

高潮・津波対策用のフラップ式可動ゲートの開発

DEVELOPMENT OF FLAP TYPE MOBILE GATE FOR PROTECTION AGAINST STORM SURGE AND TSUNAMI

白井 秀治¹・永田 修一²・藤田 孝³・新里 英幸⁴
・仲保 京一⁵・高橋 和夫⁶

Shuji SHIRAI, Shuichi Nagata, Takashi FUJITA, Hideyuki NIIZATO,
Kyouichi NAKAYASHU, Kazuo TAKAHASHI

¹正会員 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 工博 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 技術研究所 (〒551-0022 大阪市大正区船町2-2-11)

⁴正会員 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)

⁵日立造船株式会社 (〒592-8331 大阪府堺市築港新町1-5-1)

⁶日立造船株式会社 (〒592-8331 大阪府堺市築港新町1-5-1)

Recently, the sea level rise due to global warming is apprehensive, and the sea level rise increases vulnerability to inundation in coastal areas due to storm surges and tsunamis. A flap gate is useful as one countermeasure against the storm surges and tsunamis. We are performing the studies for design and construction by considering the hydraulic and hydrodynamic characteristics for the new type flap gate. This paper presents the results derived by the hydraulic model tests using the 2-dimensional channel with a wave maker and the model of scale 1: 35, in order to investigate the characteristics of the gate behavior during rise and sink and the floodgate effects on hydrodynamics given by various conditions of wave motion and tidal movement.

Key Words : gate, flap, wave, storm surge, tsunami

1. はじめに

近年、台風接近時における高潮や南海、東海、東南海地震等の地震津波によって浸水被害が発生しやすい場所の防護施設として、港口を封鎖する可動式水門が検討され始めている。このような可動式防潮堤としては、通常時は水中に倒伏し、高潮・津波来襲時に扉体の浮力により起立して港口を閉鎖する可動式フラップゲートが有望視され、国内の各所で研究が進められている¹⁾²⁾。イタリアのベニスでは、実際に、高潮から市街地を防護するための施設として浮上式フラップゲートが採用され、数年に渡る研究期間を経て建設工事が始まっている。浮上式フラップゲートは、平常時は水中に格納するため、ローラーゲートやスライドゲートなどの既存防潮施設の様な格納用の門柱や広大な格納用地が不要であり、閉鎖時間が短いため船舶の運航を阻害する時間が最小限ですむため、我が国の港湾の入り口への設置に適している。

本研究では、津波・高潮対策水門としての機能を満足し、且つ建設コストを大幅に縮減した新形式フラップゲートの提案を行い、仮定した設計条件のもとに試設計を行い、模型実験により実構造物としての成立可能性を検討した。図-1に提案するフラップゲートを示す。本ゲートは、浮上に扉体上端部に設置した浮袋を利用し、

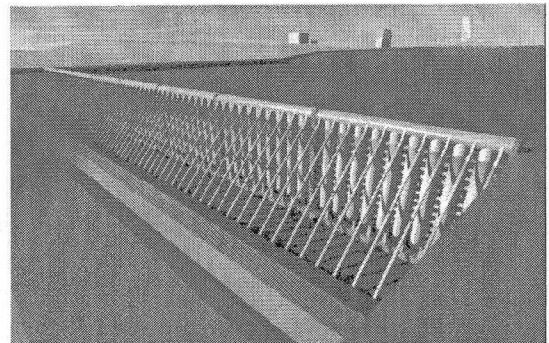


図-1 港口へのフラップゲート設置イメージ

高潮・津波の水位上昇による水圧荷重を鋼製テンション材で支持する形式である。ゲートの開閉操作手順は図-2に示す通りで、通常時は、船の航行の確保や港内側の環境を維持するために水底に格納しており、高潮や津波の襲来時に、給気バルブを解放することにより、堤体に設置した蓄圧タンクから扉体上端部の浮袋に高压空気を流入してゲートを即座に閉鎖状態まで浮上させる。その後、高潮・津波による水位の上昇に伴い、ゲートは、全閉状態まで起立し、港口の閉鎖が完了するものである。また、高潮や津波が過ぎ去った後は、浮袋内の空気を自然排気もしくは強制排気することによって扉体を沈降させ、函体内に格納するものである。なお、本ゲートは比較的水深の深い港口への設置を想定しているため、ここで取り扱う津波は、長周期の潮位変動と考える。

