

3次元津波シミュレーションと可視化技術

川崎, 浩司
ハイドロソフト技術研究所

<https://doi.org/10.15017/1956710>

出版情報：応用力学研究所研究集会報告. 29A0-S7 (1), pp.24-34, 2018-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン：

権利関係：

応用力学研究所研究集会報告 No.29AO-S7
「非線形波動研究の新潮流—理論とその応用—」 (研究代表者 辻本 諭)

Reports of RIAM Symposium No.29AO-S7

New trends in nonlinear waves - theory and applications -

Proceedings of a symposium held at Chikushi Campus, Kyushu University,
Kasuga, Fukuoka, Japan, November 9 - November 11, 2017

Article No. 04 (pp. 24 - 34)

3次元津波シミュレーションと 可視化技術

川崎 浩司 (KAWASAKI Koji)

(Received 15 January 2018; Accepted 12 March 2018)



Research Institute for Applied Mechanics
Kyushu University
March, 2018

3次元津波シミュレーションと可視化技術

(株)ハイドロソフト技術研究所 川崎浩司 (KAWASAKI Koji)

近年、3次元数値流体力学ツール OpenFOAM (Open source Field Operation And Manipulation) が海岸・海洋工学分野において利用されつつある。OpenFOAM は、多相流や燃焼、磁場などの用途に応じた各種ソルバを有しており、前処理や後処理のためのアプリケーションも充実している。本稿では、OpenFOAM を用いた3次元津波シミュレーションに関する研究事例と計算結果の可視化技術について紹介する。

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、津波によって東日本の太平洋沿岸を中心に深刻な被害が生じた。同地域は、過去に多くの津波被害を受けており、防波堤や防潮堤の築造、防潮扉の設置などの対策が講じられていた。しかし、津波はこれらの構造物を越えて内陸まで浸水し、壊滅的な被害をもたらした。今後、津波の防災・減災対策を考える上では、沿岸域における浸水特性に加えて、構造物の被災メカニズムに関連する流体と構造物の相互作用を解明することが必要不可欠である。

近年では、コンピュータの性能向上と高精度な数値計算スキームの開発により、数値解析による研究が多く行われている。流体と構造物の相互作用問題はFSI (Fluid-Structure Interaction) と呼ばれており、ANSYS FSI や LS-DYNA など、FSI 解析を行うソフトウェアも存在している。しかし、FSI 解析は計算負荷が大きくなりやすく、大規模な計算領域を扱いにくい。また、商用コードはプログラムの中身が確認できず、計算スキームの詳細な検討や改変が難しいといった欠点がある。こうした問題を克服するため、既存の商用ソフトウェアと同程度の機能と品質を備えたオープンソースソフトウェアを用いた研究が増えている。

坂本ら (2012) は、オープンソースの3次元数値流体力学ツール OpenFOAM (Open source Field Operation And Manipulation) (OpenFOAM Foundation, 2013) と構造解析モデルを組み合わせることで、1-way FSI モデルを構築した。同モデルを用いて、球形ガスホルダーに作用する津波波圧とそれによる構造物の変形を解析した。野中ら (2012) は、OpenFOAM と2次元流体解析モデル、構造解析モデルを組み合わせて、実際に津波によって被災した橋梁を対象に再現計算を行った。このように、流体と構造物の相互作用問題は工学的に重要であり、今後も解析・検討事例が増えていくものと思われる。

本稿では、3次元数値流体力学ツール OpenFOAM の計算事例として、2011年の東北地方太平洋沖地震で被災した釜石市唐丹町小白浜にある漁港の防潮堤を対象とした3次元津波-構造解析シミュレーションについて説明するとともに、計算結果の可視化技術についても紹介する。

2. 3次元流体—構造解析の概要

本研究で用いた3次元流体—構造解析モデルは、数値流体力学ツール OpenFOAM と構造解析ツール SeanFEM である。以下に、各モデルの概要と計算の流れを述べる。

(1) 3次元数値流体解析ツール OpenFOAM

OpenFOAM は、2004 年から GPL (GNU General Public License) のもとでソースコードが公開されている流体解析モデルであり、多相流、燃焼、磁場などの用途に応じた各種ソルバを有している。本研究では、OpenFOAM のうち、非圧縮・不混和流体の2相流ソルバである interFoam を採用した。基礎方程式は、以下に示す連続式(1)と非圧縮性流体の Navier-Stokes 方程式(2)である。

