

# 可動式津波低減設備“防波扉”の実用化に関する研究

飯干 歩<sup>1</sup>・平石 哲也<sup>2</sup>・濱田 英外<sup>3</sup>・森田 章一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>国土交通省 中部地方整備局港湾空港部  
(〒460-8517 愛知県名古屋市中区丸の内 2-1-36 NUP・フジサワ丸の内ビル)  
E-mail: iiboshi.ayumu.63c@gmail.com

<sup>2</sup>正会員 京都大学教授 防災研究所 (〒612-8235 京都府京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)  
E-mail: hiraishi.tetsuya.2c@kyoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

<sup>3</sup>防波システム研究所 (〒252-0807 神奈川県藤沢市下土棚 198-14)

防波扉は折りたたみ式の可動式津波低減設備で、津波発生時に自動的に起立して波の浸入を防ぐ。本研究では、防波扉の実用化に必要なとされる条件を、水理模型実験と数値解析の両面から検討した。OpenFOAMを用いて数値解析モデルを構築し、津波低減効果の評価を行った。波高計測値のみで防波扉の性能を評価する手法は、堤体の正味の津波低減効果を正当に評価できておらず不適切であった。一方、通過水量データでの評価は、堤体の津波低減効果を最も適正に評価しており、防波扉の津波低減効率は7割以上を示した。防波扉の強度分析では、ヤング率が大きい木材の場合、防波扉を強度面で安全に運用できると判断した。検討結果を踏まえて、防波扉は津波対策防災設備として実用性が認められると判断し、防波扉の現場設置モデルを提案した。

**Key Words :** *movable seawall, wooden structure, tsunami mitigation, OpenFOAM, strength analysis*

## 1. 序論

我が国では今後発生が想定される南海トラフ地震など大規模な災害に伴う大津波に備えて、防災・減災のための効果的なハード整備が求められている。また、東南アジア地域のように、津波リスクが高い発展途上国においても適用可能な津波対策を検討する必要がある。

一般的に建設されるコンクリート製防潮堤は、建設費用や環境の改変といった課題を抱える。これらを解決するために、普段は海底面に設置され、津波発生時のみ自動的に動作する可動式防潮堤の開発が進められている。本研究では、“防波扉”と呼ばれる新たな可動式津波低減設備に関して検討を行う。防波扉の概要を図-1に示す。防波扉は、折りたたみ式の木製構造物である。平常時は、

汀線付近にコンパクトに折りたたまれた状態で設置されるが、津波による浸水が始まると、本体の浮力と津波の波力を利用して自動的に起立し、後続の波の浸入を防ぐ。

防波扉に関する既往の実験には増田ら<sup>1)</sup>や浜田ら<sup>2)</sup>があるが、津波高さと防波扉の低減効果の関連や、本体の耐久性が明らかにされていない。主な課題として、防波扉に衝突する津波高さを明確に把握し、津波低減効果を正しく評価すること、及び作用波圧データを取得し、本体の強度分析を行うことが挙げられる。また、これまでに防波扉の実用化に言及した報告はないが、実現可能な寸法を想定して水理実験を行うことで、模型寸法を1/10縮尺として防波扉の現場設置モデルを提案できると考える。さらに、数値解析手法を用いた検討を併せて実施し、実験結果と比較することにより、精度の高いデータに基づいて実用化に向けた議論を進められると考える。

本研究では、防波扉の実用化に必要なとされる条件を、水理模型実験と数値解析の両面から検討する。そこで、新たに数値解析による水理実験の再現手法を確立し、津波低減効果の評価及び本体の強度分析を行う。検討結果を踏まえたうえで、防波扉の実用化の可能性を示すことを本研究の目的とする。

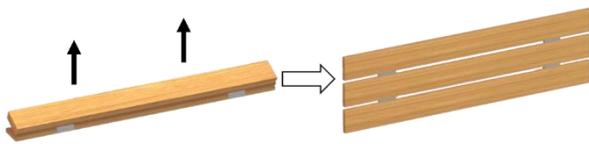


図-1 防波扉

## 2. 防波扉の津波低減効果に関する実験的検討

### (1) 実験方法

防波扉模型を水路に設置して孤立波を衝突させる水理模型実験を、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーの津波再現水槽で実施した。ピストン式造波装置がある方向を沖側、反対を岸側と呼び、岸側から沖側を見た時の位置関係で左右を定める。実験水路の断面を図-2(1)に示す。図-2(2)に平面配置を示す。防波扉1体は2本の円柱で支持され、堤背後の2~3ヶ所で波高を測定した。データは0.02 sごとに記録し、造波開始から20 s間計測を行った。

