

フラップゲート式可動防波堤の波浪・津波応答に関する模型実験

木村雄一郎*・新里英幸**・仲保京一**・安田誠宏・間瀬 肇

* 京都大学大学院工学研究科

** 日立造船株式会社

要 旨

フラップゲート式可動防波堤は、通常海底に倒伏し、津波あるいは高潮発生時には浮力を利用して浮上し、短時間で港口を閉鎖できる可動式の防波堤である。本研究は、フラップゲートの実用化に向けて、海底倒伏状態あるいは浮上状態のフラップゲートの波浪応答特性を模型実験により評価するものである。実験は、長さ50m、幅1mの2次元造波水槽を用いて、模型縮尺1/30で実施した。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ある。実験では、規則波および段波性の津波をフラップゲート模型に作用させ、波圧、扉体角度などについて計測を行った。実験の結果、倒伏した扉体の係留特性およびフラップゲート特有の動揺特性や波圧特性を評価することができた。

キーワード: フラップゲート, 津波, 模型実験, 係留特性, 波圧, 扉体動揺

1. 緒 論

わが国は四方を海に囲まれ、沿岸の平野部に人口および中枢的な諸機能が集中する。このため、わが国における自然災害の中で、津波災害および高潮災害は極めて重大な被害をもたらす。津波は他の自然災害と比較して発生の頻度が少ない。そのため、大津波をきっかけとして集中的な研究がなされ、その都度対策が講じられてきた。しかし、その発生数の少なさゆえ津波の実体について明らかでない点も多く、また対策費用にも制限があるため、防災対策は遅れがちである。一方、高潮は、気象予報技術の進歩に伴い、近年では高い精度でその発生が予測できるようになってきた。とはいえ、台風0416号、台風0418号あるいは台風0423号等による高潮被害は、わが国の広い地域で深い爪跡を残したことも事実である。

津波あるいは高潮に対する沿岸防災施設には、防波堤および水門等がある。津波対策の防波堤は、特に津波防波堤と呼ばれ、大船渡、釜石あるいは須崎などで整備が進められ、港口の遮蔽率を高め港内水位の上昇を低減させることを目的とする。一方、水門については、津波対策水門あるいは高潮対策水門の双方の施設があり、それぞれゲートの形式に特徴

があるものの、河川あるいは水路を横断して設置される施設である。本研究が対象とするフラップゲート式可動防波堤（以下、フラップゲート）は、津波防波堤および水門、双方の機能を有する施設である。

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。フラップゲートの構造については次章においてその詳細を示すが、扉体は通常海底に倒伏した状態で保持され、津波・高潮の発生が予測される際には浮力を用いて浮上し、短時間で港口を閉鎖できる。従来の津波・高潮防災施設は、海水交換を妨げ港内の水質を低下させる、景観設計上支障をきたす、あるいは大型施設の構築が困難となる等の課題を有していた。しかし、フラップゲートは通常海底に倒伏しているため、海水の交換を妨げず、景観への影響も小さい。また、フラップゲートの扉体部は、海底に設置された水平軸を回転中心として起伏するため、港口部の径間に対する制限がない。さらに、フラップゲートは、従来の施設と比較して、建設費用ならびに維持管理費用の大幅な削減が可能である。

このように、フラップゲートは従来の防災施設と比較して多くの利点を有している。これまでに、白井ら（2005；2006）によって、フラップゲートの防災施設としての有用性については確認されているも

の、製品としての機能を保証する上で、いくつかの検討すべき課題も残されている。本研究は、フラップゲートを実用化する上で、製品の機能保証に必要なデータを収集し評価するものである。従来、浮体式カーテンウォール（中野ら，2000）あるいは浮消波堤（肥後ら，2002）など作用波に追従して動揺する構造物や、固定式の構造物（例えば、水谷ら，2000；池野ら，2005）を対象とした波力評価に関する研究は多くなされている。しかしながら、フラップゲートとは波力に対する支持方式が異なる上、海底に倒伏する構造物を対象とした研究例はみられない。本研究では、①波浪による海底の圧力変動が倒伏したフラップゲートに与える影響の評価、②浮上したフラップゲートの周期波に対する動揺特性および波圧特性の評価、ならびに、③浮上したフラップゲートの津波に対する応答特性の評価を行うことを目的とし、2次元造波水槽を用いた水理模型実験を実施した。以下、フラップゲートの構造および各模型実験の内容について示す。

2. フラップゲートの構造および運用の方法

フラップゲートが浮上・起立する様子を Fig.1 に示す。フラップゲートの扉体は通常海底に倒伏した状態に保持され、津波あるいは高潮の発生が予測される際には、浮力を用いて浮上し港口を閉鎖する。そ

の後に生じる港外水位の上昇により、扉体は所定の角度まで起立して連続壁をなす。テンションロッドは、上部ロッドおよび下部ロッドの2つの部材からなり、扉体が起立した際には、扉体に作用する水圧荷重を支持する。また、下部テンションロッドには抵抗板が設置され、その流体抵抗により扉体の急激な起立動作を抑制できる。扉体は扉体を格納するとともに、扉体回転軸およびテンションロッドを介して、扉体を受ける水圧荷重を地盤内に伝達する。

扉体は、Fig.2 (b) に示すように、隣接する扉体との間に所定の隙間を持たせて、水路を横断する方向に連続して配置される。津波対策のフラップゲートでは、扉体間の隙間は、扉体幅の1%を目安に設計される。実機の扉体幅は10mを標準とするため、実機における扉体の隙間は10cmに相当する。フラップゲートを高潮対応として使用する場合は、ゴム製の膜を用いて扉体間の隙間を止水し、扉体からの漏水を抑制する。隣接する扉体の先端同士は、ワイヤロープを用いて接続され、各扉体が独立して動揺しないような構造が採用される。これにより、斜めから入射する波が扉体に作用した場合でも、扉体間の隙間は増大しない。扉体は、縦主桁、水平桁、回転軸およびスキンプレートにより構成される (Fig.2(a) および (b) 参照)。縦主桁間には、扉体に浮力を与える1対の空気室が設けられる。万一、空気室の一方が浸水した場合であっても、他方の空気室の浮力および

