傾斜水路における跳水上下流端の水深間の関係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 〇小林 純 日本大学理工学部 正 員 安田 陽一
 - 日本大学理工学部 正 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 する検討が行われてきた^{1),2)}。しかし、実際の構造物から流下す る高速流には気泡が混入されている場合が多く、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。最近、著者らは傾斜水路の跳水を対象とし、 流速特性や跳水長に対する流入射流の気泡混入の影響を 示した^{3),4)}。本研究では、水路傾斜角度 θ =55°の傾斜水路におい て水路傾斜面と水平面とにまたがって形成されている跳水 (*B-jump*^{2),3})を対象とし、aerated inflowの場合における跳水長およ び跳水上下流端の水深間の関係について検討し、non-aerated inflowの場合における跳水長および跳水上下流端の水深間の関係 との比較を行った。

実験方法

 θ =55°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³⁾。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)。

跳水長

流入射流に気泡が混入した場合と流入射流に気泡が混入して いない場合の跳水について、下流水深の変化に対する跳水長の変 化を図-1に示す。ここで示される L_i は跳水始端から跳水終端ま での水平距離を示し、跳水終端では水面において逆流が観測され ず、流速が十分に減衰されている断面として定めた。図-1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 れて跳水長は単調増加する²⁾が、aerated inflow においては、下流 水深の変化に伴う跳水長の変化は小さく、跳水長はほぼ一定に近 い値を示す。例えば、 $h_d/h_2=5.5$ 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

水路傾斜面と水平面とにまたがって形成されている跳水(*B-jump*)(図-2)を検査部に選び、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。ただし、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。

$$(W_{S})\sin\theta + (W_{H} - F_{H})\sin\theta + P_{I} - P_{d}\cos\theta = \rho_{w}q_{w}(\beta_{d}V_{d}\cos\theta - \beta_{I}V_{I})$$
(1)

ここで、 q_w は水の単位幅流量、 V_1 は跳水始端での断面平均流速($V_1 = q_w/d_1$)、 V_d は跳水終端での断面平均流速、 β_1 は跳水始端での運動量の補正係数、 β_d は跳水終端での運動量の補正係数、 ρ_w は水の密度を示している。(1) 式を無次元表示すると次式が得られる。

$$\lambda_d \left(\frac{h_d}{d_1}\right)^3 - \left[S_s \left\{\frac{\tan\theta}{(1-C_{mean})^2} + k' \left(\frac{1}{(1-C_{mean})\cos\theta} + \frac{h_j}{d_1}\right)\frac{\ell}{d_1}\right\} \tan\theta + S_H (1-r) \left\{k' \left(\frac{h_j}{d_1} + \frac{h_d}{d_1}\right) \left(\frac{L_j}{d_1} - \frac{\ell}{d_1}\right)\right\} \tan\theta + \lambda_1 + 2\beta_1 F_1^2 \left[\frac{h_d}{d_1}\right] + 2\beta_d F_1^2 \cos\theta = 0 \quad (2)$$

ここで、k'は眺水始端と終端の水面を直線で結んだことによって示される眺水部の体積と気泡混入率が 90%となる高さで表した眺水部の体積との比、rは眺水部の水平面に作用する実際の底面圧力と静水圧と仮定した場合との比、 S_H 、 S_S は眺水部における水平面上および傾斜面上の実際の重量と気泡混入流れの空間を全て水に置き換えたときの重量との比、 λ_I 、 λ_d は眺水始端、終端における全圧力の補正係数を示している。なお、 β_I 、 β_d 、 λ_I 、 λ_d の値はそれぞれ1としている⁴。

運動量方程式の質量力項、全圧力項、運動量の項についてそれぞれ流入射流および跳水部の気泡混入を考慮し 検討した結果⁴⁾、跳水上下流端の水深間の関係式(3)が得られる。

キーワード: 跳水、気泡混入流、水深間の関係、エネルギー減勢、傾斜水路

-259-

表-1 実験条件
$$F_1, C_{mean}, h_2$$
の定義
aerated inflow
 $\theta = 55^{\circ}$
 $10 \le F_1 \le 13$
 $0.52 \le C_{mean} \le 0.55$
 $1.0 \le h_d / h_2 \le 6.0$
 $4.4 \text{cm} \le d_c \le 6.5 \text{cm}$
 $0.77 \le s/d_c \le 1.14$ $h_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gd_1 \cos \theta}}$
 $C_{mean} = \frac{1}{y_{0.9}} \int_0^{y_{0.9}} \overline{C} dy$
 $h_2 = \frac{d_1}{2} (\sqrt{8F_1^2 \cos \theta + 1} - 1)$

 \overline{C} : y=y における気泡混入率、 d_c : 限界水深、 d_l : 跳水始端での水のみに換算した水深、 F_l : 流入射流のフルード数、g: 重力加速度、 h_d : 下流水深、s: ステップ高、 V_l : 跳水始端で の断面平均流速、y: 水路床からの垂直距離、 y_{0g} : 跳水始端での $\overline{C}=90\%$ となるyの値



