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

Effective 3-D Structures of an Opening Mouth of Tsunami Breakwater in Ofunato Bay

中村孝幸¹・山先達也²・松葉陽治郎³

Takayuki NAKAMURA, Tatsuya YAMASAKI and Yojiro MATSUBA

The well-known destructive tsunami triggered by 2011 Great Tohoku Earthquake in East Japan has shown that the existing tsunami breakwaters are not enough to prevent big tsunamis. Some breakwaters were completely collapsed by earthquakes or tsunamis. It was found out that, even though in the intact condition from the tsunami attack, the existing tsunami breakwaters were insufficient for sheltering corresponding harbor and coastal areas, typically in Ofunato Bay. In order to solve the tsunami disaster problem, the control function of tsunami breakwaters was revised and improved as compared to the previous one. Especially, the 3-D structure of the opening mouth of tsunami breakwater is a major point of this study.

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。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に建設されてきたが、今回の津波により大船渡湾、釜石湾、女川湾などの湾口防波堤が破壊されるなど、機能的な側面を含めて、その有効性が疑問視されるようになっている。また、現在大船渡湾では、倒壊した湾口防波堤の復旧事業が進められつつある。国土交通省による津波浸水シミュレーションでは、湾口防波堤を復旧することで、湾奥の浸水高さを約20～25%低減できることなどが報告されている（国土交通省東北地方整備局，2011）。

そこで、本研究では、大船渡湾岸域を対象にして、さらなる湾奥津波高さの低減が可能となるように、津波防波堤の開口部形状や開口部潜堤（捨石マウンドを含む）の影響に着目して、より効果的な開口部3次元形状のあり方について数値実験に基づき明らかにする。この際、併せて基本となる原地形の大船渡湾の湾水振動特性や陸域境界の反射特性の影響などについても検討する。

2. 大船渡湾の湾水振動特性と津波防波堤の効果

(1) 大船渡湾に対する従来の研究結果

岩手県大船渡市の大船渡湾では、1960年のチリ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たが、今回の大震災によって倒壊している。堀川ら（1969）は、この建設されていた津波防波堤の効果を現地観測結果に基づき検討している。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-1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-2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卓越調和成分波の周期 T 、縦軸はその成分波の湾奥での増幅率 M を示す。波高増幅率 M は、図-1中に示す湾奥

図-1 大船渡湾の防波堤及び潮位観測所の位置

図-2 湾奥での波高増幅率（堀川ら，1969）

1 正会員 工博 愛媛大学大学院教授 理工学研究科
2 修(工) 技研興業株式会社
3 愛媛大学大学院理工学研究科

部での潮位観測所での観測波高と湾口防波堤の外海側にある長崎での観測波高との比により定義されている。なお、防波堤がないときの結果は、高橋ら(1966)の研究によるもので、津波とは異なる低気圧性の気象擾乱による長周期波に対する観測結果に相当しており、観測された水面変動も地震津波によるものに比較するとかなり小さく、湾沿岸での長周期波の作用によるエネルギー逸散が少ないときの結果と理解した方がよいと思われる。この点については、後述する湾沿岸域での反射率の大小による湾奥での津波増幅率への影響について検討した結果を参照していただきたい。

図-2によると、湾奥波高の増幅率 M は、周期約13分(約800s)の第2次共振点では防波堤の設置の有無による差異が見られず、防波堤の効果はほとんど見られない。一方、第1次共振点に相当する40分程度(3200s)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。ただし、防波堤なしの条件で観測された結果は、上述したように水面変動が小さな気象擾乱による長周期波に対する観測結果であることに注意されたい。

そして、堀川ら(1969)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1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。

(2) 数値計算で想定した大船渡湾のモデル化

大船渡湾を対象にした津波高さの平面分布の数値計算を行うにあたり、まず大船渡湾の海底地形および陸域境界を海底地形デジタルデータ(日本水路協会, 2011)に基づき、図-3に示すようにモデル化した。そして、津波の数値計算には、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条件などを詳細に考慮できる柵方水深変化モデルの鉛直線グリーン関数法(中村ら, 1977)を用いた。ここでは、海底地形を10m, 20m, 30mの3段

図-3 数値実験に用いた大船渡湾のモデル

階変化で近似した。このとき、境界積分の数値計算には、地形の再現性が高められるように線素分長として50mを用いた。また、津波の入射方向は、原則的に図中に示すように危険側となる湾が開口している方向と一致するように設定し、その周期は今回の津波を参照して5分~60分の範囲とした。評価のための湾奥津波高さの代表量は、図中に示す算定対象水域内の空間平均津波高さとした。

(3) 陸域境界及び津波防波堤の反射率の影響

事前検討として、津波計算における湾陸域境界の反射率 Cr を推定するため、突堤形式の津波防波堤が設置されている状況下において、陸域の反射率 Cr を0.85~1.0の範囲で複数に変化させたときの湾奥部代表水域での波高増幅率を求めた。図-4は、この結果を波周期による変化で示すもので、十勝沖地震津波に対する堀川らによる観測結果も併せ示す。なお、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-5(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-5(b)の潜堤付き突堤形式防波堤を用いた。

