海底に倒伏したフラップゲート式可動防波堤の 扉体係留力の検証

木村 雄一郎¹・仲保 京一²・板垣 暢³・森井 俊明⁴

¹正会員 日立造船株式会社 機械・インフラ本部 (〒592-8331 大阪府堺市西区築港新町1丁5番-1)
E-mail:kimura@hitachizosen.co.jp

²正会員 日立造船株式会社 機械・インフラ本部 (〒592-8331 大阪府堺市西区築港新町1丁5番-1)
E-mail:nakayasu@hitachizosen.co.jp

³正会員 日立造船株式会社 機械・インフラ本部 (〒592-8331 大阪府堺市西区築港新町1丁5番-1)
E-mail:itagaki@hitachizosen.co.jp

⁴日立造船株式会社 機械・インフラ本部 (〒592-8331 大阪府堺市西区築港新町1丁5番-1)
E-mail:morii@hitachizosen.co.jp

通常海底に倒伏し、運用時には浮力を利用して水面まで浮上して連続した壁をなす、フラップゲート式の津波防波堤の開発を進めている。フラップゲートの扉体は、係留装置によって常時浮力を有した状態で海底に倒伏保持されており、これを解除することで速やかに水面まで浮上できる。一方、倒伏状態の扉体には、常時風波による流体力が作用するため、係留装置の設計には、この荷重の評価が不可欠となる。本研究では、水理模型実験および実海域試験での計測結果、ならびに扉体の挙動に関する簡易な運動方程式を用いて係留装置への作用力を評価した。研究の結果、扉体の動揺を許容した係留方式を採用することで、係留装置への作用力が軽減できることを確認し、その評価式を導出した。これらの知見を実機設計に活用することで、信頼性の高い施設の実現が可能となる。

Key Words : flap-gate, tsunami breakwater, experiment, calculation, mooring system

1. はじめに

著者らは、通常海底に倒伏し、運用時には浮力を利用して水面まで浮上して連続した壁をなす、図-1に示すような、フラップゲート式可動防波堤（以下、フラップゲートと呼称）の開発を進めている^{1,2)}。津波対策施設としてのフラップゲートの扉体は、係留装置により常時浮力を有した状態で海底に倒伏保持されており、その係留装置を解除することで速やかに水面まで浮上することができる。通常時から扉体に浮力を与えることで、浮上時間を短縮できるとともに、扉体を係留するための係留力を常時監視することにより、扉体の浮上力を担保することが可能となる。一方で、係留装置が誤って解除された場合、船舶の航行等に多大な影響を与える恐れが生じる。海底に倒伏した扉体には、常時風波による流体力が作用するため、係留装置を設計する上で、こうした流体力が係留装置に与える作用荷重を適切に評価することが不可欠となる。

本研究では、フラップゲートの扉体を倒伏保持するた

めの係留装置に、風波によって常時作用する荷重を評価することを目的とする。本係留装置は、こうした荷重を低減するため、機械室内に備えられたバネを介して扉体を係留しており、扉体は所定の範囲内において動揺できる構造となっている。そのため、係留力の評価には、浮力と係留力とによる力の釣り合いだけではなく、時間的に変動する波浪の影響を考慮した動的な検討が必要となる。ここでは、水理模型実験および実海域試験より得られた計測結果をもとに、扉体の挙動に関する運動方程式を数値的に解くことで、係留装置への作用力の評価を行った。

図-1 フラップゲートの概略図

2. 水理模型実験と実海域試験

(1) 水理模型試験の方法

模型実験は、長さ 50m、幅 1m の造波水槽を用いて、模型縮尺 1/30 で実施した³⁾。実験装置全体の概略を図-2 に示す。実験模型は、水深 13m の実海域を対象とした実機を模型化したもので、実機の扉体 1 門の高さは 22m、扉体幅は 10m であり、対応する模型の扉体高さは 71.7cm、扉体幅は 32.5cm となっている。水槽幅は 1m であるため、実験模型は扉体 3 門を備えた構造とした。3 門の扉体は、それぞれ独立して可動でき、隣接する扉体間には 3mm の隙間を設けた。各扉体の先端と扉体を格納する函体との間の隙間は 28mm とし、扉体面積に対して約 4% の開口を設けた。また、実験模型はステンレス鋼を用いて作成しており、扉体の浮力および慣性モーメントは、ポリエチレン製の浮力体を用いて実機の条件と合うように調整した。扉体の係留は、扉体回転軸から 62.0cm の位置に設けた治具より、ステンレス製のワイヤロープにて下方に荷重を加えることで行った。

