

実 験

越流型フラップゲートの流体力特性について

太田 勝¹⁾ 名合 宏之⁴⁾
川原 龍太郎²⁾ 前野 詩朗⁵⁾
中村 浩志³⁾

フラップ付親子ゲートの流体力特性を検討する第一段階として越流型フラップゲートの流体力特性を理論的かつ実験的に解析した。その結果、傾斜角度が 0° から 45° の範囲における圧力分布、全圧力および作用点位置の越流水深に対する変化特性、さらに管理水位一定の条件下で回転モーメントの傾斜角度に対する変化特性を定量的に明らかにすることができた。

はじめに

近年、河川における水資源の管理構造物としてのゲートは、経済性・安全性に対する工学的な要請を背景に長径間化、設置様式の多様化、操作条件・方式の複雑化が進展してきた。中でも越流型フラップを設けた親子ゲートは、構造・水理特性や操作条件等、その複雑さにおいて特筆されるべき内容がある。

越流型フラップゲートは起伏ゲート、転倒ゲートとも呼ばれ、ドイツから導入された型式で、堰柱・操作台が不要、軽量、縦横の比率を大きくとれる等種々の長所を備えているため農業用井堰を中心として多数設置されてきた。このゲートは下端部にヒンジを設け、回転させることにより開閉をおこなう構造で、上流水が制限水位を超えた場合ゲートを自動的に転倒させる保護装置を備えている。したがって上流水位一定の条件下でゲートの傾斜角を変化させて最大水圧荷重および作用点の位置をもとめるが、流速、下流水位等の影響を大きく受けるため単純に静水圧で近似することは不適當である。実際の流体力の解析的把握は困難であったため早くから水理模型実験がおこなわれ、ゲートの導入と時期を同じくして実験結果も紹介されている¹⁾。これまで設置されてきたこの種のゲートの多くは比較的規模が小さく、操作条件が類似していると考えられたためその構造設計に際しては既知の実験結果をそのまま適用する設計法が採用されることがほとんどであった。

近年、ゲートの大型化、操作条件の多様化にともない、水位・流量特性においても従来の実験結果の運用および経験的知識では解決し得ない問題が生じ、また、ある操作条件のもとで振動現象の発生する事例がしばしば報告されたため、水理模型実験によって個別に検討されるケースが増えてきた。その結果、前述の実験は特殊な事例で一般に適用できないことが明らかとなり、さらに河床に設置されたゲートに作用する荷重は上・下流面の水圧力および下流面に発生する渦によって支配されることも知られてきた²⁾。

本研究は、このような現状を踏まえてフラップ付親子ゲートの水理・構造特性を明らかにする研究の第一段階として、完全越流状態にある平板状越流型フラップゲートの上流面に作用する流体力の特性を理論及び実験によって解明し、従来からおこなわれてきた設計法の見直しを図ろうとするもので、その具体的内容は以下に示す通りである。

始めに、理論解析は、単純な境界条件のもとで二次元ポテンシャル理論を適用して圧力分布の第1近似解を求め、その定性的特性を把握する。

つぎに、ゲートの傾斜角および越流水深に関する広範な実験により圧力分布状態・全圧力および作用点位置の変化を観察して理論解の妥当性を検討するとともに、フラップゲートの構造設計上、最も重要となる回転モーメントの変化特性に焦点をあてて、従来の流体力設計法についても検討を加える。

1) 大阪工場水門機械部設計係長 4) 岡山大学工学部教授
2) 大阪工場水門機械部部長 5) 岡山大学工学部助手
3) 大阪工場副工場長

2. 理論解析法の概要

(1) 流出モデル

本研究では、水平床上に設置された平板状の越流型フラップゲートモデル(図-1)を対象として解析をおこなう。このようなゲートからの流出問題は他の流出構造物の場合と同様二次元ポテンシャル理論を用いた解析が近似的に可能だと考えられるが、越流水脈に対する重力の影響の評価が問題となる。すなわち、越流水脈は現実には図の破線に示される形状となるが、このような重力の影響を考慮した解析をすることは極めて難解である。この問題に関連して、名合は流出形態が上下逆転した形の底流型傾斜水門の解析を行っており、ゲート板上の圧力分布に関して流出水脈に作用する重力の影響は、ほとんど無視し得ることを示している³⁾。本研究においても、圧力分布の第一近似解を得ることを目的として、流出水脈に作用する重力の影響を無視できると仮定して二次元ポテンシャル理論を用いて理論解析を行う。この場合の流出水脈は図の実線に示される通り、水脈の上面は水平であり、下面は流速が一定で次第に水平に近づく流線として取り扱う。

