

氏 名	たていし もとはる 立 石 源 治
学位(専攻分野)	博 士 ( 工 学 )
学 位 記 番 号	博 甲 第 3 1 4 号
学 位 授 与 の 日 付	平成 15 年 3 月 25 日
学 位 授 与 の 要 件	学位規程第 3 条第 3 項該当
研 究 科 ・ 専 攻	工芸科学研究科 先端ファイブロ科学専攻
学 位 論 文 題 目	衝撃負荷を受ける高分子系複合材料の破壊挙動解析
審 査 委 員	主 査 濱田 泰以 委 員 石原 英昭 委 員 岩本 正治 委 員 横山 敦士

### 論文内容の要旨

本論文は、高分子系複合材料の大規模な衝撃破壊挙動を、材料物性値等の基本データを用いて表現するための数値解析手法を構築し、各種数値実験を行うことによりその有効性を検討した研究である。本論文は 5 章および緒論と結論より構成され、以下に各章の概要を示す。

第 1 章では本研究に至る背景および従来の研究の現状と問題点を指摘し、本研究の必要性を示した。

第 2 章では高分子系複合材料円筒の進展型破壊挙動を、静的微小変形理論の範疇で表現するための 3 次元シェル要素を用いた数値モデルについて述べた。まず、高分子系複合材料円筒の進展型破壊現象を考察し、有限要素法による解析を行う上での仮定条件を整理した。次に、弾性状態、非弾性状態での構成式を提案した。特に、非弾性状態での応力算定時には、層間はく離破壊、周方向圧縮破壊、周方向引張破壊、せん断破壊を巨視的に表現した軸方向降伏応力、周方向降伏応力というパラメータを用いて応力を評価することにより、周方向に花弁状のひび割れが進展する現象を構成式に導入した。また、円筒形状での軸方向ひずみ一周方向ひずみの連成効果を曲率半径の関数とし構成式に導入することにより、幾何形状が破壊挙動に与える影響を考慮できる数値モデルを構築した。最後に、材料定数、幾何形状、有限要素分割の異なる解析モデルを用いた数値実験を行うことにより、考案した数値モデルが有効であることを明らかにした。

第 3 章では、第 2 章で提案した数値モデルに大変形効果を導入し、座屈破壊挙動と進展型破壊挙動の両者を表現する数値モデルの開発を行った。その中で、進展型破壊が発生している要素では初期応力マトリックスの影響により剛性マトリックスが非正定値となってしまうことを指摘し、この回避手法を考案した。

第 4 章では、進展型破壊の破壊モードを層間はく離破壊、周方向圧縮破壊、周方向引張破壊、せん断破壊に分類し、個々の破壊モードを考慮した数値モデルを構築した。さらに、第 2 章、第 3 章で述べた 3 次元解析に必要なパラメータすなわち軸方向降伏応力、周方向降伏応力を同定する手法を考案した。

第 5 章では、第 2 章、第 3 章で述べた破壊挙動解析のための数値モデルに動的効果を導入した。動的効果導入にあたって、時間積分手法および減衰特性を調査検討し、高分子系複合材料部材の衝撃破壊解析に適切な条件の提案を行った。つぎに、高分子系複合材料円筒、高分子系複合材料

角筒を用いた数値実験より、薄肉角筒は静的解析では座屈破壊が発生し動的解析では進展型破壊が発生することを示した。

第6章では、第2章から第5章に示した数値モデルを総括し、高分子系複合材料部材の破壊挙動解析のための数値解析手順を提案した。解析対象となる破壊現象を示し、本数値解析に必要となる材料定数、時間刻み、減衰定数等の解析条件を整理した。

第7章では、各章で得られた知見をまとめ、高分子系複合材料の衝撃圧縮破壊解析手法に関する総括を行った。

### 論文審査の結果の要旨

自動車産業分野において省エネルギー化および軽量化を図るため、これまで主に用いられてきた金属に代わる材料として比剛性、比強度の高い高分子系複合材料を使用する試みが始まっている。高分子系複合材料に適当な条件で圧縮荷重を加えると進展型破壊と呼ばれる安定した連続破壊様相を呈する。この破壊により吸収されるエネルギーは金属材料と比較しても遜色はなく、しかも一定荷重を維持しながら破壊が進行する。この特徴を生かした衝撃吸収部材への利用が注目されている。また、現在では車両開発の主役は従来の実験に代わり有限要素法解析に代表される数値解析へと移行しつつある。このような背景の中、複雑な破壊挙動をともなう高分子系複合材料部材の衝撃吸収挙動をシミュレート可能な数値解析手法が必要である。しかし、高分子系複合材料の破壊挙動の予測は、その挙動の複雑さゆえ、小規模な破壊挙動でも膨大な計算量を要し、衝撃吸収部材のような大規模な破壊を取り扱う解析法はまだ確立されたとは言い難いのが現状である。本論文では、高分子系複合材料部材の大規模な衝撃破壊挙動を、材料物性値等の基本データを用いて表現するための数値解析手法を構築し、各種数値実験を行うことによりその有効性を検討した。

高分子系複合材料円筒の進展型破壊挙動をシミュレートするための数値モデルの提案を行っている。特に、実用的な計算時間でのシミュレーションを行うために進展型破壊現象を巨視的に表現する数値モデルを考案し、この数値モデルを用いた数値解析を行い、その有効性を確認している。さらに本数値モデルを拡張し、座屈破壊挙動と進展型破壊挙動を複合的に表現する数値モデルの提案を行っている。本数値モデルに必要となった改良点を明らかにし、この対策を考案している。本数値モデルを用い、座屈長、降伏応力、幾何形状の関係により破壊パターンが変化する高分子系複合材料円筒、角筒の破壊挙動をシミュレートできることを検証している。また、各種時間積分手法を調査するとともに、その特徴を検討し高分子系複合材料部材の衝撃破壊解析のための時間積分手法の開発を行っている。

本論文で提案した数値解析手法は、従来の数値解析手法では困難であった、高分子系材料の大規模な破壊現象を効率的に解析する手法である。本数値モデルは本論文で対象とした円筒形状部材以外にも応用可能であり、広範な本材料の設計問題に対する有効な指針を与え、大きな役割を果たし得るものと高く評価された。

本研究をまとめるに当たり基礎となったレフェリー制のある3報の論文を下記に示す。

- (1) 立石源治, 穴山明寛, 横山敦士, 濱田泰以: クラッシング破壊を伴うF R P材料の衝撃解析用数値モデル, 日本材料学会誌, 51, 5, pp. 506-511 (2002)

- (2) 立石源治, 横山敦士, 濱田泰以 : 座屈現象を考慮したクラッシング破壊を伴うF R P材料の衝撃解析用数値モデル, 日本計算工学会論文集, Paper No. 20030002 (2003)
- (3) A. YOKOYAMA, M. Tateishi, Macroscopic Numerical Modeling for FRP Tubes with Crushing Behavior under Compressible Load, International Journal of Crashworthiness, Submitted
- 上記3編のうち2編は申請者が筆頭著者である. 以上の結果より, 本論文の内容には十分な新規制と独創性ならびに高い学術的な価値があることを全審査員が認めた.