防波扉模型は木材によって製作され、高さ0.15 mの板を蝶番で3枚縦に結合することで、全体の高さが0.45 mの3段式折りたたみ構造物とした。防波扉の各段は水路床に近いものから順に1段目、2段目、3段目とし、沖側に面している方を前面、反対側を背面と呼ぶ。水路床に固定したコンクリートブロックの上に防波扉を取り付け、汀線から0.45 m地点で起立するようにした。実験水路の水位は0.85 m、孤立波の入力波高は、0.15 m、0.25 m、0.35 mの3種類とした。防波扉は、折りたたみ時、起立時に加えて、固定式防潮堤、ブランク実験の4種類の設置条件を設定した。各設置条件の設置状況を写真-1に示す。各実験条件に付き原則3回の実験を行った。

防波扉は、津波先端部が到達すると最上段が揚圧力を受けて浮き上がり始め、浮力によって2段目と最下段が浮上する機構を有しており、津波作用時に立ち上がることは本模型実験で目視とビデオ撮影によって確認した。

### (2) 津波低減効果の評価方法

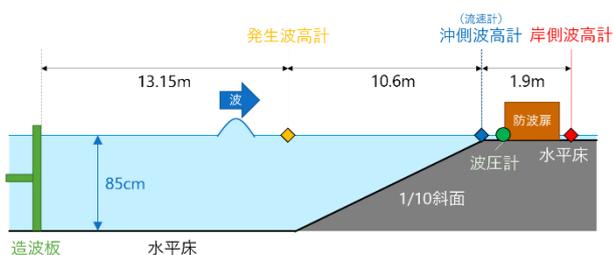


図-2(1) 津波再現水槽断面

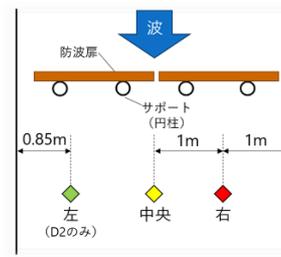


図-2(2) 津波再現水槽平面 (模型設置部)

浜田ら<sup>2)</sup>が提案した津波低減効率の評価式に基づいて、より厳密に防波扉の津波低減効果を評価できるよう改良した。本研究で用いる評価式を式(1)に示す。

$$TME_h = \frac{h_{r0} - h_r}{h_{r0}} \quad (1)$$

ここで、 $TME_h$ は津波低減効率、 $h_r$ は岸側波高、 $h_{r0}$ はブランク実験の岸側波高平均値を表す。式(1)の分母は堤体がない場合本来陸上で計測された波高に、分子は堤体があることで減少した波高に相当する。したがって、式(1)は堤体がない場合の波高増加量に対する堤体が存在する場合の波高減少量の割合を示している。

### (3) 実験結果

津波低減効率の計算結果を図-3に示す。図の横軸は入力した波高、縦軸は津波低減効率の値を示しており、実験ケースごとに3試行した平均値をプロットしている。津波低減効率が負の値をとるケースは、防波扉や防潮堤を設置したことで堤体背後の波高が上昇することを意味する。岸側波高計では、防波扉中央の隙間を通過した波や、堤体を越えた波が水路床に落下して新たに形成された波を記録しているとみられる。これらはブランク実験では見られない現象のため、防波扉、固定式防潮堤の方が岸側波高 $h_r$ の値が上昇し、結果として津波低減効率が負の値になったと考えられる。なお、測定結果からは入力波高15cmのとき、防潮堤のケースが最も津波低減効率が高く、入力波高が35cmのときは防潮堤を設置すると津波低減効果が損なわれ、防波扉の効果が高くなる、と解釈できる。一方で、津波発生時に堤体を何も設置しない場合と比較して、防潮堤を設置した場合の方が津波浸水を防ぐことができることは明らかである。したがっ



