

# リアス式湾における津波防波堤の効果的な配置法に関する研究

中村 孝幸<sup>1</sup>・山先 達也<sup>2</sup>・ニエン・セン・ラット<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 愛媛大学大学院 理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)

E-mail:nakamura@cee.ehime-u.ac.jp

<sup>2</sup>愛媛大学大学院 理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)

E-mail:Yamasaki.tatsuya.07@cee.ehime-u.ac.jp

<sup>3</sup>愛媛大学大学院 理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番)

E-mail: nzlatt@gmail.com

東北地方太平洋沖地震による大津波は、多数の死者・行方不明者や家屋の倒壊など未曾有の災害を引き起こした。この直接的な原因の一つとして、リアス式湾における津波の増幅現象があげられる。従来、湾内へ侵入する津波高さを軽減するため、突堤形式の津波防波堤が湾口部などに建設されてきたが、今回の津波によって破壊されるなど、機能的な側面を含めて、その有効性が疑問視されようになっている。既に著者らは、港内係留船の長周期船体動揺の低減を目的として、湾内へ侵入する超長周期波を制御するための港口部大型共振装置を提案し、その効果などについて明らかにしてきた。ここでは、より長波長の波を制御対象にできるように改良された、新形式の共振装置の有効性について検討すると共にそれから派生したより簡単な構造の装置の効果を大船渡湾を対象にして検討する。

**Key Words** : tsunami, ria bay, harbor response, resonator, breakwater

## 1. まえがき

岩手県大船渡湾には、湾内津波高の低減を目的として湾口部に津波防波堤が建設されていた。本研究は、数値実験により、津波防波堤の平面的な配置、特にその開口部形状に着目して、より高い津波の制御効果が得られる平面形状について明らかにする。具体的には、様々な揺り返し周期を持つ津波に対して、共振装置の概念を導入して、湾内共振の増幅度が最も低くなる津波防波堤の開口部形状を検討する。

既に中村ら<sup>1)</sup>、Poonら<sup>2)</sup>は、港内係留船の長周期船体動揺の低減を目的として、湾内へ侵入する超長周期波を制御するための港口部大型共振装置を提案している。この共振装置は、入射する波エネルギーを装置内でトラップし、湾内への透過波のエネルギーを低下させるものである。しかし、このような矩形共振装置では、長周期の条件になると波浪低減効果が減少する傾向が見られることなども知られている。そこで、より長波長の津波をも制御対象にできるように、新形式の共振装置を提案し、その有効性について研究を進めてきた<sup>3)</sup>。ここでは、津

波防波堤の開口部形状として、従来の新型共振装置の研究成果を参照すると同時に、現地への適用性を考慮して、より単純化された平面形状の津波防波堤についても検討対象とした。

## 2. 共振装置の効果

共振装置は波浪が侵入する湾口部へ図-1 (a)に示すような矩形型の堤体を設置することによって侵入する波を矩形型の水域へトラップし、湾外側へ波浪を反射させる仕組みである。しかし、このような矩形型の共振装置では長周期の波に対して湾内静穏化効果を十分に発揮できないことが報告されている<sup>1)</sup>。前回、提案した新型共振装置は、図-1 (b)に示すようにその矩形型共振装置に部分的に平行堤を設けたものである<sup>3)</sup>。平行堤を設けることで、長周期波が共振装置と平行堤との間でトラップされ、湾内側への侵入を低減する仕組みである。図-2は港内係留船の長周期動揺の軽減を目的として提案された各堤体による波浪低減効果を示す。図中では、横軸に現地波の周期  $T(s)$ 、縦軸に透過波高の平面的な  $rms$  値と入射波高の比  $Ktrms$  を示す。この図より平行堤を設けること

