

津波対策としての新たな構造形式について ー海底設置型フラップゲート式可動防波堤の紹介ー

日立造船株式会社	仲	保	京	一
東洋建設株式会社	水	谷	征	治
五洋建設株式会社	山	下		徹
岩手県	阿	部	幸	樹
水産庁	不	動	雅	之
一般社団法人全日本漁港建設協会	牧	野	稔	智
株式会社長野漁港技術事務所	長	野		章

目 次

1. はじめに.....	28	3-2 詳細設計.....	30
2. 設備概要.....	28	3-3 工場製作・輸送.....	31
2-1 設備構成と作動機構.....	28	3-4 現地据付.....	33
2-2 設備の特徴.....	29	3-5 現地試運転.....	34
3. 施工事例.....	30	4. おわりに.....	35
3-1 工事概要.....	30		

1. はじめに

海底設置型フラップゲート式可動防波堤（以下、本設備という。）とは、平常時は海底に倒伏して船舶の通行を確保し、津波や高潮が予測される場合に、水面上にゲート（扉体）を浮上させて、航路を締め切ることで背後域への浸水を抑制する津波・高潮対策施設である。

本設備の研究・開発は2003年度に開始され、各種実験等により基本性能の把握ならびに性能の向上が図られ、2009年度までに実用化に必要な室内実験¹⁾²⁾³⁾⁴⁾が概ね完了した。また、2010年度からは、開発の最終段階である実海域試験による基本機能および信頼性の検証⁵⁾⁶⁾が行われた。その後、東日本大震災において多くの海岸構造物が津波により被災したことを踏まえ、2013年度に本技術の粘り強さを検証することを目的とした水槽実験が追加実施された⁷⁾。そして2017年、岩手県大船渡漁港細浦地区における津波対策水門に初採用⁸⁾⁹⁾され、2020年12月に工事が完了した。

