

要素ネットワークの更新を考慮した大変形解析のための RBSM の開発

名古屋大学 学生会員 ○中島 達也

名古屋大学大学院 正会員 山本 佳士, 中村 光, 三浦 泰人

1. はじめに

コンクリート構造物を対象とした数値解析手法は、非線形有限要素法を中心に数多くの研究が行われてきており、静的荷重下、地震作用下等における複雑な非線形域の応答を再現できるようになってきている。しかしながらポストピーク挙動の再現となると未だいくつかの課題が残されており、特に、コンクリートの圧縮軟化・局所化挙動、およびその拘束圧依存性挙動の再現は現状においても難しい課題として残されている¹⁾。一方、剛体バネモデル (RBSM)²⁾は、ひび割れ等の不連続挙動のみならず、現状の数値解析技術では再現が困難な上記の圧縮軟化・局所化挙動、拘束圧依存性挙動を再現可能であることが分かっており、鉄筋コンクリート部材・構造レベルのポストピーク挙動が再現できるようになりつつある。しかしながら、従来の RBSM は、微小変形を仮定しているため、図-1 (a) に一例を示すように、大変位、大回転挙動を伴う倒壊過程までは再現することはできなかった。そこで著者らは、大変位・大回転挙動も再現可能のように、幾何学的非線形性を考慮可能な 3 次元 RBSM の開発を行っている^{3,4)}。しかしながら、幾何学的非線形性を考慮した RBSM でも、基本的に初期の剛体バネネットワークを参照し続けるため、例えば、要素界面で大きなせん断すべりが生じる、あるいは図-1(b) のように倒壊過程で破界片同士が新たに接触するなど、初期のネットワークを超えて要素同士が新たに接触した際には、その要素間で力をやり取りすることができず、不合理な応答が生じることが考えられる。すなわち、ポストピーク域においてコンクリート構造物が、ひび割れ、ひび割れ面のすべり、圧壊を経て大変形する挙動を適切に再現することはできない。そこで本研究では、RBSM において大変位・大回転挙動時に要素ネットワークを更新する手法の開発を行った。

2. 解析手法

2.1 幾何学的非線形性を考慮した RBSM

RBSM は、剛体要素と要素間のバネにより離散化する手法である。提案手法では、Voronoi 分割を用いたランダム多面体要素の使用を前提とし、要素間のバネは図-2 に示す様に、要素境界面の重心と頂点からなる 3 角形の重心に配置する。バネは境界面法線

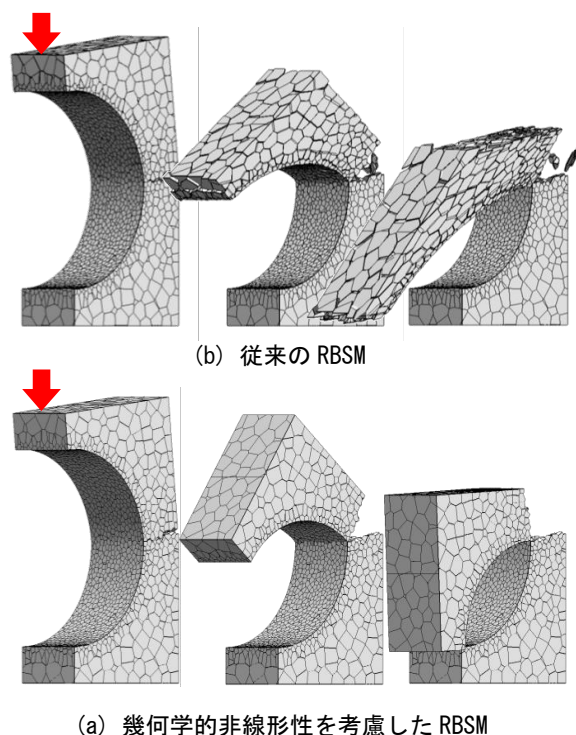


図-1 大変位・大回転を伴う倒壊シミュレーション結果の一例

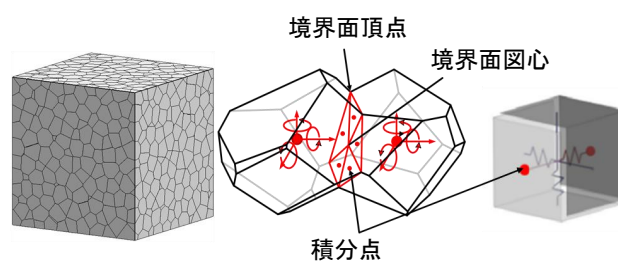


図-2 RBSM の概要

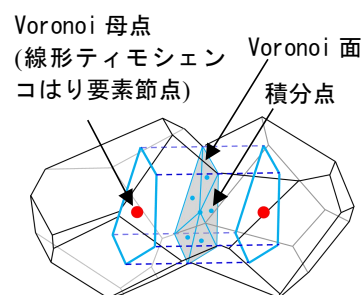


図-3 線形ティモシェンコはり要素を仮定したモデルの概念図

方向の垂直バネが 1 成分と水平方向のせん断バネ 2 成分から構成される。このように一つの要素境界面

に複数のバネを配置することで、境界面内の応力の分布を再現でき、回転バネを導入することなく、モーメントの伝達を簡易に表現できる。コンクリートの構成モデルには RBSM のバネに、コンクリートのひび割れ、圧縮軟化、拘束圧依存性挙動を再現できる非線形構成モデルを導入した。

