

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

EXPERIMENTAL STUDY ON RESPONSE CHARACTERISTICS OF FLAP GATE BREAKWATER AGAINST WAVES

木村雄一郎¹・新里英幸²・仲保京一³・安田誠宏⁴・間瀬 肇⁵

Yuichiro KIMURA, Hideyuki NIIZATO, Kyoichi NAKAYASU, Tomohiro YASUDA and Hajime MASE

A flap gate breakwater is a new type structure for coastal disaster reduction; the breakwater usually lies down on a seabed and rises up through sea surface with buoyancy when tsunami or storm surge occurs. In past studies, it has been confirmed that the flap gate breakwater has capabilities against tsunamis. The characteristics of wave pressure acting on flap gate are different from those on a fixed gate and a breakwater since the flap gate moves according to acting waves or tsunamis. The present study examined the characteristics of wave pressure acting on the flap gate by hydraulic experiments using monochromatic waves and tsunamis. It was confirmed that the gate motion and wave pressure were closely related, and wave pressure was reduced by employing fluid resistance plates.

1. はじめに

地震発生後に短時間で港口を閉鎖し、港内への津波の進入を抑制する、図-1に示すようなフラップゲート式可動防波堤(以下、フラップゲート)の開発が進められている(白井ら, 2005; 2006)。フラップゲートは、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、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。テンションロッドは、上部ロッドおよび下部ロッドの2つの部材から成り、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した抵抗板が、扉体の急激な起立動作を抑制する。扉体は港外水位の上昇により所定の高さまで起立するが、起立が完了するまでの浮上状態においては、港外からの波浪外力により動揺する。これまで、浮体式カーテンウォール(中野ら, 2000)あるいは浮消波堤(肥後ら, 2002)に規則波が作用する際の波力や動揺特性に関する研究は行われているものの、作用する波力を支持する構造がフラップゲートとは異なる。また、固定構造物(例えば、水谷ら, 2000; 池野ら, 2005)あるいは浮体(池谷ら, 2005)に津波が作用する際の波力評価に関する実験的研究は行われているが、フラップゲート式の可動構造物に関する研究はなされていない。本研究は、フラップゲートに規則波あるいは段波津波を模擬した孤立波を作用させ、扉体に生じる波圧特性を明らかにすることを目的とし、2次元造波水槽にて水理模型実験を実施した。

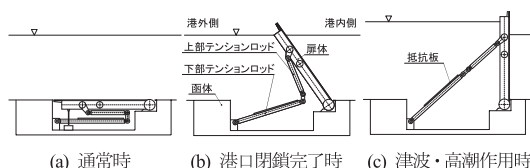


図-1 フラップゲート式可動防波堤

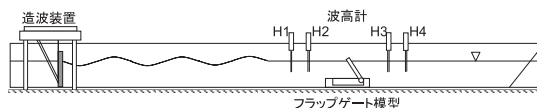


図-2 規則波実験における実験装置の概略図

2. 規則波実験

(1) 実験方法

実験は、長さ50m、幅1mの造波水槽を用いて、模型縮尺1/30で実施した。実験装置全体の概略を図-2に示す。実験模型は、水深13mの実海域を対象とした実機を模型化したもので、実機の扉体一門の高さは22mおよび扉体幅は10mであり、対応する模型の扉体高さは71.7cmおよび扉体幅は32.5cmとなる。水槽幅は1mであるため、実験模型は扉体3門を有した構造とした。隣接する扉体間の幅は、それぞれ3mmとした。実験模型は、SUS鋼を用いて作成し、扉体の浮力および慣性モーメントは、ウレタン製の浮力体を用いて実機の条件と合うように調整した。実機では、隣接する扉体の先端をワイヤロープ等により緩く連結することで、扉体のバラつきを抑制する計画である。実験模型においても実機の状態を再現し、扉体の先端を同様に連結した。

実験では、実海域のスケールで周期が4s～16sの規則波を用いた。規則波の波形勾配は0.01～0.04とした。規則波の諸元を表-1に示す。波高の計測は、入射波と反射

1 正会員	修(工)	日立造船(株) 技術研究所
2 正会員	工修	日立造船(株) 技術研究所
3 正会員		日立造船(株) 産業機械事業部
4 正会員	博(工)	京都大学助教 防災研究所
5 正会員	工博	京都大学教授 防災研究所

