Henry 式を拡張した三連水門からの放流量計算法に関する基礎的検討

石川工業高等専門学校　正会員　○鈴木洋之
石川工業高等専門学校専攻科　学生員　石田竜彦

1. はじめに

既存の水門理論[1)2)]では水路幅の水門（単門）を対象に横断方向に流れが変化しないと仮定して，もぐり流出と自由流出の流出形態毎に流れがモデル化されている．しかし，実際に多く見られる水路横断方向に複数門を持つ水門では，流れが横断方向に変化する．また，流出形態を理論的に判定する手法がないため，現場での形態判定は難しい．これらを原因とする放流量誤差が小矢部川の小矢部大堰にある三連水門で確認された[3)]．本稿では中央水門のみが操作される三連水門を対象に Henry 式[1)]を拡張した流量計算法を検討した．

2. 流況と流れのモデル化

中央水門のみを操作した三連水門では，水門噴流が拡散して生じる水路幅全体で現れる射流が跳水を経由して常流に移行する様子が観察された．本解析では流下方向の運動量変化を無視できると仮定する．Henry[1)]モデルに水門幅 B_g と水路幅 B_c を取り込み，安田ら[4)]の解法を用いると，図 -1 の断面 1・2 のエネルギー保存則から自由流出の流量係数と流量推定式を得る（表 -1 式 (1) ～ (3)）．また，断面 1･2 のエネルギー保存則と断面 2・3 の運動量保存則からもぐり流出の流量係数を求める 2 次方程式と流量推定式を得る（表 -1 式 (4) ～ (7)）．これらの式は B_0=1(B_g と B_c が等しい）の時，単門の Henry 式と合致する．また，縮流係数 C_c は従来の 0.606 で与える．これらの式の運用には流出形態の判断が必要である．単門では自由流出での射流水深に対応した共役水深（常流水深）より下流水深が大きいともぐり流出に移行するという指摘[3)]から，断面 2 の噴流運動量を持つ断面 3 の共役水深のうち常流水深を境界水深とした．

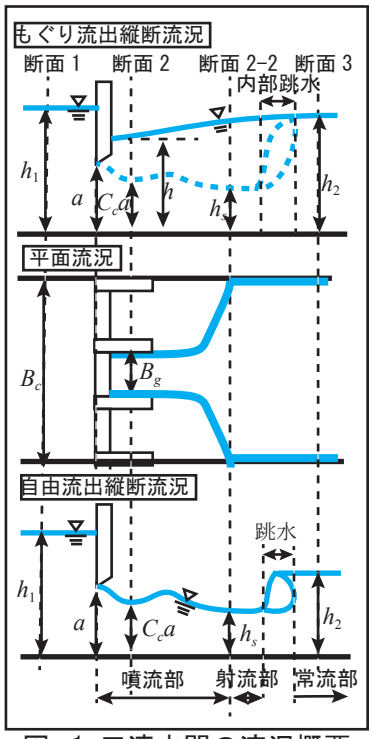

図 -1　三連水門の流況概要

表 -1　モデル基礎式の一覧

＝自由流出関連式＝

・断面 1・2 でのエネルギー式

$$h_1+\frac{1}{2g}\left(\frac{Q}{B_c h_1}\right)^2=C_c a+\frac{1}{2g}\left(\frac{Q}{B_g C_c a}\right)^2 \quad (1)$$

・流量係数 C

$$C=C_c\sqrt{\frac{1}{1-\left(\frac{B_0 C_c a}{h_1}\right)^2}} \quad (2)$$

・流量推定式

$$Q=CaB_g\sqrt{2g(h_1-C_c a)} \quad (3)$$

＝もぐり流出関連式＝

・断面 1・2 でのエネルギー式

$$h_1+\frac{1}{2g}\left(\frac{Q}{B_c h_1}\right)^2=h+\frac{1}{2g}\left(\frac{Q}{B_g C_c a}\right)^2 \quad (4)$$

・断面 2・3 での運動量式

$$\rho Q\frac{Q}{B_c h_2}-\rho Q\frac{Q}{B_g C_c a}=\frac{1}{2}\rho g B_c h^2-\frac{1}{2}\rho g B_c h_2^2 \quad (5)$$

