

# 多重防波堤による津波の減勢効果

林 宗市<sup>1</sup>・福本 淳司<sup>1</sup>・米山 望<sup>2</sup>

## Dissipating Effect of the Tsunami by Multiple Breakwaters

Soichi HAYASHI<sup>1</sup>, Junji FUKUMOTO<sup>1</sup> and Nozomu YONEYAMA<sup>2</sup>

### Abstract

If a big earthquake occurs, the associated tsunami will strike shore and cause tremendous damage to towns and people near the coast. But, it is afraid that the construction of a huge breakwater to mitigate tsunami damage have an adverse effect on aquaculture industry and inshore fishery.

The purpose of this study is to estimate the effect of multiple breakwaters installed offshore in parallel by applying a three dimensional numerical simulation model for the water behavior.

The placement of the multiple breakwaters permits that ships can go in and out, and daily life has little inconvenience, and marine products can increase under natural environments.

As a result, it is found that the energy of tsunami decays as the wave is divided into right and left by the first breakwater and hits the next breakwater.

キーワード：津波, 多重防波堤, シミュレーション

Key words: tsunami, multiple breakwaters, simulation

### 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震津波は、20 m を超える津波が約200 km にもわたって東北地方沿岸部で観測され、歴史上まれにみる甚大な被害をもたらした。三陸では過去にも

同様の巨大津波が発生した記録がある<sup>1)</sup>。しかし、これまでは数十年から百数十年に1回程度の頻度で発生する比較的発生頻度が高い津波を想定した対策が中心であった。今回の東北地方太平洋沖地震津波に対しても、既設の堤防により、水位低減

<sup>1</sup> 日本 SGI 株式会社  
SGI Japan, Ltd.

<sup>2</sup> 京都大学防災研究所  
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

本報告に対する討議は平成 30 年 11 月末日まで受け付ける。

や津波到達時間の遅延、海岸線の維持などで一定の効果は見られたが、限界も明らかとなった。しかしながら、発生頻度は低い(数百年から千年に一回程度の頻度)が甚大な被害をもたらす最大クラスの津波(レベル2津波)にも効果のある巨大堤防の構築は、景観や漁業環境への悪影響も容易に想像される。そのため、「災害に上限なし」という認識のもと、最大クラスの津波については、被害を最小限に抑える「減災」の考え方を軸に、対策が検討されつつある。

本稿ではレベル2津波を減勢させるための有効な方法の1つとして、海中に設置する多重防波堤の活用を提案する。これは、津波を確実に防ぐわけではないが、その勢いを大幅に減じることとなる。

以下では、多重防波堤の減勢メカニズムを検討した後、シミュレーションにより、防波堤の数や高さおよび長さ、津波の波形を変化させて、その効果を定量的に検討した。

## 2. 津波挙動の数値解析手法

多重防波堤の周辺を流れる津波の挙動は、水平方向の流れだけでなく、鉛直方向の流れも無視できない。そこで、減勢の効果は、三次元で津波の流れを予測評価できる、三次元自由液面解析コード<sup>3,4)</sup>を用いて検討した。このコードは、Navier-Stokes 方程式をもとに、非圧縮性流体乱流解析を直交座標系で行うものである。この解析法を用いた結果は、水理実験結果をよく再現しており、また北海道南西沖地震津波の遡上現象の解明にも大きく貢献したことが知られている<sup>4)</sup>。

## 3. 多重防波堤に期待される効果

防波堤は、釜石湾の湾口防波堤にみられるように、船の出入りや漁業環境の悪化を考慮して開口部が設定されるが、この開口部により津波の減勢効果が減じられてしまう。そこで、我々は、この問題を解決するための方法の1つとして、開口部のある防波堤を複数配置することで、波が開口部を通過後、直ちに左右の方向に分かれて、その波が次の防波堤に当たることにより減勢効果が向