で突堤形式の堤体や矩形共振装置型堤体と比較して静穏化効果が改善されることがわかる。

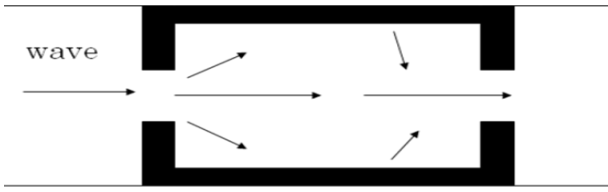


図-1(a) 矩形共振装置

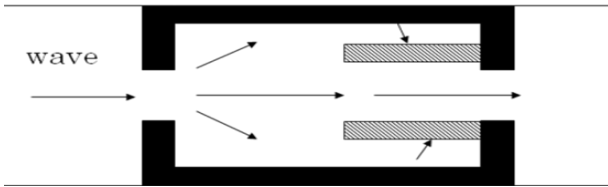


図-1(b) 新型共振装置

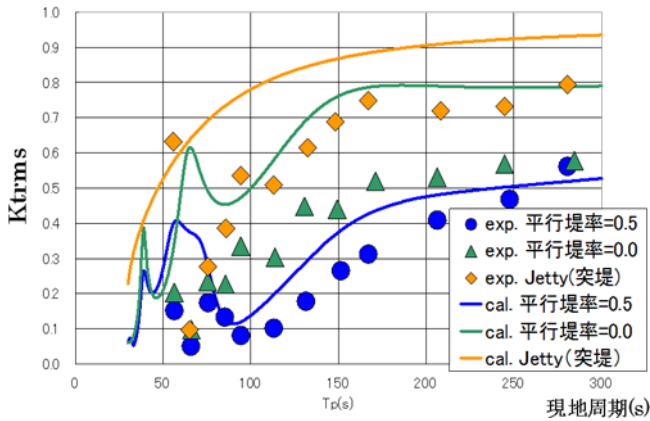


図-2 各種堤体による透過波の低減効果<sup>3)</sup>

### 3. 従来の結果と現地のモデル化

#### (1) 岩手県大船渡湾における従来の研究結果

次に津波防波堤の効果的な配置法について検討する。岩手県大船渡市にある大船渡湾は、1960年のチリ地震津波、1968年の十勝沖地震津波によって大きな災害が生じている。そこで、チリ地震津波の災害を契機に大船渡湾口部に、総延長740mの津波防波堤が建設されていたが、今回の大震災によって倒壊している。堀川ら<sup>4)</sup>は、この建設されていた津波防波堤の効果を検討している。対象とした大船渡湾の防波堤及び津波が測定された潮位観測所の位置を図-3に示す。この研究では、1968年の十勝沖地震津波に対する定常応答についての記録を用いて防波堤の効果が調べられており、その結果が図-4中の防波堤設置のケースに相当する。ここで、横軸は津波に含まれる定常波の周期  $T$ 、縦軸は波高増幅率  $M$  を示す。なお、防波堤なしの結果は、高橋ら<sup>5)</sup>の研究によるもので、津波とは異なる気象擾乱によるセイシュの観測結果に相当する。

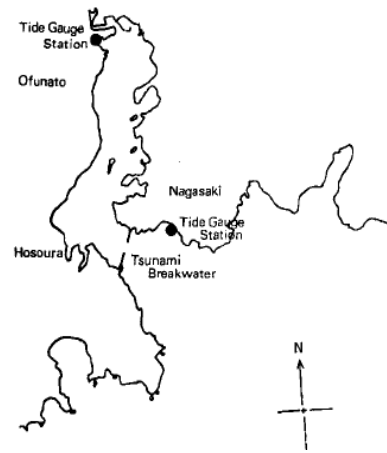


図-3 大船渡湾の防波堤及び潮位観測所の位置<sup>4)</sup>

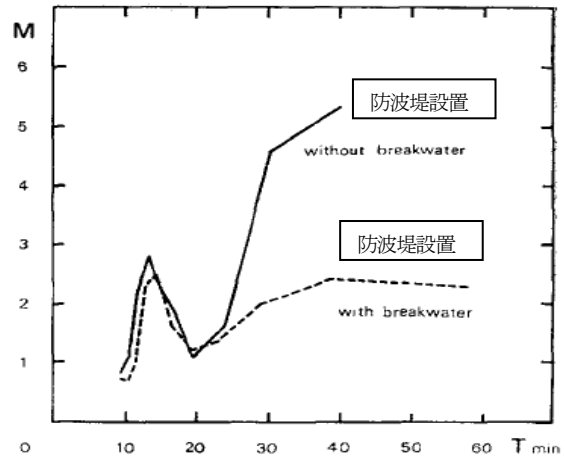


図-4 湾奥での波高増幅率<sup>4)</sup>

この結果によると、湾奥波高は、周期約13分程度の第1次共振点では差異が見られず、防波堤の効果はほとんど見られない。一方、第2次共振点に相当する約40分程度の長周期の条件下では、湾奥の最大波高は、防波堤の設置により50~60%程度減少することなどが示されている。そして、堀川ら<sup>4)</sup>は、単純な矩形湾を対象とした実験と理論による検討も行っており、その結果に基づき、第2次共振点に相当する波高増幅率の推定には、防波堤開口部でのエネルギー損失の影響が重要になることなども報告している。なお、この研究の詳細については、堀川らの文献<sup>4)</sup>を参照していただきたい。

