

フラップゲート式可動防波堤の実海域試験

Field Experiment of Flap-gate Breakwater



木村 雄一郎	Yuichiro Kimura	①
仲保 京一	Kyoichi Nakayasu	②
近本 武	Takeshi Chikamoto	③
佐々木 広輝	Kouki Sasaki	④
森井 俊明	Toshiaki Morii	⑤
油谷 比土次	Hitoshi Aburatani	⑥

あ ら ま し

フラップゲート式可動防波堤は、通常時は海底に倒伏し、浮力を利用して水面まで浮上して連続した壁面を形成する沿岸施設である。従来の水理模型実験や設計検討により、津波・高潮防波堤あるいは波除堤としての、本施設の有用性が確認されている。本研究では、実海域試験を通して、双方の施設への適用を想定したフラップゲート式可動防波堤の基本動作性、および、状態監視手法や維持管理手法の有用性について検証を行った。研究の結果、特性が大きく異なる双方の施設において、それぞれの試験装置に採用された運用方法、荷重の支持方法ならびに保守管理手法が、各施設に求められる基本性能を適切に満たすものであることが確認でき、実機の設計、製作ならびに現地施工を行う上でも有用なデータを取得することができた。

Abstract

A flap-gate breakwater is a new type of coastal structure that normally lies on the seabed and rises with natural buoyancy to form a continuous seawall. Through previous model experiments and design reviews, the structure was confirmed to be effective as a barrier both to protect against tsunami and storm surge and to dissipate waves. In this study, we conducted a field experiment to verify the fundamental capability of the structure and the effectiveness of status monitoring and maintenance in both applications. The results proved that the operation, support and maintenance systems of each structure satisfied the requirements of the two substantially different applications. Moreover, we were able to obtain data useful to design, production and construction.

1. 緒 言

当社、東洋建設および五洋建設の3社で構成される民間企業グループでは、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連続した壁をなす、フラップゲート式可動防波堤（以下、フラップゲート）の開発を進めている。フラップゲートは、港口部を完全に閉鎖し

後背地の浸水を防止する可動式津波・高潮防波堤（以下、フラップ式津波・高潮防波堤；[図1](#)参照）、あるいは、港内へ進入する波浪を低減し船舶の荷役作業性を向上させる可動式波除堤（以下、フラップ式波除堤；[図2](#)参照）としての運用が期待される。双方の施設とも、航路を閉塞しない、海水交換を妨げない、景観への影響が少ないなど、既存の沿岸施設と比較して多くの優位性を持つ。フラップ式津波・高潮防波堤およびフラップ式波除堤のイメージを[図3](#)および[図4](#)に示す。

フラップ式津波・高潮防波堤およびフラップ式波除堤は、従来の水理模型実験^{1) 2) 3)}あるいは数値解析⁴⁾等により、沿岸施設としての有用性が確認されている。本研究は、実海域における、双方の施設の基本性能を実証することを目的としたものであり、平成23年2月より、静岡県焼津漁港内にて試験を開始している。試験では、

① Hitz日立造船㈱ 事業・製品開発本部 技術研究所 博士(工学)
 ② Hitz日立造船㈱ 機械・インフラ本部 フラップゲートプロジェクトチーム 技術士(建設)
 ③ 東洋建設㈱ 名古屋支店 土木第一営業部 技術士(建設・総合技術管理)
 ④ 五洋建設㈱ 土木部門 土木本部 土木設計部 技術士(建設)
 ⑤ Hitz日立造船㈱ 機械・インフラ本部 社会インフラ事業部 技術部
 ⑥ Hitz日立造船㈱ 機械・インフラ本部 社会インフラ事業部 防災営業部

