

リメッシュ機能を有する3次元RBSMの提案

名古屋大学 学生会員 ○井熊 晃司

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

川井により提案された剛体バネモデル (RBSM) は, 対象を剛体要素と要素境界面に配置したバネの集合として離散化する手法である. 要素境界面のバネに塑性, 軟化等の非線形構成モデルを適用することにより, 材料の引張破壊やせん断すべり破壊等の不連続挙動を簡便に表現することができる. 手法の特性上, 不連続面は要素境界に沿って進展するが, ボロノイ分割を用いたランダム多面体要素の適用により, 要素分割依存性が低減され, その適用範囲が広がった. 特に, コンクリートに対しては, ランダム多面体がコンクリートのひび割れ面の凹凸等の幾何学的な性状を表現することにより, ひび割れ面のせん断伝達挙動等, ひび割れの幾何性状に起因する複雑な非線形挙動を自然に再現することが可能になっている. 著者らも, 普通強度コンクリートを対象として, 引張・圧縮軟化, 局所化挙動, 拘束圧依存性挙動等の複雑な非線形力学特性を定量的に再現できる3次元RBSMおよびその構成モデルを提案している¹⁾

一方で, 高強度コンクリートのひび割れ面は, 骨材が割れることに起因して, 普通強度コンクリートと比較して平滑になり, せん断伝達能力が低下することが知られている. しかしながら, 従来のRBSMでは, ランダム形状の要素境界に沿ってひび割れが進展するため, 高強度コンクリートの平滑なひび割れを再現できない.

そこで, 本研究では応力状態に応じてRBSM要素のリメッシュを行い, 荷重過程において, ひび割れ面形状の再現性を高精度化する手法を開発した. これにより, 普通強度コンクリートおよび, 高強度コンクリートを一つのモデルで評価することが可能になる.

2. 解析手法

2.1 解析手法の概略

本研究の解析手法の流れを図-1に示す. 提案手法では, 通常のRBSMと同様に, 解析対象をボロノイ

分割によってモデル化し, バネには著者らが提案している非線形構成モデル¹⁾を導入する. この非線形構成モデルと, RBSMによって導出された剛性方程式を用いて, 通常非線形求解法を用いて (ここでは, 修正ニュートンラプソン法を用いた.) 収斂計算を行い, 各荷重増分ステップにおけるつり合い解を算定する. 各荷重増分ステップにおけるそれぞれのバネの応力情報をもとに, 剛体要素内の応力状態を以下に示す方法により算出し, 要素の切断判定を行う. 切断されない場合は, 通常のRBSMと同様に次のステップに移行し, 切断された場合には, モデルの情報を更新し, 次のステップに移行する.

2.2 応力状態および主応力の算出方法

剛体要素内の応力の算定には, 以下の方法を用いた. まず, それぞれの剛体要素において, 重心を通り, 図-2に一例を示すように, x, y, z軸方向に垂直な面で, 要素を切断し, その要素のフリーボディを考える. それぞれの要素境界面に作用するバネの応力を用いて, 力のつり合いにより切断面に作用

