

# 2011年東北地方太平洋沖地震津波の釜石湾における挙動の数値解析

## Numerical Analysis of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami in Kamaishi Bay

米山 望<sup>1</sup>・森 信人<sup>1</sup>・三輪真揮<sup>2</sup>

Nozomu YONEYAMA, Nobuhito MORI and Masaki MIWA

In this study, the effectiveness of an offshore breakwater for the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami was examined by quasi three dimensional (quasi-3D) and three dimensional (3D) numerical models. First, both 3D numerical models were applied to the behavior of tsunami inundation inside of Kamaishi bay where a baymouth breakwater installed against to assumed tsunami. The numerical results well agreed with the post-event tsunami survey on the land. The numerical simulations were performed without offshore breakwater. It is found that the offshore breakwater performed significant reduction of the tsunami height on the land. Furthermore, the velocity of tsunami inundation was discussed for understanding physical characteristics of tsunami around Kamaishi bay.

### 1. はじめに

今次津波による東北地方の被災は、巨大津波に対し防波堤等のハードウェア対策で完全に防ぐことは現実的ではないとの認識を生み、避難や高台移転等の対策が進められている。一方、ハードウェア対策が不十分なために浸水高が大きくなった地域では、街そのものが消失し、早期の復興が非常に困難となっている。それゆえ、早期復興のためには、ハードウェア対策により市街地の被災をある程度のレベルまで抑えることが重要となる。

そこで防波堤を超えた津波や防波堤の抵抗力の評価が必要であるが、津波そのものと防波堤の空間スケールが2～3オーダー以上異なること、流体の流速分布や加速度の取り扱いによる沿岸近傍および陸上部における数値計算の予測精度に問題が残る。

本研究では釜石湾湾口防波堤を対象に、3次元および準3次元の流体の数値解析を行い、遡上高に加えて流速や流体力等に対する沖防波堤の効果について検証する。

### 2. 釜石市の被害概要

釜石市における人的被害は死者・行方不明者合わせて約1000人、住居被害は全壊・半壊合わせて約3600棟にのぼる。防災直後には東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループが津波の痕跡調査を行ない、膨大な量のデータが得られた。この調査結果(The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group, 2011)によると、釜石湾付近では10 m程度、両石湾付近では15 mを超える津波痕跡高が観測されている。また、地震の発生によって地盤が沈

下しており、国土地理院の調査結果によると釜石湾奥では、0.56 m～0.66 m地盤沈下していることが報告されている。

釜石湾湾口防波堤が設置されている岩手県釜石市は明治三陸大津波や昭和三陸大津波など、津波の被害を受けてきた。設置された釜石湾湾口防波堤は、来襲津波に対して港内水位を海岸に設置されている防潮堤の天端より低い水位に減衰させることを目的として2000年に完成した。670 mの南堤、900 mの北堤がハの字型に設置されており、その中央に水面下-19 mまでの潜堤を含む300 mの開口部がある。防波堤天端は水面上+6 mであり、最も深いところでは、基礎石が最大水深-63 mに設置されている。

今次津波により、湾口防波堤は大きな被害を受けた。有川ら(2012)による水理実験結果では、越流により背面に負圧が生じ、港内外の水位による圧力差よりも増大することが指摘されている。基礎マウンドの滑動抵抗力や背面の負圧のばらつきによって、ケーソンの被災の状態にばらつきが生じることもわかった。

### 3. 解析手法の概要

#### (1) 三次元解析

解析手法の3次元モデルはNavier-Stokes方程式を基礎とし、自由表面をVOF法、固定境界をDonar-Acceptorおよび埋込み境界法、乱流は $k-\epsilon$ モデルで取り扱う手法を用いた。米山らはこの手法を用いて、北海道南西沖地震津波の奥尻島における津波遡上現象の再現している(米山ら, 2001)。

#### (2) 準三次元解析

準3次元モデルは、静水圧近似を用いた3次元Euler方程式を基礎としたROMSを用いた(Shchepetkin・McWilliams, 2005)、計算は、鉛直格子を $\sigma$ 座標系で表し、鉛直混合を