浮上・倒伏等の基本動作性、ならびに、海底倒伏状態における施設の保守管理手法や常時監視手法の有用性等について検証を進めている。

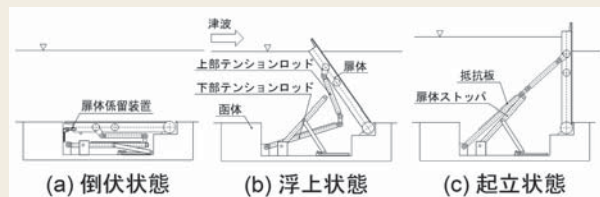


図1 フラップ式津波・高潮防波堤の基本動作

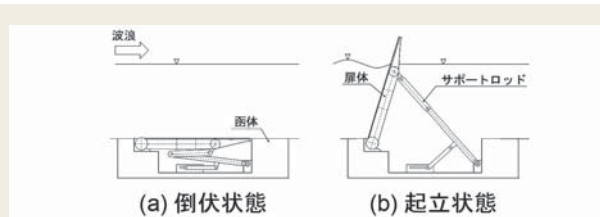


図2 フラップ式波除堤の基本動作

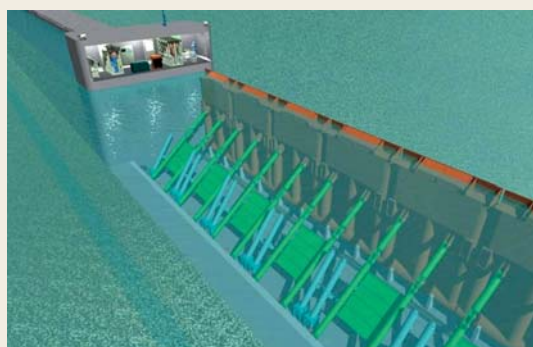


図3 フラップ式津波・高潮防波堤のイメージ

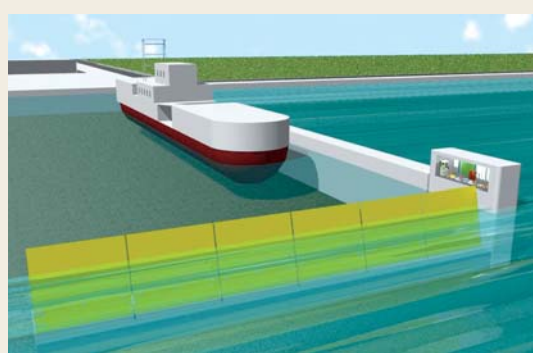


図4 フラップ式波除堤のイメージ

2. 施設概要

本章では、実機としての双方のフラップゲート施設の概要について記す。

2.1 フラップ式津波・高潮防波堤 フラップ式津波・高潮防波堤は、図1あるいは図3に示すように、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。扉体は、所定の幅で分割され、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。扉体の浮力は、扉体内に備えられた空気室に給気することにより得られる。浮力によって水面まで浮上した扉体は、津波あるいは高潮によって生じる港外水位上昇により、所定の高さまで起立し連続した止水壁をなす。テンションロッドは、上部ロッドおよび下部ロッドの二つの部材からなり、起立した扉体に作用する水圧荷重を支持するとともに、対をなす下部テンションロッド間に設置された流体抵抗板が、扉体の急激な起立動作を抑制する。テンションロッドおよび扉体底部回転軸を介して函体に伝達された水圧荷重に対する反力は、函体と捨石マウンドとの摩擦抵抗によって支持される。引波による港内水位の低下を軽減するため、函体上には扉体ストップが備えられる。これにより、引波時において倒伏する扉体を所定の角度で支持し、港内水位を適正な水準に保持することができる。

扉体は、常時浮力を有した状態にあり、扉体係留装置によって、その先端部に下向きの荷重を加えることで、倒伏状態が保持されている。扉体空気室への空気送入を平常時に行い、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で、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。

2.2 フラップ式波除堤 フラップ式波除堤は、図2あるいは図4に示すように、扉体、函体およびサポートロッドを主要な部材として構成される。扉体は、津波・高潮防波堤用と同様、所定の幅で分割され、扉体内部の空気室への給排気により起伏するが、双方の施設で浮上の方向が異なる。津波・高潮防波堤用扉体が港外水位の上昇を利用して起立するのに対して、波除堤用扉体は、浮力のみで所定の高さまで起立し、サポートロッドによって起立状態で固定される。サポートロッドは、ロープを介して機械室に備えられた油圧シリンダに接続されており、この油圧シリンダの伸縮により、サポートロッドの固定および解除が行われる。

本施設は、船舶の荷役作業に合わせて運用されるため、比較的高い頻度での使用が想定される。また、津波・高潮防波堤と比べて、施設の故障等によりその機能を失った場合、社会経済活動に与える影響は小さい。本施設においても、運転状況から設備の常時監視を行うシステムは搭載されるものの、波除堤用扉体の起立動作は、その都度、機械室の給気装置より送気することで行う。

