

港湾・海岸におけるフラップゲート式可動防波堤技術マニュアル

新井 進太郎*・下迫 健一郎**・仲保 京一***

* (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 研究員

** (一財) 沿岸技術研究センター 審議役

*** カナデビア (株) 機械・インフラ事業本部 鉄構・防災ビジネスユニット 水門設計部 部長

フラップゲート式可動防波堤は、海底に旋回起立する扉体が設置される新形式の防波堤であり、従来船舶航行や海水交換の観点から困難だった港口部の締切を可能とし、周辺景観への影響を低減できる特徴を有する。海底設置による様々な技術的課題を克服し、2024年11月現在は国内2施設で採用されている。本稿はフラップゲート式可動防波堤の設計・施工・保守管理について述べた「港湾・海岸におけるフラップゲート式可動防波堤技術マニュアル」について、その概要と要点について示したものである。

キーワード：フラップゲート，可動防波堤，防潮施設

1. はじめに

フラップゲート式可動防波堤は、「新世紀港湾ビジョン」(2000年度・国土交通省発表)を受けて発足した、沿岸技術研究センターを事務局とする「沿岸域水門研究会」への構造提案から開発が始まった技術である。各種実験等による性能把握・性能向上、実海域試験による信頼性の検証などを踏まえて、2017年に大船渡漁港における津波対策水門として初採用されている。これらの実験結果や実機の設計・施工を通して得られた技術的知見を、この度「港湾・海岸におけるフラップゲート式可動防波堤技術マニュアル」として刊行することとなった。本稿は、フラップゲート式可動防波堤の構造およびマニュアルの概要について述べる。

2. 構造概要

2.1 構造概要

フラップゲート式可動防波堤の構成要素を図-1に示す。主に扉体および扉体に作用した力を函体に伝達するテンションロッド等の可動構造、扉体を格納する函体構造、函体を支持する基礎構造から構成されている。常時は海底で扉体をフックで係留することで航路を確保し、津波等の発生が予測される際は、フックを解放することで扉体先端が水面に出る高さまで無動力で浮上する機構となっている。

本形式の技術的な特色として以下の点が挙げられる。

- ①扉体の起立に港内外の水位差を利用することで、大型構造物の駆動に人工的な動力源を使用しない。
- ②浮上に必要な空気の扉体への給気を平常時に完了することで、ゲート浮上を迅速に行える。
- ③水門設備の大部分を工場で製作完了でき、品質確保お

よび工程面で優位である。また、一括で据え付けるため、航路閉鎖期間の短縮が可能である。

- ④平常時に扉体が海底面に倒伏していることにより、海面上に露出する部材が少なく、一般的な水門と比べ景観への影響が小さく、航行船舶の高さ方向の制限もない。

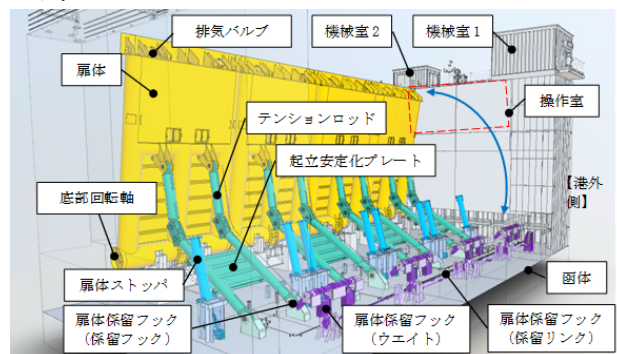


図-1 フラップゲート式可動防波堤の構成部材

2.2 設計基準・設計手法

フラップゲート式可動防波堤の構成部材とそれぞれの設計基準・設計手法について表-1に示す。本技術は港湾の施設及び海岸保全施設として使用するため、「港湾の施設の技術上の基準・同解説(以下、港湾基準)」及び「海岸保全施設の技術上の基準・同解説」に準じる。ただし、上部構造(函体・可動構造・駆動装置など)は機械設備であるため、港湾基準より詳細な記載のある「ダム・堰施設技術基準(案)」に準じる。なお、函体の設計の考え方については、港湾基準及び「道路橋示方書・同解説」が参考となる。