幾何学的非線形性の考慮は、Voronoi 分割のネットワークを利用した場合、RBSM と低減積分 Timoshenko 梁が等価であることに着目し、従来の微小変形理論に基づく RBSM の代わりに、幾何学的非線形性を考慮した低減積分 Timoshenko 梁要素のネットワークを用いることで実現している。具体的には、図-3 に示すように、2 つの剛体要素間の力学モデルとして、図中の青線で示すように、Voronoi 面を断面に持つ、幾何学的非線形性および有限回転を考慮した線形ティモシェンコはり要素を仮定している。これにより、図-1 (b) で示したように大変位・大回転挙動の再現が可能になる。

2.2 RBSM 要素ネットワークの更新方法

RBSM の要素ネットワークの更新は以下のように行った。まず、各 Voronoi 多面体要素に接触判定用の球（以下、接触判定球）を配置する。接触判定球は、要素とともに移動する。時間増分ステップ毎に、接触判定球を用いて初期のネットワークとは異なる要素との接触判定を行い、新たに接触と判定された場合には、その要素節点間に新たに低減積分 Timoshenko 梁要素を配置する。

より具体的には、まず接触判定球の中心を Voronoi 多面体要素の自由度設定点 (Voronoi 母点) に配置し、その半径は、球の体積が Voronoi 要素の体積と等しくなるように設定する。

接触判定は、2 つの接触判定球の中心間距離とそれぞれの球の半径の和を比較して行う。計算の簡略化のため、接触判定および相互作用の評価においては、Voronoi 多面体の形状および寸法は無視し、接触判定球のみを参照する。

接触と判定された場合には、それぞれの球の中心点を節点とする、幾何学的非線形性を考慮した低減積分 Timoshenko 梁要素を配置する。この Timoshenko 梁要素の断面は円形状と仮定し、その半径は、それぞれの接触判定球の半径の平均とする。さらに、断面内積分点における垂直ひずみおよびせん断ひずみを、RBSM におけるバネのひずみおよびせん断バネのひずみと仮定する。構成モデルには、著者らが提案している、引張軟化、モール・クーロン型の破壊基準等を考慮したコンクリートの挙動を表現するモデル

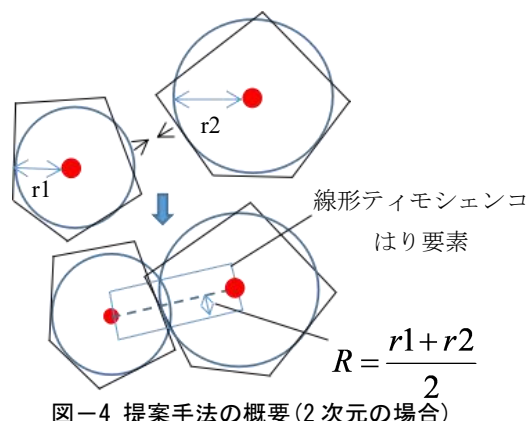


図-4 提案手法の概要 (2次元の場合)

を修正して適用して、垂直応力およびせん断応力を算定した。具体的には、垂直バネの圧縮側の弾性係数は、要素同士が重なりあわないように十分大きい値を設定し、引張には抵抗しないものとした。また、モール・クーロン型の破壊基準における粘着力は0とした。提案手法の概要を図-4に示す。

3. まとめ

本研究では、従来のRBSMでは再現できない、大変位・大回転を伴うひび割れ、すべり、倒壊挙動等が生じた後に初期のネットワークを超えて、要素同士が接触し相互作用する挙動を簡単に再現する手法を提案した。手法の妥当性、有用性を示す解析例は当日発表する。

また、接触判定球の配置や半径の設定、接触判定後の相互作用の再現は、上記の他にも複数の手法が考えられるため、それぞれの妥当性、有効性についても今後検証を続けていく予定である。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会、コンクリート構造物のポストピーク挙動解析研究委員会：コンクリート構造物のポストピーク挙動評価と設計への応用、日本コンクリート工学協会、2003
- 2) 山本佳士ら：3次元剛体バネモデルによるコンクリート供試体の圧縮破壊解析、土木学会論文集 E, Vol.64, No.4, pp.612-630, 2008.
- 3) 伊佐治優、山本佳士、中村光、三浦泰人：有限回転を考慮した3次元RBSMによるコンクリート材料のポストピーク挙動解析、Vol38, No.2, pp.91-96, 2016
- 4) 伊佐治優、山本佳士、中村光、三浦泰人：破壊の局所化および大回転変位を伴うRC構造物の倒壊シミュレーションのための新しい離散体解析手法の開発、計算工学講演会論文集 Vol.22, 2017