

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

EXPERIMENTAL STUDY ON MOORING CHARACTERISTICS OF FLAP TYPE GATE
AGAINST TSUNAMI AND STORM SURGE LYING DOWN ON A SEABED

木村雄一郎¹・新里英幸²・仲保京一³・安田誠宏⁴・間瀬肇⁵

Yuichiro KIMURA, Hideyuki NIIZATO, Kyoichi NAKAYASU, Tomohiro YASUDA and Hajime MASE

¹正会員 修(工) 日立造船株式会社 技術研究所 (〒551-0022 大阪市大正区船町2-2-11)

²正会員 工修 日立造船株式会社 技術研究所 (〒551-0022 大阪市大正区船町2-2-11)

³正会員 日立造船株式会社 産業機械事業部 設計部 (〒592-8331 大阪府堺市西区築港新町1-5-1)

⁴正会員 博(工) 京都大学助教 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁵正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

A flap type gate is a new structure for coastal disaster reduction that lies down on a seabed, and rises up through sea surface with buoyancy in occurrence of tsunami or storm surge. In past studies, it has been confirmed that the flap gate has capabilities against tsunamis. In order to improve reliability of rising up when tsunami or surge comes, the flap gate is made to have buoyancy and is kept lying down by mooring systems. Consequentially, mooring characteristics of the flap gate, caused by waves, determine the design of their systems. In this paper, two-dimensional hydraulic experiments were carried out in a wave channel using regular waves and tsunamis, and stresses of mooring systems were investigated. It was confirmed that their stresses were reduced by controlling gaps between gates and storage of gates and permitting flutters of gates.

Key Words: Gate, flap, tsunami, wave, mooring characteristics, hydraulic experiment

1. はじめに

東海, 東南海および南海地震津波の発生が危惧される中, 被害が懸念される地域では, 津波防災施設の整備を進めている。現在開発中のフラップゲート式可動防波堤(以下, フラップゲート)は, 扉体, 函体およびテンションロッドを主要な部材として構成される津波・高潮対応防波堤である(図-1参照)。扉体は, 一端を回転支承として函体に連結し, 他端に与えた浮力を利用して水面まで浮上し港口を閉鎖する。テンションロッドは, 上部ロッドおよび下部ロッドの2つの部材から成り, 起立した扉体に作用する水压荷重を支持する。筆者らは, 従来の研究¹⁾²⁾において, フラップゲートが津波に対して十分な防災性能を有していることを確認している。また, フラップゲートは, 建設費ならびに維持管理費が既存の防災施設と比較して安価であり, 防災関係者や学識者からも早期実用化が期待されている。

フラップゲートは, 災害時の起立動作の信頼性を高

めるとともに, 扉体の浮上力を常時から監視するため, 扉体には常時から浮力を与え, 函体部から係留部材により鉛直下向きに荷重を加えることで倒伏状態を保持する(図-2参照)。静水中において, 扉体を倒伏状態に保持するために必要な係留力については, 静力学的な力の釣り合いから容易に算出できる。しかし, 倒伏状態のフラップゲート上に波浪が通過する際の係留力の変動については, その算定は容易ではない。そこで本論文では, 倒伏状態のフラップゲート上に波浪が作用する際の係留力を測定することを目的として, 2次元造波水槽にて規則波を用いた水理模型実験を実施した。

また, 津波の発生が予期される際, 扉体の浮上は, 扉体を係留する装置のロックを解除することで行う。フラップゲートには, 万が一, ロック解除装置に不具合が生じた場合でも, 扉体の起立動作が確実に行えるよう, 前者とは異なる系統のロック解除機構も備えている。筆者らは, 扉体の起立動作の確実性をさらに向上させるため, 倒伏状態の扉体に作用する津波波力を利用することを考えている。そこで, 倒伏状態の扉体に段波津波が作用した際の, 扉体に生じる波力特性を

把握し、係留機構への作用力を計測することを目的として、2次元造波水槽にて孤立波を用いた段波津波実験を実施した。

規則波実験および段波津波実験には、同一のフラップゲート模型を用いた。これらの実験により、合理的かつ経済的な係留機構を設計することが可能となり、扉体の起立動作の确实性をより向上させることができる。