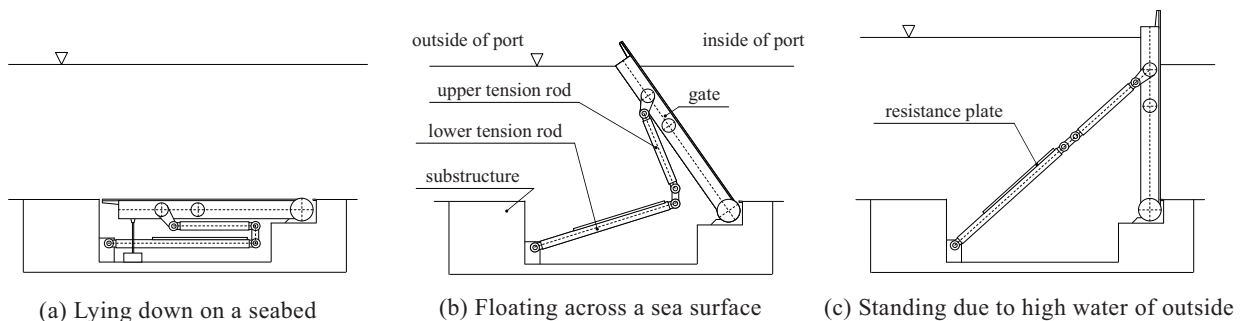


Fig.1 Behavior of the flapgate rising up from a seabed

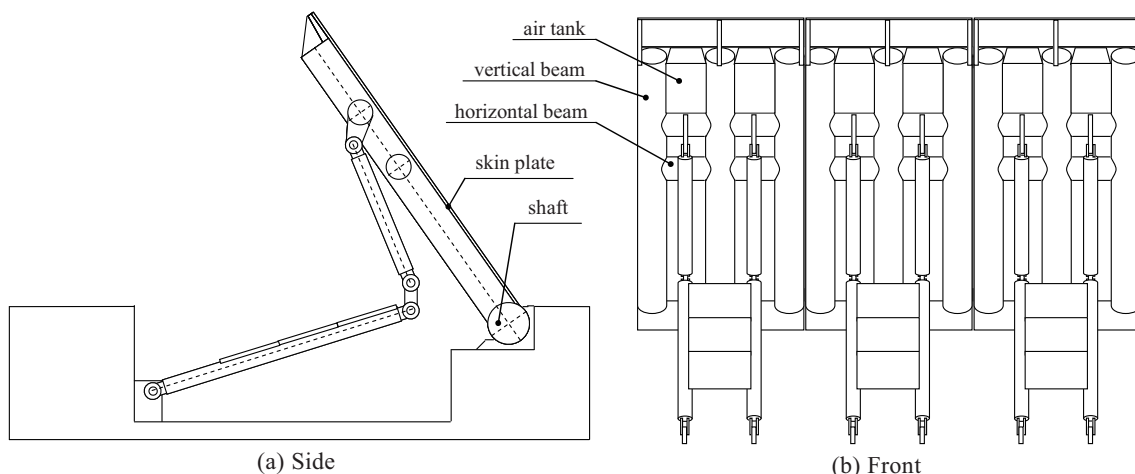


Fig.2 Structure of gates

隣接する扉体から接合されるワイヤロープによる牽引力によって、扉体は浮上することができるよう設計される。テンションロッドは、一端が上部水平桁に接合され、他端は函体に接続される。

扉体は常時浮力を有した状態に保たれ、係留装置によって扉体の先端に下向きの荷重を加えることで、扉体の倒伏状態は保持される。扉体空気室への空気送人を通常時に行い、常時から扉体に浮力を与えることで、津波発生時の浮上に要する時間を短縮できる。さらに、扉体の係留に必要な荷重を常時監視することにより、扉体の持つ浮上力を常に担保でき、浮上動作に対する信頼性を高めることができる。空気室への送気は、空気室直下の配管より気泡状の空気を供給することで行われる。また、空気室からの排気については、扉体先端付近に設置された排気バルブを開放することで行う。係留機構はFig.3に示すように、係留フック、トルクアームおよび転向リンクアーム等により構成される。扉体の倒伏は、扉体先端に掛かる係留フックによって保持されている。係留フックの操作は、トルクアーム、転向リンクアームおよびロッドを経て、フラップゲートの側部に設置される機械室にて行われる。

通常、扉体はFig.4(a)の状態に係留されている。扉体の浮上は、Fig.4(b)に示すように係留フックを緩めることにより行う。フックによる係留が解除された後は、浮力と自重が均衡する角度まで扉体は浮上する。津波あるいは高潮が収束した後、扉体先端部の排気バルブから空気室内の空気を排除することで、扉体は倒伏を始める。扉体は係留フックを押し下げて(Fig.4(c)参照)着底し、係留フックはカウンターウェイトの重みにより水平位置に復帰する(Fig.4(d)参照)。その後、扉体空気室への給気により、扉体はFig.4(a)の状態まで浮上し、通常係留状態となる。扉体が海底で保持されている状態においても、フラップゲート上を通過する波浪による水圧変動によって、扉体には流体力が作用する。そのため、係留フックを所定の角度で完全に固定して扉体を係留すると、非常に大きな荷重が局所的にフックに作用することとなる。係留フックに作用するこれらの荷重を軽減するために、フックは所定の範囲内で動揺できるように、扉体の浮力に相当する初期張力を与えたコイルバネを介して支持されている。コイルバネは、係留フックを操作する機械室内に設けられており、その変位量は作用荷重とともに常時監視されている。

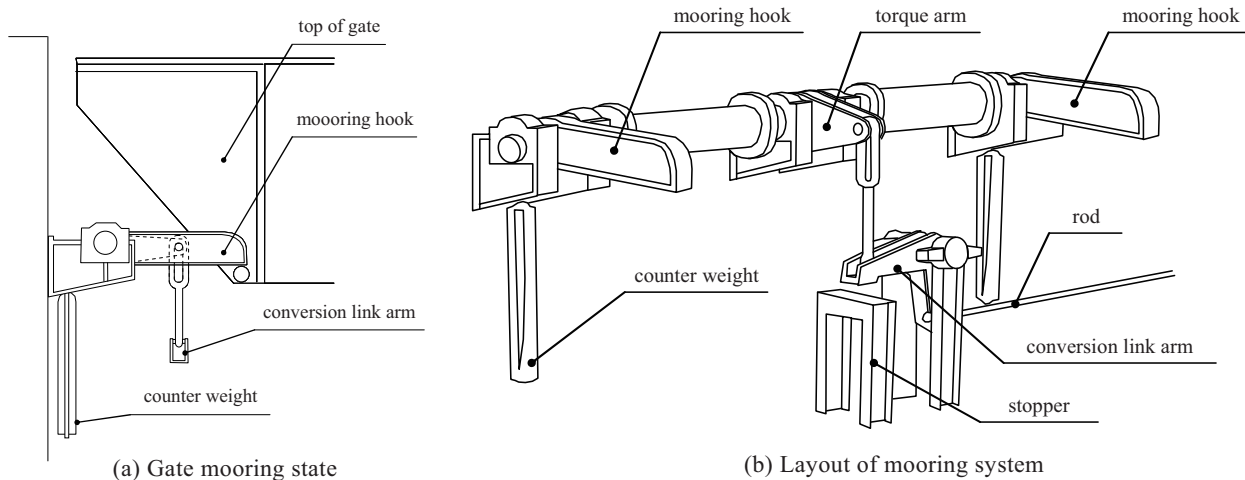


Fig.3 Gate mooring system

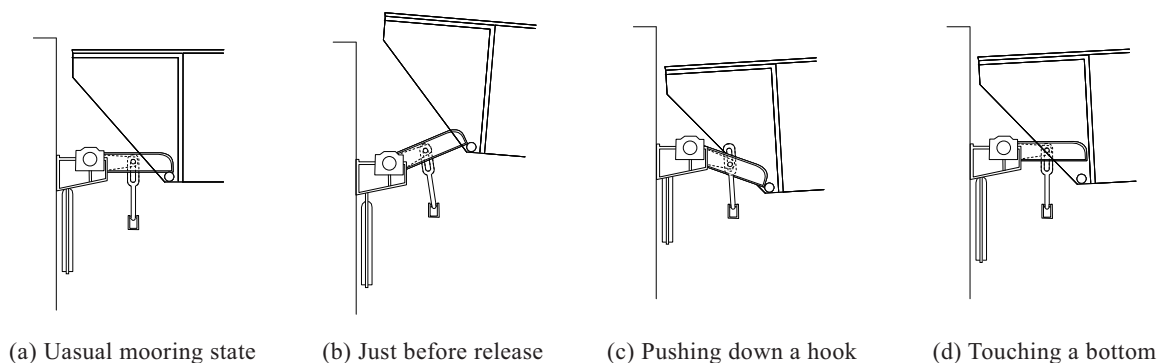


Fig.4 Way of releasing moorage system and re-moorage

3. 海底に倒伏した扉体の係留特性評価

本章にて記載する模型実験は、係留機構の最適設計のため、倒伏状態の扉体に作用する波浪流体力を評価するものである。以下、実験の方法、実験結果と考察について述べる。

3.1 実験の方法

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 Fig.5 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 に相当する。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条件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通過する際、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 に相当する）。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 (=H/L) は 0.01~0.04 とした。規則波の諸元を Table 1 に示す。ここで、H は波高、L は波長を示す。

