運動量の定理に基づく水門からの自由流出の定式化

松江工業高等専門学校　正会員　○荒尾慎司，山口大学工学部　フェロー会員　羽田野袈裟義
SOMPO リスクケアマネジメント　李洪源，芦屋市役所　桑山なるみ，島根県庁　安井美沙希

1．はじめに

主に河川に設置される水門における水理はベルヌーイの定理を基にして組み立てられている[1), 2)]．しかし，この構造物をすぎる流れにおいては無視できないエネルギー損失を生じるはずで，このためエネルギー損失を無視したベルヌーイの定理に基づく流量公式は水理学の解析原理と矛盾すると考えられる．

本研究では，この考え方に基づき，エネルギー損失に相当する流水抵抗を考慮した運動量の定理を適用して水門（スルースゲート）の自由流出を検討し，流量と水門上流水位との関係を定式化することを目的とする．

2．運動量の定理に基づくスルースゲートの水理検討

スルースゲートからの流出の水理モデルを図-1 に示す[1)]．単位幅流量を q，ゲート開度を a，縮流係数を C_c，自由流出のゲート上流の一様な水深を h_0 とする．ゲートに作用する単位幅当たりの抵抗力を F_D とし，水底の摩擦を無視する．

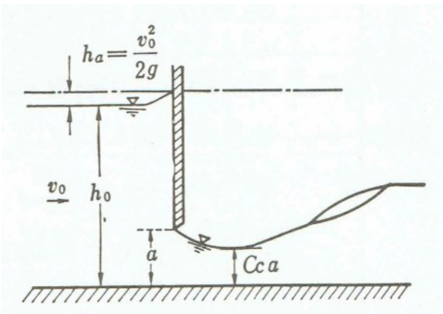

図-1　スルースゲートからの自由流出の模式図

上記の設定でゲート上流の断面とゲート流出直後（縮流前）の断面の間に運動量の定理を適用すると，

$$\rho\left(\frac{q^2}{a}-\frac{q^2}{h_0}\right)=\frac{1}{2}\rho g h_0{}^2-\frac{1}{2}\rho g a^2-F_D \tag{1}$$

上式において $F_D = K_D \dfrac{1}{2}\rho g(h_0-a)^2$ と置くと，

$$K_D=\frac{\rho q^2}{\frac{1}{2}\rho g(h_0-a)^2}\left(\frac{1}{h_0}-\frac{1}{a}\right)+\frac{h_0{}^2-a^2}{(h_0-a)^2}$$

$$=-\frac{2h_c{}^3}{a^3(h_0/a)(h_0/a-1)}+\frac{h_0/a+1}{h_0/a-1} \tag{2}$$

上式から，もし K_D が一定ならば，h_0/a と h_c/a（h_c は限界水深）が一定の関係をもつ．すなわち，

$$\frac{h_0}{a}=F\left(\frac{h_c}{a}\right) \tag{3}$$

式(3)に関しては自由流出での実験データから検討する．

3．実験装置

長さ 10.3m×幅 30cm の長方形断面を有する可変勾配水路の下流端から 5.5m 地点に，止水用に両側にゴムを貼った厚さ 1cm のアクリル板を水門（スルースゲート）として図-2 のように設置した．水門の上流側の面の位置を 0cm として上・下流にメジャーを設置し，水深の計測位置を測定した．水深の測定では，ポイントゲージを使用した．　また，流量測定には，水路下流端に設置した流量計測升（最大 480kg 貯水量）を使用した．

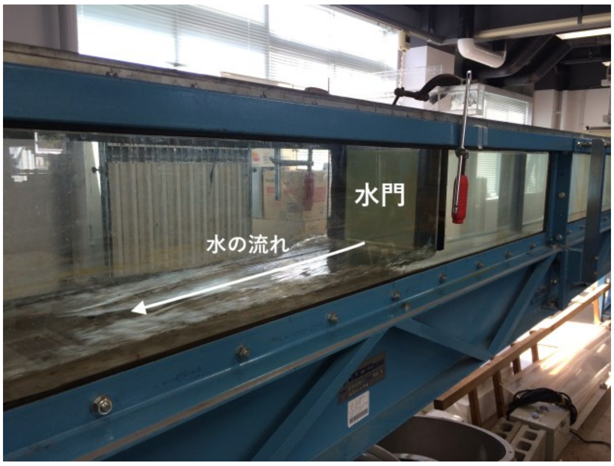

図-2　水路と水門（スルースゲート）

4．実験方法と実験条件

4.1 実験方法

実験は以下の手順で行った．

1)所定の開度になるよう水門を設置する．
2)水路に水を循環させ，所定の流量に設定する．
3)水門下流側で最小水深を測定し，水門上流側 10cm の地点で水深を測定する．

キーワード　河川，水門，運動量の定理，流出量
連絡先　〒690-8518　松江市西生馬町 14-4　松江工業高等専門学校，環境・建設工学科　TEL 0852-36-5225

4) 水路末端の流量計測枡にて枡への貯水量を計測時間で除して流量を求める．流量は 5 回計測し，その平均値を採用する．この流量測定値の計測誤差は 1%未満である．

