

フラップ式水門の浮上・沈降挙動の解析

ANALYSIS FOR RISING AND SINKING MOTION OF A FLAP-TYPE GATE IN A STILL WATER

清宮理¹・下迫健一郎²・由井孝昌³・山下誠也⁴・椎名正樹⁵・土屋昌義⁶
Osamu KIYOMIYA, Ken-ichirou SHIMOSAKO, Takamasa YUI, Seiya YAMASHITA,
Masaki SHIINA and Masayoshi TSUCHIYA

- ¹フェロー 工博 早稲田大学 建設工学専攻 教授 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)
²正会員 独立行政法人 港湾空港技術研究所 耐波研究室 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)
³正会員 工修 石川島播磨重工業株式会社 鉄構設計部 (〒135-8710 東京都江東区豊洲3-1-1)
⁴正会員 工博 石川島播磨重工業株式会社 船舶海洋機器開発部 (〒235-8501 神奈川県横浜市磯子区新中原町1)
⁵工修 三菱重工業株式会社 鉄構装置部 (〒231-8715 神奈川県横浜市中区錦町12番地)
⁶正会員 川崎重工業株式会社 機器・装置技術部 (〒675-0180 兵庫県加古郡播磨町新島8番地)

A flap-type gate for protecting against storm surge and tsunami is the mobile barrier hinged along a sea-bottom axis. Present paper describes the motion characteristics of the gate rising to the water surface or sinking to the bottom. Extensive experiments are performed with the scale model of the rising or sinking gate in a water tank. The effects of the air chamber volume in the gate and the side wall beside the gate on the motions are investigated.

Further, a simple mathematical model is derived for the dynamics of rising motion of the gate. The rising motion predicted numerically using the mathematical model compares well with experiment motion, if the coefficients for the equation of the motion in the mathematical model can be suitably determined.

Key Words : Flap-type gate, Movement in a still water, Storm surge, Tsunami, Experiments, Numerical simulation

1. はじめに

近年、東海地震や東南海地震など津波の来襲を伴う大規模地震の発生が近いと予測され、沿岸域では津波対策の整備が要望されている。著者らは対策施設のひとつとしてフラップ式水門を提案し、フラップ式水門の水利特性、力学特性について研究を進めている^{1), 2), 3)}。フラップ式水門は図-1に示すように海底部側はピン構造となっており、常時は海底に伏せた状態で設置されている。高潮や地震津波が予測されたときフラップ(扉体)の内部に空気を送り込み、フラップに浮力を与えることで急速に浮上させ、高潮や津波が過ぎた後は空気を排除して、フラップを海底に沈降させる構造である。津波時には数分、高潮時には1時間程度の操作時間を設定している。しかしながら、浮力を与えることでフラップ式水門を浮上させる操作機構はイタリアのモーゼ計画⁴⁾でも採用

されているものの、津波と高潮の両者に適用できる水門の浮上・沈降の挙動特性に対する検討例は今までにない。

そこで、本研究はフラップ式水門の静水中での浮上・沈降の挙動特性をまず把握し、操作機構の設計(空気室の規模、ポンプ容量など)に必要な基本情報を得るために、数値計算モデルを作成し、模型実験との比較によりその妥当性の検証を行うものである。