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流体力による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 (Fig.6 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。実験では、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 の 3 条件に設定した。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。ロードセルにて計測する係留力についても、回転軸から係留点までの距離 L_M (= 62.0cm) を乗じることで係留力によるモーメントとして定義し、波浪流体力によるモーメントと比較できるようにした。流体力によるモーメントおよび係留力によるモーメントは、静水圧 ρgh (= 3.52kPa, ρ : 水の密度, g : 重力加速度, h : 水深), 扉体長さ L_G (= 71.7cm) および扉体幅 B (= 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。

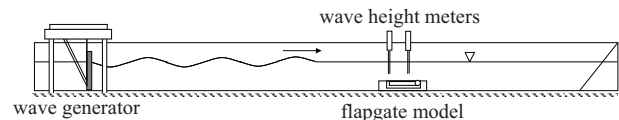
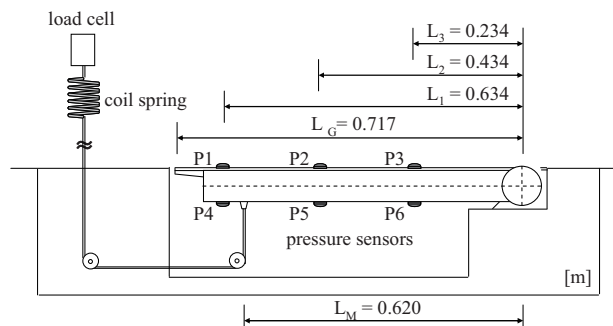


Fig.5 Two-dimensional water channel in mooring gate experiment

Table 1 Wave condition in model experiment

prototype		experimental model			
wave period [s]	wave period [s]	wave height [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	3.55	5.32	7.09
8.0	1.444	2.81	5.63	8.44	11.3
10.0	1.806	3.80	7.61	11.4	15.2
12.0	2.167	4.76	9.51	14.27	19.0
14.0	2.528	5.69	11.37	17.06	22.7
16.0	2.889	6.60	13.2	19.8	26.4



weight of gate in water : -0.196 kg

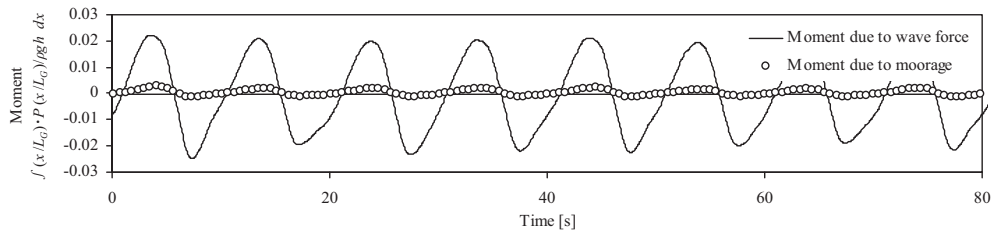
gravity center of gate : 0.364 m from shaft

Fig.6 Arrangements of load cell and pressure sensors to evaluate moments due to wave and moorage forces

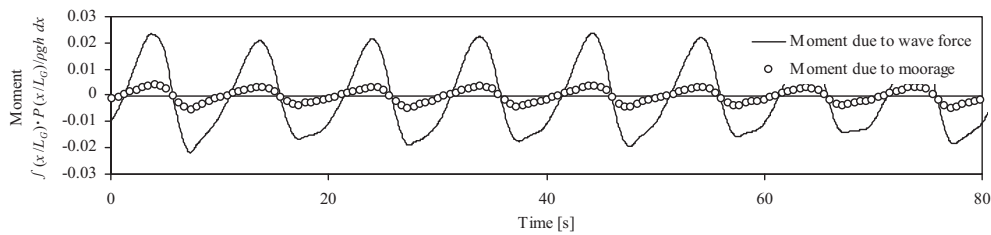
3.2 実験結果と考察

Fig.7 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波浪流体力によるモーメントおよび係留力 T_m による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を示す。Fig.7 より、流体力および係留力によるモーメントは、作用する規則波の周期と同期して変動した。Fig.8 に、Fig.7 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) 流体力によるモーメントの最大値および (b) 係留力によるモーメントの最大値を示す。Fig.8 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。Fig.7 および Fig.8 より、扉体の係留にバネ定数の大きいバネを用いるほど、係留力によるモーメントは増大した。また、扉体先

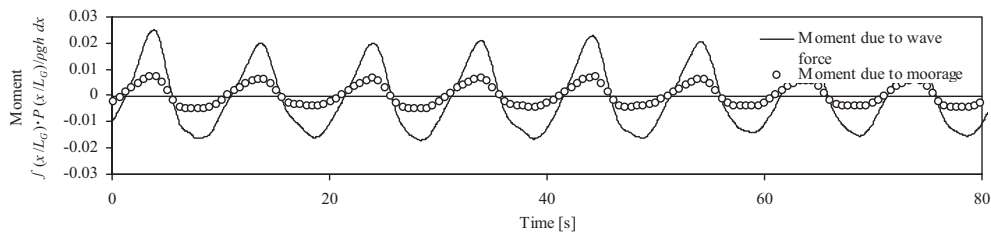
端の開口率を大きくすると、流体力によるモーメントおよび係留力によるモーメントは共に増加した。Fig.9 は、(a) 0.80N/mm および (b) 15.5N/mm のバネ定数のバネを用いて扉体を係留したフラップゲートに、周期 4s~16s、波形勾配 0.04 の規則波を作用させた際の流体力によるモーメントの最大値を示したものである。Fig.9 では、横軸に実海域スケールでの波周期、縦軸には無次元化したモーメントを示す。Fig.9 より、特定のケースでモーメントの最大値が若干落ち込んでいるものの、作用する規則波の周期が長くなるにつれて、流体力によるモーメントの最大値は増加する傾向がみられた。Fig.10 に、Fig.9 と同一の係留バネを用いたフラップゲートに、Fig.9 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。Fig.10 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



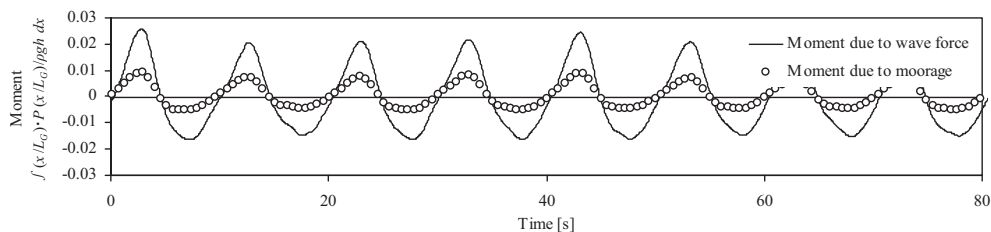
(a) Spring constant: 0.80 N/mm



(b) Spring constant: 3.27 N/mm



(c) Spring constant: 8.65 N/mm



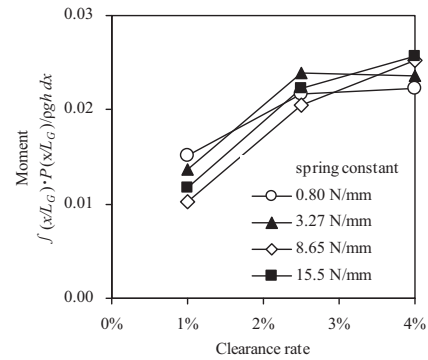
(d) Spring constant: 15.5 N/mm

Fig.7 Time series of moments acted on gate due to wave and moorage forces in regular waves ($T=10$, $H/L=0.04$)

