

論文審査の結果の要旨

氏名：鄭 泰 根

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：マルチファイバーモデルコンポジットによる一方向炭素繊維強化プラスチックの繊維方向圧縮
負荷におけるキンクバンド現象の評価法

審査委員：（主査） 教授 加藤 保之
（副査） 教授 富岡 昇 准教授 岡部 顕史
埼玉大学准教授 坂井 建宣

本論文は「マルチファイバーモデルコンポジットによる一方向炭素繊維強化プラスチックの繊維方向圧縮負荷におけるキンクバンド現象の評価法」と題し、以下の6章からなる。

第一章「序論」では、本研究の背景として、一方向炭素繊維強化プラスチック（以下、一方向CFRP）の引張強度は向上しているが、圧縮強度が向上していないという事実を指摘し、これによって生じる構造材料としての問題点を挙げている。一方向CFRPの低い圧縮強度の要因と考えられているキンクバンド破壊現象についての説明がなされており、このキンクバンド破壊がミクロスケールでの構造破壊であることから、キンクバンド破壊のスケールに合わせた評価法が必要であることが述べられている。また、一方向CFRPに対する圧縮試験規格についてもまとめてあり、それらはマクロスケールでの圧縮特性の評価を目的とした試験片形状を規定しているため、キンクバンド現象を評価する方法としては適していないことが述べられている。以上の研究背景を踏まえて、マルチファイバーモデルコンポジットを用いる新しい評価法を提案し、このマルチファイバーモデルコンポジットを用いて圧縮試験中の炭素繊維の圧縮挙動を観察することによって、炭素繊維の配列状況がキンクバンドの形成に与える影響について明らかにすることが目的であることが述べられている。

第二章「一方向CFRPを模擬したモデルコンポジットの製作方法とその圧縮試験方法」では、モデルコンポジット試験片とその製作方法ならびにモデルコンポジットの圧縮試験方法が提案されている。具体的には、母材樹脂で製作されたベース材の表面付近にのみ炭素繊維を配置したモデルコンポジットにより、圧縮試験中に表面から炭素繊維を観察する方法であることが述べられている。また、モデルコンポジット内の炭素繊維に圧縮負荷を加える方法として、偏心荷重が生じにくい4点曲げ試験を利用したことが述べられている。本章ではこの提案手法の妥当性について検討しており、その結果、本モデルコンポジットを用いることによって、圧縮負荷に伴う母材樹脂中の炭素繊維の圧縮破壊の様子を試験中に観察できることが示されている。また、詳細は次章において検討されているが、炭素繊維の圧縮破壊モードは一方向CFRPのキンクバンド破壊モードとは異なること、更に、炭素繊維の圧縮破断ひずみは一方向CFRPの圧縮破断ひずみと比較して大きい値であることが明らかにされている。

なお、1本の炭素繊維をダンベル形状などの母材樹脂内に配置したモデルコンポジット（第三章におけるシングルファイバーモデルコンポジット）は、炭素繊維と母材樹脂との間の界面強度を求めるための引張試験であるフラグメンテーション試験において利用されているが、その圧縮試験結果が報告された例はほとんど無いことが述べられている。

第三章「シングルファイバーモデルコンポジットの圧縮破壊挙動」では、1本の炭素繊維を樹脂埋めしたシングルファイバーモデルコンポジットにおいて一方向CFRPで生じるようなキンクバンド破壊現象が再現可能であるかが検討されている。具体的には、炭素繊維の圧縮破壊モードに影響を及ぼすと考えられる母材樹脂のヤング率を成形条件の変更により複数通りに変えてシングルファイバーモデルコンポジットを製作して、その圧縮試験を実施することによって検証されている。

母材樹脂のヤング率が低い場合には炭素繊維は圧縮破壊する以前に座屈変形を生じ、ヤング率が高い場合には炭素繊維は座屈変形する以前に圧縮破壊することが示されている。炭素繊維が座屈変形する条件において一方向CFRPのキンクバンド長さ等しい座屈波長となるためには、母材樹脂のヤング率が非常に小さい必要があり、一方向CFRPの成形において母材樹脂の硬化不良があったとしてもこれほど小さなヤング率になることはないから、シングルファイバーモデルコンポジットにおいて観察さ

れる炭素繊維の座屈現象と一方向 CFRP のキックバンド現象とは、その発現メカニズムが異なることが述べられている。この結果から、どの条件においてもキックバンド破壊が生じないことが示されており、シングルファイバーモデルコンポジットではキックバンド破壊現象を再現することができないことを明らかにしている。

