

水門形状の流量係数に及ぼす影響に関する研究

INFLUENCE OF GATE-SHAPES ON DISCHARGE COEFFICIENTS OF UNDERFLOW GATES

名 合 宏 之*
By Hiroshi NAGŌ

1. 緒 言

開水路に設置される底流型水門の形状には、従来より各種のものがあるが、とくに近年、長径間の可動せきにシェル構造の水門が用いられるようになり、ますます多様化してきている。一方、底流型水門の流量係数に関する研究は数多く行われているが、そのほとんどは、きわめて単純な形状を対象とした基礎的研究、あるいは特定の形状に対する模型実験の研究であり、各種の形状要素の流量係数に及ぼす影響を系統的に取扱った研究はきわめて少ない。このため、実際の水門の設計を行うにあたって利用しうる流量係数の資料は乏しく、多くの場合、模型実験によって推定せざるをえないのが現状である。

このような実情を背景とし、本研究では、各種底流型水門の合理的な水理設計法を確立するための基礎として、まず、形状による流量係数の基本的な変化特性を、モデル水門を対象として理論的かつ実験的に明らかにし、その結果にもとづいて、各種の実際的な水門の流量係数の推定法を提案し、その適用性について検討する。

2. 水門形状の分類とそのモデル化

開水路底流型水門の形状には各種のものがあるが、流出流量に影響するのは、主として流れに接する上流面および底面の形状である。このことを考慮すると、流出流量を取扱うにさいしては、水門形状を図-1のように分類することができる。Type-I は平板状の水門であり、その形状は底面傾斜角 θ のみによって表わされる。この形状の水門のうち、とくに $\theta=90^\circ$ の場合は、鉛直刃形水門であり、スルースゲートのほとんどがこの形状である。Type-II はラジアルゲートであり、その形状は流出端傾斜角 δ_0 および曲率半径 R によって表わされる。現

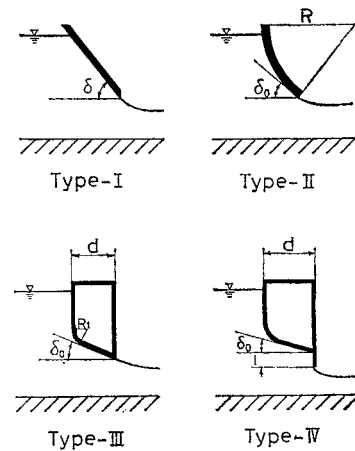


図-1 底流型水門の形状

実の水門としては、テンターゲートやローリングゲートがこの形状に属する。Type-III は、鉛直上流面および底面より構成される水門であり、底面の断面形状としては、直線、円弧、楕円弧あるいは放物線弧などが用いられる。直線状断面の場合には、一般に上流面との交点に丸みが施されるようである。このように、この種の水門の形状を記述する要素はかなり多いが、すべてに共通する主な形状要素は θ および水門の厚さ d と考えてよいであろう。Type-IV は、本体は Type-III と同様であるが、流出端に鉛直リップが付加された水門である。流出端近傍の形状は流れに著しく影響することから、鉛直リップの長さ l は、 θ および d に加えて重要な形状要素とみなさなければならない。Type-III および Type-IV は、従来からも用いられていたようであるが¹⁾、近年、長径間の可動せきに用いられるシェル構造の水門によくみられる形状である。

本研究では、これら各種水門の流量係数の合理的な推定法を確立するための基礎として、まず、各水門形状を構成する主要な形状要素によってモデル化し、このモデル水門について、それぞれの形状要素の流量係数に及ぼす

* 正会員 工博 岡山大学助教授 工学部土木工学科

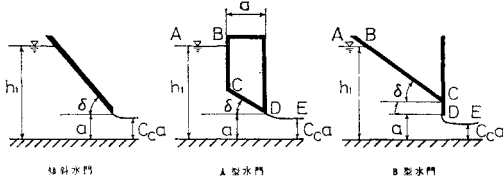


図-2 モデル水門

影響を検討する。

各水門形状のモデル化は、次のように行われる。

まず、Type-I は、形状要素が底面傾斜角 δ のみであり、そのままの形状、すなわち、図-2 に示される傾斜水門を1つのモデル水門として取扱うことにする。

Type-II および Type-III の水門には、 δ_0 のほかに R あるいは d などの形状要素があるが、Koch と Carstenjen¹⁾、Horton²⁾ および Knapp³⁾ などは、これらの水門の流量係数も、 δ_0 にひとしい底面傾斜角を有する傾斜水門のそれによって近似できるとしている。しかし、 R あるいは d の影響についての検討はなされておらず、この手法の適用限界は明確にされていない。本研究では、これらの水門形状を、底面傾斜角 $\delta(=\delta_0)$ および水門の厚さ d によって表現される水門、すなわち、図-2 のA型水門にモデル化し、水門の厚さの影響について検討する。水門の厚さ d を用いてモデル化したのは、それが Type-III の主要な形状要素であると同時に、それによって、Type-II の曲率半径 R の影響もある程度表現しようと考えたためである。なお、曲率の影響については後に補足的に検討することにする。

Type-IV では、鉛直リップの長さ l 、流出端傾斜角 δ_0 および水門の厚さ d が主要な形状要素とみなされるが、これらのうち、流出端に近い形状要素ほど流出流量に著しく影響すると考えられ、ここでは、 l および δ_0 を主要な形状要素として取り上げ、図-2 のB型水門にモデル化する。

3. 傾斜水門の流量係数の特性

傾斜水門は形状が比較的単純であることから、従来より、その流出機構については、理論的かつ実験的な検討がかなり行われている^{1),4),5)}。しかし、その水理解析法はいまだ確立されておらず、したがってまた、流量係数の定量的特性も十分明らかにされているとはいえない。著者はさきに、 δ が 90° の場合、すなわち、鉛直刃形水門について、縮流係数ならびに流量係数の水理特性を実験的に明らかにした^{6),7)}。ここではその結果をもとにして、縮流係数ならびに流量係数の、傾斜角による変化特性を明らかにするとともに、これら諸係数の形状による変化特性を解明するにさいしての水理学的問題点を明ら

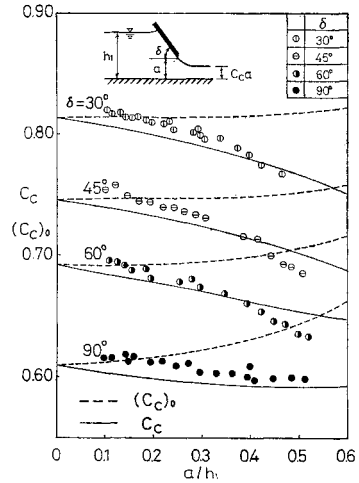


図-3 傾斜水門の縮流係数

かにしておこう。

(1) 縮流係数の特性

流量係数の基本的な特性は縮流係数のそれによって表わされる。そこで、流量係数を取扱うに先立ち、まず、縮流係数の特性を明らかにしておこう。

図-3 は、傾斜水門の縮流係数の実験結果を示したものである。実験は、模型の縮尺効果を除去するため、鉛直刃形水門の実験結果⁶⁾を参考にし、水門の開き高 a を 6.0 cm に設定して行われた。また、幅 B が 40 cm の水平直線水路が用いられている。傾斜水門における縮尺効果の特性は厳密には鉛直刃形水門のそれとは異なるであろう。しかし、鉛直刃形水門からの流出と比較して傾斜水門からの流出現象に極端な相違は認められない。したがって、縮尺効果の特性にも顕著な差が現われることは考えられず、このように鉛直刃形水門について得られている結果を適用することが、近似的な手法として許容されよう。なお、以下に示される実験結果は、すべてこれと同じ条件のもとで得られたものである。