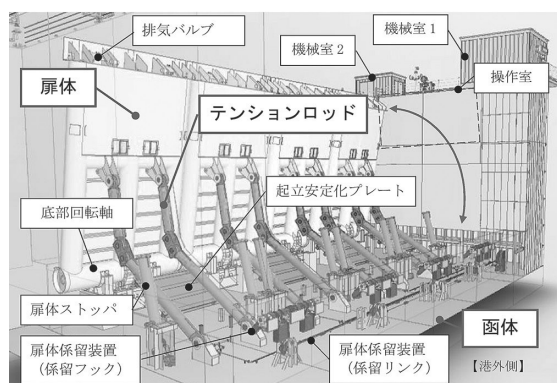
本稿では、本設備の概要紹介と本設備が初

採用された大船渡漁港細浦地区における津波対策水門工事の施工結果について報告する。

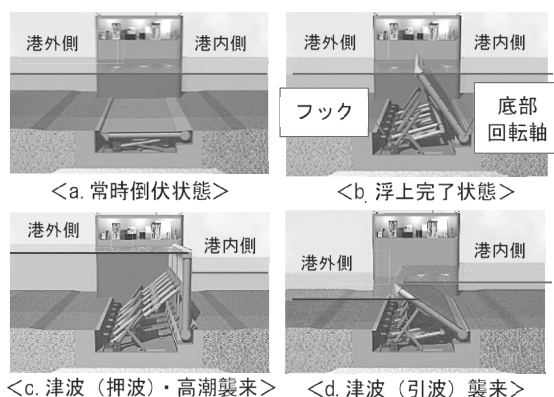
2. 設備概要

2-1 設備構成と作動機構

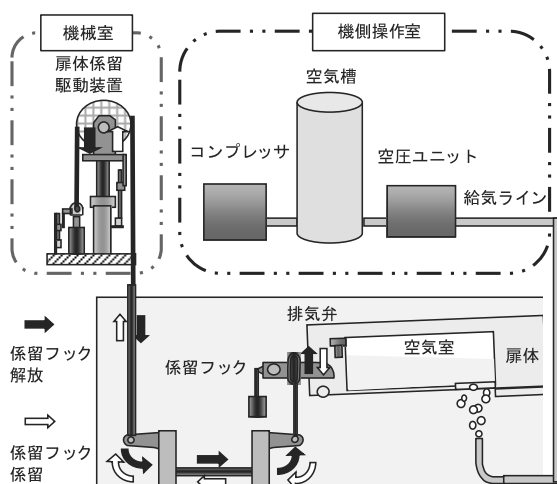
本設備の機器構成を図－1に示す。本設備は、扉体、扉体を格納する函体および扉体起立時に扉体上部に作用する荷重を函体に伝達するテンションロッド等を主な部材として構成される。本設備の作動イメージを図－2に示す。開口部に一列に並べて配置される扉体は、隣接する扉体同士が先端部にて緩く連結されており、底部回転軸を中心に旋回起立することで連続した防波堤を形成する。扉体は常時海底に倒伏した状態であるが、浮上に必要な浮力は平常時に扉体空気室内へ給気しておくことにより確保し、常時は扉体が浮上しないよう、函体に設けたフックにより扉体先端を係留している。津波等の発生が予測されるとき、係留フックを解放操作することで、扉体自体の浮力により先端が水面に出る高さ



図ー１ 機器構成



図ー２ 作動イメージ



図ー３ 扉体給気および係留システム

まで浮上する。なお、係留フックの解放操作は、施設管理者による手動操作の他、全国瞬時警報システムや、港内側潮位の異常上昇をトリガーとする自動操作にも対応する。その後、扉体は津波等による潮位上昇に伴う港内外の水位差を利用して、所定の高さ（角度）まで無動力で起立する。扉体に作用する荷重は、テンションロッドと底部回転軸を介し函体基礎に伝達され、函体は基礎杭等により支持され、施設の安定性が確保される。津波の引き波の際に港外側水位が低下した場合は、扉体が扉体ストッパにより所定の角度に保持され、港内水位の異常低下を抑制する。

2-2 設備の特徴

本設備は、以下に示す優れた特徴を有している。

（１）自然の力活用による動力の小型化

本設備では、扉体を起立させる際、津波等に伴う港内外の水位差を利用する。大型構造

物の駆動に電気等の人工的な動力源を使用しない方式とすることで、機械装置ならびに電源装置の小型化を実現する。

（２）事前給気による迅速なゲート閉鎖

本設備に採用する扉体給気システムと扉体係留システムを図ー３に示す。本設備では、ゲート浮上に必要な空気の扉体への給気を、平常時に完了しておく方式を採用する。そのためゲート閉操作時にはコンプレッサ起動や空圧ユニット内のバルブ操作等を不要にでき、扉体は係留フック解放操作のみで直ちに浮上を開始する。これにより本設備では、従来形式の水門と比較して、極めて短時間のうちにゲート閉鎖を完了できるとともに、信頼性確保のための給気システムの２重化や商用電源停電時におけるコンプレッサ運転のための非常用電源の省略を可能とする。なお、細浦地区水門では、ゲート浮上１回分に相当する圧縮空気を、扉体空気室とは別に設けた空気槽に貯留しており、ゲート倒伏操作直後に地震が発生した場合においても、コンプレッサを起動することなく、短時間のうちにゲート閉鎖できる。

（３）一体製作・輸送による工期短縮

本設備は、水門設備の大部分を工場にて製作完了できるため、現地施工の場合と比較して施工性が良く、良好な施工品質を確保しやすい。また、工場製作と現地基礎工事を並行作業できることから、全体工期を短縮できる。工場製作した設備は、一括で据付を行うため、施工時の航路閉鎖期間も短縮できる。

（４）確実な稼働のための維持管理性確保

本設備は、平常時に航路を確保するとともに

に、有事には確実に浮上して背後域への浸水を抑制することが求められる。そのため、設備完成後の維持管理は極めて重要であり、常に設備の状態を正しく把握するとともに、必要な点検・整備がタイムリーに実施できなければならない。一般に平常時に稼働しない水門は、巡視による目視点検や管理運転により設備状態を把握するが、本設備では、扉体係留力や扉体揺動量等を常時監視する状態監視システムにより、自動的かつ定量的に設備の状態を把握する。

