

複雑地形や広域街区における VOF 法を用いた大規模 3 次元津波遡上解析

○ 清水建設 (株) 正会員 ファム バン フック
 清水建設 (株) 正会員 田中 栄次
 清水建設 (株) 正会員 長谷部 雅伸
 清水建設 (株) 非会員 高橋 郁夫

1. はじめに

津波遡上解析には、一般的に 2 次元浅水長波モデルによる平面計算が用いられているが、構造物などによる影響は土地利用の粗度や構造物の被覆率を考慮して底面粗度を変化させることにとどまっている。しかしながら、陸上に遡上する津波は建物群などの構造物配置や地形の影響を受けて、複雑な流れ場となっており、その挙動は強い非線形性・分散性をもつ。このような複雑な流れ場を精度良く再現するためには、沿岸地域の建物や構造物及び地形等を詳細に考慮できる 3 次元津波遡上解析が必要となる。本研究では VOF 法 (Volume of Fluid Method)¹⁾ を用い、3 次元津波の遡上解析を実施し、既往の遡上津波水理実験結果との比較により精度検証を行うとともに、街区全体を対象とした大規模解析による地形や建物群の影響を考察する。

2. 解析手法の概要と精度検証

(a) 解析手法の概要

本研究では水と空気で作成される二相流モデルを用い、自由界面の挙動は VOF 法により再現する。基礎方程式は以下の連続式と運動量保存の式によって構成される。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla(p) + \mu \nabla(\nabla \mathbf{u}) + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{u} : 流速ベクトル、 p : 圧力、 μ : 流体の分子粘性係数、 \mathbf{g} : 重力加速度ベクトルである。なお、式(3)中の ρ_1 、 ρ_2 はそれぞれ水と空気の密度、 α は水の体積分率 ($0 < \alpha < 1$)、 ρ は両者の混在を考慮した見かけの流体密度である。

基礎方程式(1)、(2)の空間的離散化には有限体積法を用い、流速と圧力の連成解法には PISO 法を採用した。また、移流項の空間的離散化には 1 次精度中心差分、時間発展には 1 次精度陰解法を用いて、乱流モデルには LES モデルを使用した。なお、本解析ではオープンソース OpenFOAM²⁾ を用いた。

(b) 遡上津波水理実験の再現による精度検証

津波の伝搬・遡上過程と建物の影響による津波変形の予測精度を検証するため、既往の水理実験³⁾の再現計算を行った(図-1、縮尺 : 1/200)。計算格子間隔は 10mm~2.5mm と建物周辺ほど細くなるよう

細分化を行った。図-2 には解析結果の一例として、遡上津波が建物に衝突する瞬間の図を示す。このように単純な建物形状を対象としても、周囲の流体は複雑な挙動を示すことが分かる。図-3 は海域での水位変動及び建物全面での浸水深を実験結果⁴⁾と比較した図を示すが、実験結果との良好な一致が確認できた。なお、計算精度検討の詳細は参考文献^{5,6)}を参照されたい。

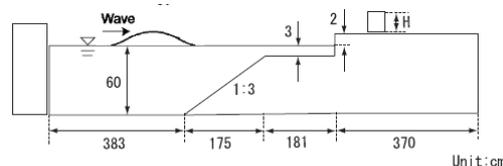


図-1 遡上津波水理実験の概要³⁾

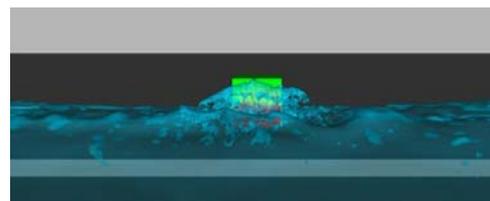


図-2 遡上津波が建物に衝突する瞬間

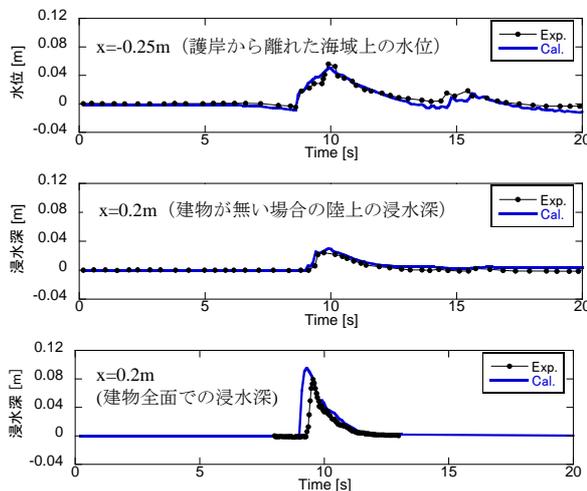


図-3 海域での水位変動及び陸域での浸水深の履歴

3. 大規模 3 次元津波遡上解析

VOF 法による 3 次元津波遡上解析の実用性と、複雑な地形、建物群などの津波遡上への影響を検討するために、沿岸の街区全体を対象とした 6km×6km の大規模 3 次元津波解析を行った。街区周辺においては計算格子間隔は 5m~1m とし、建物周辺ほど計算格子が小さくなるよう細分化を施した。入射波は前述の水理実験で用いた波形をフルードの相似則により実機換算したものを用いた。図-4 に建物近傍の計算格子の一例