写真-1 防波扉の設置条件 (左から折りたたみ時、起立時、固定式防潮堤、ブランク実験)

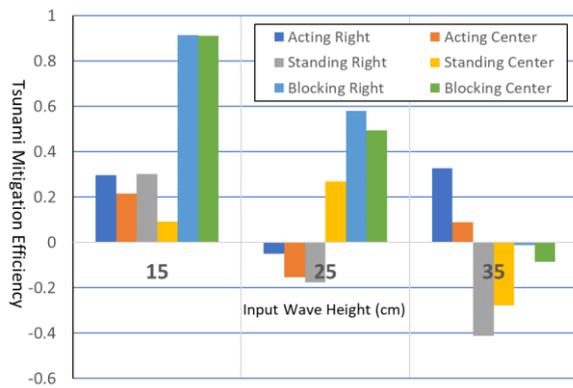


図-3 波高による津波低減効率

(ここで、Acting; 防波扉, Standing; 起立固定時, Blocking; 固定式防潮堤のケース Right; 右側, Center; 中央の波高計での計測値 (3 試行の平均値) を示す。)

て、本実験結果の波高計測値を用いた評価方法では、堤体の津波低減効果を正しく評価できていないと考えた。

### 3. 数値解析による防波扉の津波低減効果の評価

#### (1) 計算条件

防波扉の水理模型実験を数値流体力学手法で再現することを目的として、津波再現水槽の数値解析モデルを構築した。本研究では、数値解析用ソフトウェアとして OpenFOAM<sup>3)</sup>を用いた。OpenFOAM は数値流体力学 (CFD) ツールボックスの一種である。ソルバーとして、非圧縮性非定常流解析に対応する interIsoFoam を使用した。気相と液相の界面は VOF 法に基づいて解いている。

計算領域は、津波再現水槽の寸法に基づいて定めた。津波再現水槽の水路幅は 4 m であるが、計算領域内では

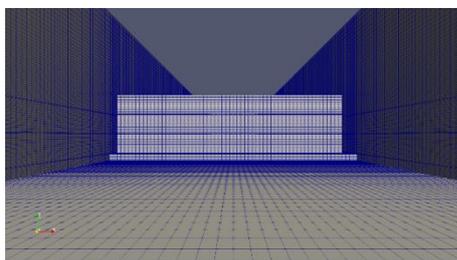


図 4 防波扉起立時の計算メッシュ

半分の 2 m に設定した。防波扉を 2 台並べて設置すると水路幅方向に対称となるため、水路の半幅だけを計算することとした。この水路モデル上に、防波扉模型が起立した状態の計算領域を設定した。計算メッシュを図-4 に示す。段と段の隙間は 0.01 m と仮定した。防波扉本体及び土台部分是不透過領域とすることで表現し、防波扉背後の防波扉を支える円柱模型 (図-2(2)参照) は省略した。固定式防潮堤、ブランク実験についても同様に計算領域を設定した。なお、防波扉の全高は 0.53m で、0.01m の隙間が上下板の接続部に 3 か所開いている。また、側壁とは 0.12m 離れている。したがって透過体としての空隙率は 13.3% である。造波装置による孤立波の造波は、移動メッシュ制御により再現した。計算領域の沖側壁面を造波板と仮定し、水路沖側から岸側に向けて周辺のメッシュが縮むように設定した。沖側壁面が水を押し出すことにより孤立波が発生し、実験水路と同様の造波を再現できる。計算は 15 s 間実施し、0.1 s ごとにデータを記録した。実験同様、初期水位は 0.85 m に、孤立波の入力波高は 0.15 m, 0.25 m, 0.35 m の 3 種類に設定し、合計で 9 ケースの数値解析を実施した。

#### (2) 津波低減効果の評価方法

実験と同様に津波低減効率の評価式 (2.2 式(1)参照) を用いて検討を行い、VOF 値  $\alpha = 0.5$  を満たす連続面を水面として取得した。波高による評価に加えて、防波扉前面に設定した断面を通過する水量による評価も併せて行った。解析領域に、図-5 のように水路幅方向の断面を設定し、流量  $Q_1$ ,  $Q_2$  を定義した。流量  $Q$  は計算で求まる VOF 値を断面で積分して求めた。流量を時間積分して、時間内に通過した水量を算出した。通過水量に基づく津波低減効率の評価式を式(2)に示す。

