

博士学位論文審査要旨

2009年2月17日

論文題目：マトリックスの硬化状態と織構造を考慮した織物強化複合材料の力学的特性および内部損傷に関する研究

学位申請者：太田 孝雄

審査委員：

主査：	同志社大学大学院工学研究科	教授	松岡 敬
副査：	同志社大学大学院工学研究科	教授	今井田 豊
副査：	同志社大学大学院工学研究科	教授	藤井 透

要 旨：

繊維強化プラスチック (FRP) は、優れた比強度、比剛性を有していることから、軽量化を必要とする構造部材への適用などその用途は広い。FRP を構造部材として適用するにあたり、要求される性能に応じて強化材やマトリックスを適切に選択する段階から FRP 製造過程に至るまで、すべての過程において安全性に対する高い信頼性を確保することが必要となる。本論文は、熱硬化性樹脂をマトリックスとした FRP に対して、マトリックス中に未硬化反応部分が残留するといったマトリックスの硬化状態の問題と、織物を基材とした場合にみられる繊維束のうねりや繊維束形状などの織構造を考慮した織物強化複合材料の力学的特性と内部損傷との関係について論じたものである。

本論文は6章から構成されている。第1章の緒論では、本研究の背景および繊維強化プラスチックの問題点を概観し、マトリックスの硬化状態、内部損傷に関する評価ならびに織構造を考慮する重要性について述べている。また、本論文の全体の構成についてまとめている。

第2章では、平織り GFRP 積層板におけるマトリックスの硬化状態の把握とマトリックスの硬化状態が平織り FRP 積層板の力学的特性に及ぼす影響について検討している。平織り GFRP 積層板のマトリックスの硬化状態は、設定温度 80°C の雰囲気内にて数種類の硬化時間を変化させることによって管理している。平織り GFRP におけるマトリックスの硬化状態は動的粘弾性試験により評価し、その結果、比較的短い硬化時間の場合にはマトリックス中に未硬化反応部分は存在することを確認している。次に、3点曲げ試験により曲げ変形を受ける平織り GFRP の力学的特性に及ぼすマトリックスの硬化状態の影響について内部損傷の観点から検討した結果、マトリックス中の未硬化反応部分の有無によって、破壊形態は縦／横繊維束交差部での meta-delamination から matrix crack へと変化することを明らかにしている。また、長い硬化時間のポストキュアは、平織り GFRP 積層板の強度、弾性率を低下させることから、平織り GFRP 成形時の硬化時間には適正な範囲が存在することを言及している。

第3章では、第2章で述べた熱硬化性樹脂であるマトリックスの硬化状態が GFRP の力学的特性に変化を及ぼす要因を詳細に明らかにするために、GFRP のマトリックス中に存在する未硬化反応部分が繊維／マトリックス間の界面特性に及ぼす影響についてマイクロドロップレット試験を実施し、定量的評価を行っている。その結果、マトリックス内の未硬化反応部分の存在の有無により界面強度は大きく変化することを確認し、特に、長い硬化時間のポストキュアは逆に界面強度を低下させることを明らかにしている。ポストキュアによる界面せん断強度の増加は、繊維／マトリックス間界面の化学的接着を向上させる効果に加え、ポストキュア後に室温まで冷却したときに繊維がマトリックスから受ける圧力、すなわち繊維／マトリックス間における内部

応力による力学的接着効果が大きく寄与することを述べている。さらに、平織り GFRP 単層板の初期損傷および内部損傷進展挙動に及ぼすマトリックス硬化状態の影響について静的引張試験を実施し検討した結果、基材が複雑な強化形態を示す場合でも、ポストキュアにより初期損傷の発生・進展を抑制する効果があることを確認している。

第 4 章では、繊維束のうねりや縦／横繊維束の繊維束形状などの織構造を変化させるために、成形段階において平織り布に予負荷を与えて成形した平織り GFRP 単層板を用いて、静的引張試験による力学的特性ならびに内部損傷挙動に及ぼす織構造の影響について検討している。また、予負荷を与えたことによる繊維束形状および繊維束内の繊維密度分布の変化は、試料の断面観察により得られた画像を二値化処理することにより定量的に評価している。その結果、予負荷を与えることにより縦繊維束のうねりは低減し、横繊維束内の繊維密度は、均一化により高い値を示すことを確認している。また、成形段階に予負荷を与えることによって、引張変形を受けた場合、横繊維束内における初期損傷の発生は遅れ、その後の損傷進展挙動は緩やかになることを明らかにしている。