上すると考えた。この場合、幾重にも並ぶ防波堤開口部の位置は常に同じでよく、船の出入りには不便が少ないという利点もある。

図1には、二重防波堤の場合に、上空から海面を見下ろした場合の水流の様子を概念的に示す。茶色部分は防波堤を、青色は海水を、矢印は海水の流れを示す。右側からの津波が最初の防波堤にあたり、開口部からの水流が次の防波堤にあたるのが期待される。

この考えの正当性について三次元自由液面解析コードを用いて様々な条件下で定量的に評価し、その効果について検証する。

## 4. 多重防波堤の減勢効果の検討

例として、二重防波堤の場合のモデルを示す。茶色部分は海岸及び防波堤、青色は海水であり、図2(a)は上面図を、図2(b)は側面図を示す。図2(a)の上端及び下端は共に側方境界を示す。また、側方境界および防波堤の境界条件は、すべてフリースリップ条件とする。防波堤間の水路の幅を $W$ 、防波堤と側方境界間の水路の幅を $W/2$ とすることで、周期性の導入の結果、防波堤が等間隔で並ぶモデルを作ることができる。このモデルは長い海岸線に沿った場合に対応する。また、図2は二重防波堤を示したが、一重もしくは多重などの様々なモデルに対しても検討した。

計算を簡単にするため、防波堤は幅 $D$  20 m、

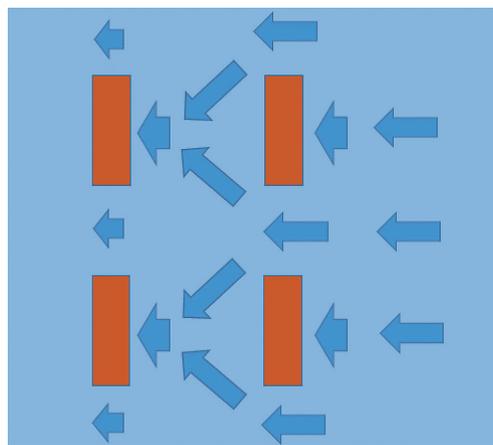


図1 二重防波堤による減勢効果の概念図

長さ L 60 m の長方形とする。また、海岸の勾配は沖方向に 10 m 進むと 1 m 下がる階段状モデルを基本形に選んだ。なお、計算メッシュサイズは縦・横・高さはすべて 1 m とした。

波は、半周期の正弦波 (波高  $\times \sin(\alpha) : \alpha = 0 \sim \pi$ )、波高 7 m を基本とした (図 3 (a))。また、比較のために、正弦波の頂点からは波高一定とする波 (図 3 (b)) も用いた。

波は沖から海岸に向かって移動した後、海岸を上昇し、数十秒の後止まり、以後沖方向に戻る。波が最も海岸を上昇した時の高さ (遡上高) を比較することで、防波堤の効果を評価することとした。

#### 4.1 防波堤のない場合

最初に防波堤の無い海岸で正弦波の遡上高のシミュレーションを行った。図 4 は正弦波の波高に対する遡上高をプロットしたものである。ほぼ直線的に上昇し、次式で示すように勾配はおよそ 2.5 となった。防波堤の設置により、遡上高がどれほど減少するかを調べることで、防波堤の効果を見積もることができる。

$$\text{遡上高} \approx 2.5 \times \text{波高} \quad (1)$$

#### 4.2 防波堤の高さの検討

防波堤の高さはどの程度が望ましいかを検討した。表 1 には、水路の幅 W が 10 m の一重の防

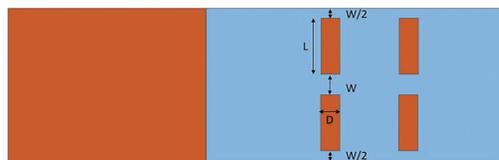


図 2 (a) 二重防波堤上面図 (W : 水路の幅, D : 防波堤の幅, L : 防波堤の長さ)



図 2 (b) 二重防波堤側面図 (H : 防波堤の高さ)

波堤に対して、波高 7 m の正弦波が到達した場合についてシミュレーションした結果を示す。防波堤の高さが 10 m までは遡上高は抑えられるが、それ以上では遡上高は一定 (9 m) になる。15 m では防波堤を越さない。したがって、このシミュレーションで設定した条件の場合、7 m の波高に対しては防波堤の高さが 10 m 以上であることが望ましい。

