

安定化有限要素法による建物倒壊を考慮した津波シミュレーション

中央大学大学院	学生員	大野 友平
東京建設コンサルタント	正会員	高橋 佑典
エイト日本技術開発	正会員	大川 博史
中央大学	正会員	樫山 和男

1. はじめに

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う津波被害により、防災・減災対策を行う上で数値シミュレーションの重要性が改めて認識され、その精度の向上が求められている。津波の被害検討には津波遡上域の解析を精度良く行う必要があり、これまで建物の影響は一般に粗度として考慮することが多かった。しかし、建物の倒壊により発生する漂流物が遡上域に与える影響は大きいと言える。

そこで本論文では、津波のシミュレーションにおいて、建物の倒壊に伴い発生する漂流物の影響を建物密度の移流、拡散によって簡易的に考慮する方法について提案する。なお、支配方程式には Boussinesq 方程式を用い、離散化手法には SUPG 法に基づく安定化有限要素法¹⁾を用いる。数値解析例として、建物の倒壊を考慮した津波遡上問題を取り上げ、実地形のモデルを用いて本手法の妥当性を検討する。

2. 数値解析手法

(1) 津波遡上計算

支配方程式には、以下に示す非線形性と分散性を考慮した Boussinesq 方程式（非線形分散波方程式）を用いる。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A}_i \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mathbf{N}_{ij} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial^2}{\partial t \partial x_i} (\mathbf{K}) + \mathbf{R} - \mathbf{G}\mathbf{U} \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{U} は未知数ベクトルであり、 \mathbf{K} , \mathbf{R} , \mathbf{A}_i , \mathbf{N}_{ij} , \mathbf{G} はそれぞれ分散項、水底勾配項、移流項、拡散項、摩擦項に対する行列である。

支配方程式 (1) に対して、空間方向の離散化として三角形一次要素を用い、SUPG 法に基づく安定化有限要素法を適用する。時間方向の離散化として、2次精度を有する Crank-Nicolson 法を用いる。また連立一次方程式の解法には、Element-By-Element Bi-CGSTAB 法を用いる。遡上域における移動境界手法は、複雑地形に対しての適合性に優れた、固定メッシュに基づく Euler 的手法を用いる。

(2) 構造物影響評価

建物の倒壊を考慮したシミュレーションを行うため、構造物倒壊手法を導入する。¹⁾ この方法では、構造物内部にも有限要素分割を行い、構造物の境界に境界条件（non-slip 条件）を与える。（図-1(a)）そして各構造物に働く流体力を、時間ステップごとに計算された流速と水位、および密度を用いて、構造物周り一層分のメッシュにより構成される領域 Ω^0 で算定し流体力を求める。（図-1(b)）そして、その流体力が構造物の倒壊にいたる抗力の指標を超えたとき、そ