第 5 章では、第 4 章で得た結果に基づき、平織り GFRP 積層板の力学的特性と内部損傷に及ぼす織構造の影響について、4 点曲げ試験、圧縮試験、引張試験により検討している。その結果、繊維束へ予負荷を施すことによって繊維束のうねりが小さくなるため、特に、曲げや圧縮変形を受けた場合、繊維の微小座屈の発生が低減し、応力-ひずみ曲線における著しい非線形性は示さなくなることを明らかにしている。引張変形を受ける場合、第 4 章の結果と同様に縦繊維束うねりの低減や横繊維束の断面が扁平化することにより、横繊維束内のトランスバースクラックの発生を抑制する効果があることを明らかにしている。さらに、多層構造にみられるネスティングなどの積層配置よりも繊維束のうねりなどの織構造の変化の方が平織り GFRP 積層板の強度特性に強く影響を及ぼすことを示している。また、縦繊維束のうねりと横繊維束の断面を織構造パラメータと定義し各種強度との関係を検討した結果、各種強度と織構造パラメータには密接な関係があることを明らかにしている。

第 6 章では、本論文で得られた結果を総括している。

本論文は、マトリックス中の未硬化反応部分の存在の有無に関するマトリックスの硬化状態と基材である織物の織構造の変化を考慮した織物強化複合材料の力学的特性と内部損傷の関係について明らかにしており、このような知見は、FRP の耐久性や安全性に対する信頼性向上に関する材料設計の発展に繋がることから、学術的にも工学的にも高く評価できる。

よって本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。

学力確認結果の要旨

2009年2月17日

論文題目： マトリックスの硬化状態と織構造を考慮した織物強化複合材料の力学的特性および内部損傷に関する研究

学位申請者： 太田 孝雄

審査委員：

主査：	同志社大学大学院工学研究科	教授	松岡 敬
副査：	同志社大学大学院工学研究科	教授	今井田 豊
副査：	同志社大学大学院工学研究科	教授	藤井 透

要 旨：

本論文提出者は、同志社大学工学部機械工学第2学科を卒業後、2000年3月同志社大学大学院工学研究科機械工学専攻博士課程（前期課程）を修了し、同年4月に大学院工学研究科機械工学専攻博士課程（後期課程）に入学し、2002年3月に同志社大学大学院工学研究科機械工学専攻博士課程（後期課程）を中退後、同年4月より国立富山工業高等専門学校（現在、独立行政法人国立高等専門学校機構富山工業高等専門学校）機械工学科助手として勤務している。

本論文の主たる内容は、材料に2編、Materials Science Research Internationalに1編、Innovative Developments, Characterizations and Applications of Compositesに1編、High Performance Structures and Materials IVに1編、Proc. of the 9th United States-Japan Conference on Composite Materialsに1編、Proc. of the 10th United States-Japan Conference on Composite Materialsに1編の論文発表を行い、内外の学会において十分な評価を得ている。

2009年1月10日午後3時より約2時間にわたり提出論文に関する学術講演会（博士論文公聴会）が開かれ、種々の質疑応答が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに講演会終了後、審査委員により学位論文に関連した諸問題につき口頭試問を実施した結果、いずれも十分な学力を有することが確認できた。なお、フランス語に関しては本学工学部在学中に単位認定されており、十分な能力を有すると認める。また英語に関しては本大学院工学研究科機械工学専攻博士課程（後期課程）在学中に合格しており、さらに英語による論文発表、ならびに海外の国際会議における講演も行っており、十分な語学力を有しているものと認められる。

以上より、本論文提出者は専門分野、および語学力に関して十分な学力を有すると認める。

博士學位論文要旨

論文題目：マトリックスの硬化状態と織構造を考慮した織物強化複合材料の力学的特性および内部損傷に関する研究

氏名：太田 孝雄

要旨：

繊維強化プラスチック（FRP）は、優れた比強度、比剛性を有していることから、最近の地球環境問題に対する関心の高まりや原油高騰が囁かれる中、軽量化を必要とする構造部材への適用などその用途は拡大しつつある。一般に、熱硬化性樹脂をマトリックスとしたFRPは、マトリックス自身の強度が高いことと繊維とマトリックスとの接着性に優れている理由から、一次構造部材としての使用が圧倒的に多い。FRPを構造部材として適用するにあたり、要求される性能に応じて強化材やマトリックスを適切に選択するなどといった材料設計の段階からその強化材とマトリックスを最適な成形法を選択し組み合わせるときのFRP製造過程に至るまで、すべての工程において安全性に対する高い信頼性を確保することが必要となる。しかしながら、実際にFRPが構造部材として使用されている中で、使用環境等の違いにより場合によっては、FRPの寿命が想定したものより短くなることもあり、FRPの安全性に対する信頼性について十分な議論がなされていないのが現状である。

