

縮流係数と縮流断面の流速非一様性を評価したゲートからの流出の水力検討

松江工業高等専門学校 学生会員 ○亀井 悠喜信
 松江工業高等専門学校 正会員 荒尾 慎司
 九州産業大学 フェロー 羽田野 袈裟義

1. はじめに

河川や灌漑用水路などで流量制御に用いられるスルースゲートからの自由流出の流量係数 C は、縮流係数を C_c として次式で与えられる^{1), 2), 3), 4)}.

$$C = \frac{q}{a\sqrt{2gh_0}} ; C = C_c \sqrt{\frac{1}{1+C_c a/h_0}} \quad (1)$$

ここに、 q は単位幅流量、 a はゲート開度、 g は重力加速度、 h_0 はゲートの上流側水深である。

従来研究の大きな課題として、1) 一般に用いられる $C_c \sim a/h_0$ の関係がゲート開度 a により系統的に異なり a/h_0 を C_c の主要因子とすることの正当性に疑問が残る、2) C_c と C のデータによる関係づけが殆ど皆無である、3) 治水計画に不可欠なゲート上流側水深の評価式が皆無である、などが挙げられる。

本研究では、名合^{3), 4)} による詳細な測定データを入念に分析し、縮流係数 C_c をレイノルズ数の関数としての定式化を行ないその結果を流量係数評価に用いた。定式化では、流量と上流側水深の評価のために異なる2つのレイノルズ数を導入した。また、予測精度向上のため、縮流断面のエネルギー補正係数を評価した。次に、潜り流出の縮流係数が自由流出と同じ性状を示すと仮定してエネルギー保存側と運動量の定理を組合せて流量と下流側水深から上流側水深を求める式を導き実験値と比較している。

2. 名合の自由流出に関する実験データ

名合^{3), 4)} は、スルースゲートからの自由流出に関して表-1 に示すように水路幅 $B=10, 15, 20, 30, 40\text{cm}$ に対するゲート開度 a の比 $a/B=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ について流量係数 C と縮流係数 C_c の値を全 265 個の実験データを得ている。以下、その実験データからレイノルズ数により縮流係数 C_c を定式化する。

表-1 名合の実験データの概要

a:ゲート開度		B:水路幅(10, 15, 20, 30, 40cm)			
a/B	a(cm)	データ個数	a/B	a(cm)	データ個数
0.1	1	10	0.4	4	8
	1.5	5		6	9
	2	21		8	18
	3	13		12	16
	4	13		小計	51
	小計	62	0.5	5	9
0.2	2	9		10	16
	3	12		15	10
	4	11	小計	35	
	6	17	合計	265	
	8	10			
	小計	59			
0.3	3	12			
	4.5	9			
	6	13			
	8	16			
	12	8			
	小計	58			

3. データ解析の結果

3.1 レイノルズ数を用いた縮流係数の定式化

$a/B=0.1$ の場合のデータから得られたレイノルズ数と C_c の関係を、全データの回帰式と共に図-1 に示す。なお、力学的にはレイノルズ数は $Re=q/v$ (v : 動粘性係数) が合理的であるが、式(1)の形で流量評価に用いるためには上流側水深 h_0 を用いたレイノルズ数の表現が必要になる。そこで $Re=q/v$ に加え、次式の Re_1 を用いた表現を示す。

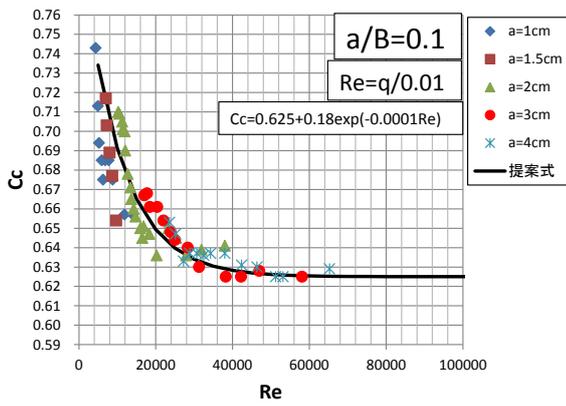
$$Re_1 = \frac{a\sqrt{gh_0}}{v} \quad (2)$$

簡単のためここでは $v=0.01\text{cm}^2/\text{s}$ とした。同図によると、いずれのレイノルズ数を用いた場合も縮流係数 C_c はレイノルズ数の増加により単調減少してほぼ一定値に漸近すること、同じレイノルズ数ではゲート開度 a が大きいほど C_c が大きい傾向が認められる。この図は従来の整理法すなわち $C_c \sim h_0/a$ の関係図に比べてデータのまとまり方で明らかに優れており、縮流係数の整理方法として図-1 のまとめ方がより合理的であることが示唆される。

