

シェル構造ゲートに作用する流体力 特性に関する基礎的研究

BASIC INVESTIGATION ON THE HYDRODYNAMIC FORCE ACTING ON SHELL-TYPE GATES

名 合 宏 之*
By Hiroshi NAGŌ

1. 緒 言

シェル構造ゲートは長径間の可動せきとして近年数多く使用されてきているが、その水理特性についてはなお未解明な点が多い。本研究は、この種のゲートに作用する流体力の特性について検討し、構造設計上の基礎的資料を得ようとするものである。

ゲートに作用する流体力の特性は、ゲートの形状および対象とする水理条件によって著しく異なる。したがって、流体力特性に関する研究は、個々のゲート形状あるいは特殊な水理条件を対象として行われてきた^{1)~4)}。シェル構造ゲートについては、形状が平板上のゲートに比べてかなり複雑であること、また、比較的最近になって使用されはじめたことなどもあって、その水理解析法は確立されておらず、流体力に関する資料は十分得られていない。このため、設計にあたっては、個々の形状について水理模型実験を行わざるをえないのが現状である。

本研究では、各種のシェル構造ゲートに作用する流体力の特性を水理学的に解明していく研究の第一歩として、ゲート形状をその主要な形状要素によってモデル化し、底流状態におけるモデル水門に作用する平均流体力の特性を理論的かつ実験的に検討し、各形状要素の流体力に及ぼす影響を明らかにする。

2. 対象とするゲート形状とそのモデル化

シェル構造ゲートは、傾斜底面と流出断面との位置関係によって、図-1 に示されるような3種の形状に分類される。すなわち、I型は、流出断面より上流側に傾斜底面を有する形状、II型は下流側に、III型は両側に有する形状である。II型あるいはIII型の流出断面より下流側に作用する圧力は、自由流出時には大気圧に等しく、も

ぐり流出時には、ゲート面に沿う流速が小さいため、下流水深による静水圧によってほぼ近似できるであろう⁵⁾。また、II型の上流面に作用する流体力は平板水門に作用するものと同様であり、その特性はほぼ明らかにされている⁶⁾。したがって、シェル構造ゲートの流体力に関して水理学的に問題になるのは、I型およびIII型の流出断面より上流部の流体力特性である。ところが、III型の流出断面より上流部の形状は、I型によって代表される。これらの点を考慮して、本研究ではI型の形状を対象としてその流体力特性について検討する。

I型ゲートは、鉛直上流面および傾斜底面によって基本的な構造が決定されるが、しばしば、流出端に図に示されるような鉛直リップが付加されることがある。底面形状としては、平板状のものあるいは曲面状のものが用いられる。また、平板状の底面の場合には、鉛直上流面との交点に、流線のはく離を防止するために丸みが施されることが多い。このようなゲートに作用する流体力特性を解明するに際して、すべての形状要素を考慮した一般的な取り扱いはいきわめて困難である。そこで、本研究では、ゲートを構成する代表的な形状要素によって、ゲート形状をより単純な形状にモデル化し、そのモデルゲートに作用する流体力の特性を明らかにすることにより、実際のシェル構造ゲートの基本的な流体力特性に関する資料を得ることとする。

上述のように、I型ゲートの基本構造は、鉛直リップがない場合には、底面の傾斜角 δ およびゲートの厚さ d によって決定される。また、鉛直リップが付加される

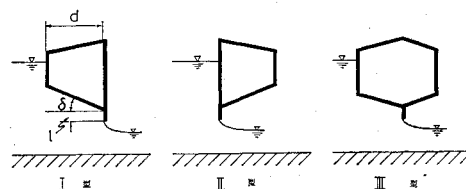


図-1 シェル構造ゲートの形状

* 正会員 岡山大学助教授 工学部土木工学科

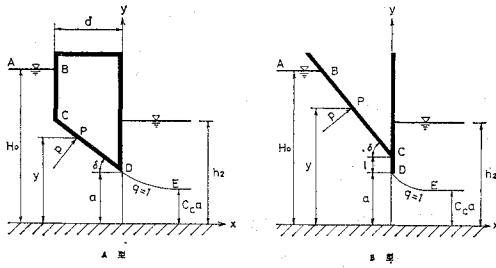


図-2 モデルゲート

場合には、それが流出端に存在することから、その長さ l は、流況に、したがってまた流体力に著しく影響することが予想される。これらの点を考慮して、本研究では、I型ゲートを図-2に示されるようなA型およびB型ゲートにモデル化する。底面形状としてはこのほかに曲面状のものもあるが、シェル構造ゲートでは、その曲率が小さいものも多く、その流体力特性は、図に示されるような平板状のものに対して得られる結果によってほぼ近似することができよう。

3. ポテンシャル理論による解析

(1) 基礎的考察

ゲートに作用する流体力の解析法としては、古くより、鉛直刃形水門を対象とした、Kulkaの方法⁵⁾、およびその修正法であるKnappの方法⁷⁾があり、また、本研究で対象とするA型ゲートの底面に作用する圧力を取り扱った、KochとCarstenjenの方法¹⁾などがある。これらの手法は、いずれも、ゲート面上の流速分布に対してかなり大胆な仮定を設けた解析法であるが、用いられた仮定の妥当性および解析結果の適用性が明確でなく、現在あまり用いられていないようである。一方、ゲートからの流出問題の解析に2次元ポテンシャル理論を用いる手法が導入され、流体力の特性がこの理論によってよく説明されることが示されて以来、現在では、多くの場合この手法を用いた解析がなされている²⁾。本研究でも、モデルゲートに作用する流体力の特性をこの手法を用いて検討するが、ここでは、理論の適用にあたっての二、三の問題点について考察しておく。