1 正会員 博(工) 京都大学准教授 防災研究所  
2 正会員 修(工) 国土交通省江戸川河川事務所

$k-\varepsilon$  モデル, 水平混合を Smagorinsky モデルで取り扱う設定で行った (森ら, 2010)。

#### 4. 釜石市の津波挙動解析

##### (1) 解析対象領域

解析対象領域は, 釜石湾および両石湾を含む南北方向に 10 km, 東西方向に 12 km とし, 計算地形は中央防災会議 50 m 解像度データに湾口防波堤の形状を組み込んで作成した (図-1 参照)。

三次元解析では, 地形を内挿し, 水平方向の格子間隔は 40 m, 鉛直方向は 5 m とし, 防波堤近傍は 20 m とした (図-2)。準三次元解析では, 水平方向の格子間隔は計算領域一様に 50 m, 鉛直 20 層で計算した。

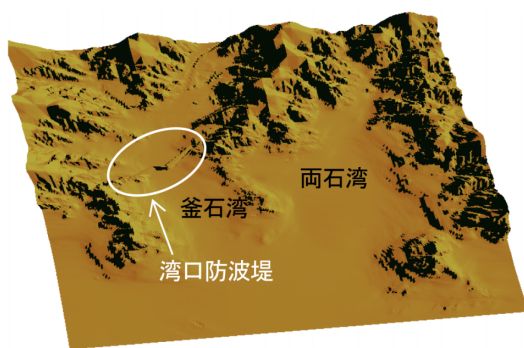


図-1 解析地形の概要

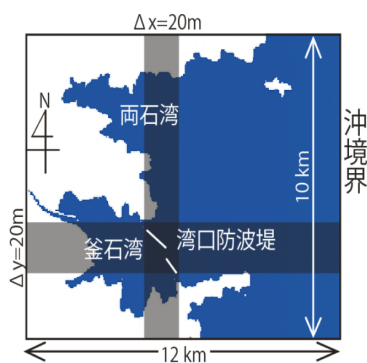


図-2 解析領域

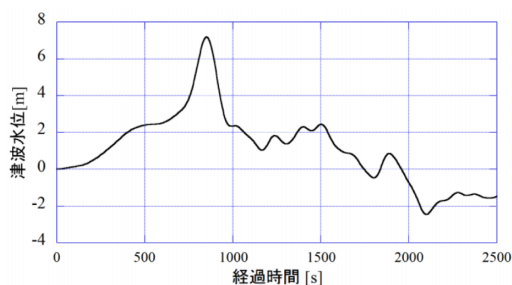


図-3 入力波形

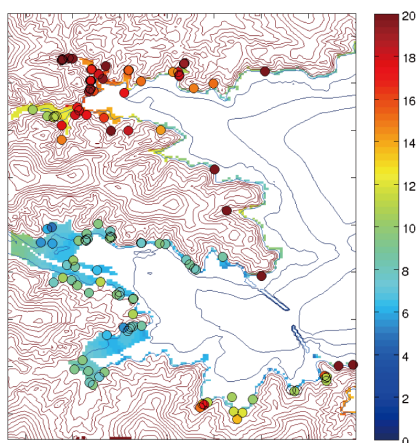


図-4 津波痕跡調査結果と解析結果の比較 (準三次元) (○: 痕跡調査結果, 濃淡: 解析結果, 単位: m)

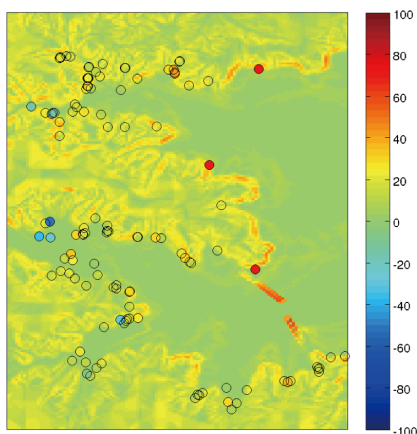


図-5 津波痕跡調査結果と解析結果の相対誤差 (準三次元) (○: 相対誤差, 濃淡: 地形勾配, 単位: %)