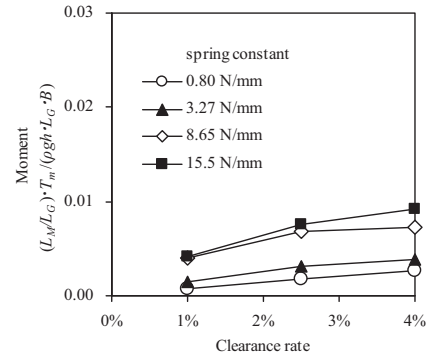
バネを用いた実験ケースほど動揺角度は小さくなり、作用する規則波の周期が長くなるにつれて動揺角度が増加した。扉体に生じる流体力によるモーメントは、扉体の上面および下面の圧力差に起因する。扉体上面の圧力は、その地点の静圧に依存し、扉体下面の圧力は、扉体の先端あるいは扉間の隙間から伝播する圧力に依存する。扉体の先端部の開口率がゼロである場合を仮定すると、扉体下側の圧力は、扉体上面の静水圧が扉間から下方に伝播するだけであるため、扉体の上下面で圧力差は生じない。扉体先端の開口率が扉間の開口率と比べて大きい場合、扉体下側の圧力は、扉体先端の開口部から伝播する圧力に支配されるため、扉体の上下で圧力差が生じやすい状態となる。扉体上の波高計で計測した水位および扉体に作用する流体力による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き、作用するモーメントの値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、扉体に生じる流体力によるモーメントは増大すると考えられる。

扉体に生じる流体力によるモーメントが、扉体上下の圧力差によって生じることは先に述べた。Fig.9 (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、係留力によるモーメントは約 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、Fig.10(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。Fig.10 は、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。

扉体先端部の真上の波高に対する波浪流体力によるモーメントの位相差を Fig.11 に示す。Fig.11 より、扉体に生じるモーメントは、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

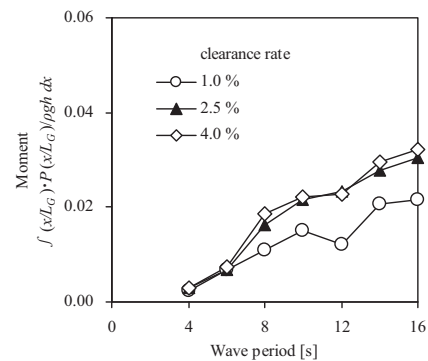


(a) due to wave force

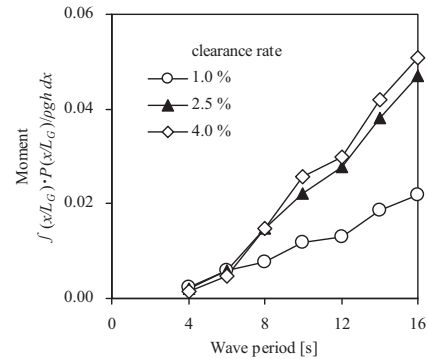


(b) due to moorage force

Fig.8 Maximum moments acted on gate



(a) Spring constant: 0.80 N/mm



(b) Spring constant: 15.5 N/mm

Fig.9 Maximum moments acted on gate due to wave forces

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、扉体に生じる流体力によるモーメントの最大値も一定値に近づくはずである。しかし、扉体に生じるモーメントは、Fig.9 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、 $\varphi = \pi$ で負の勾配が最大とはならず、位相は $\varphi = \pi/2$ の方にずれ、勾配もより急峻となる。Fig.11 より、波周期が長くなるほど、流体力によるモーメントの位相が $\varphi = \pi$ から $\varphi = \pi/2$ の方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、扉体に生じる波浪流体力によるモーメントも増加すると考えられる。

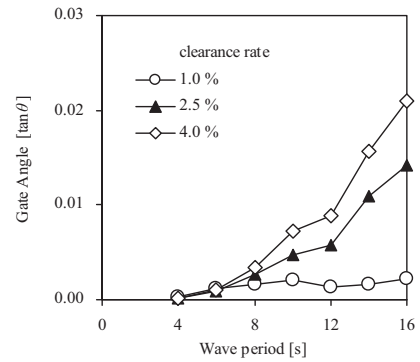
4. 水面に浮上した扉体の動揺・波圧特性評価

本章にて記載する実験は、扉体の経済設計のため、浮上状態の扉体に規則波を作用させ、扉体の動揺特性および波圧特性について評価するものである。以下、実験の方法、実験結果と考察について述べる。

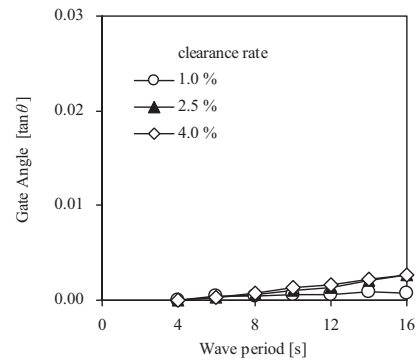
4.1 実験の方法

実験は、3 章にて使用した造波水槽およびフラップゲート模型を用いて実施した。実験装置全体の概略を Fig.12 に示す。実験では、抵抗板を設置したケースならびに抵抗板を設置しないケース、双方の模型を対象とした。抵抗板は、下部ロッド長さの 3/4 に相当するものを使用した。実機では、隣接する扉体の先端をワイヤロープ等により緩く連結することで、扉体のバラつきが抑制される。実験模型においても実機の状態を再現し、扉体の先端を同様に連結した。

実験で対象とした規則波は、3 章にて使用した入射波と同一の条件のものである (Table.1 参照)。波高の計測は、入射波と反射波を分離するため、フラップゲートの沖側と岸側にそれぞれ 2 台ずつ設けた容量式波高計により行った。波圧の計測には、扉体の沖側に水深方向一列に設置した計 6 個の波圧計を用いた。波圧計の設置状況を Fig.13 に示す。扉体角度は、扉体回転軸上に設置した加速度計を用いて算出した。静水状態で水面に浮上静止した扉体の初期角度は $\theta_0 = 43.6$ 度であった。