(2) 解析法

前述の流出モデルに対して、ゲート板上の点Pに作用する圧力をpとすれば、次のような基礎方程式が得られる。

連続方程式

$$V_A h_1 = V_C C_c (h_1 - d) \dots\dots\dots (1)$$

エネルギー方程式

$$h_0 = h_1 + \frac{V_A^2}{2g} = y + \frac{p}{\rho g} + \frac{V_P^2}{2g}$$

$$= d + \frac{V_C^2}{2g} \dots\dots\dots (2)$$

- ここに、 h_0 : 断面Iにおける比エネルギー
- h_1 : 断面Iにおける水深
- V_A, V_C : 断面I及び縮流断面IIにおける平均流速
- V_P, p : ゲート板上の任意の点Pにおける流速および水圧

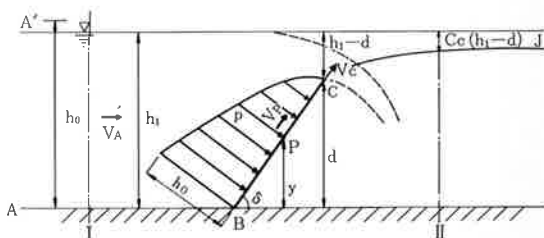


図-1 流出モデル(z平面)

- d : ゲート高
- δ : ゲート傾斜角度
- C_c : 縮流係数
- g : 重力加速度
- ρ : 水の密度

である。

式(1)および式(2)をpについて解けば次式が得られる。

$$\frac{p}{\rho g d} = \frac{d-y}{d} + \left\{ \left(\frac{h_1-d}{d} \right) (1-q^2) \right\} / \left\{ 1 - C_c^2 \left(\frac{h_1-d}{h_1} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $q = V_P / V_C$ である。上式において点Pにおける無次元流速qが与えられれば圧力を求めることができる。流速qは等角写像の方法により以下のように求める。

図-1の流れの平面(z平面)に対応する複素ポテンシャル平面(w平面)は図-2に示す通りであり、このw平面の帯状領域は図-3に示す ζ 平面($\zeta = re^{i\theta}$ の半径1の4分円内に次式の関係によって写像される。

$$w = - \frac{2C_c(h_1-d)}{\pi} \cdot \ln \left\{ \frac{1}{2} \left(\zeta + \frac{1}{\zeta} \right) \right\} + iC_c(h_1-d) \dots\dots\dots (4)$$

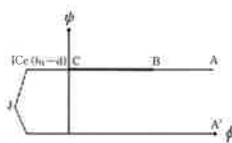


図-2 w平面

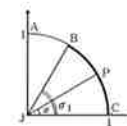


図-3 ζ 平面

つぎに、次式で定義される関数 ω を導入する。

$$\frac{dw}{dz} = -u + iv = -e^{-i\omega}, \quad \omega = \theta + i\tau \dots (5)$$

ここで、u, vは水平および鉛直方向の流速成分であり、 θ は流れの方向を表わし、 $q = e^\tau$ の関係がある。 ω を ζ 平面の4分円内で決定し、ゲート板が円周上の点に対応することを考慮し、 q, y および C_c を求め、 ζ 平面の偏角をsと書いて、その結果を用いると式(3)は次式のように表わせる。

$$\frac{p}{\rho g d} = \frac{2C_c(h_1/d-1) \cdot \sin \delta}{\pi} \times \int_0^\delta \left(\frac{\sin \sigma_1 + \sin s}{\sin \sigma_1 - \sin s} \right)^{\delta/\pi} \cdot \tan s \, ds + I(h_1) \left\{ 1 - \left(\frac{\sin \sigma_1 - \sin s}{\sin \sigma_1 + \sin s} \right)^{2\delta/\pi} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、

$$I(h_1) = \frac{\left(\frac{h_1-d}{d}\right)}{\left\{1 - Cc \left(\frac{h_1-d}{h_1}\right)^2\right\}}$$

$$Cc = \frac{h_1}{h_1-d} \left(\frac{1 + \sin \sigma_1}{1 - \sin \sigma_1}\right)^{-\delta/\pi}$$