まず、下流自由表面上の速度変化の取り扱い、すなわち、いわゆる重力の影響の取り扱いであるが、著者はさきに、自由流出時の縮流係数の量的評価にあたっては、この影響を無視しえないことを示した³⁾。ここでは、流体力に対する重力の影響について検討してみよう。図-3は、鉛直刃形水門の圧力分布を示したものであり、また、図-4はその全圧力を示したものである。これらの図中には、ポテンシャル理論によるMüller⁹⁾および

Pajer¹⁰⁾の理論曲線が、上述のKulkaおよびKnappの理論曲線、および著者が行った実験結果とともに示されている。Müllerの曲線は重力の影響を無視したものであり、Pajerの曲線はそれを考慮したものである。圧力分布については両者の差はほとんど認められず、いずれも実験値とよく一致している。また、全圧力については、重力の影響を考慮した解は、それを無視した解に比べて若干小さな値を与えるが、実用上ほとんど差がないとみなせよう。このように、流体力がほぼ等しい値を与えるのは、ゲート下端の流速に対するゲート面上の流速

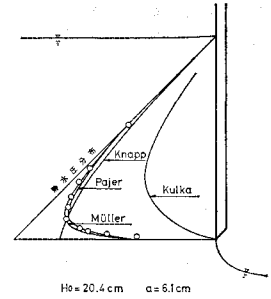


図-3 鉛直刃形水門の圧力分布

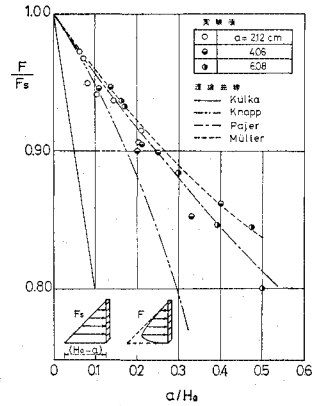


図-4 鉛直刃形水門の全圧力

の比が、いずれの取り扱い法でもほぼ等しくなることを意味している。なお、これらの図から、ポテンシャル理論による解は、KulkaやKnappの解に比べて、よりよい適用性を示すことがわかる。

次にもぐり流出時の取り扱いであるが、もぐり流出時には、流出噴流は周囲の流体と混合するため、噴流部の局所的な現象の説明には、ポテンシャル理論の適用は妥当でない。しかし、もぐり流出時の流出流量を取り扱うに際しては、縮流断面より上流側の流れを、自由流線の存在するポテンシャル流と仮定した解析法がある程度妥当な結果を与える¹¹⁾。このことは、流出端より上流部の流体力を取り扱う現問題に対しても、近似的に同様な手法の適用が可能と考えられる。

上述のモデルゲートに対する解析を行うにあたっては、いま一つ、スキンプレートに沿う流線のはく離現象の取り扱いが問題となる。特にA型ゲートの場合、底面傾斜角が小さく、ゲートの厚さが薄い場合には、凸角部(C点)近傍に、はく離領域の発生が予想され、このような場合にははく離領域を考慮した取り扱いが必要である。しかし、その実際的な解析はきわめて困難である。一方、実際のゲートにおいては、前述のように、凸角部に丸みをつけるなどして、流線のはく離を防止する工夫

がなされることが多い。このような場合には、むしろ、連続流を仮定した取り扱いが、凸角部のごく近傍を除いて、よりよい近似解を与えると考えられる。

(2) 解析方法

a) 流体運動のモデル化

モデルゲートに作用する流体力を解析するに際し、流体運動は、上述の考察結果を考慮し、次のような仮定を用いてモデル化される。

- i) 流れは2次元ポテンシャル流で近似される。
- ii) 自由流出時には、下流側の自由表面上の流速は一定とみなされる。
- iii) もぐり流出時においても、図-2 に示されるような自由流線が存在するものとする。
- iv) ゲート面に沿う流線は連続しているものとする。
- v) ゲート上流側の水面は水平とし、ゲート前面の水深 H_0 によって表わされるものとする。
- vi) もぐり流出時の下流水面は、ゲート下流面における水深 h_2 によって表わされ、水面と自由流線との間の圧力分布は静水圧的とみなされる。

b) 圧力分布

流体運動に対する上述の仮定を用いると、図-2 に示されるゲート面上の圧力分布は以下のように解析される。

流出端 D における流速に対するゲート面上の点 P の流速の比を q とすると、点 B 、点 P および点 D の間にベルヌーイの式を適用することにより、点 P の圧力 p は次式で表わされる。

$$\frac{p}{\rho g a} = (1 - q^2) \frac{(H_0 - h_2)}{a} - \frac{y - h_2}{a} \dots\dots(1)$$