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla \cdot \mathbf{p}^* + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_s \quad (2)$$

ここで、 ∇ は3次元領域におけるベクトル微分演算子、 \mathbf{U} は流速ベクトル、 ρ は密度、 \mathbf{p}^* は疑似動圧、 $\boldsymbol{\tau}$ は粘性応力テンソル、 \mathbf{g} は重力加速度ベクトル、 \mathbf{f}_s は表面張力に相当する体積力である。

空間の離散化には有限体積法を用いており、流速と圧力は PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) 法で解かれる。気液界面の追跡には、Rusche (2002) と Weller (2002) によって改良された VOF (Volume Of Fluid) 法を用いている。その移流方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{U} \alpha + \nabla \cdot \mathbf{U}_c \alpha (1 - \alpha) = 0 \quad (3)$$

ここで、 α は流体の体積率を表す VOF 値 ($0 \leq \alpha \leq 1$)、 \mathbf{U} は気液相の平均流速である。 \mathbf{U}_c は気相と液相の相対流速であり、次式で定義されている。

$$|\mathbf{U}_c| = \min[c_\alpha |\mathbf{U}|, \max(|\mathbf{U}|)] \quad (4)$$

ここで、 c_α は、VOF 値の拡散を抑制するために、ユーザーが設定する変数である。本研究では、デフォルトの設定値である $c_\alpha=1.0$ を用いた。

(2) 3次元構造解析ツール SeanFEM

SeanFEM は、野中・吉野 (2010) が開発した有限要素法に基づいた構造解析ソフトウェアで、材料非線形性と幾何学的非線形性を同時に考慮した複合非線形解析を行うことができる。本研究では、防潮堤をシェル要素でモデル化した。本モデルのシェル要素は、図-1 に示すように、厚肉板構造に対応した積層タイプのシェル要素である。各層に対して、コンクリートと鉄筋の材料構成則を定義した。なお、図内の鉄筋層については、実際の鉄筋断面の等断面になるように板厚を決定し、鉄筋の評価をしている。

(3) 計算の流れ

図-2 に、本研究における3次元流体—構造解析の流れを示す。まず、OpenFOAM を用いて、対象とする防潮堤を含む領域で津波解析を行う。計算結果から、防潮堤に作用する波圧の時系列変化を抽出する。そして、得られた波圧の時系列を防潮堤に作用する外力として SeanFEM に与える

ことにより、構造解析を行う。

図-3 に、3次元流体解析で使用した計算領域を示す。本領域は、東北地方太平洋沖地震に伴う津波により被災した小白浜漁港をモデル化したものであり、被災前には沿岸部に防潮堤（D.L.+12.5m）が設置されていた。被災後は、写真-1 に示すように、中央付近の防潮堤が陸側へ倒れ込んでいる。

