

審査の結果の要旨

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、本文7章からなる。

ラミネート複合材料は、そのテイラーリング性から、使用目的・想定外力に対応させた、優れた比強度、比剛性を有する材料として設計できることから、航空機材料からスポーツ用品まで幅広く用いられている。しかし、ラミネート複合材料は面内の力に対しては優れた強度を期待できるが、面外からの力、特に横断衝撃負荷に弱く、これによって積層板内の界面が局所的にはがれる層間はく離を生じ易いという問題がある。そしてこの層間はく離の存在は圧縮座屈強度の大幅低下を招くため、航空機複合材翼構造設計に見られるように、横断衝撃に対する強さは、構造強度設計にあたっての主要な留意点となる場合も多い。したがって、横断衝撃に対する層間はく離の発生・挙動の評価は重要であるが、一部有限要素法による評価の試みはあるものの、このような層間はく離発生現象をシミュレートする方法論は確立するに至っていない。このようなことから、本研究は、ラミネート複合材料を個別要素モデル化する方法を提案してその確立を図ると共に、その個別要素化したモデルによる横断衝撃による層間はく離の系統だったシミュレーションを行って、ラミネート複合材料の横断衝撃破壊に対する基本的な知見を得ようとするものである。

第1章は「序論」であり、本研究の背景、目的・意義、および本論文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」では、本研究を進める上でのラミネート複合材料と個別要素法についての基本的な知識をまとめている。すなわち、ラミネート複合材料についてはその構造・構成について、また個別要素法についてはその基礎となる力学的支配方程式、個別要素法をコンクリート等の固体材料を扱えるように拡張した拡張個別要素法の考え方と同法における要素間力のばねによる与え方、数値積分法等についてまとめている。

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個別要素法モデル化についての方法を提案している。すなわち、まずラミネート複合材料を球状要素と球状要素をそれによって繋ぐと強化繊維に相当するものとなるボンドばね及びマトリックスの存在に対応する合成ばねで構成する、一般性のある三次元個別要素法モデルを提案している。また、本研究で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に対する二次元個別要素法モデル化の方法を示している。さらに要素間に働く結合力の与え方として、準分子モデリングにおける方法を導入して、本研究で用いるボンドばねと合成ばねの性質を定めるパラメータの決定法を示している。

第4章「本研究におけるプログラムシステムの開発」は、前章で提案したラミネート複合材料の個別要素法モデルを解析するために本研究で開発したプログラムについてその内容、特徴をまとめたものである。また基本的問題の解析を行って、開発プログラムが期待した機能を果たすことを検証している。

第5章は「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」であり、第4章で開発したラミネート複合材料のための個別要素法プログラムを用いて、第3章での個別要素法モデルの低速横断衝撃に対する適用性を検討するための、同方向複合材料およびクロス・プライラミネート複合材料の破壊現象についての準備的シミュレーションを行っている。その結果をこれらラミネート複合材料において従来実験を通じて定性的に知られている事実と比較し、破壊の起こり方、特に界面はく離現象につきシミュレーション結果は実験事実とほぼ対応するものとなっており、従って、第3章での個別要素法モデル化は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有効なものであるとしている。

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」は前章までの結果を踏まえ、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、低速横断衝撃の範囲で、衝撃速度と強化繊維の体積率を系統的に変化させたシミュレーションを行い、衝撃速度と体積率が界面はく離現象にどのように影響するかを検討している。シミュレーションは衝撃子の降下量を一定にしたものと、衝撃子の与えるエネルギーを一定にしたものの二通りを行っており、これらを通じて、衝撃速度は速くなると破壊は貫通型に、遅くなると界面はく離型になる傾向があること、また体積率は増すほど層間はく離に対しては強くなるといった基本となる知見を得ている。

第7章は「結論と展望」であり、本論文の成果をまとめると共に残された問題について将来に向けての展望が述べられている。

以上要するに本論文は、これまでにまだ確立されていないラミネート複合材料横断衝撃破壊のシミュレーションにつき、個別要素法によるシミュレーション手法を開発、その手法による系統だったシミュレーションを実施することにより、ラミネート複合材料横断衝撃破壊に関する有用な知見を得たものであり、今後益々適用範囲が広がると考えられるラミネート複合材料の強度信頼性の向上に寄与するところが大きいものと考えられる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。