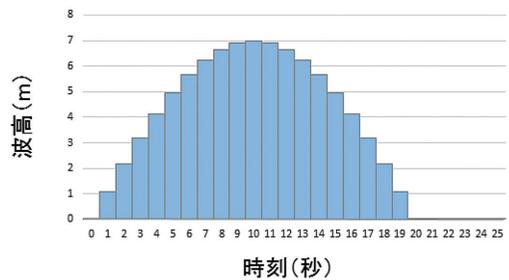


図 3 (a) 津波形状 : 半周期の正弦波

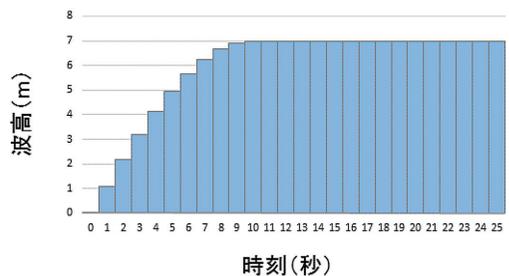


図 3 (b) 津波形状 : 平坦部を含む正弦波

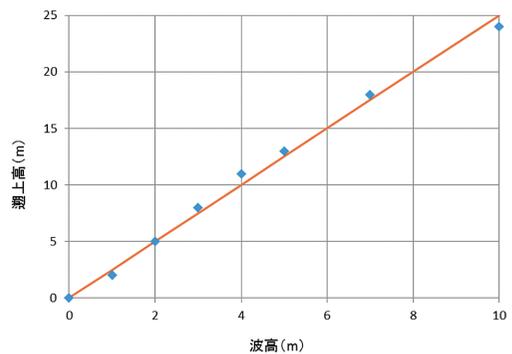


図 4 波高と遡上高

表1 防波堤の高さ  $H$  (m) の変化による遡上高。  
一重防波堤, 水路の幅  $W$  10 m。

防波堤の高さ $H$	遡上高	説明
0	17	波が防波堤を越す
5	13	波が防波堤を越す
7	12	波が防波堤を越す
10	9	波が防波堤を越す
15	9	波が防波堤を越さない
20	9	波が防波堤を越さない

### 4.3 多重防波堤の効果

図2に示したように、海岸に対して平行に防波堤を設置し、防波堤の間隔は60 m とする。図2 (a)の上端と下端は側方境界を示す。防波堤の水路の幅  $W$  の間隔を、防波堤と側方境界の間は  $W/2$  の間隔を空け、断続的に無限に続くモデルを用いた。

表2に、波高が7 m、海面上の防波堤の高さ  $H$  が一定 (15 m)、水路の幅  $W$  が0, 10, 20及び40 mの各場合に対する一重、二重、三重及び五重防波堤での遡上高を示す。このとき、防波堤の設置水深は、一重の時7 m、二重の時6 m および14 m、三重の時4 m、9 m および14 m、五重の時3 m、11 m、19 m、27 m および35 mである。なお、水路の幅  $W$  が0の場合は、防波堤が無限につながっているモデルである。水路の幅  $W$  が10, 20, 40の場合の防波堤の長さ  $L$  はそれぞれ、70 m, 60 m、及び40 mとなる。この結果から、列数が多いほど、水路の幅  $W$  が狭いほど、防波堤による減勢効果が大きいことが分かる。また、防波堤が二重かつ防波堤の水路の幅が10 mの場合は遡上高が5 mとなる。これは式(1)を参照すると波高7 mの津波が波高2 mの津波に減少したことに相当する。その他の場合も同様に式(1)を用いて、防波堤による効果を評価することができる。

二重防波堤かつ防波堤の水路の幅  $W$  が20 mの場合に16秒経過時の海面の形状(図5 (a)および図5 (b))及び水面下3 mにおける圧力(コンター)および速度  $V$  (矢印)を図5 (c)に示す。沖側の防波堤の開口部を通過した海水は両側に渦が発生し、分かれて進行した後岸側の防波堤の中央に当たり、上方に打ち上げられる。33秒通過後では再