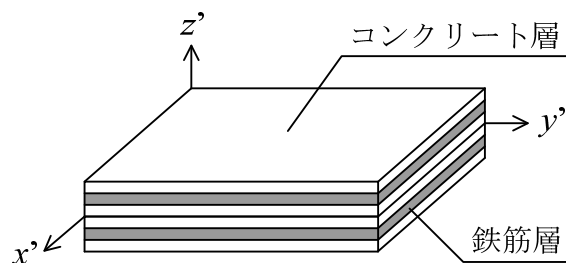


図-1 防潮堤のモデル化で用いたシェル要素の概念図

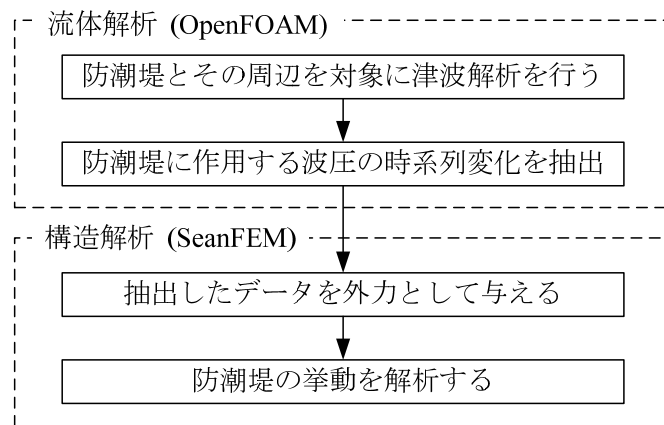


図-2 3次元流体-構造解析の流れ

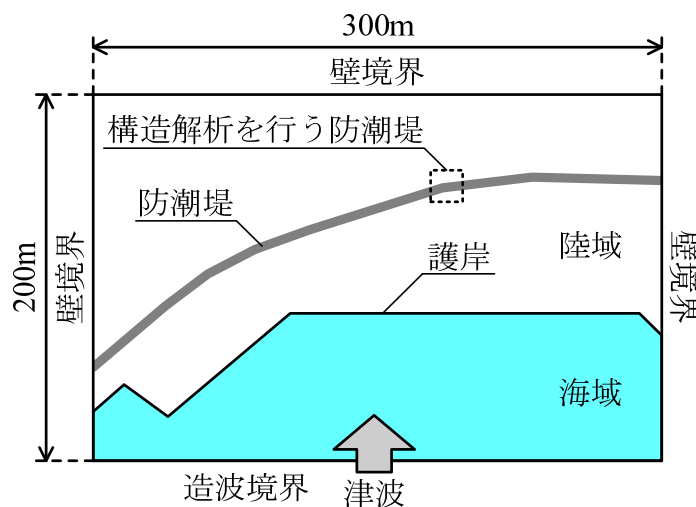


図-3 3次元流体解析の計算領域



写真-1 津波により倒壊した防潮堤

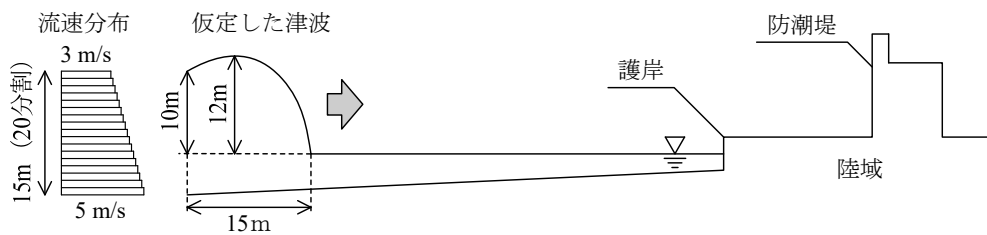


図-4 津波の造波条件

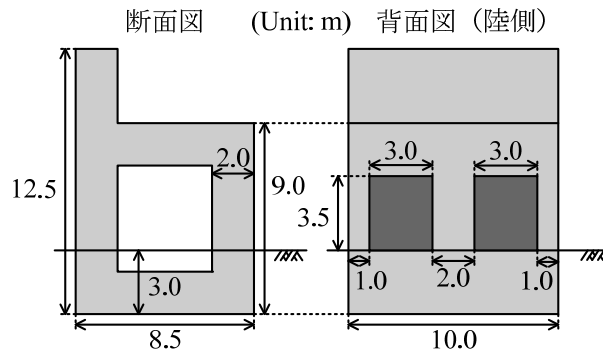


図-5 小白浜漁港防潮堤の模式図

津波の造波条件は図-4 に示すとおりである。津波の高さは、気象庁（2011）が発行している地震・火山月報に加え、事前に行った平面2次元津波伝播解析より、計算領域の沖側で10mと設定した。ただし、計算開始直後に段波の形状が崩れるのを防ぐため、陸側での初期水位を12mまで上げた。簡便のため、津波の高さは沿岸方向に変化させず、同図に示す流速分布を造波境界から与えた。

図-5 に、3次元構造解析で対象とする小白浜漁港の防潮堤の模式図を示す。底面から3mは地中に埋め込まれており、内部は道路を通すために中空となっている。解析では、実際に倒壊した部分から1ブロックを抽出し、非線形シェル要素でモデル化している。境界条件は、図-6 に示すとおりで、水平ばね、鉛直ばね、水平摩擦ばねの3種類を用いた。そして、防潮堤の海側に面した各節点に、3次元流体解析で得られた圧力を外力として与えて構造解析を行った。その他の計算条件は表-1 に示すとおりである。

