H3-5 潜り跳水における流量係数と収縮係数に対するアスペクト比の影響 The effect of aspect ratio on discharge and contraction coefficients in submerged hydraulic jumps

○冨田麻理子¹, 安田陽一²

*Mariko Tomita, Youichi Yasuda

Abstract: In the past, discharge coefficients of submerged jump were investigated by Henry. Recently, the authors investigated the flow conditions of submerged hydraulic jumps below a sluice gate, and also the relationship between the upstream and downstream of sluice gate was predicted by using the experimental results on discharge and contraction coefficients. But, a general agreement on these coefficients has not been obtained. In this study, the effect of aspect ratio on discharge and contraction coefficients in submerged jumps was investigated by considering different experimental equipment.

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]}を対象に, 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_a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 Cc=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. 最近, 著者らの研究^[6]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^[6].著者らの実験結果から収縮係数は一定値となら ず,フルード数 Fo によって変化することを示してい ることから Henry が用いた Cc=0.6 と異なる.

ここでは, 潜り跳水における流量係数および縮流係数の特性を明らかにするために, Table 1 に示す実験条件を加えて, 流量係数および縮流係数に対する aspect 比の影響を検討した.

2. 実験方法

Henry による実験では、水路幅 1 feet (30.4 cm)の水 路で検討していることを考慮して、水路幅 B=0.40m、 上流部高さ 1m、下流部高さ 0.6m、全長 L=15m の長方形 断面水平水路を用いて追加実験を行った.追加した実 験条件を Table 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_a 、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、Table 1 に示 す実験条件のもとで検討を行った.実験では、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.また、ゲート開口高さ a、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.流量につい ては、水路下流端に設置された全幅刃型せきによって 測定した.

 Table 1. Experimental conditions

$h_u(\mathbf{m})$	<i>a</i> (m)	$Q(m^3/s)$	h ₄ (m)
0.6	0.05	0.0125-0.0358	0.548-0.263
0.48	0.04	0.0084-0.0210	0.196-0.464
0.32	0.026	0.00389-0.0129	0.303-0.144
0.24	0.02	0.0028-0.0096	0.23-0.102

3. 潜り跳水中の流量係数 C 収縮係数 Cc

潜り跳水が形成された状態の流量係数 C について 検討するために、スルース・ゲート前後の断面でベル ヌーイの定理を適用し、連続の式を用いると、(1)式が 得られる.なお、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.

$$Q = C\sqrt{2g}h_{u}h_{o}B\sqrt{\frac{h_{u}-h_{3}}{h_{u}^{2}-h_{o}^{2}}}$$
(1)

潜り跳水が形成された状態において跳水部を検査 部に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.

$$\frac{h_3}{h_o} = \sqrt{2F_o^2 \left(\frac{h_0}{h_4} - 1\right) + \left(\frac{h_4}{h_0}\right)^2}$$
(2)

 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 $h_o = Cca$ となる. Cc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.

$$F_o = \frac{Q}{Bh_o\sqrt{gh_o}} \tag{3}$$

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 しゲート開口高さ aの実測値から収縮係数 Ccを算定 し,(4),(5)式の実験式を得られた.

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

(適用範囲 1<h,/h3<26)

$$C_c = 0.65 + \frac{0.3}{(1+F_o)^{2.5}} \tag{5}$$

(適用範囲 0.65 < Fo < 8.0)

^{1:}日大理工・院(前)・土木,2:日大理工・教員・土木

- 4. Henry によって定義された流量係数 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.

$$Q = C_d Ba \sqrt{2gh_u} = \frac{C_d}{C_c} Bh_o \sqrt{2gh_u}$$
(6)

(6)を C_dについて整理し、無次元化量で表示すると、

$$C_d = \frac{C_c F_o}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{h_o}{h_u}} \tag{7}$$

(7)式に $Cc = h_0/a = 0.6$, (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, **Figure 1**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, **Figure 1**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⁶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 *Cd* の値は実 線で示す本研究結果から計算した *Cd*より幾分小さく なる.



Figure 1. Discharge coefficient C_d defined by Henry

5. 流量係数 C, 収縮係数 C。 に対する aspect 比の影響 $h_{u'a}$ を一定のもとで流量 Q, 被り水深 h_3 , 跳水終 端水深h4を変化させ、ゲート開口高さaを調整する ことにより aspect 比を *B*/a=20~8まで変化させて実 験を行った結果を Figures 2,3 に示す. 図中実線は 著者らによって示した実験式⁶⁰である. 図に示され るように、aspect 比の大きなものほど実験式に近い 値となり, aspect 比が小さくなるにつれて流量係数 Cは実線で示す値より大きな値を示す.また,収縮 係数 *Cc* は aspect 比が大きなものほど実験式に近い 値となり小さくなるにつれて、実線で示す値より *Cc*=0.6 近くまで小さくなる. aspect 比が小さい場合, ゲートを通過する流れが集中しやすいと考えられ る. また, 流量係数 C の変化傾向から, エネルギ ー損失が小さくなるものを推定される.なお, aspect 比の小さい場合の実験結果が Henry よって示され た結果に対応している.



Figure 2. Discharge coefficient defined by authors C



Figure 3. Relationship between Froude number and *Cc* 6. まとめ

Table 1 に示す実験条件のもとで, aspect 比を B/a=8 ~20 まで変化させ, 潜り跳水中の流量係数 C,収縮係 数 Cc に対する aspect 比の影響を検討した結果, aspect 比が小さくなると,著者らによって示した実験結果と 異なることを示した.また, aspect 比が小さい場合の 実験結果は Henry によって示された結果と同様とな ることを示した.これまでの検討では, h_{a}/a の値を一定にして検討しているが,系統的な検討に至ってい ない. 今後, 潜り跳水の特性を一般化するために, 実験条件を拡張して検討する必要がある.

7. 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] 安田陽一, 冨田麻理子, 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.

[7] 冨田麻理子,安田陽一,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,土木学会第 70 回年次講 演会,II-114,CD-ROM, 2015