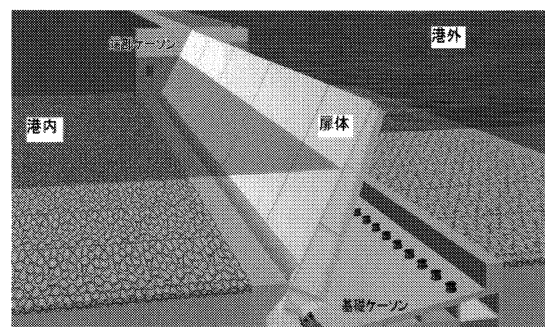


図-1 フラップ式水門の概要

2. 水理模型実験

フラップ式水門の浮上・沈降の挙動特性を解明するため、2m幅の水槽内に図-2に示す縮尺1/50の模型を設置し、静水中で実験を行った。扉体の上端部に空気箱（容積2181cm³）を設け、内部の空気充填率を調整しながら、一定空気量による扉体の浮上・沈降状況をビデオ撮影し、扉体の角度変化量は画像データから解析することとした。浮上・沈降に要する時間はストップウォッチで測定した。実験条件を表-1に示す。この実験は、主に2種類に大別され、空気充填率の影響を確認する実験および隣接ゲートや側壁の影響を確認する実験である。なお、空気充填率は、空気箱内の空気充填率であり、100%の空気充填率は扉体の全容積の約14%に相当する。

また、側壁や隣接ゲートの影響および数値計算モデルと模型実験との妥当性検証にあたり、多くの一定空気量による浮上実験の中から、表-2に示す実験状態を選び出した。空気充填率は55%と65%の2種類、水深は15m、20m、25mの3種類である。

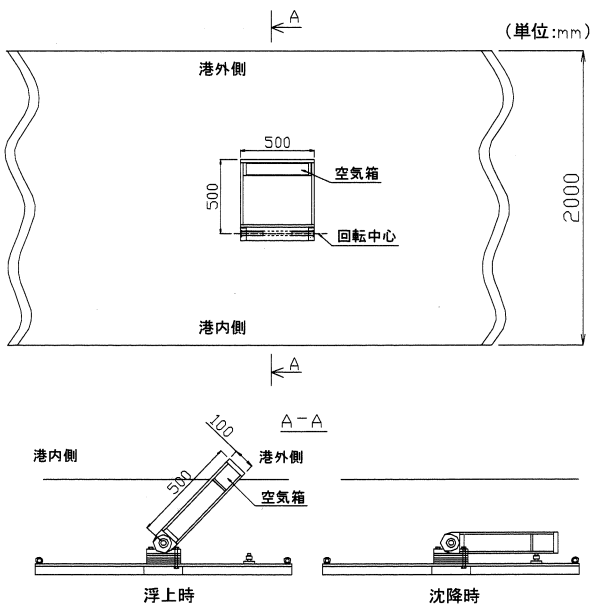


図-2 実験模型図

表-1 実験条件

空気充填率 (%)	設置水深 (模型 cm) <実機換算 m>
0~100	30 <15>
	40 <20>
	50 <25>
	60 <30>

表-2 実験状態<実機換算値>

空気充填率	55%	65%
ゲート重量 (tf)	1694	1666
<kN>	<16601>	<16327>
水深 (m)	15	
	20	
	25	
ゲート長さ (m)	25	
ゲート幅 (m)	25	
ゲート厚さ (m)	5	
回転ピン～重心距離 (m)	12.6	12.45

(1) 空気充填率の影響実験

実験の一例として水深20m（実機換算値）で空気充填率が異なる場合の浮上運動に対する時刻歴を図-3に、沈降運動に対する時刻歴を図-4に示す。時間は実機換算値である。図-3ではフラップゲートが水底から離れる時間を大体合わせている。