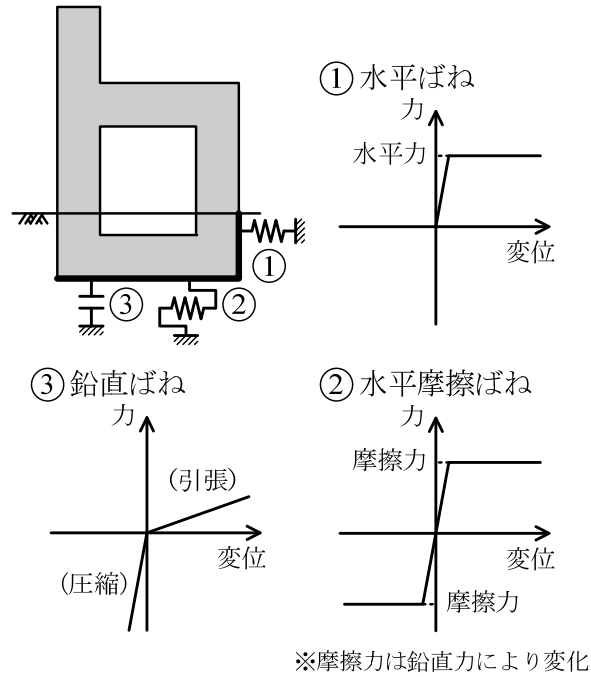


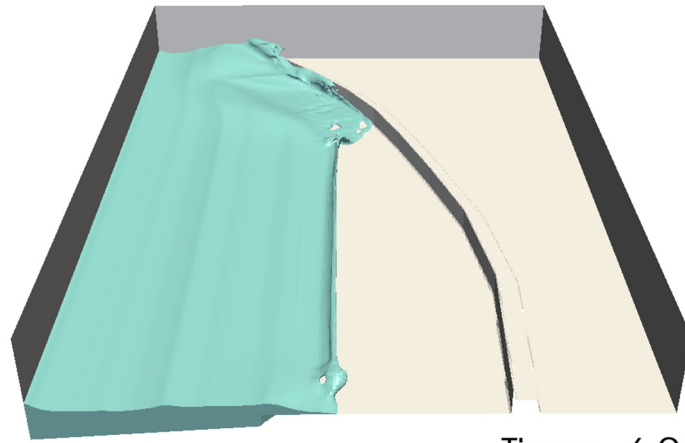
図-6 構造解析の境界条件

表-1 計算条件

流体解析 (OpenFOAM)	解析手法	有限体積法 (PISO 法)
	計算格子間隔	$\Delta x = 0.5\text{m}$ $\Delta y = 0.5\text{m}$ $\Delta z = 0.42 \sim 0.75\text{m}$
	計算格子数	4,193,211
	計算時間間隔	自動制御 (最大クーラン数 0.5)
	流体密度	空気: 1 [kg/m ³]
		水: 1000 [kg/m ³]
	動粘性係数	空気: 1.59×10^{-5} [m ² /s]
水: 1.00×10^{-6} [m ² /s]		
乱流モデル	使用しない	
構造解析 (SeanFEM)	解析手法	有限要素法 (updated Lagrange 法)
	節点数	845
	計算時間間隔	0.1 [s]

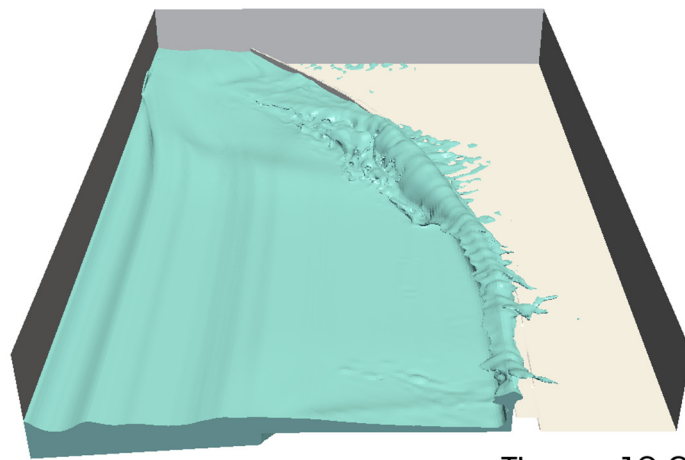
3. 計算結果および考察

図-7 に、3次元流体解析における水面挙動を例示する。ここで、時刻 t は計算開始からの経過時間を示す。同図(a)および(b)より、沿岸に到達した津波が陸上に打ち上がり、その後、防潮堤を越えている様子が確認される。同図(c) では、防潮堤前面の水位がさらに上昇し、防潮堤を越流して内陸まで浸水していることがわかる。



