

氏名	じょ しばらん XU ZHILAN
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	博甲第903号
学位授与の日付	平成30年9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	MECHANICAL PROPERTIES AND INITIAL FRACTURE BEHAVIOR OF WOVEN FABRIC REINFORCED COMPOSITES (織物強化複合材料の力学特性及び初期破壊挙動に関する研究)
審査委員	(主査)教授 横山敦士 教授 佐久間淳 准教授 高木知弘 准教授 大谷章夫

論文内容の要旨

本論文は、織物構造を有するガラス繊維および炭素繊維を強化材とした高分子系複合材料の破壊機構について、初期破壊過程を破面観察等、実験的に詳細な検討を行い、強化繊維が織物構造を有していることによる特徴的な破壊現象を抽出し、さらにはその最終強度への影響について検討している。また、複合材料内の織物構造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も行った研究成果をまとめたものである。本論文は5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、本研究に至る背景および目的について述べている。織物複合材料は織物構造を強化繊維が構成していることによる破壊が発生して、その発生メカニズムの解明がこの材料の強度予測ならびに設計法確立にとって重要な要因となっていることを指摘している。このような状況を鑑みて織物複合材料の破壊現象の解明の必要性について述べている。

第2章では、織物複合材料の初期破壊現象の検討ならびにその成果を用いた数値解析モデルの構築を行っている。織物構造に対して荷重負荷方向を傾けた試験片を作製して、その初期破壊プロセスを検討することによって、破壊現象が織物構造により大きな影響を受けていることを示している。この結果を基にしてこの破壊現象を表現しうる数値解析モデルの検討を行っている。初期破壊において破壊現象が繊維束内部ならびに繊維束間の樹脂破壊であることを指摘し、その破壊現象を表現可能な梁要素を用いた数値モデルの提案を行っている。

第3章では、炭素繊維を強化繊維とした織物複合材料の強化繊維に対する表面処理法が初期破壊現象に与える影響について検討を行っている。織物複合材料において一方向強化複合材料の様に初期破壊がそのまま最終破断に進展することは少なく、内部に発生した微細なクラックが連結しながら最終破壊に至ることが多い。このため、初期破壊のクラックを押さえるための界面処理が最終破壊に影響を与える。この処理法の影響を実験的に評価し、適切な表面処理を行うことで強度向上の効果が得られ、その効果は織物軸と荷重負荷方向との角度が大きくなるほど顕著になることを示している。

第4章では、織物複合材料の初期破壊現象に対する織物構造の影響について検討を行っている。繊維束の太さの異なる2種類の織物を用いて複合材料を作製して、その初期破壊現象の検討を実験的ならびに数値解析的に検討している。実験的に初期破壊現象には2章で述べている繊維束間ならびに繊維束内のクラックが発生していることを確認しているが、その発生密度は繊維束の太さが異なることで大きく違っていることを明らかにしている。さらに数値解析を用いて評価を行い、この現象は織物構造のクリンプの違いにより発生していることを指摘している。また、この現象が最終破断に対して大きな影響を明らかにしている。

第5章では、ガラス繊維と炭素繊維の2種類の繊維を用いたハイブリッド型の織物複合材料の初期破壊現象の評価を行っている。ハイブリッド型の織物では種類の繊維を用いて織物を構成しているため、多様な剛性、強度の異方性織物複合材料を作製可能であるがその初期破壊現象は荷重負荷方向に直交する繊維の種類により大きく異なり、この初期破壊現象が最終強度に影響を与えていることを示している。また、数値解析モデルを用いてこの破壊現象の評価を行い、繊維表面のせん断応力が初期破壊現象に影響を与えていることを指摘している。

第6章では、前章までの知見を用いて強化繊維を編物で縛った構造体（Multi-axial Warp Knitted Fabric）を強化材にした複合材料の初期破壊現象の解明を行っている。本章で用いている強化材は一方向繊維に対して他の繊維を用いて縛るため、編物繊維の近傍で初期破壊が発生していることを確認しており、編物繊維の入る密度が強度に大きな影響を与えていることを指摘している。

第7章では、各章で得られた知見をまとめ、織物複合材料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

省エネルギーの観点から工業製品の軽量化が要請されている。このため、各分野において繊維強化複合材料の利用が進んでいる。繊維強化複合材料には複合材料内での繊維の形態により多様な材料を作製可能である。織物構造体を強化材とした織物複合材料は一方向強化複合材料が持っている極端な強度異方性や成形が難しいと言った欠点に比較して、強度の異方性が比較的小さく、幅広の大きな構造物を成形しやすいなど工業的に大きな利点があるため、自動車などの実用構造体の材料として多用されてきている。一方、織物構造を強化繊維が構成していることにその特徴的な破壊現象が発生し、その発生が最終破壊に影響を与えていることが知られている。その発生メカニズムの解明がこの材料の強度予測ならびに設計法確立にとって重要な要因となっている。

本論文では織物構造を有するガラス繊維および炭素繊維を強化材とした高分子系複合材料の破壊機構について、特に初期破壊過程について強化繊維が織物構造を有していることによる特徴的な破壊現象を抽出し、さらにはその最終強度への影響の解明を行ったものである。評価手法としては、引張試験における詳細な破面観察による内部クラックの進展についての評価および複合材料内の織物構造を表現する数値解析モデルを用いての破壊過程での応力伝達機構の検討を組み合わせることにより、その破壊現象の詳細な解明に成功している。

本論文では、得られた織物複合材料の初期破壊メカニズムならびにその評価手法が、本材料が多様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2報の論文を下記に示す。

- (1) Zhilan Xu, Asami Nakai, Yuqiu Yang, Hamada Hiroyuki, A Study on the Initial Fracture Behavior of CF/GF Intra-Hybrid Woven Fabric Reinforced Composites, Open Journal of Composite Materials, 2018, 8, 11-27
- (2) Zhilan Xu, Atsushi Yokoyama, Influence of the Woven Structure on the Initial Fracture Behavior of Roving Glass Fabric Reinforced Composite, Open Journal of Composite Materials, 2018, 8, 54-67

上記2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ような背徳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。