2枚の図から明らかに、空気量が増せば浮上に要する時間は短くなり、沈降に要する時間は長くなる。

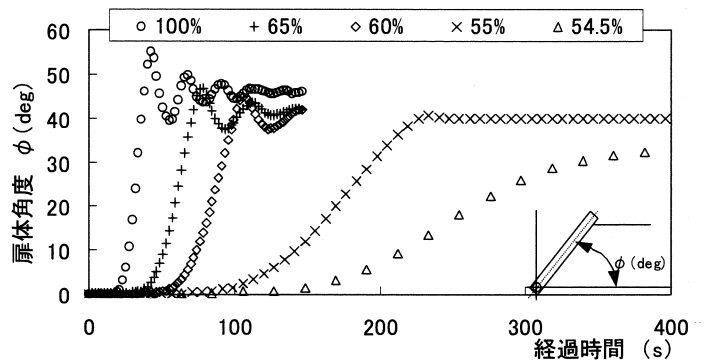


図-3 浮上運動に及ぼす空気充填率の影響（水深20m）

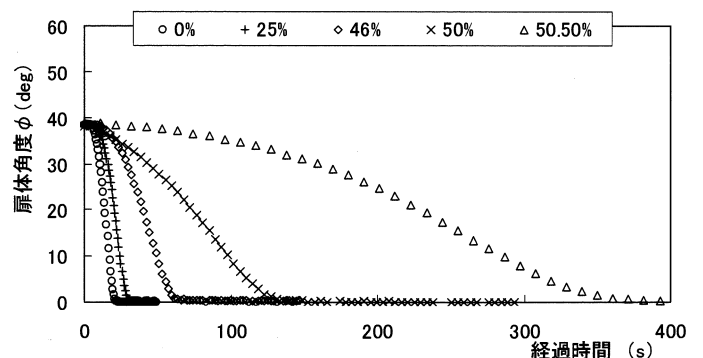


図-4 沈降運動に及ぼす空気充填率の影響（水深20m）

(2) 側壁および隣接ゲートの影響実験

本実験では、フラップゲートの周辺条件を種々変えた状態で、浮上・沈降実験を実施し、側壁や隣接ゲートの影響を把握するものである。例えば、対象のフラップゲートと側壁や隣接ゲートとの隙間の大きさを変化させて、片側が側壁の場合や両側が側壁の場合の実験、またフラップゲートの片側もしくは両側に固定フラップゲート

トを配置した実験である。その中から、両側側壁（上下流長さ600mm）および両側が固定フラップゲート（法線長さ600mm）の場合の浮上運動について述べる。

図-5に空気充填率55%，水深20mの場合で、両側側壁の有りの無しの影響を示し、図-6に両側固定フラップゲートの有りの無しの影響を示す。図からわかるように両側側壁の場合は側壁なしに比べて、水底からの立ち上がりに時間がかかり、またその後の浮上速度も小さい。この要因はゲート前面（上面）板が浮上により押しのけた流体が、側壁の影響により後方（下面）への回り込みを阻害され、ゲートに作用する力（付加質量）が大きいために浮上速度の差となって現れていると考えられる。また、両端固定フラップゲートの場合は、若干浮上速度は影響を受けるものの、側壁の場合よりはゲート前面の流体は後方に回り込みやすいため、あまり影響を受けないことが確認できる。

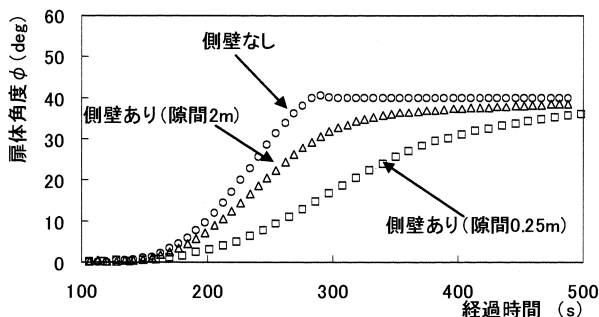


図-5 浮上運動に及ぼす両端側壁の影響
(空気充填率55%，水深20m)

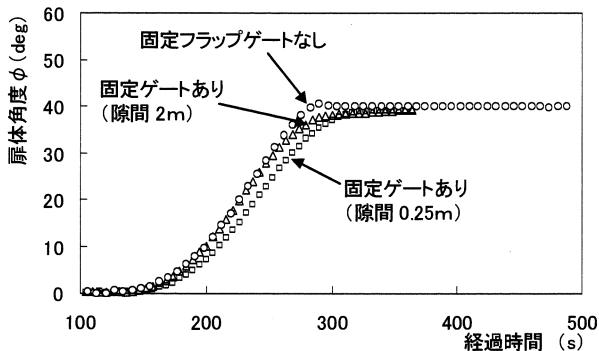


図-6 浮上運動に及ぼす両端固定フラップゲートの影響
(空気充填率55%，水深20m)