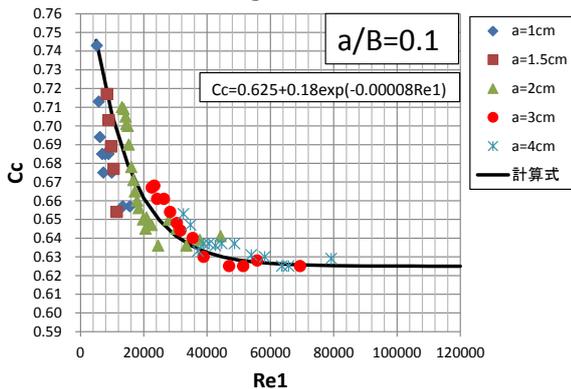
そこで式(2)のレイノルズ数を用いた場合について、ゲート開度ごとに回帰式を求めた。図-2 は開度

キーワード スルースゲート, 縮流係数, レイノルズ数, 上流側水深の評価

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

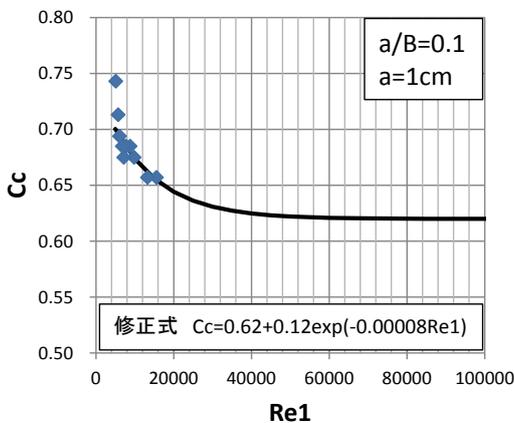


(a) $Re_e = q/v$ による整理



(b) Re_1 (式(2)) による整理

図-1 レイノルズ数と C_c の関係



(a) $a=1\text{cm}$

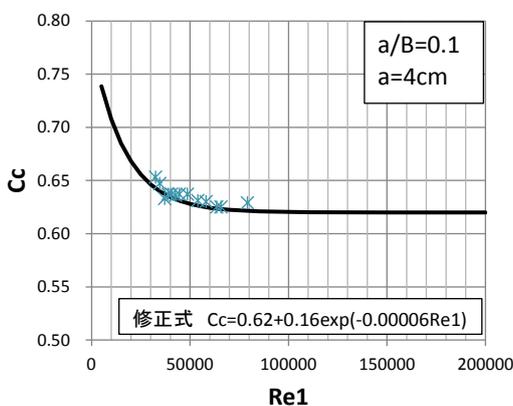


図-2 Re_1 と C_c の関係

で $a=1\text{cm}$ と 4cm の結果の例を示す. 図-2 中に示した回帰式から, C_c の関数形を次式

$$C_c = 0.62 + \beta \exp(-\gamma \times Re_1) \quad (3)$$

の形とし, β と γ をゲート開度 a の関数として取り扱うことが適当と考えられる. そこで, ゲート開度 a のみに基づくレイノルズ数を次式

$$Re_2 = \frac{a\sqrt{ga}}{v} \quad (4)$$

で定義し, 式 (3) の β と γ をゲート開度 a ごとに求め, その結果を式 (4) のレイノルズ数 Re_2 に対して図示したものがそれぞれ図-3 と図-4 である.