##### (2) 計算条件

入力波形は, 釜石沖に設置されている岩手南部沖 GPS 波浪計の観測データ (図-3) とした。両モデルともに市街地は一定粗度を仮定して簡便に評価した。また釜石湾の湾口防波堤はこの津波により破壊されたが, 本研究では計算時間内で破壊されない条件で解析を行った。

#### 5. 津波再現計算

上記の条件下で, 準三次元および三次元により, 釜石市に押し寄せた津波の再現計算を行った。

##### (1) 準三次元解析

図-4は, 準三次元解析による最大津波水位の解析結果に, 現地で観測された痕跡高 (丸で表示) を重ねあわせたものである。同図から, 解析結果と観測結果の傾向は概ね一致することがわかる。また, 図-5に津波痕跡調査結果と解析結果の相対誤差を示す。同図から, 釜石湾の湾奥, 特に陸上部においてやや過大に評価している。こ

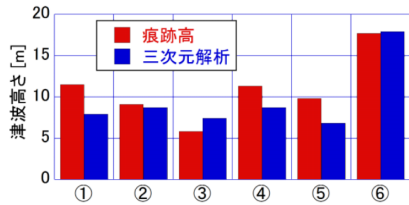


図-6 津波痕跡調査結果と解析結果の比較 (三次元)

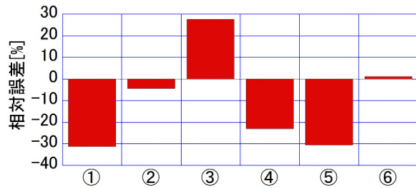


図-7 津波痕跡調査結果と解析結果の相対誤差 (三次元)

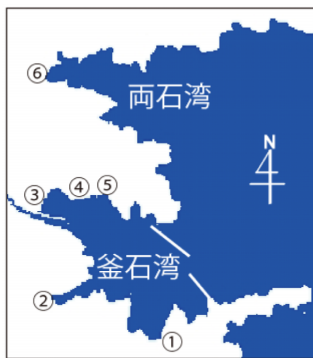


図-8 三次元解析の水位比較点

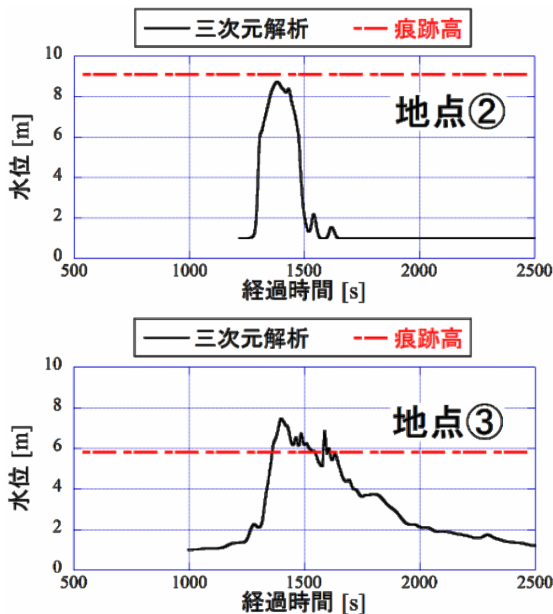


図-9 津波水位の時間変化例 (三次元解析)

