

等方性損傷モデルを用いた流体-構造連成解析手法の構築

Development of a numerical method for fluid-structure interaction using isotropic damage model

18N3100009I 金澤 功樹 (計算力学研究室)

Isaki KANAZAWA / Computational Mechanics Lab.

Key Words : tsunami, isotropic damage model, FSI

1. はじめに

我が国は四方を海に囲まれているため津波による被害を予測することは大切である．特に，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．これまで著者らはコンクリート構造物を対象として等方性損傷モデルを用いた二次元流体-構造連成解析手法の構築を行ってきた¹⁾．この手法によって津波の波力を外力としたコンクリート構造物の動的な損傷解析が可能となった．しかし，二次元解析では実際の構造物が持つ複雑な形状を再現した解析を行うことは困難であり，三次元解析ではその再現は可能であるが，広大な領域を解析することは計算コストの観点から非現実的である．

本研究では，上記の問題を解決するため，流体-構造連成解析手法を三次元に拡張し，高効率な流体解析手法である 2D-3D ハイブリッド解析手法²⁾の導入により計算コストの削減を行った．本論文では三次元流体解析と三次元構造解析による連成解析例を通して，構築した連成解析手法の妥当性の検証および，2D-3D ハイブリッド解析手法を用いた流体解析と三次元構造解析のカップリングの妥当性の検証について述べる．

2. 流体-構造連成解析手法

図-1 に構築した本手法の解析フローチャートを示す．青色の部分に流体解析，橙色の部分に構造解析に関する箇所である．流体解析，構造解析，連成解析手法の詳細について以下に示す．

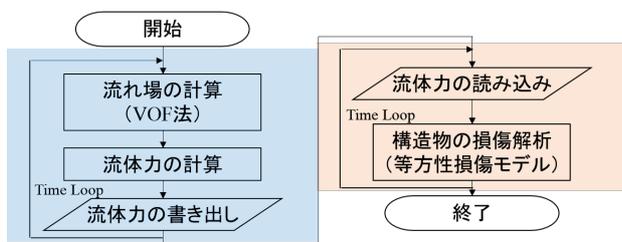


図-1 解析フローチャート

(1) 流体解析

流体解析手法として三次元自由表面流れ解析手法を用いる．支配方程式は Navier-Stokes 方程式 (1) と連続式 (2) である．また，VOF 法³⁾を用いて自由表面流れ解析を行っており，界面関数の移流には移流方程式 (3) を用いている．

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - f_i \right) + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u_i \frac{\partial \phi}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

ここで， ρ は密度， u_i は x_i 方向の流速， f_i 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，各要素の密度 ρ ，粘性係数 μ は以下の式より定義される．

$$\rho = \rho_l \phi + \rho_g (1 - \phi) \quad (4)$$

$$\mu = \mu_l \phi + \mu_g (1 - \phi) \quad (5)$$

ここで， $\rho_l, \rho_g, \mu_l, \mu_g$ はそれぞれ液体の密度，気体の密度，液体の粘性係数，気体の粘性係数である．離散化手法として，支配方程式 (1), (2) に対して，空間方向には移流の卓越に起因する数値振動と非圧縮条件の過拘束に起因する数値振動を抑制するために，SUPG/PSPG 法に基づく安定化有限要素法⁵⁾を適用している．支配方程式 (3) に対しては SUPG 法に基づく安定化有限要素法を適用している．時間方向には共に Crank-Nicolson 法を適用している．なお，有限要素としては四面体 (P1/P1) 要素を用いている．流体解析はノード間の情報交換をメッセージ通信で行う MPI ライブラリを用いて並列計算を行っている．