#### (2) 数値計算で想定した大船渡湾のモデル化

数値計算を行うにあたり、まず大船渡湾の現況のモデル化を行った。図-5は大船渡湾の沿岸地形および単純化された地形モデルを示す。この地形モデルは海上保安庁から発行されている海底地形デジタルデータ<sup>6)</sup>を基本データとして用いた。

湾における津波の数値計算は、水深変化と任意平面形状の港湾境界を対象として、陸域境界や島堤の反射率を任意に設定できる鉛直線グリーン関数法<sup>7)</sup>を用いた。このとき、海底地形は、棚形の水深変化で近似することに

#### 4. 大船渡湾の津波防波堤の平面配置案の検討

##### (1) 津波高分布及び平均津波高

ここでは、大船渡湾に建設されていた津波防波堤の有無による湾内の最大津波高などを数値計算により求め、堀川ら<sup>4)</sup>の結果と比較してみた。具体的には、来襲する可能性の高い周期 $T=300s\sim 3600s$ の範囲内の規則的な津波を対象にして波高分布を数値実験により検討した。

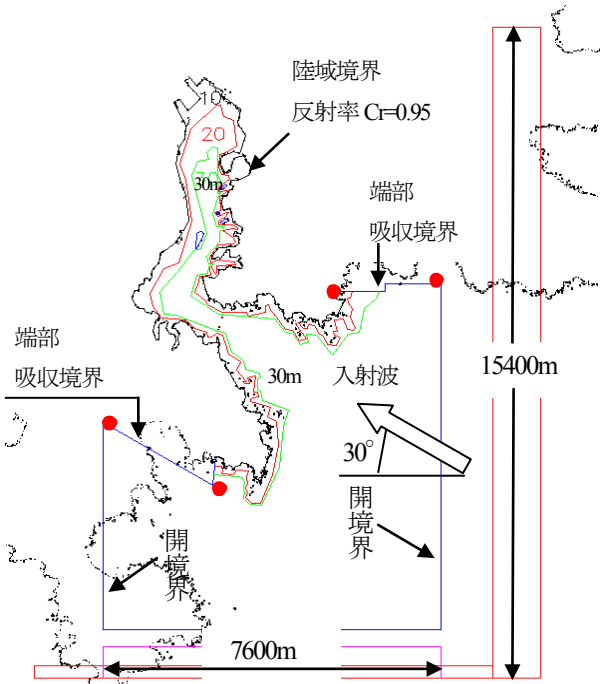


図-5 大船渡湾のモデル化

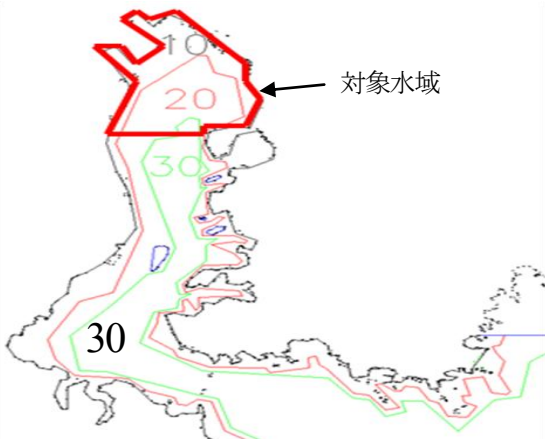


図-6 湾奥平均波高の算定のための対象水域

なり、ここでは、図中に示すように水深 10 m, 20 m, 30 m の 3 段階変化で近似した。

陸域境界の反射率  $Cr$  は、完全反射を含む複数の条件を採用した事前検討に基づき、最終的に堀川らの十勝沖地震津波に対する結果(図-4)との整合性が見られた  $Cr=0.95$  を採用した。算定では、図中に示すような複雑な地形や水深変化線の形状をなるべく正確に再現できるように、境界積分に用いる線素分長を 50m 程度として、離散化近似した。また、津波の入射方向は、図-5 中に示すように、危険側となる湾が開いている方向と一致するように設定した。なお、以下の検討では、湾奥での平均波高の算定のための対象海域として図-6 中の閉鎖線で示す水域を代表領域として用いた。

