

自動式木製津波低減設備の実験

浜田 英外¹・藤田 慶彦²・平石 哲也³

Experiments of Wooden Automatic Tsunami Mitigation Facilities

Eigai HAMADA¹, Yoshihiko FUJITA² and Tetsuya HIRAISHI³

Abstract

Tsunami mitigation facilities have been developed based on a new concept, in which the facilities are made of wood and will function automatically during tsunami flooding based on their natural buoyancy, instead of depending on electrically powered equipment. These are intended to provide a sufficient breakwater effect against tsunami flooding, while allowing some flood water to pass to the land side.

This experiment was intended to confirm that the new tsunami mitigation facilities (named, Anti-Tsunami Door) will, in fact, function automatically during tsunami flooding and that the wooden structure has sufficient strength during flooding to reduce the tsunami impact by approximately 80-90 %, compared to the protection provided by a concrete seawall. Anti-Tsunami Door might be applied to level 2 tsunami area because it can be constructed like a folding screen with multiple panels (such as 5×3 m height panels for 15 m height tsunami) of economic and environmental-friendly reinforced timber.

キーワード：防波扉，可動防潮堤，木製構造物，ユニット形式，レベル2津波

Key words: Anti-Tsunami Door, movable breakwater, wooden structure, unit structure, Level 2 tsunami

はじめに

2011年3月11日の東日本大震災では、当時の想定を大きく超えた大津波が東北地方太平洋側沿岸

部を襲ったために、既存の防潮堤は十分に対応できず、大きな被害を受けた。そして、その後に津波の想定高さの見直しが行われ、対応すべき想定

¹ 防波システム研究所代表
Anti-Tsunami Laboratory

² 東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科
Tokyo University of Marine Science and Technology

³ 京都大学防災研究所教授
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

本論文に対する討論は平成29年2月末日まで受け付ける。

津波高さが大幅に高くなった。それらの想定津波に対して、コンクリート製の防潮堤で防止するには、想定高さが上がった分、比例倍数分費用が高む。また、高くなる防潮堤を支え津波の威力に耐え、更には引き波に対しても十分な強度を持つ強大な基礎及び構造が必要であり、その工事経費は膨大になり、財政的に大きな負担になることは想像に易い。特に、南海トラフ地震により大きな津波が今後想定される地域では、まだ災害は可能性にすぎないということで、その費用の工面が難しく、対応遅れに繋がるのが懸念されている。

コンクリート製の防潮堤は、津波防止という観点では安定した性能を有しており、信頼性が高い。しかし、対応する津波高さに比例する以上に高額の費用がかかるという難点に加え、設置高さが高くなると、防潮堤で生活環境が寸断される。さらには、住民が海や津波の状況が分からず対応が遅れるという懸念や、津波発生時に防潮堤に設置されている開口部の閉鎖というような危険作業が発生するなどの課題がある。

そのような課題から、コンクリート製の防潮堤の課題を解決するために、自動で動作し通常時はコンパクトな状態で保持できる可動式・自動式防潮堤が開発されてきている。例えば、陸上設置型フラップゲート式可動防波堤は既に開発され実用化に至っており^{1,2)}、流起式可動防波堤も技術開発が進んでいる³⁾。しかしながら、これらの先行している可動式防潮堤は精密な構造体を擁し、製作に高度な技術や高価な材料が必要である。現時点では、堤防や港湾入口での限られた開口部に限定して適用されており、より広範な海岸線での、より高い想定津波に適用するのは経済的な観点から困難である。

このような状況において、筆者らは扉形状の木造構造物を採用し、木材の持つ浮力で浸水に対して自動的に動作し、主として長時間にわたる後続の津波の侵入を抑止するという新しいコンセプトの津波減災設備として防波扉等を設計した。

増田、藤田らは、防波扉のコンセプトに基づき、56 cm 幅のモデルで基本実験を行い、自動動作や津波影響低減の効果を確認し⁴⁾、シミュレーショ

ン結果を報告している⁵⁾。今回、この防波扉等のモデルを98 cm 幅にスケールアップし、津波低減設備として安定して自動的に機能するか、強度的に津波の波力に対応できるか、どれだけの津波低減効果があるかという点を確認するため、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーの1 m 幅実験水路にて、実験を行った。

今回実験を行ったのは、防波扉と防波門と呼ばれる設備である。特に、防波扉は、扉形状（実用サイズは、概略高さ3 m、幅5 m、厚み20 cm）のユニット形式の木造構造物を海岸沿い等に伏せて並べ、津波を低減するもので、ユニット形式であることから、長い海岸線への対応が可能である。また、屏風構造にして複数段を重ねて設置することを想定しており、例えば5段にすれば、計算上 $3\text{ m} \times 5 = 15\text{ m}$ の津波高さにも対応しうるものであるが、その一方で、通常時の設置高さは、その厚みから $20\text{ cm} \times 5 = 100\text{ cm}$ 程度で抑えられる。これにより通常時の視界確保に支障がないものである。主材料に再生可能な木材を使っており環境に優しく経済性にも優れている。津波低減効果があることが確認されれば、大幅に高い想定津波であるレベル2津波に対する低減設備として適用できると想定している。また、防波扉は設置が簡便であるので、既設の防潮堤に追加設置し、津波対応高さを向上させることも可能であると想定している。

1. 実験の概要

- (1) 実験場所：京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリー 3号棟実験場
- (2) 実験日時：2015年4月8日 - 4月17日、5月11日 - 13日
- (3) 使用実験設備：40m 不規則波造波水路（水路幅1 m、深さ1.5 m、長さ50 m）
造波板（幅1 m、高さ1.5 m、ピストンストローク±1 m）
波高計（工場検査時精度±0.1 mm）
- (4) 実験内容：造波水路の陸上部（マウンド天端部）に防波扉等の実験モデル（高さ15 cm等）を設置し、造波板で発生させた何種類かの実験