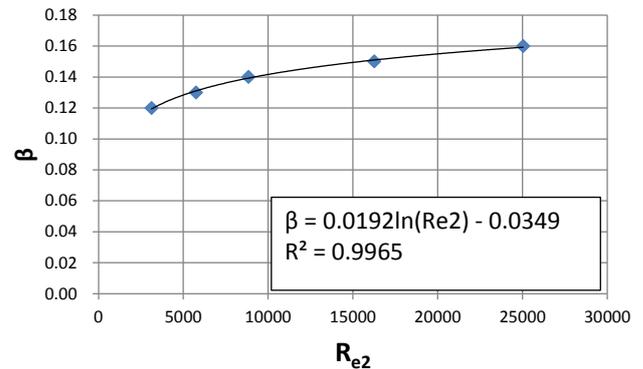


図-3 Re_2 と β の関係

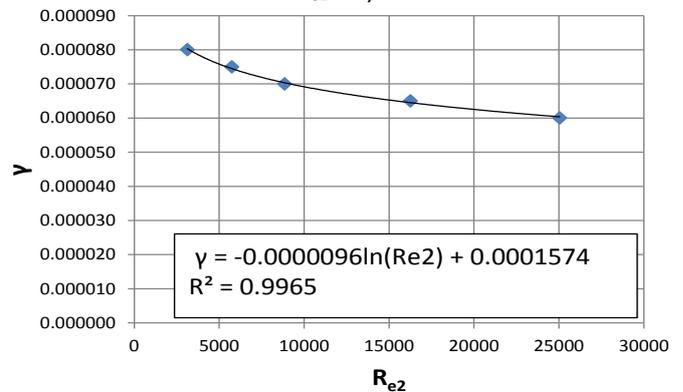


図-4 Re_2 と γ の関係

図より, 式 (3) 中の β と γ は次式で近似できる.

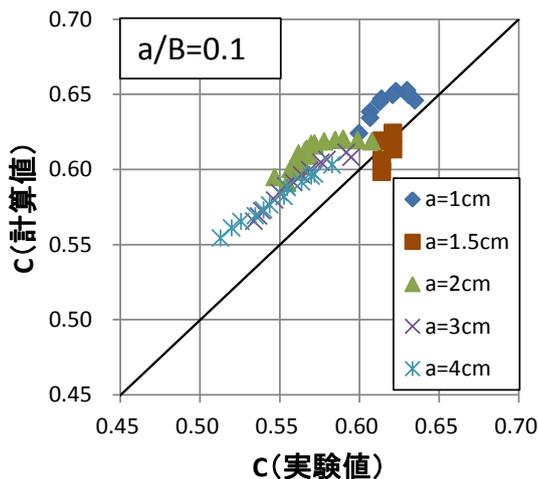
$$\beta = 0.0192 \ln(Re_2) - 0.0349 \quad (5)$$

$$\gamma = -0.0000096 \ln(Re_2) + 0.000157 \quad (6)$$

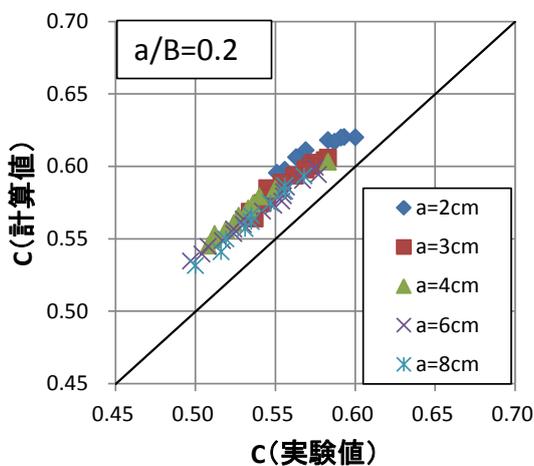
以上で縮流係数 C_c の定式化がなされた.

3.2 流量係数の評価

次に上で得られた C_c の表現式を代入して流量係数 C を求めた. その結果を名合の実験値と比較したものが図-5 である. 同図によると, 全体的に流量係数 C の計算値は 1 割程度の過大評価で満足な結果とはいえない. この原因を縮流断面の流速分布と考え, 次節で検討した.



(a) $a/B=0.1$



(b) $a/B=0.2$

図-5 流量係数 C の計算値と実験値との比較

3.3 縮流断面の流速非一様性を考慮した検討

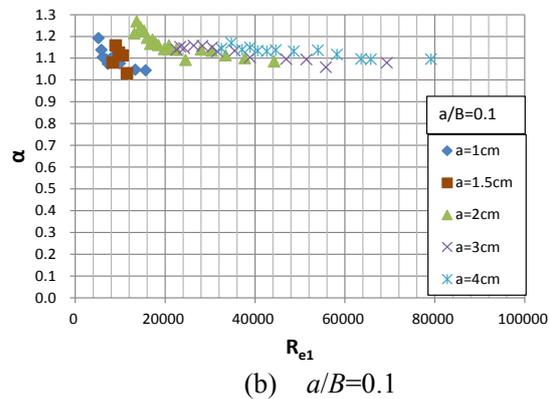
縮流断面のエネルギー補正係数を α 、上流側の平均流速を v_0 、縮流断面の平均流速を v とすると、エネルギー式は次式で与えられる。