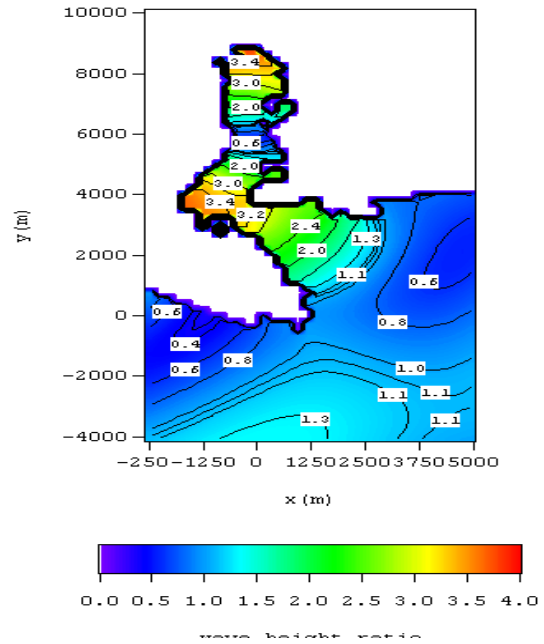


図-7 波高増幅率の分布(防波堤なし $T=850s$ )

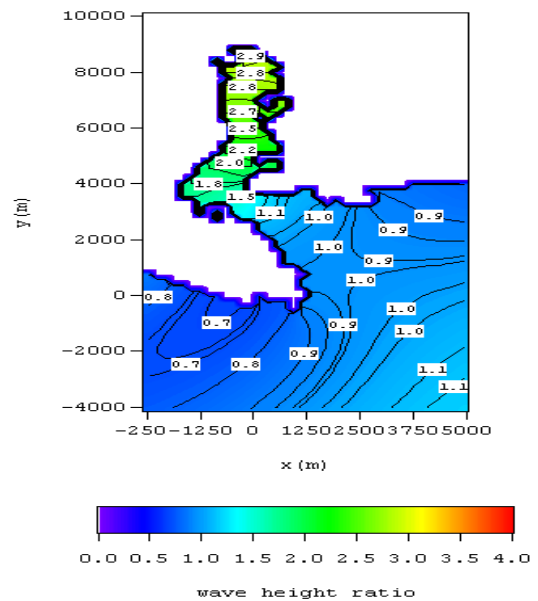


図-8 波高増幅率の分布(防波堤なし $T=2100s$ )

図-7~10は、大船渡湾口部に突堤形式の津波防波堤が設置されている状態と倒壊した後の湾口部に何もない状態の大船渡湾の波高分布の算定結果( $T=850s, 2100s$ )を示す。図-7と図-9は、周期 $T=850s$ の時の防波堤の有無による比較を示すもので、いずれも湾内の波面モードは湾口

部で腹, 湾の中間部で節, 湾奥部で再び腹になることなどが認められる. 防波堤を設けることで, 湾口部の沖側で波高が部分的に増加するなどの差異は見られるが, 全体的には堤体の設置の有無の影響はほとんど見られない.

一方, 図-8と図-10は, 波周期 $T=2100$  sの時の結果を同様にして示す. このときのモードは湾口部で節が形成され湾奥部にかけて腹が形成され増幅されていることがわかる. やはり, 堤体の設置の有無の影響はほとんど認められない.

図-11は, 突堤形式の津波防波堤の有無による湾奥の平均波高に着目した波高増幅率の算定結果の比較を示す. この図より, 両者とも波高増幅率のピークがほぼ

$T=850$ s(約15分)と $2000$ s(約34分)の時に現れていることがわかる. そして, 前述した堀川ら<sup>4)</sup>の結果と比較すると, 湾内共振点に相当する波周期はほぼ一致するものの, 突堤形式の防波堤では, 短周期の津波のみならず長周期の津波に対しても1割減程度とほとんど効果を示さない結果となった. このような差異については明確でないが, 防波堤開口部でのエネルギー損失によるものか陸域境界での浸水による低反射条件などによる影響ではないかと推定される.