波（孤立波）に対して、動作状況、強度状況、実験モデル前後の波高を確認、測定した。

2. 実験モデル

2.1 防波扉及び防波サポート

防波扉は、扉形状の木製構造物の一边を地表な

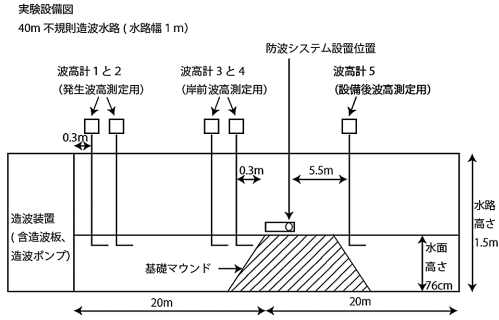
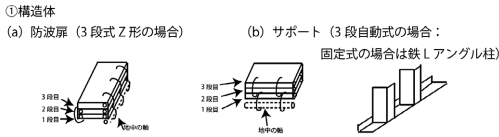


図1 実験設備図



「1段目の第1軸」は「地中の軸」とワイヤでつなく。
 「2段目の第1軸」は「1段目の第2軸」とワイヤでつなく。
 「3段目の第1軸」は「2段目の第2軸」とワイヤでつなく。

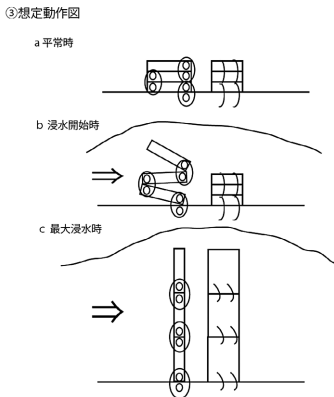
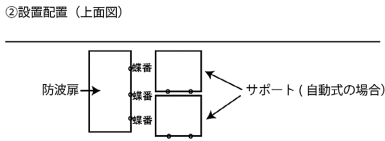


図2 防波扉実験モデル図

どに接続して設置し、津波が越流する際に木材の浮力で自動的に浮き上がり、防潮堤として機能する津波低減装置である(図2)。建屋の扉は水平方向回転して開閉するのに対し、防波扉は垂直方向に立ち上がる点異なるが、蝶番の動作が類似しているので、防波扉と名称している。防波扉は、扉形状であるため、複数の防波扉を重ねて屏風形式に繋げることにより、より高い津波への対応も可能と考えている。今回の実験では主として1段式のもので動作と性能の確認を行なった。

自動式の防波サポートは、防波扉と同様の木造構造物で津波の越流時に自動的に立ち上がるもので、防波扉の後方に、防波扉の動作方向と垂直方向に設置し、立ち上がった防波扉が津波波力によって陸側に傾くのを支えて、津波低減効果を維持する役割をする。今回は、目的が防波扉の動作確認のためであったので、主としてL字鋼を使った固定式のものを使用した。

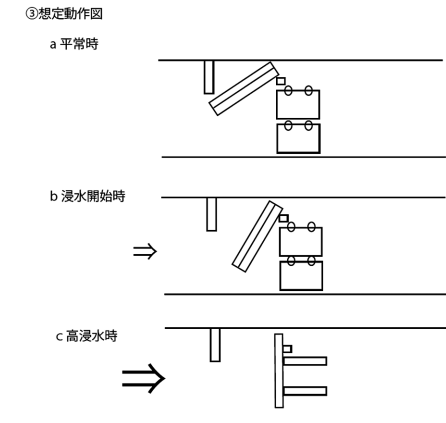
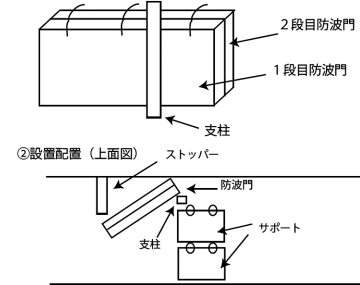


図3 防波門実験モデル図

2.2 防波門

防波門は、門形状の木製構造物を、軸となる支柱（橋脚など）に越流した津波が流入するように海側に開口部を設置し、津波が流入した際に、門が閉じるように動作し、防潮堤として機能する津波低減装置である。防波扉はユニット形式で、海岸線に並べて設置する装置であるが、防波門は一体物である。河口などの水の流れがある場所にも設置できる点が利点である。木製構造物で製作すると、規模に限られるが、金属製の枠などの中に多数の木製の構造物を収納させ、大規模な防波門とするようなスケールアップを考慮している。

防波扉、防波門の木製構造体は、2枚の木材板で木枠を挟み込んで強化したもので、内部を中空とし、そこに浸水が取り込まれるようになっている。浸水を取り込んでも浮力があまり変化しないことが、木製構造物の最大特徴と考える。このような中空の構造を採用することによって、構造物としての材料を節減できる。又浸水を取り込むことによって構造体の見かけ重量が増大するが、それが津波低減効果にどのように影響を与えるかは、今後の検討課題である。

3. 実験結果

3.1 実験結果データ

3.1.1 防波システム実験データ

造波装置で発生させた孤立波に対しての各防波システムの動作を動画として記録した。

この撮影動画から実験モデルの動作状況、構造的な欠損がないか強度の確認を行った。

3.1.2 津波低減効果

防波システム装置の後方に設置した波高計で、実験モデルを通過後の浸水波高を測定し、下記の算定式(1)にもとづき津波波高の低減効果を評価した。装置や地形、更には波の形や周期によって効果が変わるので定量的な評価はできないが、固定式の防潮堤構造を設置した場合のデータを測定し、それらとの比較、評価を行った。