図-4 各種の境界反射率に対する突堤形式防波堤を設けた大船渡湾での湾奥部波高増幅率の周期による変化(開口部潜堤マウンドあり)

(a) 倒壊前の突堤形式津波防波堤(防波堤開口部にセル式潜堤)

(b) 突堤形式津波防波堤のモデル化(防波堤開口部に潜堤あり)

図-5 大船渡湾の突堤形式防波堤の模式図とそのモデル化

図-4において波高増幅率に及ぼす反射率の影響に着目すると、境界反射率 Cr が1.0から0.85に減少することで、増幅率が顕著に低下することが分かる。特に増幅率が極大値を示す湾水振動の共振点においては1/3から1/4程度に激減することが認められ、湾奥津波高さを低減するのに湾内の陸域境界の反射率を低くすることが有効であることが分かる。ただし、超長周期波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。

図-4中に示す堀川らによる観測結果と本算定結果を比較すると、反射率 $Cr=0.95$ とした算定結果が周期帯全体にわたり観測結果との対応がよく、 $Cr=0.95$ が妥当な反射率と推定される。このことより、以下の算定では防波堤を含む陸域境界の反射率は0.95として、各種の検討を進めることとした。

(4) 湾水振動の共振モードと津波防波堤の効果

図-4から、突堤形式の津波防波堤を設けた場合、いずれの反射率の結果においても、湾水振動の共振点は、観

測結果と同様に、第1次共振点が $T=2250s$ 、短周期側の第2次共振点が $T=850s$ であることが確認できる。

図-6, 7は、それぞれ原地形および突堤形式防波堤を設けた場合の湾域での波高増幅率の空間分布（波面モード）を示す。各図の(a)と(b)は、波高増幅率がピークを示す第1次および第2次共振点に対応する周期条件下での結果に対応する。なお、防波堤のない原地形での湾水振動特性については、後に提示するが、特に第1次共振点に対応する周期が $T=1850s$ 程度と短周期側に現れる傾向にあることを付記しておく。

これらの図より、各図の(a)に示す第1次共振点に相当する長周期側の条件下では、湾奥で波高比が大きく、湾口付近で波高比が減少する、いわゆる湾奥で腹、湾口で節となる波面モードに近いことが認められる。一方、各図の(b)に示す第2次共振点に相当する短周期側の条件下では、湾奥、湾中央部、湾口にかけてそれぞれ腹、節、腹が現れる波面モードとなることが確認できる。

図-6 原地形での波高増幅率の分布

図-7 突堤形式防波堤での波高増幅率の分布

そして、これらの波面モードの結果と前出の波高増幅率の結果との総合比較から、湾口防波堤が湾奥津波高の低減に有効となるのは、湾口付近に重複波の節が形成される条件に相当することや、そこに腹が形成されるときにはほとんど効果が見られなくなることが確認できる。これは、腹が形成されるときには防波堤の周辺で鉛直方向の波運動が卓越することになり、防波堤による波運動の阻害が少なくなるためと推定される。

(5) 津波の入射角の影響

上記までの検討では、危険側と想定される入射角 150° (図-3での定義) の条件を用いた。ここでは、東北地方太平洋沖地震津波の条件に近い真東からの入射 (入射角 180°) を想定して、原地形と突堤形式防波堤を設けた場合の両者について、同様に湾水振動特性を検討してみた。図-8はこの結果を示すもので、前出の入射角 150° の結果についても併せ示す。

算定結果より、やはり危険側と想定される入射角 150° の場合の結果が原地形、突堤形式防波堤ともに湾奥部での増幅率が高い値を示すことが分かる。このとき、入射角が変化しても各共振モードに対応する周期条件は変化しないことも確認できる。以下では、危険側の入射条件である入射角 150° を想定して検討を進めることとしたい。

3. 防波堤開口部の潜堤の有無および開口部形状による湾奥津波高の低減効果

著者らの以前の研究 (中村, 2013) により、突堤形式の防波堤の開口部に導流堤形式の付加堤を設けることで湾奥部波高増幅率が低減できることが確認されている。ここでも同様に防波堤開口部の形状を変化させることで湾奥津波高の低減効果について検討してみる。この際、上記した突堤形式津波防波堤による効果を含めて、より高い津波の遮蔽効果が期待できる防波堤開口部の3次元的な構造について考察した。

図-9は、突堤形式防波堤の開口部に導流堤を付加した構造の堤体を示す。以下では、このような形状の防波堤

図-9 突堤形式防波堤の開口部に導流堤を設けたL型堤と潜堤の配置条件

をL型堤と称することとしたい。図中で (a) 図より (c) 図へは、それぞれ潜堤なしの場合、L型堤の沖側開口部に潜堤を設けた場合、その潜堤を導流堤の全体にわたり拡張した大型潜堤を設けた場合に相当する。そして、図-9の例では、導流堤の長さが防波堤開口長とほぼ等しい条件 (200m程度) とし、潜堤上の水深は図-5に示す突堤形式の場合と同じ10mとしてある。

