

傾斜水路の跳水特性に対する気泡混入の影響

日本大学大学院理工学研究科 学生員
 日本大学理工学部 正 員
 日本大学理工学部 正 員
 日本大学理工学部 正 員

○小林 純
 高橋 正行
 安田 陽一
 大津 岩夫

はじめに 堰やダムなど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跳水式減勢工が用いられている^{1),2)}。流入射流に空気が混入されていない場合(non-aerated inflow)の跳水特性については様々な研究^{2),3)}がなされている。しかし、実構造物から流下する高速流は多量に空気混入されている場合が多い。著者は傾斜水路の跳水を対象とし流入射流に空気が混入された場合(aerated inflow)の流速特性や跳水長について検討し、水路傾斜角度および下流水深が大きい場合、流入射流に空気が混入されていない場合に比べ流速が短区間で減勢されることが明らかにした⁴⁾。しかし、流入射流に空気が混入された場合の水深間の関係については不明な点が多い。本研究では、水路傾斜角度 $\theta=55^\circ$ の aerated inflow の場合における傾斜水路の跳水を対象とし、跳水上下流端の水深間の関係について実験的・解析的に検討した。

実験方法 $\theta=55^\circ$ における傾斜水路の跳水を対象とし、表-1に示す実験条件のもとで跳水長および跳水上下流端の水深間の関係について実験を行った。なお、aerated inflow を形成させるためにここでは階段状水路を用いた。また、水路水平部の底面圧力はピトー管の静圧管を用いて測定した。さらに、流入射流における断面平均された気泡混入率 C_{mean} および跳水内部の気泡混入率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 non-aerated inflow の場合、傾斜面と水平面とにまたがって跳水が形成されると、流速の減衰に対する水路接合部での流線の曲がりの影響を受ける。下流水深が十分に大きい場合(図1-a)、高速流が水路底面に沿い下流側遠方まで到達し、広範囲にわたって逆流が形成される⁴⁾。

aerated inflow の場合、跳水部に多量に気泡が混入される。特に下流水深が十分に大きい場合(図1-b)、主流に連行された気泡の浮力によって傾斜面上で跳水が形成されるようになる。図中の C_{mean} は跳水始端での断面平均された気泡混入率を示す。

跳水長 流入射流の気泡混入の有無による跳水長の変化を図-2に示す。ここで示される L_j とは、跳水始端から逆流が観察されなくなる断面までの水平距離を示し、跳水終端では流速が十分に減衰される。図に示されるように non-aerated inflow の場合、下流水深が増加するにつれて跳水長は増加する³⁾。

一方、aerated inflow の場合、下流水深の大小にかかわらず跳水長の大きさはほぼ一定になる。なお、 $h_d/h_2=5.5$ の場合、aerated inflow の跳水長は non-aerated inflow の跳水長の 26%程度となる。

跳水上下流端の水深間の関係 図-3に示される跳水部を検査部を選び、水路傾斜方向に運動量方程式を適用すると(1)式が得られる。このとき、検査部水路底面での壁面摩擦力、検査面での Reynolds 応力による表面力および水表面での表面張力を無視する。また、跳水部において気泡(気相)と水流(液相)が一体となって運動するものと仮定する。さらに水路横断方向に対し、物理量は変化しないものとする。なお、(1)式は単位幅で示されている。

$$(W_s)\sin\theta + (W_H - F_H)\sin\theta + P_1 - P_d\cos\theta = \rho_w q_w (\beta_d V_d \cos\theta - \beta_l V_l) \quad (1)$$

(1)式の各項について検討を加える。

(質量力項)

W_s および W_H は検査部において傾斜面上および水平面上の流体の重量を示し次式で示される。

$$W_s = S_s \frac{\rho_w g}{2} \{y_{0.9}^2 \tan\theta + k'(y_{0.9}/\cos\theta + h_j)\ell\} \quad (2)$$

$$W_H = S_H \frac{\rho_w g}{2} \{k'(h_d + h_j)(L_j - \ell)\} \quad (3)$$

k' は跳水始端と終端を直線で結ぶことで表した跳水部の体積と、気泡混入率が 90% となる高さで表した跳水部の体積との比を示す。図-4に示されるように、下流水深の増加に伴い、跳水部の水面形は直線とみなすことができるようになり k' は 1 に近づく。