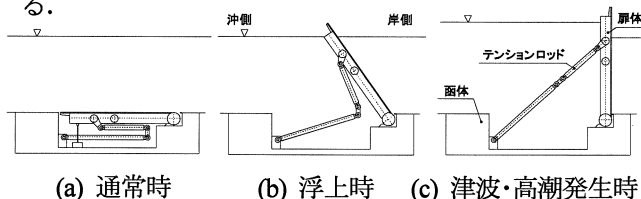


図-1 フラップゲートの概略図

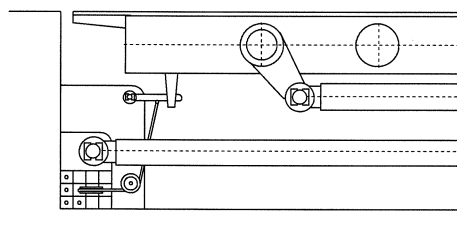


図-2 実機の扉体係留機構

2. 規則波実験

(1) 実験方法

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。実験装置全体の概略を図-3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、実機の扉体一門の高さは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となる。水槽幅は1mであるため、実験模型は扉体3門を有した構造とした。3門の扉体は、それぞれ独立して可動でき、隣接する扉体間の隙間は3mmとした。外側の扉体と水槽壁面との隙間も3mmとなるように、アクリル板を用いて水槽幅を調整した。隣接する扉体間および扉体と水槽壁面との隙間面積は、扉体面積に対して約1%に相当する。実験模型は、SUS鋼を用いて作成し、扉体の浮力および慣性モーメントは、ウレタン製の浮力体を用いて実機の場合と合うように調整した。各扉体の係留は、扉体回転軸から62.0cmの位置に設けた治具より、SUS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。

倒伏した扉体の上を波浪が作用する際、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周期が4s～16sの規則波を用いた。規則波の波形勾配は0.01～0.04とした。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に、2台の容量式波高計を用いた。波浪によって扉体に作用

する浮上力は、波の入射方向にわたって扉体の上面（P1～P3）および下面（P4～P6）に3箇所ずつ一列に設置した圧力計より算出した。具体的には、上面と下面の圧力計より差圧を求め、3点の差圧を用いて最小二乗法により直線近似した関数を導き、扉体回転軸からの距離を関数に乗じた上で、扉体長さにわたって積分したものを波浪による起立モーメントと定義した。扉体に作用する浮上力に抵抗するための係留力は、各扉体を係留するワイヤロープの他端をそれぞれロードセルに接合することで、荷重の計測を行った。実機では、所定の扉体動揺量を許容するために、係留装置にバネを用いる。実験模型においても、ワイヤロープとロードセルの間にコイルバネを挿入し、扉体の動揺を許容できる構造とした（図-4参照）。コイルバネは、バネ定数が0.80N/mm、3.27N/mm、8.65N/mm、および15.5N/mmの4種類のものを使用した。各扉体の先端と函体の間には隙間がある。この隙間の幅を調整するための調整板を扉体先端に設置した。調整板を用いて、扉体先端と函体との隙間を7mm、17mm、および27mmと変えて実験を行った。それぞれの隙間面積は、扉体の面積に対して1.0%、2.5%、および4.0%に相当する。係留力についても、回転軸から係留点までの距離を乗じることで係留モーメントとして定義し、起立モーメントと比較できるようにした。起立モーメントおよび係留モーメントは、静水圧、扉体長さ（71.7cm）および扉体幅（32.5cm）を用いて無次元化を行った。扉体の回転角度は、ロードセルにて計測した作用荷重をバネ定数で除することにより算出した。

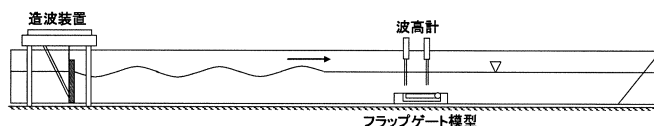
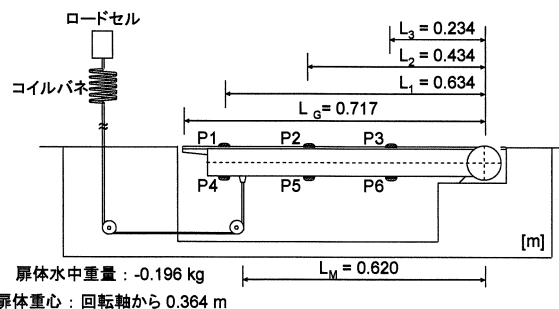


