

論文の内容の要旨

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

一方向炭素繊維強化プラスチック（CFRP）は金属材料と比較して比剛性、比強度、耐疲労性などが優れているため、スポーツ用品や土木建築、輸送機器などの様々な分野において使用されている。しかしながら、近年の一方向 CFRP ではその圧縮強度が引張強度の 50～60 %程度と、圧縮強度と引張強度との差が拡大傾向にあり、構造部材として使用する場合には問題が生じることがある。例えば、航空機構造においては主翼やフロアなどの桁材として一方向 CFRP が用いられることが多いが、それらが曲げ変形を生じると圧縮側から先行して破壊が生じるため、圧縮強度が実質的な強度基準となることが多い。従って、一方向 CFRP の引張に対する優れた力学特性を活かしたより軽量の CFRP 構造を実現するため、圧縮強度が低い要因を明らかにして、圧縮強度を向上させる方法を検討していく必要がある。

一方向 CFRP の代表的な圧縮破壊モードの一つとしてキンクバンド破壊が挙げられる。キンクバンド破壊は母材樹脂中の炭素繊維の微小座屈によって引き起こされ、一方向 CFRP の圧縮強度が見かけ上低下する要因と考えられている。圧縮強度は構造設計上重要な材料特性であるから、キンクバンド破壊についてもこれまでに多くの研究報告がなされている。しかしながら、キンクバンド破壊現象はミクロスケールでの構造破壊であるため、圧縮試験規格にあるようなマクロスケール試験片はキンクバンド破壊現象の観察には適しておらず、一方向 CFRP のキンクバンド現象の観察に関する報告は少ない。

そこで本論文では、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を詳細に観察して、その破壊メカニズムを検討することが可能なマルチファイバーモデルコンポジットを提案した。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、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を目的とした。

本論文は、全 6 章で構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第一章「序論」では、炭素繊維の材料開発に伴い一方向 CFRP の引張強度が向上しているのに対して、圧縮強度についてはほとんど向上していないことを示した。また、近年の一方向 CFRP においては圧縮強度が引張強度の約 50 %程度に留まっている事実を指摘し、これによって生じる問題点を挙げた。キンクバンド破壊は母材樹脂中における炭素繊維の同位相の微小座屈に起因し、ミクロスケールでの構造破壊であるため、多くの研究報告にあるマクロスケール試験片ではキンクバンド現象の観察が難しいことを示した。以上より、キンクバンド破壊のスケールに合わせた評価方法が必要であることを示した。

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、炭素繊維の圧縮破壊挙動が観察可能であるモデルコンポジット試験片を製作し、4 点曲げ試験を利用してモデルコンポジットの圧縮試験を実施する方法を提案した。本手法を用いて 1 本の炭素繊維を樹脂埋めしたモデルコンポジット、すなわちシングルファイバーモデルコンポジットの圧縮試験を実施した結果、圧縮負荷に伴う炭素繊維の圧縮挙動を連続的に観察することができることを示した。

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、シングルファイバーモデルコンポジットを用いて圧縮試験を実施して、キンクバンド破壊が再現可能であるかを検討した。具体的には、母材樹脂による炭素繊維の支持状況が圧縮破壊に影響を及ぼしていると考えられるため、母材樹脂のヤング率を意図的に変化させたシングルファイバーモデルコンポジットを用いて圧縮試験を実施した。母材樹脂のヤング率が高い場合には、炭素繊維は圧縮破壊した。一方で、母材樹脂のヤング率が低い場合には炭素繊維の座屈変形が観察されたが、一方向 CFRP のキンクバンド長さと同じ座屈波長を得るためには母材のヤング率が非常に小さい必要があったことから、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 のキンクバンド現象とはその発現メカニズムが異なることを示した。この結果から、シングルファイバーモデルコンポジットでは一方向 CFRP のキンクバンド破壊

現象を再現することができないことを明らかにした。

また、炭素繊維は脆性材料であるため、その引張強度にはばらつきを有するが、圧縮強度のばらつきについては報告例がないことから、シングルファイバーモデルコンポジットを用いて検討を行った。ここでは炭素繊維の破壊の開始点を検出するため、4電極法を用いて炭素繊維の圧縮負荷に伴う電気抵抗を逐次測定して、圧縮破壊に伴って電気抵抗が急激に増加する点を炭素繊維の圧縮破壊の開始点とする方法を提案した。この方法を用いて炭素繊維の圧縮破壊におけるばらつきをワイブル分布を用いて検討した結果、引張破壊のばらつきと比較してばらつきが小さいことを明らかにした。

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を用いて圧縮試験を実施して、キックバンド破壊が再現可能であるかを検討した。2本の炭素繊維を配列する場合、炭素繊維同士の間隔が圧縮破壊に影響を与えると考えられるため、炭素繊維の間隔を変化させてツーファイバーモデルコンポジットを製作した。ツーファイバーモデルコンポジットの圧縮破壊モードは炭素繊維間の距離に係らず炭素繊維の圧縮破壊であったことから、ツー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た。また、2本の炭素繊維の間隔を変化させた結果、炭素繊維がある間隔以下で配列している場合には、炭素繊維同士が長手方向の同じ位置にて圧縮破壊が生じた。これより炭素繊維をある間隔以下で配列した場合には、その圧縮破壊において相互干渉が生じることを示した。

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を用いて圧縮試験を実施して、キックバンド破壊が再現可能であるかを検討した。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に炭素繊維の圧縮破壊であったが、炭素繊維の本数が増えるにつれて一方向 CFRP と同様なキックバンド破壊が観察された。これより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を用いることにより、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が明らかにした。

更に、炭素繊維の本数が増えるとキックバンド角は小さくなり、また、キックバンド幅は広くなる傾向があることを明らかにした。炭素繊維の本数が増えるにつれて、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から、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、近接する炭素繊維の本数によって関連づけられることを明らかにした。

キックバンドが弾性床上的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見かけ上圧縮強度が低下すると考えられる。

第六章「**結論**」では、本研究で得られた結果をまとめて述べた。

以上より、ミクロスケールの圧縮破壊現象を観察することができる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り、一方向 CFRP のキックバンド破壊現象を詳細に観察する手法を確立した。本手法によりミクロスケールでのキックバンド破壊現象を観察することができるから、これまでに報告されている有限要素法を用いた圧縮破壊シミュレーションと実験結果とを直接比較することによって、数値シミュレーション手法の妥当性を評価することが可能となる。その結果より、数値シミュレーションの妥当性を確認することができれば、その数値シミュレーション手法を用いて、容易には実験を行うことができない、炭素繊維の直径や断面形状、母材樹脂の特性などを任意に変えることによって、一方向 CFRP の圧縮強度を向上させる具体的な方法を検討することが可能となる。