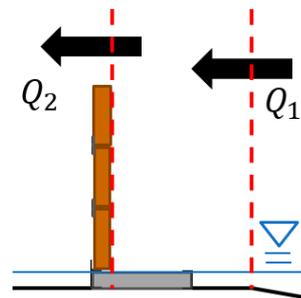


図-5 設定断面及び流量

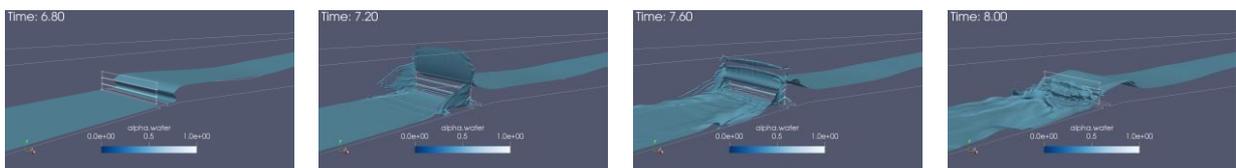


図-6 防波扉の計算結果可視化

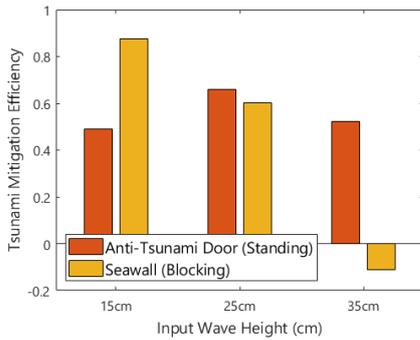


図-7 波高による津波低減効率

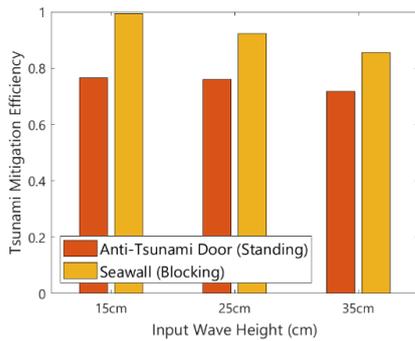


図-8 通過水量による津波低減効率

$$TME_V = \frac{V_{20} - V_2}{V_{20}} \quad (2)$$

ここで、 $TME_V$ は津波低減効率、 $V_2$ は流出量、 $V_{20}$ はプランク実験の流出量を表す。式(2)の分母は堤体がなければ本来背後で浸水していた水量に、分子は堤体があることで減少した水量に相当する。したがって、式(2)は堤体がない場合の背後への通過水量に対する堤体が存在する場合の低減水量の割合を示している。

### (3) 計算結果

防波扉の計算結果について、水面形状を各時刻で可視化したものを図-6に示す。左から右にかけて、孤立波が防波扉に衝突する様子を図示している。

#### a) 波高による津波低減効果の評価

津波低減効率の計算結果を図-7に示す。固定式防潮堤では入力波高0.35 mのとき負の値を示し、防潮堤を設置しているために、堤体背後の波高が上昇してしまうことを意味する。岸側波高 $h_r$ の値が大きくなった理由として、防潮堤を越えた波が水路床に落下し、新たに波を形成したことが考えられる。これは水理実験の結果及び考察と一致し、モデルの検証ともなった。堤体背後での局所的

表-1 防波扉の津波低減効率比

入力波高(m)	0.15	0.25	0.35
津波低減効率比	0.771	0.823	0.840

な水面の乱れの影響を取り除く手段として、波高計の計測位置を岸側に下げることが考えられる。しかし、波高の計測値はその計測位置に大きく依存するため、一律の基準で評価できていないと難しい。波高計測値のみを用いて防波扉の性能を評価する手法は、堤体正味の津波低減効果を正當に評価できず、不適切となることがある。

#### b) 通過水量による津波低減効果の評価

津波低減効率の計算結果を図-8に示す。津波低減効率は全ケースで正の値をとる。式の物理的意味及び算出される津波低減効率の妥当性を踏まえると、式(2)を用いた評価方法は、堤体の津波低減効果を最も適正に評価していると考えられる。防波扉の性能を評価する手法として、式(2)を用いた堤体背後への通過水量による評価が妥当であると提案する。本研究の条件下では、防波扉の津波低減効率は7割以上を示すという結果が得られた。