3. フラップゲートの浮上運動計算法

(1) 運動方程式

静水中でフラップゲートが水底から浮上するときの運動を表現する運動方程式は、次式である。

$$(I/g + m)\ddot{\theta} + N\dot{\theta} + N^{(2)}\theta = W_G \sin \theta - M_R(\theta) \quad (1)$$

ここに、 I : ゲートのヒンジ（回転軸）まわりの重量

慣性モーメント、 g : 重力加速度、 m : 付加質量慣性モーメント、 N : 線形減衰係数（造波減衰係数他）、 $N^{(2)}$: 非線形減衰係数（粘性減衰係数）、 W : ゲートの重量、 l_0 : ヒンジから重心までの距離、 $M_R(\theta)$: 復原モーメントである。回転角 $\theta(t)$ は鉛直軸からとった角度で時計まわりを正方向とする。重量慣性モーメント I は、フラップゲートの重量分布が一様であると仮定すれば、 $Wl_0^2/3$ となる。ここに、 l_0 はフラップゲートの長さである。

フラップゲートの浮上時の状態変化を模式的に示したのが図-7である。フラップゲートの鉛直軸からとった角度を θ 、水底面からとった角度を ϕ で表し、フラップゲートの一端が浮上時に水面に達したときの角度を θ_1 、もう一端が空中に露出するときの角度を θ_2 とする。

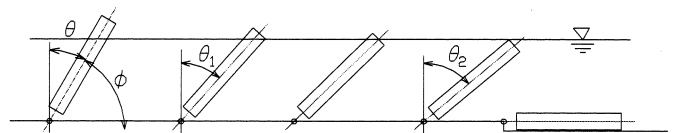


図-7 フラップゲートの状態変化図

一方、復原モーメントはフラップゲートの没水状態によって変化し、(2) ~ (4) 式で与えられる。

$\theta_2 \leq \theta(t)$ のとき

$$M_R(\theta) = \rho g c l_0^2 B \sin \theta \quad (2)$$

$\theta_1 \leq \theta(t) \leq \theta_2$ のとき

$$M_R(\theta) = \rho g B \left\{ c l_0^2 \cos \theta - \frac{1}{2} c_0^2 (l_0 \sin \theta - a) \right\} \tan \theta \quad (3)$$

$$c_1 = \frac{h - l_0 \cos \theta}{\sin \theta}$$

$$c_0 = c - c_1$$

$$a_0 = \frac{2}{3} c_0 \cos \theta \left(1 + \frac{\tan^2 \theta}{2} \right)$$

$$a = a_0 + c_1 \cos \theta$$

$\theta(t) \leq \theta_1$ のとき

$$M_R(\theta) = \rho g c B \left(\frac{h^2}{\cos \theta} + c a \right) \tan \theta \quad (4)$$

$$a = \frac{2}{3} c \cos \theta \left(1 + \frac{\tan^2 \theta}{2} \right)$$

ここに、 B : フラップゲートの幅（入射波の方向に直角方向の幅）、 $2c$: フラップゲートの厚み、 h : ヒンジ（回転軸）中心から水面までの高さである。

フラップゲートの浮上運動を計算するにあたり、(1) 式の付加質量慣性モーメント m および減衰係数 N 、 $N^{(2)}$ を、実験結果の逆解析をもとに設定する。

(2) 復原モーメント・重力によるモーメントの計算

前項の式にて求めた復原モーメント・重力によるモーメントの計算例を図-8に示す。本ケースは表-2に示す空気充填率65%，水深20mのものである。図-8の横軸の θ_2 はフラップゲートの一端が浮上時に水面に到達したときの角度である。フラップゲートが水面上に現れると、急激に復原モーメントが減少することがわかる。