また、点検・整備をタイムリーに行うには、扉体倒伏状態すなわち航路を確保した状態で、必要な点検・整備作業が行えることが望ましい。そのため、本設備では機械室および操作室を配置する管理塔側にダイバー通用口ならびに機材搬出入口を設け、航路制限を行うことなく、ダイバーが管理塔天端から扉体の下側にアクセスし、必要な点検や作業が行えるようにしている。

(5) 景観と海上交通への配慮

本設備では、平常時に扉体が海底面に倒伏しているため、一般的な水門と比較して景観に与える影響が小さく、航行船舶に対する高さ方向の制限もない。

3. 施工事例

3-1 工事概要

本工事は大船渡漁港海岸のうち、細浦地区水門工一式の整備を行うものである。水門設置位置を図-4に示す。また、本工事の全体

工程表を表-1、施工フローを図-5に示す。

3-2 詳細設計

本設備の設計諸元を表-2に、一般図を図-6に示す。

(1) 函体

函体の設計では、先行施工される鋼管杭と現地接合するさや管部のクリアランスを、さや管と杭のグラウト接合強度を確保する範囲内で極力大きくとることを考えて、杭外形φ1000mmに対し、片側165mmの施工誤差に対応できるように設定した。扉体格納ピットの寸法は、設備完成後に扉体下側で行われる点検や部品交換等の潜水作業に支障が生じない空間を確保するように決定し、扉体倒伏（航路を確保した）状態で格納ピット内の堆積物を函体外に排出するための堆積物排出管を設置した。

(2) 可動構造

扉体の設計では、確実に扉体の浮上・倒伏操作ができるよう、水中における扉体のモーメントバランスに留意した。具体的には、確実に浮上操作ができるよう、扉体空気室内部の空気による浮上モーメントが、水中における扉体自重および付着生物自重による転倒

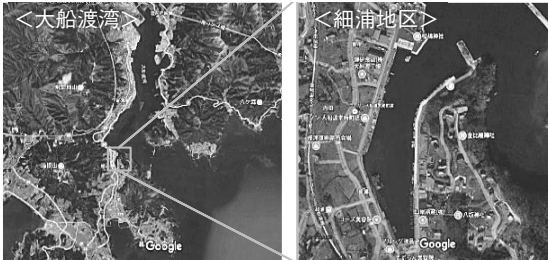
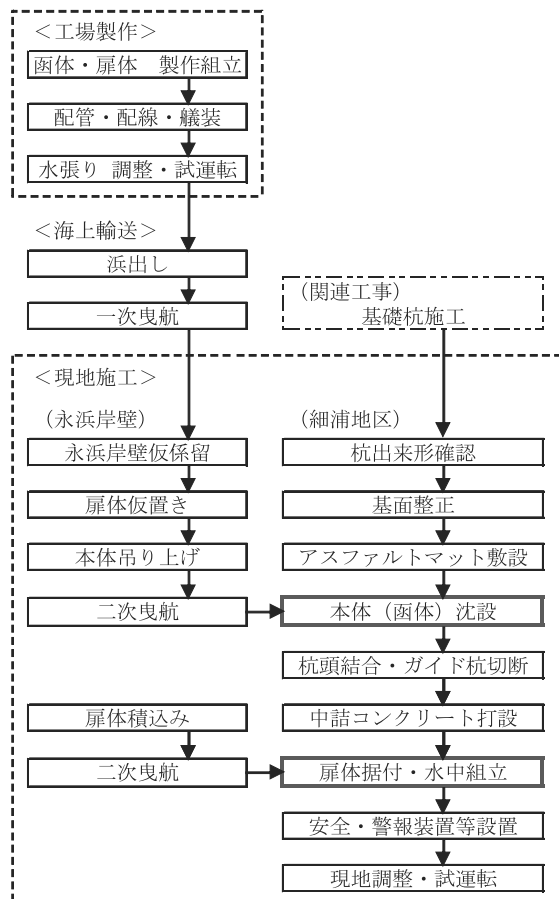


