

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 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 have investigated characteristics of the hydraulic jump in sloping channels, but the effect of aerated inflow on flow characteristics of the hydraulic jump has not been shown. 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 that the jump length is affected by the air-concentration of the aerated inflow. The length of the jump has been formulated. By considering the air-concentration in the jump, the sequent depth ratio of the jump in sloping channels has been obtained on the basis of the momentum equation.

Key Words: *Sloping Channel, Energy Dissipator, Stilling Basin, Hydraulic Jump, Sequent depth, 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、構造物下流側の減勢池で跳水を形成させることが一般的である。また、ダムや堰から越流する高速流において多量の気泡混入が生じている場合が多く見られる。しかしながら、流入射流の気泡混入による跳水特性への影響、例えば跳水の流況、跳水内部の流速特性および跳水長への影響についてはほとんど解明されていない。これは、従来の跳水現象の実験的研究^{1)~4)}において、模型規模では流入射流に気泡が混入されないためである。流入射流に気泡が混入された場合の研究についてはRajaratnam⁵⁾による水平水路の自由跳水を対象に、跳水上下流端の水深間の関係を検討した研究があるにすぎない。気泡混入射流による跳水特性への影響を知ることは、河川横断構造物の下流側の減勢池を設計する上で重要である。

最近、著者らは水路傾斜角度 $\theta=30^\circ, 55^\circ$ の傾斜水路において射流から常流へ遷移する流れを対象に、模型規模でも流入射流に気泡が混入される工夫を行い、遷移部の流況について実験的に検討を行った^{5)~6)}。その結果、 $\theta=30^\circ, 55^\circ$ で下流水深 h_d が大きく $h_d/h_2 > 3.0$ の場合(h_2 は

水平水路上の自由跳水の対応水深[図-1 参照])、流入射流に気泡が混入されていないとき、顕著な表面渦は形成されず、広範囲にわたって循環流(逆流)が形成されるようになる。流入射流に多量の気泡が混入すると、遷移部に多量の気泡が混入し、気泡の浮力効果によって水路床に沿って流入した高速流が短区間で水面に向かって上昇し、常に顕著な表面渦が形成されることを見出した⁵⁾。ここでは射流から常流へ遷移する流れの流況において、顕著な表面渦が形成される場合と広範囲に循環流が形成される場合の両者共に跳水と呼ぶことにする。

流入射流の気泡混入の有無によって傾斜水路における表面渦の形成条件、跳水の流況、あるいは跳水長が大きく変化することから、跳水特性に対する気泡混入射流の影響を検討することが重要である。

本研究では傾斜水路において射流から常流へ遷移する流れを対象とし、流入射流の気泡混入量の変化による跳水長の変化を明らかにした。また、流入射流に十分気泡が混入された場合を対象に、流入射流および跳水部における気泡混入の影響を考慮した運動量方程式から、跳水上下流端の水深間の関係について明らかにした。また、跳水上下流端の水深間の関係について、流入射流に気泡が混入された場合と気泡が混入されない場合との違いを示した。

2. 実験

本実験では、水路傾斜角度 $\theta=30^\circ, 55^\circ$ の長方形断面傾斜水路における跳水を対象とし(図-1), 表-1 に示す実験条件のもとで跳水特性について検討を行った。表-1 中の跳水始端での断面平均された気泡混入率 C_{mean} ⁷⁾, 流入射流のフルード数 F_1 および h_2 はそれぞれ(1), (2), (3) 式によって算出される。

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

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gd_1 \cos \theta}} = \frac{q_w}{\sqrt{gd_1 \cos \theta d_1}} \quad (2)$$

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

ここに C は水路底面からの垂直距離 y における時間平均された気泡混入率(=気泡混入量 / (気泡混入量+水の量)), d_1 は水のみに換算した流入射流の水深($d_1 = (1 - C_{mean})y_{0.9}$), q_w は水のみの単位幅流量 ($q_w = Q/B$; B は水路幅, Q は水のみの流量), V_1 は d_1 から求めた断面平均流速 ($V_1 = q_w/d_1$), $y_{0.9}$ は $C=0.9$ となる y の値を示している。なお, q_w は水路下流側に設置された全幅堰から測定した流量 Q より算定した。また, 跳水始端において気泡混入率の分布を水路横断方向に5箇所測定し, 各測定断面の平均された気泡混入率を求め, それらを平均して C_{mean} および d_1 を定めた。