防波扉の津波低減効果を固定式防潮堤と比較するため、式(3)に示す津波低減効率比  $TMER$  を計算した。

$$TMER = \frac{TME|Standing}{TME|Blocking} \quad (3)$$

ここで、 $TME|Standing$  は防波扉の津波低減効率、 $TME|Blocking$  は固定式防潮堤の津波低減効率である。なお、固定式防潮堤は側壁との間に隙間を有していない。

図-8に示した防波扉の津波低減効率について、式(3)を用いて比を計算した結果を表-1に示す。

表より、入力波高が大きくなるにつれて、防波扉の津波低減効率比も大きくなるのがわかる。このようになった要因として、津波低減効率の下がり幅が異なることが関係している。固定式防潮堤では、入力波高が小さいときほとんど越波を許さない一方で、大きいとき越波量が増大し、効率が低下する。防波扉では、入力波高の大きさにかかわらず隙間から波の通過を許すため、効率に大きな変化が生じないと考えられる。表-1に示される結果から、津波低減効率を指標として防波扉の性能を評価したとき、本研究の条件下では固定式防潮堤と比較して7~8割程度の効果を示すという結果が得られた。

#### (4) 計算モデルの精度

本章の最後に計算モデルの精度を評価しておく。そのために高さ25cmの防潮堤に作用する波圧分布を模型実験で測定し、本計算で用いたOpenFOAM計算モデルで求めた波圧分布と比較した。図-9に防潮堤に作用する波圧分布を示す。Case-2が本計算で使用した計算格子と時間刻み条件に相当する。計算波圧は実験値よりやや過大だが、分布形は良く再現されており精度が確認できた。

本章での結論を踏まえると、水理模型実験においても防波扉背面の流量を測定し、得られた測定値に基づいて津波低減効率を算出することが適切であると言え、現実的かつ精度の高い手法を検討していく必要がある。

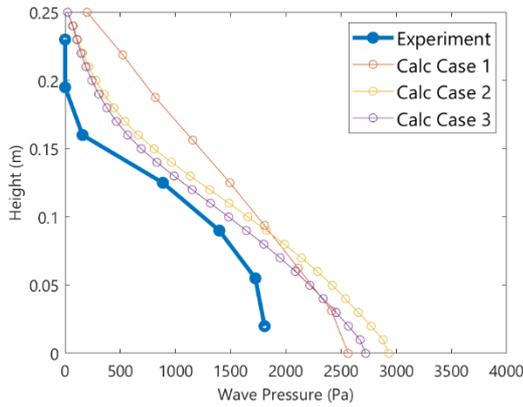


図-9 波圧分布における実験値と計算値の比較

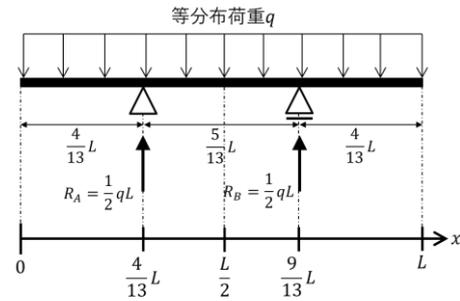


図-10 防波扉に作用する波力の構造力学的問題

#### 4. 静的モデルによる防波扉の強度分析

##### (1) 強度分析の手順

防波扉本体の強度を調べるため、静的モデルを用いて分析を実施した。計算結果より防波扉前面に作用する波圧分布データを取得した。次に、3段の防波扉の各段について、波圧分布から最大波力を算出した。防波扉の板を単純梁として図-10のように表し、最大波力が各段に一样に作用すると仮定し、各段の曲げモーメント及び板のたわみを算出した。ここで支点位置は実験での背後支持円柱位置である。たわみ曲線は図-11に示す形状となり、梁の両端 ( $x=0, L$ ) と中央 ( $x=L/2$ ) でたわみの絶対値は最大値となる。たわみ最大値  $v_{max}$  は、一つの木材が変形していると捉え、以下の式(4)の通りに求められた。

$$v_{max} = |v(0)| + \left| v\left(\frac{L}{2}\right) \right| \quad (4)$$

$$|v(0)| = |v(L)| = \frac{187621 F_{max}}{7800} \frac{1}{E} \cong 24.1 \times \frac{F_{max}}{E}$$

$$\left| v\left(\frac{L}{2}\right) \right| = \frac{88837 F_{max}}{19968} \frac{1}{E} \cong 4.45 \times \frac{F_{max}}{E}$$

