

解析手法の違いが津波浸水計算結果に及ぼす影響の評価

谷本 早紀* 荒木 啓司*

Estimation of Difference of the Effect in the Analysis Methods on the Simulation Results of Tsunami Flood Depth

Saki TANIMOTO Keiji ARAKI

In order to ensure the safety of railways against tsunami hazards, we estimated the tsunami flood depth in the model area by 2-dimensional tsunami analysis method and 3-dimensional one. In the case of using the detailed terrain model, the geometric means and the geometric deviation values respectively obtained by the 2-dimensional analysis method and 3-dimensional one were not significantly different. However there is the difference between the distribution of the maximum flooding depth by the 2-dimensional analysis and that by the 3-dimensional analysis. In the case of the tsunami source model in which the fault slip was adjusted amount to 70%, the result of 2-dimension analysis did not show any occurrence of overflowing the embankment, but the result of 3-dimension analysis showed an occurrence of overflowing the embankment.

キーワード：津波，浸水深，2次元津波浸水計算，3次元津波浸水計算

1. はじめに

2011年3月11日発生した東北地方太平洋沖地震は、東日本の沿岸域に甚大な津波被害をもたらした。鉄道でも車両の流出や構造物の損壊などの被害を受けた。こうした津波被害の軽減のために、自治体などでは津波の浸水計算技術を活用するなどして、被害が想定される地域や避難場所、避難経路などをハザードマップにまとめている。このような自治体作成のハザードマップでは、自治体ごとに異なる解析手法が用いられており、想定地震（波源）や初期潮位の設定などの津波の前提条件や解析精度が異なっている例がある。また、海底地形、地上地形とその標高は反映されているものの、鉄道構造物を含む地上構造物の影響は必ずしも十分に考慮されていないハザードマップもある。鉄道は複数の自治体をまたいで走っているため、津波対策を検討する際にこうした既存のハザードマップをそのまま用いると、自治体間で不整合が生じる可能性がある。

そこで鉄道の津波対策の支援を目指して、ハザードマップ作成に用いられる津波浸水計算を行い、その解析手法の違いや地上構造物の有無が津波の浸水計算の結果にどのような影響を与えるのか調べた。本稿ではその結果を報告する。

2. 津波浸水深の評価方法と鉄道の特情

津波浸水計算においてよく使われる方法は長波理論¹⁾であり、線形長波理論と非線形長波理論に大別される。

* 防災技術研究部 気象防災研究室

これらは2次元の津波解析手法として技術的に確立された手法である。その一方で、津波の陸域遡上の計算においては、地形や建物などが津波の挙動に及ぼす影響を評価できるよう鉛直方向の流体運動を考慮した3次元の津波解析も重要だといわれており、特に東北地方太平洋沖地震の発生後、3次元津波解析手法の構築が活発化している^{2) 3)}。

鉄道の特徴のひとつとして、平地の他に、盛土や高架のように地面からの高さが異なる構造物が線状に分布していることが挙げられる。こうした線状の構造物の周りでの津波の鉛直方向の流体運動は津波の陸域遡上の計算結果に影響を及ぼすことが考えられる。すなわち、鉄道の津波対策を念頭に置いた津波浸水計算においては、2次元の解析手法だけでなく、3次元の解析手法が必要となる可能性がある。

ここでは流体運動の3次元性を考慮することの効果を検討するため、2次元および3次元の津波解析を実施しそれらの結果を比較した。3章以降ではその結果を示す。

3. 津波浸水深の解析手法と各種条件設定

3.1 解析手法

3.1.1 2次元計算

2次元計算における、津波の挙動に係る支配方程式として、非圧縮性流体を対象とした連続の式およびNavier-Stokesの運動方程式から求められる非線形長波方程式(式(1)～式(3))を用いた。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

特集：防災技術

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\rho} = A \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_y}{\rho} = A \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