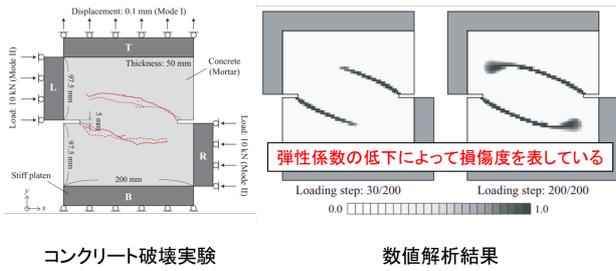


図-2 等方性損傷モデルの概念図⁴⁾

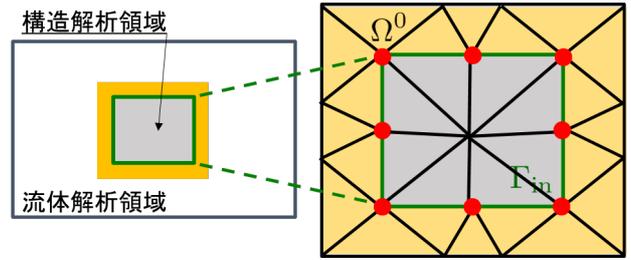


図-3 流体力評価

(2) 構造解析

動的構造解析手法として減衰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。車谷らによって提案された等方性損傷モデル⁴⁾を動的構造解析に組み込むことで構造物の破壊挙動及びひずみ軟化挙動を再現する。支配方程式は応力のつり合い方程式 (6)、応力-ひずみ関係式 (7)、ひずみ-変位関係式 (8) である。

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + b_i + B_i = 0 \quad (6)$$

$$\sigma_{ij} = (1 - D) c_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

ここで、 σ_{ij} は応力テンソル、 b_i は物体力、 B_i は慣性力、 c_{ijkl} は弾性係数行列、 ε_{ij} はひずみテンソル、 D は損傷変数である。図-2に損傷モデルの概念図⁴⁾を示す。図-2(左)に示すようなコンクリートの破壊実験では赤線のようにひびが生じる。等方性損傷モデルを用いたコンクリートの損傷解析では、損傷した要素の弾性係数を低下させることによって間接的にひび割れを再現する。損傷変数 D が 0 であれば要素が全く損傷していない、1 であれば完全に損傷している状態を表す。損傷変数 D は以下の式 (9) で表される。

$$D(\kappa) = 1 - \frac{\kappa_0}{\kappa} \exp \left(-\frac{E \kappa_0 h_e}{G_f} (\kappa - \kappa_0) \right) \quad (9)$$

ここで、 κ は解析の時刻歴における等価ひずみの最大値、 κ_0 は破壊発生ひずみ、 E はヤング率、 h_e は要素サイズ、 G_f は破壊エネルギーである。また、等価ひずみとは複数のひずみ成分をスカラー値で表したものであり、以下の式 (8) で表される。

$$\varepsilon_q = \frac{k-1}{2k(1-2\nu)} I_1 + \sqrt{\left(\frac{k+1}{1-2\nu} I_1 \right)^2 + \frac{12k}{(1+\nu)^2} J_2} \quad (8)$$

ここで、 k は圧縮引張強度比、 ν はポアソン比、 I_1 はひずみテンソルの第 1 不変量、 J_2 は偏差ひずみテンソルの第 2 不変量である。離散化手法として、空間方向には四面体要素を用いた有限要素法を適用している。時間方向には Newmark の法を適用している。等方性損傷モデルを用いた動的破壊解析手法の詳細及び妥当性については参考文献⁴⁾を参照されたい。

(3) 連成解析手法

流体解析により求めた構造物に作用する流体力を構造解析の外力とすることで流体-構造連成解析を行う。図-3(左)に示すような流体力を求めたい構造物境界 Γ_{in} 周りの領域 Ω^0 に対して支配方程式 (1), (2) を適用する。その際に、式 (1), (2) に重み付き残差法を適用し、圧力項と粘性項に対して部分積分を施すと以下のような重み付き残差式 (5) を得られる。

$$\int_{\Omega^0} w_i \rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - f_i \right) d\Omega - \int_{\Omega^0} \frac{\partial w_i}{\partial x_i} p d\Omega + \int_{\Omega^0} q \frac{\partial u_i}{\partial x_i} p d\Omega + \int_{\Omega^0} \frac{\partial w_i}{\partial x_i} \mu \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) d\Omega = \int_{\Gamma_{in}} w_i \left(-p \delta_{ij} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) dn_j d\Gamma \quad (5)$$