レイノルズ数 Re ($Re = V_1 d_1 / \nu = q_w / \nu$; ν は水の動粘性係数) が $30000 \leq Re \leq 70000$ の範囲で実験を行った場合, 滑面傾斜面上の射流には気泡が混入されないため, 射流中に気泡を混入させるために階段状水路⁸⁾⁹⁾を利用した。また, 流入射流の断面平均された気泡混入率 C_{mean} は流量および階段状水路のステップの高さを変化させて調整した。ただし, 階段状水路の形状が跳水の流況および跳水内部の流速特性に影響しないように跳水始端直上流側から水路接合部までの水路傾斜面を滑面水路とした。図-2 に示されるように, 流入射流の気泡混入率の分布形状は *diffusion model*⁷⁾ によって示された気泡混入率の分布と同様な形状となり, ステップの形状による気泡混入率の分布形状の違いは認められない。

跳水内部の水路底面近傍では気泡がほとんど存在しなかったため, 底面圧力の測定はピトー管の静圧管を用いた。なお, 水路床に設置した圧力取り出し孔を用いた場合とピトー管の静圧管を用いた場合とで圧力の測定値はほとんど同じ値を示すことを実験的に確認している。また, 流入射流における断面平均された気泡混入率 C_{mean} および跳水内部における気泡混入率の測定に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

$\theta = 30^\circ$	$\theta = 55^\circ$
$0 \leq C_{mean} \leq 0.38$	$0 \leq C_{mean} \leq 0.55$
$5.7 \leq F_1 \leq 7.4$	$7.1 \leq F_1 \leq 13$
$1.0 \leq h_d/h_2 \leq 4.2$	$1.0 \leq h_d/h_2 \leq 6.0$
$4.0\text{cm} \leq d_c \leq 8.0\text{cm}$	$4.0\text{cm} \leq d_c \leq 8.3\text{cm}$
$B = 40\text{cm}$	$B = 40\text{cm}, 50\text{cm}$
$H_{dam} = 41.0, 152.5\text{cm}$	$H_{dam} = 82.0, 247.3\text{cm}$

B : 水路幅 d_c : 限界水深
 h_d : 下流水深 H_{dam} : ダム高

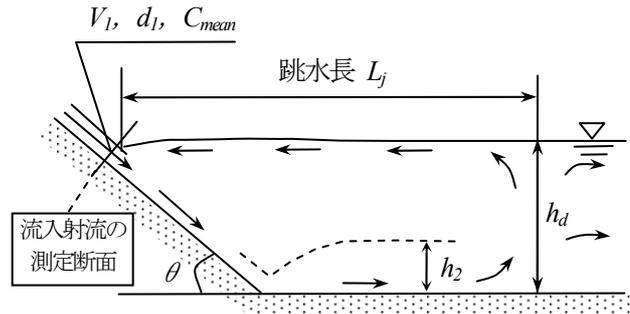
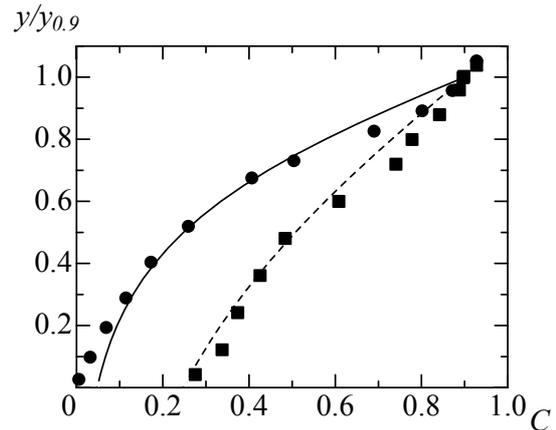


図-1 記号の定義



実験値 ($0.300 < Re \times 10^{-5} < 3.00$)

● : $\theta=30^\circ$ $C_{mean}=0.38$

■ : $\theta=55^\circ$ $C_{mean}=0.55$

Chanson (1996) ($4.52 < Re \times 10^{-5} < 61.8$)

