○東北大学大学院工学研究科	学生員	小谷拓磨
東北大学大学院工学研究科	正 員	高瀬慎介
東北大学災害科学国際研究所	正 員	森口周二
東北大学災害科学国際研究所	正 員	寺田 賢二郎
東北大学大学院環境科学研究科		村松 眞由

1. はじめに

流体構造連成解析については、これまでに多くの研究成 果が報告されており、かなり複雑な流体と構造物の連成解 析が可能となった.一方で、構造物の破壊挙動までを含め た構造物と流体の相互作用の表現については十分には研究 が進んでいない.しかしながら、2011年の東日本大震災の 津波被害などを考えた場合,構造物が流体力によってどの ように破壊されるのか,また,破壊された構造物の瓦礫が 流体の中で浮遊することにより、流体力がどのように変化 するのかを知ることは、今後の安全安心な街づくりを考え る上で非常に重要なことである.このような社会的背景に 基づいて、本研究では構造物の破壊を含む流体構造連成解 析手法を提案する.具体的には, Cohesive model を導入し た個別要素法¹⁾(DEM)により、構造物の接触挙動および 破壊挙動を表現し, 流体挙動の表現には安定化有限要素法 を適用するとともに,有限被覆法²⁾によって構造物と流体 の相互作用を表現する.本論文では、この枠組みについて 説明し、本手法を用いて得られた構造物の破壊を含む複雑 な構造流体連成解析の結果について報告する.

2. 構造物の接触と破壊の表現

本研究で提案する手法では,個別要素法に Cohesive model を導入することで構造物の接触と破壊を表現している.接 触については,DEM¹⁾を適用し,予め設定した不連続面で の亀裂進展挙動を表現するために多項式に基づく Cohesive model³⁾を導入した.以下では,これらの詳細について説 明する.

(1) 個別要素法による接触の表現

本研究で使用した DEM は,接触力モデルが図-1 で表現 される一般的なものである.法線方向の接触力を表現する バネとダッシュポット,および接線方向の接触力を表現する バネとダッシュポットがあり,接線方向には摩擦力を制御 するためのスライダーが存在する.要素同士が接触してい る間はこのモデルによって接触力が評価され,運動方程式 に反映される。この接触力モデルによって,法線方向の接 触力 \mathbf{F}_n と接線方向の接触力 \mathbf{F}_s は以下のように表現される.

$$\mathbf{F}_n + C_n \dot{\mathbf{u}} + K_n \mathbf{u} = 0 \tag{1}$$



図-1 DEM の粒子間力モデル

$$\mathbf{F}_s + C_s \dot{\mathbf{v}} + K_s \mathbf{v} = 0 \tag{2}$$

ここで, u は法線方向の貫入量ベクトル, ù は法線方向の貫入速度ベクトル, v は接線方向の貫入量ベクトル, v は接線方向の貫入量ベクトル, v は接線方向の貫入速度ベクトルである.また, K_n は法線方向のバネ定数, C_n は法線方向のダッシュポットの減衰係数, K_s は接線方向のバネ定数, C_s は接線方向のダッシュポットの減衰係数である.なお,本研究では,法線方向のパラメータ(バネ定数とダッシュポットの減衰係数)と接線方向のパラ メータは同値と仮定する.また,ダッシュポットの減衰係数 C は,バネ定数 K,反発係数 e,要素質量 m を用いて次式で表現できる.

$$C = 2\sqrt{mK}\sqrt{\frac{(\ln e)^2}{(\ln e)^2 + \pi^2}}$$
(3)

ここで,πは円周率である.上式を用いることにより,ダッ シュポットの減衰係数*C*の代わりに反発係数*e*を入力パラ メータとして用いることができる.よって,入力パラメー タは,バネ定数*K*,反発係数*e*,(スライダーの)摩擦係数 μの3種類となる.

(2) Cohesive model による破壊の表現

本研究では、図-2に示すように、剛体モデルの表面を潜在 的な不連続面として、この面を Cohesive model を用いて連 結することで破壊挙動を表現する.本研究で用いた Cohesive model³⁾は、多項式を用いたものであり、次式で表現される.

$$T = \begin{cases} \frac{27}{4} T_{max} \left(\frac{\delta}{\delta_f}\right) \left[1 - 2 \left(\frac{\delta}{\delta_f}\right) + \left(\frac{\delta}{\delta_f}\right)^2 \right], & \delta \le \delta_f, \\ 0, & \delta > \delta_f, \end{cases}$$
(4)

〒 980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1, TEL 022-752-2132, FAX 022-752-2133



図-2 Cohesive model による DEM 剛体モデルの連結



図-3 Cohesive model のイメージ

ここで、Tは結合力、 T_{max} は結合力の上限値、 δ は開口量、 δ_f は完全な破壊に至る開口量を意味する.このモデルのイ メージ図を図-3に示す.

3. 有限被覆法を用いた流体-構造連成解析

DEM により求められた構造の運動を流体計算の際に用い ている固定メッシュに対して構造物の速度・位置を反映す るため、本研究では、有限被覆法を用いて解析を行う. 有 限被覆法は、図-4に示すように、近似関数が定義される数 学領域 Ω^M と、支配方程式が満たされるべき物理領域 Ω^P を 独立して定義するという点で,有限要素法と異なる.しか し、解析対象を要素で部分分割し、各要素間の未知量を節 点値により補間近似するという点において FEM と一致する ため, FEM を一般化した手法とみなすことができる.以上 の特性から, FCM では解析対象とは独立に節点を単位とす る PU 条件(Partition of Unity)を満たす近似関数 (重み関 数)を定義する.有限被覆法は有限要素法と異なり,要素内 に流体と構造の境界が存在することを許容するため、その 境界位置を正確に考慮した流れ場を求めることが可能であ る.本論文では、任意形状を有する解析領域の適用性に優 れている四面体要素に着目し、1次の四面体有限要素の形 状関数を重み関数とする.

4. 流体力による構造物の破壊解析

数値解析例として, 流体力による構造物の破壊解析を行っ た. 解析モデルとして,幅20m,奥行10m,高さ12mの構 造物に対して、10mの水柱を崩壊させ連成解析を行った.解





 Ω^{P} physical domain

図-4 数学領域 Ω^M と物理領域 Ω^P





図-5 流体力による構造物の破壊解析結果

析結果を 図-5 に示す.この図より,流体力により,建物の 壁面が破壊・接触し、流されていく様子が安定に解析が行 われていることがわかる.また,本手法の安定性および有 効性が確認できた.

5. おわりに

本研究では、構造物の破壊を含む流体構造連成解析手法 を構築した.構造物の接触挙動および破壊挙動の表現には, Cohesive model を導入した個別要素法を用い,流体と構造 の連成手法には、安定化有限被覆法を適用した、これによ り,数値解析例に示す構造物の接触挙動および破壊挙動を 考慮した構造流体連成解析が可能となった.今後の課題と して,実地形を考慮した津波の遡上解析を行い,本手法の 有効性について検討を行う予定である.

- 1) Cundall, P. A. : A Computer model for simulating progressive, Large Scale movement in blocky rock system, Proceedings of ISRM Symposium, pp.11-18, 1971. Terada, K., Asai, M. and Yamagishi, M. : Finite Cover method for linear and nonlinear analyses of heterogeneous solids, Inter-
- 2) national Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.58, Issue 9, pp.1321-1346, 2003.
- Needleman A.: A continuum model for void nucleation by in-3) clusion debonding. J Appl Mech, Vol.54, pp.525-531, 1987.

参考文献