ここで、 w_i は流速に関する重み関数、 q は圧力に関する重み関数である。式 (5) の右辺の境界積分項が構造物に作用する流体力である。この流体力を流体解析時に毎ステップ求め、構造解析の外力として与える。流体力を構造解析の外力として受け渡すには、図-3のように、流体解析、構造解析それぞれに用いるメッシュの節点が共有されていなければならない。また、本手法において構造物の変位は微小とし、構造物の変形によって流体解析領域は変化しないと仮定する。

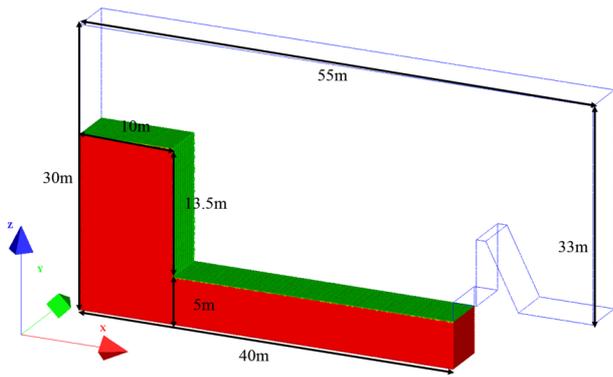


図-4 段波問題解析モデル（流体）

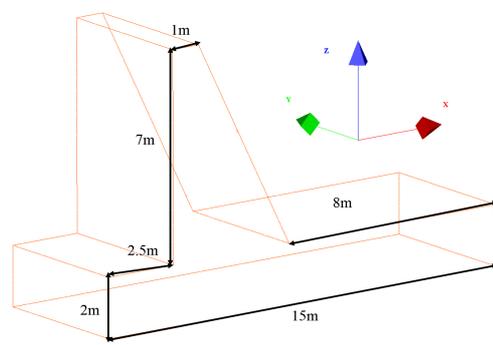


図-5 段波問題解析モデル（構造）

3. 数値解析例

(1) 段波問題

a) 解析条件

流体解析モデルを図-4示す．流体の密度・粘性係数は20の時の水，空気の値を用いている．初期条件として，13.5mの仮想段波を流体解析領域左端から10mの位置まで設定した．流体解析における境界条件はslip条件である．構造解析モデルを図-5示す．構造物の材質は一般的なコンクリートと仮定し，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 $2,400\text{kg/m}^3$ ， 30GPa ， 0.2 ， 10 ， 10^{-4} ， 100N/m とする．幾何的境界条件としては，構造物の底面の変位を全て固定している．また，力学的境界条件としては，流体解析で得られた構造物に作用する流体力を与えている．流体，構造要素共に奥行き方向は5.0m，要素サイズは約15cmである．時間増分量は0.01秒である