図中の破線は、2次元ポテンシャル流の仮定にもとづき、下流自由表面上の速度変化および上流側の水位上昇などといった、重力の影響を無視して得られる理論解であり、v. Mises⁸⁾ が容器からの流出問題を解析して得た解と同様のものである。実線はこの値に重力の影響を考慮して修正を施したものである。重力の影響を無視して得られる解を $(C_c)_0$ 、修正量を ΔC_c とすると、実線で示される修正理論解 C_c は次式のように表わされる。

$$C_c = (C_c)_0 + \Delta C_c \dots \dots \dots (3.1)$$

修正量 ΔC_c としては、ここでは、Fangmeier ら⁹⁾ が $\delta = 90^\circ$ に対して得た C_c の値（重力の影響を厳密に考慮し、等角写像法によって計算された解）と $(C_c)_0$ との差（図-4）を用いている。 ΔC_c は形状によって当然変化すべ

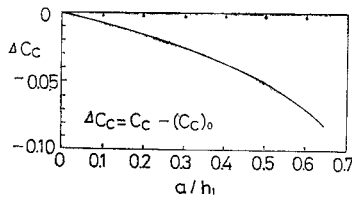


図-4 重力の影響に対する修正量 ΔC_c

き性質のものであるが、Marchi⁵⁾が傾斜水門について得た C_c の理論解(重力の影響のうち、それが主として現われる下流自由表面上の速度変化を考慮し、ホドグラフ法を用いて得られた近似解)から ΔC_c を計算すると、傾斜角による ΔC_c の変化は無視しうほど小さい。このことを考慮し、ここでは 図-4 に示される ΔC_c を各傾斜角に対して適用している。図-3 より、実験値はどの傾斜角についても、このようにして得られた修正理論解によって十分近似しうることがわかる。なお、 ΔC_c が形状によってほとんど変化しないということから、縮流係数の形状による変化特性は $(C_c)_0$ によって表現されると考えてよい。

(2) 流量係数の特性

(a) 自由流出時の流量係数

図-5 は自由流出時の流量係数を示したものである。ここに示される流量係数の実験値は次式によって計算されたものである。

$$C = Q/Ba\sqrt{2gh_1} \dots\dots\dots(3.2)$$

ここに、 C : 流量係数、 Q : 流量、 B : 水路幅、 a : 水門の開き高、 g : 重力加速度、 h_1 : 上流水深。図中の曲線は、図-3 に示された縮流係数の修正理論解を用い、完

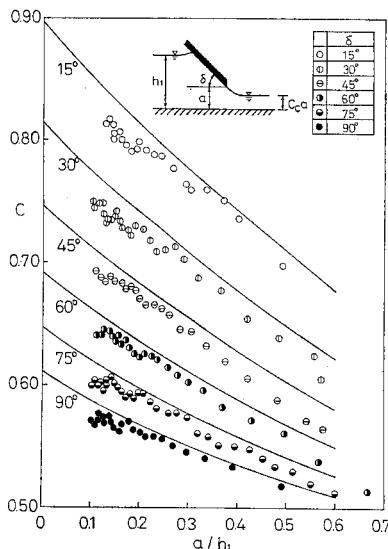


図-5 傾斜水門の流量係数(自由流出)

全流体の仮定のもとにエネルギー保存則を適用して得られた次式によって計算された流量係数を示している。

$$C = C_c / \sqrt{1 + C_c a / h_1} \dots\dots\dots(3.3)$$

この図より、流量係数の定性的な傾向は計算値によってよく説明されることがわかる。また量的には、どの傾斜角の場合も、実験値は計算値よりも若干小さな値を示すことがわかる。縮流係数の実験値(図-3)は、修正理論解よりも全体的に大きな値を示しているのに反し、流量係数の実験値は、この修正理論解を用いて計算される値より小さくなっている。これは流量係数が式(3.3)のような単純な形では表わされず、縮流係数以外の構成要素、たとえばエネルギー損失などの影響が現われているとみなさなければならない。

(b) もぐり流出時の流量係数

もぐり流出に対する流量公式として式(3.2)を用いた場合、その流量係数は、Jaeger¹⁰⁾やHenry¹¹⁾によって提案されている流出モデルを用い、図-6 に示される断面1と断面2の間にエネルギー保存則を適用することにより、次のように表わすことができる。

$$C = C_c' \sqrt{\frac{1 - h_2/h_1}{1 - (C_c' a/h_1)^2}} \dots\dots\dots(3.4)$$

ここに、 C_c' は物理的に明確な量ではなく、図-6 に示されるように、自由流出時と同様な噴流が存在すると仮定した場合の仮想的な縮流係数である。また、 h_2 は縮流断面における水深であり、断面2と断面3の間に運動量保存則を適用して得られる次式により、下流一様流の水深 h_3 と関係づけられる。

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{4A^2}{A^2-1} \right) \left(\frac{h_1}{h_3} - 1 \right) \pm \sqrt{\left\{ \left(\frac{4A^2}{A^2-1} \right) \left(\frac{h_1}{h_3} - 1 \right) \right\}^2 + 4 \left\{ \left(\frac{h_3}{h_1} \right)^2 - \left(\frac{4A^2}{A^2-1} \right) \cdot \left(\frac{h_1}{h_3} - 1 \right) \right\}} \right] \dots\dots\dots(3.5)$$

ここに、

$$A = C_c' a / h_1$$

式(3.4)および式(3.5)を用いて流量係数を算出する場合、仮想的な縮流係数としてどのような値を採用すればよいかという点が問題となるが、著者はさきに、このようなモデルに対して用いるべき縮流係数としては、重力の影響を無視した解 $(C_c)_0$ をもちいるのが妥当であることを示した⁷⁾。図-7 は、このような方法で得られた傾

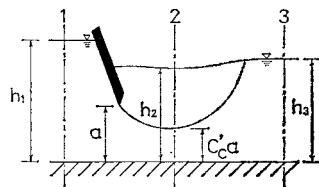


図-6 もぐり流出模式図

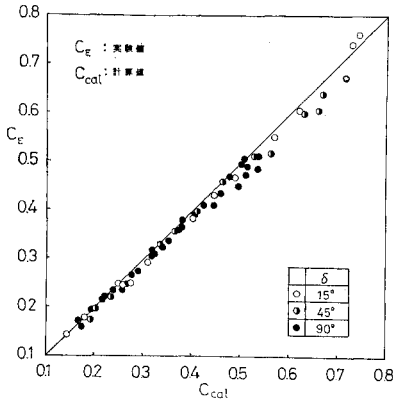


図-7 傾斜水門の流量係数（もぐり流出）

斜水門の流量係数の計算値 C_{cal} を、実験値 C_E と比較したものである。計算値は平均的にみて、実験値より若干大きな値を示すが、推定値としてほぼ妥当であることがわかる。なお、もぐり流出時の流量係数は、下流水深 h_0 によって著しく変化する。したがって、式 (3.4) および式 (3.5) を用いて計算する場合、下流水深として、どの断面の値を採用するかは重要な問題である。図-7 に示された計算値では、この値として、もぐり跳水終了断面の最大水深を用いている。

4. A型およびB型水門の縮流係数の特性

前節の傾斜水門の解析でも示されたように、流量係数の基本的特性は、縮流係数の特性を知ることによってほぼ明らかにされる。そこで、A型およびB型水門の流量係数を取扱うにあたっては、まず、その縮流係数の特性を明らかにしておく。

(1) 基礎的考察

3.(1) で明らかにされたように、縮流係数の形状による変化特性は、重力の影響を考慮せずに得られる、2次元ポテンシャル流の仮定にもとづく理論解 (C_c) によってよく説明される。ここでは、A型およびB型水門について、このような理論解を求め、これらの水門の縮流係数の形状による基本的な変化特性について考察しよう。