熱硬化性樹脂をマトリックスとしたFRPの場合、マトリックスである熱硬化性樹脂の硬化過程は、熱可塑性樹脂のものと異なり、加熱されると架橋反応して不溶不融の状態に樹脂は硬化する。したがって、そのFRPの成形では、成形現場での温度管理が重要となる。特に船艇・船舶や耐食機器などの現場で直接行うFRP構造物の成形において、ハンドレイアップ法やスプレーアップ法などの成形法が多く採用されているが、これらの成形法は、成形現場での温度管理が困難である。したがって、実際に、FRP成形物には、成形現場での温度管理が不十分であることに起因したマトリックスの硬化不良、すなわちマトリックス中に未硬化反応部分が存在する場合がある。この存在は、マトリックスばかりではなくFRPそのものの機械的性質へ大きく影響を及ぼす。一般に、現場で直接行うFRP構造物の成形では、ポストキュアによって硬化条件を管理している。現在までにポストキュアによってマトリックスの硬化状態の改善を目的としたFRPの強度特性を調査し、ポストキュアによる硬化条件の管理の重要性が提唱されてきたが、逆に、マトリックス中に未硬化反応部分が存在するようなFRPの硬化状態とそのFRPの強度特性の関係を明らかにすることも重要である。

織物を基材としたFRPは、織物の高いハンドリング性により複雑な形状への成形が比較的容易である特徴を有する一方、縦繊維束と横繊維束がお互いに交差し、さらに繊維束は湾曲を帯びているために損傷過程は複雑である。これまでに、織物を基材としたFRPの損傷発生およびその損傷プロセスに関する研究が行われてきた。その研究における評価の多くは、織構造をある集合体（Unit cell）として考え、そのUnit cell内に発生する損傷について論述している。また、初期損傷の発生する領域内の繊維体積含有率 V_f は、領域内どの部分においても同量であると仮定しているが、実際は、FRP構造物の形状や成形の際の成形圧力等により、初期損傷の発生する領域内の V_f は不均一な分布を示すために、初期損傷発生条件およびその損傷過程は異なることが予想される。したがって、局所的に不均一な V_f を考慮した織物強化複合材料の初期損傷の発生および損傷プロセスを明らかにする必要がある。また、繊維束の湾曲はFRPの圧縮特性を著しく低下させることが予想できるが、織物や編物などを基材としたFRPの圧縮特性に関する研究報告は極めて少ない。したがって、織物特有の繊維束の湾曲と織物強化複合材料の圧縮特性ならびに曲げ特性と

の関係について明らかにすることも重要である。

本論文では、熱硬化性樹脂をマトリックスとした FRP に対して、その FRP の製造過程の観点から、マトリックス中に未硬化反応部分が残留するといったマトリックスの硬化状態の問題と織物を基材とした場合にみられる繊維束のうねりや繊維束形状などの織構造を考慮した織物強化複合材料の力学的特性および内部損傷について検討し、今後、FRP が構造部材として利用される場合において、安全性に対するより高い信頼性を確保するために工学上有用な材料設計指標を供出することを目的とした。

本論文は 6 つの章により構成されている。

第 1 章の緒論では、本研究の背景および繊維強化プラスチックの問題点を概観し、マトリックスの硬化状態、内部損傷に関する評価ならびに織構造を考慮する重要性について述べた。また、本論文の全体の構成についてまとめた。