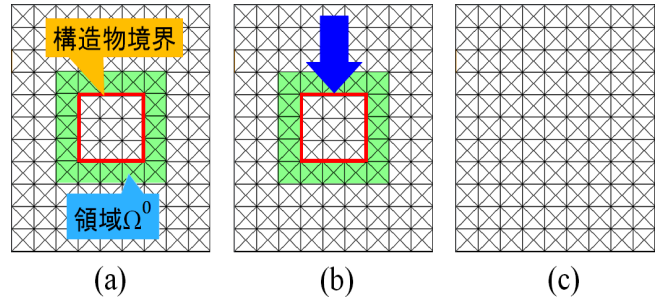


図-1 建物倒壊アルゴリズム

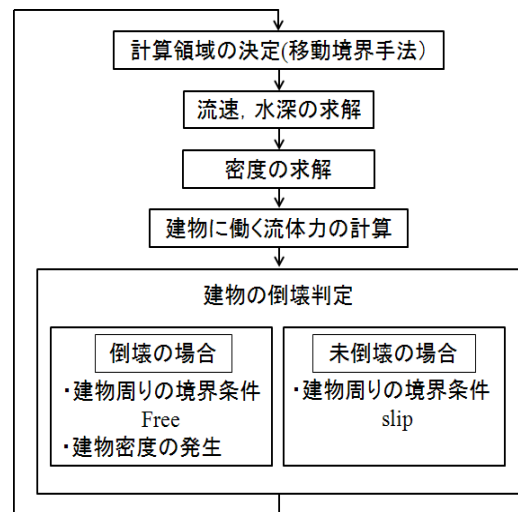


図-2 本手法のフローチャート

の構造物は倒壊と判定し、構造物周りの境界条件、および内部の節点条件を Free として解析を行っていく。（図-1(c)）

建物の倒壊後は、その建物の平均密度が建物部分のメッシュ全域に発生し、次式の移流拡散方程式に従って移流、拡散していくものとする。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho - \mathbf{k} \cdot \nabla^2 \rho = 0 \quad (2)$$

ここで、 ρ は密度であり、 \mathbf{u} は移流速度、 \mathbf{k} は拡散係数である。移流拡散方程式 (2) に対して、空間方向の離散化として、三角形一次要素を用い、SUPG 法に基づく安定化有限要素法を適用する。流れ場と同様に時間方向の離散化として、Crank-Nicolson 法を用い、連立一次方程式の解法には、Element-By-Element Bi-CGSTAB 法を用いる。

図-2 に、本手法のフローチャートを示す。解析手順としては、まず移動境界手法により計算領域を決定し、流速及び

KeyWords: 安定化有限要素法, Boussinesq 方程式, 移動境界手法, 建物密度の移流, 構造物倒壊, 流体力

連絡先: 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 TEL 03-3817-1815

水深の求解を行う。次に密度の求解，建物に働く力の算出の後，構造物の倒壊判定を行う。その手順を繰り返し行っていく。

3. 数値解析例

(1) 解析条件

本手法の妥当性の検討を行うため，建物を有する津波遡上問題をとり上げる。

図-3 に，解析モデルを示す。宮城県気仙沼市沿岸域周辺の幅 900m，長さ 1300m の領域を対象とし，陸域に 7 つの木造構造物（緑色），6 つのコンクリート構造物（黄色）を設置，初期条件として沖合に水位差 30m の段波を発生させる。建物境界の境界条件は non-slip 条件として解析を行った。また，水の密度，建物倒壊に伴い発生する建物密度をそれぞれ 1000kg/m^3 ， 2000kg/m^3 ，マンシングの粗度係数を $n = 0.025\text{s/m}^{1/3}$ ，拡散係数を x, y 方向ともに $1.0\text{m}^2/\text{s}$ とした。構造物の倒壊にいたる抗力の指標は木造構造物，コンクリート構造物それぞれ仮定の 49kN/m ， 900kN/m と仮定した。解析に用いるメッシュは，GIS を用いて得られた地形データを基に修正 Delaunay 法³⁾ によって生成した三角形非構造格子であり，メッシュ幅は約 5m である。

(2) 解析結果

図-4, 図-5 にそれぞれ $t=56\text{s}$ の流れ場の様子（水位， y 方向の流速）を示す。発生した津波が陸域へ遡上，建物に衝突し，抗力値の低い木造構造物は倒壊，抗力値の高いコンクリート構造物は倒壊していないことが確認できる。

また，図-6 に $t=56\text{s}$ の密度移流の様子を示す。建物倒壊に伴い発生した建物密度が移流，拡散していき，後方の構造物に衝突している様子が確認できる。

4. おわりに

本論文では，津波のシミュレーションにおいて，建物の倒壊に伴い発生する漂流物の影響を建物密度の移流によって簡易的に考慮する方法について提案し，数値解析例として実地形のモデルを用いて建物倒壊を考慮した津波遡上解析を行った。その結果，抗力値の低い木造構造物の倒壊が確認されるとともに，建物倒壊に伴い発生した建物密度が移流，拡散していく様子が確認され，本手法の妥当性を示した。

