circ$ において常に跳水が形成されることを明らかにした。

参考文献

- 1) W.H.Hager (1992), "Energy Dissipaters and Hydraulic Jump," Water Science and Technology Library vol.8, KLUWER.
- 2) 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," 土木学会水工論文集, 第46巻, pp.601-605.
- 3) Y.Yasuda and I.Ohtsu (1999), "Flow Resistance of Skimming Flows in Stepped Channels," Proc.28th IAHR Congress, Graz, Austria, Session B14 (CD-ROM).
- 4) I.Ohtsu and Y.Yasuda (1991), "Hydraulic Jump in Sloping Channels," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 117(7), pp.905-921.
- 5) I.Ohtsu, Y.Yasuda and S.Awazu (1990), "Free and Submerged Hydranlic Jump in Rectangular Channels," Rep. No.35, pp.1-50.