# 波浪中フラップゲート式可動防波堤の平面水槽実験

Experiments on the Motions of Flap Gate-type Breakwater in Plane Waves

新里英幸<sup>1</sup>·木村雄一郎<sup>2</sup>·仲保京一<sup>3</sup>·藤田 孝<sup>4</sup>

# Hideyuki NIIZATO, Yuichiro KIMURA, Kyouichi NAKAYASU and Takashi FUJITA

This paper describes a characteristic of the motion variances of each gate of the flap gate-type breakwater in plane waves. The authors investigated the gate motions in plane waves and water level in the water tank by three dimensional experiments. In an experiment, the motion variances of each gate could be confirmed while the gates stand up from the seawater surface condition to the vertically standing condition. However, the water permeate flow which takes a leaks from clearance of gates affects the motion variances of each gate and the incident waves hardly. The motion variances of each gate were decreased by the loosely-connecting the top of each gate and the motions of each gate were stable.

## 1. はじめに

著者らは、津波来襲時および高潮・高波時に港口を閉 鎖し、港内への波・流れの浸入を防御するフラップゲー ト式可動防波堤(以下、フラップゲート)を開発してい る.フラップゲートは、図-1に示すように扉体、扉体を 格納する函体および扉体起立時に扉体上部荷重を函体に 伝達するテンションロッドを主部材として構成される. 所定の幅で分割される扉体は、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.起立動作に 関して、津波や高潮が予想されるとき、扉体の係留を解除 することで浮力によって扉体先端が水面まで浮上する.そ の後、津波や高潮が抑波として作用することで港外側水位 と港内側水位との水位差が生じ、その水位差による港外側 からの水圧によって扉体は所定の高さまで起立する.

著者らは、これまでに2次元造波水槽を用いた規則波 中や段波津波中でのフラップゲートの動揺実験を行い、 波浪中の水理特性を確認している(白井ら,2005;2006). しかしながら、浮上状態におけるフラップゲート各扉体 の動揺特性に関する研究は、これまで詳細に行われてい ない、フラップゲートは、波浪により各扉体の動揺にば らつきが生じると、隣接する扉体間の隙間が大きくなり、 透過水量が多くなることが懸念され、その扉体間の隙間 に流木や漂流船舶等を挟み込んだ場合には、その止水性 能が著しく低下することが想定される.よって、波向や 波周期等の波浪条件による、フラップゲート各扉体の動 揺のばらつき特性を把握することが非常に重要となる.

本研究では、各扉体の動揺のばらつき特性を確認する

1	正会員	工修	日立造船(株)技術研究所
	正会員	修(工)	日立造船(株)技術研究所
3	正会員	工修	日立造船(株) 産業機械事業部
4	正会員		日立造船(株) 開発戦略室



ことを目的として,平面水槽を用いたフラップゲートの 3次元動揺実験を行い,平面波浪場での各扉体の動揺量 および扉体間からの透過水量を測定した.実験では,波 浪の外力条件は規則波が単独に作用する場合や不規則波 と津波が同時に作用する場合等,外力条件を様々に変化 させて,ばらつき状態を検証した.

# 2. 実験方法

## (1) 実験装置

実験は、平面水槽(全体の長さ30m,幅19m,深さ1. 5m)で実施した.水槽内には多方向不規則波造波装置お よび津波流れ発生用の造流装置が装備されている.図-2 に実験で使用する平面水槽範囲(長さ26.6m,幅15m, 深さ1.5m)の平面図を示す.図より造波装置から11mの 箇所に止水板を設置し、平面水槽を領域1と3に分け、 領域1を貯水部、領域3を港外、また領域1の中に領域2 を設け港内(6m×6m×0.85m)とした.港内と港外の 境界には港内面積/開口長が実機換算で823m<sup>2</sup>/mとなる開 口部を設け、この開口部に縮尺比1/40のフラップゲート 供試模型7ブロック(1ブロックにつき扉体高さ55cm,扉 体幅25cm,函体長さ80cm,函体高さ17.5cm)を、隣接 する扉体間の隙間が扉体幅に対して1%程度になるよう に水槽床に設置した. また、模型はSUS 鋼と浮力体にウ レタン製を用いて製作し,扉体の浮力および慣性モーメ ントは、フルードの相似則を満たすように調整した.模 型の函体高さ分が入射波の抵抗になることを回避するた め、実験で造波する入射波の最大波長3.2mに対して長さ 方向が約2倍に相当するマウンド(長さ6m,幅15m,高 さ17.5cm, 端部斜面1/10) を沈設した. 実験に際し, 津 波の模擬方法は、領域1の貯水をポンプで領域3の噴出 口から排出し,港外水位を上昇させることで押波を生成 した.これにより領域3と領域2に水位差が生じ、港外 側の水が港内側へ扉体間の隙間から透過する. この透過 水量は,時間経過とともに港内水位が上昇する量として 評価する.このとき、港内外の水位計測は図-2に示すよ うに、容量式波高計(港外側11本,港内側3本)を使用 するが、港内領域は港外領域と比較して狭く、フラップ の動揺による造波影響や港内での反射影響により港内波 浪場は非常に乱れることが予測される.よって港内波浪 場の様子を確認するため事前に波浪場解析 (藤田ら、