実験時の波高計の各設置場所における波高（水位変化）の時系列データを図4に示す。最高点（波

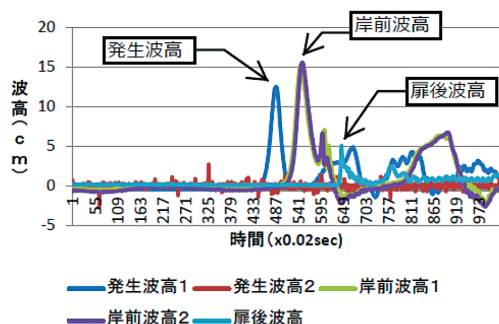


図4 防波扉実験時の水位変化の時系列データ（発生波高13 cm, 防波扉高さ15 cmで、動作時）

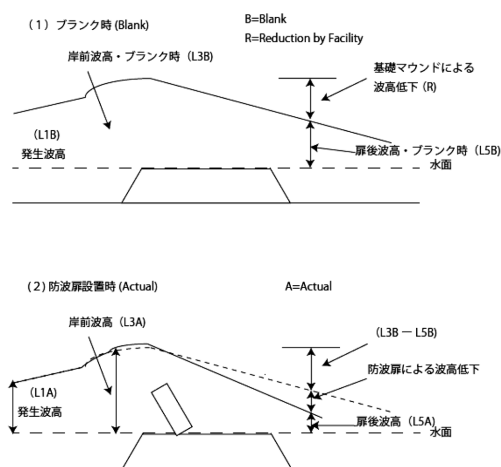


図5 津波低減効率の計算図

頂）が移動するので、それぞれの測定位置での最高値を採用して、津波低減効率を計算する。

(3) 津波低減効率の計算式

$$\begin{aligned}
 & \text{津波低減効率} \\
 &= (\text{防波扉による波高低下}) / \\
 & \quad ((\text{岸前波高}) - (\text{基礎マウンドによる波高低下})) \\
 &= ((\text{岸前波高}) - (\text{基礎マウンドによる波高低下}) \\
 & \quad - (\text{扉後波高})) / \\
 & \quad ((\text{岸前波高}) - (\text{基礎マウンドによる波高低下})) \\
 &= (L3A - (L3B - L5B) - L5A) / (L3A - (L3B - L5B)) \quad (1)
 \end{aligned}$$

3.2 防波扉の低減効果の確認実験 (No.1)

実際の現場で用いる防波扉は、2-3 m 高さ × 5 m 幅 × 20 cm 厚みを予定している。今回の実験では水路幅に目一杯合わせた幅広の防波扉 (幅98 cm / 厚み 4 cm) を使用し、高さは防波扉小と防波扉中でそれぞれ15 cm と 30 cm である。今回の実験結果を表 1 にまとめて示す。

「動作時」とは、防波扉が水平に伏せた状態から、波の侵入によりほぼ垂直に立ち上がって防潮堤と機能するようになる時のことで、「動作後」は、動作の後で最初の水平位置に戻さず、ほぼ垂直に立ち上がったままの状態、新たに波を侵入させた時のことである。

防波扉は、連続写真 (写真 1) に示したように、安定して自動的に立ち上がり、防波扉が水密でない分効果が減少するものの、防波扉の高さ (15 cm) の直立防潮堤とほぼ同等の効果を発揮した。

防波扉は、入射波が防波扉の先端に到達した時点で瞬間的に完全に起立する (完全起立までにかかる時間は 1 秒以下) ように観測された。この時に防波扉にかかる力は、「孤立波の流体力」と「浮力」であるが、浮力を充分に得る前に立ち上がっていることと観測されること、また、孤立波の流体力だけで上方に立ち上がると考えられないことから、両効果の中で瞬間的に上方に立ち上がると考えられる。

表 1 の (津波) 低減効率は、発生させた波高と防波扉の高さの相関で決まるため (15 cm 高さの防波扉に 19 cm の波が入射した時と、30 cm 高さの防波扉に 13 cm の波が入射した時では、低減効率は異なる)、数値が単純な比例関係にならないが、実際には立ち上がった防波扉の垂直方向の面積に相応した津波低減効果をもたらしている。このことを確認するために、次項において、固定式防潮堤との比較検討を行った。

本研究において、津波低減効率の計算式を採用した理由は、実験の初期条件 (基礎マウンド) による波高の低減効果を除き、防波扉および防波門による正味の低減効果を評価するためである。例えば上記の No.1-10 で、発生させた孤立波の高さは 13 cm (実測値 12.01 cm) であるので、対応する

表 1 防波扉実験結果 1

No.	設定内容	発生波高	岸前波高	扉後波高	低減効率
1-1	ブランク	4.84cm	7.12cm	3.55cm	
1-2	ブランク	9.80cm	12.35cm	6.36cm	
1-3	ブランク	12.78cm	15.29cm	7.28cm	
1-4	ブランク	14.78cm	17.39cm	7.96cm	
1-5	ブランク	17.73cm	20.19cm	8.94cm	
1-6	防波扉小 広動作時	4.92cm	6.91cm	0.81cm	75.7%
1-7	防波扉小 動作後	4.74cm	6.79cm	0.49cm	84.7%
		4.53cm	6.52cm	0.59cm	80.0%
1-8	防波扉小 動作時	9.66cm	11.91cm	2.73cm	53.8%
		9.64cm	11.62cm	2.38cm	57.7%
		9.28cm	11.47cm	2.25cm	58.9%
1-9	防波扉小 動作後	9.82cm	12.02cm	2.59cm	57.0%
		9.13cm	11.08cm	2.38cm	53.2%
1-10	防波扉小 動作時	12.01cm	14.44cm	4.52cm	29.7%
1-11	防波扉小 動作後	12.14cm	14.55cm	4.88cm	25.3%
1-12	防波扉小 動作時	14.90cm	16.94cm	5.74cm	23.5%
1-13	防波扉小 動作時	17.09cm	19.77cm	5.82cm	31.6%
1-14	防波扉中 広動作時	9.78cm	12.26cm	1.72cm	72.5%
		9.53cm	12.19cm	1.45cm	76.6%
		9.87cm	12.25cm	1.92cm	69.3%
1-15	防波扉中 広動作後	9.69cm	12.07cm	0.96cm	84.2%
		9.42cm	11.60cm	1.01cm	81.9%
		9.68cm	11.95cm	1.13cm	81.0%
1-16	防波扉中 広動作時	12.31cm	14.77cm	2.18cm	67.7%
		11.98cm	14.46cm	2.84cm	55.9%
1-17	防波扉中 広動作後	11.76cm	13.57cm	1.04cm	81.2%