図-4 水門設置位置

表-1 全体工程表

	2017年度				2018年度				2019年度				2020年度			
1. 詳細設計																
2. 製作																
製作																
調整・試運転																
3. 輸送(一次曳航)																
4. 現地工事																
基面整正																
本体(函体)沈設																
杭頭結合・ガイド杭切断																
中詰コンクリート打設																
扉体据付・水中組立																
現地調整・試運転																
階段等付属設備設置																



図ー５ 施工フロー

モーメントと軸受部の摩擦による抵抗モーメントの合計値に対して、125%以上を確保するように設計を行った。また、確実に倒伏操作ができるよう、大気中における扉体自重による転倒モーメントが、扉体自体が持つ浮力による浮上モーメントと軸受部の摩擦による抵抗モーメントの合計値に対して、125%以上を確保するように設計した。なお、扉体空気室内部の空気量は、潮位変動に伴う体積変化を考慮するものとし、付着生物の自重は、漁港・漁場の施設の設計参考図書に準拠し、水中重量として80N/m²を採用している。

扉体底部回転軸、テンションロッド、係留ピンの軸受構造には、将来の部品交換作業性を考慮し、軸を抜き出さずにブッシュ交換できる構造を採用するとともに、扉体下側への堆積物の落下を極力低減するよう、扉体側面に水密兼防塵ゴムを配置し、扉体底部には防塵膜を、扉体先端部には防塵ブラシを設置した。また、将来の扉体取外しにも対応できるよう、現地据付時に使用する吊りピースは、

表ー２ 設計諸元

仕様項目			水門設備
ゲート形式			起伏式フラップゲート
純径間			32.000 m
有効高			13.000 m
扉体天端高			T. P. +7.500 m
ゲート敷高			T. P. -5.500 m
設計入射波高			T. P. +4.900 m
検討 潮位	押波時	港外側	T. P. +0.620 m(H. W. L.)
		港内側	T. P. -6.500 m (1mの地盤沈下を見込む)
	引波時	港外側	T. P. -6.500 m (1mの地盤沈下を見込む)
		港内側	T. P. -0.880 m(L. W. L.)
衝突荷重			20 kN/m

航路水深を阻害しないようスキンプレート下側に配置し、残置できるように設計した。

(3) 駆動装置

扉体を常時係留状態に保持するための係留フックに作用する荷重は、扉体空気室内部の空気による浮上力に加え、波浪に伴う扉体上面と扉体下面の水圧差および船舶航行に伴う水圧変動を考慮した。また、扉体係留駆動装置には、扉体が外れない範囲で波浪に追従して揺動できるよう、係留ロープの末端に動揺追従機構を具備することで、係留部材に作用する荷重の軽減をはかった。