波を分離するため、フラップゲートの沖側と岸側にそれぞれ2台ずつ設けた容量式波高計により行った。波圧の計測には、扉体の沖側に水深方向一列に設置した計6個の波圧計を用いた。波圧計の設置状況を図-3に示す。扉体角度は、扉体回転軸上に設置した加速度計を用いて算出した。静水状態で水面に浮上静止した扉体の初期角度は $\theta_0 = 43.6$ 度であった。

表-1 規則波の条件

実機	模型				
波周期 (s)	波周期 (s)	波高 (cm)			
		H/L=0.01	H/L=0.02	H/L=0.03	H/L=0.04
4.0	0.72	0.815	1.63	2.44	3.26
6.0	1.08	1.77	3.55	5.32	7.09
8.0	1.44	2.81	5.63	8.44	11.3
10.0	1.81	3.80	7.61	11.4	15.2
12.0	2.17	4.76	9.51	14.3	19.0
14.0	2.53	5.69	11.4	17.1	22.7
16.0	2.90	6.60	13.2	19.8	26.4

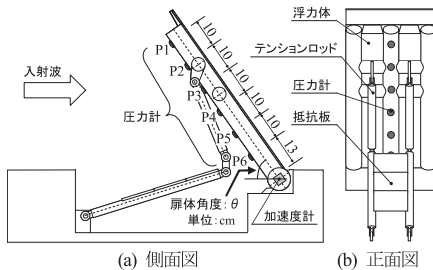


図-3 フラップゲート模型に設置した圧力計

(2) 実験結果

規則波作用時の扉体角度と波周期の関係を図-4に示す。図の縦軸は、初期状態から最大扉体角度までの増分($\theta_{\max} - \theta_0$)を入射波振幅で除した単位振幅あたりの動揺角、横軸は実機換算波周期である。図より、波周期10s以下ではいずれの波形勾配に対しても同等の値を示しているが、10s以上では単位振幅あたりの動揺角は増加しており、その傾向は波形勾配によって異なることがわかる。これは、入射波に応じて扉体動揺の非線形性が強い領域と弱い領域があることを示している。なお、周期4s～16sに扉体動揺のピークはなく、この範囲に固有周期が存在しないことがわかる。

水深波高比(H/h)に対する扉体角度を図-5に示す。図中、(a)は下部デションロッドに抵抗板を設置していない場合、(b)は抵抗板を設置した場合の扉体角度であり、データの識別のためA～EあるいはA'～E'の記号を振り当てた。なお、フラップゲートは扉体角度90度以上に大きくならないため、初期角度からの動揺量ではなく、実際の扉体角度を示している。

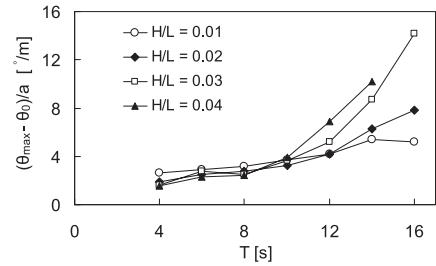
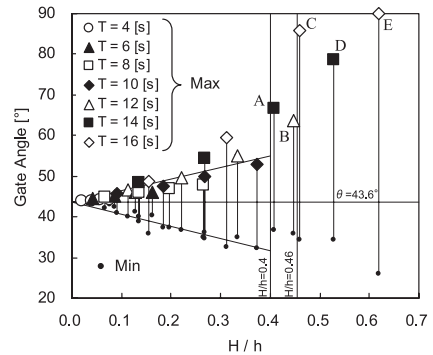
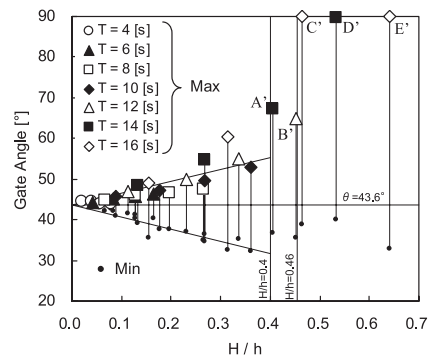