倒伏した扉体上に波浪が作用する際、水深が浅いほど扉体に作用する圧力変動は大きい。実験水深は、干潮時を想定し、平均水位 13m より 2m 水位が低下した水深 11m の実海域を対象とした（実験では 35.9cm）。実験では、実海域のスケールで波周期が 10s~16s の規則波を用い、これらの規則波の波形勾配は 0.01~0.04 とした。模型スケールでの波周期は、1.81s~2.90s に相当する。実

図-2 規則波実験の実験装置の概略図

表-1 実験で使用した規則波の条件

実機	模型(1/30)				
	波周期 [s]	波高 [cm]			
		$H/L=0.01$	$H/L=0.02$	$H/L=0.03$	$H/L=0.04$
10.0	1.806	3.80	7.61	11.4	15.2
12.0	2.167	4.76	-	-	19.0
14.0	2.528	5.69	-	-	22.7
16.0	2.889	6.60	13.2	19.8	26.4

図-3 模型試験における計測機器の配置

験に使用した規則波の諸元を表-1 に示す。波高の計測には、入射波と反射波を分離するため、2 台の容量式波高計を用いた。扉体の係留力は、各扉体を係留するワイヤロープを滑車により転向し、気中部において、その他端をそれぞれロードセルに接合することで計測を行った。ワイヤロープとロードセルとの間にはコイルバネ（バネ定数：8.65N/mm）を挿入し、扉体の動揺を許容できる構造を再現した。このコイルバネのばね定数は、実機を想定して設定したものである。また、係留状態の扉体に作用する波圧の変化を計測するため、波浪の伝搬方向にわたって扉体の上下面に 3 台ずつ、計 6 台の圧力計を設置した。ロードセルおよび圧力計の設置状況を図-3 に示す。これら 6 台の圧力計に作用する波圧は、最小二乗法を用いて線形近似し、回転軸からの距離を乗じた上で積分することによりモーメントとして算出した。また、計測機器によるデータ収録は 100Hz で行った。

(2) 実海域試験装置

実海域試験は、平成 23 年 2 月より、静岡県焼津漁港にて実施している⁴⁾。試験海域の周辺図を図-4、現地に設置された試験装置を写真-1、試験装置の概略図を図-5、試験海域の波浪条件を表-2 にそれぞれ示す。現地海域の水深は 6.5m~7.0m であり、試験装置は、捨石により嵩上げされた水深 6m のマウンド上に設置した。常時海底に倒伏保持される可動構造部の沖側に機械室が設置されており、その機械室において試験装置の制御ならびに試験データの収録を実施している。試験装置は、計測機器の取り付けや試験中の作業を安全かつ容易に実施するため、安全柵に囲まれた観測用の歩廊を備える。函体から機械室を支持する支柱内には、函体に備えられた装置を制御するためのケーブルや配管が供えられるとともに、保守点検を行うダイバーの通用孔としても使用できる構造となっている。このように、試験計測用の機器類を除く本装置の仕様は、ほぼ実機と同等のものにより構成されている。また、フラップゲート試験装置における扉体の高さは 6.15m、幅は 4.8m である。

実海域試験装置の扉体係留装置を図-6 に示す。海中において、係留フックと呼ばれる部材が扉体の先端を支持しており、ロッド部材および転向リンク部材を介して機械室内の係留ユニットに係留力が伝達される構造となっている。ロッド部材の末端にはバネが備えられ、実機と同様に、扉体の動揺に追従した係留がなされる。扉体の係留力は、機械室において常時計測され、遠隔地においてもモニタリングできるよう構成されている。また、前記模型試験と同様、扉体の上下面には、試験計測用の圧力計を計 6 台設置しており、波浪によって扉体に生じるモーメントを算出することができる。

図-4 試験海域の周辺図

写真-1 現地に設置された試験装置

図-5 実海域試験装置の概略図

表-2 試験海域の波浪条件

波向	沖波			設置場所
	再現期間 [yr.]	波高 $H_{1/3}$ [m]	周期 $T_{1/3}$ [s]	波高 $H_{1/3}$ [m]
ENE	1	1.2	4.0	0.3~0.5
	30	3.8	6.6	1.1
SSE	1	4.2	9.9	-
	30	9.9	15.6	0.5

3. 付加慣性モーメントの推定

係留状態における扉体の運動方程式を得るためには、扉体の付加慣性モーメントが必要となる。これを推定するため、倒伏状態から浮上する扉体の運動方程式を定義し、実海域試験における扉体の浮上動作と比較した。このように、周囲の流れ場を解くことなく、扉体の付加慣性モーメントを用いてフラップゲートの挙動を予測する手法は、清宮ら（2006）によっても行われている。