ブランク実験 (上記の No.1-3) と比較して評価する。このブランク実験の時、波高は岸前で 15.29 cm に上昇し、装置後方 (約 5.5 m 後方) で 7.28 cm まで低下した。この低減分は、初期条件 (原地形) の持つ物理的な低減効果と判断されるので、この分を差し引いて、岸前波高からの津波低減効果を評価する方法を採用した。これに基づき、No.1-10 のデータを評価すると、 $(14.44 - (15.29 - 7.28) - 4.52) / (14.44 - (15.29 - 7.28)) = 0.2970$ となり、低減効率は 29.7% となった。

上記の幅広の防波扉 (高性能型) は、1 m 幅の水路に対して、98 cm 幅の防波扉を適用したもので、標準的なモデル (91 cm 幅) より幅広にして波が当たる面積を広げることにより、水密性を高めたものである。

3.3 防波扉の低減効果の確認実験 (No.2)

前項の発生波高13 cmの実験 (No.1-10と1-11) において、防波扉の動作時の津波低減効率が、動作後に比べ、「動作時は防波扉が立ち上がっていく途中で防潮堤として機能しない時間があり、津波低減効果が低いであろう」という想定に反して、効果が高かったことから、同じ幅広の防波扉を使って、防波扉が立ち上がる動作時が、既に立ち上がった後で新たに浸水を受ける動作後より低減性能が高くなるのかどうかの確認を行った。その結果を表3.3に示す。

この結果から、防波扉動作時の津波低減効率の平均値は30.7%であり、動作後の平均値は29.3%であることが分かった。以上から、防波扉は、水平状態から立ち上がる動作のある動作時の方が、既にほぼ垂直になって立ち上がる動作のない動作後よりも、その瞬間の波動に対しては、今回の実験条件下で津波低減効率が高い傾向にあることが観測された。

3.4 固定式防潮堤との比較

上記3.2項で述べたように、津波低減効率は発生させた波高と防波扉の高さの比率と密接に関係している。実際には、水密でないために低減効果が減少するものの、防波扉の高さ (15 cm) の直

立防潮堤とほぼ同等の効果を発揮した。

その点を分かりやすく適正に評価するために、同じ条件下の固定式防潮堤の低減効果と比較すること適切であると考え、防波扉を垂直に立てその周辺をその高さまでパテで止め、固定式防潮堤構造として実験した。その結果を表3にまとめて示す。

固定式防潮堤 (15 cm 高さ) が発生波高13 cmの孤立波を受けた時の低減効率は、平均値で34.9%であった。このことから、防波扉 (15 cm 高さ) が動作する時の低減効率については、平均値で30.7%であるので (表2)、固定式防潮堤の防災効率に近い数値であることが分かった。これを割合として評価すると、防波扉の低減効率は、その動作時には、固定式防潮堤の88%程度あることになる。また、防波扉が動作した後はその低減効率は若干低下するが、それでも、固定式防潮堤の低減効率の84%程度と相応の効果があることが分かった。

以上から、防波扉は、通常時は地表面等に伏せられて保持され、津波が浸水してきた時に自動的に立ち上がって防潮堤となる設備であるために、両側に隙間があり防潮堤として完全には水密することができず、防潮堤の性能は固定式防潮堤に比べて劣るが、その低下する度合いは、固定式防潮堤の低減効率に比べ、10~20%程度の低下であり、自動浮上するために水密でないことによる波高低減の効率低下はあまり大きくはないと評価できる。

表2 防波扉実験結果2

No.	設定内容	発生波高	岸前波高	扉後波高	低減効率
2-1	防波扉小動作時	12.41cm	15.31cm	4.78cm	34.5%
2-2	防波扉小動作時	12.51cm	15.26cm	5.04cm	30.4%
2-3	防波扉小動作時	12.48cm	15.25cm	5.27cm	27.2%
2-4	防波扉小動作後	12.48cm	14.89cm	4.83cm	29.7%
2-5	防波扉小動作後	12.18cm	14.45cm	4.60cm	28.5%
2-6	防波扉小動作後	12.53cm	15.29cm	5.10cm	29.9%
1-3	ブランク	12.78cm	15.29cm	7.28cm	
1-10	防波扉小動作時	12.01cm	14.44cm	4.52cm	29.7%
1-11	防波扉小動作後	12.14cm	14.55cm	4.88cm	25.3%

表3 防波扉実験結果3

No.	設定内容	発生波高	岸前波高	扉後波高	低減効率
3-1	固定式防潮堤	12.74cm	15.12cm	4.94cm	30.5%
3-2	固定式防潮堤	12.80cm	15.20cm	4.39cm	38.9%
3-3	固定式防潮堤	12.18cm	15.34cm	4.74cm	35.3%
	固定式防潮堤 - 平均値				34.9%
2-1~	防波扉小動作時				30.7%
2-3	- 平均値				
2-4~	防波扉小動作後				29.4%
2-6	- 平均値				