・流量係数を与える 2 次方程式

$$C_0^2\left(H_1-\frac{B_0^2}{H_1}\right)^2+2C_0\left\{B_0^2+2H_1\left(B_0-\frac{B_0^2}{H_2}\right)-H_1^2\right\}+\left(H_1^2-H_2^2\right)=0 \quad (6)$$

・流量推定式

$$Q=CaB_g\sqrt{2g h_1} \quad (7)$$

・無次元量の定義

$$H_1=\frac{h_1}{C_c a},H_2=\frac{h_2}{C_c a},H=\frac{h}{C_c a},C_0=\left(\frac{C}{C_c}\right)^2,B_0=\frac{B_g}{B_c} \quad (8)$$

3. 実験概要

幅 30cm と 100cm の水平水路にそれぞれ単門と三連水門の模型を設けた．両模型で開度 a と水門上流水深 h_1 について表 -2 の条件を満たす流量で初期自由流出を形成する．その後，水路末端の堰で段階的に水門下流水深 h_2 を上昇させて，もぐり流出に移行するまでの各段階で水門上下流の水深をポイントゲージで計測した．計測は単門では水路中央部で縦断方向に約 20cm 間隔とした．三連水門では水路中央部と水路中央から左右岸に 30cm の位置で縦断方向に水門下流 100cm までは約 20cm 間隔，噴流の混合終了位置より下流では約 30cm 間隔で計測した．単門では水門から 100cm 下流で一定水深となった．また，三連水門では混合終

キーワード：スルースゲート，三連水門，自由流出，もぐり流出，Henry 式
連絡先：〒 929-0392　石川県河北郡津幡町北中条　石川工業高等専門学校，　TEL:076-288-8172

了位置より下流で横断方向に水深はほぼ同じであった．このため，解析では単門で水門下流 150cm，三連水門で混合終了位置での水路中央部の水深を h_2 に用いた．また，単門では側壁高不足のため a=7cm，h_1/a=7 の実験は未実施である．

表 -2 初期自由流出の形成条件

開度a(cm)	h_1/a	単門(流量)	三連水門(流量)
3.0	2	Case 1-1(4.30L/s)	Case 2-1(4.80L/s)
3.0	5	Case 1-2(7.21L/s)	Case 2-2(8.40L/s)
3.0	7	Case 1-3(9.10L/s)	Case 2-3(10.50L/s)
5.0	2	Case 1-4(9.30L/s)	Case 2-4(10.00L/s)
5.0	5	Case 1-5(16.00L/s)	Case 2-5(18.50L/s)
5.0	7	Case 1-6(19.10L/s)	Case 2-6(22.10L/s)
7.0	2	Case 1-7(15.20L/s)	Case 2-7(16.70L/s)
7.0	5	Case 1-8(25.95L/s)	Case 2-8(29.80L/s)
7.0	7	–	Case 2-9(36.40L/s)

4. 実験結果

図 -2(a)(b)(c) はそれぞれ Case2-1(1-1)，2-5(1-5)，2-8(1-8) で得られた h_1 と h_2 の関係である．また，同図には提案法で推定した境界水深の値を示した．不完全もぐり流出に移行して，h_1 が上昇を開始する時の h_2 が実測の境界水深となる．ただし，不完全もぐり流出ともぐり流出は区別していない．単門と三連水門では同じ初期自由流出でも a と h_1 の上昇に伴い，境界水深に違いが現れる．これは三連水門での噴流特性が顕著になり，単門の跳水を伴う共役水深で表される流れとの違いが大きくなるためである．しかし，提案手法で推定した境界水深はほぼ実測の境界水深を表している．

