潜り込み流れにおけるスルース・ゲート上・下流側の水深間の関係の推定

Prediction of relationship between upstream and downstream depths of a sluice gate in submerged flows

日本大学大学院理工学研究科　土木工学専攻　学生会員　○冨田　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

放水路やダムのボトムアウトレットなどからの高速流の減勢，水門が開閉したことによって生じる高速流を減勢させる場合に減勢池内での跳水の形成が利用される[1]．跳水に関する研究として水路中央部を対象に水面形，最大流速の減衰状況，流速分布，跳水長などが検討されている[2),3]．この場合，時間平均された物理量について検討された場合がほとんどである．ゲート下流側で潜り跳水が形成される場合，跳水部下流側の水面で不安定な湧き上がりが形成されることが現地観測から見られるが，定量的に挙動の特性を把握するに至っていない．最近，著者らの研究[4),5]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が検討され，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（不安定偏向流れと呼ぶ）ことが示された．

ここでは，潜り跳水を対象に広範囲な実験条件から流量係数 C および収縮係数 Cc について合理的に近似式を提案し,運動量方程式およびベルヌーイ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明らかにした．また，既往の研究で示されている流量係数[6),7]との比較検討を行った．

2. 実験条件

幅 B=0.80m,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実験を行った．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．

3. 潜り跳水が形成された状態の流量係数 C

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．

$$Q = C\sqrt{2g}h_u h_o B\sqrt{\frac{h_u - h_3}{{h_u}^2 - {h_o}^2}} \qquad (1)$$

ここに，h_o は縮流部の水深である．

なお，縮流部水深h_oを間接的に評価するために，跳水部に運動量方程式(2)式を適用し,実測値 h_3,h_4,および Q を代入することによって縮流部の水深を算定した．

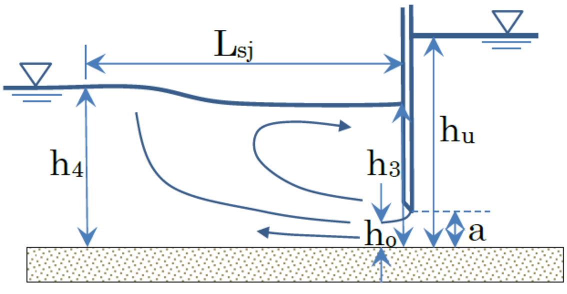

図 1 スルース・ゲートにおいて形成される
潜り込み流れの記号の定義

表 1　実験条件

Q (m³/s)	h_u (m)	h_4 (m)	F_o (-)	a (m)
0.0707	0.247-0.469	0.227-0.440	0.653-0.715	0.159
0.0770	0.904-0.452	0.252-0.507	0.940-7.92	0.038-0.138
0.0954	0.249-0.759	0.220-0.386	1.00-4.45	0.086-0.159
0.1028	0.393-0.594	0.357-0.526	0.812-1.17	0.121-0.189
0.1232	0.396-0.642	0.414-0.596	0.852-0.915	0.141

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

$$Q = B\sqrt{\frac{g}{2}}h_4 h_o\sqrt{\frac{{h_4}^2 - {h_3}^2}{h_4 - h_o}} \qquad (2)$$

(1)式を無次元化すると次式が得られる．

$$\mathrm{F_o} = \mathrm{C}\sqrt{2}\frac{\mathrm{h_u}}{\mathrm{h_3}}\frac{\mathrm{h_3}}{\mathrm{h_o}}\sqrt{\frac{\left\{\frac{\mathrm{h_u}}{\mathrm{h_3}}\frac{\mathrm{h_3}}{\mathrm{h_o}} - \frac{\mathrm{h_3}}{\mathrm{h_o}}\right\}}{\left\{\left(\frac{\mathrm{h_u}}{\mathrm{h_3}}\frac{\mathrm{h_3}}{\mathrm{h_o}}\right)^2 - 1\right\}}} \qquad (3)$$

