

スルース・ゲート下流側に形成される潜り跳水の流量係数に関する実験的検討 Experimental investigation on discharge coefficient of submerged jumps below a sluice gate

日本大学大学院理工学研究科土木工学専攻 学生会員 ○富田 麻理子
日本大学理工学部土木工学科 正会員 安田 陽一

1. はじめに

スルース・ゲート下流側に形成される潜り跳水^{1),2),3)}について, Henry によって運動量方程式および Bernoulli の定理を用いて, Torricelli の定理から定義された流量係数 C_d について解析し, 実験的にその妥当性を示している^{4),5)}. この場合, スルース・ゲートからの流れについては, 2次元ポテンシャル流れとして解析された収縮係数 $C_c=0.6$ を用い, スルース・ゲート前後では損失水頭が生じないものとして解析している. また, 実験では幅 1 foot (30.48 cm) の矩形断面水路で検討していた. 最近, 著者らの研究^{6),7)}によって, 矩形断面水平水路に形成される潜り跳水中の流速の時系列変化を検討し, 被りの大きい潜り跳水の場合, 主流が底面から水面に向かって上昇し始めた段階で主流の流向が不安定になることを示した. また, 収縮係数および Bernoulli の定理から定義した流量係数について実験的に明らかにし, 運動量方程式および Bernoulli の定理からスルース・ゲート上・下流側の水深間の関係を推定し, 偏向流況および非偏向流況の形成領域を示した⁸⁾. 実験結果から収縮係数は一定値とならず, フルード数 F_o によって変化することから Henry が用いた $C_c=0.6$ と異なる. また, 流量係数の定義の違いから Henry による結果との対応が明らかにされていない. ここでは, 本研究結果から Henry によって定義された流量係数 C_d に換算して比較を行い, Henry によって示された実験結果との対応を検討した.

2. 実験

幅 $B=0.80\text{m}, 0.40\text{m}$ 上流部高さ 1m, 下流部高さ 0.6m, 全長 $L=15\text{m}$ の長方形断面水平水路を用いて実験を行った. 実験条件を表 1 に示す. 上流ゲート周辺の物理量を図 1 に示す. スルース・ゲート開口高さ a , スルース・ゲート直上流側の水深 h_u , スルース・ゲート下流側の水深 (跳水が形成されている場合は終端水深) h_4 , および流量 Q を変化させ, 表 1 に示す実験条件のもとで検討した. 潜り跳水の流況観察およびポイントゲージを用いた水深測定を行った. ゲート直下の水深 h_3 については鋼尺を用いて計測した. $B=0.40\text{m}$ で行った実験では $B=0.8\text{m}$ で行った同一の Reynolds 数, 水深間の関係のもと実験を行った.

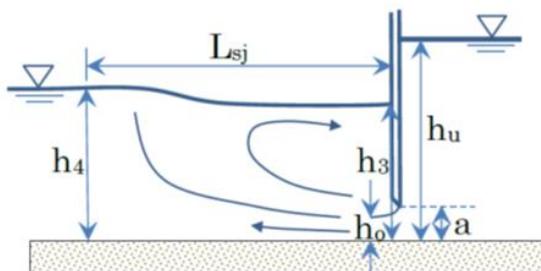


図 1 スルース・ゲート周辺の物理量の定義図

表 1 実験条件

Q (m³/s)	h_u (m)	h_4 (m)	F_o (-)	a (m)
0.0707	0.24 7-0.4 69	0.227-0. 440	0.653-0. 715	0.159
0.0770	0.90 4-0.4 52	0.252-0. 507	0.940-7. 92	0.038-0.13 8
0.0954	0.24 9-0.7 59	0.220-0. 386	1.00-4.4 5	0.086-0.15 9
0.1028	0.39 3-0.5 94	0.357-0. 526	0.812-1. 17	0.121-0.18 9
0.1232	0.39 6-0.6 42	0.414-0. 596	0.852-0. 915	0.141

3. 潜り跳水の流量係数および収縮係数

潜り跳水が形成された状態においてスルース・ゲート前後の断面で適用した Bernoulli の定理を無次元化して整理したものを(1)式に示す. また, 跳水部を検査部を選び水平流下方向に運動量方程式を適用し, 無次元化して整理したものを(2)式に示す.