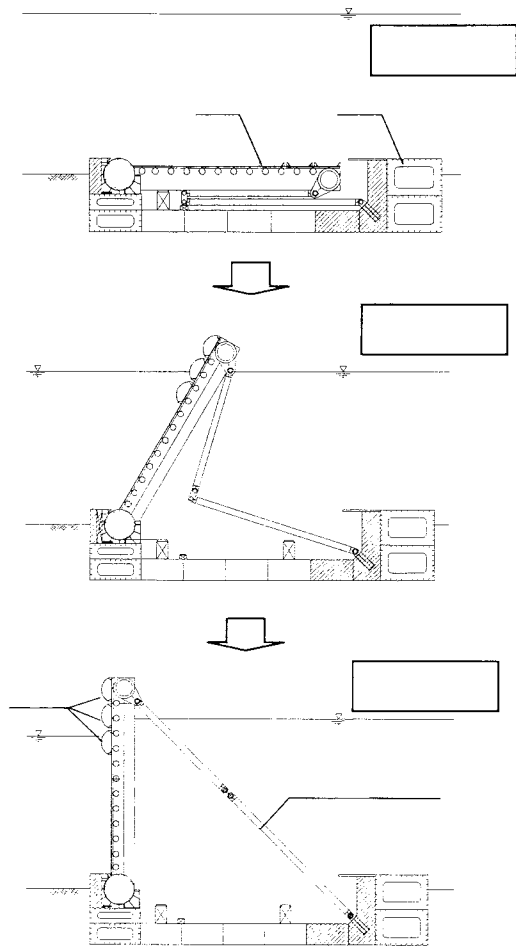


図-2 ゲート操作手順

2. ゲート構造

(1) 構造形式

ゲート全体は、中空パイプ形状の主桁とスキンプレートで構成される扉体、潮位差と波浪による水圧荷重を伝達するテンションロッド、水平・鉛直荷重を受け持つ函体、開閉時の浮力をコントロールする給排気システムで構成される。中空パイプ形状の主桁内にはポリウレタンフォームを充填し、タンク損傷時にも所定の浮力を確保できるように配慮する。また、給排気システムは、ゲ-

ト兩岸の堤体に設置した蓄圧タンク、平時にタンク内に圧縮空気を貯めるためのコンプレッサー、蓄圧タンクから扉体に取り付けた浮袋まで空気を送るための給排気管、扉体上面に水平に配置した浮袋で構成される。浮袋は、袋の損傷などのトラブルを想定して複数列配置し、容量は必要最小量の倍程度とした。給排気バルブの開閉は、手動または、バッテリー駆動として停電時にもゲート操作が可能なものとする。

これらの構造により、本ゲートは以下の特徴を有する。①堤体部に設けた給排気バルブの開閉操作による浮袋への空気の出し入れのみ（扉体構造部への水の出入りはない）でゲートの開閉を行うため、操作が容易で、確実な操作が期待できる。②主桁を中空パイプ構造とすることで扉体の水中重量が小さくなるため、浮袋に必要な空気量は少量ですみ、且つ蓄圧タンクへの蓄圧は平時に時間を掛けて行うため、開閉時に必要なエネルギーは微少である。③扉体は底部水平桁とテンションロッドで係留（固定）されるため、既存ゲートが長径間へ適用する際に必要な門柱を設置する必要がなく、長径間への拡張が容易である。④常時は海底に格納されるため景観に優れ、船舶の高さ制限も不要である。

(2) 構造設計

表-1に示す設計条件の下に試設計を行った。ただし、これらの条件は仮定値であり、特定の港湾施設を想定したものではない。設計外力として、ゲートの内外の水位差による静水圧と合田式による波力の合計を扉体への水平荷重として考えた。スキンプレートは、この水平荷重に対して縦桁と横桁で囲まれる四辺固定板の構造系として設計した。水平補助桁は、縦桁で支持される両端固定梁として設計し、縦桁は、上部水平桁と底部水平桁で支持される両端固定梁として設計した。また、上部水平桁については、縦桁の設計時に算出した支点反力を集中荷重として作用させ、テンションロッド位置で多点支持された連続梁として設計し、底部水平桁には、縦桁設計時に算出された支点反力を集中荷重として作用させ、回転支承で多点支持された連続梁として設計した。骨組解析プログラムを用いて支点反力、曲げモーメント、せん断力を計算して、曲げ応力度とせん断応力が許容応力度以下になるように各中空パイプ部材の外径と板厚を決定した。テンションロッドは、上部水平桁の設計時に算出された支点反力が引張荷重として作用するとして設計した。