海底に倒伏した扉体に与える空気量を変えて実施した扉体浮上試験における扉体角度の時間変化を図-7に示す。各試験ケースにおいて、倒伏した扉体の係留に必

図-6 実海域試験装置の係留システム

要な係留力は6.4kN、10.0kNおよび18.4kNであった。図-7より、扉体は、6度程度（破線）の角度までは非常にゆっくりとした速度で浮上し、その後水面まで速度を上げて浮上している様子が確認できる。これは、図-8に示すように、扉体と函体との開口が制約されているため、扉体が函体内から抜け出すまでは、扉体下方の空間に海水が供給されにくく扉体の浮上速度が抑制されるためである。また、一旦扉体が函体から抜け出すと、こうした制動効果はなくなるため、扉体は短時間で水面まで浮上することができる。各試験ケースにおいて、扉体の浮上速度が変化する前後における時間を表-3に比較する。表-3より、扉体の浮上力を変えた場合であっても、函体から出た後の浮上時間の差は比較的小さいことがわかる。

このような扉体の浮上動作特性を考慮し、倒伏状態から浮上する扉体の運動方程式を次式にて与えた。

$$(I + J) \frac{d^2 \theta}{dt^2} = B l_B \cos \theta - W l_G \cos \theta - F_s l_s - \int \Delta P \cdot x dx \quad (1)$$

ここで、 I は扉体慣性モーメント、 J は付加慣性モーメント、 θ は水平を基準とした扉体の角度、 t は時間、 B は扉体浮力、 l_B は回転軸から浮心までの距離、 W は扉体重量、 l_G は回転軸から重心までの距離、 F_s は扉体回転軸と軸受との摩擦力、 l_s は扉体回転軸の半径、 ΔP は扉体が浮上することによる扉体下部空間の圧力低下、 x は回転軸からの距離を示す。摩擦力 F_s は、回転軸の重量に摩擦係数を乗じることで算出した。また、扉体が函体から抜け出の際の抵抗は、扉体と函体との間の閉塞部を流体が通過することによって生じる圧力損失によるものとし、この圧力損失 ΔP 、および閉塞部における海水の流速 v を次式により与えた。

$$\Delta P = \zeta \frac{\rho v^2}{2} \quad (2)$$

$$v = \frac{a}{2D} \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

ここで、 ζ は損失係数、 ρ は海水の密度、 a は扉体の長さ、

D は閉塞部の幅を示すものである。本計算では、扉体角度 θ が6度を上回ると、開口幅 D が急増し、圧力低下 ΔP の影響がなくなることとしている。これらの方程式を以下に示す一次の離散式を用いて数値的に解いた。下式において、 ω は扉体の角速度、 M はモーメントを表す。

$$\theta(t + \Delta t) = \theta(t) + \Delta t \cdot \omega(t) \quad (4)$$

$$\omega(t + \Delta t) = \omega(t) + \Delta t \frac{M(t)}{I + J} \quad (5)$$

図-9に、式(1)による計算結果と実海域試験結果とが概ね一致するよう、扉体の付加慣性モーメントを調整した結果を示す。ここでは、付加慣性モーメント J を扉体の慣性モーメント I の18倍としており、このとき双方の曲線は良好に一致している様子が確認できる。前記の付加質量は、一般的なコンクリート構造物と比較して大きい。この要因として、扉体は面積が広いわりに水中重量が軽く、構造体周辺の海水と一体となって運動するためと考えられる。ただし、軸と軸受の摩擦係数 μ や閉塞部の損失係数 ζ など、計測が容易でないものについては、本試験装置において確からしい値を使用した。また、扉体内に備えられる空気室等の構成機器は、想定される実機と同様の場所に配置されており、ここで示した付加慣性モーメントは、フラップゲートのスケールが変わった場合であっても使用できるものである。以上の結果より、得られた付加慣性モーメントを用いて、扉体係留力の評価を行った。

図-7 扉体浮上時における扉体角度の時間変化

図-8 扉体が函体から抜け出す際の海水の動き

表-3 倒伏した扉体の浮上時間

扉体係留力	函体を出るまでの時間	函体を出てからの時間	浮上までの時間の合計
[kN]	[s]	[s]	[s]
6.4	16.8	20.8	37.6
10.0	7.9	14.0	21.9
18.4	5.3	10.1	15.4