(a) 理論解析の概要

理論解析においては、モデル水門のスキンプレートに沿う流線のはく離現象の取扱いが問題となるが、ここでは、流線はスキンプレートに沿うものとして取扱われる。これは、はく離現象の流体力学的意義はもちろんのこと、実際的な解析もきわめて困難であり、また、実際の水門においては、図-1におけるType-IIIのように、凸角部に丸みをつけるなどして、はく離を防止する方策がとられ、流線がスキンプレートに沿うとして解析され

た結果が、これらの水門に対する近似解を与えることが予想されるためである。

このような仮定にもとづいて、モデル水門からの流出問題を、ここでは不連続流の解析における、Levi-Civitaの方法¹²⁾を用いて解析する。なお、最近、Larock¹³⁾は、本研究で対象としているものと形状的に同様な、ノズルからの流出問題を、混合境界値問題として取り扱っている。しかし、特定の境界条件に対する数値解を与えているのみであり、各形状要素の変化に対する、縮流係数の一般的な変化特性を明らかにするには至っていない。

解析法の詳細についてはすでに報告しているが^{14),15)}、その概要を示すと以下のようなものである。

まず、図-2に示される流れの平面（図中の C_c はこの場合 (C_c) を意味する）を z 平面とすると、これに対応する複素ポテンシャル w の平面 ($w = \phi + i\psi$) は、図-8のように表わされる。この w 平面は、図-9に示される補助平面 (ζ 平面、 $\zeta = re^{i\sigma}$) の半径1の四分円内に、次の関係によって写像される。

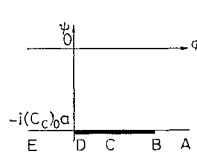


図-8 w 平面

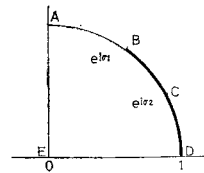


図-9 ζ 平面

$$w = -\frac{2(C_c)_0 a}{\pi} \ln \left\{ -\frac{1}{2} \left(\zeta + \frac{1}{\zeta} \right) \right\} + i(C_c)_0 a \dots\dots\dots (4.1)$$

次に、次式で定義される関数 ω を導入する。

$$\frac{dw}{dz} = -u + iv = -e^{-i\omega}, \omega = \theta + i\tau \dots\dots\dots (4.2)$$

ここに、 u, v は水平および鉛直方向の流速成分であり、 θ は流れの方向、 e^τ は合速度の大きさを表わしている。このように導入された関数 ω は ζ 平面の四分円内で次のように定義される。

$$e^{i\omega(\zeta)} = \prod_{j=2}^3 \left\{ \left(\frac{1 - \zeta e^{i\sigma_{j-1}}}{1 + \zeta e^{i\sigma_{j-1}}} \right) \left(\frac{e^{i\sigma_{j-1} + \zeta}}{e^{i\sigma_{j-1} - \zeta}} \right) \right\}^{(\delta_j - \delta_{j-1})/\pi} \dots\dots\dots (4.3)$$

ここに、 σ_1 および σ_2 はそれぞれ ζ 平面における点 B および点 C の偏角である。 δ_1 は 0 であり、 δ_2 および δ_3 はそれぞれ BC 部分および CD 部分の水平とのなす角を示している。境界面上では、 $\zeta = e^{i\sigma}$ であるから、上式は、

$$e^{i\omega(\sigma)} = \prod_{j=2}^3 \left(-\frac{\sin \sigma_{j-1} + \sin \sigma}{\sin \sigma_{j-1} - \sin \sigma} \right)^{(\delta_j - \delta_{j-1})/\pi} \dots\dots\dots (4.4)$$

と表わされる。また、境界面上の座標は、

$$z = -\frac{2(C_c)_0 a}{\pi} \int_{j=2}^3 \left(-\frac{\sin \sigma_{j-1} + \sin \sigma}{\sin \sigma_{j-1} - \sin \sigma} \right)^{(\delta_j - \delta_{j-1})/\pi} \cdot \tan \sigma d\sigma + C_0 \dots\dots\dots (4.5)$$

ここに、 C_0 は積分定数である。

式(4.5)を用いると、BC部の長さ l_1 およびCD部の長さ l_2 はそれぞれ以下のように表わされる。

$$l_1 = \frac{2(C_c)_0 a}{\pi} \int_{\sigma_2}^{\sigma_1} \left(\frac{\sin \sigma_1 + \sin \sigma}{\sin \sigma_1 - \sin \sigma} \right)^{\delta_2/\pi} \cdot \left(\frac{\sin \sigma + \sin \sigma_2}{\sin \sigma - \sin \sigma_2} \right)^{(\delta_3 - \delta_2)/\pi} \cdot \tan \sigma d\sigma \dots\dots (4.6)$$

$$l_2 = \frac{2(C_c)_0 a}{\pi} \int_0^{\sigma_2} \left(\frac{\sin \sigma_1 + \sin \sigma}{\sin \sigma_1 - \sin \sigma} \right)^{\delta_2/\pi} \cdot \left(\frac{\sin \sigma_2 + \sin \sigma}{\sin \sigma_2 - \sin \sigma} \right)^{(\delta_3 - \delta_2)/\pi} \cdot \tan \sigma d\sigma \dots\dots (4.7)$$

また、点Aでは $\theta=0 (\omega=ir)$ であり、 $u=e^r$ であることを考慮し、式(4.4)および連続の条件を用いると次式が得られる。

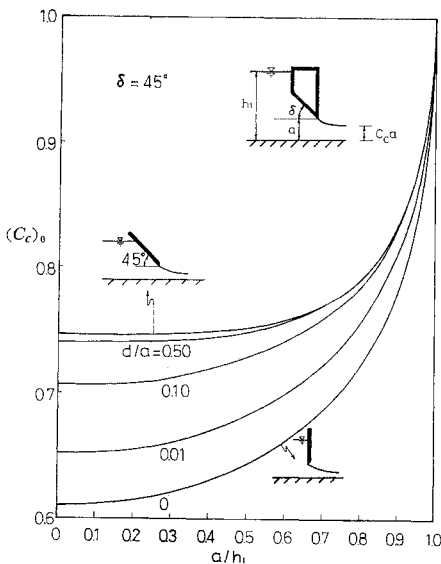
$$(C_c)_0 = \frac{1}{(a/h_1)} \left(\frac{1 + \sin \sigma_1}{1 - \sin \sigma_1} \right)^{-\delta_2/\pi} \left(\frac{1 + \sin \sigma_2}{1 - \sin \sigma_2} \right)^{(\delta_2 - \delta_3)/\pi} \dots\dots\dots (4.8)$$

式(4.6)～式(4.8)を用い、水門形状を表わす幾何学量(表一)および水理条件 a/h_1 を与えると、 σ_1 および σ_2 をパラメーターとして、縮流係数 $(C_c)_0$ が求まる。なお、これらの式において、 $\sigma_1 = \sigma_2$ とすると傾斜水門に対する式を与える。

(b) 計算結果

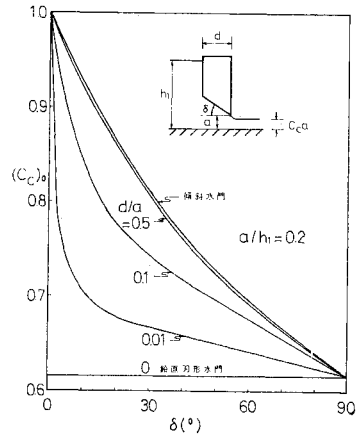
表一 モデル水門の形状要素

水門形状	l_1	l_2	δ_2	δ_3
A型	$h_1 - a - d \tan \delta$	$d/\cos \delta$	$\pi/2$	δ
B型	$(h_1 - a - l)/\sin \delta$	l	δ	$\pi/2$