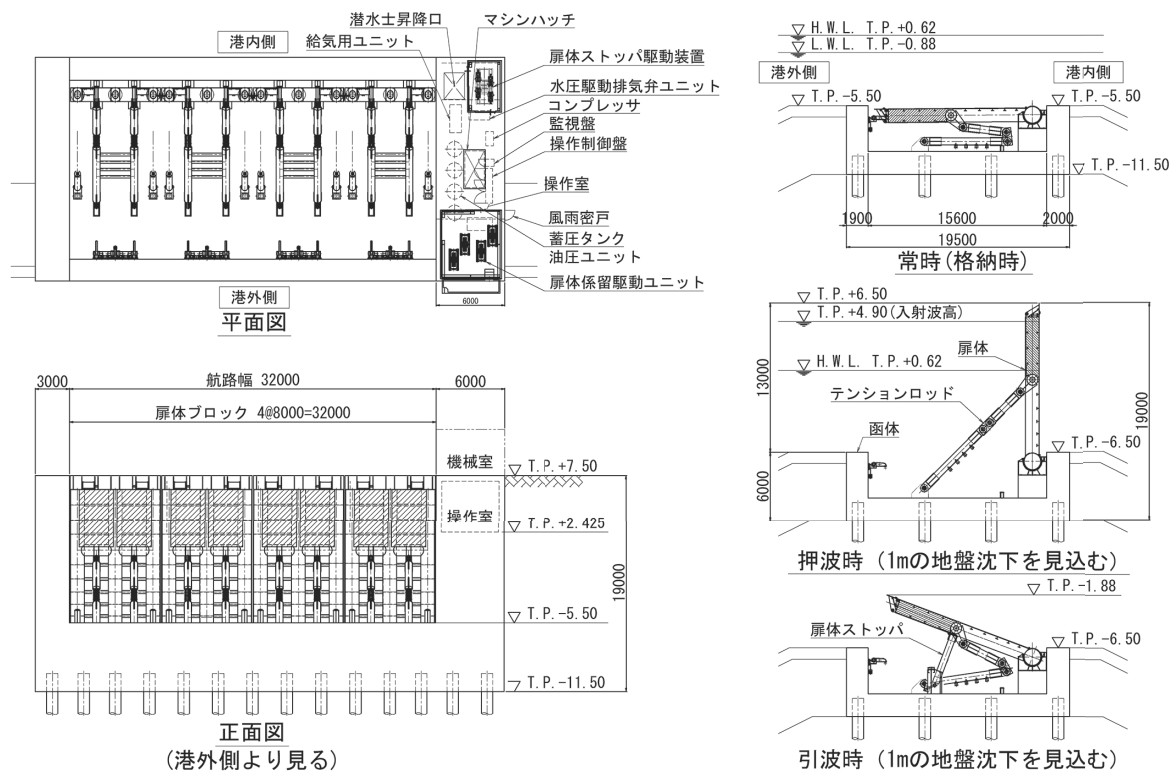
(4) 防食

鋼材の防食は、海中部は被覆防食工法と電気防食工法の併用とし、海上部については被覆防食工法のみにより行った。被覆防食工法の種類は、L. W. L. -1.0mより上側に超厚膜形被覆工法を適用した。また、扉体空気室の内面には、内部に空気が貯留されて電気防食が十分に効かないため、超厚膜形被覆工法を適用した。

3-3 工場製作・輸送

工場製作状況を図ー７に示す。工場では構成機器のうち、鋼構造部の製作とその他機械装置類の組込み、設置等を行い、最後に函体の扉体格納部分に注水して基本動作の確認までを行う。

製作は、製作・組立に時間を要するとともに各機器を組み込むベースとなる函体から開



図一六 水門設備一般図

始した。函体はハンドリング性を考慮し、最大重量1000kN程度を目安とした全16の小ブロックに分割して製作し、それらを大組立ヤード（ドライドック内）に運搬し、さや管位置の寸法精度向上のための函体ブロック仕上げ切断を行った後、工場設備のクレーン等を用いて大組立作業を行った。

扉体の製作は、函体製作開始から5ヵ月後に開始し、その後、テンションロッド、扉体ストッパ、扉体ストッパ架台、係留フック等を全体組立に必要な時期に合わせて、順次製作を開始した。ドライドック内での大組立てでは、函体上に設置する可動構造部材の取付位置にマーキングを施し、この基準線に従って各部材の取付けを実施した。可動構造部材の取付けは、まず初めに据付基準となる底部軸受けの位置決めから行った。続けて、扉体ストッパ架台・転向シーブ等の位置決め、溶接を行い、扉体ストッパの搬入、組立てを行った。その後、扉体ストッパ倒伏装置を函体上に搭載し、ワイヤリングを行い、クレーンにより扉体ストッパを吊上げてロープ長さの調整を実施した。このとき並行して扉体係留フックの取付も実施した。その後、扉体係

留駆動ユニット、リンクロッドの取付を行った。

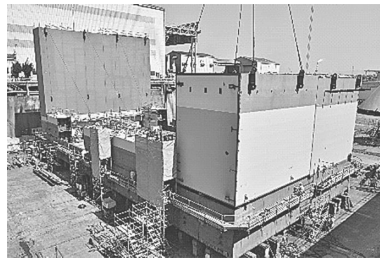
扉体下側機器の組立完了後、扉体の搭載を行った。扉体は現地で一旦取外し、再度海中で組立てる必要があるため、工場での扉体の取付け作業の際に、現地施工を行う業者が立ち会えるよう調整を行い、組立手順等の情報を共有した。大組立完了後、給気配管と、排水バルブのための水圧配管組み立て、傾斜計の配線作業等を行った。

