

博士論文（要約）

炭素繊維マツト強化熱可塑性樹脂の
挙動解析とモデル化に関する研究

長 塚 渉

論文の要約

論文題目 炭素繊維マット強化熱可塑性樹脂の挙動解析とモデル化に関する研究

氏 名 長塚 渉

本論文では、様々な量産型工業製品として用いられることが想定される炭素繊維強化熱可塑性樹脂について、その品質保証の基礎となる力学挙動のモデル化を試みている。具体的には、様々な環境下で物性を変動させる要因となるマトリックス樹脂の粘弾性特性の寄与について、従来では着目されることが少なかった面外特性の寄与に着目し、曲げ弾性率のモデル化を試みた。これによれば、面外せん断弾性率の定量化方法が提案され、様々な環境下での曲げ挙動における面外特性の影響度について詳細に考察された。また、マトリックス樹脂の特性は面外特性を介して曲げ挙動に反映されていることを定量的に明らかにしている。さらに、試験片のサイズや、マトリックス樹脂を様々に変更して当該モデルの汎用性を検討し、広く取り扱うことができるモデルであることを確認した。

【第1章】

優れた力学特性と化学的安定性を有する炭素繊維（CF）を利用した炭素繊維強化プラスチック（CFRP）は、その高い比弾性率・比強度による軽量化効果、また優れた耐腐食性や疲労特性等の付加的機能により広く適用が進む高機能材料である。しかし自動車への適用において、生産コストに直結する成形サイクルやリサイクル性が強く意識され、従来の熱硬化性 CFRP（CFRTS）の適用は一部に留まっている。このような中で材料の低コスト化適応に向け、成形サイクルや加工性の改善を図るべく成形が容易なポリプロピレン（PP）などを適用した熱可塑性 CFRP（CFRTP）が有望視されている。その中でも、単繊維にまで解繊された CF で構成される等方性マットを強化材として用いた CMT（Carbon fiber Mat reinforced Thermoplastics）は、優れた等方・均質性を有し、3次元形状に対する賦形性・成形性へのポテンシャルを含めて注目されている。しかし CFRTP は成形性や力学特性における機能が認められつつも適用に二の足を踏んでいる。熱可塑性樹脂や不連続繊維を用いることによる力学メカニズムの複雑さによる理論モデルの構築が遅れていることが原因に挙げられ、実用上の安全保証の前提となる汎用的な力学メカニズムの解明が求められる。

本研究では既述 CMT の力学メカニズムについて、マトリックス樹脂の粘弾性や面内・面

外の各弾性特性を適切に評価しモデル化することで、面外挙動の寄与に着目した曲げた弾性率モデルを提案する。また、工業的に広く用いられるよう当該モデルの汎用性を検証し、CFRTP の適用拡大の一步となることを目指している。

【第 2 章】

マトリックス樹脂の温度・ひずみ速度依存性を動的粘弾性評価により取得した。また、時間温度換算則を用いて実測が難しいひずみ速度域の弾性率算出を試みた。本結果によれば、PP の弾性率は温度変化により大きな変動を生じることが分かった。また、様々に測定周波数を変更し評価することで、弾性率のひずみ速度依存性を明らかにした。更に、温度と速度依存性の関係について、時間温度換算則の利用により相互に換算することが可能である事を明らかにした。CMT 物性の温度及びひずみ速度依存性を決めるマトリックス樹脂の重要ファクターが得られた。

【第 3 章】

本章では CF の効果を最も享受する面内力学特性のモデル化を試みた。工業的に適用しやすいよう、従来の一方向連続繊維強化材を説明するスラブモデルを基に不連続繊維強化材に適した縦弾性モデルを構築した。不連続繊維を用いる場合、連続した強化繊維に比べて強度（剛性）の利用率が低下することから、当該モデルでは繊維長や繊維の分散状態による剛性低下を表現する“形状係数”を導入した。また、曲げ特性を表現する面内特性を考えるため、引張・圧縮の両弾性率を考慮した面内縦弾性率を導出した。CMT では引張と圧縮弾性率は僅かに異なるが、十分に等方性かつ均質な材料であることが示された。この結果より面内の代表弾性率を算出することで形状係数を導出した。形状係数すなわち実質的なマット強化材の剛性利用率は繊維体積含有率の 3 割程度で、面内等方材料を示す妥当な値が得られた。マット状強化基材の剛性利用率を定量的に表現する重要な値が得られた。

【第 4 章】

既述の通り、CMT は面内方向について等方で均質な物性を示すが、面外方向への CF 配向はほとんど無く面内成分程の強化が期待できず、面外特性が曲げ弾性率を著しく低下させる要因となる。すなわち、CMT の曲げ特性を理解するうえで面外特性を正しく理解する必要がある。