表- 1 構成部材と設計基準, 設計手法

部材			仕様	設計基準・設計手法
上部構造	機械設備	電気・制御設備	電気機器	ダム・堰施設技術基準(案)
		駆動装置	機械装置	
		可動構造	鋼構造	
		函体	鋼構造 (必要に応じコンクリート充填)	
下部構造	土木構造物	基礎構造	直接基礎	港湾の施設の技術上の基準・同解説 および 海岸保全施設の技術上の基準・同解説
			杭基礎	
		支持地盤	必要に応じ、液状化対策や軟弱地盤対策等を実施する	

2.3 要求性能

フラップゲート式可動防波堤に必要な性能は、津波・高潮が発生する場合における背後地域の防護、浸水抑制と通常時の航路確保の両立である、これを踏まえ、要求性能を以下の通り整理している。

- ・設計津波及び高潮に対して使用性を確保する。
- ・設計津波を超える規模の津波に対しては、倒壊しにくい「粘り強い構造」を目指すものとする。ただし施設の要求性能に応じて、使用性や修復性、安全性を考慮した設計をしても良い。

また、地震に対する要求性能として以下を規定している。特に、想定する設計津波が対象施設の近傍を震源とする地震により発生する場合には、設計津波の作用を受ける前に当該地震による地震動の作用を受けることによる影響を適切に考慮する必要がある。

- ・レベル1地震動に対して継続して使用できること。
- ・津波に先行する地震動に対しては、津波襲来時に開口部を閉鎖できること。
- ・レベル2地震動に対しては、施設を管理する自治体の方針、施設の重要度等を踏まえ、検討の要否及び要求性能を設定すること。

3. 下部構造の設計

3.1 基本事項と荷重組み合わせ

フラップゲート式可動防波堤の下部構造は主に直接基礎と杭基礎に分類される。基礎形式は支持地盤の深さに応じて選定されるが、本構造は函体を海底面に埋設する構造となることが多いため、検討の上で函体の床付面の高さ(函体高さは5~8m程度)を考慮する必要がある。なお、本マニュアルでは直接基礎・杭基礎の両形式における性能照査の方針についても記載している。

設計に用いる荷重組み合わせと、その際に想定する扉体の状態を表- 2、表- 3に示す。扉体は常時は倒伏しており、設計津波・設計高潮の来襲時に起立することを前提とした整理としている。なお、フラップゲート式可動防波堤の函体は一般に海底面に埋設されるが、受働土圧の効果が不明確なため、原則として滑動や転倒の照査に土圧を考慮しないこととする。

表- 2 下部構造の設計に用いる荷重組み合わせ(津波対策)

		自重・水重	静水圧	波力	津波波力	地震荷重	土圧	風荷重	衝突荷重	土圧	揚圧力	扉体状態
永続状態	常時	○	○				○	△			○	倒伏
変動状態	変動波浪作用時	○	○	○			○	○	△		○	倒伏
	レベル1地震動作用時	○	○			○	○				○	倒伏
偶発状態	設計津波作用時	○	○		○		○		△		○	起立
	レベル2地震動作用時*	○	○			○	○			△	○	倒伏

注) ○は考慮する荷重、△は必要に応じて考慮する荷重を示す。

*印は当該施設の被災による影響を検討し、必要に応じて実施する。

表- 3 下部構造の設計に用いる荷重組み合わせ(高潮対策)

		自重・水重	静水圧	波力	津波波力	地震荷重	土圧	風荷重	衝突荷重	土圧	揚圧力	扉体状態
永続状態	常時	○	○				○	△			○	倒伏
変動状態	変動波浪作用時(高潮時)	○	○	○			○	○	△		○	起立
	レベル1地震動作用時	○	○			○	○				○	倒伏
偶発状態	偶発波浪作用時(高潮時)*	○	○	○			○	○	△		○	起立