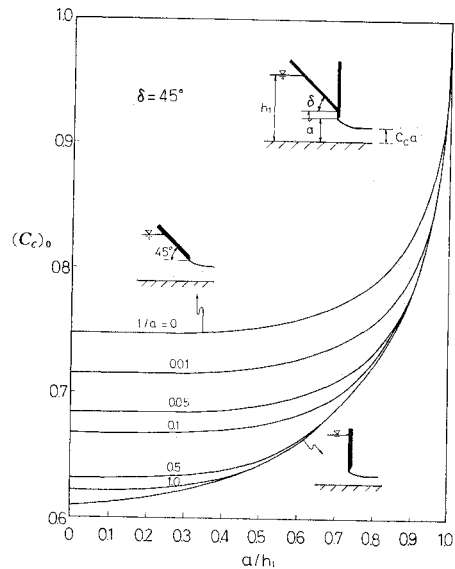


図一10 A型水門の縮流係数

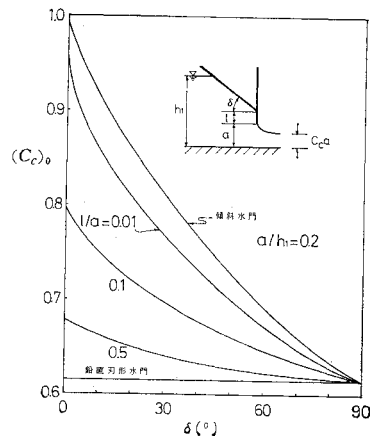
図一10 から 図一13 までには、A型およびB型水門の縮流係数の計算結果の数例が示されている。



図一11 A型水門の縮流係数



図一12 B型水門の縮流係数



図一13 B型水門の縮流係数

図-10には、底面傾斜角が45°のA型水門の縮流係数が、水門の厚さをパラメーターとして示されている。この図より、水門の厚さがわずかであっても、縮流係数の値は、鉛直刃形水門の値から急激に増大することがわかる。この増加量は、図-11より、底面傾斜角が小さくなるほど、大きくなるのがわかる。また、水門の厚さが、開き高と同程度になれば、A型水門の縮流係数は傾斜水門の値とほぼひとしくなる。

図-12および図-13は、B型水門の縮流係数の特性を示したものである。これらの図より、B型水門における鉛直リップの縮流係数に及ぼす効果は、A型水門における、水門の厚さの効果と類似していることがわかる。すなわち、わずかなリップの長さにより、縮流係数は、傾斜水門の値から著しく減少し、鉛直刃形水門の値に近づく。この減少量は、底面傾斜角が小さいほど大きく、また、リップの長さが、開き高と同程度になれば、縮流係数は鉛直刃形水門の値とほぼひとしくなる。

以上の解析結果から、A型およびB型水門の縮流係数は、流出端近傍の水門形状によって、著しく変化することが明らかにされる。

(2) 実験結果とその考察

ここでは、A型およびB型水門について得られた縮流係数の実験結果を示し、その特性について考察する。なお、以下に述べる修正理論解とは、3.に示した傾斜水門の場合と同様な手法によって、(1)で得た理論解(C_c)を重力の影響に対して修正したものである。

(a) A型水門の縮流係数

実験に用いられた模型水門の構造諸元および開き高との関係は表-2に示されるとおりである。図-14から図-17までは、底面傾斜角が30°、45°、60°および75°の場合の縮流係数を示している。これらの図中には、さきに示した、傾斜水門の実験値および修正理論曲線が示されている。また、 δ が60°

および75°の場合については、 d/a が0.1の場合の修正理論解が破線で示されている。 δ が45°および60°の場合で、 d/a が1より大きい場合には、実験値は傾斜水門の値とほぼ一致している。また、 δ が60°および75°の場合で、 d/a が0.1の場合には、傾斜水門の値より小さく、その差は、理論解における差とほぼ同程度であることがわかる。こ

表-1 A型水門模型諸元

δ	d (cm)	d/a ($a=6.0$ cm)
15°	0.6	0.1
	6.0	1.0
	24.0	4.0
30°	0.6	0.1
	6.0	1.0
	24.0	4.0
45°	0.6	0.1
	6.0	1.0
	24.0	4.0
60°	0.6	0.1
	6.0	1.0
	24.0	4.0
75°	0.6	0.1
	6.0	1.0

れらのことは、水門の厚さに関する理論解の傾向が妥当であることを示しているといえよう。ところが、 δ が30°の場合は、 d/a が小さいほど、また、 a/h_1 が小さいほど、A型水門の値は傾斜水門の値よりも大きくなっていく。このようなことは、理論結果とはまったく異なった

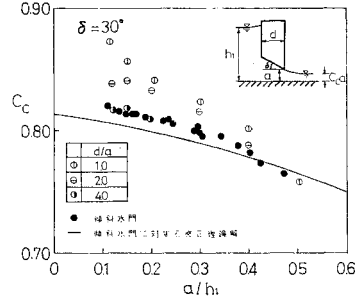


図-14 A型水門の縮流係数 ($\delta=30^\circ$)

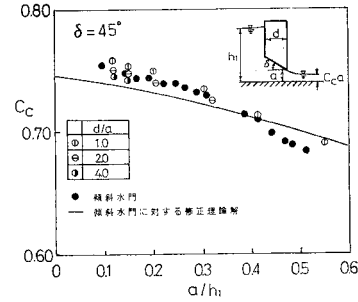


図-15 A型水門の縮流係数 ($\delta=45^\circ$)

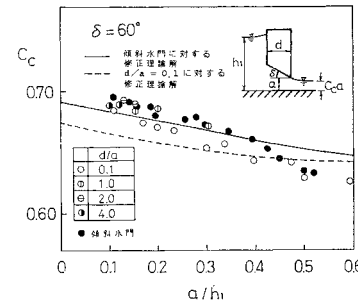


図-16 A型水門の縮流係数 ($\delta=60^\circ$)

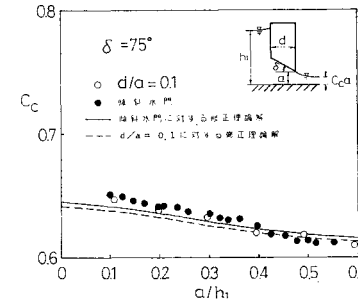


図-17 A型水門の縮流係数 ($\delta=75^\circ$)

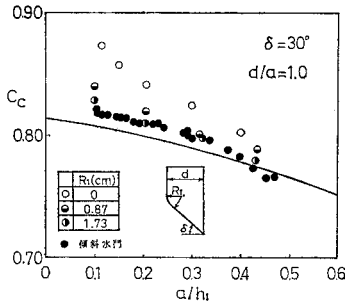


図-18 A型水門の縮流係数 (凸部に丸みをつけた場合)

ものである。これは、実際の流出形態が、理論解析で仮定した連続流の形態とは異なり、水門前面と底面との交点で流線のはく離が起っているためと考えられる。このことは、これらの図には示されていないが、 δ が 15° 、 30° および 45° の場合で、 d/a が 0.1 の場合の実験では、 a/h_1 が 0.5 より小さい領域では、すべてこの凸角において流線のはく離し、ふたたび底面に接することなく流下したことから推論される。さらに、図-18 は、 δ が 30° で、 d/a が 1.0 の模型において、凸角部に丸みをつけた場合の縮流係数を示したものであるが、丸みの半径が大きくなると、縮流係数は傾斜水門の値に近づくことがわかる。このことは、丸みをつけることにより、はく離が生じにくくなっていることを示していると考えてよいであろう。なお、はく離領域が形成された場合に縮流係数が大きくなるのは、はく離領域の存在によって、水門底面下の水脈が全体的に水路底に平行な流れの状態に近づき、縮流効果が減少するためと考えられる。