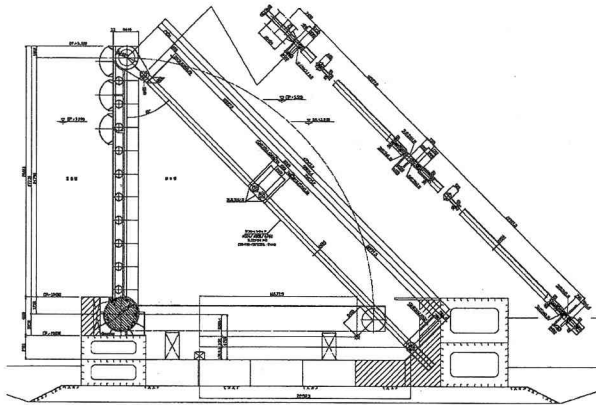
試設計概略図および各部材の寸法を図-3に示す。

表-1 設計条件

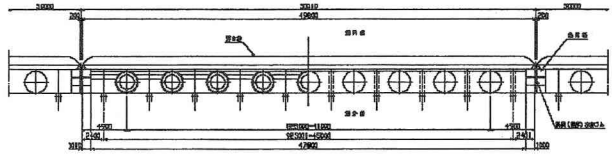
純径間	400.0 m (87°ロック × 50.0 m)	
有効高	26.00 m	
設計水位	港外水位	OP. +5.510m
	港内水位	OP. 3.20m
有義波高	4.25m	
ゲート天端標高	OP. +11.0m	
ゲート敷高	OP. -15.0m	
基礎地盤標高	OP. -18.75m	
水密方式	3方ゴム水密	
起伏角	90 度	

各部材寸法

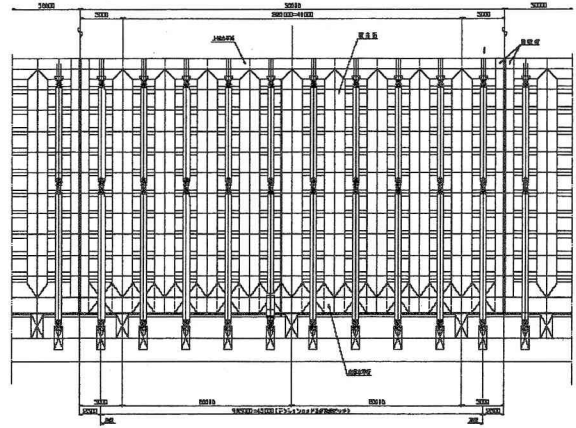
スキムプレート	PL55 (SUS316L)
上部水平桁	φ2404/φ2400/φ2376 (SUS316クラッド鋼)
縦主桁	φ2404/φ2400/φ2290 (SUS316クラッド鋼)
端縦桁	2FigPL 40×1000 (SUS316クラッド鋼)
	2FigPL 38×920 (SUS316クラッド鋼)
	2WebPL 40×2520 (SUS316クラッド鋼)
底部水平桁	φ3500/φ3496/φ3476 (SUS316クラッド鋼)
水平補助桁	φ804/φ800/φ780 (SUS316クラッド鋼)
テンション ロッド	φ804/φ800/φ760 (SUSクラッド鋼) (SM490+SUS316・2mm)



(a) 側面図



(b) 平面図



(c) 正面図

図-3 試設計概略図 (オリジナルテンションロッド係留)

(3) 浮上性能の検討

浮袋は損傷等のトラブル時にも着実にゲート閉鎖が可能な様に、上・中・下の3段を設ける。浮袋の容積は、最も浮上モーメントが小さくなる下段のみが作動する場合においてもゲート閉鎖が可能な大きさとする必要がある。表-2に、試設計をした浮袋の浮上性能を示す。表には、浮袋無し(0%)、下段のみ(33%)、中・下段(67%)、上・中・下段(100%)の4種類の浮袋内空気量における起立モーメントの比較を示している。浮袋への給気が無い状態では、自重による転倒モーメントが浮上モーメントを僅かに上回り、沈降状態を維持する。各段の浮袋容積を209m³とした本ケースでは、下段のみが作動した場合(33%)においても起立可能となっている。