である。また、 σ_1 は点Bに対応する平面の偏角を表わしており、つぎの関係を満足している。

$$\frac{d}{\sin \delta} = \frac{2Cc(h_1-d)}{\pi} \int_0^{\sigma_1} \left(\frac{\sin \sigma_1 + \sin \sigma}{\sin \sigma_1 - \sin \sigma}\right)^{\delta/\pi} \times \tan s \, ds$$

なお、理論解析に用いた σ_1 及び Cc の値を表-1に $(h_1-d)/h_1$ と $(h-d)/h$ との関係を表-2に示す。

表-1 越流水深と縮流係数および σ_1 の関係

	$(h_1-d)/h_1$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$\delta=15^\circ$	σ_1			1.57004	1.56654	1.55455	1.52228	1.44825	1.29540	0.99124
	Cc			0.89666	0.89667	0.89667	0.89674	0.89716	0.89921	0.90817
$\delta=30^\circ$	σ_1		1.56215	1.54167	1.50178	1.43578	1.33650	1.19491	0.99668	0.70850
	Cc		0.81377	0.81381	0.81403	0.81476	0.81677	0.82155	0.83231	0.85773
$\delta=45^\circ$	σ_1	1.55965	1.52620	1.47034	1.39182	1.28987	1.16275	1.00675	0.81360	0.56044
	Cc	0.74672	0.74684	0.74739	0.74886	0.75205	0.75811	0.76898	0.78839	0.82630
$\delta=60^\circ$	σ_1	1.53413	1.46772	1.38104	1.27749	1.15808	1.02230	0.86796	0.68798	0.46513
	Cc	0.69213	0.69289	0.69480	0.69859	0.70512	0.71560	0.73200	0.75831	0.80530
$\delta=75^\circ$	σ_1	1.49588	1.39839	1.28947	1.17142	1.04469	0.90845	0.76038	0.59502	0.39722
	Cc	0.64787	0.64985	0.65377	0.66032	0.67023	0.68465	0.70562	0.73723	0.79078
$\delta=90^\circ$	σ_1	1.44853	1.32570	1.20180	1.07604	0.94744	0.81452	0.67468	0.52284	0.34593
	Cc	0.61205	0.61582	0.62207	0.63138	0.64436	0.66209	0.68666	0.72232	0.78060

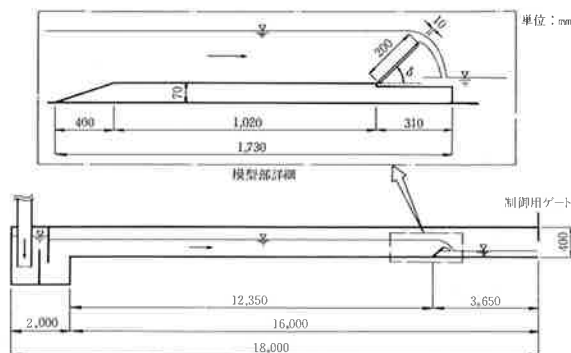


図-4 実験装置

3. 実験装置および実験方法

実験は、岡山大学工学部土木工学科水理実験室に設置された、長さ16m、幅60cm、深さ40cmの鋼製（片壁面はガラス張り）の水平直線水路を用いておこなった（図-4）。ゲート模型は、フラップ長20cm、ゲート幅50.6cmの亚克力製でゲート両端には、幅4.5cmの水切り板を設けている。圧力の測定はゲート中央部の上流面に内径3mmの銅パイプ（図-5）を通してマンメータにより水柱の高さを読みとる方法を採用した（写真-1）。

実験はゲート傾斜角 δ を 0° 、 5° および 15° から 45° まで 5° づつ変化させ、各傾斜角について越流水深を数種に変化させておこなった。なお、実験の際、ゲート傾斜角が 0° と 5° の場合上流水位が増加するとゲートがもぐる状態が発生したため、この状態を避けるため、ゲート本体を実験水路の最下流端に移動させて完全越流の状態で行った。