以上のことから、A型水門の場合には、水門底面に発生するはく離領域の大きさが、縮流係数に著しく影響するが、はく離領域が存在しないか、あるいはその影響が小さい場合には、縮流係数の水門の厚さによる変化特性は、理論解の傾向と同様であり、 d/a が 1 より大きい場合には、傾斜水門の値とほぼひとしくなることがわかる。

表-3 B型水門模型諸元

δ	l (cm)	l/a ($a=6.0$ cm)
30°	0.38	0.063
	0.88	0.146
	1.88	0.313
	2.88	0.479
	5.88	0.979
45°	0.30	0.050
	0.80	0.133
	1.00	0.300
	2.80	0.467
	5.80	0.967
60°	0.10	0.017
	0.60	0.100
	1.60	0.267
	2.60	0.433
	5.60	0.933

(b) B型水門の縮流係数
 実験に用いられた模型水門の構造諸元およびそれらの開き高との関係は表-3に示されるとおりである。B型水門は、傾斜水門の先端に鉛直リップを付けたものであるが、上述のA型水門の実験結果では、 d/a が 4.0 の場合の縮流係数は、

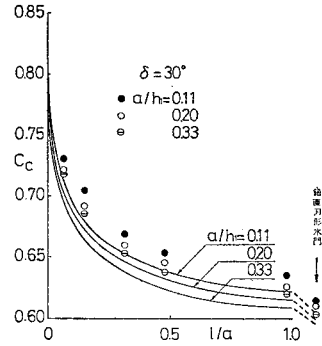


図-19 B型水門の縮流係数 ($\delta=30^\circ$)

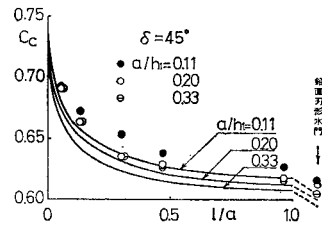


図-20 B型水門の縮流係数 ($\delta=45^\circ$)

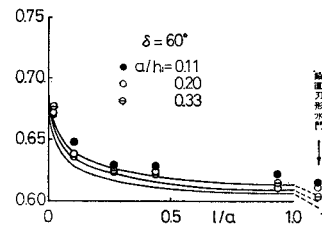


図-21 B型水門の縮流係数 ($\delta=60^\circ$)

傾斜水門の値とよく一致することが示されたので、B型水門の模型における傾斜部分としては、A型水門の d/a が 4.0 の模型が用いられている。実験は、 a/h_1 が 0.11 、 0.20 および 0.33 の各場合について行われた。

図-19、図-20 および 図-21 は、それぞれ底面傾斜角 δ が 30° 、 45° および 60° の場合の縮流係数の実験結果を、修正理論解とともに示したものである。これらの図から、実験値は、いずれの場合も理論値より若干大きな値を示しているが、リップを付加することによって、縮流係数が急激に減少するという、理論解の傾向とよく一致していることがわかる。したがって、B型水門の縮流係数の変化特性は、本研究でえられる修正理論解によって、十分説明されると考えてよいであろう。

5. A型およびB型水門の流量係数の特性

ここでは、4.でえられた結果および流量係数の実験結果にもとづいて、A型およびB型水門の自由流出時およ

びもぐり流出時の流量係数の特性を明らかにする。

(1) 自由流出時の流量係数

(a) A型水門の流量係数

実験は、表-4 に示される模型水門について行われた。図-22 から 図-25 までは、それぞれ底面傾斜角が 15°, 30°, 45° および 60° の場合の流量係数を示している。これらの各図における実線は、図-5 に示された傾斜水門に対する実験値を、直線によって近似した実験曲線である。この実験

表-4 A型水門模型諸元 (流量係数実験)

δ	d (cm)	d/a
15°	24.0	4.0
	6.0	1.0
	12.0	2.0
30°	24.0	4.0
	0.6	0.1
	6.0	1.0
45°	12.0	2.0
	24.0	4.0
	0.6	0.1
60°	6.0	1.0
	12.0	2.0
	24.0	4.0

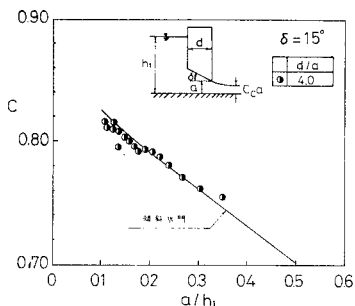


図-22 A型水門の流量係数 ($\delta=15^\circ$)

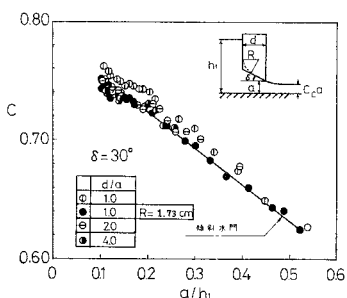


図-23 A型水門の流量係数 ($\delta=30^\circ$)

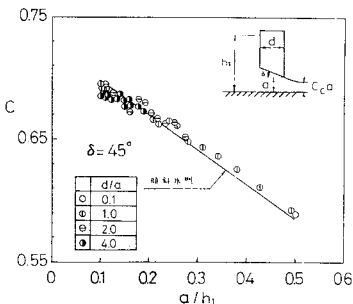


図-24 A型水門の流量係数 ($\delta=45^\circ$)

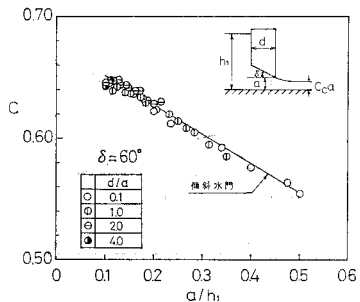


図-25 A型水門の流量係数 ($\delta=60^\circ$)

曲線と各 d/a に対する実験値とを比較すると、次のことがわかる。 δ が 45° および 60° の場合には、 d/a が 0.1 以上になると、ほとんど傾斜水門の値と一致する。 δ が 60° の場合には、 d/a が 0.1 の場合も、他の実験値とほとんど変わらない値を示している。 δ が 30° の場合で、 d/a が 2.0 および 4.0 の場合は、傾斜水門の値と一致するとみなせるが、 d/a が 1.0 の場合には、少し大きな値を示している。これは、4. で述べた、底面に形成されるはく離領域の影響が現われたものとみなしてよいであろう。同図には、前に示した凸角部に半径が 1.73 cm の丸みをつけた場合の実験値も示されているが、これは傾斜水門の値とよく一致している。したがって、このようなはく離領域の大きさを軽減させるように工夫がなされれば、縮流係数の場合と同様に、 d/a が 1 程度以上であれば、流量係数は傾斜水門の値とほぼ一致するとみなせる。

(b) B型水門の流量係数

実験は、縮流係数の場合と同じ模型および同じ a/h_1 について行われた。その結果は、図-26、図-27 および図-28 に示されるとおりである。これらの図より、B型水門の流量係数は、縮流係数の場合と同様に、鉛直リップを付加することにより、傾斜水門の値より急激に減少し、鉛直刃形水門の値に近づくことがわかる。また、減

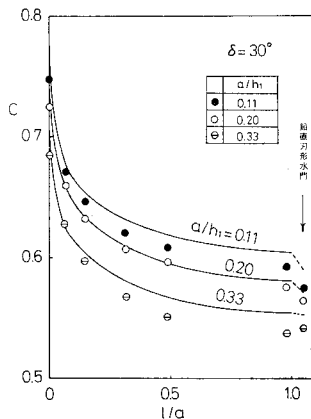


図-26 B型水門の流量係数 ($\delta=30^\circ$)

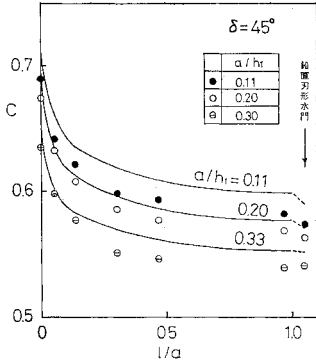


図-27 B型水門の流量係数 ($\delta=45^\circ$)

