湾口防波堤の多重配置による津波高さの低減効果について

Effectiveness of Tsunami Breakwaters in Multi Rows for Tsunami Reduction

中村孝幸¹・松葉陽治郎²

Takayuki NAKAMURA and Yojiro MATSUBA

It has become known that the existing tsunami breakwaters are insufficient for sheltering harbors and coastal areas as seen in the incidence of destructive tsunami triggered by 2011 great Tohoku earthquake in East Japan, especially in ria bays of Sanriku Area such as Ofunato Bay. Amplification of tsunami heights in a ria bay is one of major causes of the big disaster. In order to mitigate the tsunami disaster, layout of breakwaters at the mouth of the bay has been studied theoretically by numerical simulations. Breakwaters in multi rows, especially double rows of breakwaters, are typical. Focusing on the harbor oscillations for various tsunami period conditions, effectiveness of proposed layouts of the breakwater was examined extensively.

1. はじめに

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。本研究では、津波が来襲すると破壊的な被害を受けやすい、彎曲した湾やリアス式海岸の湾奥部を対象にして、湾口津波防波堤の開口部形状や配置方法などを工夫し、また防波堤を2重配置構造等にすることで、湾内の津波高さを減じて、浸水災害の軽減を図ろうとするものである。

既に著者ら（2013）は、東北地方太平洋沖地震によって甚大な津波災害を受けた大船渡湾岸域を対象にして、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防波堤（L型堤）の有効性や開口部潜堤の影響などを、湾水振動特性との関係から明らかにしてきた。この湾水振動特性は、津波の増幅現象を考えると非常に重要になる。これは、リアス式湾内での津波の増幅が湾長や湾幅などと波長との比に密接に関係することやその増幅度が湾水振動の共振現象に影響されることによる。ここでは、様々な揺り返し周期を持つ津波に対して、湾内共振の増幅率を効果的に低減できる津波防波堤の開口部形状や配置方法などを多重配置形式を含めて明らかにする。

2. 大船渡湾に対する従来の研究結果

図-1は、著者らの以前の研究（中村ら，2013）によるもので、大船渡湾を対象にして、図-2に示す矩形突堤形式の防波堤（以下、突堤形式防波堤と称する）とL型堤を湾口部に設けたときの湾の最奥部での津波高さの増幅

図-1 大船渡湾の湾奥部における津波高さの増幅特性: 各種の津波防波堤の効果(中村ら, 2013)。

特性の算定結果を示す。大船渡湾を対象にした津波高さの平面分布の数値計算には、線形理論の範疇に属するが、湾の複雑な平面形状や水深変化及び低反射条件などが取り扱える鉛直線グリーン関数法（中村ら，1977）が使用されている。このとき、津波の入射方向は、原則的に危険側となる湾が開いている方向とされている。

図-1中には、十勝沖地震津波に対する堀川ら（1969）の現地観測結果も示されている。そして、突堤形式の津波防波堤が設置されているときの算定には、図-2（a）に示す倒壊前の現地防波堤を参照して、これを概略的にモデル化した図-2（b）の潜堤付き突堤形式防波堤が用いられている。この際、湾内の陸域境界の反射率の推定には、反射率を各種に変化させた結果と堀川ら（1969）による観測結果との比較から、図中に示す例のように反射率 $Cr=0.95$ が最終的に選定されている。本研究でも後述するように、湾内の陸域境界の反射率はやはり $Cr=0.95$ としている。

図-2（c）に示すL型堤は、従来の突堤形式の防波堤に代わるものとして提案されており、矩形堤の沖側に付加

1 正会員 工博 三省水工株式会社 技術顧問
2 愛媛大学大学院理工学研究科

(a) 倒壊前の突堤形式津波防波堤(防波堤開口部にセリス式潜堤)

(b) 突堤形式津波防波堤のモデル化(開口部に潜堤あり)

(c) L型堤モデル(開口部に潜堤あり)

図-2 大船渡湾の突堤形式防波堤の模式図と従来の研究での津波防波堤モデル(中村ら, 2013)

的な平行堤を設けた構造である。このようなL型堤は、図-1に見られるように、突堤形式防波堤に比較して長周期波に対する湾奥波高の低減効果に優れることが報告されている。これは、突堤形式の開口部に導流堤（平行堤）を設けることで防波堤開口部の波高が低下し、結果的に湾内への透過波も低下することによるものとして説明されている。

そして、突堤形式堤体やL型堤などを湾口部に設けることで、長周期側の第1次共振点が長周期側に移行すると共にその増幅率の絶対値も低下することが確認されている。ただし、短周期側の第2次共振点では、増幅率の絶対値を含め防波堤の設置効果はほとんど認められない結果となっている。

以下、本研究では、やはり大船渡湾を対象にして、周期 $T=900$ s付近の第2次共振点における津波高さの低減を目的として湾口防波堤の多重化を中心にして検討を進め