ここで S_s は跳水部における傾斜面上の実際の重量と水に置き変えた重量との比であり、 S_H は跳水部における水平面上の実際の重量と水に置き換えた重量との比を示す。下流水深の変化に対する S_s, S_H の実験値を図-5に示す。下流水深の増加に伴い、跳水部において気泡の占める割合が小さくなり、 S_s, S_H 共に 1 に近づく傾向となる。

特に $h_d/h_2 \geq 4$ では水路水平部が水で満たされるようになるため S_H の値は 1 に近づく。

表-1 実験条件

aerated inflow
$\theta=55^\circ$
$10.0 \leq F_1 \leq 13.0$
$0.52 \leq C_{mean} \leq 0.55$
$1.0 \leq h_d/h_2 \leq 6.0$
$4.37\text{cm} \leq d_c \leq 6.47\text{cm}$
$0.77 \leq s/d_c \leq 1.14$

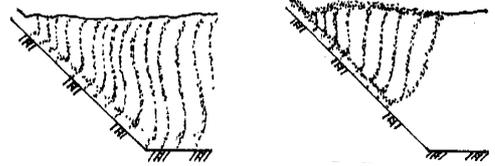
F_1, C_{mean}, h_2 の定義

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

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

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

\bar{C} : $y=y$ における気泡混入率 d_c : 限界水深 d_1 : 跳水始端での水のみで換算した水深 F_1 : 流入射流のフルード数 h_d : 下流水深 s : ステップ高 V_1 : 跳水始端での断面平均流速 y : 水路床からの垂直距離 $y_{0.9}$: 跳水始端での $\bar{C}=90\%$ となる y の値



a) $h_d/h_2=5.5$ $C_{mean}=0$ b) $h_d/h_2=6.0$ $C_{mean}=0.53$

図-1 下流水深が十分大きい場合の流況

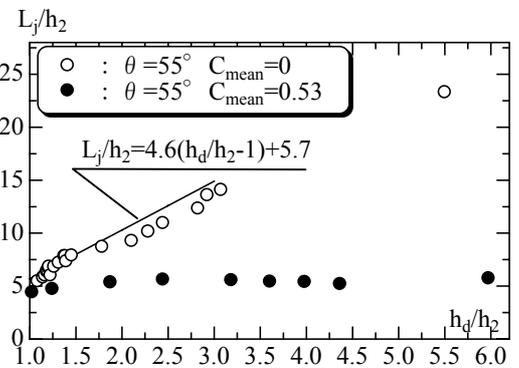


図-2 跳水長の変化

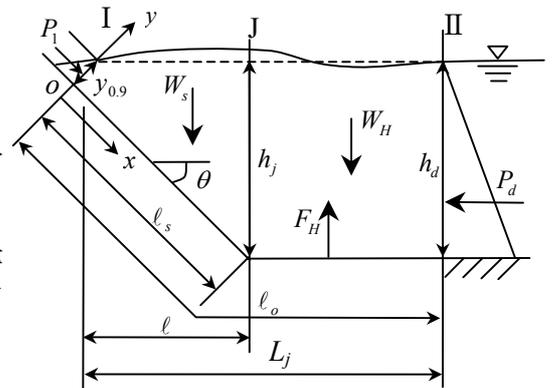


図-3 定義図

キーワード: 減勢工、洪水吐き、減勢池、空気混入、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

(水路水平部の跳水中に作用する底面圧力項)

F_H は水路水平部の跳水中に作用する底面圧力を示し、次式で表される。

$$F_H = rW_H \quad (4)$$

r は水路水平部の跳水中に作用する実際の底面圧力の値と静水圧と仮定した場合の底面圧力の値との比である。図-6より、下流水深が増加するにつれて水路傾斜面上で主流が巻き上がり、水路接合部で流線の曲がりによる底面圧力の増加が認められなくなるため r は 1 に近づく。

(跳水始端、終端での圧力項)