$$h_0 + \frac{v_0^2}{2g} = C_c a + \frac{\alpha v^2}{2g} \quad (7)$$

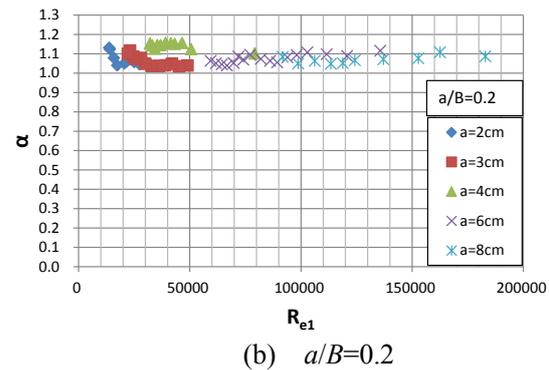
これより次の関係式を得る。

$$C = C_c \sqrt{\frac{(1 - C_c a / h_0) / \alpha}{1 - C_c^2 a^2 / \alpha h_0^2}} ; \alpha = \frac{1 - C_c a / h_0}{(C / C_c)^2} + \frac{C_c^2 a^2}{h_0^2} \quad (8), (9)$$

図-6 は式 (9) による α を、図-7 は流量係数 C の実験値と式 (8) による計算値の比較を示す。図-6 より $\alpha \approx 1.1$ である。図-7 は 図-5 より改善されており縮流断面の流速分布の重要性がわかる。紙面の都合で割愛するが、他の a/B 値でも同様である。

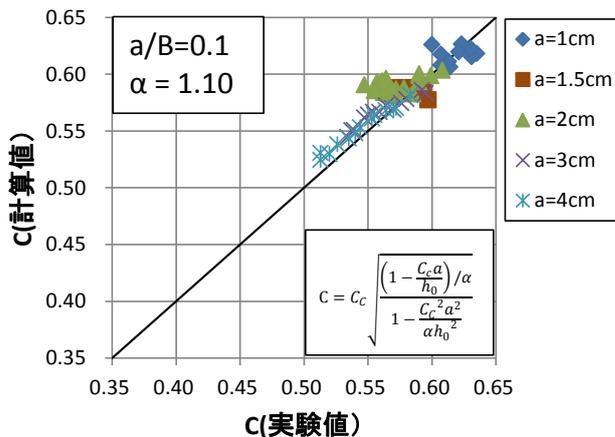


(b) $a/B=0.1$

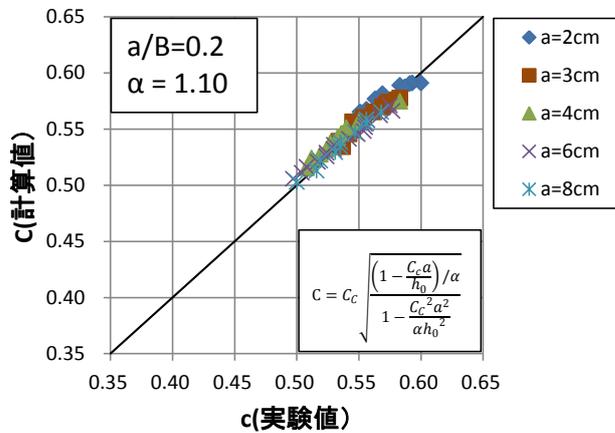


(b) $a/B=0.2$

図-6 α と Re_1 との関係



(a) $a/B=0.1$



(b) $a/B=0.2$

図-7 流量係数 C の実験値と式(8)による計算値の比較

4. 潜り流出のゲート上流側水深の評価

4.1 潜り流出の実験

潜り流出の実験は松江工業高等専門学校内の水路幅 30cm, 長さ 10.3m の可変勾配水路で行った。水路中央付近に設置した厚さ 1cm のアクリル板のスルースゲート模型を用いた。実験では、ゲート開度 a と流量を所定の値に設定して行った。所定のゲート開度と流量に対し、水路下流端部の堰を操作してゲート下流の水位を上げて種々の下流水深で潜り流出をつくり、ゲートの上流側と下流側の水深を測定する。この一連の作業が終わったら、流量を変えて同様の計測を行う。実験条件：ゲート開度 a は 2cm, 3cm, 4cm, 5cm, 6cm の 5 種で、ゲート開度と流量の組合せを 24 ケース。水深の測定位置：ゲートから上流 0.7, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 100cm, ゲートから下流 1, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 60, 70, 100, 200, 300, 400cm。