ここで、 $F_{max}$  は波力最大値、 $E$  はヤング率である。たわみ最大値を許容値と比較し、本研究の検討条件において本体の強度に問題がないか判断した。式(4) 2番目及び3番目の係数は、たわみの釣合い式に、それぞれ  $x=0, L$  および  $x=L/2$  を代入すると算出される。

##### (2) たわみ許容値による強度判定

防波扉を一樣な木材と仮定し、たわみの算出に必要なヤング率を渡邊ら<sup>4)</sup>により  $E=7000$  と  $E=9000$  の2種類の木材と定め、比較検討を行うこととした。木材のたわみ許容値として、建築物に用いられる木材のたわみ基準を採用することとした。建設省<sup>5)</sup>によると、建築物の使用上の支障が起こらないことの確認方法は、たわみ最大値  $v_{max}$  に関して以下の式(5)で定められている。

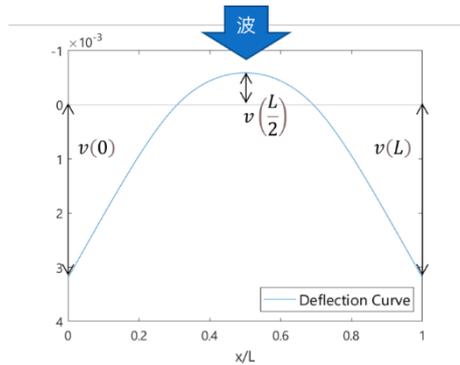


図-11 たわみ曲線

$$\frac{v_{max} \times DIC}{L} \leq \frac{1}{250} \quad (5)$$

ここで、変形増大係数  $DIC$  は長期間の荷重により変形が増大することの調整係数であり、通常木材では2を採用する。今回の検討では、作用荷重である波圧は瞬間的なものであることから、変形増大係数を1とした。部材の有効長さには、梁全体の長さを採用した。各入力波高条件で段ごとに算出されるたわみ最大値を式(5)に当てはめて、条件を満たす場合は板の強度は安全である。

##### a) $E=7000$ (N/mm<sup>2</sup>) の場合

ヤング率  $E=7000$  (N/mm<sup>2</sup>) と最大波力  $F_{max}$  の値を式(4)に代入して、梁の両端と中央のたわみを求めた。たわみの値を式(5)に示す評価基準に当てはめた結果を表-2に示す。式(5)の条件を満たさず、たわみが許容値を超えるものは表中に赤字で示した。ほとんどのケースで許容値を満たすが、入力波高 0.35 m の条件では2段目のたわみが許容値を超えていることがわかる。したがって、ヤング率 7000 程度の木材を使用した場合、今回の検討条件では防波扉の強度面で安全が保障できないという結果を得た。

##### b) $E=9000$ (N/mm<sup>2</sup>) の場合

ヤング率  $E=9000$  (N/mm<sup>2</sup>) と最大波力  $F_{max}$  の値を式(4)に代入して、梁の両端と中央のたわみを求めた。たわみの値を、式(5)に示す評価基準に当てはめた結果を表-3に示す。ヤング率が大きくなったことにより、すべてのケースでたわみが許容値を満たした。

2種類の木材を比較した結果、ヤング率が異なるために防波扉の強度分析結果に差が生じた。ただし、今回の

表-2 たわみ評価式  $v_{max}/L$  ( $E=7000\text{N/mm}^2$ )

入力波高(m)	1 段目	2 段目	3 段目
0.15	0.00160	0.00070	0.00014
0.25	0.00389	0.00180	0.00054
0.35	0.00343	0.00446	0.00091

表-3 たわみ評価式  $v_{max}/L$  ( $E=9000\text{N/mm}^2$ )