図-3 実験装置の配置図

止水板

領域1



図-4 供試模型の設置状況

表-1 規則波の条件

	実機		模型			
波周期[s]	波高[m]	波長[m]	波周期[s]	波高[m]	波長[m]	
4.0	0.5	24.9	0.63	0.012	0.62	
5.0	0.8	38.0	0.79	0.019	0.95	
6.0	1.0	51.6	0.95	0.026	1.29	
7.0	1.3	65.0	1.11	0.033	1.63	
8.0	1.6	78.0	1.26	0.039	1.95	
9.0	1.8	90.6	1.42	0.045	2.27	
10.0	2.1	103.0	1.58	0.052	2.58	
11.0	2.3	115.2	1.74	0.058	2.88	
12.0	2.5	127.3	1.90	0.064	3.18	

表-2 不規則波の条件

美	〔機	模型				
<i>T1/3</i> [s]	<i>H1/3</i> [m]	<i>T1/3</i> [s]	<i>H1/3</i> [m]	S max	波の主方向 θ	
4.0	0.5	0.63	0.012	20	0 [°]	
10.0	2.1	1.58	0.052	20	0 [°]	

1998)を実施し、十分に計測可能な範囲は概ね港内内側 壁の反射率が0.3程度と判明しその値に合う消波材を配 備した.図-3に実際の装置の配置を、図-4に各扉体1~7 の並びの設置状況を示す.

#### (2) 実験条件

水深は50cmとし、波が進行する領域3に関してはマウ ンド天端面と水面との距離は32.5cm(実機換算13m)で ある. 波向θの定義は図-2に示すとおりである. 波の条件 に関しては、表-1に示すように規則波が単独で作用する 場合は実機換算で波周期4s~12sの約1s毎,波形勾配0.02, 入射波の波向θを0°~30°(10°毎)とした.不規則波の 造波信号の作成には表-2に示すように、多方向不規則波 を対象とし、周波数スペクトルはBretschneider-光易型ス ペクトルを用いた.また方向集中度Smax=20で波の主方向 は0°である. 有義波周期と有義波高は実機換算(T13, H13) = (4s, 0.5m), (10s, 2.1m) の2通りである. 津波が作用 する場合は,所定時間内に港外側の水位を上昇させて押 波を模擬するため、津波流れ発生用造流装置を用いた. こ こで, 平面水槽内に発生する流れの流量はポンプ開放度 を調整することで制御し、予め所定の水位上昇時間を満 足するためのポンプ開放度を導出している.所定時間と 港外側の水位上昇量に関しては、実機換算で4m/20min, 模型ベースでは10cm/190sとした.

#### 3.実験結果および考察

#### (1) 外力として規則波が単独で作用する場合

扉体の回転運動は傾斜角が0°の格納状態から水面で動 的流体力・重力・浮力等が釣合う浮上状態,港内外に水



位差が生じる場合に傾斜角が垂直になる起立状態の0°か ら90°の範囲である.規則波中における実験結果から扉体 固有の応答特性を導出するとき,浮上状態で図-4に示す ように側壁影響が小さい中央部の扉体4を使用する.解析 範囲は入射波が扉体に到達してから港内側からの反射波 を含まない範囲とし,フーリエ解析を実施して周波数応 答関数を導出する.その結果の振幅部分(以下,RAO)を 図-5に示す.図より,正面から入射する波向0°の場合が 他の波向と比較して最もRAOが大きく,波向角が大きく なる程,各周期に対するRAOは小さくなる傾向を示す. これは,回転運動が微小振幅の線形領域においては,扉 体没水部の回転方向の付加質量と造波減衰力は形状で決 まるパラメータで,復原モーメントも没水部排水量に依 存することから,波向角が大きくなる程,扉体が受ける 波強制力が小さくなったためと推測される.