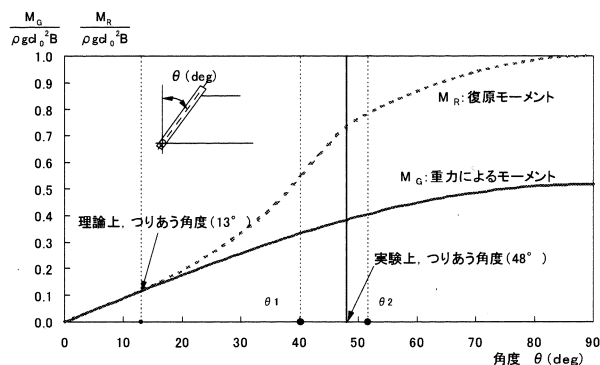


図-8 復原モーメントと重力によるモーメント
(空気充填率65%，水深20m)

フラップゲートは、重力によるモーメントと復原モーメントが等しくなるときに平衡状態となるが、図-8に示す計算結果によれば平衡状態の角度は、 $\theta = 13^\circ$ （水底からの傾斜角では $\phi = 77^\circ$ ）である。しかし、図-3に示す空気充填率65%の場合の浮上運動実験結果から、平衡状態は $\phi = 42^\circ$ 付近（鉛直軸からの傾斜角では $\theta = 48^\circ$ 付近）にある。この差異は、回転軸部の摩擦力によるモーメントがフラップゲートに作用するためと考えられる。

そこで、運動計算にあたっては、この摩擦力によるモーメントを重力によるモーメントに加え、ゲートの平衡位置が実験値と計算値で一致するように補正した。補正值は、摩擦力によるモーメントを一律0.35とした。補正後の復原モーメントと重力によるモーメントを図-9に示す。

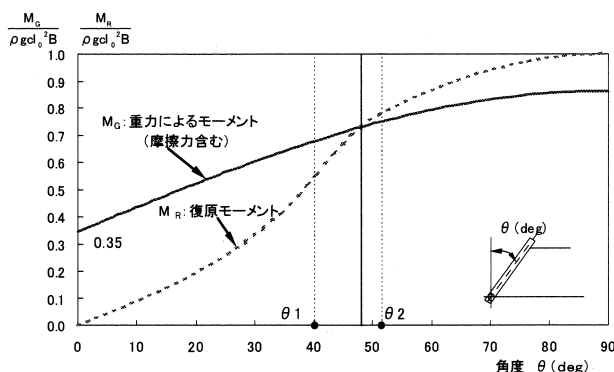


図-9 復原モーメントと重力によるモーメント
(摩擦力によるモーメントを加えて補正)

(3) 付加質量慣性モーメント m 及び減衰係数 N の設定

(1) 式を具体的に数値計算するにあたって、方程式を

以下のように変形する。

$$\ddot{\theta} + 2\alpha\dot{\theta} + \beta\theta = f_e(\theta) \quad (5)$$

$$2\alpha = \frac{N}{I/g+m} \quad (1/s)$$

$$\beta = \frac{N^{(2)}}{I/g+m}$$

$$f_e(\theta) = \frac{Wl_G \sin\theta - M_R(\theta)}{I/g+m} \quad (1/s^2)$$

ここに、 2α は線形減衰係数、 β は非線形減衰係数、 f_e は外力に相当する。逐次近似的に(5)式を解けば、フラップゲートの回転角 θ の時刻歴が得られる。

a) 付加質量慣性モーメント m

フラップゲート浮上運動実験結果の中には、浮上終了直前にゲートが周期的に動揺する場合がみられる。これは復原力の変化にともなうゲートの自由動揺である。このような自由動揺時の周期はフラップゲートの固有周期に相当し、固有周期は付加質量慣性モーメントの影響を受ける。そこで今回、計算と実験とでこの周期が一致するように、付加質量慣性モーメントを設定することとした。比較対象の実験結果として選んだのは、空気充填率65%，水深20mの場合の結果である。