(a) Spring constant: 0.80 N/mm



(b) Spring constant: 15.5 N/mm

Fig.10 Maximum angle of gate motion in waves

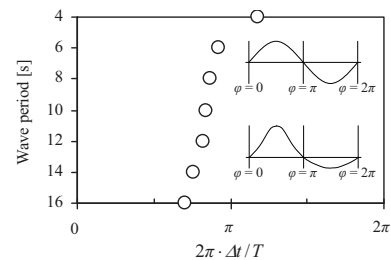


Fig.11 Phase difference of maximum moment due to wave force from wave profile

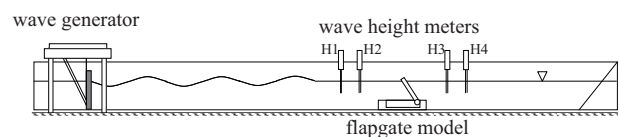


Fig.12 Two-dimensional water channel in floating gate experiment

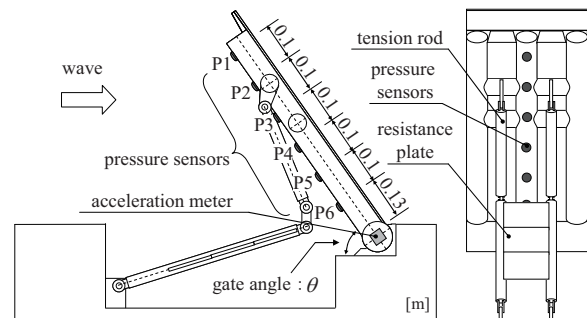


Fig.13 Arrangement of pressure sensors and acceleration meter

4.2 実験結果と考察

抵抗板を設置しないフラップゲートに関して、規則波作用時の扉体角度と波周期の関係を Fig.14 に示す。図の縦軸は、初期状態から最大扉体角度までの増分 ($\theta_{max} - \theta_0$) を入射波振幅で除した単位振幅あたりの動揺角、横軸は実機換算波周期である。図より、波周期 10s 以下ではいずれの波形勾配に対しても同等の値を示しているが、10s 以上では単位振幅あたりの動揺角は増加しており、その傾向は波形勾配によって異なることがわかる。これは、入射波に応じて扉体動揺の非線形性が強い領域と弱い領域があることを示している。なお、周期 4s~16s に扉体動揺のピークはなく、この範囲に固有周期が存在しないことがわかる。

抵抗板を設置しないフラップゲートおよび抵抗板を設置したフラップゲートにおいて、扉体角度の時

間変化一周期分を Fig.15 に示す。ここで扉体角度とは、海底倒伏状態を 0 度とした水平面に対する扉体の角度を指す。Fig.15 において、(a) および (c) は抵抗板を設置しないケース、(b) および (d) は抵抗板を設置したケースを示し、それぞれ、実海域のスケールで周期 6s あるいは 16s の規則波を作用させた際の実験結果である。また、これらは、波形勾配 0.04 の

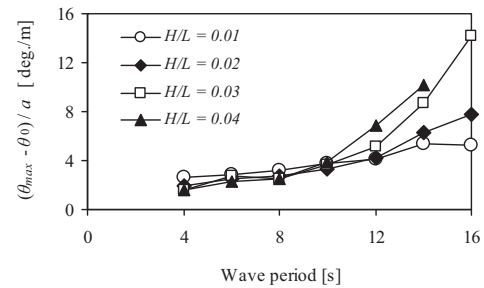
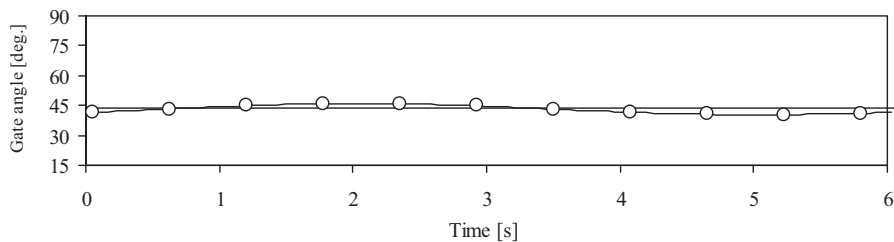
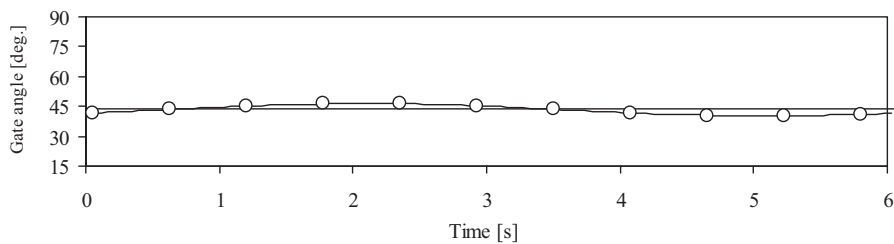


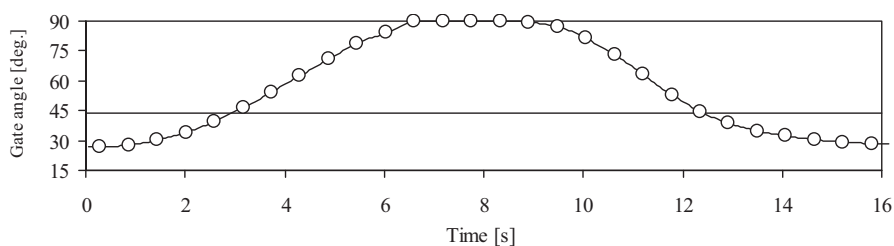
Fig.14 Angle of gate motion in waves



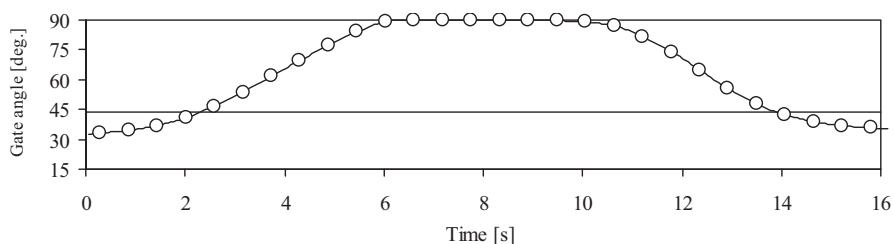
(a) Wave period: 6 s (without resistance plate)



(b) Wave period: 6 s (with resistance plate)



(c) Wave period: 16 s (without resistance plate)



(d) Wave period: 16 s (with resistance plate)

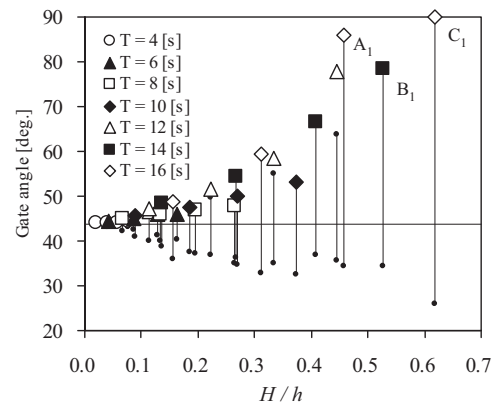
Fig.15 Time series of gate angle in regular waves

入射波を対象としたケースであり、図中の水平の直線は静水状態での扉体の釣合い角度 (= 43.6 度) を示す。Fig.15 (a) および (b) のケースを比較すると、両者の扉体角度の変化に顕著な違いは見られない。扉体動揺量の小さい領域では、抵抗板の有無が扉体動揺特性に与える影響は小さいことがわかる。一方、(c) および (d) のケースを比較すると、両者に明確な違いがみられる。抵抗板を設置したフラップゲートは、設置していないケースより短時間で扉体が 90 度まで起立し、扉体が 90 度で起立している時間も長いことがわかる。また、扉体角度の最小値については抵抗板を設置していないケースの方が小さく、抵抗板の設置により、扉体の動揺範囲が起立側にスライドしたように見受けられる。