$$F_o = C\sqrt{2} \frac{h_u}{h_o} \frac{\left\{ \frac{h_u - h_3}{h_o - h_o} \right\}}{\left\{ \left(\frac{h_u}{h_o} \right)^2 - 1 \right\}} \quad (1)$$

$$\frac{h_3}{h_o} = \sqrt{2F_o^2 \left(\frac{h_o}{h_4} - 1 \right) + \left(\frac{h_4}{h_o} \right)^2} \quad (2)$$

ここに, C は流量係数であり, Henry^{6),7)}によって定義された流量係数 C_d と定義が異なることに注意する. h_o は縮流部の水深であり, ゲート開口高さ a を用いると $h_o = C_c a$ となる. C_c は収縮係数である. また, 縮流部でのフルード数 F_o は次式で示される.

$$F_o = \frac{Q}{Bh_o\sqrt{gh_o}} \quad (3)$$

実験では, 流量 Q , 下流水深 h_4 , 被りの水深 h_3 の実測値を式(2)に代入し, 縮流部水深 h_o を間接的に評価し,

キーワード: 潜り跳水, 潜り流出, 流量係数, 収縮係数, 形成領域

連絡先: 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14, E-mail:yokyas@civil.cst.nihon-u.ac.jp

ゲート開口高さ a の実測値から収縮係数 C_c を算定する。また、ゲート上流側の水深 h_u の実測値を加えて、(1)式より流量係数 C を算定している。流量係数 C は h_u/h_3 によって変化する(図2参照)、(4)式で近似される⁸⁾。

$$C = 0.96 - \frac{0.08}{\text{EXP}\left(\frac{h_u}{h_3} - 1.3\right)^{2.5}} \quad (4)$$

適用範囲 : $1.0 < h_u/h_3 \leq 26$

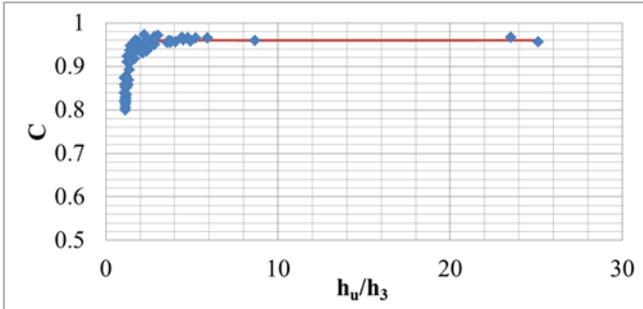


図2 流量係数 C と相対被り水深 h_u/h_3 の関係

収縮係数 C_c については、 F_0 によって変化する、(5)式で近似される。

$$C_c = \frac{h_o}{a} = 0.65 + \frac{0.3}{(1 + F_0)^{2.5}} \quad (5)$$

適用範囲 : $0.65 < F_0 < 8.0$

4. 既往研究で示される流量係数 C_d の比較

Henry によって定義された流量係数 C_d は次のとおりである。

$$Q = C_d B a \sqrt{2gh_u} = \frac{C_d}{C_c} B h_o \sqrt{2gh_u} \quad (6)$$

C_d について整理し、無次元化量で表示すると、

$$C_d = \frac{C_c F_0}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{h_o}{h_u}} \quad (7)$$

(7)式に $C_c = h_o/a = 0.6$ 、(1)式($C=1$ を代入)、(2)式を用いて整理すると、 $C_d=f(h_u/a, h_4/a)$ の関係が得られ、図3の破線で示した曲線となる。この曲線は Henry によって示された実験結果と同様な傾向を示している^{4),5)}。また、(7)式に(1),(2),(4),(5)式を用いて整理すると、同様に $C_d=f(h_u/a, h_4/a)$ の関係が得られ、図3の実線で示した曲線となる。この曲線は本研究で得られた結果⁸⁾ (C, C_c の実験結果を考慮したもの) から示されたものである。