入力波高(m)	1 段目	2 段目	3 段目
0.15	0.00124	0.00054	0.00011
0.25	0.00303	0.00140	0.00042
0.35	0.00267	0.00347	0.00071

検討では防波扉本体を一樣な木材と仮定したが、実験で用いた防波扉模型は複数の木材を用いて製作し、内部は空洞になっている。今回は問題を単純化して強度分析を実施したが、より複雑な条件下で検討する必要もある。

## 5. 防波扉の現場設置モデルの提案

ここまでの検討結果を基に、防波扉は津波対策防災設備として実用性が認められると判断し、現場設置モデルを提案する。水理実験で製作した防波扉模型の寸法を縮尺 1/10 と仮定し、ここで示す防波扉の条件は、本研究で定めた検討条件の範囲内に限り成立するものとした。提案する防波扉現場設置モデルは以下の通りである。

- ・防波扉は沿岸域の陸上あるいは汀線部に、横断方向に複数台並べて設置する。第二線防潮堤として既存の防潮堤と複合して防災機能を高める役割を果たす。
- ・防御対象とする津波高は、3.5m 程度の津波を想定する。
- ・防波扉は中空の木製構造物で構成し、高さ 1.5m 程度の板を蝶番で3枚縦に結合することで、全体の高さが

4.5m 程度の3段式折りたたみ構造物とし、本体を構成する木材には、十分な強度を持つものを使用する。

以上の設置条件を満たす場合、防波扉は津波発生時に自動的に起立し、防潮堤として波の浸入を防ぐ役割を果たす。このとき、固定式防潮堤と比較して7~8割程度の津波低減効果を示す。

## 6. 結論

本研究では、防波扉模型を水路に設置して孤立波を衝突させる水理模型実験を実施するとともに、OpenFOAMを用いて、防波扉の起立時の津波低減効果を検討した。波高データによる評価方法は一律の基準で評価できているとは言い難いので、性能を評価する手法として、堤体背後への通過水量による評価が妥当であると提案した。本研究の条件下では、防波扉の津波低減効率固定式防潮堤に対して7割程度を示した。次に、防波扉を単純梁の問題として仮定し、強度分析を実施した。ヤング率  $E=9000(\text{N/mm}^2)$  の木材の使用で防波扉を安全に運用できる。

## 参考文献

- 1) 増田光弘, 藤田慶彦, 浜田英外, 南 清和: 津波被害減災のための可動式防波扉の適用性に関する研究, 日本航海学会論文集, Vol.131, pp.119-124, 2014.
- 2) 浜田英外, 藤田慶彦, 平石哲也: 自動式木製津波低減設備の実験, 自然災害科学, Vol.35, No.2, pp.141-153, 2016.
- 3) 一般社団法人オープン CAE 学会: OpenFOAM による熱移動と流れの数値解析, 森北出版, 2016.
- 4) 渡邊英一, 松本 勝, 白土博通: 構造力学 I, p.107, 丸善, 1999.
- 5) 建設省: 建築物の使用上の支障が起こらないことを確かめる必要がある場合及びその確認方法を定める件 (建設省告示第 1459 号), 2000.5.31.

(Received February 4, 2021)

(Accepted April 23, 2021)

# RESEARCH ON PRACTICAL APPLICATION OF MOVABLE TSUNAMI MITIGATION FACILITY "ANTI-TSUNAMI DOOR"

Ayumu IIBOSHI, Tetsuya HIRAISHI, Eigai HAMADA and Shoichi MORITA

The Anti-Tsunami Door (ATD) is a foldable and movable tsunami mitigation facility that automatically stands up to prevent the intrusion of waves when a tsunami occurs. In this study, the conditions required for the practical application of the ATD were examined from both the hydraulic model experiment and the numerical analysis. A numerical analysis model was constructed using OpenFOAM, and the tsunami mitigation effect was evaluated. The method of evaluating the performance of the ATD using only the measured wave height was inappropriate because the net tsunami mitigation effect of the embankment body could not be properly evaluated. On the other hand, the evaluation using the passing water volume data was applied to expect the tsunami reduction effect of the embankment body. The tsunami mitigation efficiency of the ATD was 70% or more. The strength analysis of the ATD was also done in the paper.