— : $C_{mean}=0.38$

- - - : $C_{mean}=0.55$

図-2 流入射流における気泡混入率の分布

3. 流入射流の気泡混入量による跳水長の変化

水路傾斜角度 $\theta=30^\circ, 55^\circ$ における C_{mean}/C_M による跳水長 L_j/h_2 の変化を図-3 に示す。ここで, C_M はレイノルズ数 Re が $30000 \leq Re \leq 300000$ の範囲における C_{mean} の最大値を示している(本実験において $\theta=30^\circ$ の場合, $C_M=0.38$, $\theta=55^\circ$ の場合, $C_M=0.55$)。また, 跳水長 L_j は跳水始端から逆流が常に観察されなくなった断面までの水平距離として定め, 跳水終端では流速が十分減衰してい

ることを流速測定の結果から確認している³⁾⁶⁾。

図-3 に示されるように、流入射流の断面平均された気泡混入率が $0 \leq C_{mean}/C_M < 0.6$ の範囲では、相対下流水深 h_d/h_2 が大きくなるにつれて広範囲に逆流を伴う循環流が形成され、 L_j/h_2 は大きくなる。この場合、跳水内部の主流に気泡が混入されにくく、主流の巻き上げに対する浮力効果が小さくなったものと考えられる。

$0.6 < C_{mean}/C_M \leq 0.8$ の範囲では、相対下流水深 h_d/h_2 が大きくなるにつれて、 C_{mean}/C_M の増加に伴う L_j/h_2 の減少率が大きくなる。この場合、 C_{mean}/C_M が大きくなるにつれて、跳水内部の主流に気泡が混入されやすくなる。特に、下流水深が大きいほど気泡の浮力効果によって、跳水長が短くなるものと考えられる。

$0.8 < C_{mean}/C_M \leq 1.0$ の範囲では、相対下流水深 h_d/h_2 の大小によらず $L_j/h_2 = 5.7 \sim 6.0$ となり、自由跳水長²⁾とほぼ同じ値を示す。この場合、跳水内部の主流に多量の気泡が常に混入されている。このことから、主流の巻き上げに対する浮力効果が大きく、下流水深の大小に関わらず常に表面渦が形成されるようになったものと考えられる。

なお、水路傾斜角度 $\theta = 30^\circ$ と 55° との間では C_{mean}/C_M による L_j/h_2 の違いは認められない。

流入射流の断面平均された気泡混入率 C_{mean}/C_M および相対下流水深 h_d/h_2 の変化を考慮し、 L_j/h_2 の実験式を以下に提案する。

$$\left. \begin{aligned} L_j/h_2 &= (4.6 - 2.1 C_{mean}/C_M)(h_d/h_2 - 1) + 5.7 & (0 \leq C_{mean}/C_M < 0.6) \\ L_j/h_2 &= 16.8(0.8 - C_{mean}/C_M)(h_d/h_2 - 1) + 5.7 & (0.6 \leq C_{mean}/C_M < 0.8) \\ L_j/h_2 &= 5.7 \sim 6.0 & (0.8 \leq C_{mean}/C_M \leq 1.0) \end{aligned} \right\} (4)$$

なお、水路床から $y = y_{0.9}$ の位置までの跳水始端における気泡混入率 C および流速 \bar{u} の測定結果⁷⁾を次式に代入して単位幅流量 q_w' が求められる。

$$q_w' = \int_0^{y_{0.9}} (1 - C) \bar{u} dy \quad (5)$$

(5)式から得られた q_w' と全幅堰によって測定された q_w とが一致することを確認している。すなわち、 $y_{0.9}$ を気泡混入流の代表水深とすることによって連続の式 $q_w' = q_w$ を満足する。

4. 跳水上下流端の水深間の関係

傾斜水路の跳水を対象に、跳水上下流端の水深間の関係に対する流入射流および跳水部における気泡混入の影響を明らかにするために、図-4 に示される I, II 断面間の跳水部を検査部を選び、水路傾斜方向に運動量方程式