図-4 規則波作用時の扉体動揺角



(a) 抵抗板を設置していないフラップゲート



(b) 抵抗板を設置したフラップゲート

図-5 規則波作用時の扉体動揺角

図-5 (a) より、 H/h が0.4以下の条件については、扉体の動揺角度は波高水深比に対して概ね線形的に増加した。このとき、起立側(>43.6 度)および倒伏側(<43.6 度)の動揺幅は同程度であった。図-5 (b) の下部デションロッドに抵抗板を設置したケースについて、 H/h が0.4以下の条件では、扉体の動揺角は図-5 (a) のケースと同程度であり、抵抗板の設置による扉体動揺角の変化は確認できなかった。図-5 (a) のAおよびBのケースでは、 H/h が0.4以下の条件と比較して、起立側の動揺角は増加し、倒伏側の動揺角は減少した。抵抗板を設けた図-5 (b) のA'およびB'についても、AおよびBのケースと同様の結果が得られた。図-5 (a) のCおよびDについて

は、AおよびBのケースと比較して、起立側の動揺角はさらに増加したが、倒伏側の動揺角については顕著な変化はみられなかった。図-5 (b) のC'およびD'では、CおよびDのケースと比較して、起立側の動揺角は増加し扉体角度は90度に達したが、倒伏側への動揺角については減少した。図-5 (a) のEについては、起立側の動揺角は90度に達し、倒伏側の動揺角はA～Dの動揺角と比較して増加した。図-5 (b) のE'では、起立側の動揺角はE、C'あるいはD'のケースと同様に90度に達したが、倒伏側の動揺角については、図-5 (a) のEのケースと比較して減少した。

扉体角度が大きくなると、扉体の自重による倒伏モーメントは減少する。そのため、港外からの外力に対して扉体は起立方向に動揺し易い状態となる。 $H/h > 0.4$ となる条件では、扉体の倒伏モーメントが十分に小さくなり、扉体は起立側に動揺し易い状態であったと考えられる。扉体は入射波の周期と同期して運動しており、扉体の起立側への動揺角が大きくなると、転倒方向への運動に遅れが生じる。その結果、扉体の往復運動の中心は、運動抵抗の小さい起立側にスライドし、倒伏方向への動揺角が若干減少したと推測できる。

図-6は、扉体と下部テンションロッドとの角度の関係を幾何学的に算出したものである。図-6より、下部テンションロッドは、扉体が80度から90度に起立する際に大きく変位するのがわかる。扉体角度が80度程度に達するケースでは、下部テンションロッドに設置した抵抗板が扉体の動揺特性に及ぼす影響は大きくなる。

以上のように、抵抗板の作用により、C～EのケースとC'～E'のケースで、動揺角に差異が生じた。このときの H/h の閾値は0.46であった。 H/h が0.46を越えるケースでは、抵抗板を設置したことで、扉体の動揺範囲はより起立側にスライドしている。抵抗板は扉体の運動に対する抵抗となるものの、扉体角度が90度に接近し、扉体の持つ倒伏モーメントが非常に小さくなった状態では、扉体の起立方向への動揺量を抑制することは難しい。一方、倒伏方向への運動については、抵抗板が扉体の運動に対する抵抗となり、倒伏方向への変位量を減少させる。この結果、扉体の往復運動の中心は起立側に移動し、扉体の動揺範囲も起立側にスライドしたと考えられる。

規則波作用時において、扉体に作用する最大波圧を図-7に示す。図-6と同様に、(a) は抵抗板を設置していないフラップゲート、(b) は抵抗板を設置したフラップゲートの扉体に作用した最大波圧を示し、両図とも横軸は波高水深比とした。破線は、動揺特性が変化する際の閾値であった $H/h=0.4$ および $H/h=0.46$ を示し、2点破線は、固定壁に作用する最大波圧を示したものである。