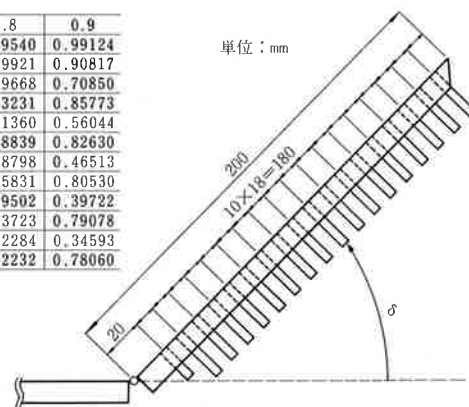


図-5 圧力測定孔の位置

表-2 $(h_1-d)/h_1$ と $(h_0-d)/h_0$ との関係

δ	$(h_1-d)/h_1$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
15°				0.316	0.433	0.556	0.679	0.794	0.892	0.964
30°		0.204	0.313	0.427	0.545	0.664	0.777	0.878	0.957	
45°		0.101	0.204	0.305	0.423	0.538	0.654	0.767	0.869	0.953

$$\frac{h_1-d}{h_1} = \frac{I(h_1)-d}{I(h_1)}$$

$$I(h_1) = d + (h_1-d) / [1.0 - \{Cc \times (h_1-d)/h_1\}^2]$$

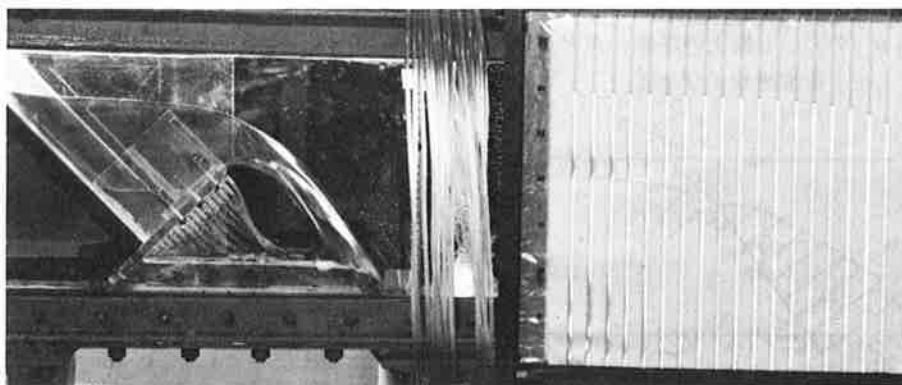


写真-1 実験装置

4. 実験結果とその考察

(1) 圧力分布特性

ゲートの傾斜角が45°、30° および 15° の場合のゲート板上流面の圧力分布の実験結果をそれに対応する理論解析結果とともに図-6、図-7および 図-8に示す。図中の実線は理論曲線を示し、破線はゲート下端における水圧を上流比エネルギーによる水圧 ρgh_0 と仮定した静水圧分布を示し、一点鎖線はゲート下端における水圧を上流水位による水圧 ρgh_1 と仮定した静水圧分布を示したものである。これらの図から圧力分布特性について以下のようなことがわかる。実験値でゲート板上流面の圧力は上端からゲート下方に向かって急激に上昇し、下端近傍では上流水位による静水圧分布に漸近する傾向を示している。つぎに、実験値と理論値とを比較するといずれの傾斜角の場合も越流水深が小さい場合には実験値と理論値とはよく一致するが、越流水深が大きくなる、すなわち理論流速が速くなるにしたがって実験値はゲート上部では理論値よりも大きく、ゲート下部では小さな値を示す傾向がみられる。傾斜角を小さくして、越流水深を大きくした場合、その傾向が顕著にあらわれている。

実験値と理論値との差の中で、ゲート下端部近傍における差は理論解析でゲート下端がよどみ点になっていると仮定したこと起因していると考えられる。

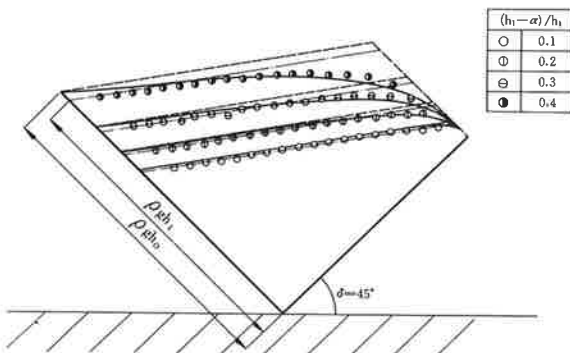


図-6 圧力分布

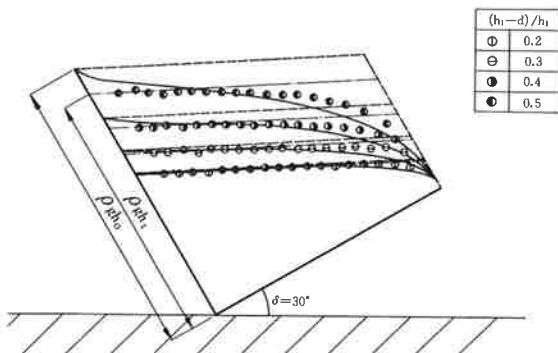


図-7 圧力分布

とができる。すなわち、理論解析では、水路底面とゲート板が1つの流線を形成するとしているため、ゲート下端のような隅角部では、解析上、流速が0すなわち、よどみ点となり、計算上は、上流の速度水頭分にはほぼひとしい圧力の上昇をもたらす。