3. 実海域試験

3.1 試験場所および現地波浪条件 本実海域試験は、平成23年2月より2年間の計画で、静岡県焼津漁港にて実施している。試験装置の設置場所を図5に、試験海域の波浪条件を表1に示す。試験装置は、外防波堤の開口部中央に向けて設置されている。現場海域の水深は6.5～7.0mである。

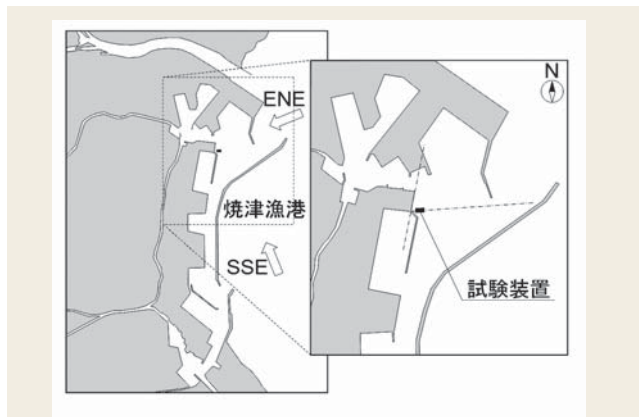


図5 試験装置の設置場所

表1 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

3.2 試験装置

工場にて製作された試験装置を図6に示す。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されている。図6に示すように、試験装置は、フラップ式津波・高潮防波堤を岸側、フラップ式波除堤を沖側として、一つの共通函体上に縦方向に並べて配置される。共通函体の中央上部には機械室が設けられ、試験装置の制御ならびに試験データの収録が行われる。また、計測機器の取り付けや試験に伴う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が設けられる。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される。

試験装置の外形寸法を図7に示す。試験装置は、沖岸方向全長20.95m、全幅9.35m、全高13mであり、津波・高潮防波堤用扉体の寸法は、高さ6.15m、幅4.8m、波除堤用扉体の寸法は、高さ6.84m、幅4.8mである。

3.3 試験項目

本実海域試験では、倒伏状態あるいは浮上状態など、可動部の状態に応じて7種類の試験を実施している。以下に各試験項目について順に記す。



図6 工場にて製作された試験装置

(1) フラップ式津波・高潮防波堤およびフラップ式波除堤を対象とした試験

a) 浮上(起立)倒伏試験 津波・高潮防波堤および波除堤用可動部の浮上(起立)および倒伏に要する時間を計測し、潮位あるいは現地波浪条件の違いが動作時間に与える影響について比較検討を行うとともに、水理模型実験結果との整合性を検証する。

b) 状態監視システム検証 実機では、機械室内に機側操作盤が設けられ、自動運転制御、異常検出および警報表示の機能を備える。さらに、主要設備や機器類の状態監視機能を追加することにより、客観データに基づく異常発生時の早期原因究明、ならびに経時劣化状態の把握による効果的な保守管理の実現を目指している。本実海域試験装置においても、実機と同等の状態監視機能を備えることにより、本システムの検証を行う。

c) 水中保守作業性の確認 ダイバーによる水中での目視点検に加え、実機で想定される部品交換を試験装置でも行い、その作業性を確認する。

(2) フラップ式津波・高潮防波堤を対象とした試験

a) 扉体係留試験 常時浮力を有した津波・高潮防波堤用扉体は、係留フックにより、海底に倒伏した状態で保持される。本試験では、海底倒伏状態の扉体を保持する係留フックへの作用荷重(係留力)を計測し、室内模型実験より得られた結果と比較することで、扉体係留特性について検証する。また、長期間倒伏状態にて保持される扉体の係留力の変化を連続監視することで、本試験装置において採用される扉体係留機構の実機への適用性を確認する。