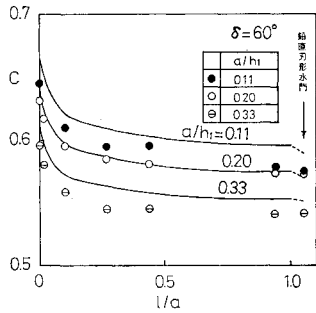


図-28 B型水門の流量係数 ($\delta=60^\circ$)

少の傾向は、縮流係数の修正理論解を用いて、式 (3.3) によって計算された理論曲線の傾向とよく一致している。量的に、理論値よりも若干小さな値を示すのは、3. で述べた傾斜水門の流量係数においてみられた傾向と同様である。

(2) もがり流出時の流量係数

3. で述べたように、傾斜水門の場合には、もがり流出時の流量係数は、式 (3.4) および式 (3.5) を用いて計算される値によってよく近似される。ただし、この場合の縮流係数としては、重力の影響を考慮しない場合の理論解 (C_e) が適用される。ここでも同様の方法で、各形状の水門に対する流量係数を、4. でえた縮流係数の理論値を用いて計算し、実験結果との比較を行う。この場合、A型水門の縮流係数としては、同じ底面傾斜角を有する傾斜水門の値を用いることにする。これは、さきに述べた、縮流係数に関する実験において、一部の実験値を除いて、A型水門の縮流係数が傾斜水門のそれと一致したことを考慮したものである。

実験は、A型水門について

は、表-2 に示された d が 6, 12 および 24 cm の模型について、また、B型水門については、表-3 に示された各模型について行われた。実験で対象とした上流水深の範囲は、約 15 cm から 60 cm であり、下流水深のそれは、約 10 cm から 50 cm である。

図-29 および 図-30 は、それぞれ、A型およびB型水門の流量係数の計算値 C_{cal} と実験値 C_E を比較した例を示したものである。また、各水門に対する実験値の特性を、実験値と計算値の比の平均値で示したのが 表-5 である。この表には参考のため、さきに述べた、傾斜水門についてえられた結果も示されている。これらの図および表より、実験値は計算値によってよく説明されることがわかる。

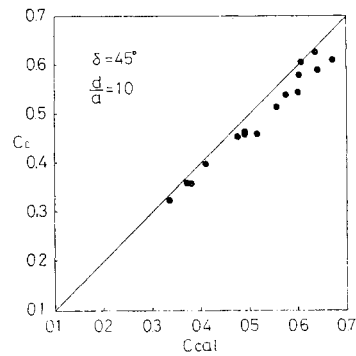


図-29 A型水門の流量係数 (もがり流出)

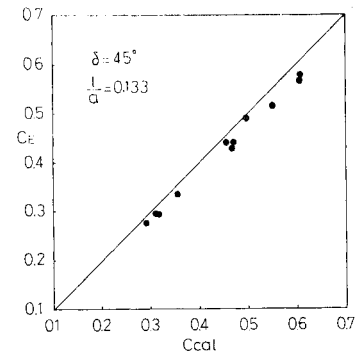
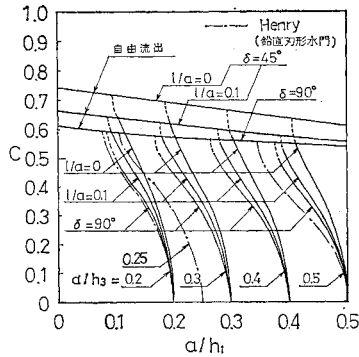


図-30 B型水門の流量係数 (もがり流出)

表-5 C_E/C_{cal} の平均値

δ	傾斜水門	A 型 水 門			B 型 水 門				
		d/a			l/a				
		1.0	2.0	4.0	0.02 ~0.06	0.10 ~0.15	0.27 ~0.31	0.43 ~0.48	0.93 ~0.98
15°	0.950	—	—	0.934	—	—	—	—	—
30°	0.958	0.972	0.950	0.943	0.956	0.972	0.960	0.957	0.958
45°	0.957	0.951	0.941	0.934	0.968	0.956	0.955	0.959	0.968
60°	0.952	0.955	0.958	0.949	0.954	0.968	0.962	0.957	0.950
90°	0.962	—	—	—	—	—	—	—	—
平均値	0.956	0.949			0.960				



図—31 B型水門の流量係数（もぐり流出）

図—31は、このようにして計算される。もぐり流出時の量的な変化特性を、B型水門を例にして示したものである。この図には、縮流係数の修正理論解を用いて、式(3.3)によって計算された、自由流出時の流量係数も同時に示されている。この図では、鉛直リップの流量係数に及ぼす影響が、自由流出時の場合と同様に著しいことがわかる。また、この図には、Henryの実験曲線の数例が示されている。 a/h_3 が0.2および0.5の場合について、本研究結果と比較すると、 a/h_3 が小さい場合には両者はよく一致しているが、 a/h_3 が大きくなるとHenryの実験曲線は本研究結果よりも小さな値を与えている。Henryの実験の詳細が不明であるので、このような差の原因を明確にすることはできないが、 a/h_3 によって差が生じていることを考えると、さきにも述べたように、もぐり流出時の流量係数が下流水深の影響を顕著にうけることから、下流水深の測定法にある程度起因しているとも考えられる。

6. 実用水門の流量係数の推定法に関する考察

前節までは、傾斜水門、A型水門およびB型水門のようなモデル水門を対象として、各種の形状要素の流量係数に及ぼす影響について検討した。本節では、これらの結果にもとづき、実用水門の流量係数の推定法について検討する。

前節の結果では、A型水門については、 δ および d/a がかなり小さい場合を除いて、その流量係数は傾斜水門のそれによって近似されることが示されている。また、 δ および d/a がかなり小さい場合でも、凸角部に丸みを施すことによって、傾斜水門の値に近づくことが示されている。したがって、形状的にA型水門に近似される実用水門については、その流量係数は、Hortonらが提案しているように²⁾、ほとんどの場合、傾斜水門のそれによって近似できよう。このように考えると、実用水門の流量係数の1つの推定法として、次のような方法が考え

られる。すなわち、

Type-I, Type-II および Type-III の水門の流量係数は、流出端傾斜角 δ_0 と同じ底面傾斜角を有する傾斜水門をモデルとして、また、Type-IVの水門のそれはB型水門をモデルとして推定する。

以下では、このような推定法の妥当性について、基礎的な実験結果、および他の研究者によって得られている各種の実用水門に対する結果を用いて検討する。

(1) モデルの適用性に関する基礎的考察

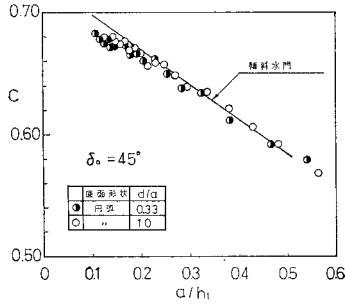
ここでは、傾斜水門をモデルとする手法の適用性について、主として、円弧底面を有する水門について行われた実験結果をもとに考察する。実験は、表—6に示される模型について行われた。この表に示される複合底面とは、A型水門の凸角部に曲率半径 R_1 の円弧が挿入された形状である。 δ_0 および d/a としては、かなり小さな値が用いられているが、それは、これらの値が小さくなると、A型水門においてみられたように、モデルの適用性が悪くなることが予想され、モデルの適用限界がある程度示されると考えたためである。