しかし、実際にはこの隅角部近傍では流線がはく離していると考えられ、上流水深による圧力以上には圧力上昇は起らないようである。したがって越流問題の理論解析においては、この隅角部に死水域の存在を考慮するなどして解析モデルを改良することが今後の課題であろう。

次にゲート上端部において実験値が理論値よりも大きい値を示しているのは、モデルで考慮しなかった重力の影響を無視し得なかったことによるものと考えることができよう。すなわち、重力の影響を考慮すればゲート上端部での流速は本解析で得られた値よりも小さい値を示すものと推測される。

以上述べてきたように、圧力分布に関し本研究で行った理論解析は、今後なお検討すべき点が残されているが、前述した点を一部修正すれば定性的傾向を考える際の指標となると思われる。実用的には、補正分布形として、直上流水位による静水圧分布曲線と理論曲線との交点を境にして、上端側のみ解析結果による水圧分布状態となる曲線を用いることが考えられよう。この分布曲線でも、ゲート上端部近傍で圧力が小さく評価されるという問題が残るが、全体的な傾向を把握することは可能だと思われる。以下では、全圧力および作用点の位置に関して、このような理論解析の補正分布曲線より得られる値を参考値として示すことにする。

(2) 全圧力とその作用点

ゲートに実際に作用する全圧力を F_d として、直上流水位 h_1 を基準にした静水圧分布による全圧力 F_s に対する比 F_d/F_s と $(h_1-d)/h_1$ との関係を図-9に示す。図中の実線は理論解析の補正分布曲線を示し、記号による点は傾斜角度 θ が5°から45°までの実験値を示している。この図から、 $(h_1-d)/h_1$ が大きくなるにつれて F_d/F_s は小さくなる、すなわち直上流水位

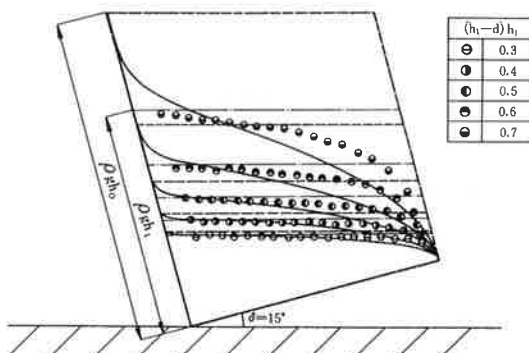


図-8 圧力分布

を基準とした静水圧分布よりの欠損割合が大きくなっていくことがわかる。各傾斜角に対する実験領域の全てが一致している訳ではなく、誤差も考えられるが、この図からはこれまで報告されてきたような傾斜角度の変化による F_d/F_s の顕著な差は認められず、逆に $(h_1-d)/h_1$ と F_d/F_s とは一義的な関係があるように考えることができる。

$\delta=0^\circ$ の場合の h_1/l に関する F_d/F_s の実験値を図-10に示す。なお、図中にはゲートがもぐった状態の実験値も参考値として図示してある。この図より、ゲートがもぐった状態では、 h_1/l が増大するにしたがい F_d/F_s は増加する傾向にあるが、完全越流状態になると逆に減少する傾向があることがわかる。さらに、この結果を図-9に重ねてプロットすれば常に $(h_1-d)/h_1=1.0$ となるが、その平均値は図-9の実験値の減少傾向をそのまま延長した近傍に存在していることがわかる。