ここに、 a はゲートの開き高、 y は水路底面より測った点 P までの距離、 ρ は流体密度、 g は重力加速度である。この式において、 $h_2 = a$ とおけば自由流出に対する状態を表わす。この式より、 H_0 および h_2 が与えられた場合、 y に対する q の値がわかれば、点 P の圧力が求まる。ゲート面上の流速 q は、等角写像の手法を用いて求められるが、その解析法の詳細については、すでに報告^{12), 13)} しているのので、ここではその概要を示すにとどめておこう。

まず、図-2 に示される流れの平面を z 平面 ($z = x + iy$) 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-5 のように表わされる。

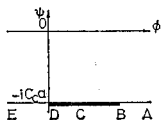


図-5 w 平面

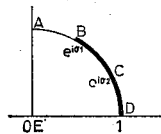


図-6 z 平面

ここに、 ϕ は速度ポテンシャル、 ψ は流れ関数である。この w 平面は、図-6 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。

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

ここに、 C_c は縮流係数である。

次に、次式で定義される関数 ω を導入する。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dw}{dz} &= -e^{-i\omega} \\ \omega &= \theta + i\tau \end{aligned} \right\} \dots\dots(3)$$

ここで、 q_* を合速度の大きさ、 u および v をそれぞれ速度の x および y 方向成分とすれば、 θ および τ との間に次の関係が成立する。

$$q_* = e^\tau, \quad \frac{u + iv}{q_*} = e^{i\theta} \dots\dots(4)$$

このようにして導入された関数 ω は、 ζ 平面の四分円内で次のように定義される。

$$e^{i\omega(\zeta)} = \prod_{j=2}^3 \left\{ \left(\frac{1 - \zeta e^{i\sigma_{j-1}}}{1 + \zeta e^{i\sigma_{j-1}}} \right) \left(\frac{e^{i\sigma_{j-1} + \zeta}}{e^{i\sigma_{j-1} - \zeta}} \right) \right\}^{(\delta_j - \delta_{j-1})/\pi} \dots\dots(5)$$

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 の偏角を示している。 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 部分の水平となす角を示している (A 型ゲートでは、 $\delta_2 = \pi/2$ 、 $\delta_3 = \delta$ 、B 型ゲートでは、 $\delta_2 = \delta$ 、 $\delta_3 = \pi/2$)。

現問題では、ゲート面上を対象としているから、 $\zeta = e^{i\sigma}$ とおくことにより、式 (5) は、

$$e^{i\omega(\sigma)} = \prod_{j=2}^3 \left(-\frac{\sin \sigma_{j-1} + \sin \sigma}{\sin \sigma_{j-1} - \sin \sigma} \right)^{(\delta_j - \delta_{j-1})/\pi} \dots\dots(6)$$

と表わされる。また、境界面上の座標は、

$$z = -\frac{2C_c a}{\pi} \int_{j=2}^3 \left(-\frac{\sin \sigma_{j-1} + \sin \sigma}{\sin \sigma_{j-1} - \sin \sigma} \right)^{(\delta_j - \delta_{j-1})/\pi} \cdot \tan \sigma d\sigma + C_0 \dots\dots(7)$$

ここに、 C_0 は積分定数である。

σ_1 、 σ_2 および C_c は、 δ 、 d/a (あるいは l/a) および a/H_0 を与えると一義的に決定されるので、これらの量をあらかじめ計算しておき、適当な σ を与えることにより、式 (6) および式 (7) を用いて、 q および y を計算することができる。なお、式 (6) および式 (7) において、 $\sigma_1 = \sigma_2$ とした場合は傾斜水門に対する表示式を与える。

以上の結果を用いて、A 型および B 型ゲートに対して、 y および q を具体的に表示すると以下のようである。

A 型ゲート:

- i) 点 P が境界面 BC 上にある場合 ($\sigma_2 < \sigma < \sigma_1$)

$$\frac{y}{a} = 1 + \frac{d}{a} \tan \delta + \frac{2C_c}{\pi} \int_{\sigma_2}^{\sigma} \left(\frac{\sin \sigma_1 + \sin \sigma}{\sin \sigma_1 - \sin \sigma} \right)^{1/2}$$

$$\begin{aligned} & \cdot \left(\frac{\sin \sigma - \sin \sigma_2}{\sin \sigma + \sin \sigma_2} \right)^{(1/2-\delta/\pi)} \tan \sigma d\sigma \dots\dots (8) \\ q = & \left(\frac{\sin \sigma_1 - \sin \sigma}{\sin \sigma_1 + \sin \sigma} \right)^{1/2} \left(\frac{\sin \sigma + \sin \sigma_2}{\sin \sigma - \sin \sigma_2} \right)^{(1/2-\delta/\pi)} \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

ii) 点 P が境界面 CD 上にある場合 (0 < σ < σ₂)

$$\begin{aligned} \frac{y}{a} = & 1 + \frac{2C_c}{\pi} \sin \delta \int_0^\sigma \left(\frac{\sin \sigma_1 + \sin \sigma}{\sin \sigma_1 - \sin \sigma} \right)^{1/2} \\ & \cdot \left(\frac{\sin \sigma_2 - \sin \sigma}{\sin \sigma_2 + \sin \sigma} \right)^{(1/2-\delta/\pi)} \tan \sigma d\sigma \dots\dots (10) \\ q = & \left(\frac{\sin \sigma_1 - \sin \sigma}{\sin \sigma_1 + \sin \sigma} \right)^{1/2} \left(\frac{\sin \sigma_2 + \sin \sigma}{\sin \sigma_2 - \sin \sigma} \right)^{(1/2-\delta/\pi)} \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