図-3 規則波実験の実験装置の概略図

表-1 規則波実験の条件

実機 波周期 (s)	模型 波高 (cm)				
	H/L=0.01	H/L=0.02	H/L=0.03	H/L=0.04	
4.0	0.722	0.815	1.63	2.44	3.26
6.0	1.083	1.77	-	-	7.09
8.0	1.444	2.81	-	-	11.3
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



扉体水中重量：-0.196 kg
扉体重心：回転軸から0.364 m

図-4 起立モーメントを測定するための圧力計と係留モーメントを測定するためのロードセルの設置状況

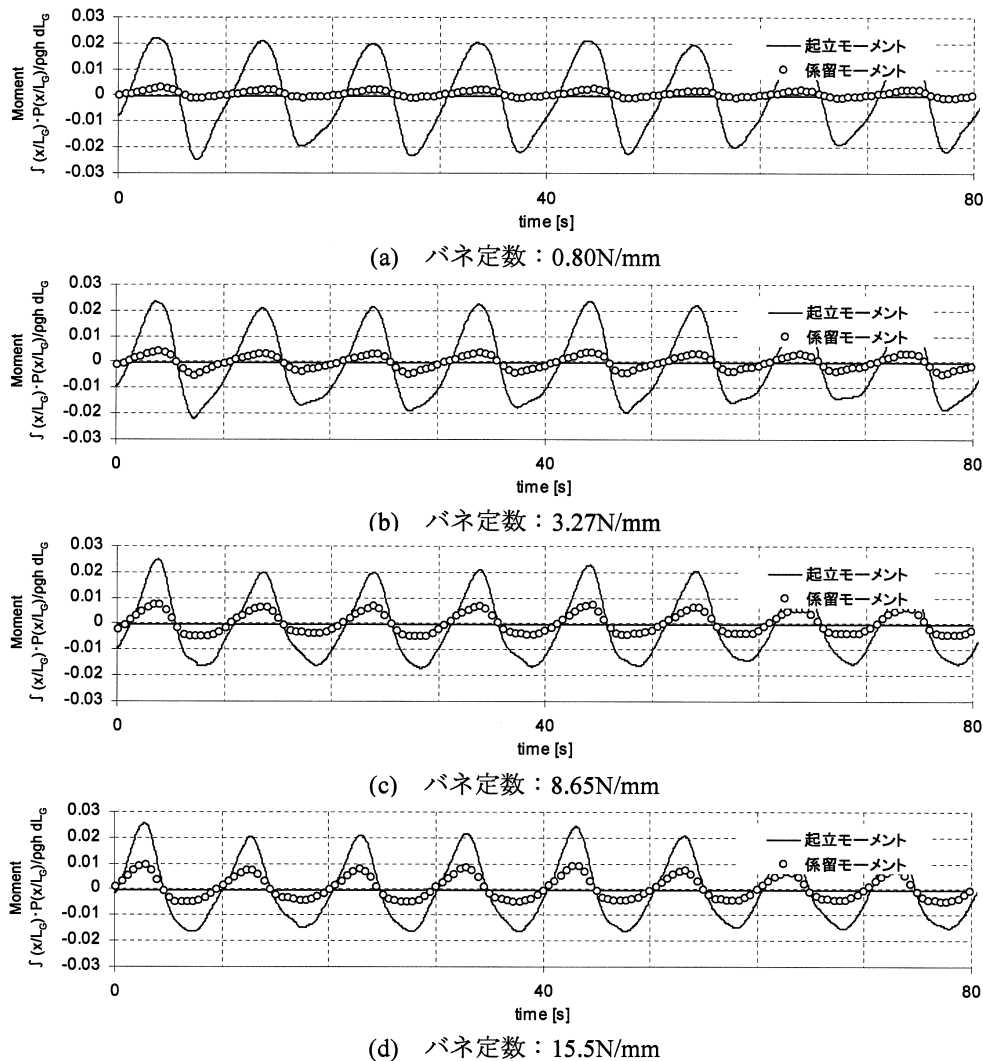


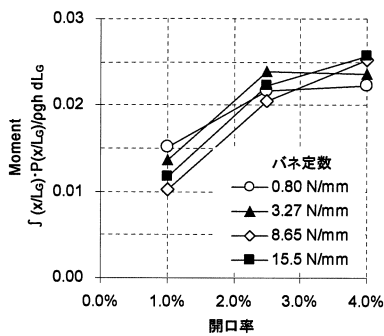
図-5 周期10秒，波形勾配0.04の規則波作用時の扉体起立モーメントおよび係留モーメント

(2) 実験結果と考察

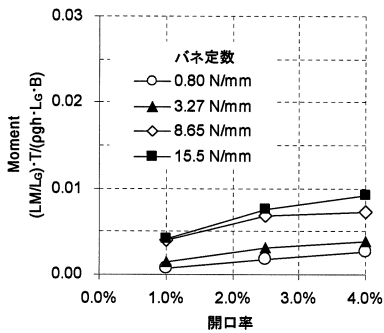
図-5は，扉体先端の開口率を4%に調節したフラップゲートに，周期10s，波形勾配0.04の規則波を作用させた際に生じる扉体の起立モーメントおよび係留モーメントの時間変化を示したものである。ここで，横軸は実海域スケールでの時間，縦軸は無次元化したモーメントである。図-5より，起立モーメントおよび係留モーメントは作用する規則波の周期と同期した。図-6に，図-5と同一の条件の規則波をフラップゲートに作用させた際の，(a)最大起立モーメントおよび(b)最大係留モーメントを示す。図-6では，横軸に扉体先端の開口率，縦軸には無次元化したモーメントを示す。図-5および図-6より，扉体の係留にバネ定数の大きいバネを用いるほど，係留モーメントは増大した。