注) ○は考慮する荷重、△は必要に応じて考慮する荷重を示す。

*印は偶発対応施設(主たる作用が偶発波浪)の場合のみ実施する。

3.2 洗掘対策

設計津波の場合でも流速が大きい場合や津波が防波堤を越流した場合、洗掘が生じると防波堤の対津波性能に与える影響が大きい。このため、洗掘対策の基本として、波浪作用に加え設計津波に対しても基礎マウンド及び海底地盤の洗掘を発生させないこととしている。ただし、海底地盤等に一切洗掘を発生させないことが困難な場合は、洗掘が生じても連鎖的に基礎マウンドが崩れ上部構造の安定が損なわれないよう配慮をする。

4. 上部構造の設計

4.1 基本事項と荷重組み合わせ

フラップゲート式可動防波堤の上部構造は、函体、扉体、テンションロッド、扉体係留フックから構成される。津波の引波に対し港内側水位の異常低下を抑制する必要がある場合は、扉体の倒伏を所定の角度で維持する構造(扉体ストッパ)を設置する。

本形式は平常時に可動構造部が海底に倒伏した状態で

維持されることを特徴とするため、以下の事項に適合するように設計する。

- (1) 上部構造に作用する荷重を、確実に基礎構造に伝達できること
- (2) 平常時には扉体の倒伏姿勢を維持でき、稼働時に円滑かつ確実に作動すること
- (3) 稼働時に必要な港内水位変動抑制性能を有すること
- (4) 予想される荷重に対して安全であること
- (5) 操作および点検・整備が容易であること

各状態の設計に用いる荷重組み合わせを表-4に示す。扉体倒伏時には船舶航行による水压変動についても考慮が必要である。なお、津波対策としての稼働状態における地震（余震）の影響や漂流物衝突の同時作用や、高潮対策としての稼働時における波力・漂流物衝突の同時作用は、必要に応じて考慮するものとする。

表-4 可動構造に作用する荷重の組合せ

使用状態	荷重	自重	静水圧	津波波力	波力	地震時動水圧	地震時慣性力	浮力	船舶航行	漂流物衝突	土蔵荷重	風荷重	温度影響
地震時以外	倒伏	○	○		○			○	○		△	△	△
	浮上（津波）	○	○	○						△			
	浮上（高潮）	○	○		○					△			
地震時	倒伏	○	○		○	○	○		○		△	△	△
	浮上（津波）	○	○	○		△	△			△			
	浮上（高潮）	○	○		△	○	○			△			

注) ○は考慮する荷重、△は必要に応じて考慮する荷重を示す。

4.2 函体の設計

函体の寸法は、扉体係留状態において所定の航路水深を確保し、所定の港内水位抑制性能を確保できる天端高とする。なお、航路水深の検討においては、扉体の動揺量や施工時に使用する吊りピースの処理等にも留意が必要である。また、倒伏操作の支障となる扉体格納部への土砂堆積を回避するよう、函体高・配置・向き等に留意する。

函体と基礎構造の取り付け部は、基礎構造の種類により大きく異なる。直接基礎の場合は港湾基準の重力式防波堤に、杭基礎の場合は「ジャケット工法技術マニュアル」および「格点ストラット工法技術マニュアル」に準じるものとする。杭基礎の場合、現場で打設される杭と工場製作のさや管の間での精度管理が重要であり、施工性も考慮しながら上部構造からの荷重を基礎構造に確実に伝達できるよう設計する必要がある。図-2に、杭基礎の場合の取り付け構造例を示す。

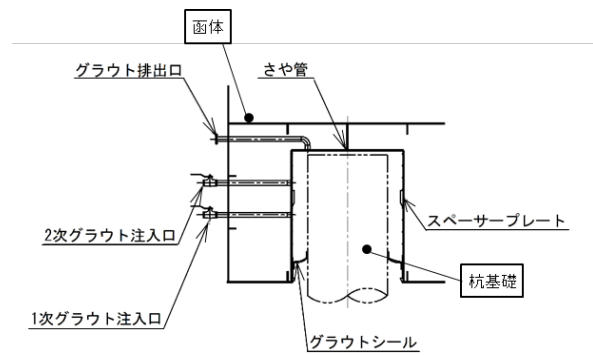
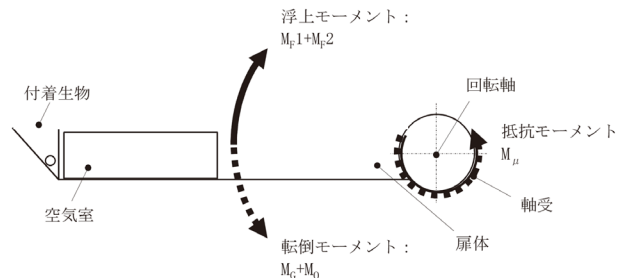