表-2 浮上性能

		浮袋内空気量			
		0m ³ 0%	209m ³ 33%	418m ³ 67%	627m ³ 100%
扉体重量	kN	25,694			
極慣性モーメント※1	kgm ²	4.08 × 10 ⁶			
重心位置※2	m	10.302			
転倒モーメント	kNm	265,112			
浮力	kN	21,338	23,450	25,561	27,673
浮心位置※3	m	12.023	12.687	13.531	14.513
浮上モーメント	kNm	256,551	297,520	345,880	401,631
扉体水中重量	kN	4,356	2,244	133	-1,979
起立モーメント	kNm	-8,561	32,408	80,768	136,519

※1 回転軸周りの極慣性モーメント ※4 転倒モーメントは反時計回りを正
 ※2 回転軸中心から扉体重心までの距離 ※5 浮上、起立モーメントは反時計回りを正
 ※3 回転軸中心から扉体浮心までの距離 ※6 67%: 中・下段、33%: 下段のみ

3. フラップゲートの水理特性

(1) 実験方法

実験では、フラップ式可動水門の基本的な水理特性を把握することを目的に、起立・倒伏実験と波浪中の動揺実験を行った。実験は、長さ50m、幅1m、水深1.2mの二次元造波水槽を用いて、模型縮尺1/35で行った。実験では、ゲート加速度、波圧、テンション材軸力を、扉体頂部に加速度計、扉体前後面に圧力センサ、テンション材に歪みゲージをそれぞれ取り付けて計測し、扉体・テンション材変位は、ビデオカメラと画像式運動計測ソフトを用いて計測を行った。また、波高計により入射・反射波とゲートによる発生波を計測した。図-4に供試模型を示す。

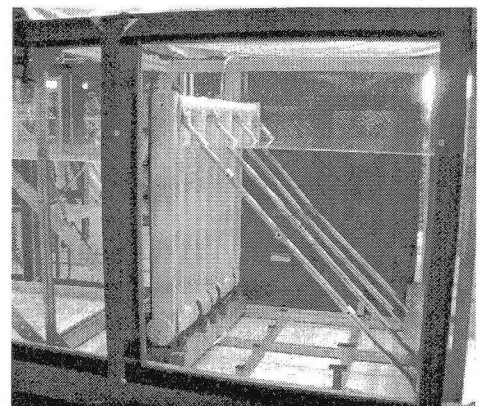


図-4 供試模型

(2) 起立・倒伏実験

起立実験では、静水中で倒伏状態から浮袋へ給気してゲートを釣合位置まで浮上させ、さらに港外水位を上昇させて全閉状態まで起立させる。倒伏実験では、給気バルブを大気に解放にして排気し、全閉状態から港外水位

を初期水位まで下降させて全開状態まで連続して倒伏させる。図-5に各実験でのゲート角度の時刻歴を示す。起立では、始動開始後約20秒で釣合角度まで浮上し、その後もわずかな水位上昇で全閉まで起立する。倒伏では、始動までに時間を要し、全閉から釣合位置まで約3分、そこから全開まで約5分を要する。また、開閉時に発生波はほとんど見られない。

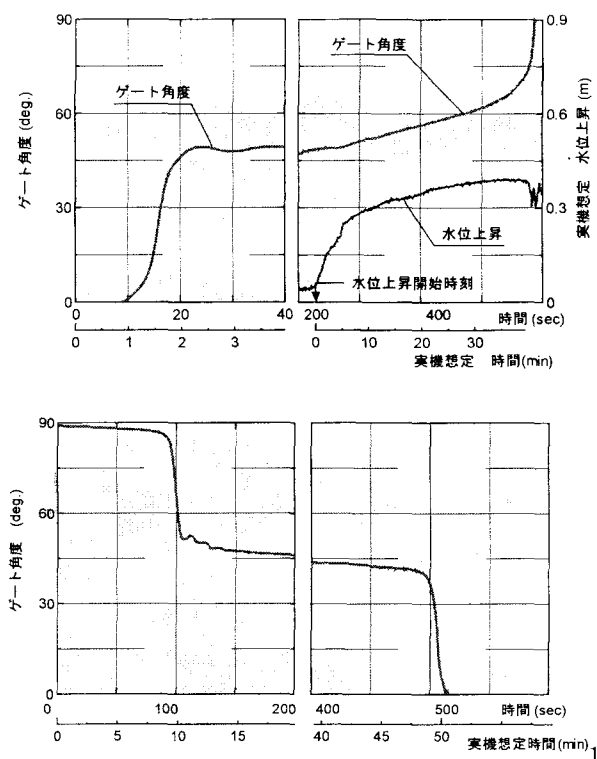


図-5 起立・倒伏時のゲート角度時刻歴(模型値)