また，扉体先端の開口率を大きくすると，起立モーメントおよび係留モーメントは共に増加した。図-7は，(a)0.80N/mmおよび(b)15.5N/mmのバネ定数のバネを用いて扉体を係留したフラップゲートに，周期4s～16s，波形勾配0.04の規則波を作用させた際の最大起立モーメントを示したものである。図-7では，横軸に実海域スケールでの波周期，縦軸には無次元化したモーメントを示す。図-7より，特定のケースで最大起立モー

メントが若干落ち込んでいるものの，作用する規則波の周期が長くなるにつれて，最大起立モーメントは増加する傾向がみられた。図-8に，図-7と同一の係留バネを用いたフラップゲートに，図-7と同一の規則波を作用させたときの扉体の回転動揺振幅を示す。図-8では，横軸に実海域スケールの波周期を，縦軸に弧度を示す。この図からわかるように，硬いバネを用いた実験ケースほど動揺角度は小さくなり，作用する規則波の周期が長くなるにつれて動揺角度が増加した。

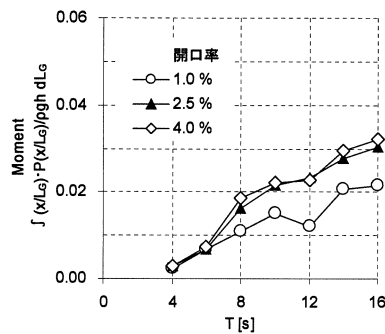
扉体に生じる起立モーメントは，扉体の上面および下面の圧力差に起因する。扉体上面の圧力は，その地点の静圧に依存し，扉体下面の圧力は，扉体の先端あるいは扉間の隙間から伝播する圧力に依存する。扉体の先端部の開口率がゼロであった場合を仮定すると，扉体下側の圧力は，扉体上面の静水圧が扉間から下方に伝播するだけであるため，扉体の上下面に圧力差は生じない。扉体先端の開口率が扉間の開口率と比べて大きい場合，扉体下側の圧力は，扉体先端の開口部から伝播する圧力に支配されるため，扉体の上下で圧力差が生じやすい状態になる。扉体上の波高計で計測した水位および扉体の起立モーメントの時系列データを比較すると，扉体先端の開口部の水位が，扉体上の水