図-2 基礎構造との取り付け部の設計事例

4.3 扉体・テンションロッドの設計

扉体の設計にあたっては、確実に浮上・倒伏操作が行われるよう、水中における扉体のモーメントバランスに留意が必要である。具体的には、浮上操作に対しては、扉体空気室内部の空気による浮上モーメントを、水中における扉体自重及び付着物自重による転倒モーメントと軸受け部の摩擦による抵抗モーメントの合計値に対し125%以上確保するよう設計する。倒伏操作に対しては、大気中における扉体自重による転倒モーメントを、扉体自体が持つ浮力による浮上モーメントと軸受け部の摩擦による抵抗モーメントの合計値に対し125%以上確保するよう設計する。各状態におけるモーメントバランスを図-3に示す。

(a) 浮上（給気）時のモーメントバランス



(b) 倒伏（空気室給気量0）時のモーメントバランス

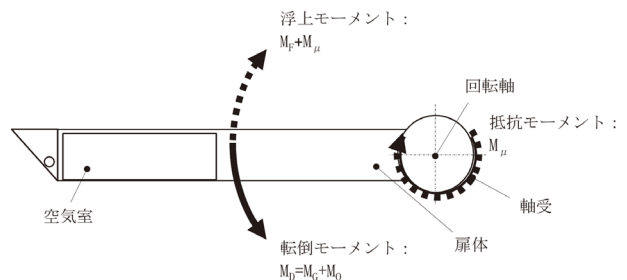


図-3 扉体のモーメントバランス

テンションロッドは扉体からの荷重を函体に伝達する重要な可動構造部材であり、扉体の円滑な浮上・倒伏作を阻害しないよう、自重と浮力が相殺され水中での自重が極力ゼロとなるよう設計する。加えて、段波等により衝撃的な荷重が想定される場合は、衝撃力が緩和可能な構造にすることが望ましい。一例として、扉体とは逆

方向に回転運動を行う抵抗版（起立安定化プレート）を下部テンションロッド間に設置する例がある（図-4）。

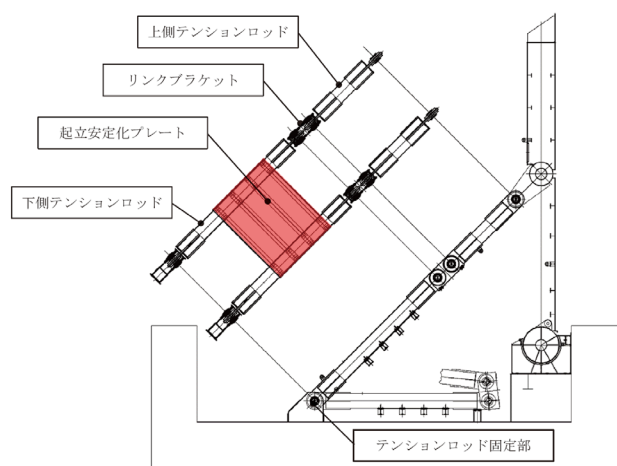


図-4 テンションロッドの設計事例

4.4 扉体ストッパの設計

扉体ストッパは、津波の引き波時に港内水位の異常低下を避けるべく、引き波時の扉体の倒伏を所定の角度で維持できるように取り付けられる部材である。通常時は扉体下部に格納され、扉体が浮上する際に無動力で所定の角度まで旋回起立する。扉体格納時には、後述する扉体ストッパ倒伏装置により、扉体の格納に先立ち倒伏する。倒伏操作にあたり、扉体ストッパ倒伏用のロープが津波堆積物の影響を受けないよう、ロープの上にカバーを設けるなど設計上の配慮が必要である。