b) 寸動動作確認試験 寸動動作とは、施設の

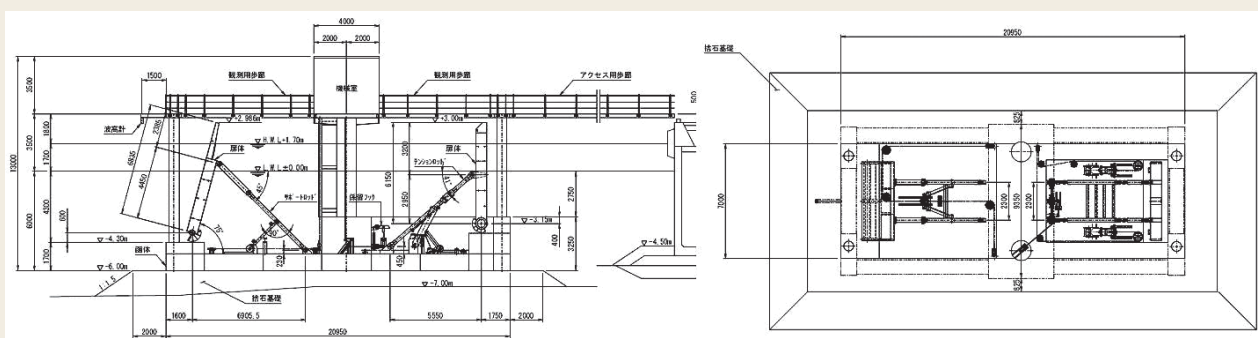


図7 試験装置の外形寸法

状態の監視および回転軸部の固着防止を目的として、定期的実施される保守・点検作業である。具体的には、海底倒伏状態で給排気を行い、海底面以下でのわずかな動作から運転データを取得し、状態の監視に援用する。本試験では、実機と同等の保守・点検作業を実施し、その監視性能を検証するとともに作業性の確認を行う。

c) **動揺試験** 浮上状態にある津波・高潮防波堤用扉体の波浪に対する動揺振幅を計測し、室内模型実験結果とも合わせて扉体の動揺特性を評価する。

(3) フラップ式波除堤を対象とした試験

a) **起立保持試験** フラップ式波除堤の実際の運用を想定した条件の下で、波除堤用扉体をサポートロッドにより固定し、装置を構成する部材に作用する荷重の計測を行う。

波高、波周期および潮位等、現地の海象条件については、試験期間を通した連続計測を実施する。また、回転軸や軸受の摩耗量、生物付着ならびに堆積物についても調査し、データの収集を行う。

3.4 **計測機器** 前節に記載した7項目の試験実施のため、試験装置には、表2に示す8種類の計測機器が備えられる。ただし、装置の制御を目的としたセンサ類については、ここに示す限りではない。

表2 本試験にて使用した計測機器

No.	使用機器	計測内容
1	超音波式波高計	水位変動
2	傾斜角センサ	双方の扉体の傾斜角度
		係留フックの傾斜角度
		扉体ストッパの傾斜角度
3	容量式水位計	津波・高潮用扉体の空気量
4	圧力計	津波・高潮用扉体への作用波圧
		抵抗板への作用波圧
5	ロードセル	津波・高潮用扉体の係留力
6	ロードセル	波除堤用扉体軸受への作用荷重
7	歪みゲージ	サポートロッドに作用する軸力
8	油圧シリンダ圧力計	サポートロッドに作用する曲げ

3.5 **試験工程** 各種の試験は、試験装置設置直後に第1回目の計測を行い、その後、3ヶ月毎に定期計測を実施している。台風接近等による荒天時においても、不定期での計測を適宜行っている。また、フラップ式津波・高潮防波堤は、使用頻度が極端に少ない状況下での運用が想定されるため、2011年12月～2012年12月の1年間、海底倒伏状態に保持される計画である。

4. 試験結果

ここでは、フラップ式津波・高潮防波堤およびフラップ式波除堤の基本動作性を検証するために実施した浮上(起立)倒伏試験、フラップ式津波・高潮防波堤の保守管理手法の有用性を検証するための寸動動作試験、および、フラップ式津波・高潮防波堤の倒伏状態における常時監視を目的とした扉体係留試験について報告する。

