

大規模地震応答解析のための全自動並列ロバスト 整合四面体メッシュ生成手法の開発及び実装

東京大学工学系研究科社会基盤学専攻修士課程一年 学生会員 ○勝島 啓介
理化学研究所 計算科学研究機構 総合防災・減災研究ユニット 正会員 藤田 航平
東京大学工学系研究科社会基盤学専攻准教授 正会員 市村 強
東京大学工学系研究科社会基盤学専攻教授 正会員 堀 宗朗
東京大学工学系研究科社会基盤学専攻准教授 正会員 M.L.L. Wijerathne

1. はじめに

地盤と複数構造物を同時に考慮した地盤 - 構造物系の大規模地震応答解析は、強震時の構造物の挙動特性把握や地盤 - 構造物間の相互作用考慮を通して、構造物の耐震安全性照査及び向上に役立つと期待される。High Performance Computing 技術の近年の発展により、大規模有限要素法解析が実現可能となり、かつ、その解析所要時間は短縮されてきている。一方、複雑形状、複数物性を有するような大規模解析対象のロバストな有限要素モデル構築手法は依然確立されておらず、モデル化を含むプリプロセッシング段階に解析所要時間の多くを費やしているのが現状である。地盤 - 構造物連成モデルでは、考慮すべき構造物・地盤の特微量の分解能が 100 から 1000 倍のオーダーで異なり、かつ、構造物部が複雑な幾何的形狀を有する複数の物性・部材から構成されるという点で、有限要素モデル構築が困難な典型例であり、複雑形状・複数物性を持つ大規模有限要素モデル構築手法の開発が望まれている。本研究では大規模地盤 - 構造物連成有限要素モデル構築を主眼に置き、整合四面体有限要素モデルを全自動、並列かつロバストに生成する手法を開発、実装する。

2. アルゴリズム

解析領域全体を octree 構造に基づきマルチスケールな複数のボクセルに分割した後、各ボクセル内部に四面体を生成していく。解くべき問題に応じて必要十分な分解能をもったモデルが生成できるよう、生成する四面体のサイズは可変とする。領域全体の四面体生成を各ボクセル内で独立に行わせることで、並列計算処理を簡単に適用でき、高速な四面体生成を可能としている。また、Multiple Material Marching Cubes 法(M3C)を用い、物性領

域境界に位置するボクセル内に物性領域境界面を三角形パッチで改めて表現することで、物性境界における四面体の整合性を確保している。なお、各ボクセル内で独立に四面体を生成した際に懸念される、隣接するボクセル内で生成した四面体のボクセル 6 外面における整合性は、共有されている外面で矛盾しない三角形分割を、二次元 Delaunay 三角形分割により行うか予め用意しておいた分割パターンを割り当てて行うことで確保している。以下、octree 構造を用いた領域全体のボクセル分割、ボクセル内四面体要素生成の詳細を説明する。

2.1. ボクセル分割

四面体生成の基準となるバックグラウンドボクセルを octree 構造に基づいて設置する。

第一に、各物性閉領域を定義している入力有向三角形パッチ群を全て内部に含むのに十分大きいボクセルを 1 つあてがい、内部に入力有向三角形パッチを有するボクセルを、その一辺長が予め指定した最小一辺長となるまで octree 構造に基づき 8 つに再帰分割していく。次に、設置したボクセルの頂点位置の節点がどの物性領域に属しているかという物性情報を、計算量削減のため、物性領域境界部に位置する節点の物性情報を種として塗りつぶして割り当てる。このままでは各物性領域内部に生成される四面体の要素サイズが解析で要求されるサイズに比べ大きくなる可能性があるため、各物性領域内部のボクセルを、その一辺長が物性領域ごとに予め指定した一辺長以下となるよう再分割する。最後に、隣接するボクセル間の急激な階層の開きは最終的に生成される四面体品質の低下、解析精度悪化に直結するので、面または辺を共有するボクセル同士の階層が 2 以上離れないようにボクセルの再分割を行う(図-1)。

キーワード 地震応答解析, 大規模メッシュ, 四面体要素, 並列メッシュ生成, マルチマテリアル

連絡先 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1 TEL:090-7904-0362 E-mail:keisuke-k@eri.u-tokyo.ac.jp