### (2) 外力として規則波と津波が同時に作用する場合

規則波と津波同時作用下においてばらつく頻度が大き いと予測される波向30°の波周期8sに対する隣接する扉体 1と2および扉体6と7の運動時系列,そのときの扉体の動 揺差時系列を図-6に示す. 図中の[A]と[B]は扉体が水面に 浮上している時間帯を表し、特に[A]は入射波と側壁や港 内側からの反射波が共存しない時間帯, [B]は入射波と側 壁や港内側からの反射波が共存する時間帯を示す. また. [C]は扉体が浮上状態から起立状態に移行する時間帯を表 す.図より[A]と[B]の時間帯は、隣接する扉体の動揺差 は±2°程度と小さいが、[C]の時間帯では、隣接する扉体 間のばらつきが大きくなるのがわかる.この[C]において, 各波周期4s~12s(2s毎)に対する隣接扉体の動揺差の最 大値を図-7に示す.図より、波周期4sの場合が各隣接扉 体の動揺差に対して、概ね大きな値を示している。[C]の 垂直に起立する状態では,港内外の水位差も大きくなり, 港外側からの水圧が増大して起立モーメントとして扉体 に作用している.同時に扉体没水部の排水容積は次第に 減少し,回転方向の動揺に影響を与える扉体に作用する 復原モーメントも小さくなる.よって、[C]の状態の回転 方向に対しては扉体の動揺よりもむしろ扉体が垂直に起 立させる動きが卓越するものと推測される.これは,垂 直に起立する過程において,水面で浮上状態の各扉体が 水路幅方向に形成される波周期対応の水位分布に追従し

て動揺し、各扉体の没水部の排水容積および扉体に作用 する復原モーメントの減少に伴い動揺の位相が変化し、各 扉体の動揺がばらつくと予測される.これは図-7に示す ように、入射波の周期が4sから10sまで次第に大きくなる と、水路幅方向の水位分布の波長は長く、隣接扉体の動 揺の位相差は小さくなるため、動揺角の差の最大値も小 さく示されていることで確認できる.しかし、同図より 波周期12sの場合は端部付近の扉体6と7および扉体5と6 の動揺差は大きい値を示している.このケースは入射波 の周期が大きくなると、動揺角の差の最大値も小さくな るという傾向に当てはまらない.これは扉体5と扉体7と 比較して扉体6のみが大きく動揺したことを現しており、 水路幅方向の水位分布のピークが扉体6に生じているため と推測される.

図-8に波向0°,波周期8sの入射波に対する各扉体の運動時系列を示す.波向30°の場合と同様に[C]の時間帯に 各扉体のばらつきが顕著となっている.これより,扉体 が垂直に起立する移行状態においては,各扉体のばらつ きと入射波の波向との相関は小さい.

図-9に波向30°,周期10sの入射波に対して時刻14.3s~ 15.3sの1s間の各扉体の動揺時系列を示す.この時間帯は





反射波の影響がない[A]の状態に相等し、端部の扉体から 順に波打つように、各扉体がわずかの動揺差で挙動して いる様子を表している.

図-10に波周期8sに対して各波向に対する扉体隙間から の透過水量を評価する港内水位変化を示す.このとき水 位は港内3本の波高計データの平均値で,波の影響を除 いている.図より透過水量に関してはどの波向に対して も、および[A],[B],[C]のどの時間帯に対しても大差な いことを表している.この波のケースは図-6で示したよ うに,[C]の時間帯でばらつきが確認されている.従って, ばらつきが透過水量に与える影響は小さいと推測される.

## (3) 外力として不規則波と津波が同時に作用する場合

各扉体が垂直に起立する移行状態を表す[C]の時間帯で の扉体の動揺のばらつきを抑えるため、隣接する扉体ど うしのブロック頂部を、入射波と反射波が共存しない時 間帯[A]や入射波と反射波が共存する時間帯[B]に生じた 小さな動揺差を許容する程度にワイヤーを用いて緩く連 結し、不規則波と津波同時作用下での実験を行った.不 規則波の条件は表-2の実機換算でT<sub>1/3</sub>=4s、H<sub>1/3</sub>=0.5mの場 合である.ここで、比較のため、不規則波は発生させず に津波単独作用下での実験、すなわち波浪が無い状態で 港外水位を実機換算4m/20minで上昇させる実験も実施し た.実験ケースとして、Case1を[波無し+頂部連結無し], Case2を[波有り+頂部連結無し], Case3を[波有り+頂部 連結有り]とした.