P_1, P_d は跳水始端断面および終端断面での単位幅当たりの全圧力を示し、次式で表される。

$$P_1 = \rho_w g \cos \theta \int_0^{y_{0.9}} \int_y^{y_{0.9}} (1 - \bar{C}) dy dy = \lambda_1 \frac{\rho_w g}{2} d_1^2 \cos \theta \quad (5)$$

$$P_d = \lambda_d \frac{\rho_w g}{2} h_d^2 \quad (6)$$

ここで、 λ_1 は跳水始端での全圧力を静水圧と仮定し、水のみで換算した水深 d_1 および水の密度 ρ_w を用いて表示したことによる補正係数である。

λ_d は跳水終端断面での全圧力の補正係数であり、この場合、気泡混入はなく静水圧分布していることから $\lambda_d = 1.0$ である。 λ_1 は $\theta = 55^\circ$ の場合、 $C_{mean} = 0.52 \sim 0.55$ において実験的に $\lambda_1 = 1.57 \sim 1.70$ と算出される。跳水始端断面の圧力項は他の項に比べて小さいことから $\lambda_1 = 1.0$ と仮定した場合との違いは小さい。したがって、跳水上下流端の水深間の関係に対して $\lambda_1 = 1.0$ と仮定できる。

(運動量の項)

跳水始端での運動量の項に示される β_1 は水のみで換算した水深 d_1 、水のみでの単位幅流量 q_w 、水の密度 ρ_w を用いて表示したことによる補正係数であり、次式で示される。

$$\beta_1 = \int_0^{y_{0.9}} \rho u^2 dy / \rho_w q_w V_w \quad (7)$$

$$\rho = (1 - \bar{C}) \rho_w \quad V_w = q_w / d_1$$

実験的に求めた気泡混入率 \bar{C} および流速 \bar{u} を(7)に代入して β_1 を求めると C_{mean} の変化に関わらず $\beta_1 = 1.03 \sim 1.05$ となり、 $\beta_1 \approx 1.0$ と近似することができる。なお、跳水始端での流速分布は実験的に指数則分布 $\bar{u}/V_{0.9} = (y/y_{0.9})^{1/n}$ ($V_{0.9}$ は $y = y_{0.9}$ のときの \bar{u}) で近似できる。

跳水終端断面での運動量補正係数 β_d については、流速の大きさが小さく、運動量の大きさが他の項に比べて小さいことから $\beta_d = 1.0$ とみなす。

以上の検討結果から(1)式は次式のように無次元表示される。

$$\left(\frac{h_d}{d_1}\right)^3 - \left[S_s \left\{ \frac{\tan \theta}{(1 - C_{mean})^2} + k' \left(\frac{1}{(1 - C_{mean}) \cos \theta} + \frac{h_d}{d_1} \right) \frac{\ell}{d_1} \right\} \tan \theta + S_H (1 - r) \left\{ k' \left(\frac{h_d}{d_1} + \frac{h_d}{d_1} \right) \left(\frac{L_j}{d_1} - \frac{\ell}{d_1} \right) \right\} \tan \theta + 1 + 2F_1^2 \left(\frac{h_d}{d_1} \right) + 2F_1^2 \cos \theta \right] = 0 \quad (8)$$

図-2、4~6で得られた結果を(8)式に代入することによって跳水上下流端の水深間の関係(9)が得られる。

$$d_1 = f(h_d/d_1, F_1, \theta, C_{mean}) \quad (9)$$

d_1, F_1, θ および C_{mean} を(9)式に代入して算出した h_d/d_1 を $(h_d/d_1)_{cal}$ とし、実験的に得られた h_d/d_1 を $(h_d/d_1)_{exp}$ として比較したものを 図-7に示す。図に示されるように誤差 $| (h_d/d_1)_{exp} - (h_d/d_1)_{cal} | / (h_d/d_1)_{exp} \times 100(\%)$ が 5%以内となった。

図-8は $C_{mean} = 0.53$ および 0 における水深間の関係(10)を示す。図中実線が $C_{mean} = 0.53$ の場合であり、破線が $C_{mean} = 0$ の場合を示す。図に示されるように、与えられた θ, F_1 、および h_d/d_1 に対して、 $C_{mean} = 0.53$ の d_1 の値は $C_{mean} = 0$ の d_1 の値に比べて大きくなるのが理解される。これは、跳水部に気泡が混入されたことによって、跳水始端近くで体積が増加するため、 $C_{mean} = 0$ の場合よりも跳水始端位置が上流側に位置したものと考えられる。