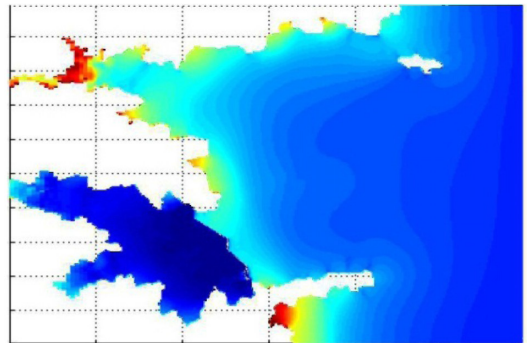
れは陸上の解像度および粗度による差と思われる。

### (2) 三次元解析

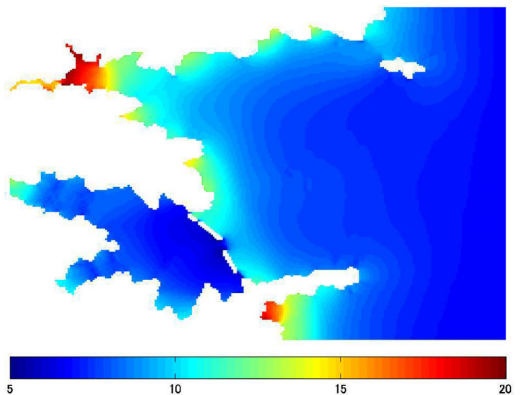
図-6に、津波高さの三次元解析結果と痕跡高の比較を、また、図-7に三次元解析結果の痕跡高に対する誤差を示す(図中の比較地点を図-8に示す)。図-6から三次元解析も現地で観測された釜石湾、両石湾奥での痕跡高を概ね再現し、比較した地点での誤差は、最大で30%である。また図-9に津波水位の時間変化の例を示す。これより、再現計算結果の最大水位の推定誤差は痕跡高に対し約20～30%である。

### (3) 準三次元解析と三次元解析の比較

準三次元解析と三次元解析の比較のため、図-10に最大津波水位分布を、また、図-11に最大流速分布を示す。図から、最大水位は地形の影響を大きく受け、湾口防波堤の外側でも幾つかの地点で流れが集まり高い水位となっている。この傾向は、三次元および準三次元解析ともに一致している。また、両解析とも湾口防波堤により、防波堤内側の水位を大幅に低減させていることがわかり、その傾向は三次元解析の方がやや大きい。三次元と準三次元解析の差が見られるのは、浸水範囲先端であり、これは圧力の取り扱いの差と遡上域先端の取り扱いによるも

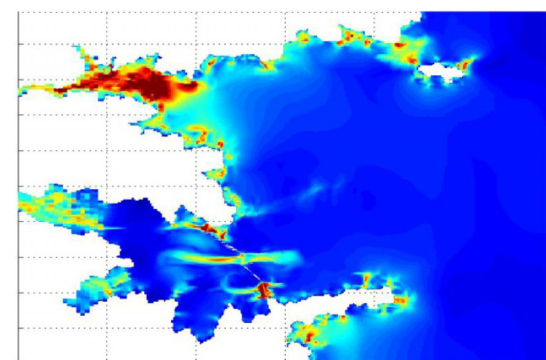


(a) 三次元解析結果

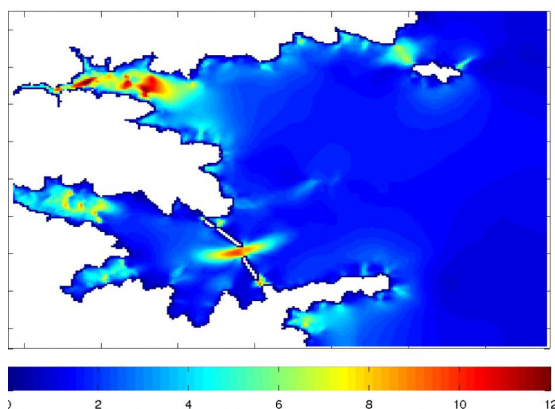


(b) 準三次元解析結果

図-10 最大水位分布の比較 (単位 m)



(a) 三次元解析結果



(b) 準三次元解析結果

図-11 最大流速分布の比較 (単位 m/s)