3.5 防波門の確認実験

標準サイズの防波門（幅91 cm/ 厚み 2 cm）で実験した結果を表 4 にまとめた。防波門小と防波門中の高さはそれぞれ15 cm と 30 cm である。

「動作時」とは、防波門が水路にはほぼ平行に置かれた位置から、水路に直角となる位置まで門のように移動して、防潮堤と機能する時のことで、「動作後」は、動作した後に門と水路が直角である状態で、波を受けた時のことである。

防波門は、写真 2 の連続写真に示したように、安定して自動的に防潮堤として機能する最終位置に移動し、水密でない分効果が減少するものの、防波門の高さ（15 cm）の直立防潮堤とほぼ同等の津波低減効果を発揮した。移動時間は約 1 秒間である。

15 cm 高さの防波門小が動作後に10 cm 高さの波を受けた時（No.4-2）、68.2%の低減効率がある。一方、波が到達した直後に防波門が動作を開始し、防潮堤として機能し始めるまでに少し時間がかかるために、動作時の低減効率（No.4-1）は、

表 4 防波門実験結果 1

No.	設定内容	発生波高	岸前波高	門後波高	低減効率
4-1	防波門小動作時	9.88cm	12.52cm	3.96cm	38.5%
4-2	防波門小動作後	9.95cm	12.64cm	2.08cm	68.2%
4-3	防波門小動作後	4.83cm	7.05cm	0.30cm	86.8%
4-4	防波門小動作後	12.89cm	15.59cm	4.34cm	35.1%
4-5	防波門小動作後	15.59cm	18.18cm	5.18cm	30.9%
4-6	防波門中動作時	10.33cm	12.92cm	3.80cm	44.4%
4-7	防波門中動作後	10.25cm	12.98cm	1.55cm	77.5%
4-8	防波門中動作後	13cm 相当	NA	NA	支柱45度傾
4-9	ブランク	4.84cm	7.03cm	2.27cm	
4-10	ブランク	9.64cm	12.30cm	6.22cm	
4-11	ブランク	13.12cm	15.59cm	6.69cm	
4-12	ブランク	15.88cm	18.43cm	7.75cm	

No.4-2と同じ条件下で、38.5%と小さい。ただ、この状態の時間は1秒間程度であるので、実際の津波の場合、周期が長く浸水時間が長いことを考えると、性能への影響は少ないと考える。

これらの結果は、防波門が1 m 幅の場所に両側に 4 cm ずつ隙間を持って設計されて、津波の浸水時に防潮堤として機能する位置に移動した後のもので、実際の防潮堤に良く似た（隙間がある以外は）状況であると考えられる。

4. 実験結果のまとめと考察

4.1 防波扉の津波低減効果の整理と考察

防波扉の津波低減効果をまとめて評価するために、代表例として15 cm 高さの防波扉に発生波高 13 cm 相当の実験波を与えた時の結果と、同じ波高条件のブランク実験と固定式防潮堤構造体を使った実験と比較した結果を表 5 にまとめて示す。

そして、各実験の代表的なものに関して、条件と結果を整理して考察を行ったものを下記にまとめた。

(1) ブランク（実験番号：No.1-3）

条件：実験設備に津波低減設備を何も設置せず、13cm 波高の実験波を与えたもの

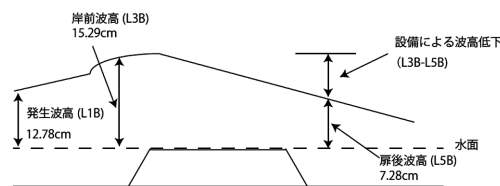


図 6 入射波高13 cm, 防波扉なし（ブランク）のケースにおける最大波高の関係図

表 5 防波扉波高低減データ

	1. ブランク	2. 固定式防潮堤 a	2. 固定式防潮堤 b	2. 固定式防潮堤 c	3. 防波扉動作時 a	3. 防波扉動作時 b	3. 防波扉動作時 c	4. 防波扉動作後 a	4. 防波扉動作後 b	4. 防波扉動作後 c
発生波高	12.78	12.74	12.8	12.18	12.41	12.51	12.48	12.48	12.18	12.53
岸前波高	15.29	15.12	15.2	15.34	15.31	15.26	15.25	14.89	14.45	15.29
扉後波高	7.28	4.94	4.39	4.74	4.78	5.04	5.27	4.83	4.6	5.1
津波低減効率	0.0%	30.5%	38.9%	35.3%	34.5%	30.4%	27.2%	29.7%	28.5%	29.9%

結果：実験波はマウンド前面でせきあげ効果によって波高が上昇し、マウンドを通過後に低下した。

津波低減効率：0%（ベース）

考察：実験波は孤立波であるので、基礎マウンドに広がって波高が低下した。これは基礎マウンド（原地形）の持つ低減効果である。

（2）固定式防潮堤構造（実験番号：No.3-4）

条件：15 cm 高さの構造体を立てて設置し、両側と下側の隙間をパテで閉じたもので、15 cm 高さまでは完全に水密状態にした。

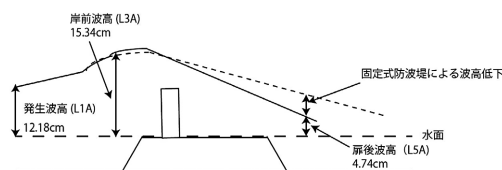


図7 入射波高13 cm, 固定式防潮堤構造のケースにおける最大波高の関係図

結果：マウンドを越流した実験波は、両側に隙間のない固定式防潮堤構造で阻まれ、波高が低減した。

津波低減効率：35.3%

考察：津波を短周期に区切った時に固定式防潮堤を乗り越える状況を表していると考ええる。

（3）防波扉動作時（実験番号：No.2-2）

条件：15 cm 高さで98 cm 幅の防波扉を1 m 幅の水路に伏せて設置したもの

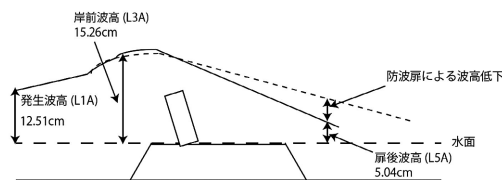


図8 入射波高13 cm, 防波扉動作時のケースにおける最大波高の関係図

結果：マウンドを越流した実験波は防波扉を立ち上げ、立ち上がった防波扉によって浸水が抑えられる。但し、水密でない分、多く浸水が抜けた。

津波低減効率：30.4%

考察：防波扉は自動的に立ち上がって防潮堤として機能することが確認された。水密でない分、その低減効率は固定式防潮堤に比べて若干低下するが、固定式防潮堤の効率の80%を超える性能がある。