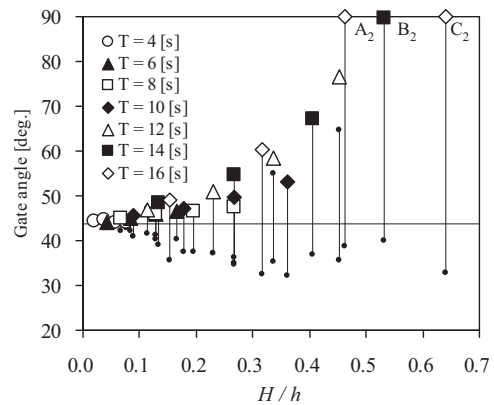
作用波の周期と波高水深比 (H/h) により扉体角度の最大値および最小値を整理したものを Fig.16 に示す。Fig.16 において、(a) は抵抗板を設置していないケース、(b) は抵抗板を設置したケースにおける結果を示すものである。また、実験データを識別するために、作用波の波高水深比の大きい 3 つのデータに対して、 $A_1 \sim C_1$ 、あるいは $A_2 \sim C_2$ の記号を振り当てた。

Fig.16 (a) より、 H/h が 0.4 以下の条件については、扉体の釣合い角度である 43.6 度を中心として、動揺振幅は波高水深比に対して概ね線形的に増加した。このとき、起立側 (>43.6 度) と倒伏側 (<43.6 度) の動揺幅は同程度であった。Fig.16 (b) の抵抗板を設置したケースについても、 H/h が小さい条件においては、扉体の動揺幅は (a) の結果と同程度であり、抵抗板の設置による扉体の動揺角度の変化は確認できなかった。一方、作用波の波高水深比が比較的大きいケース (H/h が 0.4 を越えるようなケース) では、 H/h が増大するにつれて起立側の動揺幅は 2 次関数的に増加したが、倒伏側の動揺幅については限定的であり、実験ケースによっては動揺幅が減少するものもあった。また、作用波の周期が長いケースほど、起立方向への動揺量が大きくなる傾向も確認できた。このとき、Fig.16 (a), (b) のいずれにおいても、C の実験ケースでは、扉体の最大角度は 90 度に達した ($C_1=C_2=90$ 度)。また、A あるいは B の実験ケースについては、双方とも扉体動揺角の最大値が $A_1 < A_2$ (=90 度)、 $B_1 < B_2$ (=90 度) となっており、抵抗板の設置により扉体の最大角度が増加している様子が確認できた。一方、倒伏側の動揺幅については、抵抗板を設置することで小さくなる傾向がみられ、Fig.15 (c) および (d) の扉体角度の時間変化と同様の結果を示した。

静水域において浮上状態の扉体は、自重によって倒伏方向に作用するモーメントと浮力によって起立



(a) without resistance plate



(b) with resistance plate

Fig.16 Angle of gate motion in waves

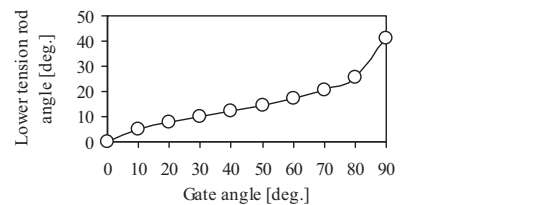


Fig.17 Relationship of angle between gate and lower tension rod

方向に作用するモーメントが均衡した状態にある。港外水位の上昇による静水圧の増加あるいは港外からの作用波力によって扉体角度が大きくなると、扉体重心位置と扉体回転中心の水平距離が短くなるため、扉体の自重によって倒伏方向に作用するモーメントは減少する。その結果、扉体角度が大きくなるほど、港外からの外力に対して扉体は起立方向に動揺し易い状態となる。 $H/h > 0.4$ となるような、作用波の波高水深比が比較的大きい条件下では、扉体の自重によるモーメントが十分に小さくなり、扉体は起立側に動揺し易い状態であったと考えられる。また、扉体に作用する入射波の波高が同一であっても、周期が長くなるにつれて扉体への波力の作用時間は長くなるため、運動抵抗の小さい起立側への動揺幅はより増大する。扉体は入射波の周期と同期して運

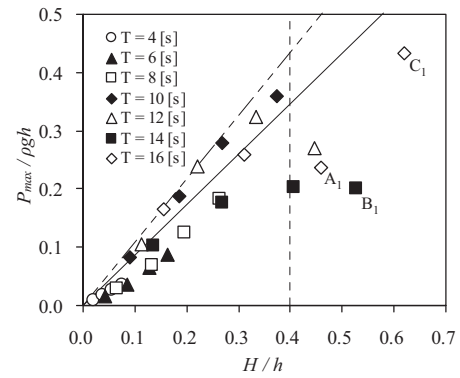
動する。扉体の起立側への動揺幅が大きくなると、倒伏方向への運動に遅れが生じ、倒伏方向への運動の途中で次の入射波が扉体に作用することとなる。その結果、扉体の往復運動の中心は、運動抵抗の小さい起立側にスライドし、倒伏方向への動揺角が若干減少したと推測できる。

Fig.17 は、扉体と下部テンションロッドとの角度の関係を幾何学的に算出したものである。テンションロッドの角度は、水平面となす角として表示している。Fig.17 より、下部テンションロッドは、扉体が 80 度から 90 度に起立する際に大きく変位する。扉体角度が 80 度程度に達するケースでは、下部テンションロッドに設置した抵抗板が扉体の動揺特性に及ぼす影響が大きくなるのがわかる。その結果、抵抗板の作用により、扉体角度の最大値が 80 度を越える $A_1 \sim C_1$ のケースと $A_2 \sim C_2$ のケースとでは、それぞれ動揺角に差異が生じたと考えられる。抵抗板は扉体の運動に対する抵抗となるものの、扉体角度が 90 度に接近し、扉体の自重による倒伏方向へのモーメントが非常に小さくなった状態では、扉体の起立方向への運動を抑制する効果は軽微である。一方、倒伏方向への運動時には、抵抗板が扉体運動に対する抵抗となり、倒伏方向への変位量を減少させる。この結果、扉体の往復運動の中心は起立側に移動することとなり、扉体の動揺範囲も起立側にスライドしたと考えられる。

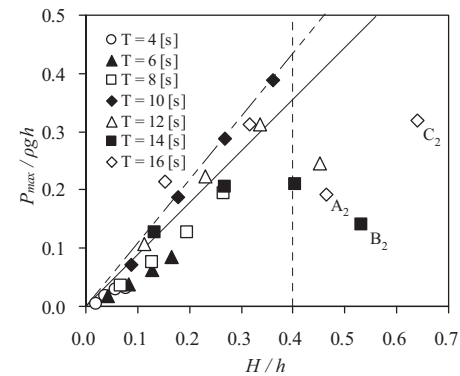
規則波作用時において、扉体に作用する最大波圧を Fig.18 に示す。縦軸に示す波圧は、実験水深における静水圧 ($=\rho gh$) を用いて無次元化したものである。また、Fig.18 では、Fig.16 と同様に (a) は抵抗板を設置していないケース、(b) は抵抗板を設置したケースを示し、各図とも横軸は波高水深比とした。破線は起立方向への動揺幅が線形的な関係から外れて増加する閾値となった $H/h=0.4$ を、直線は $H/h < 0.4$ の実験データに対する近似曲線を、2 点破線は固定壁に作用する最大波圧をそれぞれ示したものである。