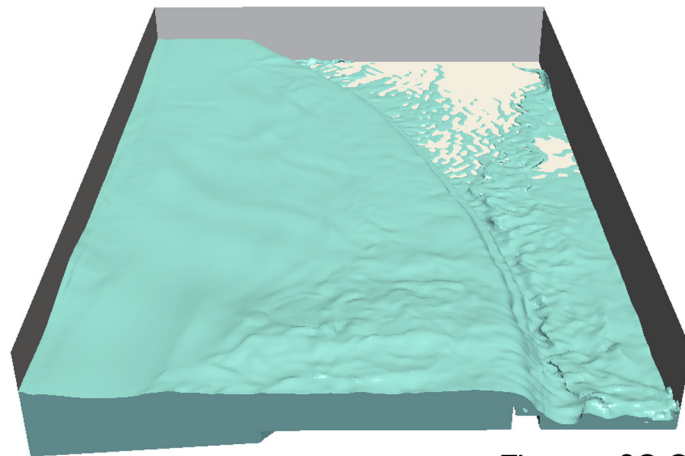
Time: 6.0

(a) $t=6s$



Time: 12.0

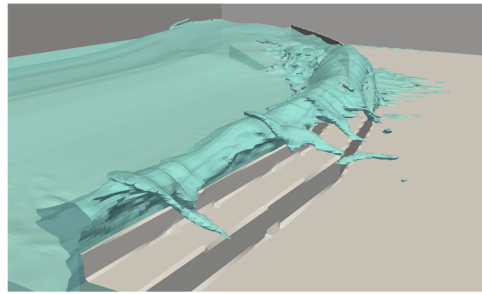
(b) $t=12s$



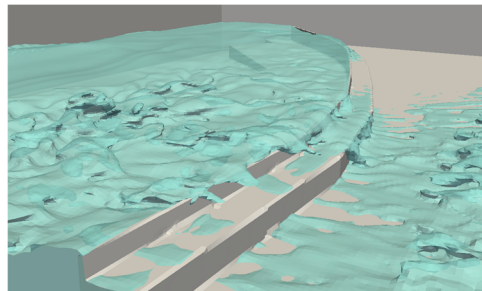
Time: 30.0

(c) $t=30s$

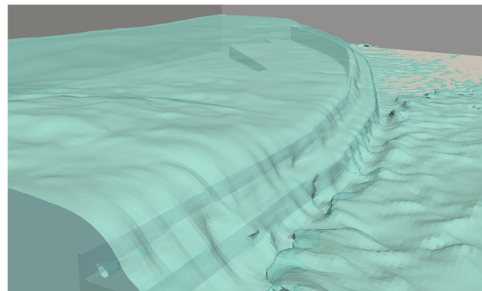
図-7 計算領域全体の水面挙動



(a) $t = 12\text{s}$



(b) $t = 20\text{s}$

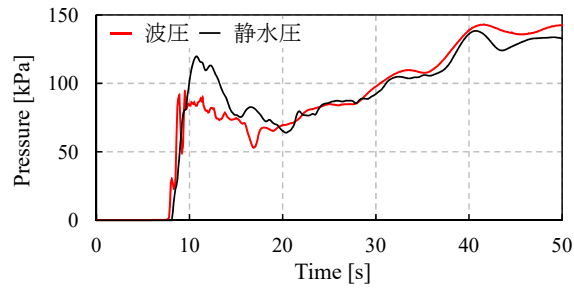


(c) $t = 30\text{s}$

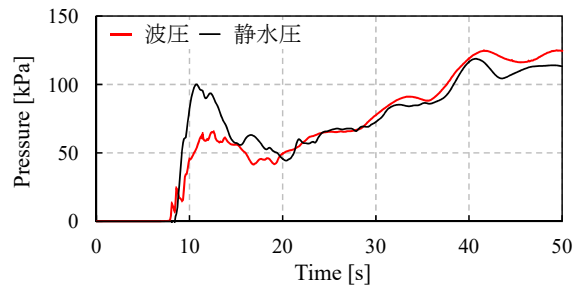
図-8 防潮堤付近の水面挙動

図-8 は、防潮堤付近の水面挙動を拡大して図示したものである。同図(a)より、OpenFOAM は、津波が打ち上がる瞬間に激しく変動する水面挙動を計算可能であることが確認される。同図(b)では、陸域が浸水するとともに、海側の水位が上昇している。その後、同図(c)では、津波が防潮堤を大きく越流している様子がわかる。被災時の映像においても、防潮堤の倒壊前に津波が越流していることを確認しており、定性的ではあるが、OpenFOAM が実際の被災状況を再現しているといえる。このように、大規模な計算領域かつ自由表面が複雑に変化する水理現象に対して、OpenFOAM は安定して解析できることから、その有用性が認められる。