ただし，F_oは縮流部でのフルード数であり次式で示される．

$$\mathrm{F}_o = \frac{Q}{Bh_o\sqrt{gh_o}} \qquad (4)$$

流量係数 C と h_u/h_3 との関係で整理したものを**図 2** に示す．図に示されるように，**表 1** に示す実験条件において，流量係数 C は h_u/h_3 のみによって変化するものとみなすことが可能であり，(5)式で近似できる．

$$C = 0.96 - \frac{0.08}{EXP\left(\frac{\mathrm{h}_u}{\mathrm{h_3}} - 1.3\right)^{2.5}} \qquad \text{適用範囲：} 1.0 < \mathrm{h_u/h_3} \leq 26 \qquad (5)$$

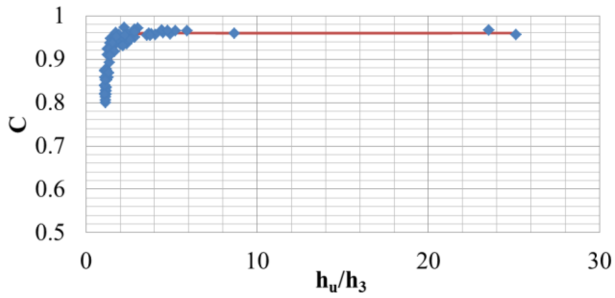

図 2 流量係数 C と相対水深 h_u/h_3 との関係

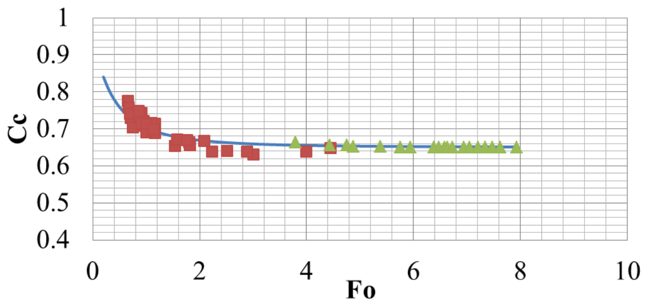

図 3 収縮係数 C と縮流部のフルード数 F_o との関係

ゲート開口高さ a と縮流部の水深 ho との間で定義した収縮係数 Cc について，Cc と F_o の関係で整理したものを**図 3** に示す．図に示されるように，収縮係数 Cc はF_oによって変化し，実験的に (6)式で近似できる．なお，重力の影響を無視し，2 次元ポテンシャル流れを仮定して推定された収縮係数 Cc[6),7)]は 0.65 であるが，実際にはその値よりも大きくなる．

$$C_c = \frac{ho}{a} = 0.65 + \frac{0.3}{(1 + Fo)^{2.5}} \qquad \text{適用範囲：} 0.65 < \mathrm{F}_O < 8.0 \qquad (6)$$

4. ゲート上下流側の水深間の関係

スルース・ゲート上下流側の水深間の関係について，(3) 式に(5)式を代入し,さらに運動量方程式を無次元化した(7)式を用いて，$h_4/h_o = f(F_o, h_u/dc)$の関係で整理した結果を**図 3** に示す．

$$\frac{\mathrm{h_3}}{\mathrm{h_o}} = \sqrt{2{\mathrm{F_o}}^2\left(\frac{\mathrm{h_0}}{\mathrm{h_4}} - 1\right) + \left(\frac{\mathrm{h_4}}{\mathrm{h_0}}\right)^2} \qquad (7)$$

なお，$h_u/ho = (h_u/dc) \times (dc/h_o) = F_o^{2/3}(h_u/dc)$を用いて整理している．

最近の著者らの実験によって，h_u/d_cを一定（この場合，ゲート上流側の水位および流量を一定）とし，ゲート開口高さ a および下流水深を変化させた実験結果 [4),5)]，および石狩川頭首工および旧江戸川水門の現地データを推定結果と比較するため**図 3** に示す関係で整理した．図中，実線は自由跳水の水深間の関係を示し，ベランジャーの式で推定される．破線は，非偏向と遷移領域との境界，一点鎖線は遷移領域と偏向流況との境界，二点鎖線は偏向流況と非偏向流況との境界を示す．実線以外の境界線は流況観察に基づき定めている．また，現地計測