その後、現地における調整作業の軽減を目的とし、工場内で函体内に注水し、調整・試運転を実施した。函体内注水完了後、約2週間かけて一通りの作動確認を実施するとともに、扉体下側に潜水土を入れて、事前の作業性確認も行った。

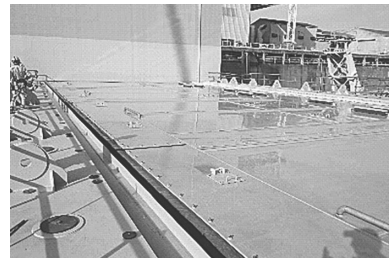
浜出し前日、堺工場に3,700 t 吊の起重機船が到着し、起重機船クレーンに、本体吊り上げ用吊枠および水中吊り金具の取付を行い、その後ドック内にポンプで海水を注水した。浜出し当日は、起重機船をドックに引き込み、ワイヤーロープと吊り金具を函体と連結し、起重機船のクレーンにより函体を吊り上げ、起重機船をドックから引き出した後、14,500



ブロック製作



大組立



工場水張調整・試運転

図－7 工場製作状況



本体二次曳航



本体据付



扉体現地据付

図－8 現地据付状況

t 積台船をドック開口部に係留し、その上に製品を搭載した。

製品は製作工場のある大阪府堺市から据付場所である岩手県大船渡湾の永浜岸壁まで一体で海上輸送（一次曳航）した。

3-4 現地据付

現地据付状況を図－8に示す。据付場所では、まず始めに基礎が構築される。本工事では先行工事による杭基礎の施工完了を待って、本体（函体）の設置作業を開始した。現地における最初の作業は、現地測量ならびに先行工事で施工された鋼管杭およびマウンドの出来形計測である。現地測量ではドローンによる空中測量とナローマルチビームによる深淺測量を実施した。また杭頭レベルおよび杭間隔の計測も実施した。次の作業は函体を設置する基面の整正である。基面精度が不十分な場合、施設本体の傾きや高さ不足、片当たり偏荷重による本体損傷の原因になる。そのため、本工事では、一般的な本均しの2倍の精度0～＋5cmで基礎砕石の切り下げ精度を確保した上で、杭周りにアスファルトマットを設置し、函体への偏荷重作用防止を図った。本工事における基面整正の範囲は約800㎡、アスファルトマットの設置数は56箇所、これら

の作業には3週間の期間を要した。

基面整正後は、フラップゲート本体の沈設を行うが、設置箇所である細浦地区は防波堤などの既存施設もある狭隘な場所であったため、本体沈設のために現地に配置できる起重機船の吊能力は最大でも18000kNに制限された。函体と扉体が一体では、吊治具も含めた総重量が約20000kNとなり、起重機船の吊能力を超過するため、本体沈設前に永浜岸壁で扉体の取外しを行った。扉体4基を取り外すことにより、据付総重量は約16000kNまで軽減し、起重機船の吊能力以内に収めることができた。

本工事では既存の漁港を使用しながら施工を行う。そのため、航路閉鎖期間は極力短縮することが望まれた。本体据付のために確保した航路閉鎖期間は2日間であった。計画では1日目に永浜岸壁で本体を吊り上げ、細浦地区までの二次曳航を完了する予定であったが、午前中の作業を予定通り完了したところで気象条件が悪化し、午後に予定していた二次曳航は翌日に持ち越された。2日目朝、気象条件は既に回復しており、起重機船は早朝に永浜岸壁を出発し、漁業施設を回避しつつ、狭い防波堤開口部も無事通過し、約1時間後に細浦地区に到着した。本体の沈設は、函体側に設けられたさや管に、先行して

