

2D-3D ハイブリッド解析手法と等方性損傷モデルを用いた流体-構造連成解析

中央大学大学院 学生員 ○金澤 功樹
中央大学 非会員 凌 国明
茨城大学 正会員 車谷 麻緒
中央大学 正会員 檜山 和男

1. はじめに

津波による構造物への被害を評価することは防災上の観点から非常に重要である。そのためには構造物に作用する流体力を精度よく求め、構造物の破壊挙動を予測する必要がある。著者らは広範囲の解析が可能でかつ、構造物に作用する流体力を高精度に評価可能なオーバーラッピング手法を用いた2次元・3次元ハイブリッド津波解析手法¹⁾を構築してきた。また、車谷らは、破壊力学に基づく損傷モデルを用いることで、コンクリートの破壊挙動を高い精度で再現し、ひび割れ進展解析可能な手法²⁾を確立している。

本研究では、これらの手法を統合した流体-構造連成解析を行い津波によるコンクリート構造物へのひび割れ進展過程を再現する。

2. 2D-3D ハイブリッド津波解析手法

(1) 支配方程式と離散化手法

沖合から海岸付近の津波解析に用いる支配方程式として浅水長波理論に基づく2次元浅水長波方程式を用いる。以下に、浅水長波方程式(1)と平均流に対する連続式(2)を示す。

$$\frac{\partial(U_i H)}{\partial t} + \frac{\partial(U_j U_i)}{\partial x_j} + \nu_e \frac{\partial^2(U_i H)}{\partial x_j^2} + \frac{gn^2 U_i \sqrt{U_i U_j}}{H^{\frac{1}{3}}} + gH \frac{\partial(H+z)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(U_i H)}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

ここで、 U_i は x_i 方向の断面平均流速、 H は全水深、 g は重力加速度、 ν_e は渦動粘性係数、 n はマンニングの粗度係数、 z は標高である。

一方、3次元領域の自由表面流れ解析(VOF法³⁾)の支配方程式にはNavier-Stokes方程式(3)と連続式(4)、VOF関数の計算に用いる移流方程式(5)である。以下にこれらの式を示す。

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - f_i \right) + \frac{\partial P}{\partial x_i} - \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u_i \frac{\partial \phi}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

ここで、 ρ は密度、 u_i は x_i 方向の流速、 f は物体力、 P は圧力、 μ は粘性係数である。 ϕ は自由表面流れにおける界面の位置を表現する界面関数である、また、各節点の密度 ρ 、粘性係数 μ は以下の式より定義される。

$$\rho = \rho_i \phi + \rho_g (1 - \phi) \quad (6)$$

$$\mu = \mu_i \phi + \mu_g (1 - \phi) \quad (7)$$

ここで、添え字 l, g はそれぞれ液体、気体を表している。支配方程式(1)、(2)、(5)に対しては、SUPG法に基づく安定化有限要素法⁴⁾を、支配方程式(3)、(4)に対してはSUPG/PSPG法に基づく安定化有限要素法⁴⁾を用いて空間方向に離散化している。時間方向の離散化にはCrank-Nicolson法を適用している。2D-3Dハイブリッド津波解析手法の詳細については参考文献¹⁾を参照されたい。

3. 動的破壊解析手法

本研究では、動的解析手法に粘性を考慮せず慣性力のみを考慮した非減衰動的解析を用いる。

(1) 等方性損傷モデル

車谷らによって考案された等方性損傷モデル²⁾を、動的構造解析に組み込むことで構造物の破壊挙動を再現する。損傷モデルの構成式は以下の式で表される。

$$\sigma = (1 - D) c : \varepsilon \quad (8)$$

ここで、 σ は応力テンソル、 c は弾性係数テンソル、 ε はひずみテンソル、 D ($0 \leq D \leq 1$) は損傷変数である。損傷の判定にはひずみテンソルをスカラー値へ変換した等価ひずみ ε_{eq} を用いる。

変形履歴における最大の等価ひずみを用いて損傷係数を求める。損傷係数 $D(\varepsilon_{eq})$ は以下の式で求められる。

$$D(\varepsilon_{eq}) = 1 - \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{eq}} \exp \left(- \frac{E \varepsilon_{eq} h_e}{G_f} (\varepsilon_{eq} - \varepsilon_0) \right) \quad (9)$$

ここで、 E は弾性係数、 ε_0 は破壊発生ひずみ、 h_e は要素の代表長さ、 G_f は破壊エネルギーである。

(2) 支配方程式と離散化手法

支配方程式は応力の釣り合い方程式に単位体積当たりの慣性力を考慮した運動方程式である。以下に運動方程式を示す。

$$\nabla^T \sigma' + b + B = 0 \quad (10)$$

KeyWords: 2D-3D hybrid tsunami numerical model, Isotropic damage model, Fluid-structure Interaction Model

連絡先: 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 TEL: 03-3817-1815 E-mail: a14.sgns@g.chuo-u.ac.jp

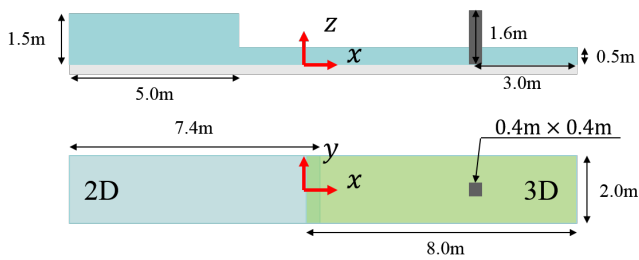


図-1 解析モデル

ここで、 σ' は応力ベクトル、 b は物体力ベクトル、 B は慣性力ベクトルである。支配方程式 (10) に対して空間方向に有限要素法を、時間方向に Newmark の β 法を用いて離散化している ($\gamma = 0.5, \beta = 0.25$)。動的破壊解析手法の詳細については参考文献²⁾を参照されたい。