その場合の浮上運動の計算結果を実験結果と対比し、最終的に得られた付加質量慣性モーメント（無次元値） $\bar{m}$ は以下のとおりである。

$$\bar{m} = \frac{m}{\rho \nabla h^2} = 9.1 \quad (6)$$

ここに、 ∇ はフラップゲート直立時の排水容積で $\nabla = 2chB$ となる。

フラップゲートが水底から離れるときの状態は、浮上中よりもはるかに動きがゆるやかである。このような現象は、水底から離れるときに、フラップゲート前面の流体が後方へまわり込むのに、大きな力が必要であるために生じると考え、この状態で付加質量慣性モーメントは非常に大きい値であると仮定した。そして、時間の経過とともにその値は減少し、(6)式の値に近づくとしている。付加質量慣性モーメントの変化を(7)式で表すこととした。

$$m(t) = m(1 + \delta e^{-\gamma t}) \quad (7)$$

ここに、 δ は水底から離れる状態での付加質量慣性モーメントが浮上中に比べどの程度大きいかを表し、 γ は付加質量慣性モーメントの時間変化を表す時定数に相当する。空気充填率65%，水深20mの場合について、浮上運動の実験結果と計算結果とをくり返し比較して以下の係数を得た。

$$\delta = 100, \quad \gamma = 0.12 \quad (1/s)$$

b) 減衰係数 N

減衰係数には線形減衰係数 2α と非線形減衰係数 β があるが、前者は水面に波が生じるための造波減衰係数やフラップゲートの回転軸の摩擦に起因する減衰係数であ

り、後者は渦の発生による粘性減衰係数である。今回のフラップゲート浮上運動では、速度がかなり小さいために、速度の自乗に比例する非線形減衰力の影響は明らかに小さい。したがって、減衰力としては線形減衰力だけを考慮することにする。

フラップゲートの浮上運動によって、水面にはほとんど波が発生しないことを実験で確認しており、造波減衰力はほとんどないとみなせる。回転軸の摩擦に起因する減衰力が、線形減衰力の大半を占めていると考えられる。

減衰力がフラップゲートの浮上運動に影響を与えるのは、浮上開始から終了までの経過時間に対してと、浮上終了直前の周期運動の振幅に対してである。空気充填率65%、水深20mの場合を対象に、フラップゲートの浮上運動の計算値が実験値に一致するように、線形減衰係数 2α を調整し、以下の値を得た。

$$2\alpha = \frac{N}{I/g+m} = 0.09 \quad (1/s) \quad (8)$$

この減衰係数 2α は次元のある係数であるから、模型と実機で異なる。上記の値は実機対応の値である。

c) 浮上運動の計算

以上の方法で係数を設定して、フラップゲートの浮上運動を計算したときの計算値と実験値との対比を図-10に示す。この図から、運動方程式の係数を適切に設定すれば、(1)式によってゲートの浮上運動を十分表現できることがわかる。

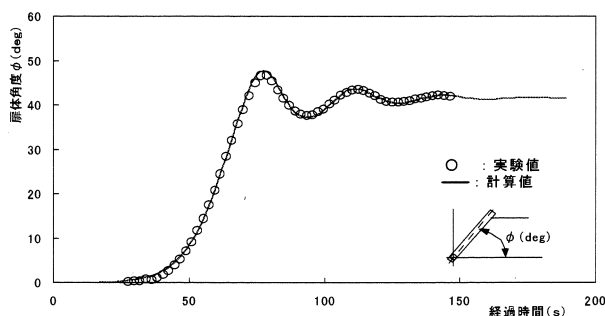


図-10 フラップゲートの浮上運動
(空気充填率65%、水深20m)

4. 模型実験結果との比較

前節では、空気充填率65%、水深20mの実験結果と対比して、運動方程式の係数を設定した。ここでは、同じ係数を用いて、水深を変化させた場合および空気充填率を変化させた場合の浮上運動を計算し、実験値と比較する。計算に用いた係数の値を表-3に示す。

表-3 計算に用いた係数一覧

空気充填率	65%	55%
$\bar{m}$	9.1	
2α	0.09	
δ	100	
γ	0.12	0.025

(1) 水深を変化させた場合

まず空気充填率が同じで水深を変化させた場合の浮上運動を計算し、実験値と比較したのが図-11, 12である。計算対象は水深25mと水深15mの2ケースである。このときの摩擦力に対する補正値は、それぞれ0.21と0.41である。