(a) 扉体係留力が6.4kNのケース

(b) 扉体係留力が10.0kNのケース

(c) 扉体係留力が18.4kNのケース

図-9 実海域試験結果と計算結果の比較

4. 扉体係留力の評価

(1) 扉体係留モデル

係留状態の扉体の運動に関する運動方程式を、図-10に示すモデルに基づいて、次式にて与えた。

$$(I + J) \frac{d^2 \theta}{dt^2} = - \int P_{upper}(x, t) x dx + \int (P_{lower}(x, t) - \Delta P) x dx - F_{moor} l_m - F_S l_S \quad (6)$$

ここで、 $P_{upper}(x, t)$ は扉体上面の圧力、 $P_{lower}(x, t)$ は扉体下面の圧力、 F_{moor} は係留力、 l_m は回転軸から扉体係留ピンまでの距離を示す。模型実験において、海底における扉体の変位に対する水面の変動は軽微であったことから、造波減衰項は考慮せず、付加慣性モーメントとして簡易的に扱っている。 $P_{upper}(x, t)$ および $P_{lower}(x, t)$ は波条件、 F_{moor} は扉体変位角に依存する関数で、それぞれ次式で与えた。

$$- \int_0^a P_{upper}(x, t) x dx + \int_0^a P_{lower}(x, t) x dx = \frac{\pi H}{6 L} \rho g a^3 \left(1 - \cos \frac{2\pi t}{T} \right) \quad (0 \leq t \leq T/4) \quad (7)$$

$$F_{moor} = l_m r_{moor} k \sin \theta \quad (8)$$

ここで、 H は波高、 L は波長、 g は重力加速度、 r_{moor} は係留フックにおける係留ユニットへの接合点と扉体係留点との比、 k は係留ユニット内のバネ定数を示す。図-10に示すように、扉体上面に作用する水圧は、水面の勾配に依存し、扉体下面に作用する圧力は、扉体先端開口部直上の水深に依存する。式(7)では、扉体上の水面が、波浪の谷あるいは峰に差し掛かりほぼ水平となった状態を $t = 0s$ （圧力差なし）、扉体上の水面の勾配がもっとも急となった状態を $t = T/4s$ （圧力差最大）として、扉体上下面の圧力差を表している。運動方程式(6)は、扉体の浮上動作を定義した運動方程式(1)と同様、離散式(4)および(5)を用いて数値的に解くことで解を得た。

図-10 扉体係留状態における運動モデル

(2) 模型実験および実海域試験計測結果

模型実験および実海域試験における、波浪によって扉体に作用するモーメントと扉体が係留装置から受けるモーメントとの時間変化をそれぞれ図-11に示す。これらは、模型実験については波高 $H=15.2cm$ 、波周期 $T=1.81s$ 、波形勾配 $H/L=0.04$ の条件の下、実海域試験については有義波高 $H_{1/3}=0.204m$ 、有義波周期 $T_{1/3}=2.25s$ の条件の下で計測した結果を示している。図-11より、係留力によるモーメントは、波浪流体力によるモーメントに連動して変化しており、後者と比較して前者が小さくなっていることがわかる。これは、扉体が波浪から受ける外力の一部が、扉体を運動させるために用いられているためである。

図-11のケースについて、波浪流体力と係留力とによるモーメントの相関を図-12に示す。図中の一次関数は、各分布に対する線形近似曲線を示すものである。これらの試験ケースでは、扉体の動揺を許容したことにより、平均で、模型実験では53.7%、実海域試験では17.6%にまで、係留力が低減されていることがわかる。実海域試験では、波の入射方向が一樣ではなく、さらに、波浪観測点と扉体位置との間に数mの差があり位相差が生じるため、分布のばらつきが大きくなっている。

(3) 計算結果と試験結果の比較

図-13に、運動方程式を用いた計算、水理模型実験お

(a) 規則波を対象とした水理模型実験

(b) 不規則波を対象とした実海域試験

図-11 流体力および係留力によるモーメントの時間変化

(a) 水理模型実験

(b) 実海域試験

図-12 流体力および係留力によるモーメントの相関

および実海域試験のそれぞれの結果に関して、波浪流体力による最大モーメントに対して扉体の係留に必要な最大モーメントを、作用波の周期を横軸として実機のスケールにて示す。図中、実海域試験結果については、波の入射方向が一樣でなく、波高および波周期の条件も一定ではないため、当該海域で卓越する波周期帯における平均値として、破線にて記載した。