4. 数値解析例

本手法の妥当性の検証のため、図-1 に示すような数値解析例題を取り上げる。

(1) 解析モデルと解析条件

要素分割幅は流体領域、構造領域共に 0.05m である。二次元領域は三角形一次要素を、三次元領域には四面体一次要素を用いている。流体解析については、境界条件として領域境界は slip 条件、構造物境界は no-slip 条件を与えている。液体の密度、気体の密度、液体の粘性係数、気体の粘性係数はそれぞれ 998.0 kg/m^3 , 1.205 kg/m^3 , $1.01 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $1.81 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ とする。動的破壊解析については、境界条件として、底辺 ($z=0$) の変位を全て固定した。コンクリートの材料パラメータである密度、弾性係数、ポワソン比、引張圧縮強度比、破壊発生ひずみ、破壊エネルギーはそれぞれ 2400 kg/m^3 , 30 GPa , 0.2 , 10 , 0.0001 , 100 N/m とする。

(2) 解析結果

図-2 に、1 秒毎の津波解析結果とコンクリート構造物の動的破壊解析における変形履歴における等価ひずみの最大値を示す。この結果より、津波が構造物に衝突すると等価ひずみの最大値が更新されていくことが確認できる。しかし、この解析例では等価ひずみ値が破壊発生ひずみを上回ることなく損傷はしない結果となった。

5. おわりに

流体-構造連成解析を行い津波によるコンクリート構造物へのひび割れ進展過程を再現し、以下の結論を得た。

- 2D-3D ハイブリッド津波解析手法を用いることで比較的低い計算コストで構造物周りの三次元流体解析を行うことが可能となった。
- 流体力を外力としたコンクリート構造物の動的破壊解析を行い、本手法において流体と構造の連成解析が定性的に行われていることが確認できた。

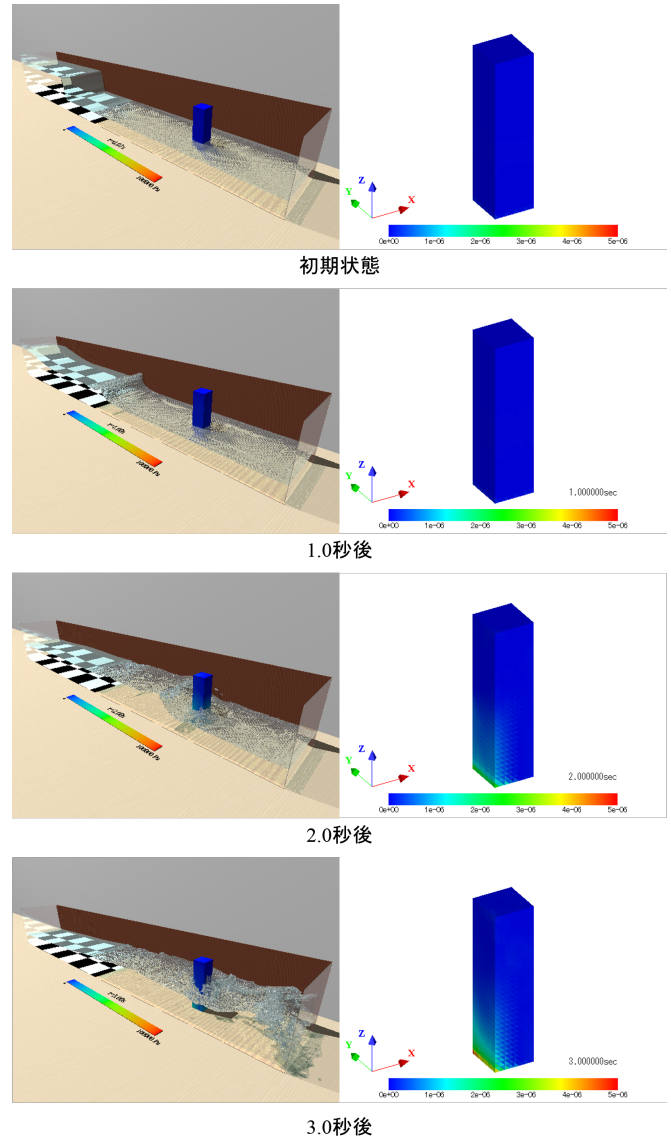


図-2 解析結果

今後の課題として、本手法の有効性を定量的に評価することが挙げられる。

参考文献

- 1) 凌国明, 松本純一, 檜山和男, 任意格子に基づくオーバーラッピング手法を用いた 2 次元・3 次元ハイブリッド津波解析手法, 応用力学論文集 19, 2016, pp. 285-293.
- 2) 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 加藤準治, 京谷孝史, 檜山和男: コンクリートの破壊力学に基づく等方性損傷モデルの定式化とその性能評価, 日本計算力学工学会論文集, 13, 2013, pp. 20130015.
- 3) Hirt, C.W., Nichols, B.D.: Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries, Journal of Computational Physics, Vol. 39, 1981, pp. 201-225.
- 4) 日本計算工学会: 第 3 版 有限要素法による流れのシミュレーション, 丸善出版株式会社, 2017.
- 5) 利根川大介, 檜山和男: 安定化有限要素法による非線形分散波理論に基づいた津波遡上解析手法の構築研究, 応用力学論文集 12, 2009, pp. 127-134.