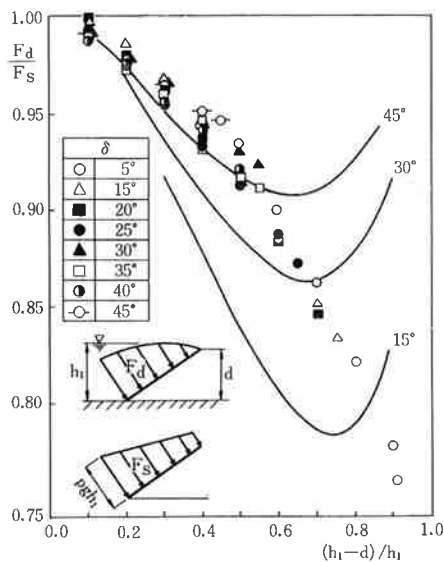


図-9 全圧力

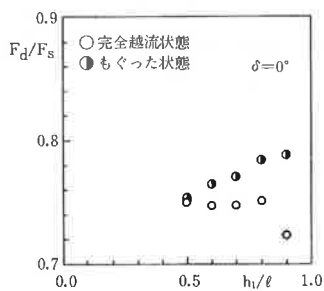


図-10 全圧力

回転軸から圧力中心までの距離を lc とした場合の lc/l の値を補正曲線とともに図-11に示す。この図から $(h_1-d)/h_1$ が大きくなるにしたがって lc/l の値も大きくなる。ゲート傾斜角度 δ の変化に対しては、全圧力の場合と同様ばらつきは見られるがほぼ一義的な関係があるものとみなしてよいと考えられる。

$\delta=0^\circ$ の場合の h_1/l に対する lc/l の実験値を図-12に示す。作用点の位置も全圧力の場合と同様な変化傾向を示し、 lc/l の平均値は図-11の実験値の増大傾向を $(h_1-d)/h_1=1.0$ まで延長した近傍にあることがわかる。

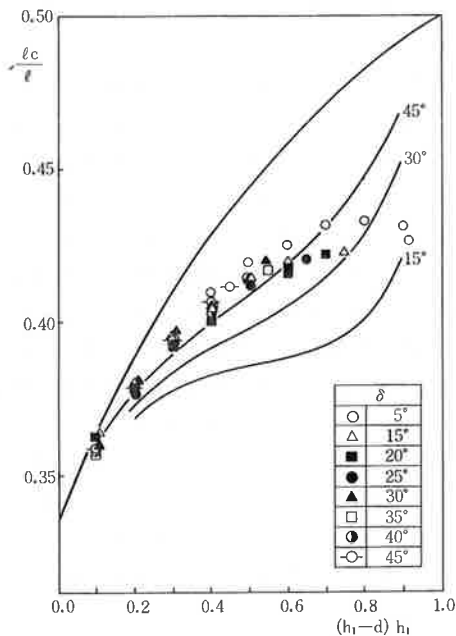


図-11 圧力中心の位置

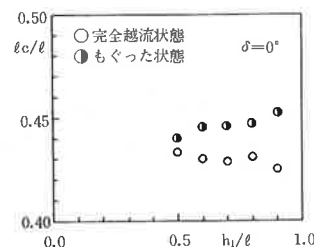


図-12 圧力中心の位置

(3) 回転モーメントの特性

図-13は、回転軸まわりの単位幅あたりの回転モーメント $T (=F_d \times lc)$ のゲート傾斜角 δ に対する変化を h_1/l をパラメータとして示したものである。一点鎖線は実験値から導かれた実験曲線であり、点線はゲートがもぐった状態の実験曲線である。また、実線は次式で与えられる上流水位にもとづく静水圧分布曲線である。

$$\frac{T}{\rho g l^3} = \frac{1}{2} \cdot \frac{h_1}{l} - \frac{1}{3} \sin \rho \dots\dots\dots (7)$$

この図から、ゲートの傾斜角を変化させることにより、上流水位 h_1 を一定に制御する場合の回転モーメントの変化特性を知ることができる。 h_1/l を一定として δ を小さくしていくと回転モーメントは増加するが、その比率は静水圧分布を仮定した場合に比較し

て小さくなり、水圧力を静水圧分布で近似することは過大評価となることがわかる。また、この図からゲートがもぐった状態では $\delta = 0^\circ$ の場合が最大の回転モーメントを与えていることがわかる。しかし、完全越流状態においては h_1/l が 0.8 以下では $\delta = 0^\circ$ の場合が最大回転モーメントを与えるが、 h_1/l が 0.9 以上になると最大回転モーメントを与える角度が 0° でなくなることがわかる。このことより、 h_1/l がある値以上になると回転モーメントのピークを与える 0° より大きいゲート傾斜角度が存在してくることがわかる。 $\delta = 0^\circ$ の場合の回転モーメントを静水圧分布に対する回転モーメントと比較すると図-14 のようになる。すなわち、実験値の静水圧分布仮定の値 ($h_1/2l$) に対する比は、 h_1/l によって多少ばらつきは見られるが約 2/3 の値を示している。