施工された56本の鋼管杭全てを挿入する必要があった。さや管と杭のクリアランスは設計上165mmであったが、函体据付に先立ち、杭の施工記録と工場製作記録との相関をチェックすると最小クリアランスは56mmであった。現地施工では、56本の杭のうち4本をガイド杭として水上に残置し、これを目安にして誘導するとともに、本体の位置情報（さや管と杭の離隔）をリアルタイムにVR（Virtual Reality）表示可能としたICT（Information and Communication Technology）を活用して据付を行い、予定された航路閉鎖期間で、無事に本体を設置完了することができた。

本体据付後、杭と函体を結合させるため、函体底部に設けたさや管と杭との間に所定の強度を有するグラウトを充填した。グラウト材は水中で隙間なく充填し、所定の強度を確保しなければならないため、作業開始に先立って、試験練り及び圧送試験を実施した。グラウト充填作業は、予め函体側に取り付けられた配管にダイバーが水中でホースを接続し、陸上に配置したグラウトポンプからグラウト材を圧送することにより行った。なお、グラウト材の充填完了は、注入量管理に加え、下側配管から注入したグラウト材が上部配管から排出されることにより確認した。

その後、所定の函体重量を確保するため、函体鋼殻内部に中詰コンクリートを打設した。中詰めコンクリートの打設は、コンクリートポンプ車を管理塔横の仮設栈橋に配置し、鋼殻に設けられた打設孔まで海上配管して実施した。打設完了後、出来形計測を実施して所定の打設量が確保されていることを確認し、水抜き穴への蓋の設置、管理塔内の打設配管撤去を行った。

コンクリート打設完了後、扉体据付前に清掃、準備作業を実施した。扉体重量は1基あたり約1100kNあり、扉体据付時における函体との最小クリアランスは50mmであった。水中において非常に高い精度で設置を行う必要があったため、扉体の据付には、沈設作業中の船体の揺れを抑制できるスパット式3000kN吊起重機船を採用した。扉体の据付は1回につき2日間で2基ずつ行った。1日目、まず初めに永浜岸壁にて扉体2基を起重機船上に搭載し

た。2日目、永浜岸壁から細浦地区まで運搬し、中央部の扉体2基を1基ずつ水中作業で所定の位置に沈設した。同様の手順で両サイドの2基も沈設し、計4日間で4基の扉体を函体上に沈設完了した。その後、水中にて潜水士が設置位置の微調整を行い、テンションロッド軸の挿入、底部防塵膜取付、スラスト受け組立、底部軸受け組立、底部水密ゴム取付、傾斜計ケーブルの接続作業および排気弁駆動用水圧配管の接続作業等を行って、扉体の据付作業が完了した。扉体4基の函体上への沈設、組立には約3週間の期間を要した。

扉体据付完了後、調整・試運転を行うとともに、スピーカー、投光器、電光掲示板等の安全施設および階段等付属設備の設置を行い2020年12月に水門設置工事が完了した。

3-5 現地試運転

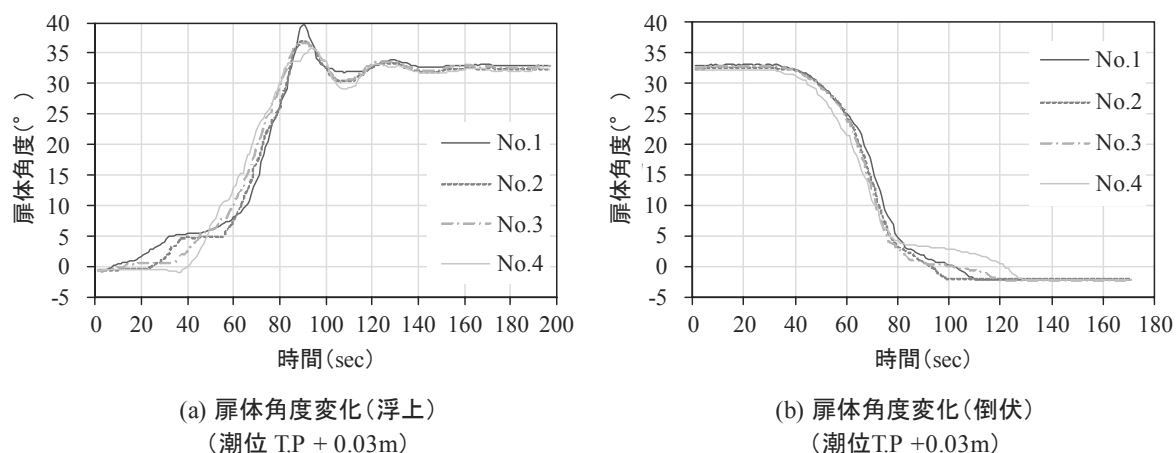
現地試運転では、まず初めに各扉体単独での動作確認を行い、その後、扉体4基をチェーン連結して一連の作動確認を行うことで、所定の開閉性能を満たすことを確認した。