図に示されるように、Henry によって示された C_d の値は実線で示す本研究結果から計算した C_d より幾分小さくなる。 h_4/a が大きいほど、また、 h_u/a が大きいほどこの傾向が見られる。前述に示したように、Henry によって示された結果は $C=1, C_c=0.6$ として解析的に求めたものであり、かつ Henry による実験結果と同様な結果を示したものである。そこで、この違いを考察するために、Henry による実験では幅 1 feet の水路で検討していたことに着目し、水路幅の異なる場合で実験的検討を行った。すなわち、以前に検討した水路幅の半分

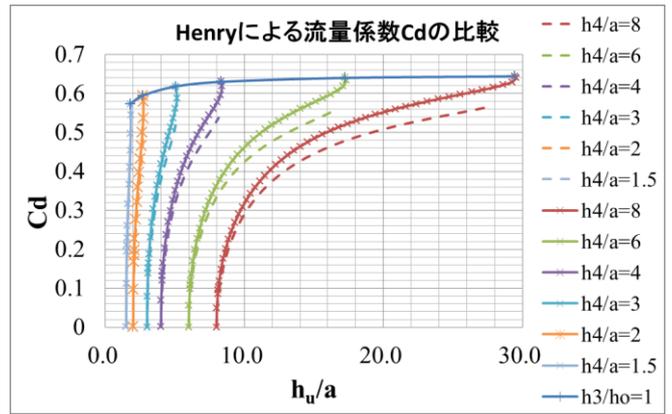


図3 流量係数 C_d の比較

(水路幅を $B = 0.8 \text{ m}$ から $B = 0.4 \text{ m}$) に変更して実験を行った。同一の Reynolds 数、ゲート上流側の水深とゲート開口高さとの比 h_u/a のもとで下流水深とゲート開口高さとの比 h_4/a を調整したところ、(7)式に(1),(2),(4),(5)式を用いて得られる流量係数 C_d (図3実線の傾向) より小さな値になり、Henry の実験結果 (図3破線の傾向) と同様な結果となった。このことから、Aspect 比の影響により流量係数 C_d が変化したとも考えられる。比較できた実験ケースは現段階では少ないことから今後、Aspect 比の影響についてさらに検討する必要がある。

5. まとめ

Henry によって定義された流量係数 C_d に換算して比較を行い、Henry によって示された実験結果との対応を検討した結果、Henry によって示された理論解と同様な傾向を示すが、 h_4/a が大きくなるほど、また、 h_u/a が大きいほど Henry によって理論的に示された流量係数の値より大きな値を示す。Aspect 比が小さい実験を行ったところ、Henry によって示された流量係数 C_d により近い値になった。

参考文献

- 1) Yasuda, Y. and Ohtsu, I., Energy dissipation structures, Encyclopedia of Water Science, Marcel Dekker Inc., New York, pp.195-198, 2003.
- 2) Rajaratnam, N. "Submerged hydraulic jump." J. Hydraulic Division, Vol. 91, No. 4, pp.71-96, 1965; Discussion, Vol. 92 (HY1), pp.146-155, Vol. 92 (HY 2), pp. 420-421, Vol.92 (HY4), pp. 154-156, Vol. 92 (HY6), p.207, 1996, Vol. 93 (HY3), p.179, 1997.
- 3) 大津岩夫, 台形および長方形断面水路の自由跳水と潜り跳水,土木学会論文報告集第 246 号, 1976.
- 4) Henry, H.R. : Discussion of Diffusion of submerged jets, Transaction, ASCE, Vol.115, pp.687-694, 1950.
- 5) Henry, H.R. : Discharge characteristics of sluice gate, Proc. ASCE, Vol. 75, Dec., 1975.
- 6) 栗山昂,安田陽一,高橋直己,跳水部下流側の流速の3次元性に関する実験的検討,土木学会第 68 回年次講演会, II-056, CD-ROM, 2013.
- 7) 富田麻理子,安田陽一,潜り跳水下流部の不安定偏向流れに関する実験的検討,土木学会第 69 回年次講演会, II-160, CD-ROM, 2014.
- 8) 安田陽一, 富田麻理子, 矩形断面水平水路における潜り跳水の水理特性, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.71, No.4, pp.534-540, 2015.