連絡先:〒101-8308 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

 $h_d/d_1 = f(\theta, F_l, C_{mean}, \ell/d_l)$ (3)

 ℓ/d_1 、 F_1 、 θ および C_{mean} の実験値を(3)式に代入して算出される $h_d/d_1 \delta(h_d/d_1)_{cal}$ とし、実験的に得られる $h_d/d_1 \delta(h_d/d_1)_{exp}$ として比較すると誤差〔 $|(h_d/d_1)_{exp} - (h_d/d_1)_{cal}| / (h_d/d_1)_{exp} \times 100(\%)$ 〕が 5% 以内となった。

図-3は C_{mean} =0.53 および 0 における水深間の関係(3)を示している。図-3の実線は C_{mean} =0.53 の場合であり、破線が C_{mean} =0の場合²⁾(h_d/h_2 <3.0)を示している。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 ℓ/d_1 の 値は C_{mean} =0の ℓ/d_1 の値に比べて大きくなる。これは、跳水部に 気泡が混入されることによって、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が上流側に位置したものと 考えられる。

<u>水路傾斜面と水平面とにまたがって形成される跳水の形成条件</u>

水路傾斜角度 θ =55°において *B-jump* が形成される領域を明ら かにする。non-aerated inflow の場合、1.0 $\leq h_d/h_2 \leq 3.0$ の範囲で *B-jump* が形成される²⁾。aerated inflow の場合、下流水深が大きく なると傾斜面上で跳水が形成されるようになる。このことから跳 水終端が水路接合部に位置したときが *B-jump* の上限に対応する。 <u>i) *B-jump* が形成される下限の相対下流水深</u>

*B-jump*の下限は跳水始端が水路接合部に位置したときである。 すなわち、(2)式において $\ell=0$ となるときの水深間の関係であり、 (4)式で示される。

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

 $+2F_1^2\cos\theta=0\quad (4)$

図-4は C_{mean} =0.53 および 0 において流入射流のフルード数 F_1 の変化に対する B-jump が形成される下限の相対下流水深の変 化を示している。図-4の実線が C_{mean} =0.53 の場合であり、破 線が C_{mean} =0の場合²⁾を示している。 C_{mean} =0.53の方が C_{mean} =0 に比べ相対下流水深 h_d/d_1 は最大で 1.5%減少するが、流入射流の 気泡混入の有無によらず B-jump が形成される下限の相対下流水 深は同様な傾向を示す。

ii) B-jump が形成される上限の相対下流水深

aerated inflow の場合(C_{mean} =0.53)、*B-jump* の上限では、 $\ell=L_j$ となり、水深間の関係は(5)式で示される。 このとき、k'=1.0, r=1.0となる⁴⁾。

$$\left(\frac{h_d}{d_1}\right)^3 - \left[S_s\left\{\frac{\tan\theta}{(1-C_{mean})^2} + \left(\frac{1}{(1-C_{mean})\cos\theta} + \frac{h_d}{d_1}\right)\frac{L_j}{d_1}\right]\tan\theta + 1 + 2F_1^2\left[\left(\frac{h_d}{d_1}\right) + 2F_1^2\cos\theta = 0 \quad (5) \right]$$

図-5の実線は C_{mean} =0.53 において水深間の関係を示す。なお、(5)式において S_s の値は実験式⁴⁾ $[S_s=0.713(h_d/h_2-1)^{0.122}]$ から与えている。また、図-5の破線は $C_{mean}=0$ における *B-jump* の上限を示し、 $h_d/h_2=3.0$ の値を示す。

図-4、図-5から水路傾斜角度 θ =55°において non-aerated inflow および aerated inflow における *B-jump* の形成領域を示すことができた。

<u>まとめ</u>

水路傾斜角度 θ=55°の傾斜水路における *B-jump* を対象とし、 aerated inflow における跳水上下流端の水深間の関係を示し、流入 射流の気泡混入の有無による跳水長および跳水上下流端の水深 間の関係の違いを明らかにした。今後、広範囲な傾斜角度のもと で aerated inflow における跳水上下流端の水深間の関係につい て系統的に検討を行う。

参考文献

1)W.H.Hager (1992), "Energy Dissipaters and Hydraulic Jump," Water Science and Technology Library vol.8, KLUWER.

- 2)I.Ohtsu and Y.Yasuda (1991), "Hydraulic Jump in Sloping Channels," Journal of Hydraulic Engineering, ASCE,117(7),pp.905-921.
- 3)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.
- 4)小林、高橋、安田、大津 (2004), "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 31 回関東支部技術研究発表会, CD-ROM



F_H:水路水平面上の水路底面に作用する表面力 *h_i*:水路接合における跳水上下流端を直線で

結んだ線までの水深

化 : 水路傾斜部の水平長

 P_{I} , P_{d} : 跳水上下流端断面に作用する全圧力 W_{s} , W_{H} : I ~J, J~II 断面までの質量力

x:跳水始端からの水路床に沿った流下距離
 図-2 定義図