扉体連結後の試運転における扉体挙動の例を図-9に示す。ここで、扉体は機械室に近い順からNo. 1、No. 2、No. 3、No. 4として表示した。

扉体は、係留フックの解放操作開始から約70秒で、扉体天端が海面上まで浮上し、扉体空気室の排気弁の開放操作開始から約130秒で全ての扉体が倒伏・着床しており、ゲート開閉操作が極めて短時間のうちに完了できることが確認できる。

また、扉体浮上時は図-9(a)に示すように、扉体No. 1の角度が5°程度に達すると、浮上速度が急減している様子が確認できる。これは隣接する扉体同士を連結するチェーンの張力によるもので、扉体間の角度差が約3°以内に留まるよう設計されているためであり、扉体連結金物が正常に機能を発揮していることが確認できる。

扉体倒伏時は、図-9(b)に示すように、いずれの扉体も大きな位相差なく沈降し、扉体格納部に進入する際、格納部内の正圧によって沈降速度が急減し、滑らかに着底する様子が確認できる。またこのときの扉体傾斜角度



図ー9 ゲート操作時の扉体の挙動

は約33°であり、潮位T.P +0.03のときの机上計算結果である31°と概ね一致する結果を示した。

4. おわりに

本工事は、海底設置型フラップゲート式可動防波堤の初採用工事であったため、経験の少ない作業や海中での潜水作業も多かったが、工事関係者との事前協議・情報周知を徹底し、無事に施工を完了することができた。また、2021年度には兵庫県に本設備2号機の据付が完了した。本技術は津波時に、水門の人的操作を必要とせず、迅速かつ確実に航路を閉鎖できることから、津波防災の安全性向上に寄与する。引き続き技術の改良に努め、今後の安全・安心社会の構築に微力ながら貢献できれば幸いである。

参考文献

- 1) 下迫健一郎ほか，フラップ式構造物の波浪および津波に対する水理特性，港湾空港技術研究所

資料，No. 1155，2007。

- 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，第25巻，pp. 93-98，2009。
- 3) 木村雄一郎ほか，フラップゲート式可動防波堤の波圧応答特性に関する実験的研究，海岸工学論文集，第56巻，pp. 806-810，2009。
- 4) 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，第56巻，pp. 851-855，2009。
- 5) 木村雄一郎ほか，フラップゲート式可動防波堤の実海域試験，土木学会論文集B3，Vol. 68，pp. 240-245，2012。
- 6) 木村雄一郎ほか，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，土木学会論文集B3，Vol. 69，pp. 395-400，2013。
- 7) 木村雄一郎ほか，フラップゲート式防波堤の津波に対する抵抗機構に関する実験的研究，土木学会論文集B3，Vol. 70，pp. 378-383，2014。
- 8) 阿部幸樹ほか，ベネチアモーゼ計画と我が国における海底設置型(フラップ式)防潮堤(岩手県大船渡漁港細浦地区)の実施，平成30年度日本水産工学会学術講演集，pp. 5-8，2018。
- 9) 阿部幸樹ほか，海底設置型(フラップ式)防潮堤防の計画と可能性，平成30年度日本水産工学会学術講演集，pp. 9-12，2018。