表—6 模型水門諸元

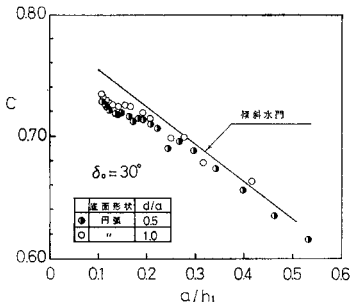
δ_0	水門形状		複合底面	
	円弧底面		d/a	R_1
0°	1, 2		5	6.0 cm
15°	1		5	8.1 cm
30°	0.5, 1		—	—
45°	0.33, 1		—	—

(a) 自由流出の場合

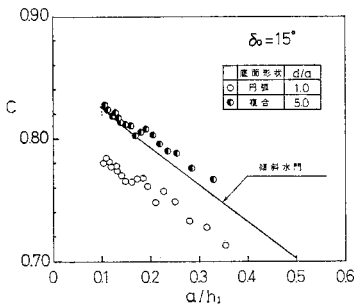
図—32 から 図—35 までには、それぞれ、 δ_0 が45°、30°、15°および0°の場合の流量係数が示されている。図中の実線は、図—5に示された傾斜水門の実験値を代表する実験曲線である。また、図—35に示された破線は、 C_0 を1として、式(3.3)によって計算された流量係数である。図—32、図—33および図—34より、円弧底面の水門の流量係数は、各場合の傾斜水門の値よりも小さくなっていることがわかる。これは傾斜水門に比べて、鉛直方向の流速が大きくなり、縮流効果が大きくなるためと考えられる。このことは、図—33において、 d/a が小さくなる（曲率が大きくなる）と、若干ではあるが、流量係数が小さくなることから推定される。また、これらの図において、 d/a が1.0の場合に着目すると、 δ_0 が大きくなるにしたがって、傾斜水門の値に近づき、 δ_0 が45°では、実用上傾斜水門の値と一致しているとみなせる。さらに、 δ_0 が45°の場合には、 d/a が0.33程度であっても、傾斜水門の値とほぼ同程度の値を示すことがわかる。図—34および図—35における円弧底面の水門に対する実験では、図—36に示されるように、



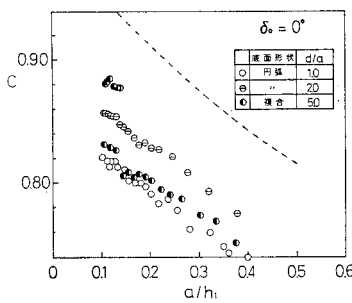
図—32 流量係数 ($\delta=45^\circ$)



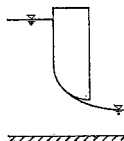
図—33 流量係数 ($\delta=30^\circ$)



図—34 流量係数 ($\delta=15^\circ$)



図—35 流量係数 ($\delta=0^\circ$)



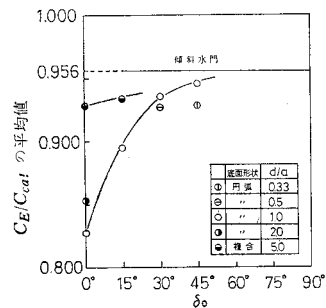
図—36 水門底面での流線のはく離

流線が底面上ではく離するのが認められた。このような場合には、縮流係数はかなり小さくなるため、流量係数が小さな値を示すことになる。図—34 に示される複合底面の水門は、 d/a が 4.0 の A 型水門に d/a が 1.0 の円弧底面の水門を取り付けたものであるが、この場合は、傾斜水門の値とほぼ同じ値を示している。図—35 における複合底面の水門も、 d/a が 4.0 の水平底を有する水門に d/a が 1.0 の円弧底面の水門を取り付けたものであるが、この場合は、実験値に 2 種のものがみられる。すなわち、1 つは d/a が 1.0 の円弧底面の水門とほぼ同じ値を示すものであり、いま 1 つは a/h_1 が 0.15 より小さい領域において、図中でもっとも大きな値を示しているものである。前者は、円弧底面の部分ではく離れた流れが、そのまま流下した場合であり、後者は、はく離れた流れがふたたび水平底面に接して流れた場合である。このように、 δ_0 が小さい場合には、流況が傾斜水門の場合とは、かなり異なってくることに注意しなければならない。

(b) もぐり流出の場合

各模型のもぐり流出時の流量係数の実験値を C_E 、これに対応する傾斜水門に対する計算値を C_{cal} とし、各模型の実験値の特性を、5. で述べたのと同様に C_E/C_{cal} の平均値で表わし、整理した結果が図—37 に示されている。この図における水平な実線は、表—5 に示された傾斜水門に対する平均的な値、0.956 を示している。この図より、円弧底面および複合底面の水門の流量係数は、傾斜水門の値よりも全体に小さな値を示し、また、 δ_0 が小さくなるほど、この差は大きくなるのがわかる。いま、円弧底面の水門の d/a が 1.0 の場合に着目すると、傾斜水門の値からの減少量は、 δ_0 が大きな値から 30° 程度まではわずかであるが、 0° に近づくにつれて、急激に大きくなるのがわかる。このように、もぐり流出の場合においても、 δ_0 が小さく、かつ d/a が小さい（あるいは曲率が大きい）場合には、傾斜水門の値より著しく小さな流量係数を示すことがわかる。

(2) 実用水門に対するモデルの適用性



図—37 C_E/C_{cal} の平均値

(1) では、モデルの適用性について、基礎的な考察を行ったが、ここではさらに、実用水門の模型実験の結果をもとにして考察する。

(a) 自由流出の場合

図-38 および 図-39 には、それぞれ Gentilini¹⁴⁾ および Metzler¹⁵⁾ によってえられた、テンターゲートの流量係数が示されている。これらの図中の実線は、図-5 に示された傾斜水門の実験値を整理してえられた実験曲線である。Gentilini の実験値は、この実線より若干大きく、また、Metzler の実験曲線は、少し小さい値を示しており、著者の実験曲線は、これらの実験結果を代表しているとみなしてよいであろう。このことは、ここに示されたテンターゲートの流量係数は、傾斜水門の値によってほぼ近似できるといえる。なお、Gentilini の実験では、 R/a は 6~16 程度であり、また、Metzler のそれは 2~10 程度である。

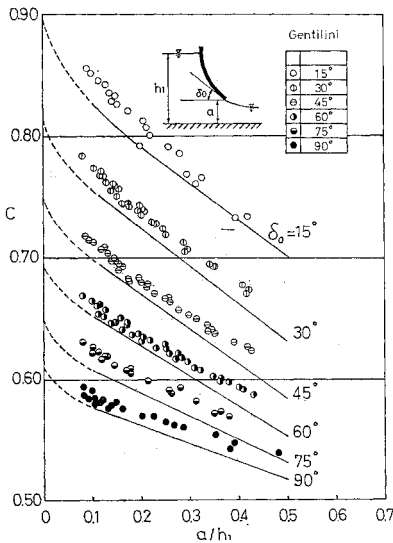


図-38 テンターゲートの流量係数 (Gentilini)

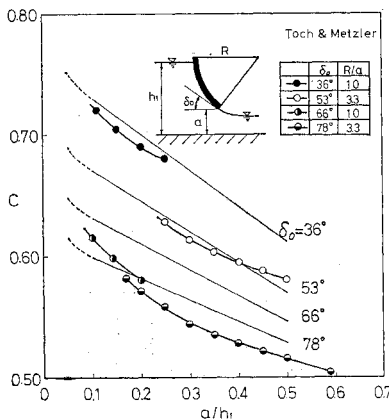


図-39 テンターゲートの流量係数 (Toch & Metzler)

図-40 は、飯野川可動せきの模型実験に使用された水門形状である (模型縮尺 1/10)¹⁷⁾。I-1 および I-3 は A 型水門とみなすことができる。また、I-2 は、図-1 に示された Type-III の水門であり、形状的には A 型水門にモデル化される。したがって、これらの流量係数は、傾斜水門をモデルとして推定することができよう。