第 2 章では、熱硬化性樹脂をマトリックスに平織りガラス繊維布を基材とした平織りガラス繊維強化プラスチック（平織り GFRP）において、特に、平織り GFRP の成形過程におけるマトリックスの未硬化反応部分に注目した。平織り GFRP の硬化条件は、設定温度一定のポストキュアにて、そのポストキュアの時間を管理することにより決定した。平織り GFRP におけるマトリックスの硬化状態は動的粘弾性試験により評価した。その結果、ポストキュアが不十分な GFRP においてマトリックスの未硬化反応部分が存在することがわかった。次に、平織り GFRP の評価の前に、マトリックス樹脂単体の機械的特性に及ぼす硬化状態の影響についてビッカース硬さ試験および静的引張試験により評価した結果、ポストキュアを施すことによって硬度、強度、ヤング率が急激に上昇する領域と比較的緩やかに上昇する領域が存在することがわかった。さらに、曲げ変形を受ける平織り GFRP の力学的特性に及ぼすマトリックスの硬化状態の影響について内部損傷の観点から検討を行ない、その結果、ポストキュアにより縦／横繊維束交差部ではく離を抑制し、強度、弾性率が著しく上昇することがわかった。一方、長時間のポストキュアは、逆に強度、弾性率の低下を引き起こすことから、平織り GFRP 成形時の硬化時間には適正な範囲が存在することを示した。

第 3 章では、熱硬化性樹脂であるマトリックスの硬化状態がその GFRP の力学的特性に変化を及ぼす要因としていくつか挙げられる中で、特に、繊維／マトリックス間の界面に注目した。GFRP のマトリックス中に存在する未硬化反応部分が繊維／マトリックス間の界面特性に及ぼす影響を定量的に明らかにするために、マイクロドロプレット試験によりガラス繊維／マトリックス間の界面せん断強度の評価を行った。その結果、ポストキュアを施すことによって、界面せん断強度はマトリックスに未硬化反応部分を有するものと比較して約 30% 向上し、長時間のポストキュアは逆に約 30% の界面せん断強度の低下を示すことがわかった。次に、繊維とマトリックスの熱膨張の相違による界面での内部応力に注目して、マトリックスの硬化状態がガラス繊維／マトリックス間の界面強度を変化させる要因について詳細に検討した。その結果、ポストキュアによる界面せん断強度の向上には、繊維／マトリックス間界面の化学的結合を高めたという化学的接着効果に加え、ポストキュア後に室温まで冷却した時、半径方向の収縮により繊維がマトリックスから受ける内部応力といった力学的接着効果が大きく寄与することがわかった。さらに、平織り GFRP 単層板の初期損傷および内部損傷進展挙動に及ぼすマトリックス硬化状態の影響について、静的引張試験を実施し検討した結果、基材が複雑な強化形態を示す場合でも、ポストキュアにより初期損傷の発生・進展を抑制する効果があることを示した。

第 4 章では、織物強化複合材料において、その材料の強度・変形および内部損傷の挙動を把握することに重点を置いた。特に、繊維束のうねりや縦／横繊維束の配置などの織構造に注目し、その織構造を変化させるために、平織り布に対して成形段階において予負荷を与えて平織り布の織構造を変化させる方法を考案した。その方法により成形した平織り GFRP 単層板について、その平織り GFRP 単層板の織構造の変化を把握するために、繊維束の形状および繊維束内の繊維密

度分布を画像処理により定量的に評価した。その結果、予負荷を施すことにより横繊維束内の繊維密度は均一化することがわかった。織物の織構造の中でも、特に、平織り布の繊維束形状の変化や繊維束内の繊維密度分布の違いが平織り GFRP 単層板の初期損傷および内部損傷過程に及ぼす影響を評価するために静的引張試験を実施した。その結果、横繊維束内の繊維密度が均一化することによって初期損傷の発生は遅れ、その後の損傷進展は緩やかになることがわかった。

第 5 章では、織物強化複合材料が構造部材として用いられる場合には、基材である織物を積層して用いるのが主であることから、第 4 章にて明らかとなった織構造の変化による平織り GFRP 単層板の初期損傷およびその損傷過程に基づき、同様の手法により平織り GFRP 積層板を成形し、その平織り GFRP 積層板に対して、4 点曲げ試験、圧縮試験、引張試験を行った。特に、曲げ変形や圧縮変形を受けた場合、繊維束のうねりは FRP の力学的特性に大きく影響を及ぼすことから、曲げや圧縮変形を受けるときの平織り GFRP 積層板の力学的特性に及ぼす織構造の変化の影響について内部損傷の観点から明らかにした。その結果、繊維束へ予負荷を施すことによって繊維束のうねりが小さくなるため、曲げや圧縮変形を受けた場合、繊維の微小座屈の発生が低減し、応力-ひずみ曲線における著しい非線形性は見られないことがわかった。

第 6 章では、これまでの研究を通じて明らかになったことを総括した。