今後の課題として，建物密度による流体力の変化に対する定量的な評価が挙げられる。

参考文献

- 1) 利根川大介，榎山和男：安定化有限要素法による津波遡上および流体力の解析手法の構築，応用力学論文集，Vol.12, pp.127-134, 2009
- 2) 前野貴弘，榎山和男，牧野優作，大川博史：安定化有限要素法による建物の倒壊を考慮した津波遡上解析：土木学会関東支部第 38 回技術研究発表会，II-1, 2010
- 3) 橙木聡史，榎山和男，高橋佑典，大川博史：大規模水害シミュレーションのための自動要素生成に関する研究：土木学会関東支部第 40 回技術研究発表会，I-1, 2012

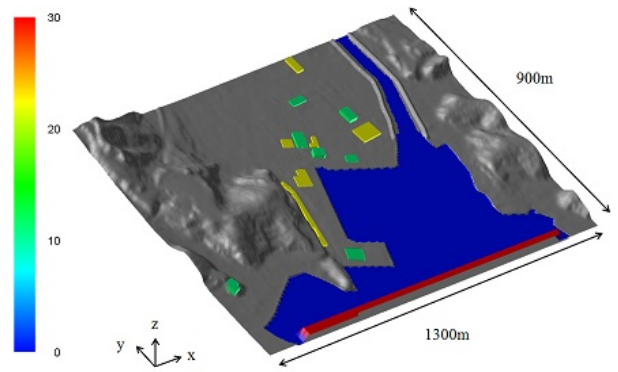


図-3 解析モデル

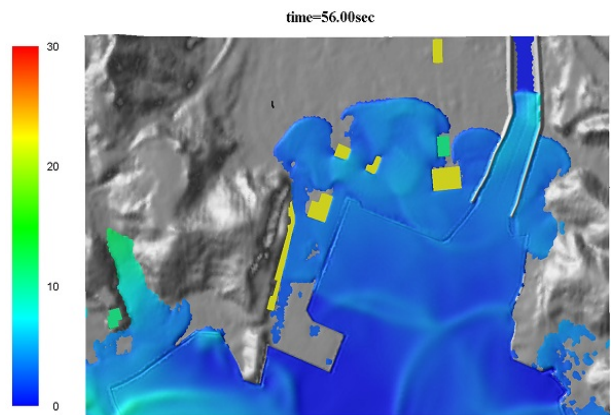


図-4 $t=56\text{s}$ の流れ場の様子（水位）

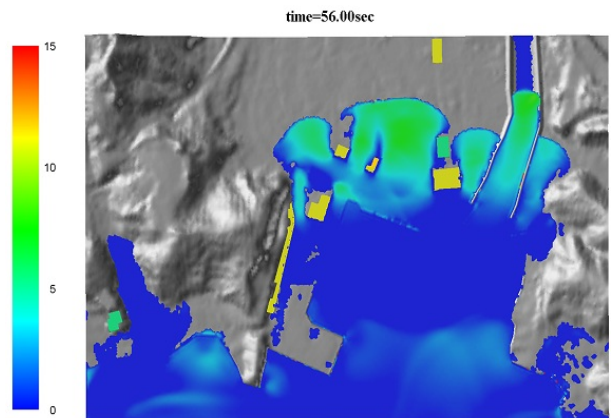


図-5 $t=56\text{s}$ の流れ場の様子（ y 方向の流速）

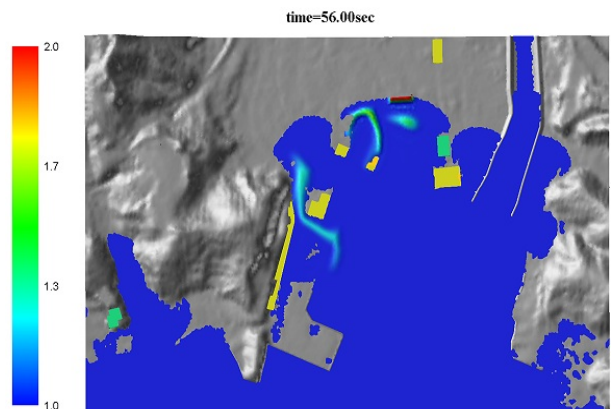


図-6 $t=56\text{s}$ の密度移流の様子