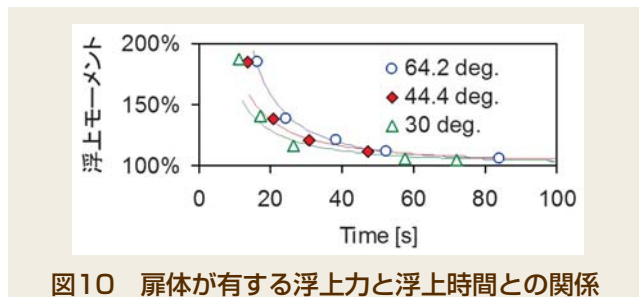
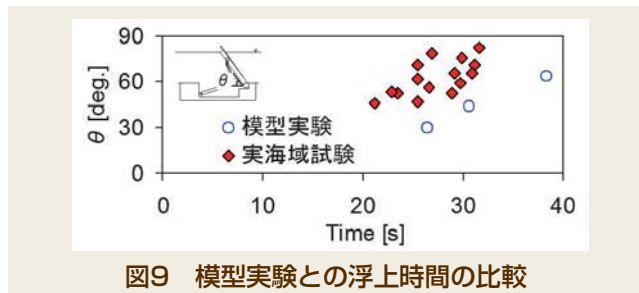
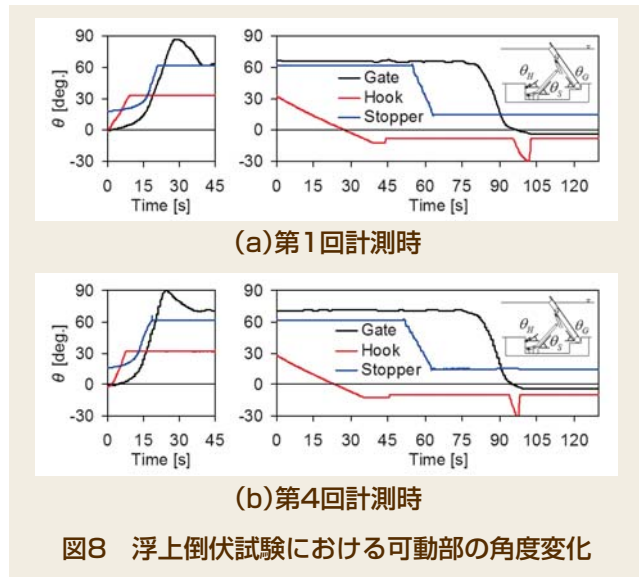
4.1 基本動作性の検証

(1) **フラップ式津波・高潮防波堤** 試験装置設

置直後に実施した第1回計測時ならびに2011年11月に実施した第4回計測時における浮上倒伏試験に関して、扉体、係留フックおよび扉体ストッパ角度の時間変化を図8に示す。これらの角度は、いずれも水平面を基準としたものである。浮上の様子を示す左図においては、係留フックを開放した時刻を0s、倒伏の様子を示す右図においては、係留フックの原点復帰操作を開始した時刻を0sとして表示している。扉体は、係留フック解放後30秒程度で水面まで浮上している様子が確認できる。水面から出た扉体は、浮上動作の慣性によって一旦水面より高い位置まで起き上がり、その後、自重と浮力の釣り合う角度の近辺で緩やかに動揺する。ストッパは、扉体下において常時浮力を有した状態にあり、扉体が浮上することで、ストッパも浮上を始める。第1回計測時の方が第4回計測時と比較して、扉体およびストッパの浮上速度がやや遅い。扉体の浮上力は、扉体が浮上する前に有していた空気室の空気量に依存し、さらに、その空気量は、扉体に給気を行った際の空気室における水圧、つまり潮位に依存する。自動制御システムにより、この空気量は適正な量に保持されるが、低水位時に給気した場合には、扉体の浮上力は比較的小さく、高水位時に給気した場合には、扉体の浮上力は比較的大きい状態となる。扉体倒伏時には、係留フックを通常の位置に復帰させ、その後、ストッパ、扉体の順に倒伏させる。扉体が沈降する際、フックは扉体によって押し下げられるため、フックは一時的に-30度付近まで変位する。