データにおいて，石狩川頭首工ではh_u/d_c =5.28 の場合，旧江戸川水門ではh_u/d_c= 4.68, 6.16, 9.70 の場合を示す．図に示されるように，実験結果および現地データから，ベルヌーイの定理および運動量方程式から水深間の関係を推定できることが可能となった．**図 4** に示されるように，$h_4/h_o = f(F_o, h_u/a)$の関係で整理すると，変曲点，極大値，直線区間と，変化傾向の異なる箇所が見られる．この場合，（6）式を用いて，$h_o = C_c a$ の関係を用いている．**図 3** に示す流況区分との対応を検討すると，極大値を結んだ直線（二点鎖線）が偏向流況と非偏向流況との境界に対応し，一点鎖線で示す直線が遷移領域と偏向流況との境界に対応し，破線で示す直線が非偏向と遷移領域との境界に対応する．なお，青の太い実線は自由跳水の水深間の関係を示す．

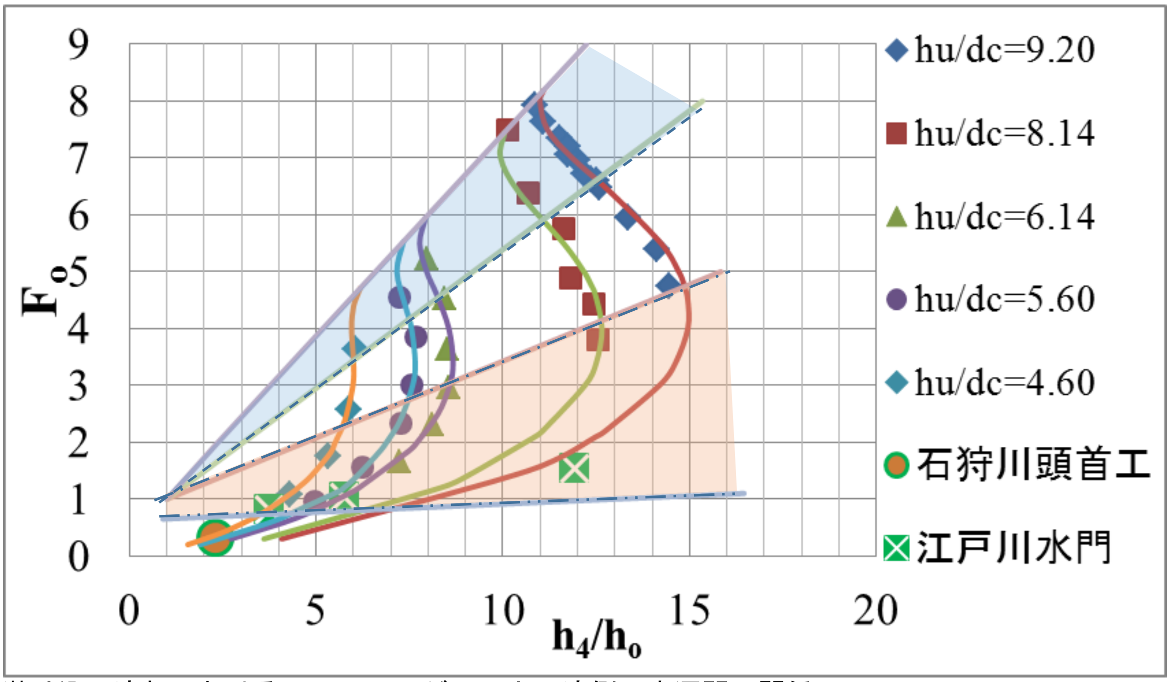

図 3　潜り込み流れにおけるスルース・ゲート上下流側の水深間の関係
(h_4/h_o = f (F_o, h_u/dc) の関係で整理した場合)