更に、これまでに報告例の無い炭素繊維の圧縮破壊におけるばらつきについても検証がなされている。実験結果より炭素繊維の引張破壊と圧縮破壊における破壊様相の違いが述べられており、引張破壊におけるばらつきと比較して圧縮破壊におけるばらつきが小さいことを明らかにしている。なお、炭素繊維の圧縮破壊におけるばらつきを検討するためには、炭素繊維の圧縮破壊の開始点を正確に検出する必要があることから、圧縮試験中の炭素繊維の電気抵抗変化から圧縮破壊の開始点を求める方法についても提案している。

第四章「ツーファイバーモデルコンポジットの圧縮破壊挙動」では、2本の炭素繊維を樹脂埋めしたツーファイバーモデルコンポジットにおいて一方向 CFRP で生じるようなキックバンド破壊現象が再現可能であるかが検討されている。具体的には、炭素繊維の圧縮破壊モードに影響を及ぼすと考えられる炭素繊維間の距離を複数通りに変えて圧縮試験を実施することで検証している。この結果から、どの条件においてもキックバンド破壊が生じないことが示されており、ツーファイバーモデルコンポジットにおいてもキックバンド破壊現象を再現することができないことを明らかにしている。

また、2本の炭素繊維がある間隔以下で配列されている場合には、2本の炭素繊維がほぼ同じ長手方向位置で破断する様子が観察されたことから、この間隔以下で配列されている場合には炭素繊維の圧縮破壊において炭素繊維同士の相互干渉が生じることを示している。

第五章「マルチファイバーモデルコンポジットの圧縮破壊挙動」では、複数の炭素繊維を樹脂埋めしたマルチファイバーモデルコンポジットにおいて一方向 CFRP で生じるようなキックバンド破壊現象が再現可能であるかが検討されている。なお、前章の結果を踏まえて、繊維間距離を相互作用が生じる一定の間隔以下にしてマルチファイバーモデルコンポジットを製作する必要があることが述べられている。

マルチファイバーモデルコンポジットにおいても炭素繊維の本数が少ない場合には、シングルファイバーモデルコンポジット及びツーファイバーモデルコンポジットと同様の炭素繊維の圧縮破壊が生じるが、炭素繊維の本数が増えると同様 CFRP と同様なキックバンド破壊が生じるようになり、更に炭素繊維の本数が増えるにつれて、一方向 CFRP のマクロスケール試験片におけるキックバンド角及びキックバンド幅に近づいていくことを明らかにしている。この結果から、マルチファイバーモデルコンポジットを用いることによって、一方向 CFRP のキックバンド破壊現象が再現可能であることを述べている。炭素繊維の本数とキックバンドパラメータとの関係を明らかにすることにより、マルチファイバーモデルコンポジットにおける圧縮破壊現象とマクロスケール試験片におけるキックバンド破壊現象とが、繊維同士がある一定間隔以下で配列している場合には、近接する炭素繊維の本数によって関連づけられることが述べられている。また、炭素繊維の本数が増えるにつれてキックバンド幅が広がる傾向を示したことから、キックバンド現象が弾性床の上の繊維の座屈に起因するとすれば、繊維本数の増加によって低ひずみ領域からキックバンドの形成が開始し、炭素繊維の曲げ変形が大きくなることによって、マクロスケール試験片では圧縮破断ひずみが低下していることを結論付けている。

第六章「結論」では、各章の結果をまとめ、本論文で得られた結論が述べられている。

以上を要するに、本論文は一方向 CFRP の低い圧縮強度の要因と考えられているキックバンド破壊がミクロスケールの構造破壊であることから、ミクロスケールの圧縮破壊現象が観察可能であるマルチファイバーモデルコンポジットを用いて一方向 CFRP のキックバンド破壊現象を詳細に観察する評価法を確立しており、工学上・工業上貢献するところが大きいと考えられる。

本論文で提案されたモデルコンポジットを用いる評価法は、一方向 CFRP と比較して数値シミュレーションによるモデル化が比較的容易であることから、圧縮破壊シミュレーションの妥当性を評価する手法にもなる。本実験結果との比較により数値シミュレーションモデルの妥当性を確認することができれば、一方向 CFRP の圧縮強度を向上させる具体的な方法をその数値シミュレーションによって検討することが可能になる。このことから、本研究の成果は一方向 CFRP の圧縮強度向上に資する今後の研究においても大きく役立つと考えられる。

以上のことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

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28年2月18日