

氏名	ふおーてん がぶりえる FORTIN GABRIEL
学位(専攻分野)	博士(学術)
学位記番号	博甲第965号
学位授与の日付	令和2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	Crushing Energy Absorption Capacity of Braided Glass Fiber Composite Rods with Applications in Lightweight Panel Structures (ガラス繊維組物複合材料ロッドにおける粉砕エネルギー吸収能力および軽量化パネル構造への適用について)
審査委員	(主査)教授 横山敦士 准教授 山田和志 教授 佐久間淳

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関して、組物構造を有するガラス繊維強化複合材料ロッドを対象にして、軸圧縮過程の内部の破壊現象の観察等、実験的に詳細な検討を行っている。強化繊維が組物構造を構成していることによる特徴的な破壊現象を抽出し、その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を解明している。また、ガラス繊維強化複合材料ロッドを効果的にエネルギー吸収部材として用いるための応用技術として紙製パネル内に設置した軽量化パネルを新たに作製して、その破壊機構を詳細に検討することにより軽量化パネルの高エネルギー吸収部材としての可能性についての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、自動車等の衝突時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。本論文の目的を組物構造を有する繊維強化複合材料ロッド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破壊過程の現象を明らかにすることとし、さらに本ロッドを用いたエネルギー吸収用の軽量化パネルについてエネルギー吸収現象の解明をすることとしている。

第2章では、組物構造を有する繊維強化複合材料ロッドの軸圧縮負荷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ためには軸圧縮強度と円周方向強度のバランスが重要であり、組物構造はそのバランスを調整するのに有効であることを解明している。さらに、このロッドを紙製のパネルに組み込んだエネルギー吸収用軽量化パネルを作製して、軸圧縮破壊実験を行い、初期の遷移過程の破壊機構に対してのパネルの支持条件の影響を詳細に分析し、パネルの構造が破壊過程に与える影響の解明を行っている。この結果に基づき、エネルギー吸収部材に対しての軽量化パネルの設計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組物複合材料ロッドを組み込んだ軽量化パネルの破壊過程に関する知見を元にしてアルミ板とのハイブリッド構造のパネルについての圧縮破壊過程の解明を行っている。前章での知見により複合材料ロッドに効果的に圧縮破壊現象を生じさせるためには支持条件の設計が必要であるため、支持強度の向上を目指してアルミ材による補強を行い、軽量化パネルの破壊現象に対する複合材料ロッドの支持強度の影響について詳細な検討を行い、適切な金属、複合材料ハイブリッド構造の設定法について述べている。以上、本章で提案している軽量化パネルに対する金属によるハイブリッド構造の有効性の確認を行っている。

第4章では、前章のハイブリッド化による軽量化パネルのエネルギー吸収性能向上の効果を発展させるため、組物複合材料ロッド自体に対する金属によるハイブリッド化の効果についての検討を行っている。軸圧縮破壊を生じる組物複合材料にとって円周方向強度が重要な要因であることを第2章で示した知見を元にして、ロッドにアルミ円筒を組み合わせたハイブリッドロッドを作製してその効果についての検証を行っている。金属円筒を複合材料ロッドと組み合わせることによる円周方向強度の向上が得られるため、エネルギー吸収性能の大幅な向上が見られることが確認され、その有効性が示されている。また、このハイブリッドロッドの形状最適化についての実験的な検討も行い、最適なハイブリッドロッドの作製指針を得ている。

第5章では、紙製パネルの補強ならびに複合材料ロッドの指示強度の向上を図るためにスチレンフォーム材を内部に配置した軽量化パネルを作製し、パネルのハイブリッド化によるエネルギー吸収性能の向上に対するパネル構造の設計指針構築の提案を行っている。詳細な実験結果を元にしてパネル構造のハイブリッド化がエネルギー吸収性能の向上に有効であり、特に複合材料ロッドの連続圧縮破壊現象の安定的な発現に有効であることを示している。

第6章では、各章で得られた知見をまとめ、繊維強化複合材料ロッドの初期破壊現象の発生機構ならびにロッドを用いたエネルギー吸収用軽量化パネルの破壊実験より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。複合材料そのものは通常、脆性的に破壊するが、破壊のさせ方によっては、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低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、その形状、材料の内部構成が大きな影響を与えている。高エネルギー吸収性能を持つ複合材料部材を作製するためには、適切な設計を行う必要があるが、まだ破壊メカニズムに関する詳細な分析例はまだ少なく、多様な用途に対する複合材料部材の圧縮破壊現象について十分な解明が進んでいないのが現状である。

以上を踏まえ、本論文では組物構造を有する繊維強化複合材料ロッドの軸圧縮破壊時にプログ

レシブ・クラッシングが発現するまでの破壊メカニズムの現象を明らかにした。この知見は、自動車搭載用エネルギー吸収用パネルの設計指針として重要であると考えられた。

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ロッドの破壊メカニズムの解明ならびにそのエネルギー吸収部材への適用検討は、本材料がエネルギー吸収部材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) Gabriel Y. Fortin, Elsayed A. Elbadry and Hiroyuki Hamada, Crashworthiness of cardboard panels reinforced with braided grass fiber rods for vehicle side impact protection, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 37(23), pp1387-1401, 2018
- (2) Gabriel Y. Fortin, Elsayed A. Elbadry and Hiroyuki Hamada, On crushing characteristics of hybrid sandwich aluminum cardboard panels reinforced with glass fiber composite rods, *Science and Engineering of Composite Materials*, Vol.26(1), pp.244-254, 2019
- (3) Gabriel Y. Fortin, Elsayed A. Elbadry and Hiroyuki Hamada, Crashworthiness of recycled cardboard panels reinforced with hybrid columnar aluminum tube-GFRP rods, *Polymer Composites*, Vol.40(11), pp.4215-4227, 2019

※上記主論文にある Gabriel Y. Fortin は、申請者 FORTIN GABRIEL と同一人である。

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。