（4）防波扉動作後（実験番号：No.2-6）

条件：15 cm 高さで98 cm 幅の防波扉を1 m 幅の水路で立ち上がらせたままで、新たに実験波を流入させた。

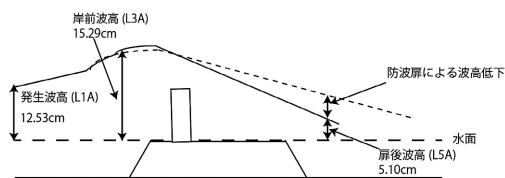


図9 入射波高13 cm, 防波扉動作後のケースにおける最大波高の関係図

結果：マウンドを越流した実験波は、既に立ち上がっていた防波扉で流入を阻まれ、構造体より陸側に進む浸水はその垂直方向の面積に相応して減少した。但し、水密でない分、多く浸水が抜け、その低減効果は固定式防潮堤よりも低くなった。

津波低減効率：29.9%

考察：防波扉が立ち上がった後の防潮堤として機能している状況を表している。水密でない分、その低減効率は固定式防潮堤に比べて若干低下するが、固定式防潮堤の効率の80%を超える性能がある。

立ち上がる時よりも低減効率は低下した。その理由としては、防波扉の立ち上がり時には、内部に取り込んだ水を含めて構造体全体を津波に持ち上げさせ津波に仕事をさせることも津波低減に寄与していると思われるが、防波扉が立ち上がった後ではそれがないことが考えられる。

図10に上記の結果をまとめて示す。

この結果を見ると、ブランクの場合には、装置背後の波高が他と違って明らかに高く、実験波の減衰が基礎マウンドによるもののみであることが分かる。一方、固定式防潮堤構造も防波扉動作時

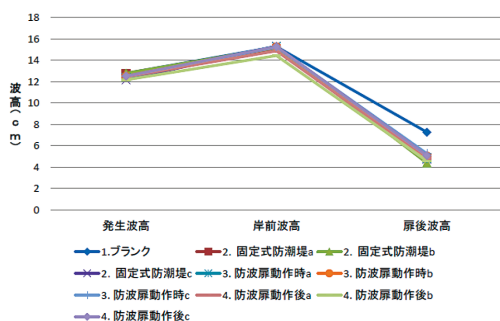


図10 防波扉波高低減データ（発生波高13 cm, 防潮堤高さ15 cm 時）

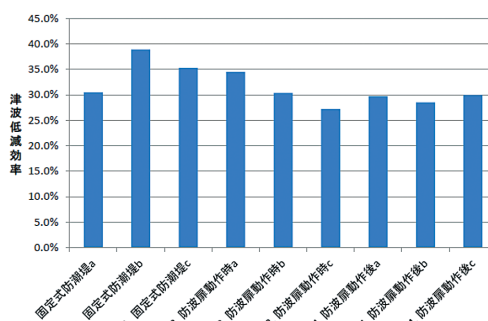


図11 津波低減効率相違（発生波高13 cm, 防潮堤高さ15 cm 時）

も動作後も装置背後の最大波高は、ほぼ同程度である。そこで、各条件における津波低減効果を図11に示す。

同図から、「固定式防潮堤構造」、「防波扉動作時」、「防波扉動作後」のそれぞれの津波低減効率は、同じ条件での実験でも多少のバラツキが認められるものの、傾向としてこの順番で津波低減効果が低下していると判断され、その内容を平均値として評価すると、表6のような結果となる。

表6 防波扉の平均津波低減効率

No.	設定内容	平均津波低減効率
3-1~3-3	固定式防潮堤構造	34.9%
2-1~2-3	防波扉小動作時	30.7% (固定式防潮堤構造の約88%)
2-4~2-6	防波扉小動作後	29.4% (固定式防潮堤構造の約84%)

4.2 防波扉の津波低減効果のまとめ

防波扉の津波低減設備としての効果を下記のように確認した。

- ①防波扉は、「浸水に対して自動的に構造体の一端が浮き上がり、所定の位置まで立ち上がり、防潮堤として機能する」ことが確認された。
- ②防波扉が、実験波が到達してから防潮堤として立ち上がるのは瞬時であり、移動にかかる時間は1秒以下であった。このことから、この立ち上がりにかかる時間による津波低減効果への影響は殆どないことが分かった。
- ③防波扉の津波低減効果は、表3の条件下では、動作時の効率は、固定式防潮堤の約88%に相当し、動作後の効率は約84%になることが分かった。この低減効率が固定式防潮堤と比べると低いのは、防波扉が水密でないためであるが、両方ともに固定式防潮堤の津波低減効率の80%以上あり、ほぼ同等の津波低減効果を持つと考えられる。

一方、立ち上がる動作時と動作後で比較してみると、平均としてわずかではあるが動作時の方が高い。この動作時の防波扉が、構造体がずっと立っている動作後より高い津波低減効率を持つ理由としては、「動作時に防波扉が内部に浸水を取り込み、その取り込んだ水と防波扉自身の重量を波に持ちあげさせて、波の持つ移動エネルギーを消費する仕事をさせ、それが通過波高を低下させているが、動作後に立ったままの場合はそのような効果がない」ことが考えられる。