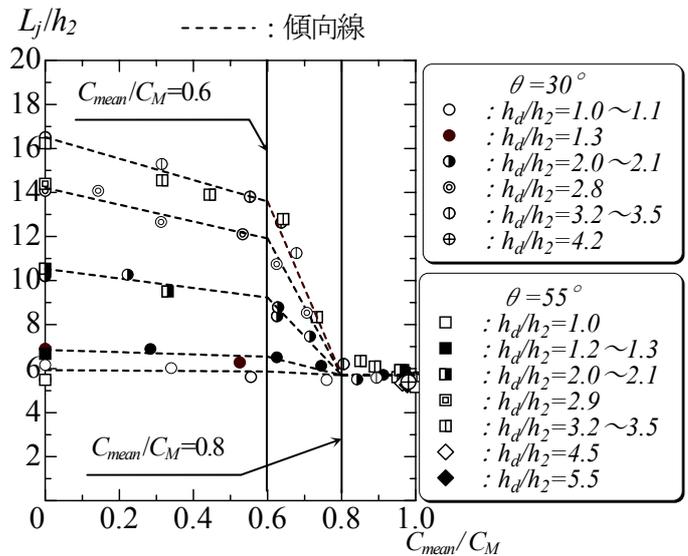
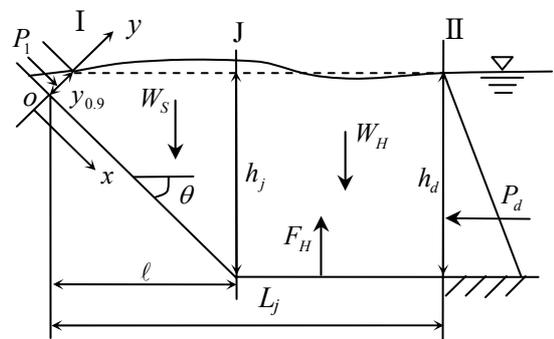


図-3 C_{mean}/C_M による跳水長の変化



F_H : 水路水平面上の水路底面に作用する全圧力
 P_1, 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

図-4 記号の定義図

を適用すると(6)式が得られる。なお、流入射流および跳水部の気泡混入率の変化を密度変化に置き換えて解析を行っている。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水量量は変化しないものとする。なお、(6)式は単位幅の水量量で示され、記号は図-4に基づく。

$$\rho_w q_w (\beta_d V_d \cos \theta - \beta_1 V_1) = (W_S) \sin \theta + (W_H - F_H) \sin \theta + P_1 - P_d \cos \theta \quad (6)$$

ここに、 β_1, β_d は跳水始端・終端での運動量補正係数である。(6)式の各項について以下に示す。

(1) 質量力

W_S および W_H は検査部において水路傾斜面上および水平面上の質量力を示し、次式で示される。

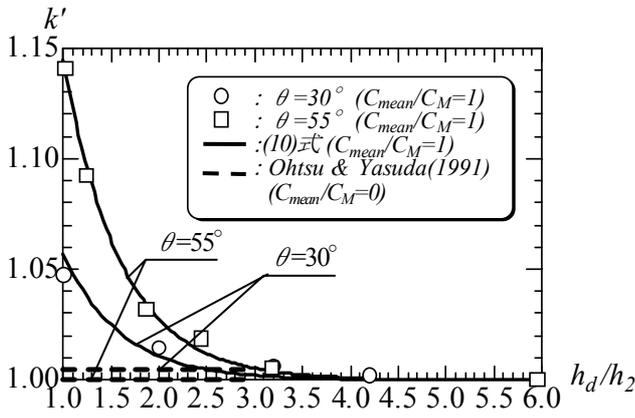


図-5 h_d/h_2 , θ および C_{mean}/C_M による k' の変化

$$W_S = S_S(W_S)_w = S_S \frac{\rho_w g}{2} \{y_{0.9}^2 \tan \theta + k'(y_{0.9} / \cos \theta + h_j)\ell\} \quad (7)$$

$$W_H = S_H(W_H)_w = S_H \frac{\rho_w g}{2} \{k'(h_d + h_j)(L_j - \ell)\} \quad (8)$$

$$h_j = \left(\ell \tan \theta + \frac{y_{0.9}}{\cos \theta} \right) + \left\{ h_d - \left(\ell \tan \theta + \frac{y_{0.9}}{\cos \theta} \right) \right\} \frac{\ell}{L_j} \quad (9)$$

ここで、 k' は跳水始端から終端までの水面形を直線変化するものとみなして算定した跳水部の体積と水面形の実測から求めた跳水部の体積との比を示し、 $(W_S)_w$ および $(W_H)_w$ は検査部において水面までを全て水とした場合の水路傾斜面上および水平面上の質量力を示している。なお、本研究では $C=0.9$ となる位置を水面として定めている。また、 h_j は水路接合部の水路床から跳水始端と跳水終端とを結んだ直線までの高さを示す(図-4 参照)。