Fig.18 より、 H/h が 0.4 以下のケースでは、フラップゲートに作用する最大波圧は、固定壁に作用する最大波圧と比較して 20%前後減少した。扉体の起立方向への動揺幅が大きくなる H/h が 0.4 を越えるケースでは、扉体に作用する最大波圧は、固定壁に作用する最大波圧と比較して大幅に低下した。自重によって倒伏方向に生じるモーメントが減少し、扉体の起立方向への動揺幅が大きくなるケースでは、扉体は小さな外力によって起立方向に変位する。そのため、扉体自身が入射波から受ける力積が減少し、扉体への作用波圧も低下したと考えられる。

Fig.16 において A~C の記号を振り当てた、作用波の波高水深比の大きい 3 ケースについて、抵抗板



(a) without resistance plate



(b) with resistance plate

Fig.18 Maximum pressures acted on gate in waves

を設置した Fig.18 (b) は、(a) と比較して扉体に生じる最大波圧が減少している様子が確認できる。Fig.16 にて示されたように、抵抗板を設置したケースでは、扉体の動揺範囲が起立側にスライドした。扉体に作用する波圧は、倒伏方向に運動する扉体を起立方向に押し上げるときに最大となる。扉体の動揺範囲が起立側にスライドしたケースでは、扉体が持つ自重によるモーメントが低下しているため、比較的小さい外力によって扉体を起立方向に押し上げることができる。このため、抵抗板を設置したケースでは、扉体への最大作用波圧が減少したと考えられる。

5. 津波に対する扉体の応答特性評価

本章では、浮上状態の扉体に段波津波を模擬した孤立波を作用させた実験を実施し、扉体の津波応答について評価を行う。以下、実験の方法、実験結果と考察について述べる。

5.1 実験の方法

実験は、長さ 50m、幅 1m の造波水槽において、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。ここでは、下部テンションロッドに抵抗板を設置したフラップゲートおよび抵抗板を設置して

いないフラップゲートに加えて、扉体を 90 度に固定した固定式ゲートに作用する波圧についても計測を行った。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、模型設置位置における水深は、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。実験装置全体の概略を Fig.19 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。波圧の計測には、規則波実験にて使用した扉体沖側の 6 個の波圧計を用いた（Fig.13 参照）。計測のサンプリングは 1ms（1000Hz）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、模型直前で砕波する砕波段波と、模型より十分に沖側で砕波して到来する波状段波を用いた。実験で使用した砕波段波および波状段波の時間波形を Fig.20 に示す。Fig.19 では、横軸を実海域スケールの時間、縦軸を波高水深比とした。

5.2 実験結果と考察

Fig.21 および Fig.22 は、フラップゲートあるいは固定式ゲートに砕波段波および波状段波を作用させた際の、扉体に作用した最大波圧の鉛直分布を示したものである。(a) は段波がフラップゲートに到達した時、(b) は扉体角度が 90 度に達し起立が完了した時における、扉体への作用波圧を示す。扉体は津波による波力を受けながら起立するため、段波到来時と起立完了時において、扉体に設置した波圧計の設置高さが増える。これらの波圧は、波圧計の水深変化に伴う静圧変動分を除いたものである。固定式ゲートについては、扉体を 90 度に固定しているため、(b) においてのみ結果を表示した。縦軸は、水深で無次元化した鉛直高さを示す。

Fig.21 (a) および Fig.22 (a) より、段波がフラップゲートに到達した際の、扉体作用波圧の鉛直分布については、抵抗板の設置による波圧の違いはみられない。この時点では、扉体および抵抗板は運動を始めておらず、かつ、浮上状態における抵抗板の位置は扉体の天端面より低い。したがって、段波到来時に

おいては、抵抗板による扉体作用波圧への影響は限定的である。

一方、Fig.20 (b) および Fig.21 (b) では、実験ケース毎に特徴がみられた。抵抗板を設置していないフラップゲートと抵抗板を設置したフラップゲートを比較すると、後者のケースでは、扉体に作用する最大波圧を 1/3~1/4 程度に低減できた。抵抗板の流体抵抗により、起立動作中に扉体を得る角速度は抑制される。起立完了時、付加質量分の水塊による慣性力が扉体に作用するが、扉体の角速度が抑制されたこ

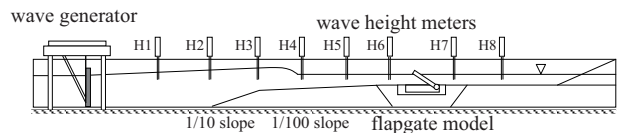


Fig.19 Two-dimensional water channel in tsunami experiment

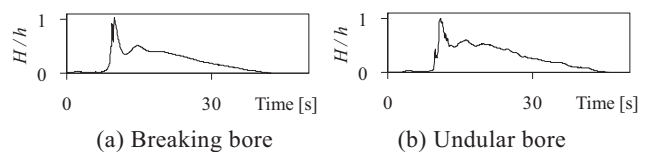
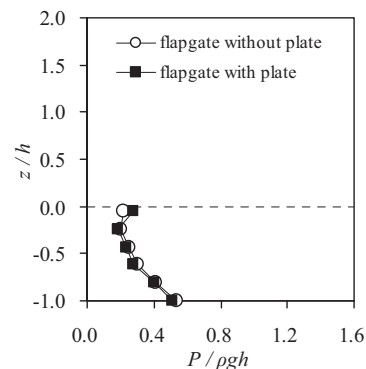
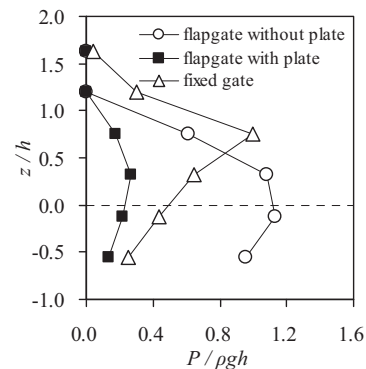


Fig.20 Time series of water level in acting tsunami



(a) in time of having arrived

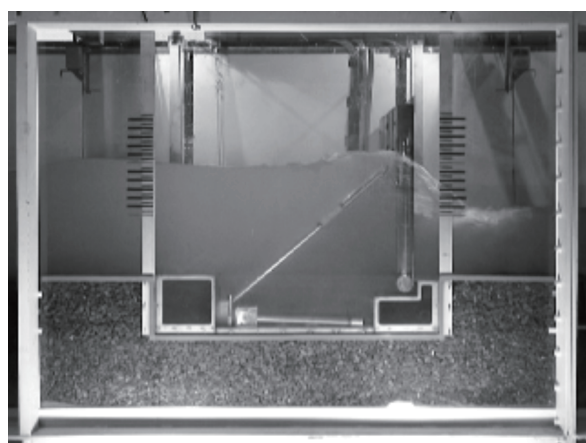


(b) in time of having stood

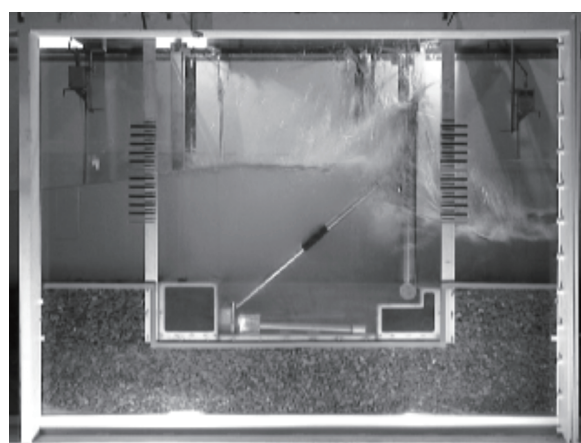
Fig.21 Vertical distribution of maximum pressure acted on flapgate and fixed gate in breaking bore

