

氏 名	トーマス ホビーブルンケン Thomas Hobbiebrunken
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2574 号
学位授与の日付	平成 17 年 9 月 26 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 学 研 究 科 機 械 工 学 専 攻
学位論文題目	Microscopic Transverse Failure Initiation in Composite Materials —— An Interdisciplinary Multi-Scale Research —— (複合材料におけるトランスバース破壊発生の微視的研究——学際的マルチ スケール解析——)
論文調査委員	(主 査) 教 授 北 條 正 樹 教 授 落 合 庄 治 郎 教 授 宮 崎 則 幸

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、炭素繊維強化樹脂基複合材料の初期損傷であるトランスバース破壊発生のメカニズムを対象として、微視的な繊維と樹脂の幾何学的配置および成形時の熱残留応力を考慮した微視的応力分布を数値解析により求めるとともに、走査型電子顕微鏡内での初期破壊のその場観察実験を組み合わせで検討したもので、9章からなっている。

第1章は緒論であり、航空機等への利用が拡大している炭素繊維強化樹脂基複合材料からなる積層構造物の破壊過程において、初期に生じかつこれに続く巨視的な損傷を引き起こすトランスバース破壊発生に関して、マルチスケールの立場でかつ材料力学と材料科学の学際的見地からの研究の必要性を示した上で、本研究の目的と概要について述べている。

第2、3章では、本研究の基礎となるマトリックス樹脂の特性評価を行っている。第2章では、マトリックス樹脂の非線形応力-ひずみ関係およびその温度依存性を、引張り、圧縮、せん断の各負荷状態で検討している。さらに、線膨張係数とその温度依存性についても明らかにしている。

第3章では、マトリックス樹脂の強度特性に関して、負荷状態、温度および寸法依存性を検討するとともに、既存の樹脂滴を用いる手法で、参照データとなる炭素繊維/樹脂界面せん断強度を明らかにしている。特に樹脂の強度に関しては、新しく直径20 μm 程度の繊維状樹脂を用いる評価法を考案することにより、複合材料繊維間の微小寸法に対応する樹脂の強度を求め、その値が従来のバルク試料の約2倍に増大することを定量的に把握している。

第4、5章では、複合材料界面破壊のマルチスケールメカニクスについて述べている。第4章では、本論文で微視的な応力分布解析に用いた、均質化法によるマルチスケール解析の手法について詳しく述べている。次に、微視的な繊維分布を正方および六角形規則配置とした場合の複合材料の弾性定数を繊維と2章で求めた樹脂の弾性定数から解析により求め、トランスバース方向の特性に関して繊維分布の影響は比較的小さいことを明らかにしている。また、実験で得られた巨視的な応力-ひずみ関係およびその非線形性、熱変形特性が、解析により定量的に予測できることを明らかにしている。

第5章では、走査型電子顕微鏡内でのその場観察実験と数値解析を組み合わせることにより、トランスバース破壊発生、およびそれに続く損傷進展のメカニズムについて検討している。新たに考案した特殊な積層構成の試験片に曲げ外力を負荷することにより、破壊の発生および損傷進展過程を精緻に観察することに成功している。この手法により、破壊は繊維が外力の方向に配列した箇所中の近接した界面から発生することを明確に示した。さらに、この初期破壊発生箇所での界面応力を、繊維の規則配置に基づく数値解析による界面での微視的応力分布およびその成分と比較することにより、トランスバース破壊発生は界面での引張り強度に支配されていることを定量的に明らかにしている。

第6～8章では、成形時の熱残留応力および外力負荷が微視的な応力分布に及ぼす影響を、より詳細に検討している。第6章では、成形時の熱残留応力によりマトリックス樹脂が広い範囲で降伏し、このような非線形性を考慮した解析では成形後の熱残留応力が線形解析と比べ大きく低下すること、ただし、外力負荷過程での破壊発生時の応力分布に非線形性が及ぼす影響はわずかであること等を明らかにしている。

第7章では、巨視的な境界条件の違いが成形時の熱残留応力に及ぼす影響を詳細に検討しており、特に完全に拘束された場合は熱残留応力のみでマトリックス樹脂や界面に破壊が発生することを明らかにしている。

第8章では、まず、計算機モデルによって繊維不規則配置を創出するとともに、不規則度を表現する幾何学的パラメータが実測された繊維不規則配置と一致することを証明している。次に、繊維の微視的配置と、熱残留応力、外力およびこの両方が負荷された場合の界面での最大応力の値との関係を、詳細に検討している。繊維分布が不規則配置の場合の個々の繊維での界面最大応力の確率分布を求め、規則配置の場合と比較するとともに、熱残留応力と外力が負荷された場合の個々の繊維の界面応力の値には、樹脂過多部分の幾何学的配置による熱残留応力の影響が大きいことを明らかにしている。

第9章は結論であり、本研究について得られた成果について要約するとともに、今後の展望についてまとめている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、航空機構造物等への利用が拡大している炭素繊維強化樹脂基複合材料の初期損傷であるトランスバース破壊発生メカニズムを、微視的な数値解析および走査型電子顕微鏡内での精緻なその場観察実験を組み合わせ検討した成果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 基礎となるマトリックス樹脂の非線形応力—ひずみ関係およびその温度依存性を明らかにした。さらに、新たに繊維状樹脂を用いる評価法を考案し、複合材料繊維間の微小寸法に対応する樹脂の強度を求め、その値が従来の評価値よりはるかに高いことを示した。
2. 走査型電子顕微鏡内で特殊な積層構成の試験片に曲げ外力を負荷することにより、トランスバース破壊の界面での発生および損傷進展過程を精緻に観察することに成功した。この初期破壊発生箇所での界面応力を、繊維の規則配置に基づく数値解析による界面での微視的応力分布およびその成分と比較することにより、トランスバース破壊発生は界面での引張り強度に支配されていることを定量的に明らかにした。
3. 成形時の熱残留応力によりマトリックス樹脂が広い範囲で降伏すること、マトリックス樹脂の非線形性を考慮した解析では成形後の熱残留応力が線形解析と比べ大きく低下すること等を明らかにした。
4. 計算機モデルによって繊維不規則配置を創出するとともに、不規則度を表現する幾何学的パラメータが、実測された繊維不規則配置と一致することを証明した。繊維分布が不規則配置の場合の個々の繊維での界面最大応力の確率分布を求め、規則配置の場合と比較するとともに、繊維の界面応力の値には、樹脂過多部分の幾何学的配置による熱残留応力の影響が大きいことを明らかにした。

以上要するに、本論文は、炭素繊維強化樹脂基複合材料のトランスバース破壊発生メカニズムを、実験および計算力学を融合させて微視的見地から検討したものであり、得られた成果は、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は、博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成17年8月4日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。