$C_{mean}/C_M=1$ の場合における k' の変化を図-5に示す。なお、図-5中の破線は $C_{mean}/C_M=0$ の場合の実験式³⁾を示している。 $C_{mean}/C_M=1$ の場合、跳水始端付近に多量の気泡が混入し水面が上昇するため $C_{mean}/C_M=0$ の場合³⁾に比べ k' は大きい値となる。また、 $C_{mean}/C_M=1$ の場合、相対下流水深 h_d/h_2 の増加に伴い k' は小さくなり、水路傾斜角度 θ および C_{mean}/C_M によらず k' は1に近づく。 $C_{mean}/C_M=1$ における k' の実験式を以下に示す。

$$k' = 1 + 10^{[-0.723 h_d/h_2 + 0.626 \tan \theta - 1.02]} \quad (10)$$

S_S は跳水部における傾斜面上の実際の質量力と傾斜面上の跳水部を全て水とみなして算定した質量力との比であり、 S_H は跳水部における水平面上の実際の質量力と水平面上の跳水部を全て水とみなして算定した質量力との比を示し、次式で定義する。

$$S_S = 1 - \frac{1}{\ell/L_j} \int_0^{\ell/L_j} (C_o) d \left(\frac{X}{L_j} \right) \quad (11)$$

$$S_H = 1 - \frac{1}{1 - \ell/L_j} \int_{\ell/L_j}^1 (C_o) d \left(\frac{X}{L_j} \right) \quad (12)$$

ここに、 C_o は跳水内部の各鉛直測定断面において $y=0$ から $y=y_{0.9}$ までの平均された気泡混入率、 X は跳水始端か

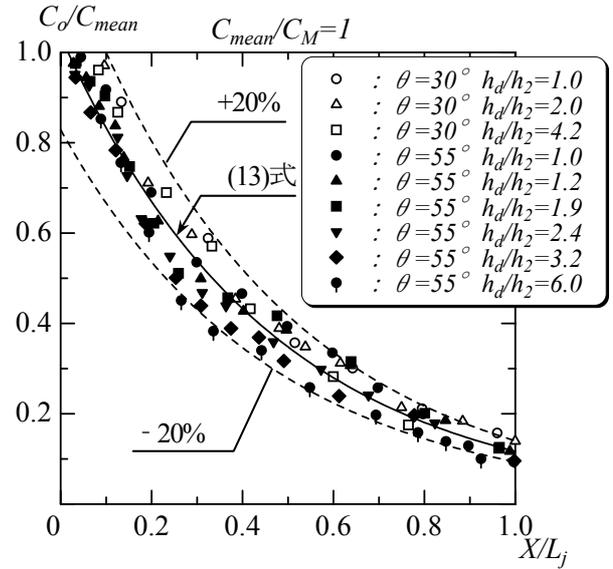


図-6 跳水内部の気泡混入率の変化($C_{mean}/C_M=1$)

らの水平距離を表している。 $C_{mean}/C_M=1$ における跳水内部の気泡混入率 C_o/C_{mean} の変化⁶⁾を図-6に示す。図-6に示されるように、 C_o/C_{mean} は水路傾斜角度 θ 、相対下流水深 h_d/h_2 によらず X/L_j によって整理される。 X/L_j による C_o/C_{mean} の変化を表す実験式を以下に示す。

$$\frac{C_o}{C_{mean}} = e^{0.0353 - 2.18 \frac{X}{L_j}} \left(\frac{C_{mean}}{C_M} = 1 \right) \quad (13)$$

(2) 水路水平部における跳水中の底面に作用する全圧力

F_H は水路水平部における跳水中の水路底面に作用する全圧力を示し、次式で表される。

$$F_H = r W_H \quad (14)$$

ここで、 r は水路水平部の検査部内の底面に作用する実際の全圧力と静水圧と仮定した場合の全圧力との比である。 $C_{mean}/C_M=1$ の場合における r の変化を図-7示す。なお、図-7中の破線は $C_{mean}/C_M=0$ の場合の実験式^{3),10)}を示している。 $C_{mean}/C_M=1$ の場合、 $C_{mean}/C_M=0$ の場合に比べ r は大きい値となる。また、 $C_{mean}/C_M=0$ および1の場合ともに h_d/h_2 の増加に伴い r は減少し1に近づく。 $C_{mean}/C_M=1$ における r の実験式を以下に示す。

$$r = 1 + 10^{[-0.446 h_d/h_2 + \{\ln(\tan \theta - 0.3) - 1.28\} / 2.25]} \quad (15)$$