ここで t は時間, x および y は水平方向の座標, z は鉛直方向の座標, g は重力加速度, ρ は流体の密度, h は水深, η は水位である。なお, M と N は流量でありそれぞれ x , y 軸方向の流速 u , v , 全水深 $D=(h+\eta)$ と式 (4) の関係がある。

$$\left. \begin{aligned} M &= \int_{-h}^{\eta} u dz = u(h+\eta) = uD \\ N &= \int_{-h}^{\eta} v dz = v(h+\eta) = vD \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

また, τ_x , τ_y はそれぞれ海底でのせん断応力である。

3.1.2 3次元計算

3次元計算では非圧縮性流体の Navier-Stokes 方程式を解く。本課題では, 伊藤忠テクノソリューションズ(株)が開発した非構造格子有限体積法ベースの3次元汎用流体解析コード FINAS/CFD⁴⁾を用いた。また, 津波の自由表面を表現するために Volume of Fluid 法 (VOF 法)⁵⁾を採用し, 海水と空気の2相流として津波の挙動を表現した。

3.2 解析条件

3.2.1 解析対象領域

解析対象として, 東北地方太平洋沖地震において鉄道でも被害が生じた石巻駅周辺を含む領域をモデル領域とした。2次元計算では東日本全域を含む領域 A から石巻駅周辺の領域 F まで6つの解析対象領域を設け, 徐々に解析領域と各領域での計算格子間隔を小さくした (図1, 図2, 表1)。3次元計算では, 2次元計算に用いた領域 F を網羅するような領域 G を設定した (図2)。

3.2.2 波源モデル

津波の波源モデルとして, 第12回南海トラフの巨大地震モデル検討会にて提案され, 東日本沿岸域全体にわたって陸域での津波の浸水に関する再現性が高いとの評価を得ている津波波源モデル (内閣府モデル)⁶⁾を使用した。

3.2.3 地形モデルの作成

2次元計算では格子中心に海底地形および標高データを割りあてて地形モデル (2次元地形モデル) を作成した。海底地形データは海底地形デジタルデータ M7000 シリーズ, 標高データは国土地理院の 5m メッシュ標高データを用いた。また, 旧北上川の河床形状については, 国土交通省・東北地方整備局・北上川下流河川事務所提供の数値データを用いた。

3次元計算 (領域 G) では, 国際航業(株)が提供している 3D 都市モデル, DEM データおよび東北地方太平洋沖地震および津波による被災前後のオルソデータの3種

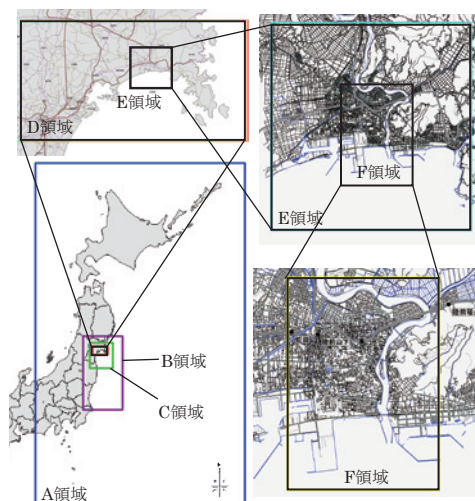


図1 2次元の津波浸水計算に用いた対象領域 (領域 A ~ F)

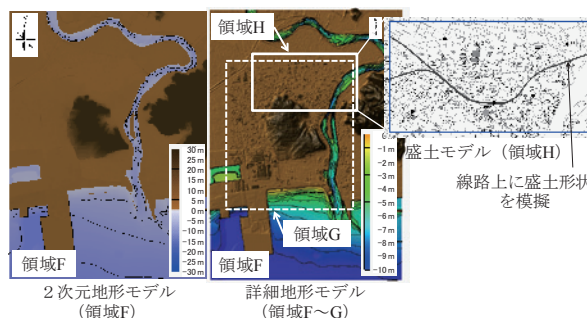


図2 津波浸水計算の対象領域 F ~ H の地形モデル

表1 津波浸水計算に用いた対象領域の大きさと計算格子間隔

解析手法	解析対象領域	領域の大きさ		計算格子間隔 (m)
		東西方向 (km)	南北方向 (km)	
2次元	A	1,035.180	1,702.215	1,215
	B	194.400	165.715	405
	C	113.805	124.335	135
	D	81.000	40.500	45
	E	13.500	13.500	15
	F	4.800	6.510	5
3次元	G	3.000	3.500	5