B型ゲート：

i) 点 P が境界面 BC 上にある場合 (σ₂ < σ < σ₁)

$$\begin{aligned} \frac{y}{a} = & 1 + \frac{l}{a} + \frac{2C_c}{\pi} \sin \delta \int_{\sigma_2}^\sigma \left(\frac{\sin \sigma_1 + \sin \sigma}{\sin \sigma_1 - \sin \sigma} \right)^{\delta/\pi} \\ & \cdot \left(\frac{\sin \sigma + \sin \sigma_2}{\sin \sigma - \sin \sigma_2} \right)^{(1/2-\delta/\pi)} \tan \sigma d\sigma \dots\dots (12) \\ q = & \left(\frac{\sin \sigma_1 - \sin \sigma}{\sin \sigma_1 + \sin \sigma} \right)^{\delta/\pi} \left(\frac{\sin \sigma - \sin \sigma_2}{\sin \sigma + \sin \sigma_2} \right)^{(1/2-\delta/\pi)} \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

ii) 点 P が境界面 CD 上にある場合 (0 < σ < σ₂)

$$\begin{aligned} \frac{y}{a} = & 1 + \frac{2C_c}{\pi} \int_0^\sigma \left(\frac{\sin \sigma_1 + \sin \sigma}{\sin \sigma_1 - \sin \sigma} \right)^{\delta/\pi} \\ & \cdot \left(\frac{\sin \sigma_2 + \sin \sigma}{\sin \sigma_2 - \sin \sigma} \right)^{(1/2-\delta/\pi)} \tan \sigma d\sigma \dots\dots (14) \\ q = & \left(\frac{\sin \sigma_1 - \sin \sigma}{\sin \sigma_1 + \sin \sigma} \right)^{\delta/\pi} \left(\frac{\sin \sigma_2 - \sin \sigma}{\sin \sigma_2 + \sin \sigma} \right)^{(1/2-\delta/\pi)} \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

c) 全圧力

ゲート面に作用する全圧力 F は、上で求めた各点の圧力 p を、ゲート面に沿って積分することによって得られる。それぞれのゲートの BC 部分および CD 部分について具体的に示すと以下のようである。

i) A型ゲート

BC 部分：

点 C を原点とし、鉛直面に沿って点 B の方向に座標 t をとると、BC 部分の全圧力は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \frac{F}{\rho g a^2} = & \frac{1}{2} \left(\frac{H_0 - a - d \tan \delta}{a} \right)^2 \\ & - \frac{H_0 - h_2}{a} \int_0^{t_1/a} q^2 d \left(\frac{t}{a} \right) \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

ここに、t₁ は t 座標における点 B の値である。t を式(8)を用いて σ に変換し、さらに式(9)を用いると、上式は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \frac{F}{\rho g a^2} = & \frac{1}{2} \left(\frac{H_0 - a - d \tan \delta}{a} \right)^2 \\ & - \frac{H_0 - h_2}{a} \cdot \frac{2C_c}{\pi} \int_{\sigma_2}^{\sigma_1} \left(\frac{\sin \sigma_1 - \sin \sigma}{\sin \sigma_1 + \sin \sigma} \right)^{1/2} \end{aligned}$$

$$\cdot \left(\frac{\sin \sigma + \sin \sigma_2}{\sin \sigma - \sin \sigma_2} \right)^{(1/2-\delta/\pi)} \tan \sigma d\sigma \dots\dots (17)$$

以下同様の手法により、

CD 部分：

$$\begin{aligned} \frac{F}{\rho g a^2} = & \frac{d}{a \cos \delta} \left(\frac{H_0 - a - \frac{1}{2} d \tan \delta}{a} \right) \\ & - \frac{H_0 - h_2}{a} \cdot \frac{2C_c}{\pi} \int_0^{\sigma_2} \left(\frac{\sin \sigma_1 - \sin \sigma}{\sin \sigma_1 + \sin \sigma} \right)^{1/2} \\ & \cdot \left(\frac{\sin \sigma_2 + \sin \sigma}{\sin \sigma_2 - \sin \sigma} \right)^{(1/2-\delta/\pi)} \tan \sigma d\sigma \dots\dots (18) \end{aligned}$$

ii) B型ゲート

BC 部分：

$$\begin{aligned} \frac{F}{\rho g a^2} = & \frac{1}{2} \left(\frac{H_0 - a - l}{a} \right)^2 \frac{1}{\sin \delta} \\ & - \frac{H_0 - h_2}{a} \cdot \frac{2C_c}{\pi} \int_{\sigma_2}^{\sigma_1} \left(\frac{\sin \sigma_1 - \sin \sigma}{\sin \sigma_1 + \sin \sigma} \right)^{\delta/\pi} \\ & \cdot \left(\frac{\sin \sigma - \sin \sigma_2}{\sin \sigma + \sin \sigma_2} \right)^{(1/2-\delta/\pi)} \tan \sigma d\sigma \dots\dots (19) \end{aligned}$$