- ④防波扉の強度面に関して、防波扉の固定式サポートは実験波が強い時（発生波高が17 cmを超えた時）に大きく移動したり変形したりすることはあったが、防波扉本体は実験波が強い時でも変形することなく、安定して津波低減装置として機能した。このことから、防波扉の木造構造体は、その動作環境（波を一部逃がしながら、その波の中で立ち上がる）下で、この実験モデルのスケールでは、強度的な問題はないことが分かった。

しかしながら、実際の津波のスケールになる

と、強度面での課題が出てくると推察されるため、より実際の津波に近いスケールでの実験を行い、詳細な圧力、必要な強度データを採取し、対策を講じていく必要がある。

- ⑤構造体を支えるベースは、フラットバー（3 mm 厚み×30 mm 幅×90 cm 長さ）を井文字に組んでボルトで止めたもので、陸上部の地表面に置いて、前後に構造体性能確認の邪魔にならないように重しを置いて、波を受けた時に大きく流されないようにした。構造体を防潮堤として機能する位置に止める固定式サポートは、L字鋼アンゲル材を地表面に設置したフラットバーにL字型ジョイントを介してボルト接続し立てたものである。扉体のベースへの接続部分及び回転のヒンジ部分は、フラットバーと扉体の枠軸、または扉体の枠軸同士を0.5 mm 径のステンレスワイヤ（もしくはテグス）の2重のリングで繋いだものである。今回の実験のスケールでは、これらの当初から考えていた構造及び接続で強度的には問題なく、津波低減効果に影響を与えることはなかった。しかしながら、実際の津波のスケールになると、強度面での課題が出てくると予想されるので、より実際の津波に近いレベルでの実験を行い、詳細な強度データを採取し、対策を講じていく必要がある。

- ⑥91 cm 幅の30 cm 高さ防波扉は10 cm の波では立ち上がらなかったが、13 cm の波で立ち上がったことから、91%幅の防波扉はその高さの40%程度の高さの波で立ち上がることが判明した。一方、98%幅30 cm 高さの防波扉は、10 cm の波で立ち上がった。

4.3 防波門の津波低減効果のまとめ

防波門は、防波扉の津波低減設備としての効果を下記のように確認した。

- ①防波門は、「浸水に対して自動的に構造体全体が浮き上がり、所定の位置へ移動し防潮堤として機能する」ことが確認された。常に構造体の垂直が保持されている構造であるので、浸水が取まっても防潮堤として機能する位置に留まり安定した津波低減効果を発揮した。

表7 防波門の津波低減効率

No.	設定内容	発生波高	岸前波高	門後波高	低減効率
4-4	防波門小 (15cm) 動作後	12.89cm	15.59cm	4.34cm	35.1%
3-3	固定式防潮堤 (15cm 高さ)	12.18cm	15.34cm	4.74cm	35.3%

- ②防波門は、波が到達してから最終的な位置まで移動するのにかかる時間は1秒程度と短いので、長周期の津波に対して、特に後続部分に対して、津波低減効果を発揮すると考える。

- ③津波低減効果は、防波門（91%幅）が動作した後で、ある条件下ではあるが、固定式防潮堤とほぼ同等の津波低減効果があることが分かった。

防波門については、今回の実験で傾向が掴めたが、更に複数のデータをとって再現性を確認しながら、評価・検討を行う必要がある。

- ④防波門の強度面に関して、固定式サポートは実験波が強い時（発生波高が17 cm を超えた時）時に大きく移動したり変形したりすることはあったが、防波門本体は強い実験波の時でも変形することなく、安定して津波低減装置として機能した。このことから、防波門の木造構造体本体は、その動作環境（波を一部逃がしながら、その波で移動し防潮堤として機能する）下で、この実験モデルのスケールでは、強度的な問題はなかった。しかしながら、実際の津波のスケールになると、強度面での課題が出てくると予想されるので、より実際の津波に近いスケールでの実験を行い、詳細な圧力、必要な強度データを採取し、対策を講じていく必要がある。

- ⑤構造体を支えるベース部分や、サポートや、扉体のベースへの接続部分及び回転のヒンジ部分は、防波扉と同様であって、今回の実験のスケールでは、これらの当初考えていたベースで問題なく対応できた。しかしながら、実際の津波のスケールになると、強度面での課題が出てくると推定されるので、より実際の津波に近いスケールでの実験を行い、詳細な強度データを採取し、対策を講じていく必要がある。

5. 結言

防波扉と防波門は、以下の3つの特徴を持つことが確認できた。

- (1) 木製構造物の浮力を利用して越流した波に対して自動的に動作し、防潮堤として機能する。
- (2) 通常時に設置されている位置から防潮堤として機能する位置まで移動するのにかかる時間は約1秒以下と短く、動作後の波高低減効率は、固定式防潮堤の80%以上相当である。特に防波扉は動作時の低減効率が動作後よりも良く、全体を通して80%以上を保持できる。
- (3) これらの木造構造物は、今回のモデル実験スケールでの動作環境で強度的な問題はなく、津波低減に役立つ。

今後の課題としては下記が挙げられる。

- (1) サポートの適正な強度を確認して適用すること。
- (2) 高い津波にも対応できるように、多段式のシステムが安定して動作するようなメカニズムを確立し、性能確認をすること。
- (3) より実際の津波に近いスケールでの実験を行い、構造体にかかる詳細な強度データを採取し、対策を講じていくこと。