類のデータを使用してより詳細な地形モデル (詳細地形モデル) を作成した。また, 詳細地形モデルの作成に用いた3種類のデータを2次元計算の計算領域に適用して, 2次元計算において地形モデルの違いによる浸水状況の比較ができるようにした。

計算領域を通る鉄道路線の主たる線路構造は平地, 盛土および河川橋梁であるが, これらの構造物形状は上記の詳細地形モデルの作成に用いた3種類のデータに含まれていなかった。そのため, 計算領域内の一部のエリアに含まれる路線を一律に高さ3mの盛土とし, これを含む領域 H を設定した。

3.3 計算ケース

前節で述べた解析条件で津波浸水計算を実施した。計算ケースは解析手法、地形モデル、計算領域の異なる5ケース(表2)で、計算ケース(1)(2)を用いて2次元計算結果の、計算ケース(3)~(5)を用いて、3次元計算の妥当性を確認する。

4. 津波浸水深の計算結果の妥当性確認

4.1 津波の外洋伝搬に関する広域2次元計算の妥当性確認

津波の外洋伝搬に関する広域2次元計算の妥当性は、計算ケース(1)における領域A(図2)での津波水位の計算結果とGPS波浪計による津波水位データとを比較することで確認した。図3に計算結果との比較に用いたGPS波浪計の観測点を示す。6つの観測点のうち、例として宮城中部沖のGPS波浪計による津波水位の時系列(観測値)とGPS波浪計の観測点が位置する領域Aの計算格子での津波水位の時系列(計算値)を図4に示す。6つの観測点すべてにおいて例示した図4と同様に水位の時間変化が一致しており、両者が概ね整合していることを確認した。

4.2 津波の陸域遡上に関する広域2次元計算の妥当性確認

津波の陸域遡上に関する広域2次元計算の妥当性は、計算ケース(1)における領域D(計算格子間隔45m)の計算で得た津波の最大水位と観測値とを比較することで確認した。観測値は、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループにより計測された津波の痕跡データ⁷⁾とした。痕跡データは遡上した津波の先端部を示す遡上高と浸水高を測定して得られたものである(以降これらを合わせて痕跡高と表記する)。図5に2次元計算結果との比較のために抽出した144の痕跡高が調査された場所である評価ポイントを示す。

144箇所の評価ポイントでの痕跡高と当該の計測箇所が含まれる計算格子での2次元計算による津波水位の散布図を図6に示す。両データ間の相関係数は0.91で、強い正の相関関係があった。次に、原子力発電所の津波評価⁸⁾にも用いられた相田⁹⁾による幾何平均 K および幾何標準偏差 κ を指標として、計算結果の妥当性を評価する。 K および κ はそれぞれ式(5)および式(6)で定義される指標であり、 $0.95 < K < 1.05$ かつ $\kappa < 1.45$ であれば計算値と痕跡高とがよく合っていることを表すとされている。

$$\log K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log K_i \quad (5)$$

表2 本課題における津波浸水の計算ケース

計算ケース	解析手法	地形モデル	計算領域		備考
(1)	2次元	2次元地形	広域	A~F	波源は内閣府モデルを使用
(2)		詳細地形	狭域	F	初期・境界条件は計算ケース(1)の領域Eの計算結果を適用
(3)		盛土	狭域	H	初期・境界条件は計算ケース(2)の領域Fの計算結果を適用
(4)	3次元	詳細地形	狭域	G	
(5)		盛土	狭域	H	