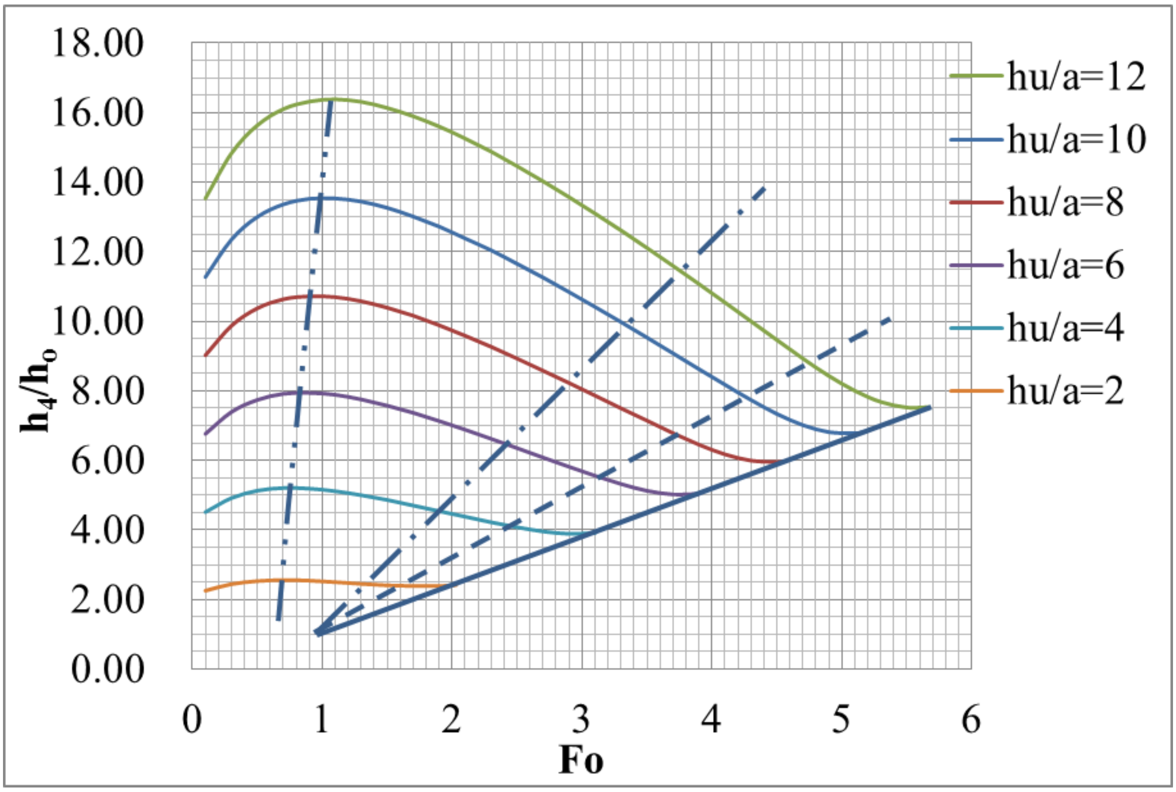

図 4　潜り込み流れにおけるスルース・ゲート上下流側の水深間の関係
(h_4/h_o = f (F_o, h_u/a) の関係で整理した場合)