(3) テンションロッド係留の改良

図-3に示すオリジナルのテンションロッド係留は、高潮・津波の水位上昇による水圧荷重を鋼製テンション材で支持するもので、港内外の潮位差以上の水位変化(波浪や津波)に対しては動揺を許容するが、それ以下の水位変化では、不動とする構造となっている。これは、潮位差以下の振幅の波浪に対しては、ほぼ完全に波の伝達を防ぐもので、港内の静穏性に大きく寄与するものである。一方で、潮位差以上の振幅の波浪に対しては、引き波時に一端閉鎖状態(約50度)まで倒伏して、押し波時に一気に全閉状態(90度)まで起立するため、テンションロッドが伸びきった時に衝撃的な荷重が作用し、改善策が必要となった。また、複数ある各テンション材に均等に荷重を受け持たせることも課題となった。

テンションロッドに作用する衝撃的な荷重の緩和と波浪・潮位差による荷重を各テンションロッドで均等に分担させることを目的に、錘付きテンションロッド係留を新たに検討した。

図-6に、錘付きテンションロッド係留の動作概要を示す。本係留は、下部テンションロッドと函体部との間に、回転式の錘を取り付けるもので、設定した開度以上で機

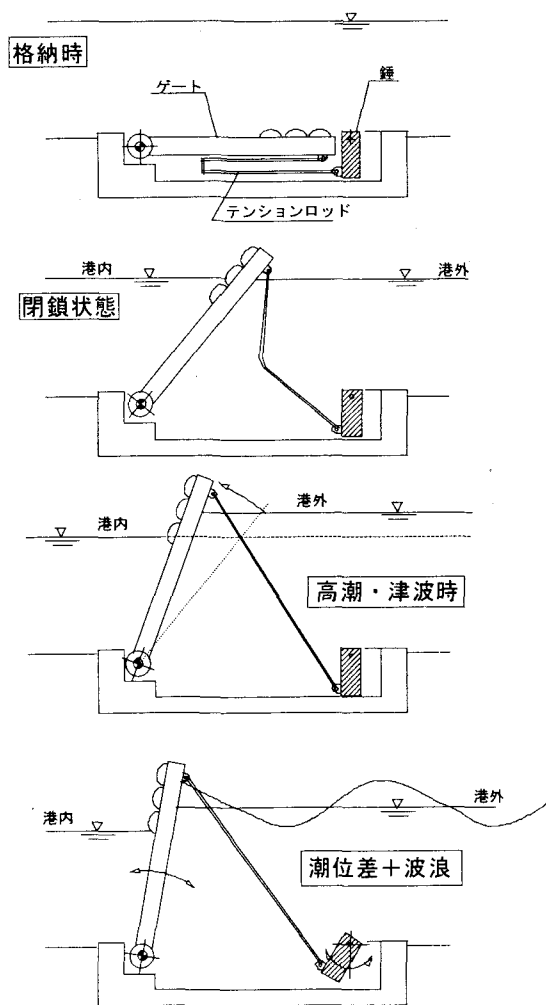


図-6 錘付きテンションロッド係留の動作概要

能し、開度の増加に伴って錘重量による張力が徐々に、テンションロッドに作用していく仕組みとなっている。錘が、水平状態まで完全に持ち上げられた状態で、ゲートは90度まで起立する幾何学的な構造であり、ゲートを角度90度まで起立させるには、非常に大きな波力が必要となる。(理論上では無限大)これにより、潮位差以上の水位変化が作用した際の、ゲートの大きな回転運動に伴うロッドの衝撃荷重を抑制するものである。また錘は、設定角度以上で機能するため、ゲートの浮上速度に影響はない。上述の係留特性を図-7に示す。