図-7より、 H/h が0.4以下のケースでは、フラップゲー

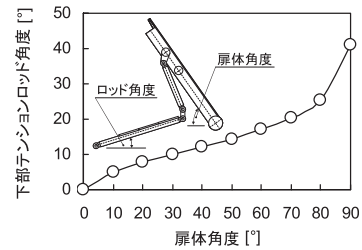
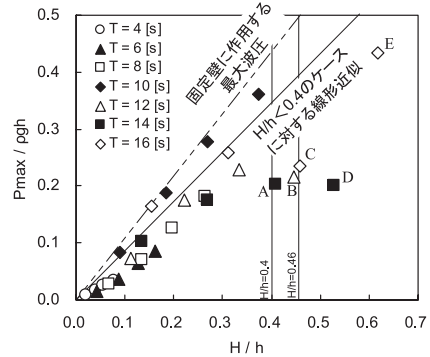
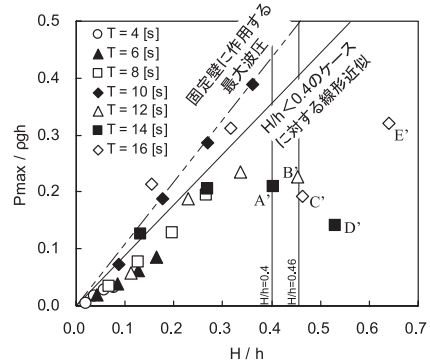


図-6 扉体角度と下部テンションロッド角度の関係



(a) 抵抗板を設置していないフラップゲート



(b) 抵抗板を設置したフラップゲート

図-7 規則波作用時の扉体作用最大波圧

トに作用する最大波圧は、固定壁に作用する最大波圧と比較して約20%減少した。扉体動揺角が大きくなる H/h が0.4を越えるケースでは、扉体に作用する最大波圧は、固定壁に作用する最大波圧と比較して大幅に低下した。扉体動揺角が大きいケースでは、港内への透過率は増加し反射率が低下することを確認している。そのため、扉体を受ける力積は減少し、最大作用波圧も低下したと考えられる。 $H/h < 0.46$ のケースについては、テンションロッドに抵抗板を設置したことによる、扉体への作用波圧の変化は確認できない。一方、 H/h が0.46を越えるケースでは、抵抗板を設置することで、扉体に生じる最大波圧は減少した。後者のケースでは、抵抗板により起立方向への扉体動揺量が増加したことで、扉体を受ける力積、

つまり、作用波圧は減少したと考えられる。さらに、抵抗板を設置したことで扉体の運動速度を抑制できるため、扉体角度が90度に達して急停止する際の、扉体への作用波圧を低減できたと推測できる。

3. 段波津波実験

(1) 実験方法

実験は、長さ50m、幅1mの造波水槽において、規則波実験と同一のフラップゲート模型を用いて実施した。ここでは、下部テンションロッドに抵抗板を設置したフラップゲートおよび抵抗板を設置していないフラップゲートに加えて、扉体を90度に固定した固定式ゲートに作用する波圧についても計測を行った。段波津波は、引波津波によって水位が低下したときに発生すると想定し、模型設置位置における水深は、実海域のスケールで7mとした（実験のスケールでは水深22.8cm）。段波津波を作成するため、水槽内には、砂と半透過性のマットを用いて傾斜面を構築した。傾斜面は、1/10勾配の斜面を4m作成し、その後、1/100勾配の斜面を10mにわたって作成した。傾斜面の背後にフラップゲート模型を設置し、模型の周囲は碎石によって構築した。実験装置全体の概略を図-8に示す。

波高の計測には、計8台の波高計を用いた。使用した波高計を沖側から順にH1～H8とした。H1は1/10勾配の沖側、H2は1/10勾配の開始位置、H3は1/10勾配と1/100勾配の境界、H4およびH5は1/100勾配域をそれぞれ3等分した位置、H6は模型の直前、H7は模型の直後およびH8はH7の4m背後に、それぞれ設置した。波圧の計測には、規則波実験にて使用した扉体沖側の6個の波圧計を用いた（図-3参照）。計測のサンプリングは10ms（100Hz）とした。

実験では、波高が水深とほぼ同一となるように調整し

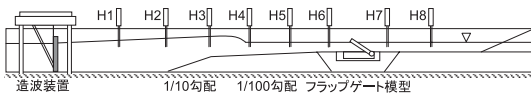
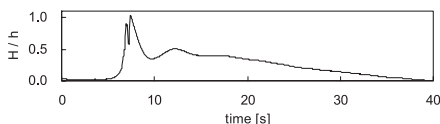
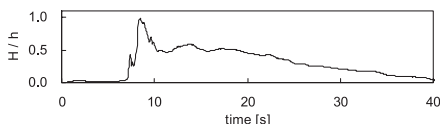


