

論文の内容の要旨

論文題目 個別要素法によるラミネート複合材料
横断衝撃破壊シミュレーションに関する研究
氏 名 張 万石

本論文は、「個別要素法によるラミネート複合材料横断衝撃破壊シミュレーションに関する研究」と題し、近年様々な分野で用いられるラミネート複合材料を個別要素モデル化し、同材料評価における課題の一つである横断衝撃破壊のシミュレーションを個別要素法により可能とする方法についての研究を行ったものであり、以下の7章で構成されている。

第1章「序論」では、ラミネート複合材料についての研究の現状とその問題点を指摘すると共に、個別要素法の概要とその応用に関わる課題を歴史的背景も簡単に振り返りながらまとめ、それを踏まえる形で本論文の目的ならびにその構成について述べている。

第2章「本研究に関連する基本事項」は、本研究を展開する上で必要となる基本的な知識をまとめたものである。ラミネート複合材料については、その定義を述べると共にそのアーキテクチャーとスタッキングシーケンスを示した。次いで、ラミネート複合材料の破壊モードと本研究でシミュレーションの対象にする横断破壊現象についてまとめた。個別要素法については、個別要素法におけるニュートンの運動方程式や要素間の相対変位増分など基本的な関係並びに要素間の相互作用力と各要素における力の総合の計算についてのまとめを示した。それらの関係を表現する際の必要となる基本的なパラメータとしてのばね定数および時刻刻みの決定法についても述べた。拡張個別要素法に関連する基本事項については、まず、拡張個別要素法における要素ばねと間隙ばねの設定について示した。次いで、要素ばねに作用する力と間隙ばねに作用する力を分けて要素接触点に作用する力の評価と各要素における力の総合の計算について述べた。最後に、個別要素法でシミュレーションを実行するに当たっての要素ばねと間隙ばねの定数、要素ばねと間隙ばねの破壊基準と時刻刻みの決定法についてまとめた。

第3章「ラミネート複合材料解析のための個別要素法モデル化」では、ラミネート複合材料に対する個別要素法モデルの提案を行った。すなわち、まず一般的なラミネート複合材料を対象に、ボンド要素とボンドばね及び合成ばねを導入し、ラミネート複合材料解析のための三次元個別要素法モデルを提案し、さらに、本研究での実際のシミュレーション対象とする同方向ラミネート複合材料およびクロス・プライのラミネート複合材料の二次元個別要素法モデル化する方法を示した。さらにマイクロメゾスコピックにおける要素が原子の

ような「引力」と「斥力」を有する性質を持つことに対応して、古典量子力学をもとにした準分子モデリングを導入して、本研究で用いるボンドばねと合成ばねのパラメータ決定法を示した。

第4章「本研究におけるプログラムシステムの開発」では、前章で提案したラミネート複合材料への個別要素法モデル化の方法の有用性を数値解析的に実証するためには、この個別要素法モデルと一体になった数値解析システムが不可欠であると考え、本研究におけるプログラムシステムの開発をプリプロセッシング、接触判定、基本解析、ポストプロセッシングの四つ部分に分けて行なった。①個別要素法解析のプリプロセッシングとしての粒子パッキングは、規則的パッキングと落下法による不規則的パッキングに関するプログラムを作製した。これは、解析モデルに関する必要な情報データをフォーマットし、一つのプリプロセッシング処理ファイルで格納して、ソルバー（接触判定と基本解析）に効率よく送り込む機能を有する。②解析時間をセーブするために、粒子接触判定と基本解析については、それぞれ領域セル分割法とヴェルレ差分計算法を用いた。この二つのアルゴリズムを組み合わせ、本章で開発したプログラムシステムでの個別要素法数値解析にかかる時間を大幅減少することができた。③ソルバー（接触判定と基本解析）からの解析結果を受け取り、そこから進展時間による粒子の位置量を抽出し、各時刻におけるモデルの画像を作って、解析時間に対応した一貫的な運動のアニメーションを自動的に示せるようにした。最後に2次元2成分系粒子の充填現象の数値計算により、このプログラムシステムの従来の個別要素法への適用性を示した。