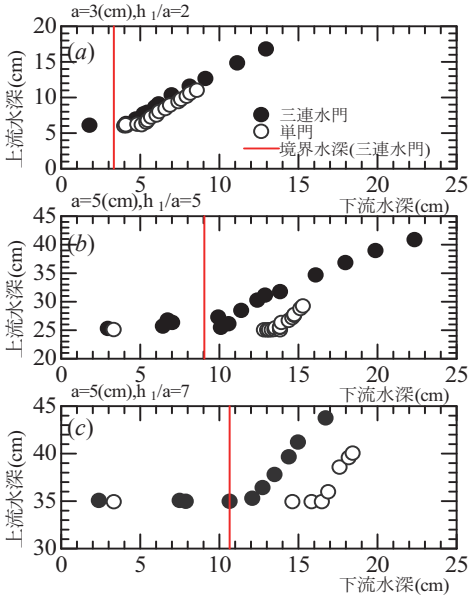

図 -2　水門上下流水深と理論境界水深

図 -3 は初期自由流出時の実測流量と推定流量の比較である．ただし，(a) は小矢部大堰で採用されている単門を対象とした Toch の式，(b) は提案法を用いた場合の推定値である．自由流出では提案法・Toch の式と共に良好な再現ができている．これは自由流出は水門下流の影響を受けない単純なオリフィス流れが基本となるためである．

図 -4(a)(b) にもぐり流出での流量実測値と推定値の比較を図 -3 と同様に示した．ただし，全実験ケースで図 -2 に見られるような h_1 が上昇を開始して以降の全データを計算対象とした．すなわち，この推定値は不完全もぐり流出ともぐり流出が混在している．Toch の式では推定値に生じる幅が提案法では小さくなり，推定精度が大幅に改善している．また，Toch の式では不完全もぐり流出からもぐり流出への移行に従って，流量が過大に推定された．三連水門では噴流拡散により下流水深が単門と比べて小さくなるために，Toch の式では水門上下流の水深差で決まるもぐり流出量が過大に推定されたと考えられる．

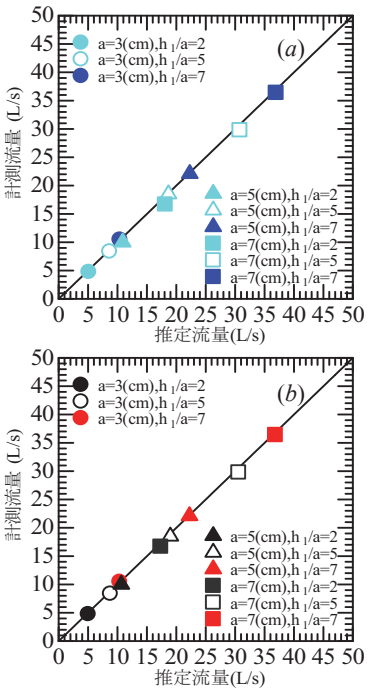

図 -3 推定流量と実測流量の比較（自由流出）

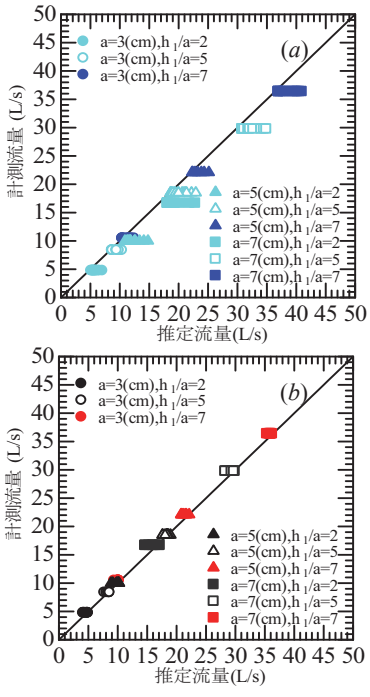

図 -4 推定流量と実測流量の比較（もぐり流出）

5. おわりに

本研究では中央ゲートのみが操作される三連水門を対象に Henry 式を拡張した放流量推定を試みた．簡易な方法に関わらず本法で良好な推定が可能であった．今後全水門が操作された場合への拡張を図る．

参考文献
1)Toch,A:Discharge of characteritics of tainter gate,Proceedings ASCE Vol.79,pp.1-20,1953.2)Henry,H.R:Discussion of Diffusion of submerged jets, Transaction, ASCE,Vol.115,pp.687-694.1950.3) 鈴木ら：Toch の式の解析によるスルースゲートからの推定放流量の精度劣化要因の解明，水文・水資源学会誌，第 28 巻，4 号，2015．4）安田ら：スルースゲートの閉鎖に伴い発生する段波の水理実験とその数値計算，土木学会論文集，No.733，II-63，pp.89-105，2005.