る。この際、長周期側の第1次共振点を含む各種の周期条件下での湾奥津波高さの低減効果についても検討する。

3. 津波防波堤の多重配置による効果

(1) 簡略化した大船渡湾モデルと湾水振動特性

大船渡湾は地形が非常に複雑で計算に極めて多くの時間を費やすため図-3に示す簡略化した大船渡湾のモデルを用いて津波高さの平面分布の数値計算を行う。この際、算定には、やはり鉛直線グリーン関数法を用い、境界積分の数値計算には線素分長10mの詳細な離散化モデルとしている。また、陸域境界の反射率は、やはり前出の例と同様に $Cr=0.95$ とした。

図-4は、簡略化した大船渡湾のモデルと詳細な大船渡湾のモデルの周期に対する湾奥部での波高増幅率の比較を示す。また、詳細地形モデルの算定結果は著者らの以前の研究(中村ら, 2013)によるものである。簡略化モデルでは振動特性がはっきりと現れており、詳細モデルよりも波高増幅率の変動が大きくなっている。湾水振動

図-3 簡略化した大船渡湾のモデル

図-4 簡略化モデルと詳細地形モデルの湾水振動

図-5 簡略化地形における各種防波堤モデルと配置条件

図-6 各種防波堤の湾奥部波高増幅率の周期による変化

の共振点については、簡略化モデルと詳細地形モデルのどちらにおいても、第1次共振点が波周期 $T=1900\sim 2000$ s程度、短周期側の第2次共振点が $750\sim 900$ s程度であり、両モデルの振動特性が近いことが確認でき、簡略化モデルはおおよそ詳細地形モデルを再現できていると考えられる。

(2) 防波堤の2重配置による効果

中村ら(2010)の研究では、直線水路を想定した検討において、堤体が二重配置構造である新型共振装置堤体を用いると、単独L型堤に比較して、長周期側のみならず短周期側においても、津波高の低減効果が確認されている。そのため、以下において新型共振装置堤体から派生した2重L型堤を提案し、その有効性を検討してみた。この平面配置状況を図-5に示す。以下では、数値実験により、この2重L型堤に加え、従来の単独L型堤、矩形共振装置堤体(2重突堤)、新型共振装置堤体(図-5(a)~(d)を参照)を対象にして、湾内全域の波高分布や湾奥部での波高増幅率を求め、有効性の比較検討を行う。

図-6はこの結果を示すもので、上記した4種類の堤体モデルに対する湾奥部での波高増幅率を示す。図-6中には、比較のため、防波堤なしの条件のときの結果についても併せ示す。この図から、2重突堤の波高増幅率の結果は、単独L型堤と比較してあまり差異がなく、湾内側の防波堤をL型堤に変化させた新型共振装置堤体は2重突堤よりも低減効果が高く、L型形状の防波堤が有効であると考えられる。また、 $T=720\text{s}\sim 800\text{s}$ の第2次共振点では、2重L型堤が防波堤なしの場合と比べて約40%、新型共振装置堤体に比べて約10%、湾奥の波高増幅率が低くなることが確認できる。

(3) 堤体間距離の影響

ここでは、最も効果が認められた2重L型堤を対象にして、図-7に示すように堤体間距離を $500\text{m}\sim 5700\text{m}$ の範囲で変化させ、湾奥津波高の低減効果に及ぼす堤体間距離の影響について検討してみた。図-8はこの検討結果を示す。この図より、湾内側の防波堤の位置が湾の屈角部より開口部側にある方が第2次共振点より長周期側の周期条件の場合、湾奥津波高の増幅率は低くなる傾向が

図-7 堤体間距離を変化させた2重L型堤モデル

図-8 堤体間距離による湾奥部での波高増幅率の比較(2重L型堤)

図-9 堤体間距離による湾内全域での平均波高増幅率(2重L型堤)

図-10 堤体間距離による堤体間水域での波高増幅率(2重L型堤)

認められる。

次に図-9は、やはり2重L型堤において、堤体間距離による湾内全域における波高増幅率の空間平均値の比較を示す。この図より、堤体間距離が短くなるほど第2次共振点において波高増幅率が減少する傾向が見られ、それが500mの場合に最小になることが確認できる。これは、堤体間の水域における波高特性によるものと考えられる。図-10は、この堤体間の水域における波高増幅率の空間平均値に着目して、その周期変化を示すものである。この図より、堤体間の水域での波高増幅率は、堤体間距離500mの場合に第2次共振点付近において、最少になることが認められ、このことが湾内全域での波高増幅率の低減に繋がったものと考えられる。そして、このような堤体間の水域における波高低減は、堤体間距離が近いことにより2つの防波堤の遮蔽性の相乗効果によるものと推測される。以上の検討から、2重L型堤において最も津波高さの低減効果が認められるのは堤体間距離が比較的短い500mの場合であることが判明した。