(3) 跳水始端・終端での全圧力

P_l , 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。

$$P_l = \rho_w g \cos \theta \int_0^{y_{0.9}} \int_y^{y_{0.9}} (1 - C) dy dy$$

$$= \lambda_1 \frac{\rho_w g}{2} d_1^2 \cos \theta \quad (16)$$

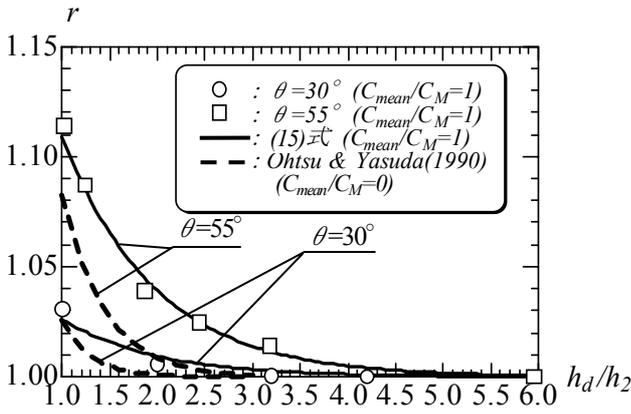


図-7 h_d/h_2 , θ および C_{mean}/C_M による r の変化

$$\lambda_1 = I + \frac{2C_{mean}}{I - C_{mean}} + \frac{2 \int_0^{y^+} \int_0^{y^+} C dy^+}{(I - C_{mean})^2} \quad \left(y^+ = \frac{y}{y_{0.9}} \right)$$

$$P_d = \lambda_d \frac{\rho_w g}{2} h_d^2 \quad (17)$$

ここに、 λ_1 は跳水始端での水のみで換算した水深 d_1 および水の密度 ρ_w で表示したときの全圧力の補正係数である。 C_{mean} による λ_1 の変化を図-8 に示す。図に示されるように、 C_{mean} が増加するにつれて λ_1 は増加する。

λ_d は跳水終端断面における全圧力の補正係数を示している。跳水終端断面では気泡混入されず静水圧分布していることから $\lambda_d = 1.0$ である。

(4) 跳水始端・終端での運動量

跳水始端での運動量に示される β_1 は跳水始端での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 で表示したときの運動量補正係数であり、次式で示される。

$$\beta_1 = \frac{\int_0^{y_{0.9}} \rho \bar{u}^2 dy}{\rho_w q_w V_w} = \frac{\int_0^{y_{0.9}} (I - C) \left(\frac{\bar{u}}{V_{0.9}} \right)^2 dy}{\left[\int_0^{y_{0.9}} (I - C) \left(\frac{\bar{u}}{V_{0.9}} \right) dy \right]^2} d_1 \quad (18)$$

ここで ρ, V_w はそれぞれ $\rho = (I - C) \rho_w, V_w = q_w/d_1$ を示す。

実験的に求められた気泡混入率 C および流速 \bar{u} を(18)式に代入して 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 (図-8) $\beta_1 \approx 1.0$ とみなせる。なお、跳水始端の流速分布は指数則⁷⁾ $\bar{u}/V_{0.9} = (y/y_{0.9})^{1/6}$ ($V_{0.9}$ は $y = y_{0.9}$ のときの \bar{u}) で近似できるものとしている。跳水終端断面での運動量補正係数 β_d については、流速分布の実測値から、 $\beta_d = 1.0$ とみなせることを確認している。