計算結果と実験結果の分布する領域は概ね一致しており、扉体の動揺を許容した係留方式を採用することで、係留装置への作用力が軽減できていることがわかる。このときの軽減率は、波の周期によって変わるものの、およそ50%～90%の間であった。また、作用波の周期が短いほど係留力の軽減効果が高くなる傾向がみられた。これは、扉体を短時間で急激に引き揚げようとする作用力に対して、扉体下部空間が負圧となって抵抗するため、係留装置自体に作用する荷重の割合が減少するためであると考えられる。他の条件での計算ケースにおいて、波周期30sの長周期波を対象とした場合であっても、扉体

係留力は3割程度軽減されることを確認した。非碎波の津波も含めて、こうした長周期の波浪は波形勾配自体が小さいため、波浪外力によって扉体に生じるモーメントそのものが小さく、フラップゲートへの影響は軽微と考えられる。図-13より、波形勾配の比較的大きいいくつかのケースでは、模型実験結果と計算結果との差異が大きくなる傾向がみられる。試験で用いたバネ系の固有周期は、扉体の付加質量も含めて、図-13のスケールにおいて3.25sであり、これが実験結果と計算結果との差異の要因とは考えがたい。一般的に波高の高い波は、波形が正弦曲線から外れて、波の谷が伝搬方向に広がり、峰が鋭くなる。こうした波では、図-14のように、波形の勾配が水平から最大斜度となるまでの時間が $T/4$ sより長くなるため、係留力の軽減効果が効きにくくなったものと予想される。

図-13 扉体係留に必要な最大モーメントの軽減率

図-14 波高が高いケースにおける波形の変化

5. おわりに

EVALUATION OF MOORING FORCE TO KEEP FLAP-GATE BREAKWATER LYING DOWN ON THE SEABED

Yuichiro KIMURA, Kyoichi NAKAYASU, Tohru ITAGAKI and Toshiaki MORII

Flap-gate tsunami breakwater, which lies down on the seabed and rises up with its buoyancy in occurrence of tsunamis has been developing. Flap-gate usually has buoyancy and mooring systems keep it lying down so as to shorten a rising time after earthquakes. Dynamic mooring forces of the gate have to be estimated to design these systems since they have to support wave pressure acting on the lying gate in addition to buoyancy of the gate. This study evaluated these forces through model experiments, field experiments, and calculation using equations of motions of the gate. As a result, it was confirmed that the mooring system that allows slight motions of the gate reduced mooring forces, and a method to estimate these forces was obtained. We can realize reliable coastal structures against tsunamis by using this result.

本研究では、水理模型実験、実海域試験装置および簡易な運動方程式を用いた計算を用いて、倒伏状態の扉体の係留力を評価した。これらの結果、所定の範囲内で扉体の動揺を許容できる係留方式を採用したことにより、扉体の係留に必要な係留力が作用波の周期に応じて軽減でき、その軽減率を簡易な運動方程式によって推定できることが確認できた。実機の係留装置においては、ここで評価した軽減率を見込まずに設計を行うことで、従来想定する安全率以上の信頼性を有する施設を実現することが可能となる。

謝辞：本実海域試験に関わる研究開発を共同で進める東洋建設株式会社および五洋建設株式会社には厚くお礼を申し上げます。また、本試験の実施にあたり、試験用地をご提供いただいた静岡県ならびに焼津市に感謝申し上げますとともに、本試験計画についてご指導いただいているフラップゲート実海域試験検討委員会を構成される有識者の方々にもお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 白井秀治, 永田修一, 藤田 孝, 新里英幸, 仲保京一, 高橋和夫 (2005) : 高潮・津波対策用のフラップ式可動ゲートの開発, 海洋開発論文集, 第 21 巻, pp.109-114.
- 2) 新里英幸, 木村雄一郎, 仲保京一, 藤田孝: 波浪中フラップゲート式可動防波堤の平面水槽実験, 海岸工学論文集, 第 56 巻, pp.851-855, 2009.
- 3) 木村雄一郎, 新里英幸, 仲保京一, 安田誠宏, 間瀬肇: 倒伏状態の津波・高潮対応フラップ式可動ゲートの係留特性に関する実験的研究, 海洋開発論文集, 第 25 巻, pp.93-98, 2009.
- 4) 木村雄一郎, 近本武, 吉田宏志, 下迫健一郎, 清宮理: フラップ式可動防波堤の実海域試験, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 第 68 巻, pp.240-245, 2012.
- 5) 清宮理, 下迫健一郎, 由井孝昌, 山下誠也, 椎名正樹, 土屋昌義: フラップ式水門の浮上・沈降挙動の解析, 海洋開発論文集, 第 22 巻, pp.691-696, 2006.