表2 防波堤の列数と水路の幅  $W$  (m) の変化による遡上高 (m)。防波堤の高さ  $H$  15 m。

水路の幅 $W$	一重防波堤	二重防波堤	三重防波堤	五重防波堤
0	0	0	0	0
10	9	5	4	3
20	14	10	9	6
40	17	15	14	13

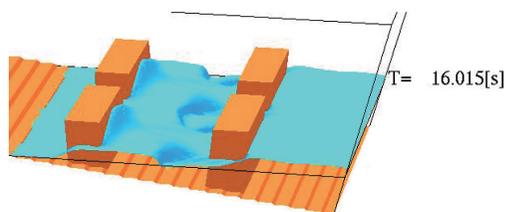


図5 (a) 二重防波堤 ( $W = 20$ ) 16秒経過時の海面図 (横から見下ろした場合)

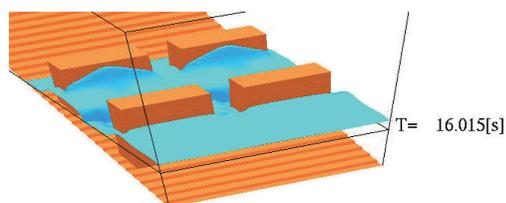


図5 (b) 二重防波堤 ( $W = 20$ ) 16秒経過時の海面図 (やや沖から見下ろした場合)

び防波堤背後の赤く丸で囲った部分に集まるのが見られる(図5 (d))。

### 4.4 波の形の検討

これまで波の形には半周期の正弦波(図3 (a))を用いたが、比較のため、長周期の波を想定して、正弦波の頂上に達した後、その高さを一定に保ったモデル(図3 (b))についても検討した。

表3には、防波堤が一重、二重、及び三重の場合に、波の形状を変えた場合の遡上高を示した。

どちらの波の場合でも、遡上高に大きな違いがみられなかったため、今回の計算では、すべて半周期の正弦波にて計算を行った。

なお、第二波以降は、波の形によって遡上高に

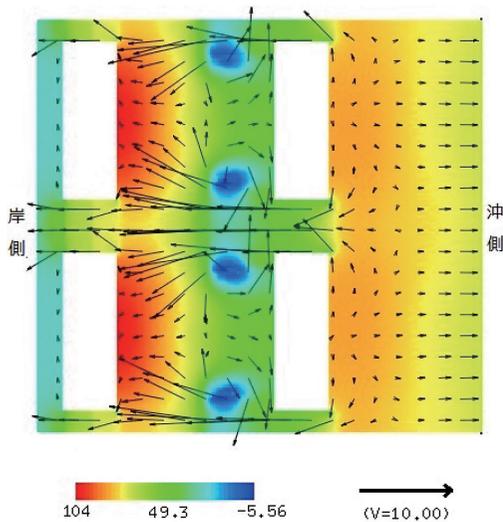


図5 (c) 二重防波堤 (W=20) 16秒経過時の圧力(コンター) [単位: kPa] および速度 V (矢印) [単位: m/s]

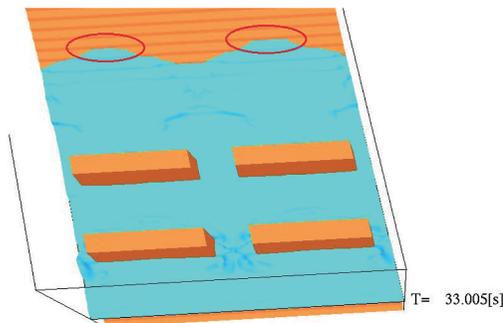


図5 (d) 二重防波堤 (W=20) 33秒経過時の海面図 (防波堤背後の赤く丸で囲った部分に集まる)