本章では面外せん断弾性率の測定手法の提案と、その温度依存性を表現できる理論モデルの構築を行う。理論モデルの構築を行う上で、その物性が正しく測定される必要がある。しかしながら、面外せん断特性の評価法は幾つかの規格が存在するが、いずれにおいてもひずみ分布が不均質かつ偏在し、ひずみゲージを用いた直接的なせん断ひずみの測定・定量化が難しい。そこで、ひずみゲージを用いてせん断ひずみが測定できるよう、十分なせん断ひずみ分布領域が一樣に得られる新規試験法を導入した。様々な温度にて新規試験を適用したところ、面外せん断弾性率はマトリックス樹脂特性を反映して顕著な温度依存性を示した。加えて、面外せん断弾性率においても形状係数を付加した簡易な面外せん断弾性率の温度依存モデルを構築したところ、実験値と理論値はよく一致し理論モデルの妥当

性が検証された。当該理論モデルを用いることで樹脂の弾性率から CMT の面外せん断弾性率を予測することが可能になり、部材設計におけるせん断挙動やその温度依存性の影響を考慮する上で有意なモデルといえる。

【第 5 章】

本章では、既述の縦弾性率と面外せん断弾性率にマトリックス樹脂の粘弾性挙動を導入し、ティモシェンコの梁の理論に組み込むことで曲げ弾性率モデルの構築を試みた。加えて、様々な温度条件・ひずみ速度条件下での曲げ試験法を確立し曲げ弾性率を評価した。これにより曲げ弾性率の温度・ひずみ速度依存モデルの妥当性について検証し、試験環境の変化による曲げ挙動の変化について検討した。また、曲げ弾性率における面外せん断特性の寄与率についてひずみ速度・温度依存性を考察した。実験より、曲げ弾性率はひずみ速度および温度に影響を受けることが明らかで、理論モデルの妥当性が実験値より確認された。面内と面外特性各々の寄与率を解析したところ、曲げ弾性率の変化は面外せん断成分の寄与の変化によることが明らかになった。つまりマトリックス樹脂の粘弾性特性は面外せん断弾性率を介してコンポジット物性に反映されているといえる。以上の結果から、過大評価される恐れがあった曲げ挙動について、面外特性を考慮することにより予測精度の向上が見込まれる。面外せん断挙動の影響を正しく考慮することの必要性を示す重要な知見になるといえる。

【第 6 章】

CFRTP を一般的に広く普及させるためには、部材として使用される際の品質保証の根拠、つまり力学メカニズムが正しく理解された設計技術の構築、更に予測技術の向上による材料開発コストの低減が求められている。そこで、曲げ試験におけるスパン効果、また幾つかのマトリックス樹脂の適用を通して、曲げ弾性率モデルの実用性・妥当性を検証する。

まず、試験片（部材）の寸法効果への対応を想定し、曲げスパンを変更して曲げ試験を実施した。その結果、スパン距離が変化してもモデルが十分適用可能である事が立証された。ここで、曲げ弾性率はスパンに応じて変化するが、これは面外せん断弾性率の影響度が変化することに起因していることが理論モデルより結論付けられた。また、マトリックス樹脂を変更した場合の理論モデルの適用性についても検証した。理論モデルには直接マトリックス樹脂の粘弾性特性を代入することができ、曲げ弾性率の温度依存傾向は高精度に予測可能であった。一方で、形状係数の値を樹脂毎に変化することが示された。理論モデルの更なる精度向上には、形状係数の影響因子を詳しく仮定し、その関数化を進めることが汎用性への課題となることを見出された。また、各マトリックス樹脂の長所短所をまとめたところ、ポリメチルペンテン（PMP）は軽量性と耐環境性に優れる樹脂で、マトリックス樹脂としての有用性を示すことができた。

【第 7 章】

本研究では、量産型部材への CFRTP 適用拡大を目的とし、特に CMT の力学特性発現メカニズムの説明とモデル化について詳細に検討した。CFRP は異なる特性の素材を組み合わせることにより、単一の素材では達成し得ない特性を発現することが最大の利点である。一方で、各々の素材の特性がいかに反映され、その影響度がどのように変動するのかを理解しモデル化するこ

とで、初めて“使われる”材料となり得る。そこで“面外異方性”と“粘弾性特性”を考慮した挙動解析とモデル化を進めた。これらの結果、熱可塑性樹脂を用いた CFRTP の曲げ弾性率は、面外特性を通じてマトリックス樹脂の影響がコンポジット特性として反映されていくことが理解された。特に、従来定量化することが難しかった面外せん断弾性率の測定法を確立し、その寄与を詳細に検討できるモデルを構築したことにより、曲げ特性の詳細な理解が進んだ。これにより、面外特性に着目することの重要性が示されたと共に、その特徴的な挙動をモデル化することができた。これにより、CAE 精度の向上や実験手法の改良が進み、更には新規 CFRTP の開発の一助になる基礎知見となると考える。

これら本研究では使われる理論となるよう、できるだけ「簡易なモデル」で「簡易な実験」を通して、メカニズムの説明および物性の評価の提案を心がけた。これにより本報の知見が、実用性・汎用性の観点で設計技術に活かされていくことで、CFRTP の更なる研究開発の加速やその普及に貢献していくと期待する。