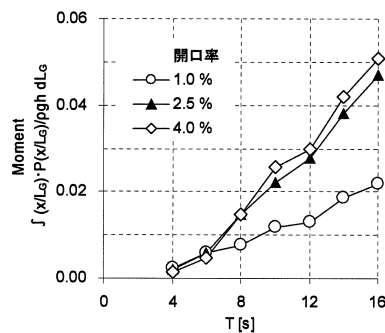
(a) 起立モーメント



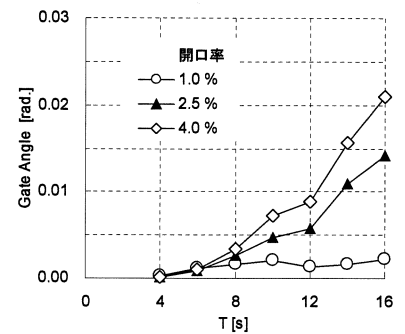
(b) 係留モーメント



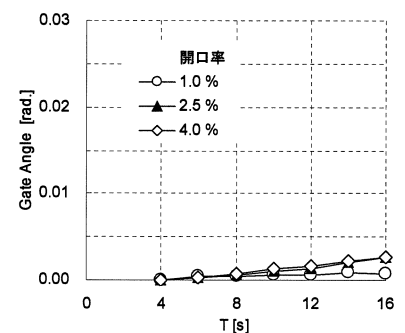
(a) バネ定数：0.80N/mm



(b) バネ定数：15.5N/mm



(a) バネ定数：0.80N/mm



(b) バネ定数：15.5N/mm

図-6 扉体に作用する最大モーメント

図-7 扉体に生じる最大起立モーメント

図-8 扉体の回転動揺角

位より高いとき、つまり、扉体上の水面の勾配が負となると、起立モーメントが正となる事が確認できている。これらの結果より、扉体先端の開口率が大きいほど扉体に生じる起立モーメントは増大すると考えられる。

扉体に生じる起立モーメントが、扉体上下の圧力差によって生じることは先に述べた。図-7 (a) および (b) の開口率 4.0% の実験ケースを比較すると、柔らかいバネを用いて係留することで、起立モーメントは約 6 割に減少している。これは、扉体が動揺したことにより、扉体下側の圧力上昇を緩和できたためである。(a) および (b) のバネに、同一の荷重を作用させると、(a) のバネは (b) のバネの約 20 倍変位する。前者のバネに作用する荷重が、後者のバネに作用する荷重の 6 割であれば、前者のバネは、後者のバネの約 12 倍の変位を生じるはずである。しかし、図-8 (a) および (b) の開口率 4.0% の実験ケースを比較すると、(a) のケースの動揺角度は、(b) のケースの動揺角度の約 8 倍でしかない。これは、係留機構以外の抗力が扉体の起立を抑制していることを示している。図-8 より、扉体の先端の開口率が小さいケースほど、扉体の動揺角度はより小さく、扉体の起立を抑制する抗力が大きくなる事を示す。これらの結果より、扉体の起立を抑制しているのは、扉体の開口部から流入出する水の抵抗であると推察できる。つまり、扉体先端の開口率を小さくし、扉体の動揺を許容する係留機構を用いることで、係留部材に生じる負荷を軽減させることができる。

扉体先端の真上の波高と起立モーメントの位相差を図-9 に示す。図-9 より、扉体に生じる起立モーメント

は、扉体上の水面の波形が $\theta = \pi$ に差し掛かった付近で最大値を示している。これは、正弦曲線の勾配は、 $\theta = \pi$ において負の傾きが最大となるためである。本研究の実験条件において、周期 4s の規則波の波長は、扉体の長さと同程度であり、扉体に大きな起立モーメントを作用させることはない。波長が扉体長さに対して十分に長い正弦波形については、波形勾配が同一であった場合、扉体上の水面勾配（あるいは、負の水面勾配）の最大値は一定値に近づくはずであり、扉体に生じる最大起立モーメントも一定値に近づくはずである。しかし、扉体に生じる起立モーメントは、図-7 に示すように増加する傾向を示す。周期の長い波を水槽で造波すると、波の峰は切り立ち、波の谷は平滑化されて、正弦曲線から徐々に外れる。このような波形の波では、 $\theta = \pi$ で負の勾配が最大とはならず、位相は $\theta = \pi/2$ の方向にずれる、勾配もより急峻となる。図-9 より、波周期が長くなるほど、最大起立モーメントの位相が $\theta = \pi$ から $\theta = \pi/2$ の方向に徐々にずれていることから、この現象は明らかである。これらの結果より、本実験の条件では、周期の長い波ほど、最大勾配を与える位相が波の峰側に近づき、波形の最大勾配が増大するため、扉体に生じる最大起立モーメントも増加すると考えられる。