図に示すように、計算値は実験値を十分よく表現しており、このように空気充填率が等しい場合、あるひとつの実験状態から設定した係数は、ほかの実験状態に対しても有効といえる。

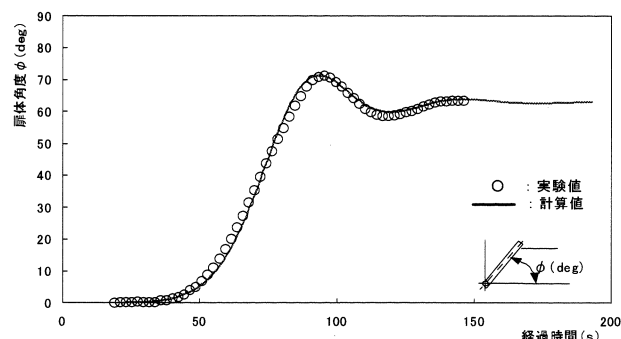


図-11 フラップゲートの浮上運動
(空気充填率65%、水深25m)

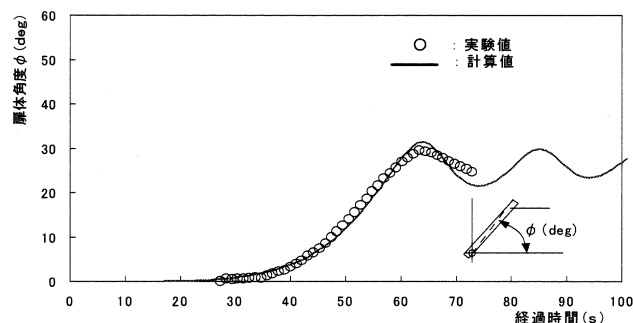


図-12 フラップゲートの浮上運動
(空気充填率65%、水深15m)

(2) 空気充填率を変化させた場合

つぎに、空気充填率が小さい場合、すなわちフラップゲートの重力によるモーメントが比較的大きい場合について検討する。検討対象は、空気充填率が55%で、水深が20m、25m、15mの3種類の実験状態である。

最初に、空気充填率55%、水深20mの場合を対象に、前節と同じ運動方程式の係数を用いて浮上運動を計算したが、計算値は実験値の傾向を良く再現できなかった。これは、前出の図-3から明らかのように、空気充填率が65%と55%とでは、浮上運動の様子が大幅に異なるためである。そこで、空気充填率55%の場合に対しては、表-3に示すように係数 γ の値を調整する必要があった。

図-13～15は、水深20m、25m、15mの場合のフラップゲート浮上運動の計算値と実験値との比較である。このときの摩擦力に対する補正値は、それぞれ0.35、0.27、0.41である。

図-13、図-15に示すように、浮上運動の実験値と計算値とはよく一致する。しかし、水深の大きい図-14の場合は計算値と実験値はあまりよく一致しなかった。実験値は、浮上終了前、平衡位置に達するまでゆるやかに変化する傾向を示しているが、このような傾向は今回の運動方程式によっては表現できないようである。

以上の結果から、空気充填率を変化させた場合でも、同一の運動方程式の係数を用いて、フラップゲートの浮上運動はある程度推定できることがわかる。ただし、計算で用いる付加質量に対する時定数 γ を調整する必要がある。

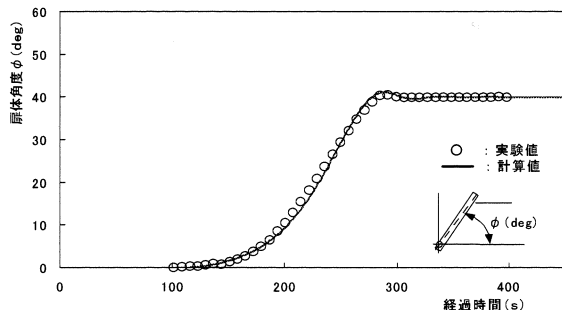


図-13 フラップゲートの浮上運動
(空気充填率55%, 水深20m)