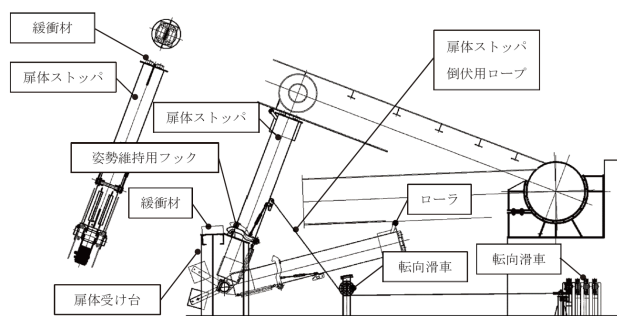


図-5 扉体ストッパ設計事例

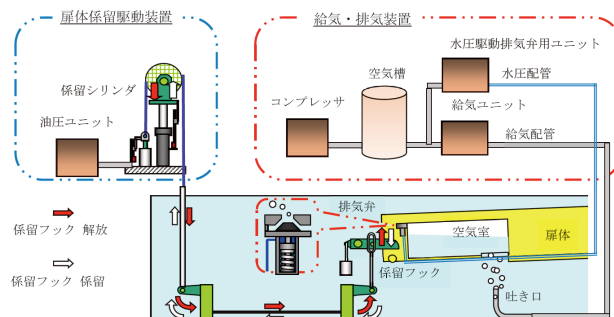
5. 駆動装置の設計、状態監視設備の設計

5.1 駆動装置

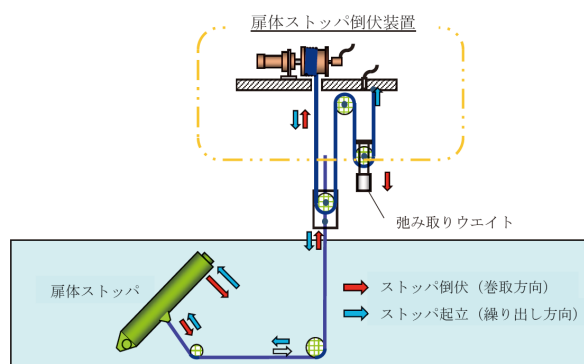
フラップゲート式可動防波堤の可動構造の駆動装置は、以下の要求事項を確保できるよう設計される。

- (1) 平常時には扉体の倒伏姿勢を安全かつ継続的に保持できること
- (2) 稼働時には所定の時間内に確実に扉体を浮上できること
- (3) 津波の危険が去った場合は、可動構造部を浮上待機状態に復帰できること
- (4) 操作及び点検・整備が容易なこと

標準的な構造の場合、扉体の係留維持および解除をする扉体係留駆動装置、扉体の浮上に必要となる空気の備蓄や倒伏操作時の排気をする給気・排気装置、扉体倒伏操作時に扉体ストッパを倒伏させる扉体ストッパ倒伏装置の3駆動装置から構成される。各駆動装置の機能と役割を図-6に示す。



(a) 扉体係留駆動装置及び給気・排気装置



(b) 扉体ストッパ倒伏装置

図-6 駆動装置の例

5.2 状態監視設備の設計

フラップゲート式可動防波堤は、可動構造のほとんどが常時海底に設置され、気中での目視管理が困難である。このため、操作室内から設備の状態を把握できるよう状態監視設備を設けることを標準とする。状態監視設備は扉体の係留力・傾斜角度を常時確認し設備の健全性をリアルタイムで確認できるとともに、それらのデータを収集・蓄積することで経年に伴う設備状態の劣化についても定量的な評価が可能となるよう設計する。

6. 施工

フラップゲート式可動防波堤の施工は、設計に基づく機能を発揮するとともに長期間使用できるよう製作・輸送・据付を行う必要がある。本マニュアルでは、製作・輸送・据付に係る全体的な手順、準拠する基準及び留意点を整理している。全体施工フローの一例を図-7に示す。