図-11と図-12にCase2とCase3の各扉体の動揺量および 港内の水位変化を示す.図-11より[C]の時,扉体のばら つきが確認できる.一方,図-12より扉体ブロック頂部 を緩く連結することにより,ばらつく事なく安定した起



図-13 Case3における港内外水位差と動揺角との関係

立状態を示す.また両図より,ばらつきによる時間差は あるが,扉体が垂直に起立した時刻60s前後に,港内水 位の変動が小さくなっており,港内静穏度が向上してい る.これは図-13に示すように,わずかな水位差により 扉体は垂直に起立し,港内外水位差の上昇に伴い,扉体 はほとんど動揺せず,かつ入射波に対する反射率は大き くなり,扉体の動揺による港内への伝達波を低減させた からである.

図-14にCase1~Case3の[A], [B], [C]の時間帯を含む 時刻0s~90sまでの各隣接扉体間の動揺差時系列を示す. 図-14 (a) と (b) より,波浪の有無に関わらず扉体を連 結しない場合,扉体の起立動作はまず中央部が先に起立 完了し,順次外側に向かって進行して,端部の扉体の起 立は遅れる傾向を示している.これは,端部近傍の扉体 は水路の側壁影響を受けやすいからであると推測され る.一方,図-14 (c) より,扉体が緩く連結された場合 は各扉体の動揺差は微小であり,概ね一列に並んで起立 動作しているのがわかる.

図-15にCase1~Case3の各ケースの港内水位変化を示



す. それぞれのケースを比較すると、途中の経過時刻で は、港内水位変化に多少の差はあるが、時刻190sでの水 位変化値はCase1では2.2cm, Case2では2.1cm, Case3で は1.9cmであり大差ないのがわかる.よって、波浪やば らつきは扉体隙間からの透過水量への影響は小さいと予 測される.この現象の波浪影響を検証するため、頂部は 連結させておき入射波の条件を変えて、不規則波と津波 が同時に作用する場合の実験を行った.水位上昇時間は 今までの津波条件と同等の190s間に港外側の水位を 10cm上昇させている.不規則波の条件は表-2で示す有義 波周期T1/3=4sと10sの場合である.その結果を入射波の 有義波周期の違いによる各々の港内外水位変化の相関と して図-16に示す.図よりT1/3=4sと10sのいずれの場合で も、正の相関関係を有しており、港外水位が上昇すると 隙間からの透水により港内水位は上昇する傾向を表して いる.ここで、最小自乗法を用いて線形近似直線を計算 すると、直線の勾配はT1/3=4sの場合0.1908、T1/3=10sの場 合0.1901とほぼ同値である.従って、隙間からの透過水



量は波浪の影響は小さく,むしろ港内外の水位差に依存 することが確認される.

# 4.まとめ

さくなる.

平面水槽を用いてフラップゲートの3次元動揺実験を 行い,本研究を通して得られた主要な結論を以下に示す. ① 波向角度が大きくなる程,各周期に対するRAOは小

- ② 各扉体の動揺のばらつきは扉体が浮上状態から起立状態へ移行する比較的短い時間帯のときに顕著となり、 それ以外の時間帯でのばらつきは非常に小さい。
- ③ 起立動作は中央部の扉体が先に起立完了し、順次外側 に向かって進行して、水路の側壁影響による水の抵抗 によって端部近傍の扉体の起立は遅れる。
- ④ 扉体頂部を緩く連結することにより,扉体の動揺は安定した挙動を示し,かつ各扉体が垂直に起立した後, 港内静穏度は向上する.
- ⑤ 扉体頂部の連結有無に関わらず透過水量に大きな差はなく、扉体の動揺のばらつきや波向に対する透過水量への影響も小さいことから、透過水量は波浪の影響よりもむしろ港内外の水位差に依存する。

#### 参考文献

- 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・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.
- 藤田 孝・永田修一・小林顕太郎・大川 豊(1998):防波 堤に囲まれた超大型浮体式構造物周辺の波浪場解析,海 岸工学論文集,第45巻, pp.836-840.