(7), (8), (14), (16), (17)を(6)式に代入し整理すると、次式のように無次元表示される。

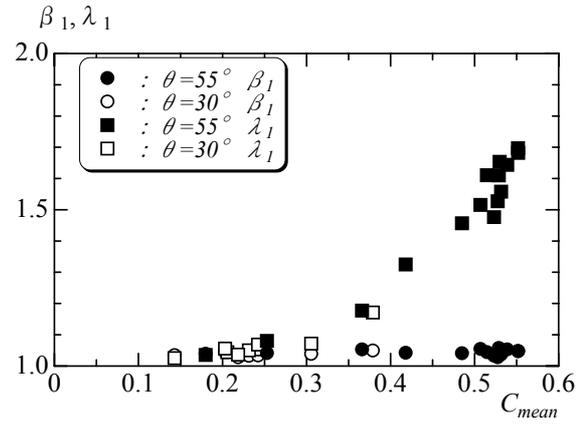


図-8 C_{mean} の変化に対する β_1, λ_1 の変化

$$\left(\frac{h_d}{d_1} \right)^3 - \left[S_S \left\{ \frac{\tan \theta}{(I - C_{mean})^2} + k' \left(\frac{I}{(I - C_{mean}) \cos \theta} + \frac{h_j}{d_1} \right) \frac{\ell}{d_1} \right\} \tan \theta \right. \\ \left. + S_H (I - r) \left\{ k' \left(\frac{h_j}{d_1} + \frac{h_d}{d_1} \right) \left(\frac{L_j}{d_1} - \frac{\ell}{d_1} \right) \right\} \tan \theta + \lambda_1 + 2F_1^2 \right] \left(\frac{h_d}{d_1} \right) \\ + 2F_1^2 \cos \theta = 0 \quad (19)$$

なお、 $\ell/d_1, F_1, \theta$ および C_{mean} を(19)式に代入して h_d/d_1 を算出する際に、 λ_1 の値を1と仮定して計算した場合と実験値の λ_1 の値を用いて計算した場合との差は h_d/d_1 の計算値の1%以内であるため $\lambda_1 = 1.0$ としている。

S_S, S_H, k', r の実験式および $L_j/h_2 \approx 5.7$ を(19)式に代入することによって $C_{mean}/C_M = 1$ における跳水上下流端の水深間の関係(20)式が得られる。

$$\ell/d_1 = f(h_d/d_1, F_1, \theta, C_{mean}/C_M) \quad (20)$$

(19)式から算出された 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 $(h_d/d_1)_{exp}$ として比較すると、誤差 $|(h_d/d_1)_{exp} - (h_d/d_1)_{cal}| / (h_d/d_1)_{exp} \times 100(\%)$ は5%以内となる(図-9)。

$\theta = 30^\circ, 55^\circ$ を対象に $C_{mean}/C_M = 0$ および1における跳水上下流端の水深間の関係の比較を図-10に示す。図中破線は $C_{mean}/C_M = 0$ の場合³⁾、実線は $C_{mean}/C_M = 1$ の場合における水深間の関係を示している。ただし、 $C_{mean}/C_M = 0$ でかつ水路傾斜角度 $\theta > 23^\circ$ の場合、 $h_d/h_2 > 3.0$ の範囲で表面渦の形成が認められないので³⁾、 $C_{mean}/C_M = 0$ の場合、 $1.0 \leq h_d/h_2 \leq 3.0$ の範囲の計算値を示している。

図-10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 $C_{mean}/C_M = 1$ の ℓ/d_1 の値は $C_{mean}/C_M = 0$ の ℓ/d_1 の値に比べて最大9.5%大きくなる。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、 $C_{mean}/C_M = 0$ の場合よりも跳水始端位置が上流側に位置したためと考えられる。

また、 $\theta = 55^\circ$ の場合、計算結果から $0 \leq \ell/d_1 \leq 2$ の範囲で一つの相対下流水深 h_d/d_1 に対して二つの ℓ/d_1 が存在する。跳水始端が水路接合部近くになると、跳水の位置が変動することが実験的に確かめられている。与えら

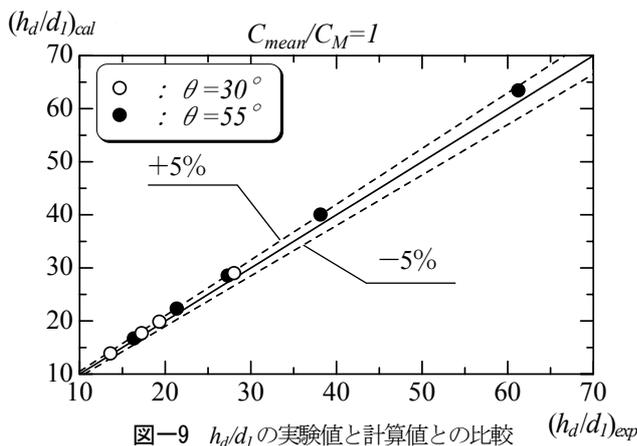


図-9 h_d/d_1 の実験値と計算値との比較 $(h_d/d_1)_{exp}$

れた h_d/d_1 に対する二つの l/d_1 の存在からこの現象を説明することができる。同一の相対下流水深 h_d/d_1 に対して l/d_1 の値が一つの解をもつ範囲では ($l/d_1 > 2$) 水路傾斜面上に跳水始端が位置し、始端の位置は安定していることが確認されている。

