F1-3 3次元階層メッシュを用いた亀裂進展解析

Crack propagation analysis using 3D hierarchical mesh

○室谷 浩平・東洋大学

塩谷隆二・東洋大学

矢川 元基・東洋大学

Kohei Murotani, Toyo University

Shioya Ryuji, Toyo University

Genki Yagawa, Toyo University

Key Words: アダプティブ解析, 階層メッシュ, 高速なリメッシング, き裂進展解析

論文要旨

本手法は、リメッシング時間を大幅に短縮する手法である。これは、メッシュの要素数が大きくなればなるほど、リメッシング回数が増えれば増えるほど、従来の手法と顕著に差が出てくる。まずは、大規模な構造メッシュをマザーメッシュとして生成して、そのメッシュから階層メッシュを生成する。この階層メッシュを用いて、アダプティブ解析に必要な解像度のメッシュを抽出する。階層メッシュを生成するのは最初の1度だけで、時間がかかる。しかし、一旦、階層メッシュが生成されたら、リメッシングをする時に何度も利用することができ、しかも、リメッシングにかかる時間は極短時間である。こうすることによって、大規模な構造メッシュの解像度を持つアダプティブメッシングを、非常に高速に、何度も利用することができる。本論文では、これまで行われてきた、2次元の三角形メッシュの階層メッシュを拡張して、3次元の階層メッシュを用いた解析をおこなう。数千万自由度のアダプティブメッシュを生成するので、PC クラスタ上で ADVENTURE SOLID を用いて弾性解析をおこなう。

1. はじめに

本研究は、階層メッシュを有限要素法のアダプティブ解析に応用するものである。まず、前処理として、解析形状全体を最も細かい要素サイズを持つマザーメッシュを生成する。このマザーメッシュに対して、プログレッシブメッシュ化¹⁾を行い、階層メッシュを生成する。ある程度の細かさのメッシュに対して、FEM を解き事後誤差評価を行い、その値が与えられた最大許容誤差よりも大きければ、その値に基づき再メッシュ化する。再メッシュ化された解析モデルに対して再度 FEM 解析を行い、与えられた最大許容誤差よりも大きければ、再度再メッシュと FEM 解析を行い、小さければ、解析は終了となる。この前処理には計算時間が多く掛かってしまうが、一度作ってしまえば、何回も再利用ができ、その上、再メッシュの速さは非常に高速で殆ど時間を要しなくなる。つまり、アダプティブ解析の収束が遅い解析や、長時間に渡る時間発展モデルを解く場合に力を発揮する。逆にいうと、単純な問題には不向きであるといえる。

これまでの、階層メッシュを2次元の三角形メッシュに対しておこなってきた。本論文では、edge collapse と vertex split を3次元の四面体メッシュに対して拡張し、3次元の階層メッシュを用いて、亀裂進展解析をおこなう。3次元の四面体メッシュは、自由度が大きくなりがちなので、弾性解析では、PC クラスタ上で ADVENTURE SOLID を用いて、解析にかかる時間を大幅に短縮した。

2. 階層メッシュ

Figure 1(a)は、Progressive meshes (PM)¹⁾で用いられる edge collapse と vertex split の二つの変換である。edge collapse は一つの辺を潰して新しい頂点を生成する変換であり、新しい頂点の座標は、潰された辺の重心に移される。反対に、vertex split は、一つの頂点を引き裂いて前の辺に戻す変換である。Figure 1(b)は、(a)を3次元の四面体メッシュに拡張したものである。

Figure 1. Edge collapses and vertex split.

階層メッシュとは、マザーメッシュに Edge collapses を次々適用して、ただ一つだけ頂点へと変換していった結果、頂点が階層的なデータ構造となる多重解像度メッシュのことである。階層メッシュは、各段階で行われる融合と分割を示す樹形図と呼ばれる2次元のグラフ図で表現することができる。Figure 2は、階層メッシュと樹形図の様子である。Figure 2(a)は2次元の三角形メッシュを例にしているが、3次元の四面体メッシュの場合も同様なアルゴリズムで、階層メッシュを生成することができる。

Figure 2. Hierarchical mesh.

3. アダプティブ解析

Figure 3 は、Flowchart of Adaptive Analysis である。事後誤差（本研究では Zienkiewicz Zhun²⁾の方法を用いる）の値が与えられた最大許容誤差よりも大きければ、その値に基づいてリメッシングを行い、そうでなければ解析は終了となる。Figure 3 のあるように、我々の手法は、階層メッシュを生成するという前処理がある。この前処理にある程度時間がかかるが、階層メッシュを用いたリメッシングは非常に高速であるので、総計算時間はかなり小さくなる。

Figure 3. Flowchart of adaptive analysis.

4. き裂進展解析

本節では、き裂進展解析を考える。Figure 4 のように、き裂の入った直方体の板に、1MPa の一様な引っ張り加重を両サイドに水平方向に掛ける。ヤング率 210GPa、ポアソン比 0.4、とする。本解析では、応力腐食割れ (SCC) を仮定して、き裂進展量を求めるためにパリス則を用いて、11 回亀裂を進展させた。

Figure 5 は、階層メッシュを用いた亀裂入りメッシュである。Figure 5(a)は小規模なメッシュで、自由度は 359,073 - 741,732 で、1 回のリメッシュにかかる平均時間は 5 秒であった。弾性解析には、CPU: 3.80GHz×5 PEs、Memory: 4GB×5 nodes の PC クラスタで、ADVENTURE SOLID (BDD)を用いて解析をおこなった。CG 法の停止条件を 10^{-6} として、CG Loops は、74 - 129 で収束し、平均解析時間は 18 秒であった。この解析の総時間は、1280 秒であった。

Figure 5(b)は大規模なメッシュで、自由度は 21,691,467 - 45,309,951 で、1 回のリメッシュにかかる平均時間は 72 秒であった。弾性解析には、CPU: 3.80GHz×70 PEs、Memory: 4GB×35 nodes の PC クラスタで、ADVENTURE SOLID (BDD)を用いて解析をおこなった。CG 法の停止条件を 10^{-6} として、

CG Loops は、126 - 236 で収束し、平均解析時間は 4000 秒であった。この解析の総時間は、132,4000 秒であった。

Figure 6(a)は小規模なメッシュの亀裂断面のメッシュであり、(b)は大規模なメッシュの亀裂断面のメッシュである。Figure 7(a)は、解析結果の主応力分布で、(b)は誤差分布である。

5. 今後の課題

本研究では、これまでの解析の 50 - 100 倍の規模の解析に成功した。まず、階層メッシュを用いることによって、リメッシングにかかる時間が大幅に短縮された。また、弾性解析で ADVENTURE SOLID を用いることで、数千万自由度規模の解析を可能にした。

今後の課題には、様々な 3 次元問題への適用や、メッシュコントロールの高速化、移動境界問題への適用などがある。

参考文献

- 1) Hoppe H., Progressive meshes, In *Computer Graphics, SIGGRAPH'96 Proceedings*, 99-108, 1996.
- 2) Zienkiewicz O. C., Zhu Z., A simple error estimation and adaptive procedure for practical engineering analysis, In *Int. J. Numer. Methods. Eng.*, 24, 337-357, 1987.

Figure 4. Analysis model.

(a) Small size mesh (b) Huge size mesh
Figure 5. Adaptive mesh for the crack propagation.

(a) Small size mesh (b) Huge size mesh
Figure 6. Adaptive mesh of the crack front for the crack propagation.

(a) Principal stress (b) Error distribution
Figure 7. Principal stress and error distribution for the crack propagation.