事実, 図-4に示される防波堤の有無の影響の比較は, 入力となる長周期波の発生原因が異なり, 防波堤のない

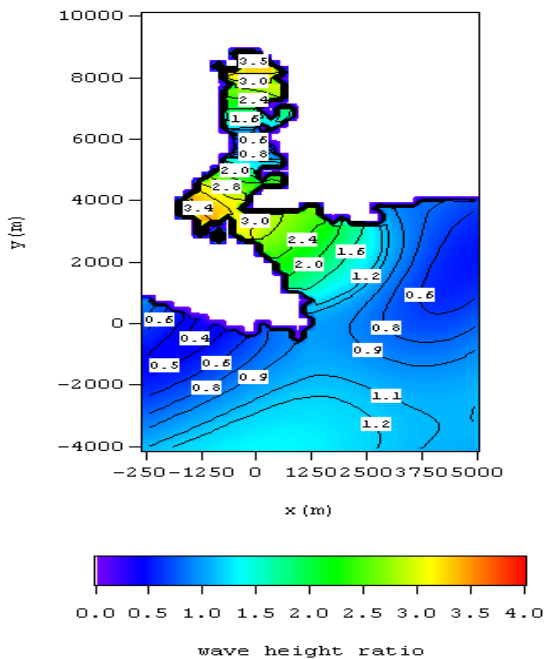


図-9 波高増幅率の分布(突堤形式 $T=850$  s)

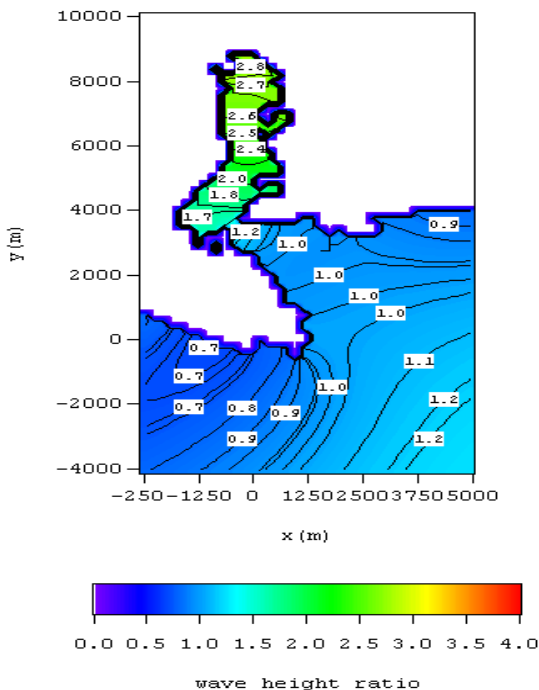


図-10 波高増幅率の分布(突堤形式 $T=2100$  s)

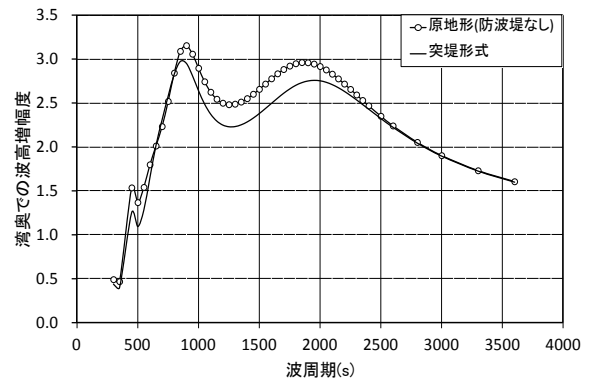


図-11 突堤形式湾口防波堤による湾奥波高増幅率の低減特性( $C_r=0.95$ )

