

論文の内容の要旨

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

現在の自動車の車体骨格を構成する材料は、特殊な少量生産車を除き、ほぼ鉄鋼材料で構成されている。この主な理由としては、低コストで加工性、溶接性、リサイクル性が優れており、各自動車メーカーは古くから鋼板車体を前提とした製造ラインに投資をしてきたことが挙げられる。しかしながら、今後の軽量化ニーズの高まりにより鋼板のみの車体では、2030 年代の燃費規制をクリアすることは困難なことであることが報告されている。そのため、鉄鋼やアルミニウム合金と比較して、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、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。

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因子は、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要求項目として、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」に関する期待が極めて大きい。このような要求に対応して、FRTP・FRP を用いて衝突安全性を考慮した設計を行う場合には、動的な変形挙動とその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、強化繊維とマトリクス樹脂の組み合わせや多様な積層構成を有する 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、マトリクス樹脂の違い、織物強化繊維の違い、織物の引張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、汎用動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 8 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

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ー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ーを算出した。そして、算出したFRPの異方性材料パラメーター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ー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、全体のまとめと今後の課題について述べる。

以上、本研究では、自動車部材として今後の適用が渴望されているFRPとFRTPにおいて、従来の研究では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し、設計する際のひずみ速度に依存した異方性材料パラメーターを算出した。そして、得られた材料パラメーターを用いて、実際のFRP製自動車部品の衝突時の挙動を予測する動的衝撃解析モデルを構築し、その予測精度と有用性を示した。

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ー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や構造設計の初期の段階で取り入れることが可能になると期待できる。そのため、自動車部材や衝撃吸収部材の高性能化と軽量化のための設計が短時間で実現でき、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ことが期待される。