とで、これらによる慣性力も軽減される。これにより、扉体に作用する最大波圧は減少したと考えられる。フラップゲートでは、 $z/h = -0.5 \sim 0.5$ において扉体に最大波圧が作用するが、固定式ゲートでは、 $z/h = 0.5 \sim 1.0$ において作用波圧が最大となった。ここで、 z/h とは、最大津波高で無次元化した鉛直座標を示す。フラップゲートおよび固定式ゲートに、最大波圧が作用した際のスナップショットを Photo 1 に示す。Photo 1 の (a) および (b) を比較すると、フラップゲートに段波を作用させたケースでは、水面の乱れが小さいのに対して、固定式ゲートに段波を作用させたケースでは、水面に大きな乱れがみられる。前者のケースでは、扉体の起立動作に伴って、段波の流れが海底部に向かったため、水面形状に大きな乱れが生じなかったと推測できる。一方、後者のケースでは、ゲートとの接触により段波の流れが上方に向かい、水面上に飛沫を舞い上げたと考えられる。このような両者の違いにより、フラップゲートに作用する最大波圧は、固定式ゲートに作用する波圧と比較して、低い位置に生じたと推測できる。抵抗板を設置したフラップゲートに作用する波圧は、固定式ゲートに作用する波圧と比較して、 $z/h = 0$ より低い位置の計測点においては差がないものの、 $z/h = 0.5$ より高い位置の計測点においては十分に小さい値となった。

砕波段波あるいは波状段波の 2 種類いずれを使用した場合でも、結果の傾向に大きな差はみられなかった。

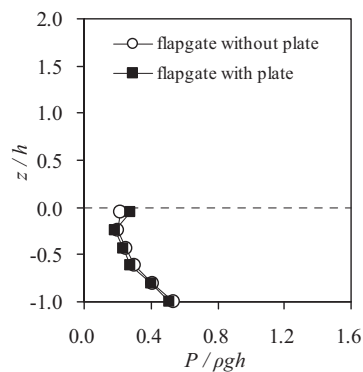


(a) flapping gate

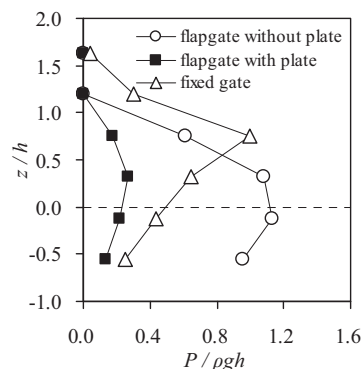


(b) fixed gate

Photo 1 Aspects around flapping gate or fixed gate in acting undular bore



(a) in time of having arrived



(b) in time of having stood

Fig.22 Vertical distribution of maximum pressure acted on flapping gate and fixed gate in undular bore

6. 結 論

本研究では、2次元造波水槽を用いてフラップゲート模型に規則波あるいは津波を模擬した孤立波を作用させ、扉体の係留特性、動揺特性および波圧特性を評価した。以上の実験を通して得られた主要な結論を、それぞれの実験ごとに示す。

6.1 倒伏扉体に対する規則波作用実験

- ① 扉体に生じる波浪流体力による扉体回転軸周りの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、扉体に生じる流体力による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。

6.2 浮上扉体に対する規則波作用実験

- ④ 周期 10s 以上の作用波に対しては、単位振幅あたりの扉体動揺角は増加し、その傾向は波形勾配が大ききほど顕著である。
- ⑤ フラップゲートに規則波を作用させた際に扉体に生じる最大波圧は、固定壁への作用波圧と比較して減少する。
- ⑥ 波高水深比 H/h が 0.4 を越える規則波をフラップゲートに作用させた場合、扉体の動揺角は増加するが、扉体への作用波圧は固定壁に作用する波圧と比較して大幅に減少する。

6.3 浮上扉体に対する段波津波作用実験

- ⑦ フラップゲートに段波津波が作用する際、下部テンションロッドに抵抗板を設置することで、扉体への作用波圧を $1/3 \sim 1/4$ に低減できる。
- ⑧ 段波作用時において、フラップゲートの扉体に生じる波圧の鉛直分布は $z/h = -0.5 \sim 0.5$ で最大となり、固定ゲートでは $z/h = 0.5 \sim 1.0$ で最大となる。
- ⑨ 段波作用時において、抵抗板を設置したフラップゲートに生じる波圧は、固定式ゲートに作用する波圧と比較して同程度か、あるいは小さくなる。

一連の模型実験を通して、フラップゲートの機能を確認し、実用化のための必要なデータを計測・評価することができた。今後は、流体と構造体を練成して解析できる数値計算モデルを構築し、スケールアップに伴う問題を検討すること、および、実海域における実証試験を実施し、製品としての最終的な検証を行う予定である。

参考文献

- 池野正明, 松山昌史, 榊山 勉, 柳沢 賢 (2005) : ソリトン分裂と砕波を伴う津波の防波堤に作用する波力評価に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.751-755.
- 池谷 毅, 朝倉良介, 藤井直樹, 大森政則, 武田智吉, 柳沢 賢 (2005) : 浮体に作用する津波波力の実験と評価方法の提案, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.761-765.
- 木村雄一郎, 仲保京一, 伊墻昭一郎, 柳 浩敏 (2007) : 高潮・津波対策用フラップ式可動ゲート津波低減性能に関する模型実験 (その 2) - 起立安定化プレートの力学特性の把握 -, 海洋開発論文集, 第 23 巻, pp.93-98.
- 木村雄一郎, 新里英幸, 仲保京一, 安田誠宏, 間瀬肇 (2009) : 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.
- 木村雄一郎, 新里英幸, 仲保京一, 安田誠宏, 間瀬肇 (2009) : フラップゲート式可動防波堤の波浪応答特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 56 巻, pp.806-810.
- 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.
- 白井秀治, 木村雄一郎, 藤田 孝, 山口映二, 仲保京一 (2006) : 高潮・津波対策用フラップ式可動ゲートの伝達波低減機構の開発, 海洋開発論文集, 第 22 巻, pp.583-588.
- 白井秀治, 藤田 孝, 木村雄一郎, 山口映二, 仲保京一 (2006) : 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.
- 中野 修, 田中伸和, 榊山 勉, 興野俊也, 大熊義夫 (2000) : 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.
- 肥後 靖, 岩下英嗣, 神田雅光, 中川寛之, 小林正典 (2002) : 没水平板型消波堤に働く流体力と動揺特性に関する研究, 関西造船協会論文集, 第 237 号, pp.119-126.
- 水谷 将, 今村文彦 (2000) : 構造物に作用する段波波力の実験, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp.946-950.

Hydraulic Model Experiments on Response of Flapgate Breakwater to Wave and Tsunami

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

* Kyoto University Graduate School of Engineering

** Hitachizosen Corporation

Synopsis

A flapgate breakwater is a new type structure for coastal disaster reduction; the flapgate usually lies down on the seabed and rises up through a sea surface with its buoyancy when tsunami or storm surge occurs. This study examines wave response of the flapgate motion of lying down and floating by carrying out hydraulic model experiments. The experiments were conducted using monochromatic waves and bore type tsunamis in a two-dimensional water channel under the condition of the model scale of 1/30 targeting a sea of 13 m in depth. The characteristics of mooring forces and wave pressure of the flapgate lying on the sea bed and moving away from the sea bed were clarified from a series of experiments.

Keywords: flapgate, tsunami, model experiment, mooring characteristic, wave pressure, gate motion