図3 2次元計算(外洋伝播)の妥当性確認に用いたGPS波浪計の観測点分布

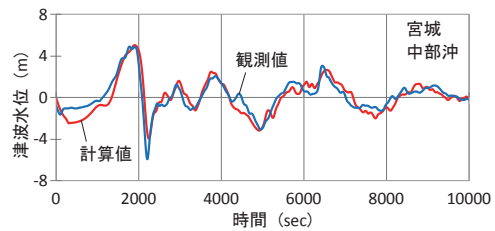


図4 津波水位に関するGPS波浪計による観測値と2次元計算結果との比較結果例(図中の時刻は地震発生時を0secとしている)



図5 広域2次元計算の妥当性の確認に用いた痕跡高の調査ポイントと痕跡高

$$\log \kappa = \left[\frac{1}{n} \left\{ \sum_{i=1}^n (\log K_i)^2 - n(\log K)^2 \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

ここで、 n は地点数、 K_i は、 i 番目の地点での痕跡高 R_i

特集：防災技術

および i 番目の地点での計算値 H_i を用いて $K_i=R_i/H_i$ で表される。図 7 に示したデータを用いて、 K および κ を求めたところ、 $K=0.96$ 、 $\kappa=1.33$ との結果を得た。これらのことから、計算格子間隔が 45m での津波水位に関する 2 次元計算結果は妥当であることが確認できた。

4.3 狭域 2 次元計算の妥当性確認

地形モデルの違いが計算結果に及ぼす影響を明らかにするために、狭域の 2 次元計算結果と観測値とを比較した。2 次元計算では、計算格子間隔を 5m とし、地形モデルとして 2 次元地形モデル（計算ケース (1)）と詳細地形モデル（計算ケース (2)）を使用した。観測値は広域の場合と同じく、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによる痕跡高を用いた。ただし、前節とは異なり、図 7 に示す領域 F の範囲内に痕跡高の評価ポイント 11 箇所を新たに選定した。

領域 F について異なる地形モデル（2 次元地形モデル：計算ケース (1) と詳細地形モデル：計算ケース (2)）にて得られた計算値と観測値との差を評価ポイントごとに図 8 に示す。図 8 において、最大水位の差がプラスの場合は計算値の方が観測値よりも大きく（過大評価）、最大水位の差がマイナスの場合は逆（過小評価）であることを示している。図 8 のポイント 6 については、地形モデルにて位置する計算格子に丘陵地および構造物が含まれており、計算値が算出されなかった。評価ポイントによってばらつきはあるものの、計算値と観測値との差は 2 次元地形モデルと詳細地形モデルとの間でほとんど違いがないことを確認した。ここで、前節と同様に K および κ を求めたところ、2 次元地形モデルは $K=0.78$ および $\kappa=1.31$ 、詳細地形モデルは $K=0.97$ および $\kappa=1.17$ であった。4.2 節より、2 次元地形モデルの $K(0.78)$ は 0.95 より小さく計算値と観測値がよく合っているといえない値であり、詳細地形モデルの $K(0.97)$ は 0.95 より大きく 1.05 より小さいことから計算値と観測値がよく合っているといえる。以上から計算格子間隔を 5m とした場合の 2 次元計算では、地形モデルが詳細であるほど計算結果の妥当性が高いことを確認した。

4.4 解析手法の違いによる狭域計算結果の比較

計算ケース (2) および (4) に基づく、詳細地形モデルを用いた狭域の 2 次元計算結果と 3 次元計算結果の比較について示す。前節と同様に、図 7 に示した評価ポイントにおける痕跡高と 2 次元計算および 3 次元計算の結果（最大水位）とを比較する。計算条件の違いは解析手法のみであり、2 次元、3 次元ともに計算格子間隔は 5m、地形モデルは詳細地形モデルである。図 9 に評価ポイント毎に異なる解析手法にて得た計算値と観測値との差を、図 10 に式 (3) および式 (4) より求めた K およ