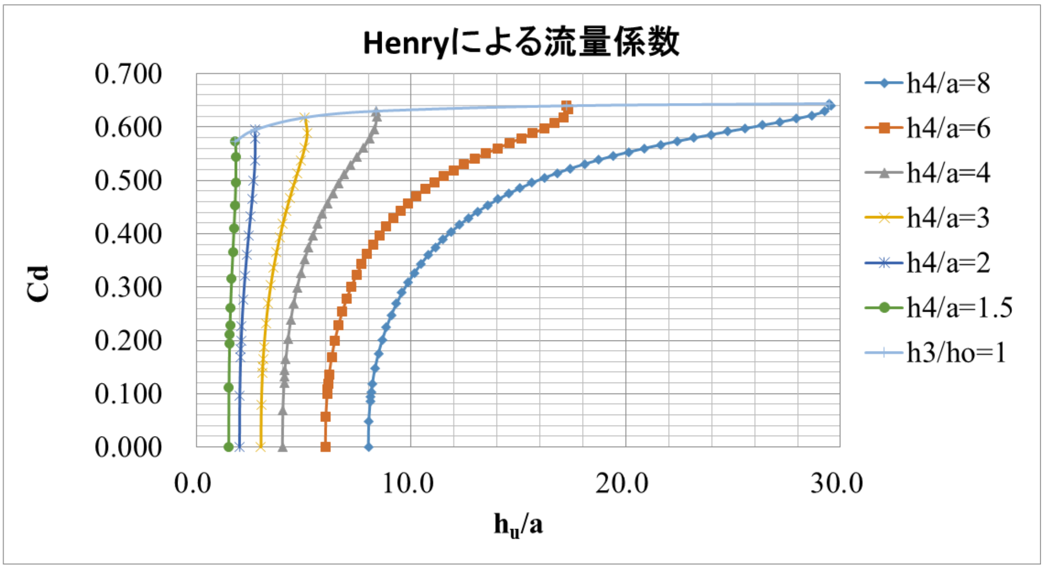

図 5 Henry によって定義された流量係数の推定結果

5. 既往研究で示される流量係数との比較

Henry は，次式で定義された流量係数 C_d について，鉛直刃型水門（スルース・ゲート）からの潜り流出と自由流出の場合に分けてそれぞれ理論解を求めている[6),7)]．この場合，重力の影響を無視した 2 次元ポテンシャル流れのもとで算定した収縮係数の値(0.65)を用いている．式(3), (5), (6), (7), (8)を用いて，$C_d = f(h_4/a, h_u/a)$の関係を推定することができる．その結果を**図 5** に示す．スルース・ゲートからの潜り流出の実現象では，**図 3** に示されるように，収縮係数 Cc は一定値でなく，わずかながら大きな値をとるため， h_4/h_a が大きくなるほど，かつ被りの水深が小さくなるほど Henry によって理論的に示された流量係数の値より幾分大きな値を示す．

$$Q = C_d B a\sqrt{2gh_u}, C_d = C_c\sqrt{1-\frac{h_3}{h_u}}\frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{C_c a}{h_u}\right)^2}} \qquad (8)$$

6. まとめ

スルース・ゲート下流側に形成される潜り跳水を対象に，**表 1** に示す実験条件から得られた実験データを用いて流量係数 C を評価し，C の推定式を提案した．このことによって，ベルヌーイの定理および運動量方程式から $h_4/h_o = f(F_o, h_u/d_c)$の関係を推定し，実験結果と推定結果との比較から，スルース・ゲート前後の水深間の関係を推定することが可能となることを確認した．石狩川頭首工および旧江戸川水門の現地計測結果から，ここで提案した推定結果が適用できることを示した．また，$h_4/h_o = f(F_o, h_u/a)$の関係で整理すると，水深間の関係を示す曲線において，極大値，変曲点，直線区間が見られるようになり，各流況の境界に対応することを示した．さらに，Henry によって定義された潜り流出の流量係数 C_d を式(3), (5), (6), (7), (8)から推定した結果，Henry によって示された理論解と同様な傾向を示し，h_4/h_a が大きくなるほど，かつ被りの水深が小さくなるほど Henry によって理論的に示された流量係数の値より幾分大きな値を示ことが分かった．

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) 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.
5) 冨田麻理子,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.
6) Henry, H.R.：Discussion of Diffusion of submerged jets, Transaction, ASCE, Vol.115, pp.687-694, 1950.
7) Henry, H.R.：Discharge characteristics of sluice gate, Proc. ASCE, Vol. 75, Dec., 1975.