CD 部分：

$$\begin{aligned} \frac{F}{\rho g a^2} = & \left\{ \left(\frac{H_0 - a}{a} \right) \frac{l}{2} - \frac{1}{2} \left(\frac{l}{a} \right)^2 \right\} \\ & - \frac{H_0 - h_2}{a} \cdot \frac{2C_c}{\pi} \int_0^{\sigma_2} \left(\frac{\sin \sigma_1 - \sin \sigma}{\sin \sigma_1 + \sin \sigma} \right)^{\delta/\pi} \\ & \cdot \left(\frac{\sin \sigma_2 - \sin \sigma}{\sin \sigma_2 + \sin \sigma} \right)^{(1/2-\delta/\pi)} \tan \sigma d\sigma \dots\dots (20) \end{aligned}$$

全圧力を表わすこれらの式中、右辺の第1項目は上流側水深によるそれぞれの部分での静水圧 (F_s/ρga²) を示し、第2項目は流れによる影響量を示している。

4. 実験結果とその考察

(1) 実験装置および実験方法

実験は幅 40 cm、深さ 60 cm、長さ 10 m の水平水路で行われた。A 型および B 型ゲートの底面傾斜角 δ としては、30°、45° および 60° が採用されている。A 型ゲートの d/a としては、1.0、2.0 および 4.0 が、また、B 型ゲートの l/a としては、0.1 から 0.76 の間の数種の値が用いられている。ゲートの開き高は 6.0 cm に設定された。

圧力の測定は、ゲート面に内径 2 mm、外径 4 mm の銅パイプを取り付け、ビニールチューブを通してマンメーターに接続し、水柱の高さを読みとる方法による。

(2) 圧力分布

a) A型ゲート

図-7 から 図-10 までは、種々の条件の変化に対する A 型ゲートの圧力分布特性を示したものである。

図-7 は、自由流出の場合で、底面傾斜角による底面

圧力分布の変化を示している。 δ が 45° および 60° の場合は、実験値はポテンシャル理論による解とよく一致している。しかし、 δ が 30° の場合は、実験値は理論曲線とまったく異なった特性を示している。これは、底面における流況が、理論解析で仮定された流況と異なるた

めに生じた結果と考えられるが、後述の実験結果をも考慮すると、この場合には底面にはく離領域が形成されていると推定される。なお、この図に示されている破線は、Koch と Carstenjen によって提案された解析法を用いて得た理論圧力分布であるが、これは流出端の条件 ($p=0$) を満足せず、また、底面上流端では、実験値に比べかなり大きな値を示すことがわかる。

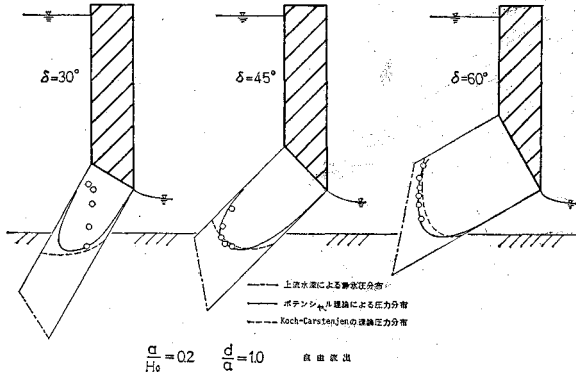


図-7 A型ゲート圧力分布 (δ による変化)

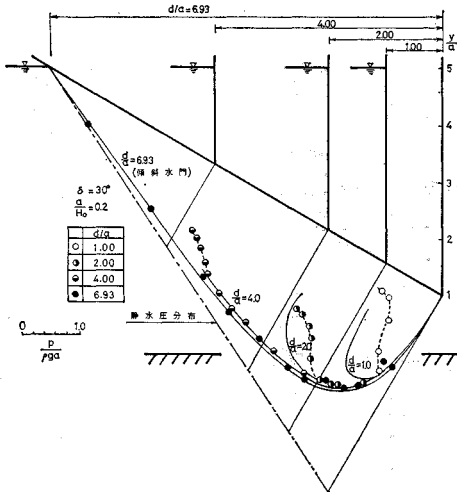


図-8 A型ゲート圧力分布 (d による変化)

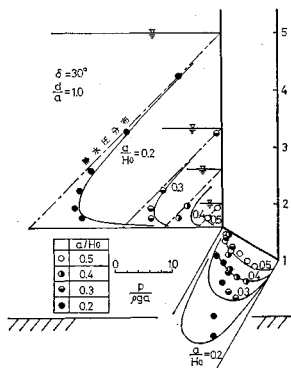


図-9 A型ゲート圧力分布 (上流水深による変化)

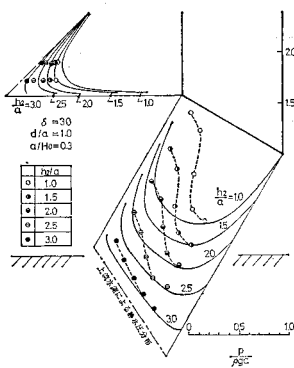


図-10 A型ゲート圧力分布 (下流水深による変化)