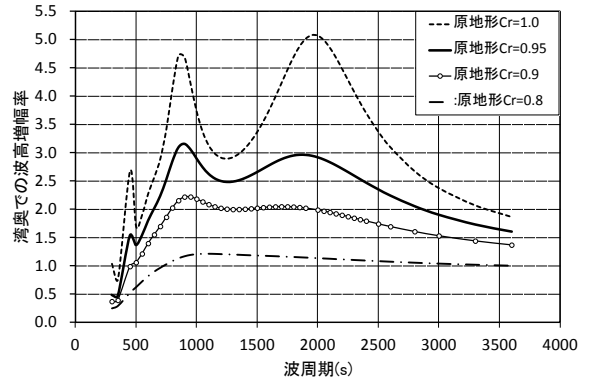


図-12 原地形での大船渡湾の湾奥における波高増幅率に及ぼす陸域境界反射率の影響

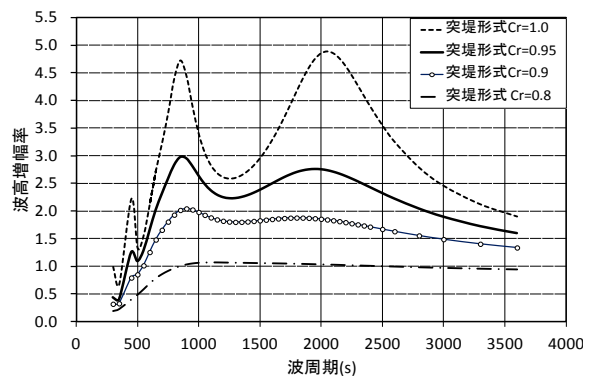


図-13 突堤形式の防波堤を設けたときの大船渡湾の湾奥での波高増幅率に及ぼす陸域境界反射率の影響

原地形では津波と異なる気象擾乱による観測結果であり、結果的に作用波高が低い陸域境界などでの損失が少なく、波高増幅率が増大したのではないかと推測される。

図-12, 13は、このようなエネルギー損失の影響を間接的に陸域境界の反射率の差異と仮定して、その影響について検討した結果を示す。各図は、それぞれ防波堤のない原地形と突堤形式の防波堤を設置したときの湾奥波高の増幅率に及ぼす陸域境界の反射率 $C_r$ の影響を検討したものである。これらの図から、陸域境界の反射率 $C_r$ を1.0から0.95へと、また0.95から0.9へと変化させることで、湾奥波高の増幅率は、有意に変化することが確認できる。

そして、これらの反射率の影響を概観すると、湾内の陸域境界の反射率を0.8程度に低減できれば、津波防波堤がなくても湾内での波高増幅率はかなり低く抑えることができることが分かる。ただし、超長周期の津波に対する反射率を低減することは現実的には難しいと考えられる。

(2) 各種堤体配置モデルによる波高分布及び平均波高

次に、湾口部に各種の共振装置型堤体を設置したときの波高分布を周期 $T=300s-3600s$ の範囲内の条件下で算定した。ここでは、前後突堤による共振水域を確保する必要がある矩形および新型共振装置では、図-14に示すように、一部の海域を仮想的に埋め立てたモデルとした。採用した港口部形状は、図-14に示すように、2組の突堤形式の堤体からなる矩形共振装置モデル、2組の突堤形式の堤体に平行堤を付加した新型共振装置モデル、新型モデルの沖側の突堤を除去して平面構造を簡素化したL型共振装置モデルに相当する。

これらのモデルの中で、静穏度に優れることが判明した、新型共振装置モデルとL型共振装置モデルについて、湾内波高分布の算定結果(周期 $T=850s$ )を図-15, 16に示す。