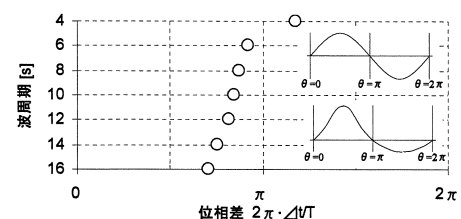


図-9 波形と最大起立モーメントの位相差

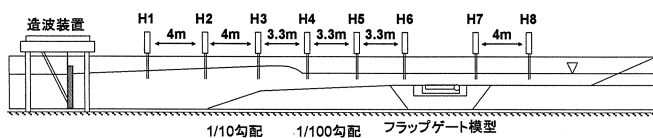
3. 段波津波実験

(1) 実験方法

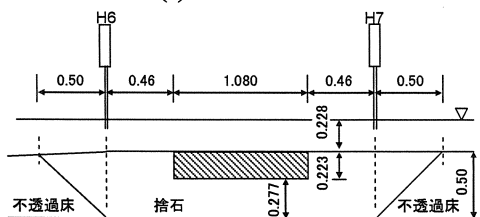
実験は、長さ 50m、幅 1m の造波水槽にて、規則波実験と同一のフラップゲート模型を用いて実施した。隣接する扉体の隙間および外側の扉体と水槽壁面との隙間も、規則波実験と同様に 3mm となるように調整した。扉体先端と函体の隙間についても、扉体先端に設置した調節板を用いて、7mm、17mm、および 27mm と隙間の開口量を変えて実験を行った。段波津波は、引波津波によって水位が低下したときに発生すると想定し、実験水深は、実海域のスケールで 7m とした（実験のスケールでは水深 22.8cm）。段波津波を作成するため、水槽内には、砂と半透過性のマットを用いて傾斜面を構築した。傾斜面は、1/10 勾配の斜面を 4m 作成し、その後、1/100 勾配の斜面を 10m にわたって作成した。傾斜面の背後にフラップゲート模型を設置し、模型の周囲は碎石によって構築した。実験模型の概略を図-10 に、実験模型の写真を図-11 に示す。

波高の計測には、計 8 台の波高計を用いた。使用した波高計を沖側から順に H1 ～ H8 とした。H1 は 1/10 勾配の沖側、H2 は 1/10 勾配の開始位置、H3 は 1/10 勾配と 1/100 勾配の境界、H4 および H5 は 1/100 勾配域をそれぞれ 3 等分した位置、H6 は模型の直前、H7 は模型の直後および H8 は H7 の 4m 背後に、それぞれ設置した。扉体に生じる起立モーメントは、規則波実験と同一の方法にて算出した。扉体の係留方法および係留に用いる 4 種類のパネについても、規則波実験と同じ条件とし、係留モーメントを算出した。計測のサンプリング間隔は 10ms（100Hz）とし、計測時間は造波開始後 60 秒間とした。

実験では、波高が水深とほぼ同一となるように調整した段波津波を使用し、模型直前で碎波する碎波段波と、模型より十分に沖側で碎波して到来する波状段波を用いた。実験で使った碎波段波および波状段波の時間波形を図-12 に示す。図-12 では、横軸を実海域スケールの時間、縦軸を波高水深比とする。