図-8に、設計条件の半分の潮位差3cm(模型値)において、規則波(模型値: $T=2.7\text{sec}$, $H=13\text{cm}$)を作用させたときのゲート動揺に伴う、扉体加速度とロッドの軸力の時刻歴を示す。錘のないオリジナル係留では、全閉状態(ゲート角度90度)で非常に大きな加速度とロッド軸力が作用しているが、錘付き係留では、加速度、軸力ともに大幅に軽減している。図-9には、図-8と同じ条件におけるオリジナル係留と錘付き係留の動揺挙動の比較を示す。ゲート倒れ込み時には大差はないが、全開時、オリジナル係留のゲート港外面には激しい波の衝突が見られる

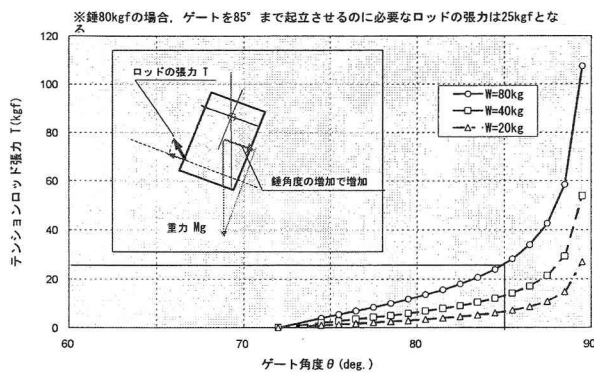


図-7 錘付きテンションロッド係留の特性

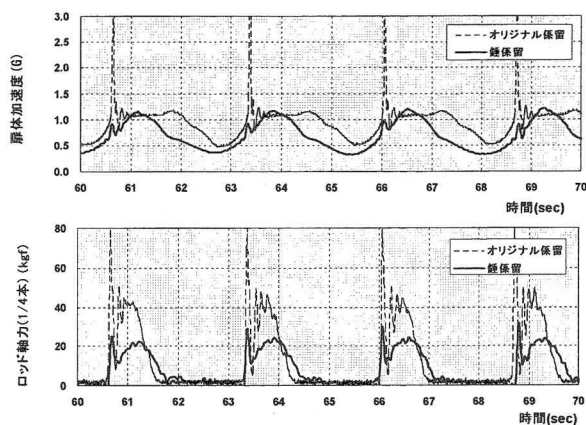


図-8 錘付きテンションロッド係留の効果
(潮位差3cm 波浪: $T=2.7\text{sec}$ $H=13\text{cm}$)