図-8 に $a=2\text{cm}$ のときの実験結果の一例を示す。下流側水位が低いとゲート直下流で水面が急上昇し、ゲート下流側 50cm よりも下流ではほぼ一定水深となる。下流側水位が高い完全な潜り流出では、ゲート下流側の水位はほぼ一定である。

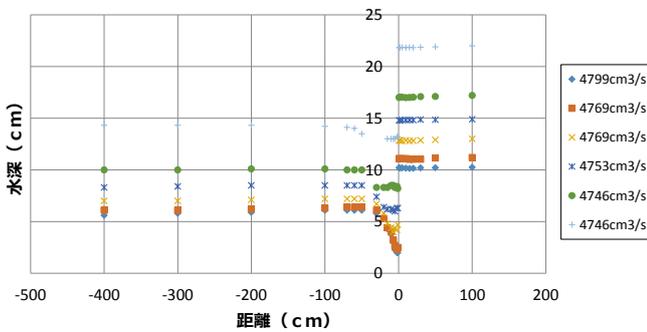


図-8 種々の下流側水深での水面形 ($a=2\text{cm}$)

4.2 ゲート上流側水深の算定式

ゲートの上流水深を h_0 , 縮流断面の水深を h , 下流側水深を h_2 とし、ゲート上流と縮流断面にエネルギー保存式, 縮流断面と下流側断面に運動量の定理を適用すると, 式 (10), (11) を得る。

$$h_0 + \frac{q^2}{2gh_0^2} = C_c a + \frac{q^2}{2g(C_c a)^2} \quad (10)$$

$$\rho q^2 \left(\frac{1}{h_2} - \frac{1}{C_c a} \right) = \frac{1}{2} \rho g (h^2 - h_2^2) \quad (11)$$

両式から h を消去して整理すると上流側水深 h_0 に関する次の 3 次方程式を得る。

$$h_0^3 - \left\{ \sqrt{\frac{2q^2}{g} \left(\frac{1}{h_2} - \frac{1}{C_c a} \right)} + h_2^2 + \frac{q^2}{2g(C_c a)^2} \right\} + h_0^2 + \frac{q^2}{2g} = 0 \quad (12)$$

4.3 理論式の妥当性の検証

式(12)によるとゲート下流側の水深 h_2 , 単位幅流量 q , 縮流係数 C_c およびゲート開度 a から上流側の水深 h_0 が求められる。縮流係数 C_c は自由流出の結果で得られた式(3)と同形の縮流係数 C_c を与える。すなわちこの C_c は, 図-1(a)を基に Re の関数として求め直した β を適用している。上流側水深の実測値 h_{0s} を式(12)で求めた計算値 h_0 で除した値を図-9 に示す。同図によると, $h_2/a < 2$ の範囲では縦軸の値が変動するが, $h_2/a > 2$ の範囲では縦軸の値が 10% 程度以下の誤差で 1 程度の値を示しており本解析の妥当性をうかがわせる。

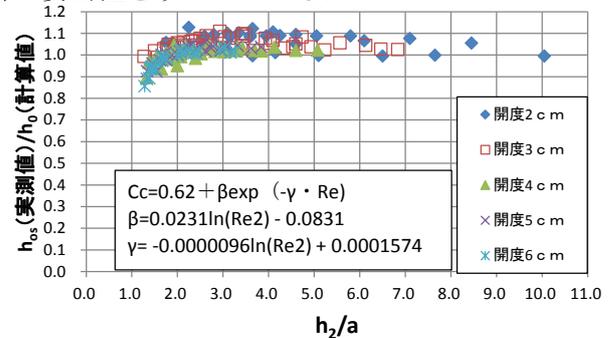


図-9 上流側水深の実験値と計算値の比較

5. 結論

以上, 自由流出について既往の実験データの分析により縮流係数をレイノルズ数により表現する式を求め, その結果と縮流断面の流速非一様性から流量係数の表現を求めた。結果は実験結果を良く再現した。潜り流出について基礎式から上流側水深の計算式を求め, これが実験値と適合することを確認した。謝辞：本研究にあたり松江高専 環境・建設工学科の卒研生石田弘毅氏と田村拓登氏に実験で熱心な協力をいただいた。記して深甚の謝意を表す。

参考文献

- 1) 椿東一郎：水理学 I, 森北出版, pp.198-200, 1973.
- 2) 土木学会：水理公式集 昭和 46 年改訂版, pp.284, 1971.
- 3) 名合宏之：開水路底流形水門の流出機構に関する水理学的研究, 京都大学学位論文, 1973.
- 4) 名合宏之：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, pp.77-86, 1977.