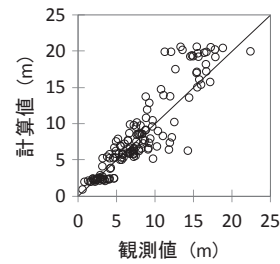


図 6 津波水位に関する観測値（痕跡高）と計算値との比較



図 7 狭域の 2 次元計算の妥当性の確認に用いた痕跡高調査ポイント

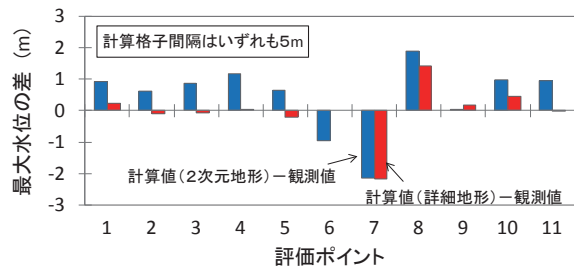


図 8 地形モデルの違いによる 2 次元計算結果と観測値との差の比較

び κ を示す。なお、図 10 には参考として、2 次元地形モデルを用いた 2 次元解析手法による計算結果から求めた K および κ も併記した。図 9 をみると、3 次元解析手法による計算値と観測値との差のほうが 2 次元解析手法によるそれに比較して小さい評価ポイントと、これとは逆に評価された評価ポイントが混在しており、解析手法の違いによる違いは明瞭ではなかった。図 10 において、詳細地形モデルを用いた 2 次元計算結果と 3 次元計算結果を用いた $K(0.97, 1.03)$ は両者とも観測値とよく合っており、図 9 と同様に両者の違いは明瞭ではなかった。 κ については、2 次元地形モデルを用いた 2 次元計算結果、詳細地形モデルを用いた 2 次元計算結果、3 次元計算結果はそれぞれ観測値とよく合っており、計算結果はすべて妥当といえる値であった。以上から、同じ地形モデルを用いれば、評価ポイントに関する限り解析手法による差はほとんどないといえる。

5. 盛土構造の考慮による狭域計算結果の比較

5.1 遡上先端部が盛土を越流する場合

前節の結果をみる限り、詳細地形モデルと5mの計算格子間隔の計算条件を前提にすれば解析手法の違いは津波浸水計算の結果には大きな影響を及ぼさないと評価される。しかしながら、前節では評価ポイントという点での比較であるため、前節の結果のみで面全部に渡って解析手法の違いが計算結果に及ぼす影響は小さいと結論づけることはできない。ここでは、領域H(図2)にて盛土モデル(3.2.3節参照)を用いて津波浸水計算を行った結果を用いて解析手法の違いを比較する。

図11に、領域Hにて盛土モデルを用いて計算した2次元計算および3次元計算の結果のうち、最大浸水深の平面分布を示す。同図より、2次元計算と3次元計算とでは計算された浸水の範囲と深さに違いがあることがわ

かる。浸水範囲は3次元計算の方が2次元計算のそれよりも広い。浸水深分布についてみると、盛土の南側エリアでは2次元計算と3次元計算とで大きな差異はないものの、盛土の北側エリアでは2次元計算のほうが3次元計算よりも広い範囲で大きな浸水深を計算した。また、図12に領域Hにおける初期波の到達時刻の分布を示す。最大浸水深と同様に、2次元と3次元で計算結果に違いがあり、津波の遡上は3次元計算の方が2次元計算よりも早く進行したことがわかる。これらの相違は、2次元計算では盛土など構造物の前面に到達した津波水位が完全に構造物の高さを超えないと越流を開始しないのに対し、3次元計算では構造物の高さを完全に超えなくても津波の鉛直流の成分の大きさに依存して越流を開始するという、津波の遡上先端部の計算方法の違いに起因するものと考えられる。