図-8 段波津波実験における実験装置の概略図



(a) 砕波段波



(b) 波状段波

図-9 実験で使った段波の時間波形

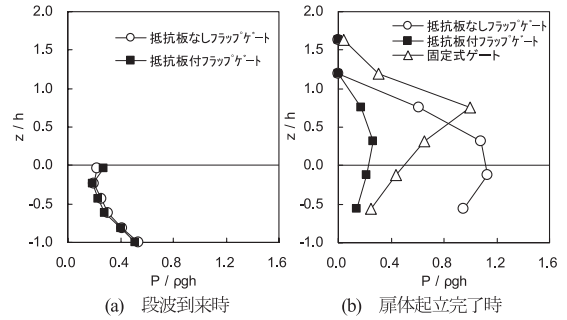


図-10 フラップゲートあるいは固定式ゲートに砕波段波が作用した際の最大波圧の鉛直分布

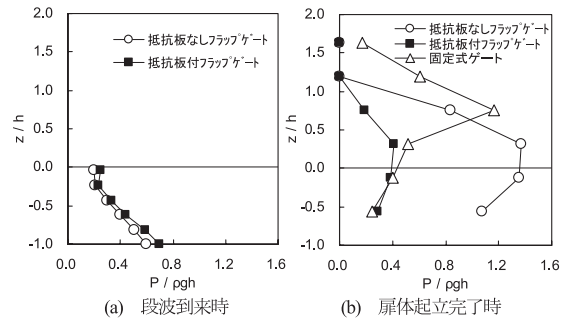


図-11 フラップゲートあるいは固定式ゲートに波状段波が作用した際の最大波圧の鉛直分布

た段波津波を使用し、模型直前で砕波する砕波段波と、模型より十分に沖側で砕波して到来する波状段波を用いた。実験で使った砕波段波および波状段波の時間波形を図-9に示す。図-9では、横軸を実海域スケールの時間、縦軸を波高水深比とする。

(2) 実験結果

図-10および図-11は、フラップゲートあるいは固定式ゲートに砕波段波および波状段波を作用させた際の、扉体に作用した最大波圧の鉛直分布を示したものである。(a)は段波がフラップゲートに到達した時、(b)は扉体角度が90度に達し起立が完了した時の、扉体への作用波圧を示す。扉体は津波による波力を受けながら起立するため、段波到来時と起立完了時において、扉体に設置した波圧計の設置高さに変化する。これらの波圧は、波圧計の水深変化に伴う静圧変動分を除いたものである。固定式ゲートについては、扉体を90度で固定しているため、(b)においてのみ結果を表示した。縦軸は、水深で無次元化した鉛直高さを示す。

図-10 (a) および図-11 (a) より、段波がフラップゲートに到達した際の、扉体作用波圧の鉛直分布については、抵抗板の設置による波圧の違いはみられない。この時点では、扉体および抵抗板は運動を始めておらず、かつ、浮上状態における抵抗板の位置は扉体の天端面より