(a) 模型全体



(b) 模型周囲

図-10 実験模型の概略図

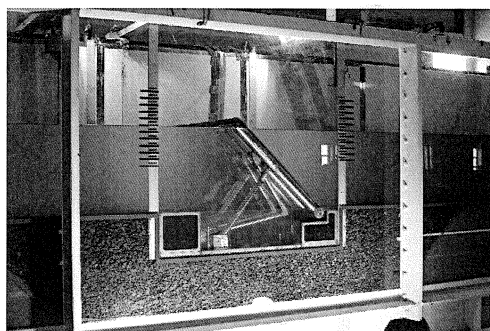
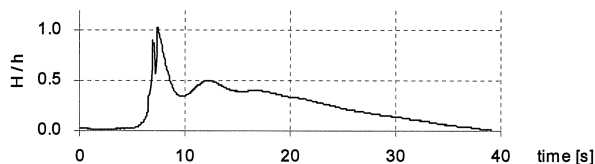
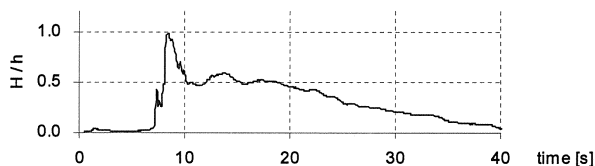


図-11 フラップゲート実験模型（浮上状態）
（写真左が沖側、写真右が岸側）



(a) 碎波段波



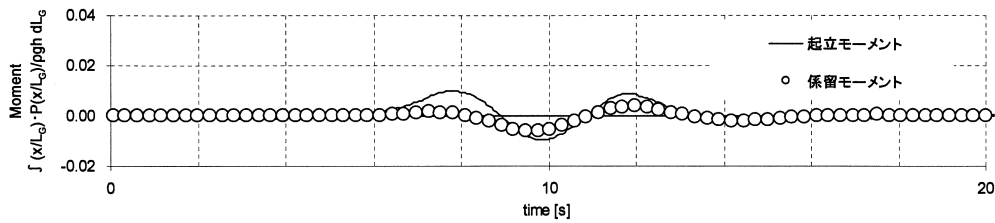
(b) 波状段波

図-12 実験で使った段波の時間波形（H6にて計測）

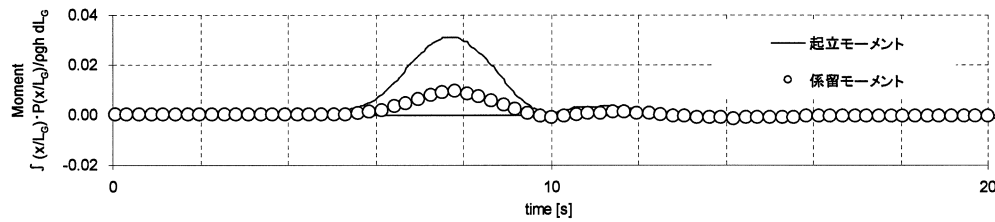
(2) 実験結果と考察

図-13は、バネ定数 15.5N/mm のバネを用いて係留したフラップゲートに碎波段波を作用させた際の扉体に生じる起立モーメントおよび係留モーメントを示したものである。図-13(a)は扉体先端の開口率を 1.0% としたケース、(b)は扉体先端の開口率を 4.0% としたケースであり、それぞれの図において、横軸は実海域スケールの時間、縦軸は無次元化したモーメントを示す。図-13より、(a) 扉体先端の開口率が 1.0% のケースでは、扉体に上向きの力が作用し、その後、下向きの力に転じた。一方、(b) 扉体先端の開口率が 4.0% のケースでは、前者と比較して上向きに大きな力を受けるが、下向きの力は作用しなかった。図-14に、扉体先端の開口率、係留バネのバネ定数、および作用段波の条件を変えて実験を行った際の、扉体に生じる最大起立モーメントおよび最大係留モーメントを示す。図-14より、扉体先端の開口率が大きくなるほど、扉体に生じる起立モーメントの最大値は大きく、柔らかいバネを用いて係留したケースほど、扉体の係留に必要な係留モーメントは小さかった。また、作用段波の違いについては、結果に顕著な違いは見られなかった。

規則波実験の考察において、扉体下面の圧力は、扉体先端の開口と扉間の開口から伝播する圧力に依存し、扉体先端の開口率が扉間の開口率と比較して大きいケースほど、先端側から伝播する圧力の影響を強く受けることを示した。図-13(a)および(b)より、双方の実験ケースとも扉体は最初に上向きの力を受けている。