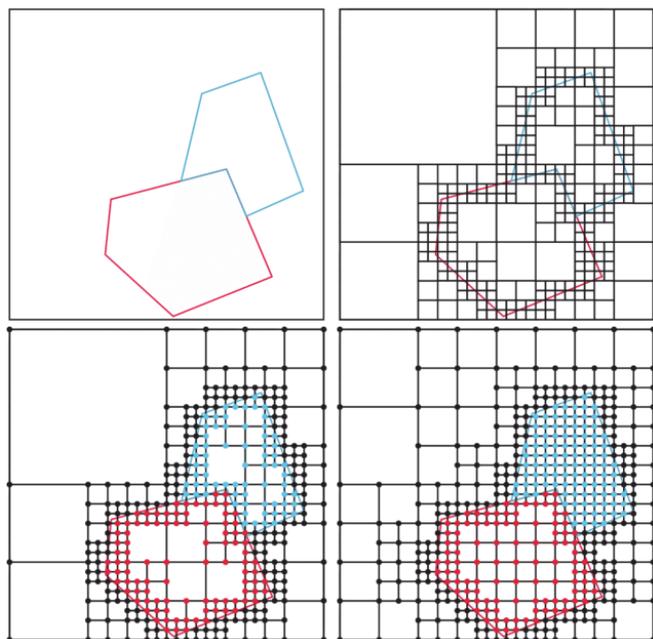


図-1 ボクセル分割例(二次元模式図)

2.2. 四面体要素生成

設置したボクセルの内部に四面体要素を生成していく。

(1) 物性領域境界部四面体生成

8 頂点位置の節点の物性が全て同じでないボクセルについて、その内部に物性領域境界面を M3C により三角形パッチで生成する。この際 M3C によって生成される新節点の位置はボクセルの中心位置、外面の中心位置、辺の midpoint 位置としている。次に、二次元 Delaunay 三角形分割を用いボクセルの 6 外面を三角形パッチに分割する。二次元 Delaunay 三角形分割で三角形が一意に生成できない節点配置については予め決めておいた三角形分割を割り当てる。最後に、拘束 Delaunay 四面体分割を用い、各物性多面体ごとに、表面三角形パッチを保持しつつ内部に四面体要素を生成する(図-2)。

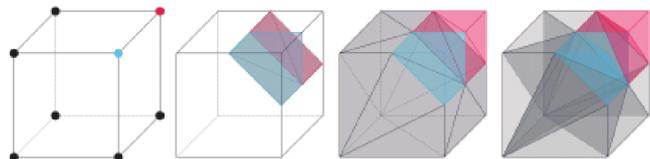


図-2 物性領域境界部四面体生成例

(2) 物性領域内部四面体生成

8 頂点位置の節点の物性が全て同じボクセルについて、その 6 外面上に存在する節点を探索し、各外面を二次元 Delaunay 三角形分割により三角形に分割する。この探索は、隣接するボクセル間の階層の開きを最大 1 としていること、及び、M3C による新節点の位置を幾何的に単純な位置に限定していることを利用して行う。そして、拘束 Delaunay 四面体分割により表面三角形パッチを保持

したボクセル内部の四面体要素生成が完了する(図-3)。



図-3 物性領域内部四面体生成例

3. 適用例

開発した手法を用いて、142 の部材領域をもつ構造物と 1 の部材領域をもつ地盤からなる地盤 - 構造物連成有限要素モデルを構築し、線形弾性動的地震応答解析を行った。地盤のサイズ 600m x 800m x 200m に対し、最小ボクセルサイズを 0.2m と指定したところ、32 コアの共有メモリ計算機を用い約 13 時間かけ、四面体二次要素で約 6 億要素、約 26 億自由度の有限要素モデルが自動構築された。構築されたモデルは物性領域境界部で整合していること、その断面をみると octree 構造に基づいたボクセル分割の跡が確認された。また、このモデルを用いた地震応答解析結果を可視化したところ、数値解が妥当なものであることが確認され、適切な有限要素モデルが構築されていることが示された。

4. まとめ

本研究では、複雑形状・複数物性をもつ整合四面体有限要素モデルを全自動、並列かつロバストに生成する手法を開発、実装した。また、本手法を実際の複雑な地盤 - 構造物連成モデルに適用し地震応答解析を行うことで、その有効性を示した。現段階では、小さな幾何的形狀近似を行っている。この幾何的形狀近似を小さくするための節点移動や要素削除及び統合による形状修正は今後の課題である。将来的には、従来の手法ではモデル構築が難しかった原子力建屋などの超重要構造物の解析や、地盤内に複数埋設物や空間を有するような都市解析などに利用可能な大規模高精度モデルが短時間で構築できるようになると考えられる。

参考文献

- 1) Z. Wu and J. M. Sullivan: Multiple material marching cubes algorithm, *International Journal of Numerical Methods of Engineering*, Vol. 58, Issue 2, pp. 189-207, 2003.
- 2) Hang Si: TetGen, a Delaunay-Based Quality Tetrahedral Mesh Generator, *ACM Transactions on Mathematical Software*, Vol. 41, Issue 2, pp. 11:1-11:36, February 2015.