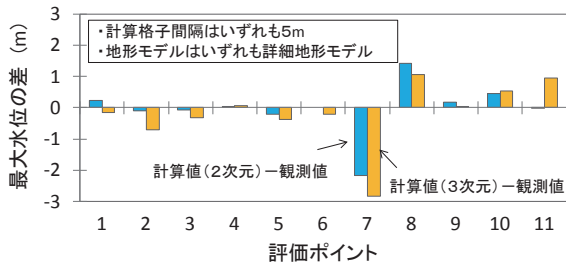


図9 計算手法の違いによる計算結果と観測値との差の比較

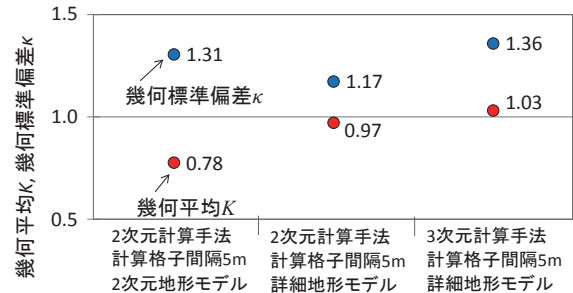
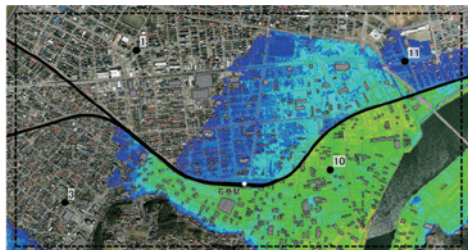
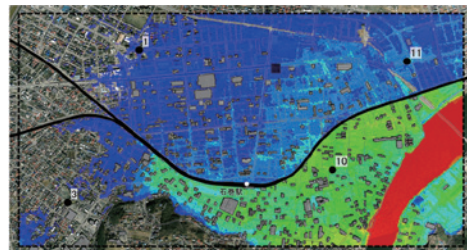


図10 計算手法の違いによる幾何平均Kと幾何標準偏差K

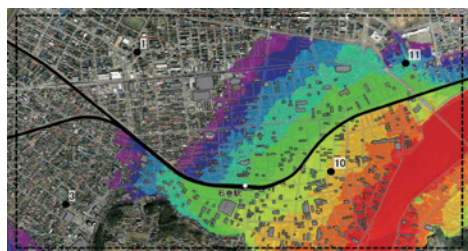


2次元解析手法による計算

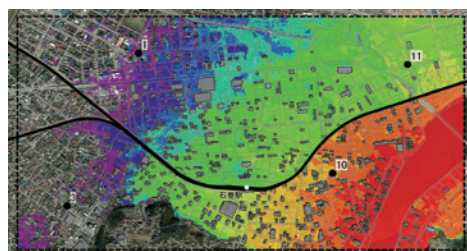


3次元解析手法による計算

図11 盛土モデルを用いた場合の解析手法の違いによる計算結果(最大浸水深)の比較 (津波波源モデルに内閣府モデルを用いた場合)



2次元解析手法による計算



3次元解析手法による計算

図12 盛土モデルを用いた場合の解析手法の違いによる計算結果(初期波の到達時間)の比較 (津波波源モデルに内閣府モデルを用いた場合)