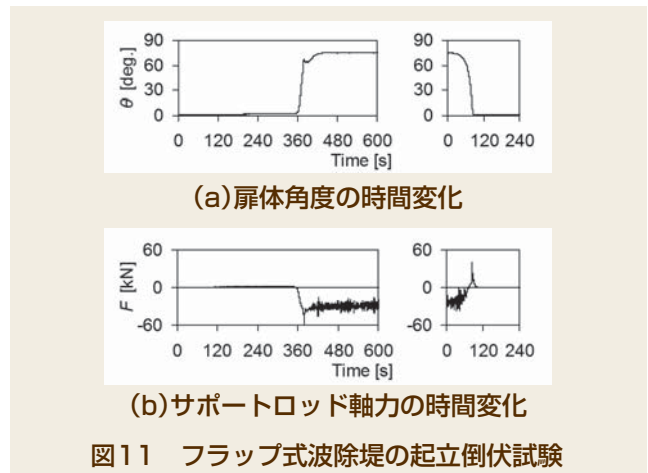
図9に、水理模型実験¹⁾および本実海域試験にて計測された、扉体の浮上に要した時間を比較する。図中、横軸には浮上に要した時間、縦軸には扉体浮上時において浮力と自重とが釣り合う角度を示す。本実海域試験装置の津波・高潮防波堤用扉体は、水中における倒伏モーメントに対して約125%の浮上モーメントを有するよう設計されている。ここでは、模型実験についても、同程度の浮上力を有する条件下で実施したケースを示しており、これらの結果は、フルード則に従い、本実海域試験のスケールに換算して表示している。模型実験と実海域試験との結果を比較すると、双方の浮上時間に大きな差はみられない。模型実験より得られた結果の方が、浮上に若干多くの時間を要しているが、これは、模型縮尺が小さいほど粘性の影響が大きくなるためと、実海域でのスケールでは、扉体の浮上に伴って扉体空気室内の空気の容積が膨張し浮力が増大するためである。これらの結果より、模型実験と本実海域試験の結果には十分な整合性が確認できた。模型実験において、扉体に与える空気量を調整し、倒伏状態の扉体が水面まで浮上するために要する時間を図10に示す。図中、各プロットは、扉体浮上時において浮力と自重とが釣り合う角度、横軸には浮上に要する時間、縦軸には水中における扉体の倒伏モーメントを基準とした扉体が有する浮上モーメントを示す。この図より、扉体の浮上状態における角度、つまり、水深と扉体高さの比率を基準として表示した浮上時間は、概ね累乗近似曲線上に分布していることがわかる。これらの

結果をもとに、扉体の浮上時間に関する要求性能を満たすための実機設計が可能となる。



(2) フラップ式波除堤 2011年5月に実施した第2回計測時における起立倒伏試験に関して、扉体角度、および、対となるサポートロッドへの作用軸力の時間変化を図11に示す。各図中、起立の様子を示す左図においては、扉体への給気を開始した時刻を0s、倒伏の様子を示す右図においては、起立保持装置が扉体を引き下げの動作を開始した時刻を0sとして表示した。

波除堤用扉体は、機械室からの給気により、浮上に必要な浮力が得られた時点で起立動作を開始する。本試験装置では、起立までに約6分を要しているが、給気装置の容量の選定により、この時間の短縮は可能である。サポートロッドに作用する軸力は、引張を正として表示している。この図より、扉体の起立状態において、サポートロッドには、扉体重量の一部と波力が作用しているが、特異な荷重が作用している様子はなく、波除堤用扉体の起立方法ならびに起立状態の保持方法が適切であることが確認できた。



4.2 フラップ式津波・高潮防波堤の保守管理手法の検証

第2回計測時における寸動動作試験の結果を図12 (a) および (b) に示す。ここで、(a) は扉体係留力の時間変化、(b) は扉体、係留フックおよびストッパ角度の時間変化を示す。寸動動作試験では、まず、ストッパ倒伏装置を駆動しストッパに接続されているロープを引き上げることで、左右のストッパを倒伏させる。次に、扉体空気室内の空気を排気し、扉体を函体上に着底させる。この段階で、係留フックは扉体を支持していない状態となるため、係留フックの動作確認を行った上で所定位置に戻す。その後、係留フックに適正な荷重が作用するまで、扉体への給気を行い、扉体を係留状態に復帰させる。最後に、ストッパを倒伏させているロープの張力を解除して、左右のストッパを扉体下面に接触するまで浮上させる。図12では、扉体空気室の排気を開始した時刻を0sとして表示している。