b) 解析結果

解析結果を図-6に示す．流れ場の様子とMises応力を図-6の左に，損傷変数を右に示す．Mises応力のコン

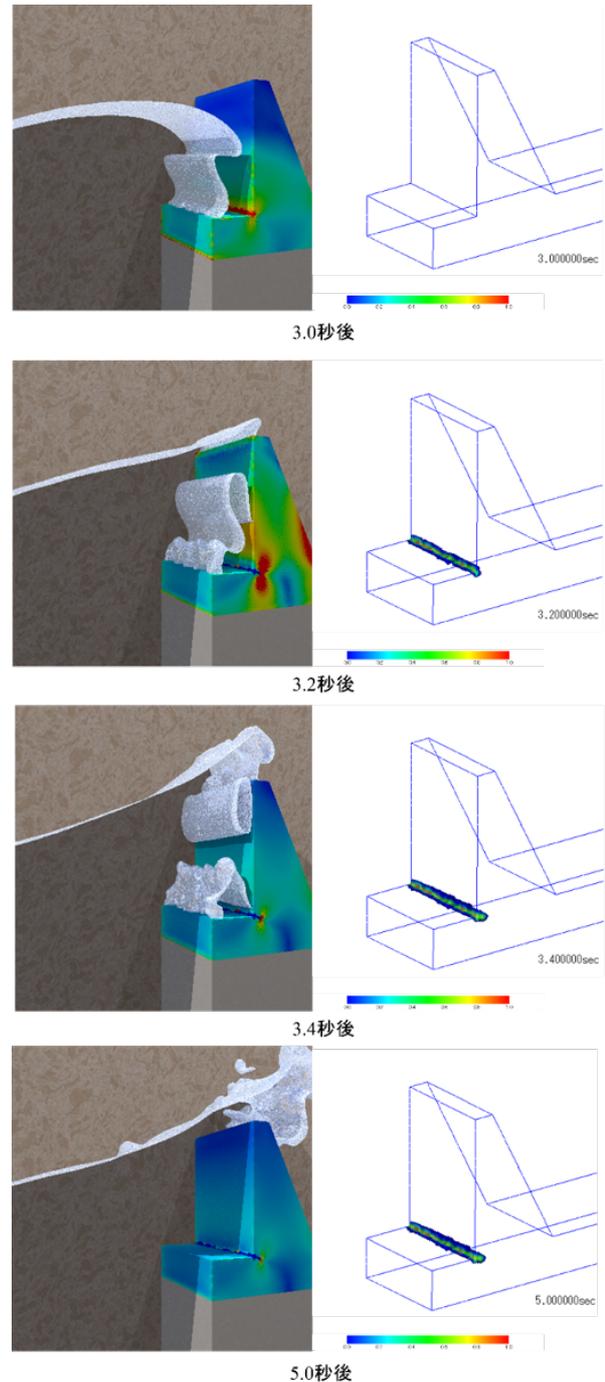


図-6 段波問題解析結果

ターは青が 0Pa ，赤が 10^6Pa である．解析結果は3.0秒後，3.2秒後，3.4秒後，5.0秒後の様子である．解析結果より，津波がコンクリート構造物に衝突すると構造物の損傷が発生し，ひび割れが進展していく様子が確認できる．3.4秒後の構造物の損傷した部分の拡大図を図-6に示す．この結果より，損傷した要素には応力が作用していないことも確認できる．

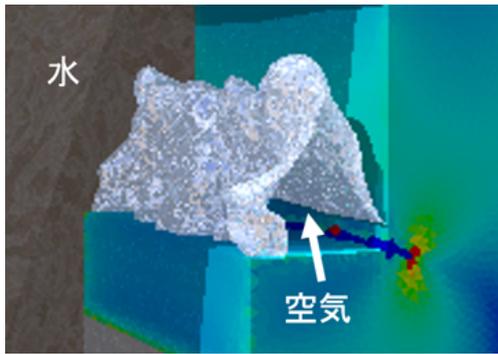


図-7 構造物に作用する Mises 応力 (3.4 秒時点)