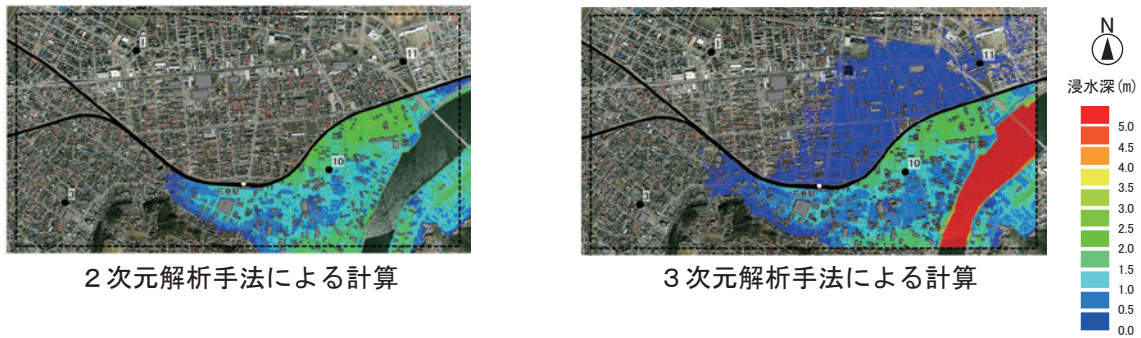


図 13 盛土モデルを用いた場合の解析手法の違いによる計算結果（最大浸水深）の比較
（津波波源モデルに70%内閣府モデルを用いた場合）

5.2 2次元計算において盛土を越流しない場合

津波の遡上先端部の計算方法の違いを確認する一環として、2次元計算では遡上先端部が盛土を越流しない浸水状況を再現するために、今回用いた津波波源モデルである内閣府モデルにおける断層すべり量を70%に調節し、このモデルを用いて2次元計算および3次元計算を実施した。その結果を図13に示す。同図によると、2次元計算では遡上先端部が盛土を越流しないため、盛土の北側エリアで浸水範囲は確認できない。その一方で、3次元計算では概ね0～0.5m程度の浸水深をもつ浸水範囲が盛土の北側エリアに広がっていた。このことから、盛土のような高さをもつ線状構造物が存在する場合、解析手法すなわち津波の遡上先端部の計算方法の違いによって、津波の遡上方向に対して構造物の下流側の領域では浸水範囲や浸水深が異なることがあるといえる。新規に浸水深マップを作成する、あるいは2次元の津波解析手法で作成されたマップを活用する際には、線状構造物の有無とその規模に留意する必要があることを示唆する結果であるといえる。

6. まとめ

本稿では鉄道の津波対策の支援を目指して、石巻駅周辺を含む領域をモデル領域に選定し、2次元および3次元の津波解析手法を用いて東北地方太平洋沖地震による津波の浸水深の計算を行った。その結果を以下にまとめる。

- ・地形モデルを詳細地形モデルとした場合、2次元計算と3次元計算の結果から求めた幾何平均および幾何偏差の値に大きな違いはなかった。
- ・2次元計算と3次元計算の結果の初期波の最大浸水深および到達時間を求めた結果、その浸水範囲および到達時間に違いがみられた。この違いは2次元計算と3次元計算で津波の遡上先端部の計算方法の違いに起因するものと考えられる。
- ・津波波源モデルとして使用した内閣府モデルの断層すべり量を70%に調節して計算した結果、2次元計算

では盛土を越流せず、3次元計算では越流するという結果になった。

- ・盛土のような高さをもつ線状構造物が存在する場合、解析手法すなわち津波の遡上先端部の計算方法の違いによって、津波の遡上方向に対して構造物の下流側の領域では浸水範囲や浸水深が異なる例を示した。

文 献

- 1) 首藤信夫：新体系土木工学 24 海の波の水理，技報堂出版，1979
- 2) ファム バン フック，長谷部雅伸，高橋郁夫：VOF法を用いた3次元津波解析に関する研究，土木学会論文集 B2, Vol.68, No.2, pp.I_71-I_75, 2012
- 3) 藤原了，唐木田泰久，國司晴夫，秋山伸一，田宮貴洋，是永真理子，佐藤暁拓，田向剛，臼井嘉哉，金伝栄，中村均：非線形長波理論解析と3次元流体解析との連結による津波シミュレーションの開発，計算工学講演会論文集，Vol.17, pp. B-3-1-4, 2012
- 4) 伊藤忠テクノソリューションズ：熱流体解析ソフト FINAS/CFD，http://www.engineering-eye.com/FINAS_CFD/index.html
- 5) Hirt, C. W. and Nicholls, B. D., : Volume of Fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries, J. Comput. Phys., Vol. 39, pp. 201-221, 1981.
- 6) 南海トラフの巨大地震モデル検討会：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震の津波断層モデルについて，南海トラフの巨大地震モデル検討会第12回会合 参考資料1，http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/12/pdf/sub_1.pdf, 2012
- 7) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ：痕跡調査結果，<http://www.coastal.jp/tjt/index.php>? 現地調査結果，2013
- 8) 土木学会 原子力土木委員会 津波評価部会：原子力発電所の津波評価技術（付属編），2002
- 9) 相田勇：三陸沖の古い津波のシミュレーション，東京大学地震研究所彙報，Vol.52, pp.71-101, 1977