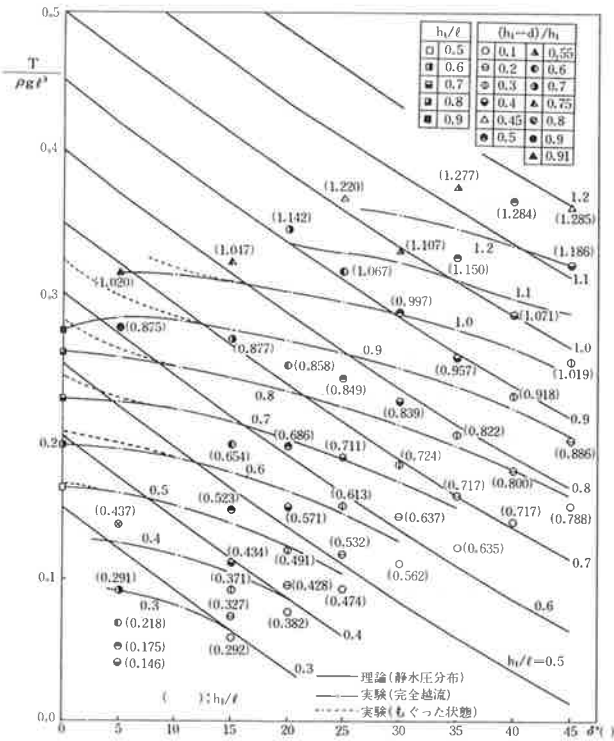


図-13 回転軸まわりの回転モーメント

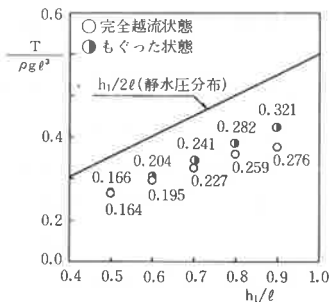


図-14 回転軸まわりの回転モーメント

おわりに

本研究では、フラップ付親子ゲートの構造設計法確立のための第1段階として、越流型フラップゲート上流面に作用する流体力の特性について理論・実験両面から検討をおこなった。その結果以下のような点が明らかにされた。

理論面からは、二次元ポテンシャル理論を適用して圧力分布の解析をおこなった。解析結果を実験によって検証したところ、越流水深が小さい場合は理論値は実験値をかなりよく説明するが、越流水深が大きくなるにしたがって、理論値と実験値とはかけ離れてくることが明らかになった。これは解析モデルにおけるゲート下端近傍の流速の設定の仕方および重力の影響を無視した取り扱いに問題があるようであり、今後理論解析をおこなう場合にはこれらの点に留意したモデルの改良方法を検討する必要があると考えられる。

つぎに、広範な実験解析の結果、全圧力およびその作用点の位置に関する特性が明らかされた。すなわち、直上流水位を基準とした静水圧分布を仮定した値に対する比は、全圧力および作用点の位置ともにゲート傾斜角度にはほとんど影響されず、越流水深と上流水深との比によってほぼ一義的に決定されることが示された。また、全圧力および作用点位置の実験値を用いて算出される回転モーメントのゲート傾斜角に対する変化特性が示され、傾斜角が 0° から 45° の範囲では 0° の近傍で最大の回転モーメントを与え、直上流水位 h_1 を基準とする静水圧分布を仮定して得られる値のほぼ 2/3 程度となることが明らかにされた。

最後に、現在は水資源開発公団に奉職されている山田賢三氏をはじめ実験データの収集に協力していただいた岡山大学工学部土木工学科の学生諸氏に感謝の意を表するものである。

参考文献

- 1) 神谷貞吉編：土木工学大成 2 特殊構造物 I、1 章 1, 2, 4 フラップゲート
森北出版、27、1969年 7 月第 1 刷
- 2) 水資源開発公団：
利根川取水施設・合口連絡水路工事誌、
2 編 1 章(9) 大分水工ゲート水理模型実験
(昭和42年 3 月)、252、
- 3) 名合宏之：シェル構造ゲートに作用する流体力特性に関する研究、土木学会論文報告集、264、1977年 8 月