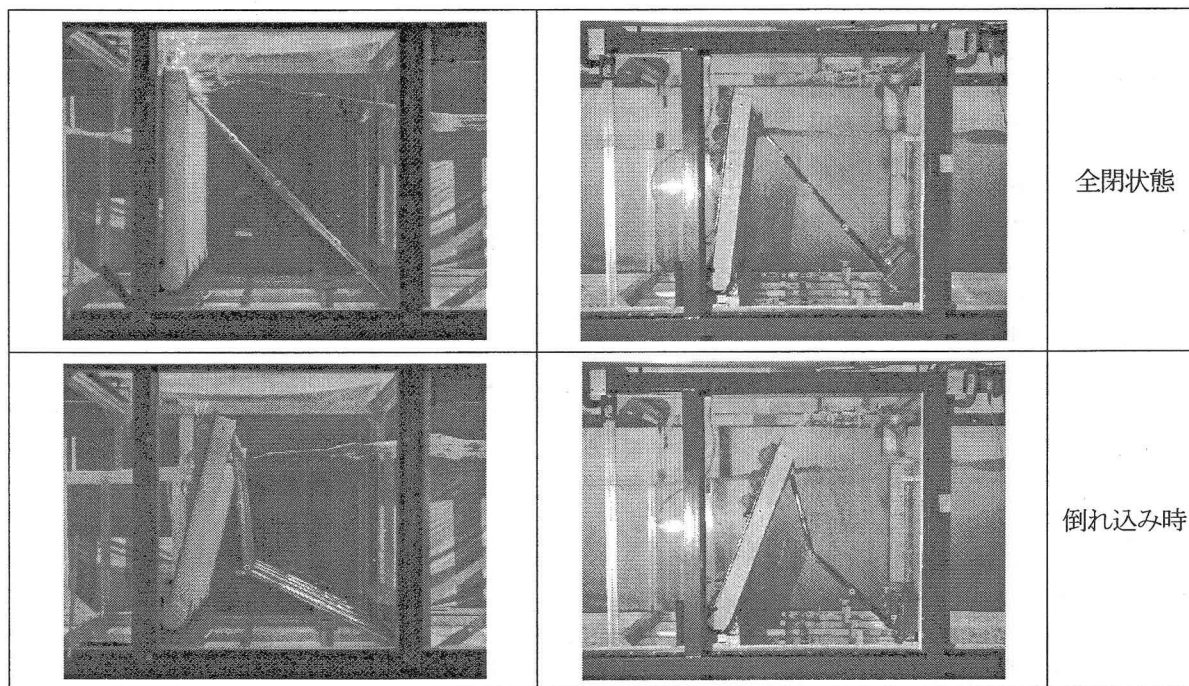


図-9 実験状況 (左: オリジナル、右: 錘付き係留)

(4) 規則波浪中の動揺実験

波の条件は、実機想定周期で4.0sec～16.0secを7分割して与え。波高は、波形勾配 $H/L=0.02, 0.04$ となるように各周期で2種類ずつとした。実験は、テンション材のみで係留するタイプとテンション材の衝撃力緩和を目的にテンション材に錘を付けた係留改良タイプの2種類に対して、釣合時と全閉時で行った。図-10に、ゲート動揺量を、図-11に波の伝達特性を示す。錘なし係留では、全閉時に動揺量が小さく、波の伝達率も4割程度と小さいために、流体性能としては非常に優れる結果となった。反面、動揺時のテンション材に作用する衝撃力は過大となった。一方、錘付き係留では、テンション材に作用する衝撃荷重を半分以下に減少できた。

(5) 不規則波中の動揺実験 (錘付き係留)

不規則波は、Bretschneider—光易型を用いた。波浪条件として、有義波高は $H_{1/3}=12.3\text{cm}$ (実機想定:

$H_{1/3}=4.3\text{m}$)、有義波周期 $T_{1/3}=1.52\text{sec}$ (実機想定: 9.0sec)、潮位差3cmとした。図-12に、実験に用いた実際の波スペクトルと目標スペクトルの比較を示す。ピーク周期はほぼ再現できているが、高周波数側で目標値を下回る傾向にある。波の作成は、模型を水槽内に設置して浮上させた状態で行っており、造波機の吸収制御でゲートの反射波の影響を完全に取り除けなかったことが原因と考える。表-3に不規則波の波高伝達特性、図-13に入射波高・伝達波高・ロッド軸力の時刻歴を示す。表と図には、波条件の比較的近い規則波の結果も併せて示す。不規則波の波高伝達率は、規則波のものと大きな差は見られないが、有義波高の出現する頻度は規則波に比べて少ないため、規則波浪中の動揺実験結果から懸念していた港内の静穏性の問題や護岸への越波の問題についても、必ずしも問題となるとは考えられない。また、テンションロッドに作用する衝撃荷重は、不規則波浪中では、かなり低減する。

4. まとめ

新形式フラップゲートの試設計を行い、模型実験により実構造物としての成立可能性を検討した結果以下の事項が明らかになった。

(1) 今回提案するフラップゲートは、浮袋への給排気によって、想定通りの開閉挙動をすることが確認できた。閉鎖時間も、数十分以内（実機換算）に完了できるため、津波対策水門としても有用と考える。また、ゲート起立・倒伏時に波の発生がほとんど無いことも有用である。

(2) オリジナルのテンションロッドは、波浪中の動揺特性に優れ港内への波の透過が非常に少ないが、潮位差以上の波浪に対しては、非常に不安定となりテンションロッドにも衝撃的な荷重が作用する。これを改善すべく提案した錘付きテンションロッド係留は、港内への波浪の透過が大きくなるが、ロッドに作用する衝撃荷重を激減することができる。今後、錘付きテンションロッド係留において、波浪の透過を低減する方法について検討していく予定である。

(3) 不規則波中では、テンションロッドに作用する衝撃荷重が低減する傾向が見られる。波高伝達率は、波条件の近い規則波と同程度で比較的高い値を示すが、有義波高の出現頻度は規則波に比べて少ないため、港内静穏性や護岸への越波量で、適切に評価した場合には、必ずしも大きな問題にならないと思われる。