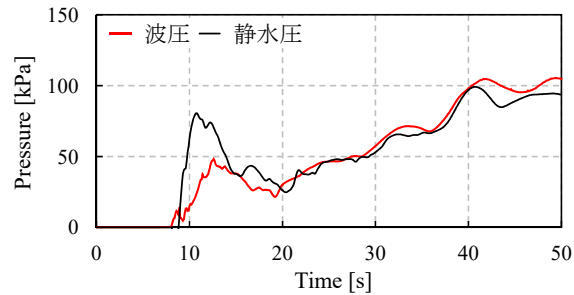
図-9 に、防潮堤前面における作用波圧の時系列変化を例示する。ここで、(a)~(c)はそれぞれ地表から 2m, 4m, 6m の高さの場合である。また、防潮堤の前面 50cm における水面変動を抜き出し、各点で推定される静水圧も併せて示した。同図から、津波到達時（時刻 $t = 9.0\text{s}$ 付近）に波圧が急激に立ち上がり、一度ゆるやかに減少した後、次第に増加していく様子がわかる。波形の立ち上がりをみると、波圧のピーク値は静水圧よりも小さいことがわかる。その後、波圧は静水圧とほぼ同様に増加し、時刻 $t = 40 \sim 50\text{s}$ 付近で最大になっている。このとき、地表からの高さ 2m を示す図(a)では、150kPa 近い波圧がかかっている。また、同時刻の付近では、防潮堤の越流量も大きくなっていることを流体解析結果から確認している。地表 2m からより高い位置になると、衝撃波圧と越流後の作用波圧がともに小さくなっていることがわかる。



(a) 地表からの高さ 2m



(b) 地表からの高さ 4m



(c) 地表からの高さ 6m

図-9 防潮堤前面における波圧の時間変化

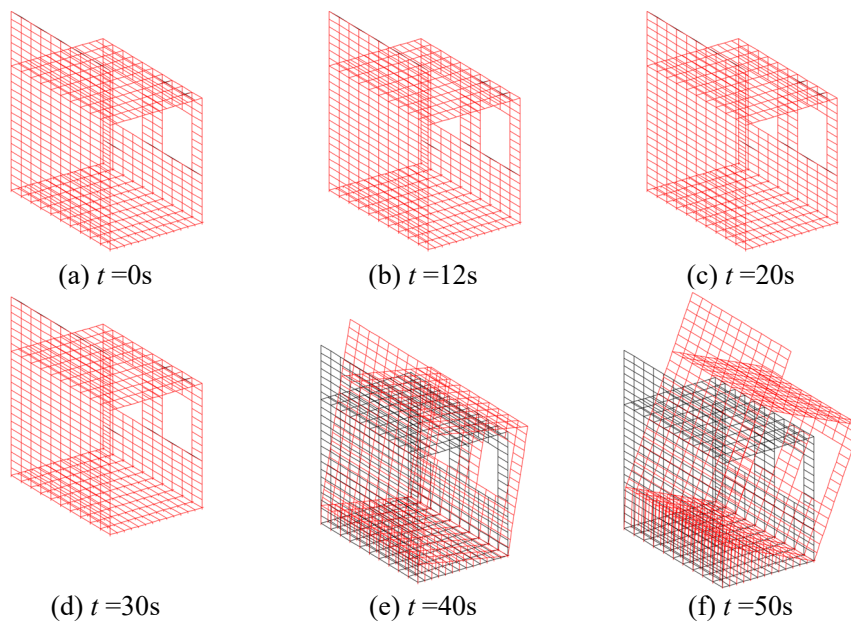


図-10 防潮堤の変形図 (変形倍率 5 倍)