5. まとめ

水路傾斜角度 $\theta=30^\circ$ および 55° の傾斜水路において射流から常流へ遷移する流れを対象とし、流入射流の気泡混入量による跳水長の変化について実験的に検討した。また、流入射流および跳水部の気泡混入の影響を考慮した運動量方程式を用いて跳水上下流端の水深間について検討した。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 C_{mean}/C_M による跳水長 L_j/h_2 の変化について広範囲な実験条件のもとで検討した結果、 $0 \leq C_{mean}/C_M < 0.6$ の場合、下流水深の増加に伴い跳水長が長くなり、 C_{mean}/C_M による変化が小さいことを示した。また、 $0.6 < C_{mean}/C_M \leq 0.8$ では C_{mean}/C_M の影響を受けて L_j/h_2 は大きく減少し、 $0.8 < C_{mean}/C_M \leq 1.0$ では $L_j/h_2 = 5.7 \sim 6.0$ となり自由跳水長とほぼ同じ値を示すことを明らかにした。さらに、 C_{mean}/C_M および h_d/h_2 の変化による L_j/h_2 の実験式を提案した。
- ② 傾斜水路における跳水を対象に運動量方程式を適用し、質量力、底面圧力、跳水始端・終端での全圧力および運動量の各項に対して気泡混入の影響を考慮した跳水上下流端の水深間について関係を示した。また、与えられた θ , F_1 , および l/d_1 に対して、相対下流水深 h_d/d_1 が予測されることを明らかにした。
- ③ 与えられた θ , F_1 , および h_d/d_1 に対して $C_{mean}/C_M=1$ の場合、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、 $C_{mean}/C_M=0$ の場合よりも跳水始端位置が上流側に位置することを明らかにした。

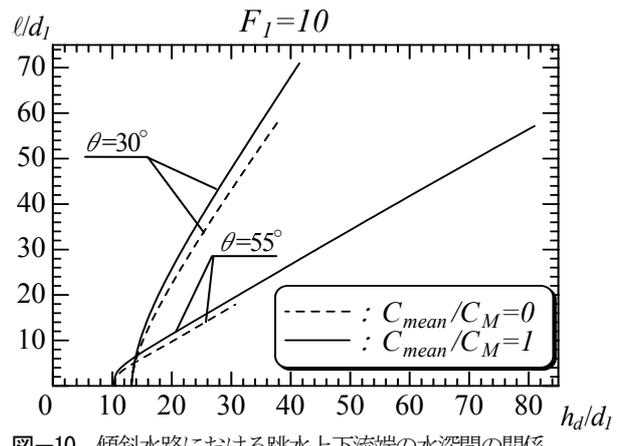


図-10 傾斜水路における跳水上下流端の水深間の関係

以上のことから、傾斜水路における跳水長および跳水上下流端の水深間について気泡混入射流の影響を明確にし、順傾斜式水叩きにおいて流入射流の気泡混入を考慮した減勢工の水工設計が可能であることを見出した。

参考文献

- 1) Rajaratnam, N.: Hydraulic Jumps, *Advances in Hydroscience Vol.4*, Chow, V.T. ed., 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) Ohtsu, I. and Yasuda, Y.: Hydraulic Jump in Sloping Channels, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.117, No.7, pp.905-921, 1991.
- 4) W. H. Hager: *Energy Dissipators and Hydraulic Jump*, Water Science and Technology Library, Vol.8, KLUWER, Dordrecht, 1992.
- 5) 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.
- 6) 小林、安田、大津: 傾斜水路の跳水特性に対する気泡混入射流の影響, 水工学論文集, 土木学会, 第 49 巻, pp.823-828, 2005.
- 7) Chanson, H.: *Air Bubble Entrainment in Free surface Turbulent Shear Flows*, Academic Press, New York, 1996.
- 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) Ohtsu, I. and Yasuda, Y.: Discussion of B-Jump in Sloping Channel, *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol.28, No.1, pp.105-119, 1990.

(2005. 9. 30 受付)