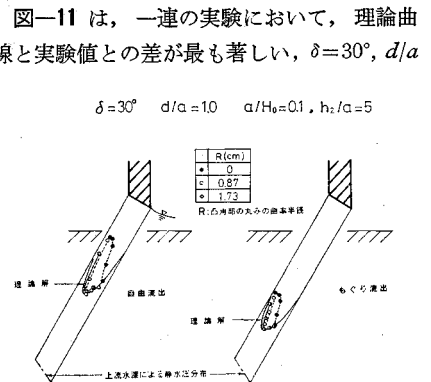


図-11 A型ゲートの圧力分布 (凸角部に丸みをつけた場合)

図-8 は、ゲートの厚さによる底面圧力分布の変化を示している。この図では、ゲートの厚さが厚くなるにつれて、理論圧力分布と異なる特性を示す領域が、凸角部近傍に限られるようになり、全体的には、実験値は理論曲線に一致していく傾向がみられる。また、その値は、同じ底面傾斜角を有する傾斜水門の値に近いっていくことがわかる。

図-9 は、上流水深による圧力分布の変化を示している。この図によると、ゲート上流面においては、実験値は理論曲線とかなりよく一致しているが、ゲート底面、特に上流面との交点近傍においては、上流水深が大きくなるにつれて両者の差が大きくなることわ

る。図-10 は、下流水深による圧力分布の変化を示している。この図では、下流水深が大きくなるにつれて、実験値は理論曲線に一致する傾向を示している。

以上の結果から、A型ゲートの底面圧力分布に対する理論解の適合性は、底面上流端近傍における流速の大きさおよび底面傾斜角に依存しているようである。すなわち、この点近傍の流速が小さい場合および傾斜角が大きい場合には、理論解は現象をよく説明するが、流速が大きくなるにつれて、また、傾斜角が小さくなるにつれて、理論解の適合性は悪くなる。その原因は、理論解を求めるに際して設定された、連続流の仮定がA型ゲートの凸角部近傍で成立していないことにあると考えてよいであろう。すなわち、上述のように、ゲート底面にはく離領域が形成されることが原因と考えられる。

=1.0, $a/H_0=0.1$ の場合について、凸角部に丸みをつけた場合の実験値を示したものである。この図より、丸みをつけると、実験値は理論曲線に一致する傾向がみられる。このことは、丸みをつけることにより、流線ははく離が起こりにくくなり、底面近傍の流れが連続流の形態に近づいたことを示していると考えられ、上述の推定の妥当性を裏づけているものと判断される。

前述の Koch と Carstenjen の理論曲線は、凸角部において流れが連続していると仮定した場合の解であるが、彼らはこの点において流れははく離した場合についても底面圧力分布の計算法を示している。その方法では、まず、はく離領域の大きさを仮定しなければならないが、いま、その方法を 図-11 に示された条件の場合に適用すると、凸角部ではく離した流線は、ふたたび底面に接することなく下流へ流れ去ってしまう。このことは、彼らのモデルを一般的に使用することができないことを示している。図-12 は、 $\delta=30^\circ$, $d/a=2.0$, $a/H_0=0.2$ の場合の実験値を、Koch らの方法によるはく離領域の存在を仮定した場合の理論曲線と比較したものであるが、この図においても、理論曲線は実験値の特性を説明するものでないことがわかる。

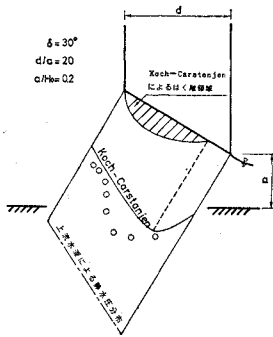


図-12 はく離を伴う場合の底面圧力分布

以上、A型ゲートの圧力分布特性は、ゲート底面に形成されるはく離領域の影響によって著しく変化することが示された。はく離領域が存在する場合の圧力分布の特性は、いまだ十分解明しえないが、はく離領域の影響が小さく、流線が連続流の形態に近いとみなされる場合には、その圧力分布は、本研究で得た理論解によって十分説明されるといえよう。

b) B型ゲート

図-13 および 図-14 には、それぞれ自由流出時およびもぐり流出時の傾斜部 (BC 部) の圧力分布、また、図-15 および 図-16 には同様に鉛直リップ部の圧力分布の数例が示されている。これらの図に示された理論圧力分布曲線より、B型ゲートの圧力分布特性は次のように説明される。まず、傾斜部における静水圧からの減少量は、水面から水門板に沿って流速の増加について徐々に増大し、鉛直リップとの交点近傍で最大となる。しかし、交点においては流速が0となるため、圧力は静水圧に戻る。次に、鉛直リップ部では、交点における静水圧より、リップ下端での下流水深による静水圧まで急激に

減少する。図に示された実験値はいずれの場合も理論曲線とよく一致しており、B型ゲートの圧力分布は理論曲線によって十分近似されるとみなしてよい。

(3) 全圧力

ここでは、モデルゲートに作用する全圧力のうち、こ

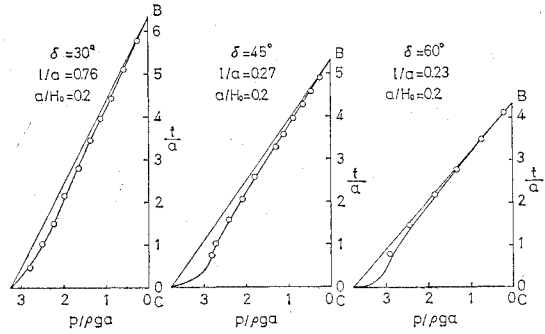


図-13 B型ゲートの圧力分布 (傾斜部, 自由流出)