図-10に、3次元構造解析における防潮堤の変形図を示す。ここでは、変形倍率を5倍としている。同図および図-9より、波圧が急激に増加した後も、防潮堤はしばらくの間、動いていないことがわかる。その後、波圧が著しく増加する時刻 $t=30\sim 40s$ で、防潮堤が大きく陸側に傾いた後、陸側下端を中心に回転している。

前述したとおり、小白浜漁港の防潮堤が倒壊した際の現地映像を解析した結果、被災時においても、津波の越流後に防潮堤が陸側に転倒していた。今回の構造解析では、防潮堤の完全な転倒には至っていないが、現地の被災状況を定性的に表現できたと考えられる。よって、本研究で提案した3次元流体-構造解析モデルは、現地の被災状況を良好に再現されることから、構造物の被災メカニズムを解明することが可能なモデルといえる。しかしながら、今回は同モデルを定量的に評価していないため、流体-構造解析モデルの更なる検証が必要である。

4. 計算結果の可視化技術

今後、南海トラフ巨大地震津波など、より甚大な沿岸災害が発生する恐れがあり、ハード対策だけでなく、ソフト対策の充実が必要不可欠である。そのため、これまで多くの自治体で災害ハザードマップの作成・公表が進められてきた。しかし、従来のハザードマップは、最大浸水深など限られた情報のみが主に提供されていたため、対象地域の災害特性が想像しにくく、災害リスクも正しく理解されないなど、住民の防災意識の向上に十分に寄与していなかったと考えられる。

そこで、本章では、南海トラフ巨大地震で甚大な津波被害が懸念されている名古屋港周辺を対象に3次元津波解析を実施し、計算結果の可視化技術について検討を行った。地形データは、内閣府による10mメッシュのデータと国土地理院による航空レーザ測量データを用いて作成した。国土地理院のデータは、地上高と建物情報が記録された2/27秒(約2m)間隔メッシュである。国土地理院のデータは陸域のみ記録されていないため、水域部については内閣府のデータを用いた。建物については、普通建物および堅牢建物のみを対象とした。また、計算では、側境界で流量一定を設定することで、簡易的に津波を発生させた。

図-11に、名古屋港周辺を3次元津波解析結果の一例を示す。同図から、沿岸災害を仮想的に経験・把握できる3次元アニメーション・スナップショットの活用は有効であることがわかる。特に、建物、道路などの空中写真を活用するとともに、光源効果を取り入れた水面挙動の表示などを施すことにより、より現実味を帯びた可視化となるよう工夫している。

おわりに

本稿では、3次元数値流体力学ツールOpenFOAMと有限要素法による構造解析ツールSeanFEMに基づく3次元津波-構造解析モデルについて解説するとともに、釜石市唐丹町小白浜にある漁港の防潮堤を対象に津波-構造解析シミュレーションを行い、モデルの有用性について検討した。また、名古屋港周辺を対象とした3次元数値流体力学ツールOpenFOAMによる津波解析結果の可視化技術についても紹介した。

数値解析の観点から津波災害をはじめ自然災害を把握・予測することは、工学面のみならず、防災・減災の面においても極めて重要であり、今後、津波シミュレーション技術と可視化技術の更なる飛躍が期待される。



(a) $t=0s$



(b) $t=60s$



(c) $t=120s$



(d) $t=300s$

図-11 名古屋港における津波浸水シミュレーションに関する可視化技術

参考文献

- 気象庁 (2011) : 地震・火山月報 (防災編) (オンライン), <http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/gaikyo/monthly201103.pdf>.
- 坂本佳子・菅付紘一・野中哲也・吉野広一・宇佐美勉 (2012) : 球形ガスホルダーに対する津波解析手法の提案, 土木学会年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM), 第 67 巻, No. I-602.
- 野中哲也・本橋英樹・原田隆典・坂本佳子・菅付紘一・宇佐美勉 (2012) : 津波波源から橋梁までの全体系津波再現解析, 第 15 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.25-32.
- 野中哲也・吉野廣一 (2010) : パソコンで解く ファイバーモデルによる弾塑性有限変位解析, 丸善, pp.2-52.
- OpenFOAM Foundation (2013) : OpenFOAM User Guide, <http://www.openfoam.org/docs/user/>.
- Rusche, H. (2002) : Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flows at high phase fractions, PhD thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, pp.152-154.
- Weller, H. G. (2002) : Derivation, modelling and solution of the conditionally averaged two-phase flow equations, Technical Report TR/HGW/02, Nabla Ltd., 29p.