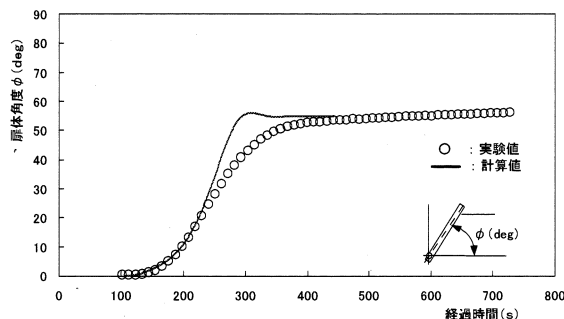


図-14 フラップゲートの浮上運動
(空気充填率55%, 水深25m)

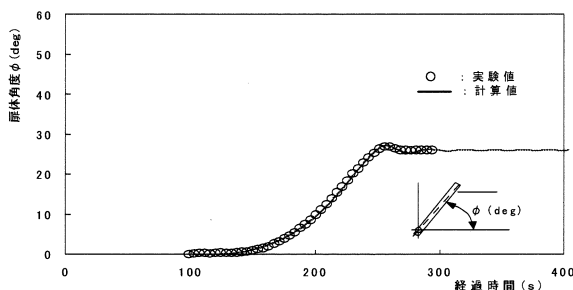


図-15 フラップゲートの浮上運動
(空気充填率55%, 水深15m)

5. まとめ

本研究によって得られた成果を以下に示す。

1) フラップゲートの浮上・沈降運動に対して、空気充填率の影響は大きい。空気充填率が大きければ浮上は早

く、沈降は遅くなる。フラップゲートの操作要求性能に合わせて空気箱規模とポンプ容量を設定する必要がある。

2) フラップゲートの浮上・沈降運動に対して、ゲート周辺条件として側壁がある場合や隙間が狭い場合に浮上・沈降時間は長くなる。これはフラップゲート周辺の水の移動に関連していると考えられる。

3) フラップゲートの浮上運動の計算法を誘導した。運動方程式の諸定数は、境界条件などに依存するため今回は模型実験との比較から求めた。また、付加質量慣性モーメント m を運動の時間関数として設定すると、種々の条件下でのフラップゲートの浮上運動をほぼ再現できた。なお、実機では実物大の模型実験から諸定数を設定する必要があると考える。

4) フラップゲートの浮上運動に対する減衰係数としては、渦の発生による非線形減衰係数や造波による線形減衰係数よりも回転軸部の摩擦による線形減衰係数が支配的であった。今後、回転軸部の構造細目や材料の選定が重要である。

今回はフラップゲートの浮上・沈降の挙動を、運動方程式を用いてある程度推定できることを小型模型実験により確認したが、今後はできるだけ実機に近いスケールで、より現実的な減衰係数や摩擦力の影響等を検討し、実機適用に向けて研究していきたい。なお、本研究は独立行政法人港湾空港技術研究所と大型防潮フラップゲート研究グループ（構成：早稲田大学、石川島播磨重工業株式会社、川崎重工業株式会社、新日本製鐵株式会社、JFEエンジニアリング株式会社、日立造船株式会社、三井造船株式会社、および三菱重工業株式会社）の共同研究として行った。

参考文献

- 1) 清宮理，下迫健一郎，仲保京一，大久保寛，長谷川 巖：高潮・地震津波用フラップ式水門の越波及び波力特性について，海洋開発論文集，第21巻，pp. 103～108, 2005. 7
- 2) Osamu KIYOMIYA, Kouji INOUE : A Plan of Large-scale Storm Barriers to Protect Urban Areas from Storm Surge Disasters, Techno-Ocean Osaka, 2002. Nov
- 3) 富田孝史，下迫健一郎，山田昌郎，横田弘：大規模可動式高潮防潮堤に関する基礎的研究－フラップゲートの水理特性と試設計－，港湾空港技術研究所資料，No. 1060, 2003. 9
- 4) ベネチア水域管理局－新ベネチア事業連合のホームページ <http://www.salve.it/uk/default.htm>