5) 流量を変化させ，2) から 4) を繰り返し行う．

4.2 水門開度について

水門の開度として，まず，2cm，4cm，6cm，8cm として得られた本実験データと，同一開度の既往研究[1]と合わせて式(3) を定式化する．その後，開度を 3cm，5cm，7cm とした実験結果と計算値との比較を行い，提案式の妥当性を確認する．

5．実験結果と考察

5.1 定式化のための実験結果

式(3)の関係を実験データにより分析する．この分析には，松江高専での実験データおよび岩佐・名合の既往研究データ[1]を用いた．**図-3** に h_0/a と h_c/a の間の関係を示す．図中の（松）は松江高専のデータで，無印は岩佐・名合のデータである．この図に示す通り，h_0/a と h_c/a の関係は，実験条件の範囲でほぼ一本の曲線上に分布しており，従来の流量係数 C と h_0/a の関係図が不揃いの分布を示すのと対照的であるため，**図-3** の関係は普遍的とみてよい．本研究の取扱は従来方法よりも水理学的に合理的であることを示唆している．

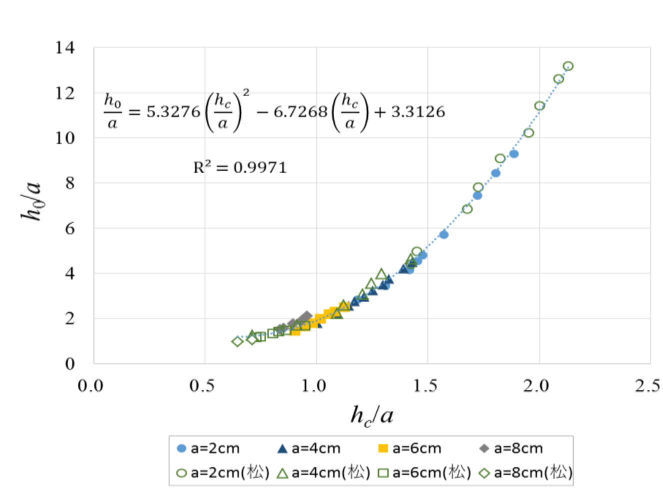

図-3 h_0/a と h_c/a の関係

図中の曲線は両者の関係を 2 次曲線近似した結果で，次式で与えられる．

$$\frac{h_0}{a} = A\left(\frac{h_c}{a}\right)^2 + B\left(\frac{h_c}{a}\right) + C \qquad (4)$$

ここで，$A = 5.3276,\ B = -6.7268,\ C = 3.3126$ である．なお，式(4)では流量に相当する h_c を右辺に置き，ゲート上流の水深 h_0 を左辺においた．この与え方は，流量係数を左辺に置いて流量を未知数とする従来の与え方と異なる．これは，水理現象として，所定の開度に対して流量が与えられた時にゲート上流の水深がどの程度になるか，がより自然な推論であることを考慮している．すなわち，水理現象としては，流量が独立量でゲート上流水深が従属量となるべきと考える．工学的立場からは，上の逆の問題として，取りうる上流水深 h_0 が与えられた時，所定の開度 a に対してどれほどの流量を流しうるか，の見積が求められる．この答えは，式(4)を h_c/a に関する 2 次方程式として解くことで得られる．結果は次式となる．

$$\frac{h_c}{a} = \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4A(h_0/a - C)}}{2A} \qquad (5)$$

これにより h_c が得られれば，$q^2/g = h_c^3$ の関係から単位幅流量 q が計算される．

5.2 検証実験の結果

3cm，5cm，7cm の開度における実験で得られた結果が式(4)による計算値と合致するか検証した．比較した結果を**図-4** に示す．この図に示すように，実験値と計算値はほぼ一致した．このことにより，本研究で導出した計算式は，従来公式に比べて各条件下において再現性の高いことが分かった．

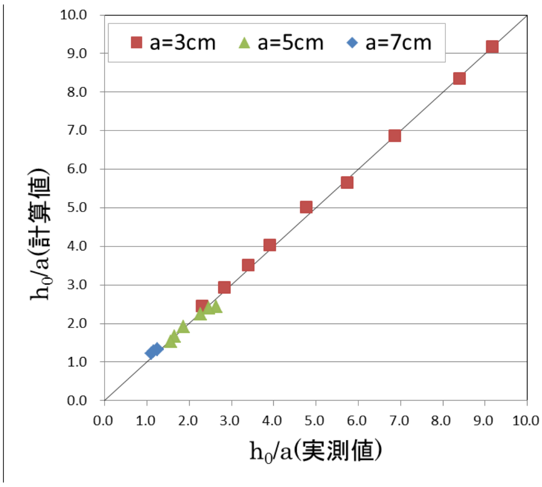

図-4 計算式の妥当性の検証

6．結語

以上，河川横断構造物である水門の自由流出を，流水抵抗を考慮した運動量の定理に基づき検討した．この問題に対して，その水理を規定する水理量の関係を求め，既往実験資料も含めて妥当性を示した．今後は潜り流出について水理検討を行う予定である．

参考文献

1) 土木学会：水理公式集 昭和 46 年改訂版，pp.276-287，1971.

2) 名合：開水路底流型水門の自由流出に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第 264 号，1977.