4. 大船渡湾の詳細地形に対する検討

(1) 津波防波堤モデル

上記の検討より、簡略化モデルにおいて単独L型堤や

新型共振装置堤体と比較して2重L型堤の方が津波高さの低減効果が高く、その堤体間距離は500m程度が効果的であることが確認できた。そこで、この結果を大船渡湾の詳細地形モデルに反映させて、その有効性を検討してみた。図-11は、大船渡湾の詳細地形モデルに2重L型堤を設置したものである。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（日本水路協会、2011）を基本データとして、10m毎の水深コンター図を作成した。算定では、2重L型堤に加え、前出の原地形、突堤形式防波堤、単独L型堤についても比較対象とした。なお、陸域境界の反射率は、上記までの検討と同様に $Cr=0.95$ とした。

(2) 津波高さの低減効果

図-12は、図-11の各種防波堤の湾奥部での波高増幅率を示すものである。L型堤を2重化することにより、増幅率は $T=850\sim900s$ の第2次共振点から $T=2000\sim2800s$ の第1次共振点までの比較的広い周期帯において、単独L型堤に比較して約2割程度低下するなど有効性が認められる。また、防波堤なしの場合と比較すると、L型堤を2重化することにより、第1次および第2次共振点付近では、増幅率は4割から6割の低下が見られ、非常に効果的であることが分かる。このことから、2重L型堤とすることで、各種の揺り返し周期の津波に対して湾奥津波高さを減ずる

図-11 大船渡湾口における2重L型堤の配置状況

図-12 各種防波堤の湾奥部での波高増幅率の比較

ことが可能となり、湾内海岸線の防潮堤高さを低く設定できるようになるものと考えられる。

図-13, 14は、単独および2重L型堤を湾口部に設けたときの波高比の平面分布(波面モード)を示すもので、それぞれ図-12において波高増幅率がピークを示す第1次および第2次共振点に一致する周期条件下での結果に対応する。図-13では、波面モードが湾奥から湾口にかけて腹・節のモードが形成されており、防波堤付近で重複波の節が形成され、防波堤の設置効果の発揮されることが確認できる。また、防波堤を2重化することで遮蔽効果が向上することが分かる。第2次共振点の図-14では、波面モードが湾奥から湾の屈角部にかけて腹・節・腹のモードが形成されていることが確認できる。また、防波堤を2重化することでやはり遮蔽効果が増大し、湾奥および湾屈角部での波高増幅が抑えられていることが確認

できる。このように2重L型堤とすることで、湾内全域の波高比が低く抑えられ、第2次共振点の短周期側においても設置効果が発揮されることが分かる。

4. 結語

- (1) 本研究では、湾口防波堤の平面配置や平面形状を試行錯誤的に検討しているが、このような試行錯誤を効率よく実施できるように、初期段階において大船渡湾の複雑な海岸地形を直線変化で近似し、かつ一定水深で単純化した算定モデルを提案し、これを用いて効果的な湾口防波堤の配置などを概略的に検討した。この簡略化モデルでは、従来の研究による水深変化や複雑な海岸地形を再現した詳細モデルに比較すると、計算機容量を1/50程度に縮小でき、かつ計算機時間も大幅に短縮できる。そして、重要となる湾内での共振特性などは、簡略化モデルを用いても詳細モデルによるそれと類似した結果が得られることが確認された。
- (2) 簡略化モデルによる検討の結果、従来の研究で採用されていたL型堤を2重配置にすることで湾水振動・短周期側の第2次共振点において津波高さの低減効果が大幅に改善できる。このとき、L型堤を2重配置するときの堤体間隔は、波長に比較すると比較的短い500m程度とすると効果的である。これは、堤体間距離を短くすることで両堤体による流体付加慣性の一体効果が現れやすくなり、その反射機能が増大するためと推測される。このことは、第2次共振点に相当する波周期 $T=810\sim 1050s$ の条件下において、堤体間内の波高増幅率が最小となることから確認される。
- (3) 簡略化モデルにおいて有効性が確認された、2重L型堤を大船渡湾の詳細モデルで採用すると、湾水振動の第2次共振点に相当する波周期 $T=850\sim 900s$ では、従来の突堤形式津波防波堤に比較して、約3~4割程度の湾奥津波高さの低減効果が得られる。

参考文献

- 中村孝幸・森田知志・加藤孝輔(1977):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.
- 中村孝幸・Nyein Zin Latt・東和希(2010):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
- 中村孝幸(2013):新型津波防波堤の須崎湾における効果,ながれ31,pp.33-38.
- 中村孝幸・山先達也・松葉陽治郎(2013):大船渡湾口津波防波堤の効果に及ぼす開口部3次元形状の影響について、土木学会論文集B2(海岸工学),Vol.69, No.2, pp. I_751-I_755.
- (独法)日本水路協会(2011):海底地形デジタルデータM7005A Ver.2.1 三陸沖.
- 堀川清司・西村仁嗣(1969):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.

図-13 第1次共振点での単独L型堤(左図, $T=2500s$)と2重L型堤(右図, $T=2800s$)の波高比の分布

図-14 第2次共振点での単独L型堤(左図, $T=870s$)と2重L型堤(右図, $T=870s$)の波高比の分布