参考文献

- 1) O.Kiyomiya, K.Inoue: A plan of large-scale Storm Surge Barriers to Protect Urban Areas from Storm Surge Disaster, Techno-Ocean,2002,Nov.
- 2) 富田孝史、下迫健一郎他：大規模可動式高潮防潮堤に関する基礎的研究—フラップゲートの水理特性と試設計、港湾空港技術研究所資料 N0.1060,31p, 2003. 9

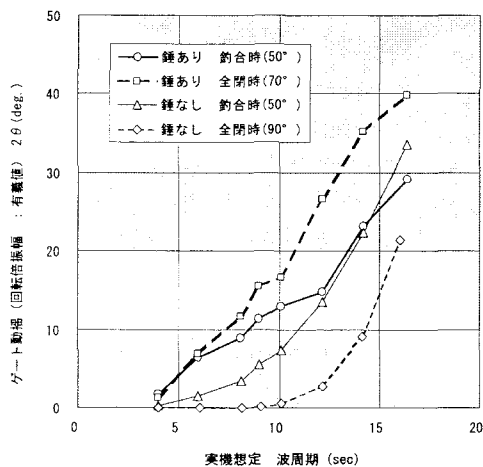


図-10 ゲート回転動揺の周期特性(H/L=0.02)

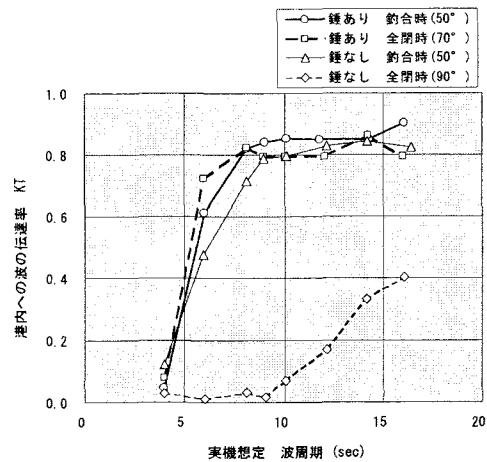


図-11 港内への波の伝達率の周期特性(H/L=0.02)

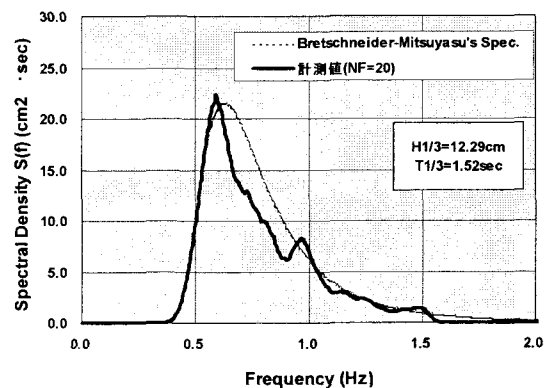


図-12 実験に用いた不規則波のスペクトル

表-3 不規則波の波高伝達特性

	入射波周期 $T_{1/3}$ (sec)	入射波高 $(H_{1/3})_i$ (cm)	透過波高 $(H_{1/3})_T$ (cm)	波高伝達率 $\frac{(H_{1/3})_T}{(H_{1/3})_i}$
不規則波	1.44	10.696	8.23	0.77
規則波	1.52	12.74	10.25	0.80

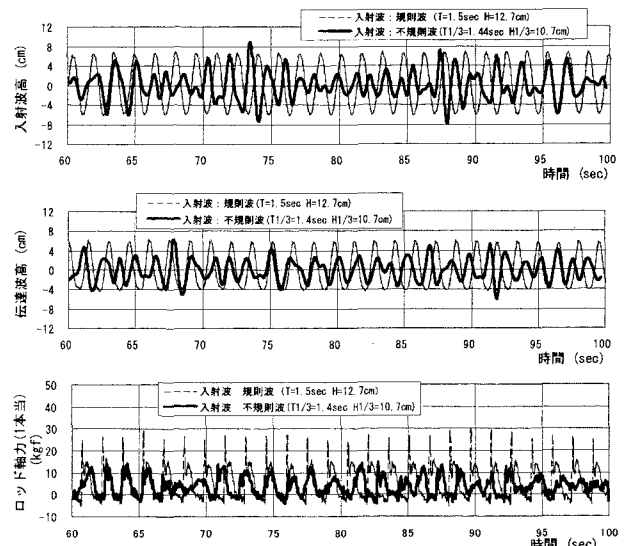


図-13 入射波高、伝達波高、ロッド軸力の時刻歴