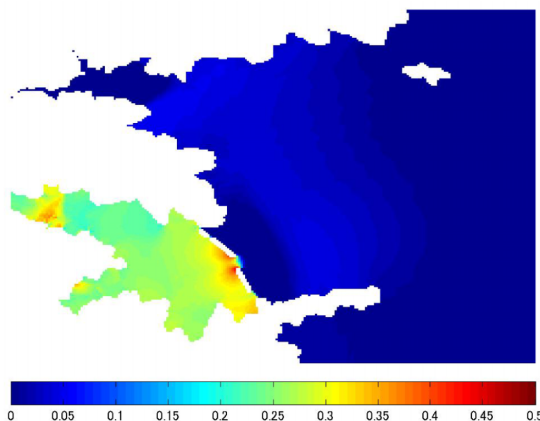


図-12 湾口防波堤による陸上部津波水位の低減割合

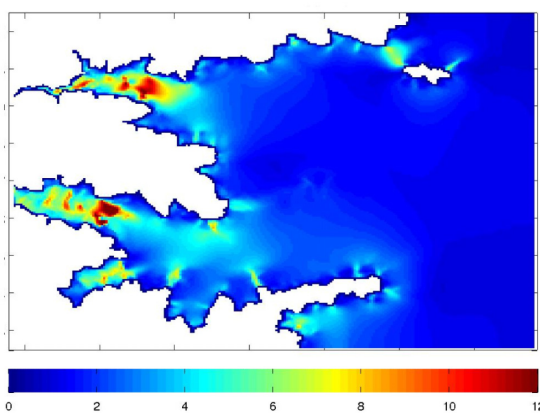


図-13 湾口防波堤なしの最大流速分布 (準三次元, 単位 m/s)

のと考えられる。

なお、両解析とも湾口防波堤沖側と内側での最大水位の差が大きいこと、および沖側水位が防波堤天端高（水面上+6m）を大きく超えていることから、津波が湾口防波堤を越流して湾内に侵入し、その際の湾口防波堤内側と沖側の大きな水位差が防波堤被災の要因となったことが示唆される。

図-11から、三次元解析では両石湾内で高流速になっており、両石湾奥で高い津波水位になることと符合する。また、湾口防波堤の外側で水位が高い地点の近傍では10m/sを超える大きな流速が発生していることがわかる。また、湾口防波堤の開口部の他、同防波堤の北端、南端で流れが速くなっていることがわかる。一方、準三次元解析では、おおまかな傾向は類似しているものの、三次元解析に比べ、流速の最大値はやや小さく、湾口防波堤から流出する流れの流速が最も速くなっていることがわかる。特に水際での高流速について両者の大きさが小さい。これは水位における議論同様に、圧力の取り扱いの違いであり、鉛直加速度や遡上先端条件による差と考えられる。

以上から、三次元解析と準三次元解析では、水位および流速の解析結果については細部では異なるものの概ね傾向が一致する傾向が得られた。一方、両者の差は、陸上、特に遡上先端付近や狭窄部で顕著であり、局所的な津波の振る舞いの数値解析における鉛直加速度の扱いによる違いが示唆された。また、三次元解析、準三次元解析ともに湾口防波堤の開口部では10m/s近い高流速が発生していることが確認された。

## 6. 釜石湾口防波堤の効果

これまでの検討により、準三次元解析、三次元解析とも、今次津波の釜石湾における挙動を概ね再現することが確認された。これを踏まえ、以下では釜石湾口防波堤が設置されていない場合の解析を行い、同防波堤の設置効果について検討した。

### (1) 準三次元解析による検討

図-12に、湾口防波堤による津波水位の低減効果を示す。同図から、概ね、20～35%の低減効果があることが示された。また、図-13に、湾口防波堤なしの最大流速分布を