第5章「ラミネート複合材料破壊シミュレーションへの適用性の検討」では、第3章に提案したラミネート複合材料解析のための個別要素法モデルを用いて、低速横断衝撃に対する同モデルの適用性検討の観点から、同方向およびクロス・プライのラミネート複合材料の破壊現象の第6章はく離問題検討に向けての準備的シミュレーションを行った。その結果は、これらのラミネート複合材料において従来の実験において定性的に知られている破壊の起こり方とほぼ一致するものであり、第3章のモデルのラミネート複合材料破壊挙動シミュレーションモデルとしての有効性が確認された。

第6章「シミュレーションによるラミネート複合材料層間はく離問題の検討」では、4層からなるクロス・プライのラミネート複合材料を対象として、3種類の衝撃速度と3種類の体積率におけるシミュレーションを通じてラミネート複合材料の特徴破壊モードとされる層間はく離問題の検討を行った。①衝撃子の降下量を一定とする場合には、運動エネルギーを中心した考察により、衝撃子の衝撃速度は、ラミネート複合材料の層間はく離の破壊程度と反比例するということが分かった。また、ラミネート複合材料の体積率は、ラミネート複合材料層間はく離の破壊程度と反比例するということも分かった。ラミネート複合

材料の破壊の程度については、体積率が大きいほど破壊の程度は小さいということが分かった。②衝撃子が与えるエネルギーを一定とする場合には、同じように運動エネルギーを中心した考察により、衝撃子の衝撃速度は、ラミネート複合材料の層間はく離の破壊程度と反比例するということが分かった。また、ラミネート複合材料の体積率は、ラミネート複合材料層間はく離の破壊程度と反比例するということも分かった。ラミネート複合材料の破壊の程度についても、体積率が大きい方が破壊の程度は小さいということが分かった。

第 7 章「結論と展望」では、本研究を総括し、主な結論と今後の展望について述べた。本研究から得られた主な成果、結論を挙げると以下のようになる。①ボンド要素とその間に存在するボンドばねと合成ばねを提案し、従来の個別要素法に導入することによって、ラミネート複合材料解析のための個別要素法解析を可能とした。また、マイクロメソスコピクにおける要素について、準分子モデリングを合成ばねとボンドばねに導入することによって、提案したラミネート複合材料解析のための個別要素法モデルのパラメータを決定した。②提案した個別要素法モデルをベースにして、従来の個別要素法モデルを含む、本研究における個別要素法解析プログラムシステムを開発した。伝統的な 2 次元 2 成分系粒子の充填現象を解析することによって、そのプログラムの従来の個別要素法問題への適用性を示した。③同方向およびクロス・プライのラミネート複合材料において、ボンド要素とその間に作用するボンドばねと合成ばねを用いてモデル化し、実際に行った横断衝撃における動的破壊挙動シミュレーション結果は、従来の実験で観察された破壊の様子とほぼ対応するものとなっていることが分かった。④低速度衝撃シミュレーションによりラミネート複合材料層間はく離問題の検討を行って、衝撃子の衝撃速度とラミネート複合材料の体積率は、それぞれラミネート複合材料の層間はく離の破壊程度と反比例するということが分かった。ラミネート複合材料の破壊の程度については、体積率が大きい方の破壊の程度は小さいということが分かった。⑤本研究のコンピュータ実験により、提案したラミネート複合材料解析のための個別要素法モデルは、ラミネート複合材料破壊の動的挙動をシミュレーションするのに有効な解析方法であると考えられる。今後、今までの研究成果をもとに期待される研究の課題と展望は次のようである。①提案した個別要素法モデルに基づき、3次元解析への拡張を進める必要がある。また、ラミナ間の接合部に強度の影響を数値解析に反映させる方法も期待される。②コンピュータ実験によるラミネート複合材料破壊のシミュレーションの結果を確かめるための実験を行い、本研究のモデリングや解析手法が実験の現象にも結びつけるものが必要である。また、より複雑な構造を有するラミネート複合材料破壊の動的解析も期待される。

なお、論文題目の欧文名は、Simulation of Transverse Impacting Damage of Laminated Composite by Distinct Element Method である。