を示す。なお、全体の計算格子数は約5千万である。

図-5には津波が汀線付近に到達し、街区への遡上が開始する直前の図を示す。図-5の右上部分の山が海岸線に迫り急峻な地形になっており、その部分では既に津波の遡上が開始して、局所的な波の集中や複雑な反射波の発生が確認できる。図-6にはそれぞれの視点から見た街区での津波の遡上の様子を示す。大きな建物のある部分では津波遡上が阻止され、路地や空地等に沿って進行する様子が見られる。図-7は最大水位 h_{max} を沖合波高 h_0 で無次元化した分布図である。浸水範囲および最大水位は建物密度や地形条件によって大きく変化し、地形が急峻で狭窄している箇所では水位が非常に大きくなる様子が、建物が少ない平野地では浸水域が広がる様子が見られる。

4. まとめ

本研究では、VOF法を用いた3次元津波解析システムを構築し、既存の実験結果との比較により解析システムの予測精度を検証した。また、複雑地形や建物群を含む広域の沿岸街区を対象とした大規模3次元解析を実施し、狭窄した急峻地形での波の局所的な集中や、建物と構造物集中箇所における遡上抑制効果を確認した。

謝辞

本システムによる計算検討は、東京工業大学 学術国際情報センターのTSUBAME共同利用(産業利用)の採択課題「複雑地形を考慮した超大規模津波波力解析システムの開発」により実施した。ここに、記して謝意を表す。

参考文献

- 1) C. W. Hirt and B. D. Nichols : Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, J. Comput. Phys., 39, pp.201-225, 1981.
- 2) OpenFOAM: User Guide, 2012, <http://www.openfoam.com/>.
- 3) チャルレス シマモラ, 嶋原良典, 藤間功司: 建物群に作用する津波波力に関する水理実験, 海岸工学論文集, 第54, pp.831-835, 2007.
- 4) 中村 友昭, 水谷 法美, 藤間 功司: 遡上津波の変形と陸上構造物に作用する津波力に関する3次元数値シミュレーション, 日本流体力学会誌 29(2), pp.107-117, 2010.
- 5) P.V.Phuc: 複雑地形を考慮した超大規模津波波力解析システムの開発, 平成23年度TSUBAME共同利用(産業利用)成果報告書, 2012.
- 6) P.V.Phuc, 他: 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(海岸工学), 第59巻, 2012(投稿中).



図-5 津波が陸域に遡上しつつある時点の全体図

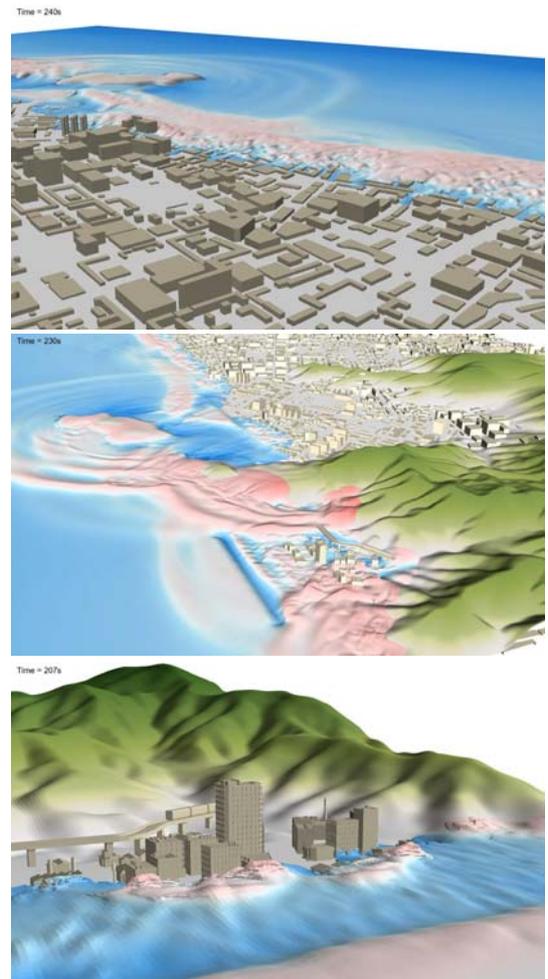


図-6 街区での津波遡上の拡大図

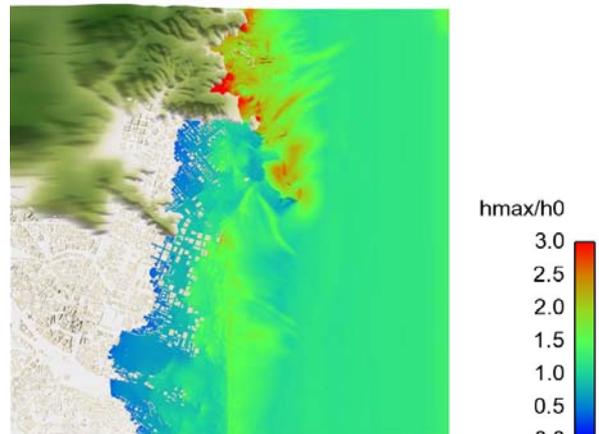


図-7 最大水位分布(沖合波高での無次元値)

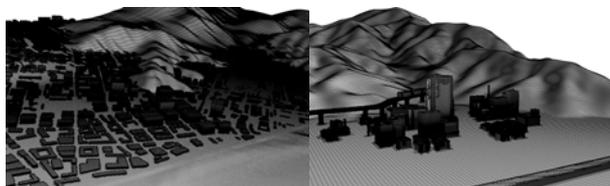


図-4 建物近傍のメッシュの拡大図