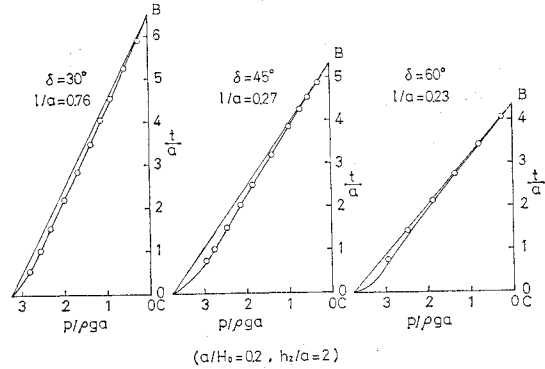


図-14 B型ゲート圧力分布 (傾斜部, もぐり流出)

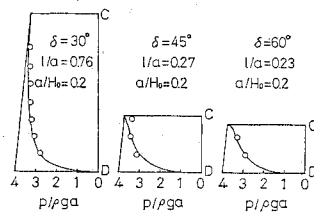


図-15 B型ゲートの圧力分布 (鉛直リップ部, 自由流出)

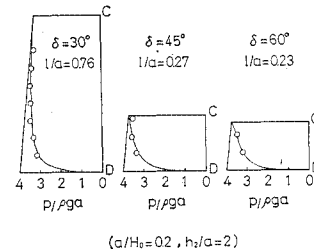


図-16 B型ゲートの圧力分布 (鉛直リップ部, もぐり流出)

の種のゲートの設計上特に問題となる、ダウンプルあるいは揚圧力に關係する、ゲート底面に作用する全圧力について検討する。なお、流出状態としては、ゲートに作用する圧力と静水圧との差が最も大きくなる、自由流出の状態を対象とする。

a) A型ゲート

図-17, 18 および 19 は、それぞれ d/a が 1.0, 2.0 および 4.0 の場合の A 型ゲート底面に作用する全圧力を示したものである。これらの図において、実線は式(18)による理論曲線を示し、1 点鎖線は上流水深が浅くなって傾斜水門の状態になる限界を示している。これらの図より、全圧力の特性として、 d/a が小さくなるにつれて静水圧に対する全圧力の比は小さくなるのがわかる。また、実験値は理論値よりも全体に小さな値を示しているが、 d/a が大きくなるにつれ、また δ が大きくなるにつれ両者は一致する傾向を示す。 d/a が小さく、また δ が小さい場合に、実験値が理論曲線から大きな差を示すのは、圧力分布においてみられたのと同様の傾向であり、底面のはく離領域の影響とみなされる。したがって、凸角部に丸みをつけるなどして、はく離領域の発生を防止する工夫がなされれば、底面に作用する

全圧力は理論値によってほぼ近似できるであろう。

b) B型ゲート

図-20, 21 および 22 は、それぞれ δ が 30° , 45° および 60° の場合の B 型ゲートの傾斜部分の全圧力を示したものである。圧力分布の積分値として求めた全圧力の実験値は、いずれの場合も理論曲線とほぼ一致しているときみなされる。これらの図より、B 型ゲートの全圧力の特性として、わずかな長さの鉛直リップを付加することにより、静水圧に対する全圧力の比は、傾斜水門の値より急激に大きくなり、その増加量は傾斜角が小さいほど大きいことがわかる。

5. 結 言

本研究では、シェル構造ゲートに作用する流体力の特性を解明するための基礎として、ゲート形状を 2 種の形状にモデル化し、それぞれに作用する圧力および全圧力の特性を理論的かつ実験的に検討した。その結果、以下に示されるような事項が明らかにされた。

(1) 基本構造が傾斜底面と鉛直上流面で構成されるモデルゲート (A 型ゲート) では、底面上流端近傍に著

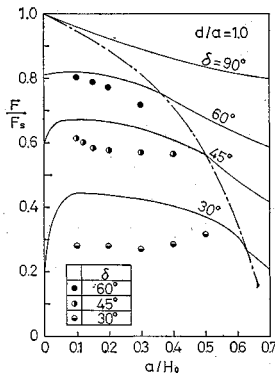


図-17 A型ゲート底面全圧力 ($d/a=1.0$)

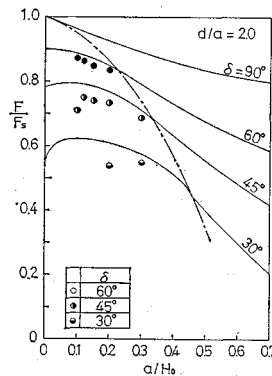


図-18 A型ゲート底面全圧力 ($d/a=2.0$)

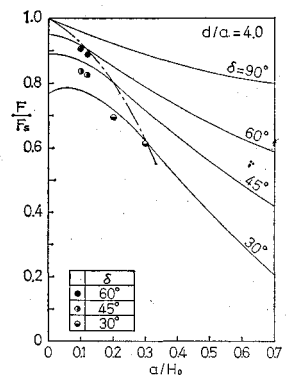


図-19 A型ゲート底面全圧力 ($d/a=4.0$)