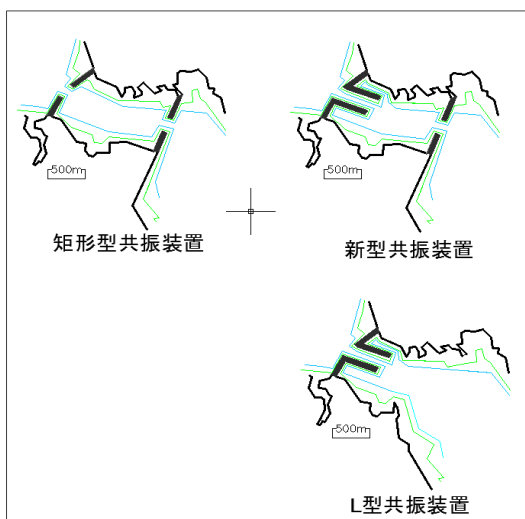


図-14 湾口部の各堤体配置モデル

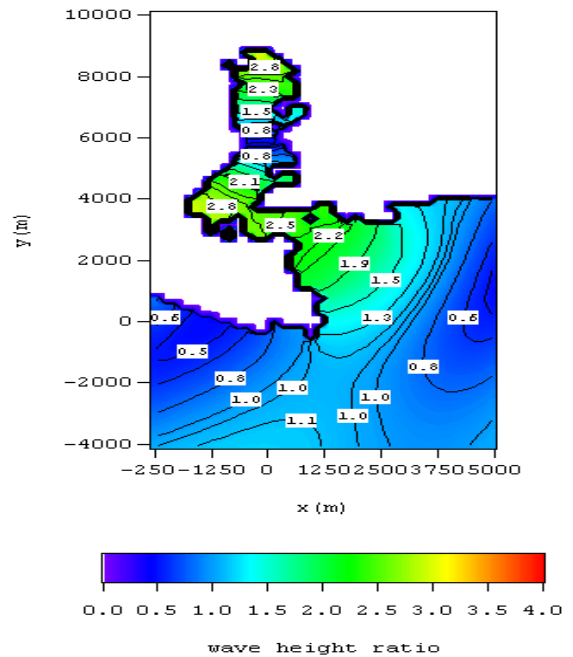


図-15 波高増幅率の分布(新型共振装置 $T=850s$ )

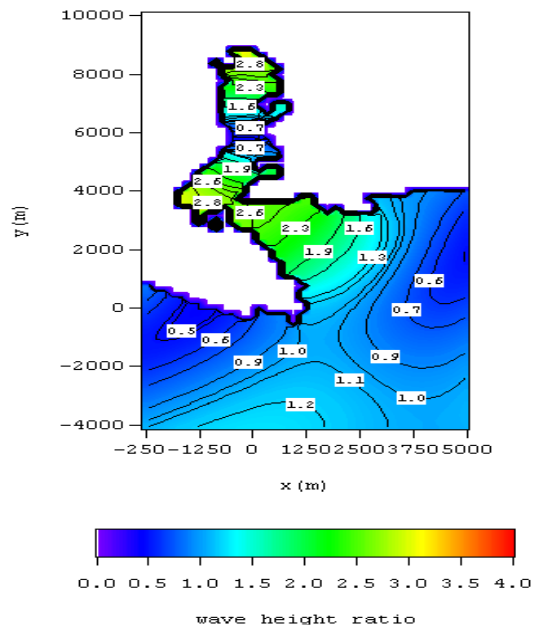


図-16 波高増幅率の分布(L型共振装置 $T=850s$ )

また、これら3つの港口部形状モデルについての湾奥平均波高の増幅率の結果を図-17に示す。この図中には比較のため、前出の突堤形式の港口モデルおよび防波堤がない原地形の結果についても併せ示す。

図-15, 16の比較および前出の図-7, 9との比較から、湾内の波面モードは周期 $T=850s$ のときの原地形と突堤形式の防波堤が設置されているときの波面モードと変化なく、湾口部から湾奥部にかけて腹-節-腹のモードが現れることが認められる。ここでは、割愛するが、周期 $T=2100s$ の場合、やはり前出の図-8, 10の結果と同様に湾口部から湾奥部にかけて節-腹に近い波面モードが現れることを確認している。



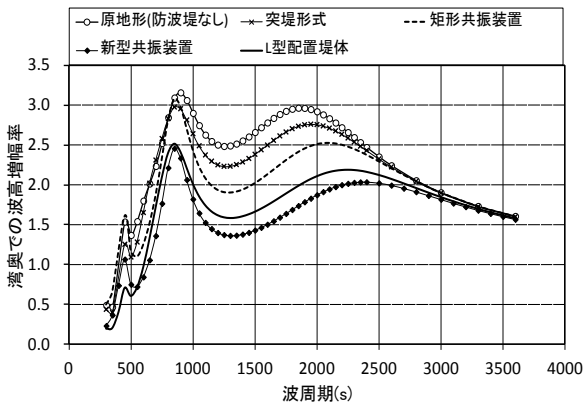


図-17 各種の堤体モデルによる波高増幅率の比較 (Cr=0.95)

