

等方性損傷モデルを用いた三次元流体-構造連成解析手法の構築

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

1. はじめに

我が国は四方を海に囲まれているため、津波の予測を行うことが必要不可欠である。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、動的な津波によるコンクリート構造物のひび割れ進展解析が可能となった。

本報告では、その手法を三次元に拡張して妥当性の検証を行った。

2. 流体-構造連成解析手法

(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²⁾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 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。

離散化手法として、空間方向に対しては SUPG/PSPG 法に基づく安定化有限要素法⁴⁾を適用し、時間方向に対しては、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。

(2) 構造解析

動的構造解析手法として、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。車谷らによって提案された等方性損傷モデル³⁾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 (7)、応力-ひずみ関係式 (5)、

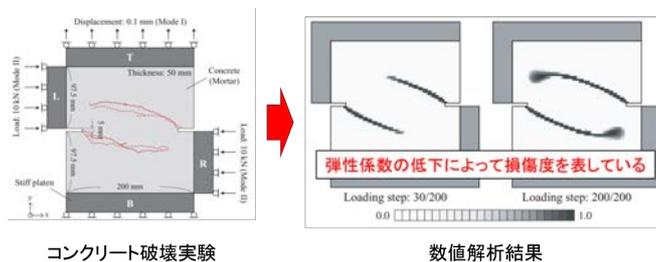


図-1 等方性損傷モデルの概念図³⁾

ひずみ-変位関係式 (6) である。

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + b_i + B_i = 0 \quad (4)$$

$$\sigma_{ij} = (1 - D) c_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

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} は弾性係数テンソル、 ε_{ij} はひずみテンソル、 D は損傷変数である。空間方向の離散化は四面体要素を用いた有限要素法、時間方向の離散化には Newmark の法を用いている。図-1 に損傷モデルの概念図を示す。図-1 (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数値解析では、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。損傷変数は以下の式で表される。

$$D = 1 - \frac{\kappa_0}{\kappa} \exp \left(- \frac{E \kappa_0 h_e}{G_f} (\kappa - \kappa_0) \right) \quad (7)$$

ここで、 κ_0 は破壊発生ひずみ、 κ は解析の時刻歴における等価ひずみの最大値、 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る。動的破壊解析手法の詳細については参考文献³⁾を参照されたい。

KeyWords: 津波, 等方性損傷モデル, 流体-構造連成解析

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

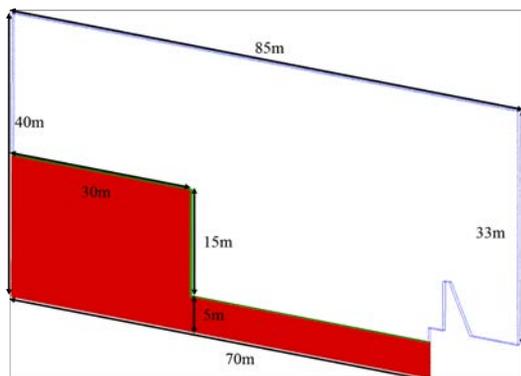


図-2 解析モデル(流体)

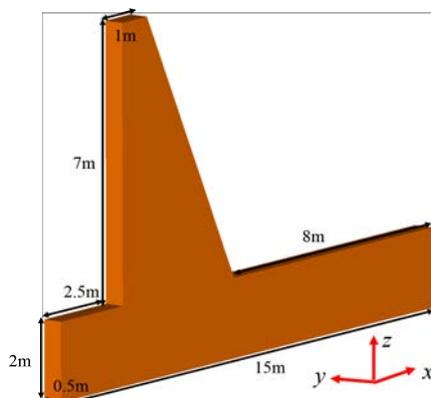


図-3 解析モデル(構造)

(3) 連成手法

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。また、本手法において、構造物の変位は微小と仮定する。そのため、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。

3. 数値解析例

数値解析例を用いて、構築した三次元流体-構造連成解析手法の妥当性の検証を行う。

(1) 解析条件

流体解析モデルを図-2に示す。流体の密度・粘性係数は20℃の時の水、空気の数を用いている。初期条件として、20mの仮想段波を解析領域左端から30m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-3に示す。構造物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 2400kg/m^3 、 30GPa 、 0.2 、 10 、 0.0001 、 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流体力を与えている。流体、構造要素共に奥行

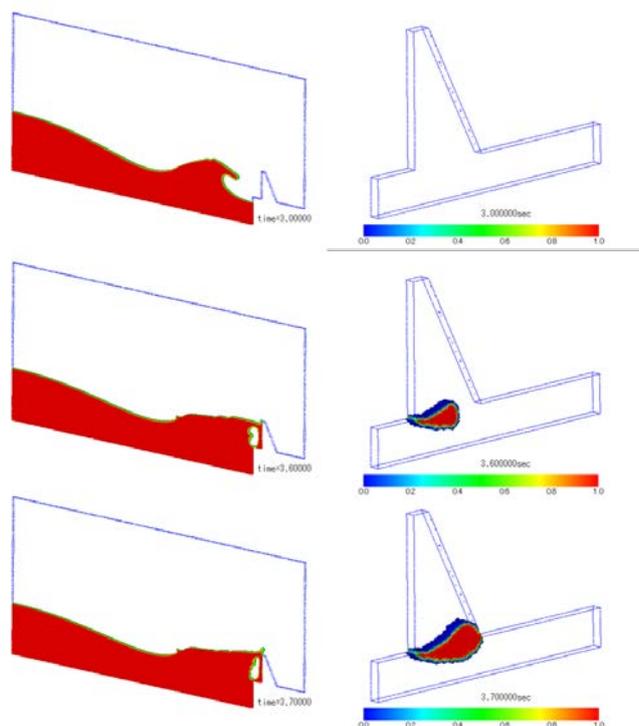


図-4 解析結果

き方向は50cm、要素サイズは約10cmである。時間増分量は0.01秒である。

(2) 解析結果

解析結果を図-4に示す。流れ場の様子を図-4の左に、損傷変数を右に示す。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が損傷が発生し、ひび割れが進展していく様子が確認できる。

4. おわりに

本研究では、自由表面流れ解析と等方性損傷モデルを用いた三次元流体-構造連成解析手法を構築し、数値解析結果より、津波によるコンクリート構造物のひび割れ進展解析が定性的に行われていることを確認した。

今後の課題として、本手法の妥当性の定量的な検証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, -71, 2018.
- 2) 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.
- 3) M. Kurumatani, K. Terada, J. Kato, T. Kyoya and K. Kashiyama, An isotropic damage model based on fracture mechanics for concrete, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 155, pp. 49-66, 2016.
- 4) 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.