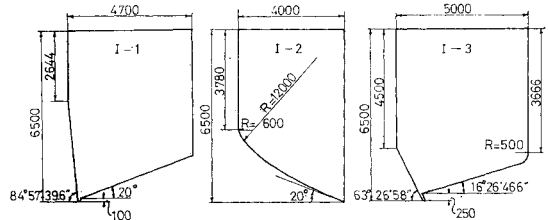


図-40 飯野川可動せきの模型実験に用いられた水門形状と実物寸法 (単位: mm)

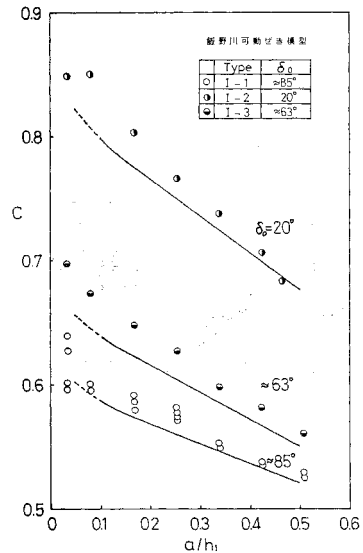


図-41 流量係数 (飯野川可動せき)

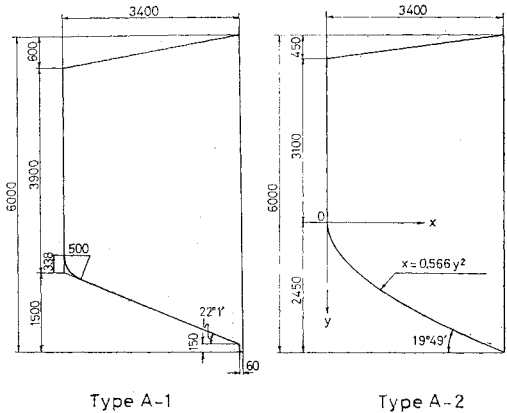


図-42 芦田川河口せき模型実験に用いられた水門形状と実物寸法 (単位: mm)

表-7 実用水門に対する C_E/C_{cal} の平均値

水 門 形 状	I-1	I-2	I-3	A-1	A-2
C_E/C_{cal} の平均値	0.963	0.968	0.969	0.999	0.958

図-41 は、これらの水門の流量係数の実験結果を、それぞれの流出端傾斜角にひとしい底面傾斜角を有する傾斜水門の流量係数と比較したものである。模型実験結果は、全体に若干大きな値を与えているが、ほぼ傾斜水門の値によって近似できるとみなせよう。

(b) もぐり流出の場合

前述の飯野川可動せきおよび 図-42 に示される芦田川河口せき(模型縮尺 1/15)のもぐり流出に対する実験結果¹⁸⁾を、5. で述べたのと同様の手法で整理した結果が、表-7 に示されている。芦田川の A-1 型は鉛直リップを有しているため、計算値は B 型水門とみなして算出された。5. で述べたように、傾斜水門に対する C_E/C_{cal} の平均値は 0.956 であり、また、B 型水門については 0.960 であったことを考慮すると、ここに示された各水門の流量係数が傾斜水門あるいは B 型水門の値によってよく説明されているといえよう。

7. 結 言

本研究では、各種底流型水門の合理的な水理設計法を確立するための基礎として、流量係数に及ぼす水門形状の影響を明らかにし、その結果にもとづいて実用水門の流量係数の推定法について検討した。すなわち、

まず、各種底流型水門の形状を分類し、これらの水門を構成する主要な形状要素として、流出端傾斜角、水門の厚さおよび鉛直リップの長さを取り上げ、これらの形状要素によって構成される 3 種のモデル水門の設定を行った。

次に、これらのモデル水門の流量係数を理論的かつ実験的に検討し、それぞれの形状要素の流量係数に及ぼす影響を明らかにした。その結果、水門の厚さが開き高と同程度以上になると、その流量係数は傾斜水門のそれとほぼ一致することが示された。また、鉛直リップの長さはわずかであっても流量係数に著しい影響を及ぼすことが示された。

このような結果にもとづき、実用水門の流量係数を推定する手法として、傾斜水門および鉛直リップを有する傾斜水門の 2 種をモデルとする方法を提案し、基礎実験および模型実験の結果によって検討した結果、特殊な形状の場合を除いてこのような手法がほぼ妥当であることが示された。

このように、本研究によって、従来より未解明であった、水門の厚さや鉛直リップの流量係数に及ぼす影響が

明らかにされるとともに、実用水門の流量係数の推定法が示され、各種水門の水理設計における有用な基礎的技術資料が提示されたものと考えられる。

本研究を遂行するにあたっては、京都大学の岩佐義朗教授より、終始、懇篤なる御指導を賜った。また、京都大学の石原藤次郎名誉教授ならびに広島大学の金丸昭治教授からは励ましと多くの御助言を賜った。実験および資料整理にあたっては、広島大学学生 桐原圭司君(現・五洋建設(株))ならびに楠喜税君(現・日本道路公団)の御協力を得た。ここに記して深甚の謝意を表す次第である。

参 考 文 献

- 1) Koch, A. und Carstenjen, M. : Von der Bewegung des Wassers und den dabei auftretenden Kräften, Springer, Berlin, 1926.
- 2) Horton, R.E. : Discharge Coefficients for Tainter Gates, Eng. News-Record, Jan. 4, 1934.
- 3) Knapp, F.H. : Ausfluss, Überfall, und Druchfluss im Wasserbau, G. Braun, Karlsruhe, 1960, S.423.
- 4) Gentilini, B. : Efflusso dalle luci soggiacenti alle paratoie inclinate e a settore, L'Energia Elettrica, Giugno, 1941.
- 5) Marchi, E. : Sui fenomeni di efflusso piano da luci a battente, Annali di Matematica Pura ed Applicata, 35, 1953.
- 6) 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, No. 264, 昭和 52 年 8 月.
- 7) 名合宏之 : 水平開水路に設置された鉛直刃形水門からのもぐり流出の水理特性, 広島大学工学部研究報告, 第 22 卷, 第 2 冊, 昭和 49 年 3 月.
- 8) v. Mises, R. : Berechnung von Ausfluss- und Überfallzallen, V.D.I., 20 Mai, 2 Juni, 9 Juni, 1917.
- 9) Fangmeier, D.D. and Strelkoff, T.S. : Solution for Gravity Flow under a Sluice Gate, Jour. EM-Div., Proc. ASCE., Feb., 1968.
- 10) Jaeger, C. : Engineering Fluid Mechanics, Blackie & Son, London, Glasgow, 1961, p. 155.
- 11) Henry, H.R. : Discharge Characteristics of Sluice Gate, Proc. ASCE., Vol. 75, Dec. 1949.
- 12) Milne-Thomson, L.M. : Theoretical Hydrodynamics, 5th Edi. MacMillan, London, 1968, p. 338.
- 13) Larock, B.E. : Jets from Two-Dimensional Symmetric Nozzles of Arbitrary Shape, Jour. Fluid Mechanics, Vol. 37, Part 3, July, 1969.
- 14) 名合宏之 : 傾斜底水門の縮流係数の理論解, 広島大学工学部研究報告, 第 19 卷, 第 1 冊, 昭和 45 年 10 月.
- 15) 名合宏之 : 傾斜水門の縮流係数に及ぼす鉛直リップの影響に関する理論的考察, 広島大学工学部研究報告, 第 22 卷, 第 1 冊, 昭和 48 年 11 月.
- 16) Toch, A. : Discharge Characteristics for Tainter Gates, Proc. ASCE, Vol. 79, 1953.
- 17) 建設技術研究所 : 飯野川可動堰ゲート水理模型実験報告書, 昭和 43 年 3 月.
- 18) 建設技術研究所 : 芦田川河口堰水理模型実験報告書, 昭和 45 年 2 月.

(1977.1.22・受付)