低い。したがって、段波到来時においては、抵抗板による扉体作用波圧への影響は限定的である。

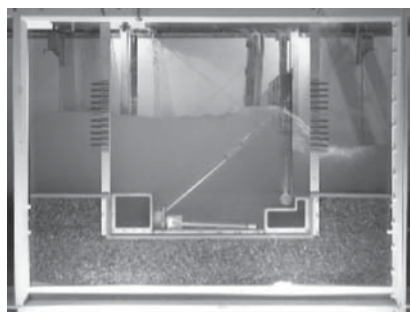
一方、図-10 (b) および図-11 (b) では、実験ケース毎に特徴がみられた。抵抗板を設置していないフラップゲートと抵抗板を設置したフラップゲートを比較すると、後者のケースでは、扉体に作用する最大波圧を1/3～1/4程度に低減できた。抵抗板の流体抵抗により、起立動作中に扉体を得る角速度は抑制される。起立完了時、付加質量分の水塊による慣性力が扉体に作用するが、扉体の角速度が抑制されたことで、これらの慣性力は軽減される。これにより、扉体に作用する最大波圧は減少した。フラップゲートでは、 $z/h=-0.5\sim 0.5$ において扉体に最大波圧が作用するが、固定式ゲートでは、 $z/h=0.5\sim 1.0$ において作用波圧が最大となった。フラップゲートあるいは固定式ゲートに、最大波圧が作用した際のスナップショットを図-12に示す。図-12の (a) および (b) を比較すると、フラップゲートに段波を作用させたケースでは、水面の乱れが小さいのに対して、固定式ゲートに段波を作用させたケースでは、水面に大きな乱れがみられる。前者のケースでは、扉体の起立動作に伴って、段波の流れが海底部に向かったため、水面形状に大きな乱れが生じなかったと推測できる。一方、後者のケースでは、ゲートとの接触により段波の流れが上方に向かい、水面上に飛沫を舞い上げたと考えられる。このような両者の違いにより、フラップゲートに作用する最大波圧は、固定式ゲートに作用する波圧と比較して、低い位置に生じたと推測できる。抵抗板を設置したフラップゲートに作用する波圧は、固定式ゲートに作用する波圧と比較して、 $z/h=0.5$ より低い位置の計測点においては同程度となり、 $z/h=0.5$ より高い位置の計測点においては十分に小さい値となった。

砕波段波あるいは波状段波の2種類いずれを使用した場合でも、結果の傾向に大きな差はみられなかった。

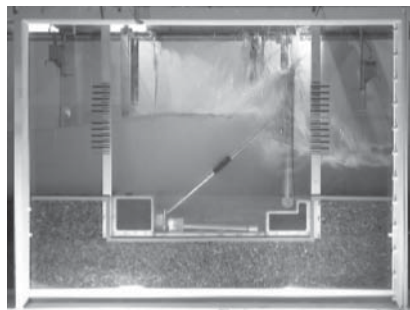
4. おわりに

本研究を通して得られた主要な結論を以下に示す。

- ①周期10s以上の作用波に対しては、単位振幅あたりの扉体動揺角は増加し、その傾向は波形勾配により異なる。
- ②フラップゲートに規則波を作用させた際に扉体に生じる最大波圧は、固定壁への作用波圧と比較して小さい。
- ③ H/h が0.4を越える規則波をフラップゲートに作用させた場合、扉体の動揺角は増加するが、扉体への作用波圧は固定壁に作用する波圧と比較して大幅に減少する。
- ④ H/h が0.46を越える規則波をフラップゲートに作用させた場合、抵抗板の影響により、扉体への作用波圧は減少し、起立方向への扉体の動揺量は増加する。
- ⑤フラップゲートに段波津波が作用する時、抵抗板を用いる



(a) フラップゲート



(b) 固定式ゲート

図-12 フラップゲートあるいは固定式ゲートに砕波段波が作用した際における水面の状態の比較

ことで、扉体への作用波圧を1/3～1/4に低減できる。

- ⑥段波作用時において、フラップゲートの扉体に生じる波圧の鉛直分布は $z/h=-0.5\sim 0.5$ で最大となり、固定ゲートでは $z/h=0.5\sim 1.0$ で最大となる。
- ⑦段波作用時において、抵抗板を設置したフラップゲートに生じる波圧は、固定式ゲートに作用する波圧と比較して同程度か、あるいは小さくなる。

参 考 文 献

- 池野正明・松山昌史・榊山 勉・柳沢 賢 (2005) :ソリトン分裂と砕波を伴う津波の防波堤に作用する波力評価に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.751-755.
- 池谷 毅・朝倉良介・藤井直樹・大森政則・武田智吉・柳沢賢 (2005) :浮体に作用する津波波力の実験と評価方法の提案, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.761-765.
- 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.
- 中野 修・田中伸和・榊山 勉・興野俊也・大熊義夫 (2000) :ALE法による2次元動揺数値解析を用いた浮体式カーテンウォールの動揺・波力特性評価, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.851-855.
- 肥後 靖・岩下英嗣・神田雅光・中川寛之・小林正典 (2002) :没水平板式消波堤に働く流体力と動揺特性に関する研究, 関西造船協会論文集, 第237号, pp.119-126.
- 水谷 将・今村文彦 (2000) :構造物に作用する段波波力の実験, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.946-950.