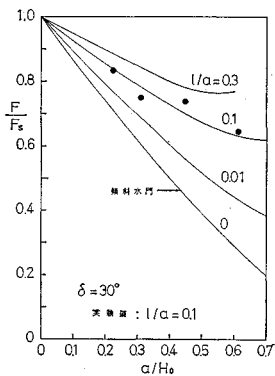


図-20 B型ゲート傾斜部全圧力 ($\delta=30^\circ$)

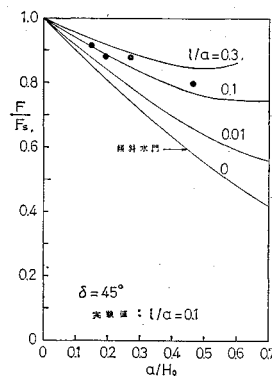


図-21 B型ゲート傾斜部全圧力 ($\delta=45^\circ$)

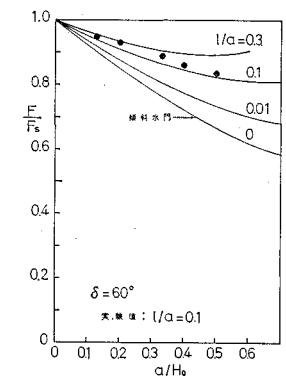


図-22 B型ゲート傾斜部全圧力 ($\delta=60^\circ$)

しいはく離現象が生起する場合があるが、そのような場合を除くと、圧力分布および全圧力は、連続流の仮定に基づいて得られるポテンシャル理論による解によってよく近似される。また、この解は、Koch らの解析法に比べて、圧力分布をよりの確に表現するものであることが示された。

(2) 底面上流端近傍に形成されるはく離領域は、底面傾斜角が小さく、また、底面上流端近傍の流速が大きくなる水理条件のもとで顕著に現われるが、このような場合でも、底面と上流面との交点に丸みをつけると、はく離領域が減少し、連続流の形態に移行する傾向がみられ、その圧力分布はある程度理論解によって近似することができる。

(3) 傾斜底面と鉛直リップによって構成されるモデルゲート(B型ゲート)については、圧力分布および全圧力ともに、ポテンシャル理論による解によってよく近似される。

(4) ゲート底面に作用する全圧力の静水圧に対する比は、ゲートの厚さが薄くなるにつれて減少し、また、わずかな長さの鉛直リップを付加することによって、傾斜水門に対する値より急激に増大する。これらの減少量あるいは増大量は底面傾斜角が小さくなるほど大きくなる傾向を示す。

以上、本研究によって、シェル構造ゲートに作用する流体力を推定するための水理学的な手法が示されるとともに、基本的な流体力特性が明らかにされ、この種のゲートの構造設計上の基礎的資料が提示されたものと考えられる。しかし、本研究で示された、ゲート底面におけるはく離現象は、流体力の変動特性に著しい影響を及ぼすが、その発生機構、水理学的取扱い法あるいは発生防止法などについては未解明な点が多く、今後さらに詳細に検討をすすめていく必要がある。

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ご指導を賜わった。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ご助言を賜わった。実験および資料整理にあたっては、広島大学大学院学生 桐原圭司君(現 五洋建設株式会社)ならびに楠 喜税君(現 日本道路公団)の協力を得た。ここに記して深甚の謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) Koch, A. und Carstenjen, M.: Von der Bewegung des Wassers und den dabei auftretenden Kräften, Springer, Berlin, 1926.
- 2) Rouse, H.: Engineering Hydraulics, John Wiley & Sons, New York, 1950.
- 3) たとえば, Gentilini, B.: Efflusso dalle luci soggiacenti alle paratoi e piane inclinate e a settore, L'Energia Elettrica, Giugno, 1941.
- 4) Homma, M., Senshu, S. & Tsuchiya, A.: A Study on Hydraulic Pressure Acting on a Sluice-Gate, 土木学会論文集, 第 36 号, 昭和 31 年 8 月.
- 5) 建設技術研究所: 飯野川可動せきゲート水理模型実験報告書, 昭和 43 年 3 月.
- 6) Kulka, H.: Der Eisenwasserbau, Berlin, 1928. (Hartung, F.: Kräftepiel und Gestaltungsmöglichkeiten bei Wehranlagen mit einteiligen Planschützen, Der Bauingenieur, Heft 6, Juni. 1954. より引用).
- 7) Knapp, F.H.: Ausfluss, Überfall und Druchfluss im Wasserbau, G. Braun, Karlsruhe, s. 1960, 164.
- 8) 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.
- 9) Müller, H.: Rechnerische Ermittlung der Strömungsvorgänge an scharfkantigen Planschützen, Wasserkraft und Wasserwirtschaft, Heft 24, Dec. 1935.
- 10) Pajer, G.: Über den Strömungsvorgang an einer unterströmten scharfkantigen Planschütze, ZAMM, Heft 5, 1937.
- 11) 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 巻, 第 2 冊, 昭和 49 年 3 月.
- 12) 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 巻, 第 1 冊, 昭和 45 年 10 月.
- 13) 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 巻, 第 1 冊, 昭和 48 年 11 月.

(1977.2.16・受付)