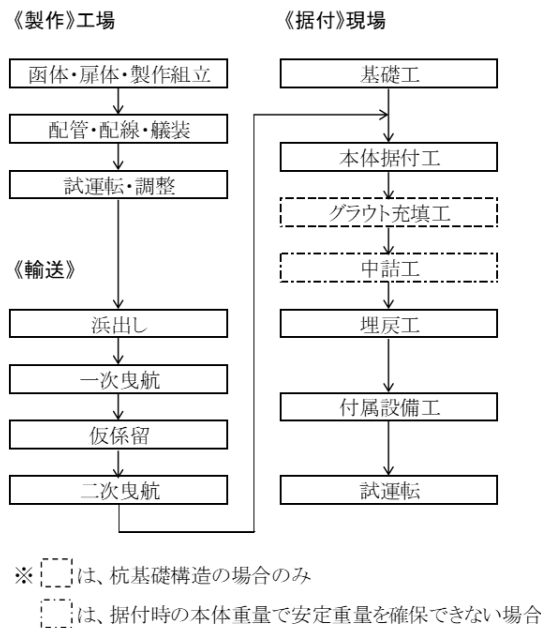


図-7 全体施工フローの例

7. 保守管理

フラップゲート式可動防波堤は、基本的な機器構成は一般的な水門扉を踏襲しているため、従来の水門と重なる部分については「海岸保全施設維持管理マニュアル」および「ダム・堰施設技術基準（案）基準解説編・マニュアル編」に準拠することとしている。

本技術特有の留意点として、海底面に係留された扉体を点検・整備する際には、航行船舶への影響が無いよう、安全対策を講じるとともに、関係者への協議・打ち合わせ・連絡等を十分に行う必要がある。例えば、設備の保守管理の一環として、航路を確保しつつ海底面以下の範囲で扉体を上下する寸動操作と呼ばれる管理運転をする際は、扉体内の空気を排気し航路内に大量の気泡を生じるため、関係者への周知や操作タイミングなどに配慮が必要である。

なお、本マニュアルでは巻末資料として上部構造点検整備要領表の一例(図-8)を付している。保守管理の上で参考になれば幸いである。

[illegible]

図-8 上部構造点検整備要領表の一例

8. おわりに

本マニュアルはフラップゲート式可動防波堤の基本的な考え方を提示し、初めて設計に携わる技術者でもその特徴を正しく理解して設計できるよう、技術的知見とともに施工実績から得られた設計・施工例を記載した。本マニュアルが、施設計画や設計・施工・保守管理に携わる技術者・管理者に活用され、適切に設計・施工・保守管理が行われることを期待する。

謝辭

本マニュアルの作成にあたって、港湾・海岸におけるフラップゲート式可動防波堤技術マニュアル作成委員会（委員長：清宮 理 早稲田大学名誉教授）を設置し、委員の皆さまには貴重なご意見・ご指導を頂きました。また、五洋建設株式会社・東洋建設株式会社にはフラップゲート式可動防波堤の施工実績を基に、施工に関する留意点等の執筆にご協力を頂きました。委員・関係者の皆様にはここに厚く御礼申し上げます。

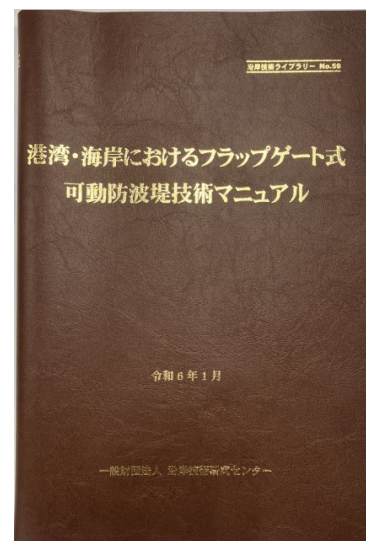


写真-1 港湾・海岸におけるフラップゲート式

可動防波堤技術マニュアル

(沿岸技術ライブラリーNo. 59, 令和6年1月, 沿岸技術研究センター)

