

氏名	こいけ あさお <b>小池 朝夫</b>
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	博甲第928号
学位授与の日付	平成31年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科 先端ファイブ科学専攻
学位論文題目	<b>軸圧縮荷重を受ける繊維強化複合材料円筒の初期破壊挙動に関する研究</b>
審査委員	(主査)教授 横山敦士 教授 佐久間淳 教授 西村寛之

## 論文内容の要旨

本論文は、軸圧縮荷重を受ける高分子系複合材料の破壊挙動について、円筒内部の破壊現象の観察等、実験的に詳細な検討を行い、強化繊維が層状に配置されていることによる特徴的な破壊現象を抽出し、その初期破壊現象が同じ圧壊現象の連続的に発生するプログレッシブ・クラッシング破壊を誘引しているメカニズムについて検討している。また、圧縮破壊過程において変形とともに発生する繊維強化複合材料特有の破壊である剝離現象を表現しうる数値解析モデルを用いて破壊過程での応力伝達機構の詳細な検討を行った研究成果をまとめたものである。本論文は4章および緒論と結論から構成され、以下に各章の概要を示す。

第1章では、本論文の背景として、自動車の安全性能を向上させるためのエネルギー吸収部材の重要性について説明し、繊維強化複合材料の比強度や比剛性に優れている点から軽量化への寄与と、エネルギー吸収部材としての優位性を示している。本論文の目的を繊維強化複合材料の軸圧縮破壊時にプログレッシブ・クラッシングが発現するまでの初期段階の破壊過程の現象を明らかにすることとし、さらに現象を簡便に再現可能な数値解析モデルを構築することとしている。

第2章では、繊維強化複合材料円筒の軸圧縮荷重時に発生する破壊のメカニズムとエネルギー吸収性能との関係を示し、繊維強化複合材料が安定的に破壊するまでの初期の遷移過程における破壊機構が重要であることを解明している。本章では、実際に長繊維強化複合材料円筒を製作して軸圧縮破壊実験を行い、初期の遷移過程の破壊機構を詳細に分析し、破壊過程の解明を行っている。この結果に基づき、次章以降で構築される数値解析モデルを作製する上での要件について提示している。

第3章では、前章で明らかにした初期の破壊過程を再現することが可能な数値解析モデルを構築している。数値解析モデルの構築にあたり、破壊現象の再現手法の検討を行い、要素サイズ、モデル化に必要な繊維強化複合材料の層の表現法についての検討を行い、適切なモデル形状の設定法について述べている。以上の解析条件の知見を元にして、初期破壊機構を再現可能な数値解析モデルを作成している。さらに、繊維強化複合材料円筒における曲率の破壊現象に対する影響を表現できる数値解析モデルの構築のため、円形形状から受ける周方向の拘束状態、つまり周方向強度が破壊現象に与える影響を表現可能な手法の検討を行っている。以上、本章で提案してい

る数値解析モデルの有効性の確認を行っている。

第4章では、構築した断面モデルを用いて繊維強化複合材料円筒の軸圧縮破壊における特徴的な破壊現象である初期破壊時の層間破壊について、層間強度や亀裂進展性に関連している破壊力学パラメータである破壊靱性やエネルギー解放率の破壊現象への影響を検討し、破壊過程における破壊や全体の変形との関連性を明らかにしている。また、数値解析結果から得られた知見を基に、エネルギー吸収効率を向上させるためのパラメータスタディを実施し、各層間の強度とエネルギー吸収量の関係性について検討し、繊維強化複合材料円筒のエネルギー吸収性能に対する評価手法として、本論文で提案している数値解析モデルが有用であることを示している。

第5章では、繊維強化複合材料円筒の周方向から受ける強度の違いにより、断面の初期破壊の変化について検討している。ここでは繊維強化複合材料円筒モデルを用いて、断面の周方向破断の有無の違いをパラメータとして、初期破壊に及ぼす影響について検討し、外周部の破断の有無が円筒の初期破断の発生に影響を及ぼすことを明らかにしている。

第6章では、各章で得られた知見をまとめ、繊維強化複合材料円筒の初期破壊現象の発生機構ならびに数値解析技術を用いたその評価手法について、各章で得られた知見をまとめている。最後に、本研究における今後の展望を述べ、本論文における結びとしている。

## 論文審査の結果の要旨

繊維強化複合材料は、金属と比較して比強度や比弾性率が高く、構造物の軽量化に寄与しており、また、繊維強化複合材料を圧縮すると繊維破断や剥離等の微細な破壊が繰り返されることによりエネルギーが吸収されるという金属とは異なる特徴を持つ。破壊のさせ方により、繊維、マトリックスや層間が逐次破壊していく現象が発現し、エネルギー吸収効率が高いことも知られている。この現象はプログレッシブ・クラッシングと呼ばれ、一部の自動用のクラッシュボックスにエネルギー吸収機構として利用されている。しかし、破壊が始まりプログレッシブ・クラッシングが発現するまでの遷移過程については、破壊メカニズムに関する詳細な分析例はほとんどなく、十分な解明が進んでいないのが現状である。このことから、プログレッシブ・クラッシングに関する CAE の適用も破壊の初期段階からは十分には再現できておらず、事前検討や設計が可能な状態であるとは言えない。

以上を踏まえ、本論文では繊維強化複合材料円筒の軸圧縮破壊時にプログレッシブ・クラッシングが発現するまでの初期段階の破壊メカニズムの現象を明らかにした。この知見は、自動車搭載用クラッシュボックスの設計指針として重要であると考えられた。また、その現象を再現可能な数値解析モデルを構築し、そのモデルを用いての破壊力学のパラメータである破壊靱性や亀裂進展特性と破壊形態の関係性を明らかにした。

本論文で得られた軸圧縮負荷を受ける繊維強化複合材料の初期破壊メカニズムの解明ならびにその再現可能な数値解析手法の開発は、本材料がクラッシュメンバーといった新たな工業部材として使用されていく上での重要な設計指針を与えるものとして工学的な価値が高く評価された。

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) 小池朝夫、横山敦士、秋田麗佳、長繊維ランダム系 FRP 円筒の軸方向圧縮時における初期圧

壊メカニズムの解明, 材料, 第65巻, 第3号, pp.239 - 244, 2016

- (2) Asao Koike, Reika Akita, Atsushi Yokoyama, Fracture Simulation of an FRP Tube with Continuous Random Fibers at the Initial Stage, International Journal of Automotive Composites, Vol.4, pp.52 – 70, 2018
- (3) 小池朝夫、秋田麗佳、横山敦士、FRP 円筒の軸圧縮破壊における層間の破壊力学パラメータの影響、材料、掲載決定済み（採択決定日：2018/10/25）

上記3編は申請者が筆頭著者である。また、いずれの論文においても、既発表の論文との重複をチェックし、二重投稿等の研究者倫理に反する行為がないことを確認した。以上の結果より、本論文の内容には十分な新規性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。