論 文 の 内 容 の 要 旨

論文題目　　分離型連成解法による大規模非線形破壊力学シミュレーションの効率化

氏　　名　　遊佐　泰紀

構造物の破壊現象は一度起これば人々の生命や財産に対して多大なダメージを与える。構造物の破壊現象の予測にはシミュレーション技術の利用が有効である。シミュレーションでは、複雑形状の実機に発現する多軸の応力状態の精緻な解析を行うことができる。比較的小規模な構造機器モデルの解析は企業において日常的に行われており、比較的大規模な構造物モデルの解析はスーパーコンピュータと並列有限要素法を用いた大規模解析の研究分野で行われている。大規模解析の分野では、線形弾性体の解析が多い。非線形解析では増分法や Newton–Raphson 法の枠組みの中で大規模な連立一次方程式を何度も解く必要がある。また、き裂問題では非線形事象がき裂先端近傍で顕著に表れ、き裂から十分に離れた領域は弾性的な挙動を示すが、通常の非線形有限要素法ではこれらを分けて扱うことができない。一方、き裂のシミュレーションの分野では、き裂先端近傍で発現する混合モード、非弾性、大ひずみなどの事象を精緻に解析することが可能である。この分野は計算破壊力学と呼ばれ、盛んに研究が行われている。き裂先端近傍の特異場を再現するために非常に細かいメッシュが必要であったり、き裂先端で破壊力学パラメータ評価やき裂進展などの特殊な処理をしたり、特別な方法でき裂の不連続性や特異場を扱ったりする。これらの手法をそのまま大規模解析に適用しようとすると、剛性行列の条件数が大きくなるため大規模解析で好まれる共役勾配法の収束性が悪化したり、大規模なき裂付きメッシュの取り扱いが大変であったりと困難性がある。以上から、き裂を有する大規模構造物の非線形解析には二つの分野の知見が必要であるが、これらを単純に組み合わせるだけでは効率的な大規模非線形破壊力学解析は実現できないと言える。

本研究の目的は、き裂を有する大規模構造物の非線形破壊力学シミュレーションの効率化である。大規模な連立一次方程式の求解が問題となる大規模解析と事象の非線形性・複雑さが問題となるき裂解析を両立させる。具体的には、き裂近傍とそれ以外の領域を別々に扱い、それらの間の相互作用を満足させる解析手法を提案する。既存手法と

比較することで提案手法の立ち位置を明確にし、提案手法を数理的に説明することで提案手法の理論的背景を示す。増分法および Newton–Raphson 法を伴う非線形解析向けに提案手法を拡張する。簡易的な数理モデルを作成して提案手法の計算時間における利点の普遍性を説明する。提案手法を用いて線形弾性解析、応力拡大係数解析、弾性き裂進展解析、弾塑性解析、大変形弾塑性解析の数値実験を行う。それぞれの数値実験において提案手法の精度や計算時間などについての利点・欠点を示す。

まず、大規模非線形破壊力学解析向けの既存手法のサーベイを行い、それらを整理した。大規模破壊力学解析に適した手法に対して、二つのメッシュやモデルの間の相互作用が担保されているかという意味での解の精度、そしてグローバル領域を弾性体、ローカル領域を弾塑性体とするなどの異なる材料モデルが使用できるかという意味での非線形解析の可否という二つの観点を導入した。解の精度が良く、非線形解析が可能な手法として分離型連成解法を提案した。分離型連成解法では、メッシュをき裂近傍とそれ以外の領域に重なり合わないように分割し、領域界面上に仮の強制変位・荷重境界条件を付与し、それらを反復解法の下で更新しながら各領域の解析を繰り返し行い、最終的に収束解を得る。メッシュの分割方針を述べ、つづいて分離型連成解法を数理的に説明した。増分解析を伴う非線形解析向けの拡張として、増分型とサブサイクリング型の二つの分離型連成解法を提案した。増分型ではグローバル解析の回数を削減することができないが、き裂に関わる非線形性・複雑さをローカル領域に限定した上で増分ステップ毎に確実に収束解を得ることができる。サブサイクリング型ではグローバル解析の回数を削減することができるが、変形経路に依存する問題に適用できないという適用限界がある。分離型連成解法を用いたときの連立一次方程式求解回数を示す数理モデルを作成し、分離型連成解法を用いたときの連立一次方程式求解回数の削減やスピードアップについて考察した。最後に本研究で使用した解析プログラムについて述べた。