違いが生じる可能性は考えられる。

#### 4.5 防波堤の長さの検討

これまでの、防波堤の長さ  $L$  を60 m に固定した。ここでは、防波堤の水路の幅  $W$  は一定に保ったまま、防波堤の長さ  $L$  を変えるモデルについて検討した。表4には二重防波堤の場合に、防波堤の長さ  $L$  を変えた時の遡上高を示した。

防波堤の水路の幅  $W$  と同時に防波堤の長さ  $L$  が長いほど、減勢効果は大きくなる。防波堤の無

表3 波の形状の違いによる遡上高 (m)。防波堤の高さ  $H$  15m, 防波堤の水路の幅  $W$  20 m。

波の形状	一重防波堤	二重防波堤	三重防波堤
半周期の正弦波	14	10	9
平坦部含む正弦波	14	10	9

表4 防波堤の長さ  $L$  (m) の効果。防波堤の水路の幅  $W$  20m, 防波堤の高さ  $H$  15 m。

防波堤の長さ $L$	60 m	110 m	180 m
遡上高	10 m	7 m	5 m

い時遡上高が18 m あった波高7 m の津波は、防波堤の長さ  $L$  が180 m の防波堤を設置した場合、図4を参照すると、波高2 m の津波に減勢したことになる。

#### 5. まとめ

最初に、防波堤がない場合のシミュレーションを行い、一様勾配海岸の場合には波高と遡上高の間には線形性の関係があることを見出した。また、この関係から、防波堤の設置がもたらす効果を、津波の波高の減少という観点で評価することができる。

次に、開口部を持つ防波堤に対する津波シミュレーションを行い、その防波堤を多重とすることで津波の減波効果が高まることを定量的に確認した。

二重防波堤における圧力および流速の解析結果から、当初予想された減勢効果のシナリオ (開口部からの水流が次の防波堤に衝突する) についても定量的に確認できた。

さらに、防波堤の数、開口部の水路の幅、防波堤の高さ、津波の波形、防波堤の長さを変えることで、津波の減勢効果がどのように変わるのかについても定量的に評価することができた。

今回は、表面が平らなモデルを用いたが、漁礁に適した石積や消波ブロックなどを組み込む事により、更なる減勢効果が期待できるであろう。

以上、本研究では、開口部の広い港での減勢効果など今後多くの課題が残されているが、今回は主として平坦な海岸に沿って、開口部が狭くても日常生活に不便が少なく、魚介類、海藻類などが自然な環境で増産できることが期待できる多重防波堤の活用を提案した。防波堤を多重にすることにより水流の強弱の異なる環境ができ、多種の水産資源が期待される。防波堤によって高波の減勢も期待でき、砂浜の保全が期待されるので、海水浴、潮干狩り、魚釣りにも適した環境を自然のサイクルの中に取り込む豊かな里海が造成されることが期待される。

## 参考文献

- 1) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ <http://www.coastal.jp/ttjt/> (最終閲覧日：2017年6月15日)
- 2) 国土交通省：平成23年度国土交通省白書 <http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h23/index.html> (最終閲覧日：2017年6月15日)
- 3) 米山 望・守屋祥一：VOF法を用いた自由液面の数値解析手法，水工学論文集，第39巻，1995.
- 4) 米山 望・松山昌史・田中寛好：土木学会論文集：1993年北海道南西沖地震津波における局所遡上の数値解析，No.705/II-59，139-150，2002.

(投稿受理：平成29年6月26日)

訂正稿受理：平成29年11月28日)

## 要 旨

大きい地震にともなう津波は海岸に押し寄せ海岸近くの町や人々に甚大な被害をもたらす。しかし、津波の被害を軽減するための巨大堤防の構築は養殖業や沿岸漁業に悪影響をもたらす。

この研究の目的は、三次元数値解析シミュレーションにより、海岸に平行に設置された多重防波堤の効果を評価するためである。

多重防波堤の設置により、船の出入りができ、日々の生活の不便が少なく、自然環境の下で水産物を増やすことができる。

結果として、最初の防波堤を通過した波は左右に分かれ次の防波堤に衝突することで、津波のエネルギーが減衰することを見出した。