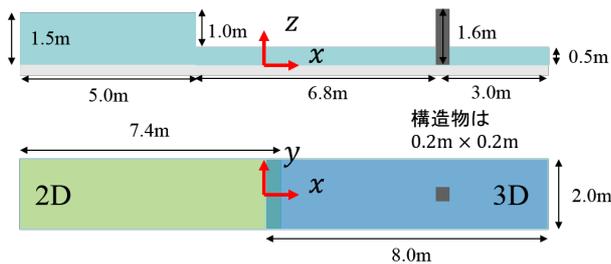


図-8 2D-3D ハイブリッド解析手法とのカップリング問題解析モデル

(2) 2D-3D ハイブリッド解析とのカップリング問題

a) 解析条件

解析モデルを図-8に示す。流体の密度・粘性係数は20の時の水、空気の値を用いている。初期条件として、1.0mの仮想段波を解析領域左端から5.0mの位置まで設定した。流体、構造要素共に奥行き方向は2.0m、要素サイズは約5.0cmである。時間増分量は0.001秒である。各領域の接続境界条件を求める際に用いるオーバーラップ領域は40cm、要素8層分設置した。また、2D-3Dハイブリッド解析手法の詳細、浅水長波流れ解析については参考文献^{(2) (6)}を参照されたい。その他の解析条件は段波問題の数値解析例と同様である。

b) 解析結果

図-9に、初期状態、1.0秒、2.0秒、3.0秒時点のの流れ場の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、2D-3Dハイブリッド解析手法を用いた場合でも、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。また、この解析例では構造物に作用する流体力が小さいため、構造物が損傷することはなかった。

4. おわりに

三次元流体-構造連成解析手法の構築を行い、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。

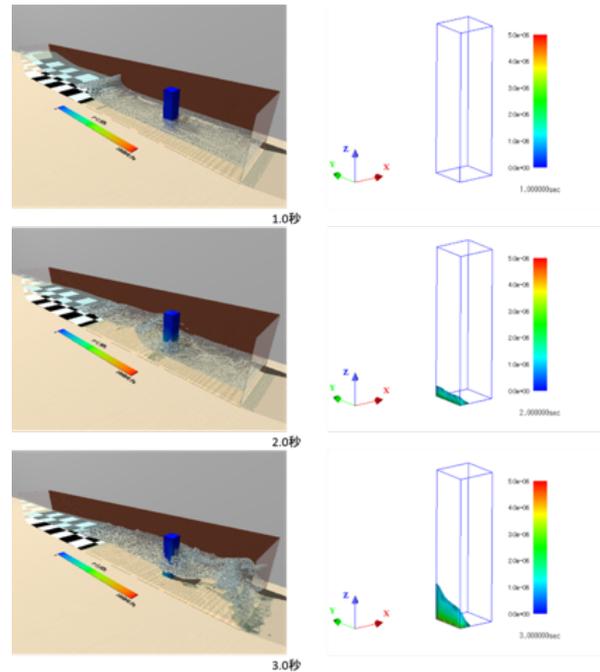


図-9 2D-3D ハイブリッド解析手法とのカップリング問題解析結果

- 従来の二次元の流体-構造連成解析手法を三次元に拡張し、本手法の定性的な妥当性を確認した。
- 2D-3Dハイブリッド津波解析手法とのカップリングの定性的な妥当性について検証し、本手法が実地形を対象とした解析に適用可能であることを確認した。

今後の課題として、実験解や参照解との比較により本手法の妥当性の定量的な検証や本手法の実地形解析への適用を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 小谷慎弥, 車谷麻緒, 凌国明, 櫻山和男, 破壊力学に基づく損傷モデルによる流体力を受けるコンクリート構造物の動的破壊解析, 第46回土木学会関東支部技術研究発表会講演集, I-71, 2018.
- 2) 凌国明, 松本純一, 櫻山和男, 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, Vol. 19, pp. 285-293, 2016.
- 3) C.W. Hirt, and B.D. Nichols, Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries, Journal of Computational Physics, Vol. 39, pp. 201-225, 1981.
- 4) M. Kurumatani, K. Terada, J. Kato, T. Kyoya and K. Kashiya, An isotropic damage model based on fracture mechanics for concrete, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 155, pp. 49-66, 2016.
- 5) 日本計算工学会編, 第3版 有限要素法による流れのシミュレーション, 丸善, pp. 59-155, 2017.
- 6) 利根川大輔, 櫻山和男: 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, Vol.12, pp.127-134, 2009.