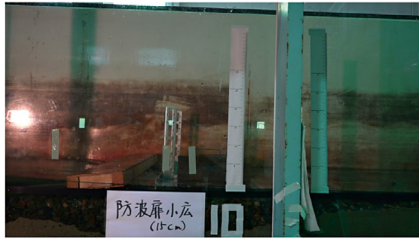
参考文献

- 1) 新里英幸・木村雄一郎・仲安京一・藤田 孝：波浪中フラップゲート式可動防波堤の平面水槽実験，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.B2-65, No.1, pp.851-855, 2009.
- 2) 木村雄一郎・新里英幸・仲安京一・安田誠宏・間瀬 肇：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，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.B2-65, No.1, pp.806-810, 2009.
- 3) 東 良慶・伊藤忠男・半田英明・山敷 亮・平石哲也・菅野高弘：流起式可動防波堤の小型模型による性能評価水理実験，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.70, No.2, pp.I_951-I_955, 2014.
- 4) 増田光弘・藤田慶彦・浜田英外・南 清和：津波被害低減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，第131号，pp.119-124, 2014.
- 5) 藤田慶彦・増田光弘・浜田英外・南 清和・岸拓真：粒子法を用いた可動式防波扉の津波被害減災性能推定に関する基礎的研究，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第19号，pp.579-582, 2014.

(投稿受理：平成27年7月26日
訂正稿受理：平成28年5月31日)

要 旨

木製構造物を採用し防潮堤として機能する新しいコンセプトの津波災害を低減する装置を開発した。この装置では、津波が越流する際（電気信号や電力などを使うことなく）、木材の浮力を使って自動的に動作し、防潮堤として機能する。このために、ある程度の津波の陸側への浸水を許すが、主として後続の津波の浸水を抑止するものである。今回の実験結果から、防波扉タイプの津波低減設備は、波の越流に対して自動的に動作して防潮堤として機能すること、固定式防潮堤による波高低減効果に対して、その80~90%程度の津波低減効果があることを示した。また、これらの木製構造物が本実験のスケールでの実験波の浸水に対して、津波低減設備として性能を維持するのに適切な強度を保持していることを確認した。防波扉は、屏風のように多段式に重ねて設置できる（例えば3m高さの防波扉を5段で15m高さの防潮堤に相当させる）ので、頻度が少ないが大幅に高いレベル2津波に対する低減設備として適用できると想定している。



(1) 孤立波到達前



(6) 孤立波到達後(約1.13秒)



(2) 孤立波到達直後(約0.43秒)



(7) 孤立波到達後(約1.30秒)



(3) 孤立波到達後(約0.56秒)



(8) 孤立波到達後(約1.47秒)



(4) 孤立波到達後(約0.67秒)



(9) 孤立波到達後(約1.80秒)

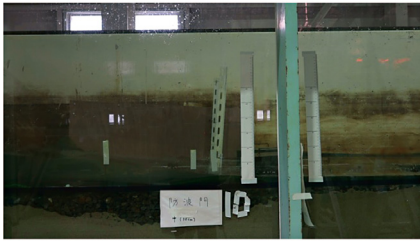


(5) 孤立波到達後(約0.86秒)

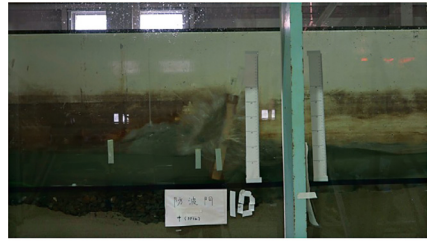


(10) 孤立波到達後(約2.69秒)

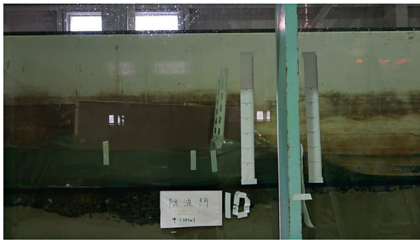
写真1 防波扉動作連続写真(実験番号: No.1-8)(発生波高10 cm; 防波扉高さ15 cm時)



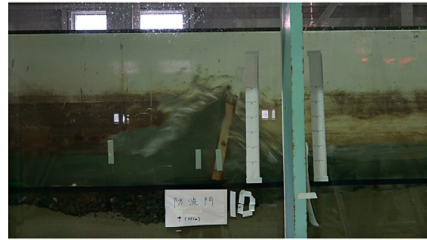
(1) 孤立波到達前



(6) 孤立波到達後(約1.17秒)



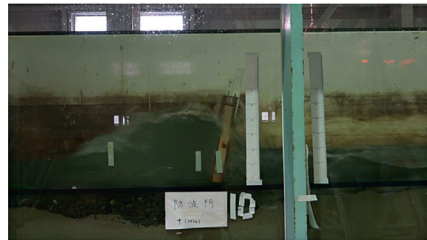
(2) 孤立波到達直後(約0.43秒)



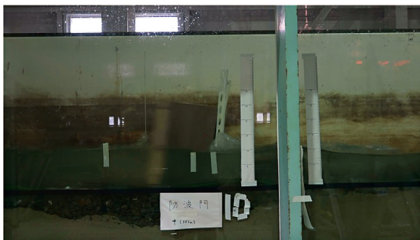
(7) 孤立波到達後(約1.23秒)



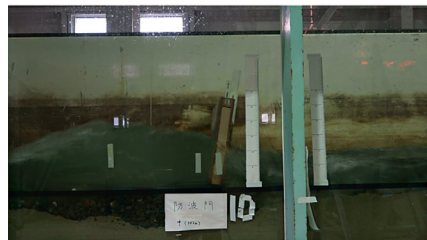
(3) 孤立波到達後(約0.60秒)



(8) 孤立波到達後(約1.40秒)



(4) 孤立波到達後(約0.80秒)



(9) 孤立波到達後(約1.56秒)



(5) 孤立波到達後(約1.10秒)



(10) 孤立波到達後(約1.90秒)

写真2 防波門動作連続写真(実験番号: No.4-6)(発生波高10 cm; 防波門高さ30 cm時)