まとめ 水路傾斜角度 $\theta = 55^\circ$ の傾斜水路における跳水を対象とし、実験的・解析的に跳水上下流端の水深間の関係について検討した。すなわち、流入射流および跳水部に混入した気泡の影響を考慮することによって、気泡混入した跳水上下流端の水深間の関係を明らかにすることができた。今後、広範囲の実験条件のもとで aerated inflow における跳水上下流端の水深間の関係について検討することによって、洪水吐から流下する高速流に気泡が混入された場合における減勢池の土工設計の精度を向上することができる。

謝辞：本研究を実施するにあたり、平成 15 年度日本大学学術フロンティア「地域環境の評価と保全に関する研究」から研究助成を受けた。ここに記して謝意を述べる。

参考文献

- 1) “水理公式集” 土木学会，全 713 ページ(1999)
- 2) W.H.Hager (1992), “Energy Dissipaters and Hydraulic Jump,” Water Science and Technology Library vol.8, KLUWER.
- 3) I.Ohtsu and Y.Yasuda (1991), “Hydraulic Jump in Sloping Channels,” Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 117(7), pp.905-921.
- 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,” 土木学会水工論文集, 第 46 巻, pp.601-605.

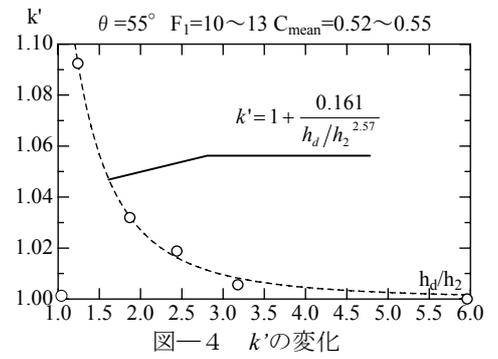


図-4 k' の変化

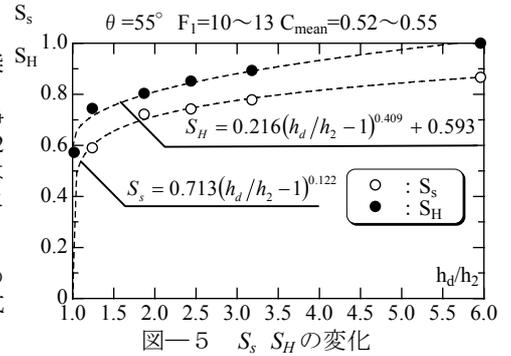


図-5 S_s, S_H の変化

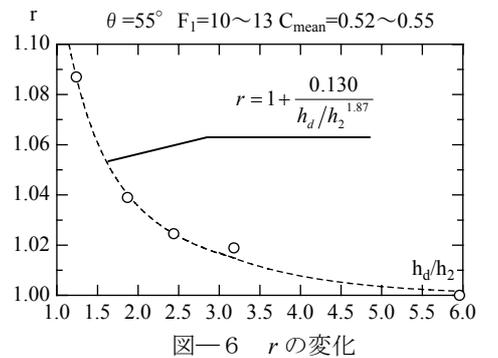


図-6 r の変化

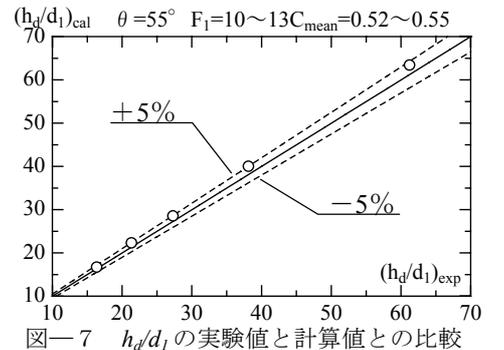


図-7 h_d/d_1 の実験値と計算値との比較

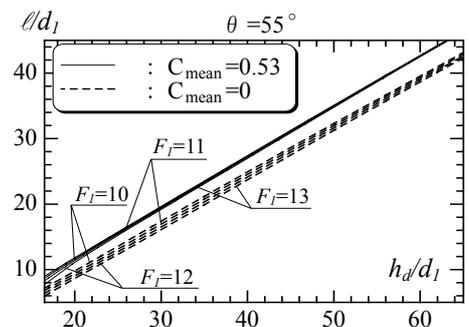


図-8 跳水上下流端の水深間の関係