

論文審査の結果の要旨

氏名：杉 本 直

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：FRTP と FRP の衝撃特性とその数値解析モデルに関する研究

審査委員：（主 査） 教授 平 山 紀 夫

（副 査） 教授 景 山 一 郎 教授 高 橋 進

名古屋大学客員教授 邊 吾 一

近年の自動車産業における大きな課題として、「1. 衝突時の安全性の向上」と「2. CO₂排出量の低減」の2つが挙げられる。このため、高い衝撃吸収性と車両の軽量化を同時に実現できる材料として、比強度・比剛性に優れる繊維強化プラスチック（以下、FRTP・FRP）を自動車構造体に適用するための研究開発が活発に行われている。そして、ここ数年では、高級車や電気自動車等、一部の車種では車体構造の主要部材として炭素繊維強化プラスチック（CFRP）等の採用が始まっている。また、欧米においてはリサイクルやリユースが可能な熱可塑性樹脂をマトリックスとする炭素繊維強化熱可塑性プラスチック（CFRTP）に関する研究が数多く行われている。

自動車の車体骨格へ軽量素材である FRTP・FRP の適用を検討するために考慮すべき設計項目は、成形性、強度・剛性、衝撃特性、疲労特性、耐吸水性、リサイクル性、コスト等多岐にわたる。その中でも近年の自動車部材の開発項目として、FRTP・FRP の適用による「軽量化」と同時に「自動車の衝突安全性の向上」に関する要求が極めて大きい。これは、FRTP・FRP が高い衝撃吸収特性を素材として有しており、異なる素材を複合させることで、それぞれ単独では達成できないような優れた衝撃吸収特性を実現することができるテーラードマテリアル（Tailored material）だからである。

このような要求に対して、FRTP・FRP を用いて衝突安全性を考慮した軽量化設計を行う場合には、その動的な変形挙動と破壊挙動をあらかじめ把握しておく必要がある。そして、設計初期の段階で、強化繊維とマトリックス樹脂の組み合わせや多様な積層構成を有する FRTP・FRP の衝撃特性の予測が簡便に行える解析手法が必要である。特に、近年の最新の研究では、FRTP・FRP の強化繊維は、破断強度のひずみ速度依存性を持つことが明らかになってきており、材料のひずみ速度依存性を考慮した解析手法の確立が急務である。このような FRTP・FRP の衝撃破壊挙動の解明は、金属材料に比較すると著しく研究が遅れており、ごく限られた形態の強化繊維とマトリックス樹脂を用いた研究が行われているだけである。このため、現時点では、FRTP・FRP の衝撃破壊挙動を予測し、静的な強度・剛性設計と動的な衝撃破壊特性を同時並行で評価できるような手法がないのが現状である。

そこで本研究では、最初に、従来の研究では検討されていない、マトリックス樹脂の違い、織物強化繊維の違い、織物の引張・圧縮負荷方向の違いによる動的変形・破断特性を評価し、自動車構造体へ適用・検討、設計する際の材料特性を得る。そして、材料試験から得られた FRTP・FRP の異方性とひずみ速度依存性を考慮した動的衝撃解析のための材料構成則とその材料パラメータを求め、汎用的陽解法ソフトを用いてモデル化する。そして、最終的には、構築した解析モデルの有用性を検証するために、実際の衝撃吸収部材を想定し、1/3 スケールの円筒型 FRP 部材を試作して衝撃圧縮試験を行い、その予測精度を検証する。本研究の目的は、実際の FRTP・FRP 製自動車部品の衝突時の挙動を精度良く予測するため必要となる、ひずみ速度に依存した異方性材料パラメータの同定方法と解析モデルの定式化を提示することである。

本論文は全7章で構成されており、各章の内容を以下に示す。

第1章では、本研究の背景および目的について述べ、その後、本研究に関連する先行研究とその成果と現時点での問題点について述べる。

第2章では、本研究で用いた複合材料とその成形方法に関する説明を行い、FEM 構造解析において動的破断を表現する材料モデルの材料構成則と解析手法について解説を行った。