(a) 扉体先端の開口率：1.0%



(b) 扉体先端の開口率：4.0%

図-13 倒伏したフラップゲートに砕波段波を作用させた際に扉体に生じる起立および係留モーメント

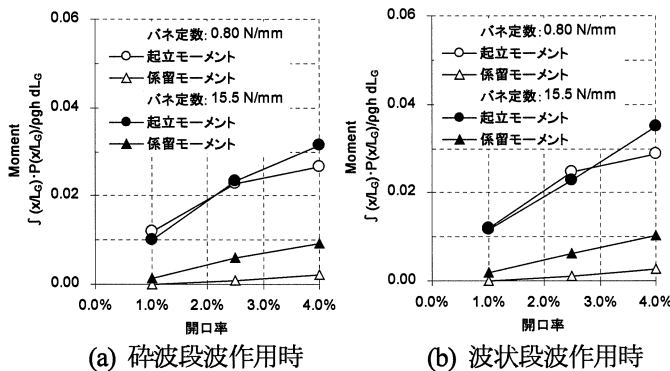


図-14 段波作用時に扉体に生じる最大起立モーメントと最大係留モーメント

これらの力は、沖側から到来した段波が、扉体先端の開口部の上に差し掛かったときに生じたものである。扉体先端部の水位が段波の到来によって上昇すると、扉体下側の閉空間の圧力が高まるため、扉体にはそれぞれ上向きの力が作用する。この時点では、扉体上の圧力は上昇していないため、扉間から伝播する圧力の影響を相対的に強く受ける (a) のケースでは、扉体下面の圧力が (b) のケースほど上昇しない。この両者の違いにより、それぞれのケースで扉体に上向きに作用する力の大きさが異なった。図-13より、上向きの力が作用した後、(a) のケースでは下向きの力が扉体に作用し、(b) のケースではいずれの向きにも力を受けない中立的な状態に復帰した。これらの状態は、扉体上に段波が到達した際に、扉体に作用する力を表している。図-13 (b) のケースでは、扉体下側の空間の圧力は、扉体先端から伝播する圧力に支配され、扉体先端の開口部の真上に段波が到達した時点で、扉体下側の空間の圧力は十分に上昇した。そのため、段波が扉体上に達しても、扉体の上下面の圧力差が小さく、扉体は大きな力を受けず中立的な状態に復帰したと推測される。図-13 (a) のケースでは、扉体先端の開口部に段波が到達した際、扉体下側の空間の圧力は十分には上昇しなかった。そのため、扉体上に段波が到達すると、扉体の上面の圧

力が下面よりも高く、扉体には下向きの力が生じたと推測できる。図-7および図-14より、段波津波によって扉体に生じる最大起立モーメントは、周期 12s ~ 14s の規則波により生じる起立モーメントと同程度であった。

4. まとめ

本研究を通して得られた主要な結論を以下に示す。

- ① 扉体に生じる起立モーメントは扉体上の水面勾配に依存する。
- ② 扉体先端の開口を扉間の開口と比較して狭くすることで、扉体に生じる起立モーメントを低減できる。
- ③ 扉体の動揺を許容できる係留機構を採用することで、扉体の係留に必要な係留力を低減できる。
- ④ 倒伏した扉体が段波津波により起立力を受ける要因は、規則波と同様に扉体上下の静水圧差により説明できる。
- ⑤ 段波津波による倒伏状態の扉体への作用力は、周期 12s ~ 14s の規則波による作用力と同程度であった。

本実験は、2次元造波水槽にて実施したが、倒伏状態の扉体に作用する起立力は水面の勾配に依存するため、今後、3次元的な検討も必要と考えられる。また、数値解析によるアプローチも検討したい。

参考文献

- 1) 白井秀治ほか：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.109-114，2005。
- 2) 白井秀治ほか：フラップ式可動ゲートの津波低減性能に関する模型実験，海洋開発論文集，第22巻，pp.577-582，2006。
- 3) 木村雄一郎ほか：フラップ式可動ゲートの津波低減性能に関する模型実験（その2），海洋開発論文集，第23巻，pp.93-98，2007。
- 4) 中野修ほか：ALE法による2次元動揺数値解析を用いた浮体式カーテンウォールの動揺・波力特性評価，海岸工学論文集，第47巻，pp.851-855，2000。