図-10は、図-9に示す3種類の防波堤開口部形状の堤体に対する湾奥部での波高増幅率の算定結果の比較を示す。算定では、堤体を含む陸域境界の反射率は $Cr=0.95$ としてある。図中には比較のため、防波堤のない原地形の場合および突堤形式の防波堤の場合の結果についても併せ示す。

この図より、防波堤開口部の形状を導流堤を付加してL型堤とすることにより、突堤形式よりも効果的に湾奥波高増幅率を低減できることが認められる。そして、L型堤の沖合開口部に潜堤を設けることで、この効果はより顕著になる傾向にある。ただし、潜堤を導流堤に沿う領域全体に拡大しても波高低減効果はそれほど有意に改善されないことも確認される。

一方、長周期側の第1次共振点に対応する周期は、L型堤とすることにより、また開口部に潜堤を設けることにより、長周期側に移行する傾向が認められる。ただし、

図-8 波高増幅率に及ぼす入射角の影響

図-10 L型堤を設けたときの湾奥波高増幅率の比較：突堤形式防波堤および原地形の結果との比較

第2次共振点に対応する周期はほとんど変化が見られない。このように、湾口部に防波堤を設けることで、第1次共振点が長周期側に移行する理由としては、防波堤の存在により付加質量が現れ、結果的に湾域の振動質量の増加によるものと考えられる。

本研究では、湾奥部波高増幅率に及ぼすL型堤の導流堤長さの影響についても検討しているが、図-9の例に比較して導流堤長さを倍増させた場合においても、図-10に示す大型潜堤の場合と類似した結果になるなど、あまり有意な効果が見られなかったことを確認しており、ここに付記しておく。

最後に図-11は、原地形と小型の潜堤を付加したL型堤の波高増幅率の分布を示すもので、それぞれ、図-10において堤体設置の効果が最も顕著な第1次共振点の周期条件に対応する。図より、湾口部付近に節が形成される条件になると防波堤の設置効果が発揮されることが確認される。また、L型堤の防波堤湾外側では、L型堤の導流堤による侵入波の遮断効果が期待でき、図-7で示した突堤形式防波堤の結果よりも津波高さの低減効果が増していることがわかる。

以上の検討より、防波堤開口部の形状を、導流堤を付加してL型堤とし、さらにその沖側開口部に堤体幅程度の潜堤を設けることにより、第1次共振点付近では、防波堤のない原地形の場合に比較して、湾奥部の波高増幅率をほぼ半減できることなどが判明した。この傾向は、特に今回の大震災の津波のように長周期の条件下で顕著である。一方、湾口部付近に重複波の腹が形成される第2次共振点に相当する比較的短周期の条件ではそれほど有意な低減効果が期待できず、今後さらに内湾側に防波堤を設置するなどの検討が必要と思われる。

4. 結語

- (1) 大船渡湾を対象にした湾水振動の数値実験の結果、防波堤のない原地形において、湾奥部での津波高さの増大を引き起こす共振周期は、湾奥から湾口にかけて腹・節モードが形成される第1次共振点で $T=1850s$ 程度であり、腹・節・腹のモードが形成される第2次共振点で $T=900s$ であることが確認された。また、大震災で倒壊した突堤形式防波堤で開口部に潜堤がある場合、第2次共振点の対応周期や共振モードは、原地形の場合とほぼ同様であるが、第1次共振点に対応する周期は $T=2250s$ と増大移行する傾向にあり、このような共振周期の条件は、従来の現地観測結果とほぼ一致する。
- (2) 大船渡湾の湾奥津波高さを低減する方法の一つとして、湾沿岸域における長周期波に対する反射率を0.85程度と多少ながら減勢する工法が挙げられる。一方、湾口防波堤を設置する工法では、従来の突堤形式防波

図-11 第1次共振点での原地形（左図、 $T=1900s$ ）と小型潜堤付加のL型堤（右図、 $T=2500s$ ）の波高増幅率の分布

堤の開口部に沖側へ向けて導流堤を付加したL型堤とすると、湾奥津波高さをほぼ半減できる。このとき、導流堤の長さは開口長程度とし、開口部沖側には堤体幅程度の潜堤を設けることが必須となる。ただし、上記した第2次共振点に近い周期条件では、湾口部付近に重複波の腹が形成されるようになり、防波堤による遮断効果はかなり低下する傾向にあることに注意する必要がある。

また、L型堤とすることにより高コストとなることも示唆されるが、湾内の防潮堤高さを高くする必要がなくなり、費用面での問題も解消されるのではないかと考えられる。

- (3) 大船渡湾のように細長いリアス式湾における湾奥津波高さを低減対策を実施するには、対象とする湾の共振特性を各種の周期に対して事前に検討しておく必要がある。そして、この検討で求められる複数の共振周期に対応する波面モード等を勘案して津波防波堤の設置位置や平面配置形状などを決定することが望ましい。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

- 国土交通省東北地方整備局釜石港事務所（2012）：大船渡湾口防波堤の復旧事業について、www.pa.thr.mlit.go.jp/kamaishi/users/file/staff_1337574693_1.pdf。
- 高橋竜太郎・相田 勇・永田 豊（1966）：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。
- 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（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。
- （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。