そして図-17から、周期 $T=850s$ の条件は、全ての堤体モデルにおいて波高増幅率のピークが現われる共振点にほぼ相当することが分かる。また、これらの波高分布と湾奥平均波高の結果から、従来において湾口部に設置されていた突堤形式の津波防波堤は堤体のない状態と比較して有意に最大波高は低減されておらず、津波防波堤としては不十分と考えられる。

今回提案した3つの堤体配置モデルの性能を図-17を参照して比較すると、新型共振及びL型共振装置では、湾奥の平均波高が堤体なしのときに比較して4~5割減になるなど有効な防波堤配置と判定される。特にL型共振装置は、従来の突堤形式の津波防波堤の開口部に導流堤に類似した平行堤を設けるだけでよく、実現性の高い工法と考えられる。

## 5. 結語

(1) 大船渡湾を対象にして、原型の突堤形式の津波防波堤による湾奥津波高の低減効果を来襲する可能性が高い揺り返し周期  $T=300s \sim 3600s$  の範囲内の条件で数値実

験による検討を行った。その結果、従来の検討結果とは異なり、突堤形式の津波防波堤を設けるだけでは津波を想定した長周期の波に対して十分な遮断効果が得られないことが指摘された。

(2) 長水路を用いた模型実験により有効性が確認された新型共振装置堤体やL型堤体などは、リアス式湾の湾口部などに用いることで、揺り返し周期が数十分程度以上の津波の制御にも有効であり、湾口部形状の重要性が確認された。そして、原型の突堤形式の津波防波堤の開口部沖側に平行堤を設けたL型堤体配置は、比較的簡単な工法で、有効な津波制御効果が確認できた。

ここでは、津波の定常応答下での湾水振動の特性を検討してきたが、さらに初期応答の状態での津波制御効果についても検討する必要がある、今後の課題としたい。

なお本研究は、科学研究費・基盤研究C(代表者:中村孝幸)による成果の一部であることを付記する。

## 参考文献

- 1) 中村孝幸・國富將嗣：長周期波制御のための外港型共振装置に関する研究，海岸工学論文集，第44巻，pp.716-720, 1997.
- 2) Poon Y. K., Raichlen. F. and Walker. J. : Application of physical model in long wave studies for the Port of Long Beach, Proc. 26th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp.1222-1235, 1998.
- 3) 中村孝幸・Nyein Zin LATT・東和希：超長周期波の制御のための新型共振装置に関する実験的検証，海岸工学論文集第57巻，pp.816-820, 2010.
- 4) 堀川清司・西村仁嗣：津波防波堤の効果について，第16回，海岸工学講演会講演集，pp.365-366, 1969.
- 5) 高橋竜太郎・相田勇・永田豊：海底設置用長波計による大船渡湾の静振観測結果について，日本海洋学会誌，第22巻，第1号，1966.
- 6) (独法)日本水路協会：海底地形デジタルデータ M7005A Ver.2.1 三陸沖，2011.
- 7) 中村孝幸・森田知志・加藤孝輔：鉛直線グリーン関数法による水深変化を伴う港湾域の波高分布の算定法，海岸工学論文集，第44巻，pp.16-20, 1997.

## EFFECTIVE LAYOUT OF TSUNAMI BREAKWATERS AT THE MOUTH OF A RIA BAY

Takayuki NAKAMURA , Tatsuya YAMASAKI and Nyein Zin Latt

In the East Japan Great disaster, a large number of people were dead and some number of persons were still missing, especially by giant tsunami attacks. One of the causes of the disaster was a significant amplification of tsunami height in a ria bay, typically Sanriku District, Tohoku area. In the last fifty years, in order to prevent and minimize the tsunami disaster in Sanriku District, tsunami breakwaters have been constructed or under construction at the mouth of ria bays. However, in the last great disaster, almost all tsunami breakwaters were collapsed or partly destroyed. Consequently the disaster level was significantly expanded. In this study, effective layout of tsunami breakwaters at the mouth of ria bay has been extensively studied. The concept of a water wave resonator for reducing incoming tsunami waves is introduced. The new type of wave resonator developed in the authors' previous study has been adopted to reduce tsunami heights in the most shore side of a ria bay. The more practical layout of the breakwater deduced from the previous study is also examined.