第3章では、FRTP・FRP に対し、従来の研究で検討されていないマトリックス樹脂の違い、強化繊維の違

いや織物の引張負荷方向の違いによる静的及び動的な引張試験を実施し、静的及び動的引張特性を明らかにした。また、マトリクス樹脂が FRTP・FRP の引張特性へ及ぼす影響も明らかにするために樹脂単体の静的及び動的引張特性も調査した。

第4章では、前章同様に、FRTP・FRP に対し、従来の研究で検討されていない樹脂の違い、強化繊維の違い、織物の圧縮負荷方向の違いによる静的及び動的な圧縮試験を実施し、静的及び動的圧縮特性を明らかにした。また、マトリクス樹脂が FRTP・FRP の圧縮特性へ及ぼす影響も明らかにするために樹脂単体の静的及び動的圧縮特性も調査した。

第5章では、実際の自動車の衝撃吸収部材を想定し、1/3にスケールダウンした織物 CFRP 円筒部材を作成し、衝撃圧縮試験を実施した。そして、CFRP 円筒部材の先端形状や繊維配向角の違いが、CFRP 円筒部材の衝撃圧縮特性へ及ぼす影響について調査した。

6章では、第3章の静的・動的引張試験結果と第4章の静的・動的圧縮試験結果を基に、FRTP・FRP の異方性材料パラメータの同定方法と解析モデルおよび材料構成則の定式化を示した。そして、第3章と第4章で用いた試験片形状と同一の FEM モデルを用いて、動的陽解法ソフトにより静的及び動的の引張解析と圧縮解析を実施した。この数値解析結果から得られた動的な応力-ひずみ線図と実験結果とを比較することで、ひずみ速度に依存した異方性材料パラメータを算出した。そして、算出した FRP の異方性材料パラメータを使用した数値シミュレーションによる衝撃圧縮破壊挙動と、1/3スケールの円筒型 FRP 部材の衝撃実験結果の比較を行い、定式化した材料構成則とその異方性材料パラメータならびに数値解析モデルの妥当性を検証した。

第7章では、本研究で得られた成果を以下のようにまとめている。

- ① 織物FRTP及びFRPの 0° 方向の高速引張変形、圧縮変形における強度と破断歪みの歪み速度依存性は、マトリクス樹脂の影響はほとんどなく、強化繊維の違いによる影響が大きい。
- ② その一方で、 45° 方向の高速引張変形、圧縮変形における強度、破断歪み、吸収エネルギーの歪み速度依存性は、強化繊維とマトリクス樹脂の両方の歪み速度依存性の影響を受けることを明らかにした。
- ③ FRTPとFRPにおいて従来の研究で検討されていない樹脂の違い、織物強化繊維の違い、織物の引張及び圧縮の負荷方向の違いによる動的変形・破断特性を明らかにした。
- ④ 実際の自動車骨格の中の衝突部材を模擬した織物CFRP円筒部材の動的な軸圧縮挙動は、円筒先端テーパ形状により、接触初期の荷重制御が可能であることを示した。また、繊維配向の変化の観点では軸圧縮方向に対して、繊維のある 0° 材のみの構成よりも、 45° 材が入ることで、エネルギー吸収能が向上することを明らかにした。
- ⑤ 本研究で提案した織物CFRPの破断歪みの歪み速度依存性を考慮したFEM解析モデルは、実際の織物CFRP円筒部材の動的な軸圧縮試験結果と良好な一致を示し、本研究で構築した動的衝撃解析モデルの予測精度の高さと有用性を確認した。

以上、本研究で提示したFRTP・FRPのひずみ速度に依存した異方性材料パラメータと数値解析モデルにより、これまでの車体設計では考慮していなかったFRTP・FRPの優れたひずみ速度性を材料設計の初期段階で取り入れることが可能になると期待できる。

これらの成果より、本研究で得られた成果は、軽量の自動車骨格の設計検討への有効な手法として活用でき、自動車の衝突安全性の向上とCO₂排出量の低減へ貢献する点が多い。

この成果は、生産工学、特に複合材工学に寄与するものと評価できる。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

平成 年 月 日