線形弾性力学問題の数値実験を行った。分離型連成解法で用いる反復解法の収束性の調査を行った。比較的収束しやすいベンチマーク問題であった円孔平板モデルの引張解析では、Aitken 直線探索付きブロック Gauss–Seidel 法、直線探索なしの記憶制限 Broyden 法、直線探索なしの記憶制限 BFGS 法があまり変わらない収束性を示した。ただし、Broyden および BFGS は初期ステップ幅の影響が大きく、初期ステップ幅 1 よりも初期ステップ幅 0.1 の方が収束が速かった。比較的収束しにくいベンチマーク問題であったき裂付き帯板の三点曲げ解析では、Aitken 直線探索付きブロック Gauss–Seidel 法は収束せず、直線探索なしの記憶制限 Broyden 法および記憶制限 BFGS 法のみが収束した。このベンチマーク問題においても初期ステップ幅の影響があり、Broyden、BFGS ともに初期ステップ幅 1 よりも初期ステップ幅 0.1 の方が収束が速かった。BFGS よりも Broyden の方が収束が速かった。Broyden の初期ステップ幅を変化させて収束性を調査したところ、このベンチマーク問題の場合は 0.1 付近に最適値があることがわかった。以上から、直線探索なしの記憶制限 Broyden 法を

初期ステップ幅 0.1 で用いるのが総じて良い収束性を示すことがわかった。反復回数は一つ目の問題が 10 回程度、二つ目の問題が 20 回程度と開きがあった。これは、二つ目の問題のメッシュ分割においてグローバルメッシュがオリジナルメッシュと比べて構造的に柔になったためと考えられる。

線形破壊力学問題の数値実験を行った。応力拡大係数解析および弾性き裂進展解析を行った。応力拡大係数解析では、主に精度の検証を行った。メッシュ分割パターンを変えて解析を行い、いずれにおいても十分な精度の応力拡大係数を求めることができた。ローカルメッシュの形を変えても分離型連成解法の反復解法の反復回数にはそれほど影響がなかったが、領域界面がギザギザになるメッシュ分割を行うと反復回数が多くなってしまうことがわかった。300 万自由度規模のき裂付き構造機器モデルを解析し、主に計算時間を調査した。分離型連成解法による解析では連成反復の分だけ連立一次方程式を何度も解く必要があるため、通常の有限要素法よりも計算時間が大きくなった。しかし、連立一次方程式求解に直接法を用いる場合は剛性行列の不変性を利用して、それほど遅くない結果を得た。弾性き裂進展解析では、き裂近傍の領域のみでメッシュを変化させてき裂進展を実現した。このアプローチによって、グローバルメッシュをき裂が存在しないただの弾性体とすることができる。また、分離型連成解法の反復解法の初期解に前のき裂進展ステップの収束解を用いることで、第 2 き裂進展ステップ以降は非常に少ない連成反復回数で収束解を得ることができた。

非線形固体力学問題の数値実験を行った。弾塑性解析および大変形弾塑性解析を行った。弾塑性解析では、主に計算時間の検証を行った。弾塑性解析ベンチマークでは、グローバル領域を線形弾性体、ローカル領域を弾塑性体としてモデル化した。簡易なモデルに対して、等方硬化則を用いた引張解析および移動硬化則を用いた引張・圧縮繰り返し解析を行い、いずれのベンチマークにおいても、サブサイクリング型の分離型連成解法を用いることでグローバル解析の連立一次方程式求解回数を削減できることを示した。サブサイクリング型の分離型連成解法では変形経路を線形に内挿する近似を用いているが、応力集中係数を比較する限り十分な精度の解を得ることができた。600 万自由度規模の圧力容器モデルの弾塑性解析を行った。連立一次方程式求解回数を削減したことで計算時間も削減された。また、グローバルメッシュを線形弾性体としてモデル化しているため、連立一次方程式求解に直接法を用いる場合は剛性行列の不変性を利用することでさらなる高速化が得られることを示した。大変形弾塑性解析では、本手法の適用限界を調査した。グローバル領域を有限ひずみ弾性体、ローカル領域を有限ひずみ弾塑性体としてモデル化した。分離型連成解法を用いてもトルクの極大値までは問題なく解析できることを示した。トルクの極大値付近で解析が破綻する理由を調査し、解析破綻時には降伏域が領域界面に到達しているとわかった。グローバル解析の連立一次方程式求解回数は通常の有限要素法と比較して 1.37 倍程度であり、増分型の分離型連成解法を用いても連立一次方程式求解回数がそれほど多くならない事例を示した。