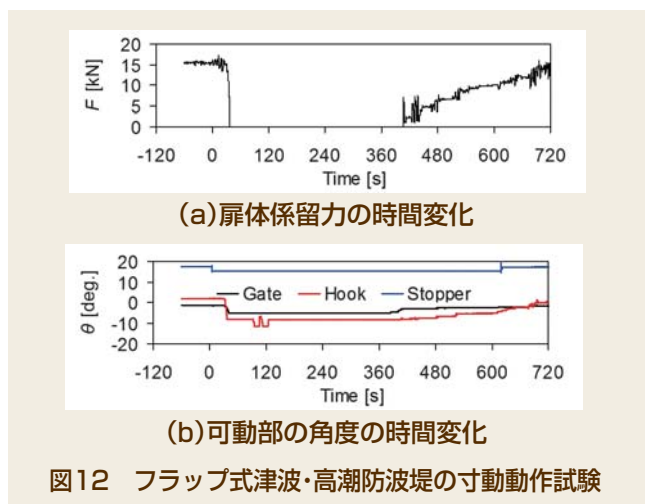


図12より、一連の動作確認が順になされている様子が確認でき、10分程度で寸動動作試験の全工程が完了している。第1回、第3回および第4回の定期計測時においても同様の試験結果が得られており、津波・高潮防波堤用扉体が長期倒伏期間に入ってから実施した第5回計測(2012年2月)でも、これまでの計測結果と比較して異なる傾向はみられなかった。これらの結果より、寸動動作試験は、長期間倒伏状態で運用されるフラップ式津波・高潮防波堤の回転軸部の固着防止や保守管理手法とし

て有用であることが確認できた。

4.3 倒伏状態におけるフラップ式津波・高潮防波堤の常時監視手法の検証

2011年12月18日より、フラップ式津波・高潮防波堤用扉体は倒伏状態に保持されており、今後、2012年12月までこの状態を継続する計画である。2011年12月18日～2012年3月31日の扉体係留力の最大値と平均値の変化を図13に示す。扉体空気室内の空気圧は潮位に依存し、その容積は、高潮時には圧縮され、低潮時には膨張するため、潮汐に応じて扉体の浮上力は変動する。図13より、扉体の浮上力に対応して変動する扉体係留力も、潮汐の変化に応じて、およそ12時間周期で変動している様子が確認できる。この扉体係留力は、扉体を係留するフックの変位量とも対応しているため、係留フックが水中で固着することなく常時変位していることがわかる。2012年2月14および同月20日に、扉体係留力が大きく振れているのが確認できる。これは、両日において、寸動動作試験を実施したためであり、この試験により、潮汐が要因となる日常的なフックの変位幅を越えて、フックの可動確認が実施できていたことがわかる。これらの結果より、扉体係留力は常時適正な水準に保持されており、倒伏状態の扉体が有する浮上力も適正に保たれていたことが確認できた。



図13 フラップ式津波・高潮防波堤用扉体の係留力

5. 結 言

これまでに実施した各種の試験を通して、実海域における、フラップ式波除堤および津波・高潮用防波堤の基本動作性能の検証を行った。これらの計測の結果、フラップ式波除堤には、試験装置設置から1年以上が経過

した現時点において、海中における顕著な経時変化の影響はみられず、本試験装置において採用される扉体の起立方法ならびに起立状態の支持方法に問題は認められなかった。また、浮上倒伏試験や扉体係留試験等の様々な試験を通して、フラップ式津波・高潮防波堤の扉体は、常に浮上可能な状態を保持できていることが確認され、使用頻度が極めて低い津波対策可動防波堤としての適応性の高さが確かめられた。

2012年12月まで、津波・高潮防波堤用扉体は、長期倒伏状態にて保持される計画である。この長期倒伏期間においても、扉体倒伏状態にて実施される扉体係留試験および寸動動作試験を通して、本施設に適用される保守管理手法の有用性を継続して検証する。

謝辞：本実海域試験を実施する上での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厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 清宮理ほか：フラップ式水門の浮上・沈降挙動の解析，海洋開発論文集，**2006**，22，691-696。
- 2) 木村雄一郎ほか：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，**2009**，25，93-98。
- 3) 新里英幸ほか：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，**2009**，56(2)，851-855。
- 4) 木村雄一郎ほか：フラップゲート型構造物の流体連成解析モデルの構築とその検証，海洋開発論文集，**2010**，26，237-242。

【文責者連絡先】

Hitz日立造船(株) 事業・製品開発本部
技術研究所 環境プラント研究室
木村 雄一郎
Tel : 06-6551-9435 Fax : 06-6551-9906
e-mail : kimura@hitachizosen.co.jp

Hitachi Zosen Corporation
Business & Product Development Headquarters
Technical Research Institute
Plant & Energy Solution Technology Group
Yuichiro Kimura
Tel : +81-6-6551-9435 Fax : +81-6-6551-9906
e-mail : kimura@hitachizosen.co.jp



木村 雄一郎



仲保 京一



近本 武



佐々木 広輝



森井 俊明



油谷 比土次