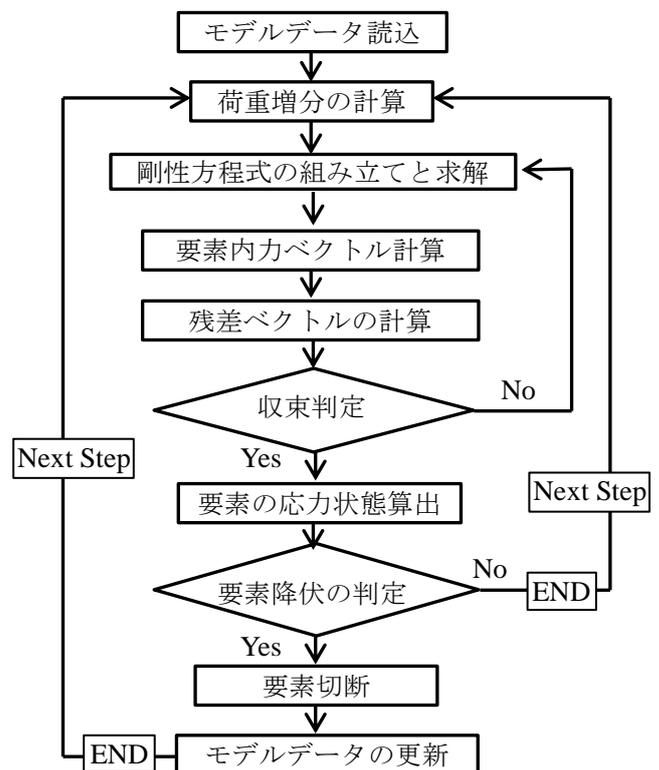


図-1 フローチャート

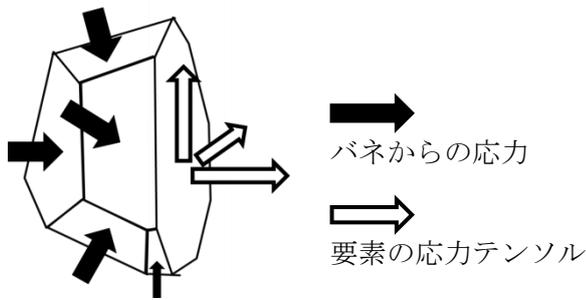


図-2 ポロノイ要素における応力テンソル算出

する x , y , z 方向の応力を算出し、これらの応力を直応力、せん断応力とし、それぞれの要素における応力テンソルとする。この応力テンソルから、最大主応力および最大主応力方向ベクトルを算出する。

2.3 ポロノイ要素の切断方法と切断後の処理

2.2 で示した方法により最大主応力を算出し、最大主応力値が、要素の引張強度に到達した場合、重心を通り、主応力方向に垂直な面で、要素の切断を行う。要素の切断にともない、要素情報、境界面情報などのモデル情報を更新する。

また、要素の切断面には、新たにバネを配置する。これは、骨材の引張破壊後の破断面の挙動をモデル化したものであり、バネにどのような特性を与えるかは今後詳細に検討する予定であるが、ここでは、簡単に以下のように与えた。すなわち、垂直バネの引張強度には十分小さい値を与え、また、せん断バネの、モールクーロン型の破壊基準¹⁾における粘着力 c に対しても十分小さな値を与えた。その他のパラメータ、例えば、バネの弾性係数、圧縮特性やせん断バネの内部摩擦角などは、その他のバネと同様のものを与えた。なお、ここでは、情報を更新した後、再度収斂計算を実施することなく次のステップに移行するものとした。

3. 1 要素モデルによる検討

3.1 解析概要

ここでは、応力テンソルの算出および RBSM 要素の切断について、1 要素モデルを用いてその妥当性の検討を行う。Case1 では、図-3 に示すように、要素上面および下面に載荷板要素を配置し変位制御で鉛直方向に引張荷重を与える。Case2 では、図-3 に示すように、要素の x , y 方向に垂直な面に載荷板要素を配置し、変位制御で純せん断力を与える。

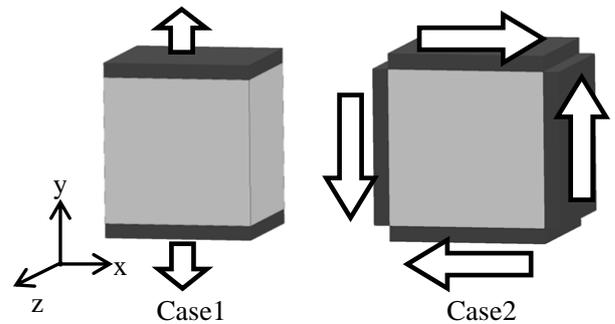


図-3 モデル概要及び、載荷方向

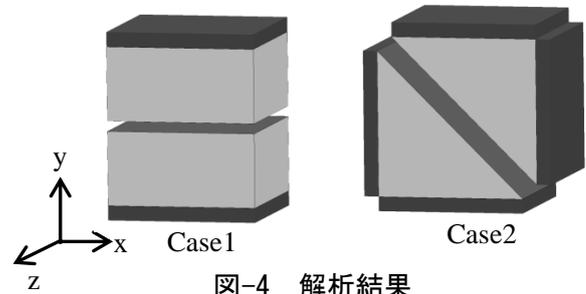


図-4 解析結果

3.2 解析結果

図-4 に、提案手法によって得られたリメッシュ処理後の変形状を示す。Case1 では、鉛直方向のみに引張荷重が与えられており、最大主応力方向は鉛直方向になる。本解析においても最大主応力方向に垂直な面で要素が切断されていることが分かる。Case2 では、純せん断力により、主応力方向は、 x - y 平面内であつ x 軸に対して 45° の方向になる。解析は、このケースにおいても最大主応力方向に垂直な面で要素が切断されていることがわかる。以上の検討により、提案手法は、適切に応力状態を評価し、それに応じてリメッシュ処理を実行していることが確認された。

4. まとめ

リメッシュ機能を有する 3 次元 RBSM を提案した。1 要素レベルの検討により、提案手法は適切に剛体要素内の応力状態を評価し、リメッシュ処理を実行できていることが確認された。今後は、提案手法を高強度コンクリートの材料レベルおよび部材レベルのひび割れ進展解析に適用し、提案手法の妥当性および有用性を検証していく予定である。

参考文献

- 1) 山本佳士ほか：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試験，土木学会論文集 E, Vol64, No.4, pp.612-630, 2008