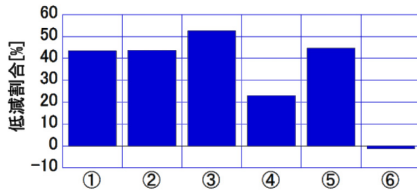


図-14 湾口防波堤による津波高さの低減割合

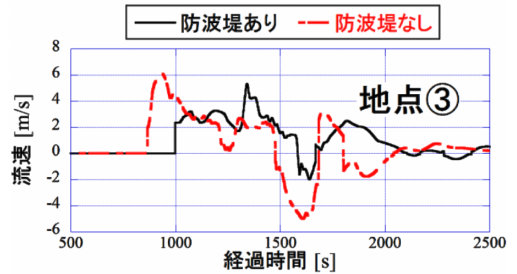


図-17 湾口防波堤の効果の検討（流速時系列2）

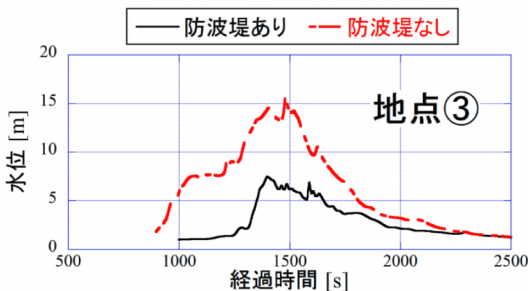
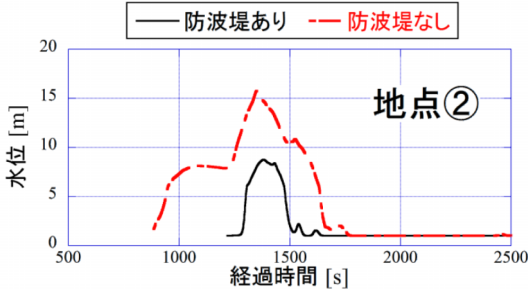


図-15 湾口防波堤の効果の検討（津波水位時系列）

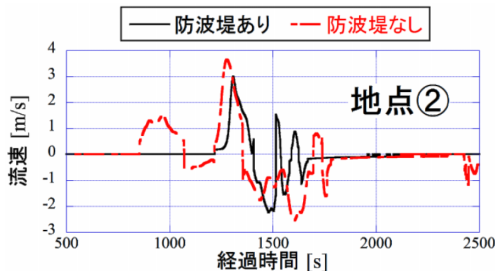


図-16 湾口防波堤の効果の検討（流速時系列1）

示す。これと図-11 (b) を比較することより、湾口防波堤が湾内、特に遡上部の流速を大幅に低減させていることがわかる。

## (2) 三次元解析による検討

図-14に、三次元解析により求めた、防波堤がある場合の津波高さ低減割合を示す。同図から、三次元解析の結果によっても、湾口防波堤の津波高さの低減効果が明確に示され、20% から50% も低減効果があることがわかった。

最後に流体力の推定に重要な流速について比較した。図-15では地点②および③における津波水位時系列を防波

堤がある場合と無い場合を比較している。同図から防波堤により津波水位が低減されていることが確認できる。一方、図-16、17に流速の時間変化を示す。同図の正の流速が西向き、負が東向きの流れである。同図から、流速の時間変化パターンに違いが見られるものの、水位ほどには大きな低減が見られないことがわかる。

## 7. おわりに

今次津波の釜石湾における津波挙動に適用したところ、以下のことがわかった。

- 本研究で用いた準三次元および三次元手法により津波水位などを概ね再現できる。
- 三次元解析と準三次元解析では、津波高さについて概ね一致するが、最大流速については異なる結果が得られた。
- 湾口防波堤の効果を検証したところ、三次元解析、準三次元解析ともに、津波水位を大幅に低減させる結果となった。一方、流速については準三次元では大幅に低減させたが、三次元では若干の低減にとどまった。

今回明らかになった、三次元および準三次元解析における運動量の差異について詳細に検討し、流体力学的な両者の適用限界の指標について検討していく予定である。

## 参 考 文 献

- 有川太郎・佐藤昌治・下迫健一郎・富田孝史・辰巳大介・慶善・高橋研也 (2012): 釜石湾口防波堤の津波による被災メカニズムの検討, 港湾空港技術研究所, No.1251, 52p.
- 米山 望・松山昌史・田中寛好 (2002): 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, 土木学会論文集, No.705/II-59, pp.139-150.
- 森 信人・鈴木崇之・木原直人 (2010): 海洋表層鉛直混合におよぼす風応力と波浪の影響, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.66, pp.311-315.
- The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group (2011): Nationwide Field Survey of the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami, JSCE, Series B, Vol. 67 (2011), No.1 pp.63-66.
- Shchepetkin, A.F., and J.C. McWilliams (2005): The regional oceanic modeling system, Ocean Modeling, Vol.9, pp.347-404.