

層間ハイブリッド化による 炭素繊維一方向強化材の曲げ特性改善に関する研究

学位論文内容の要旨

炭素繊維強化複合材料(CFRP)は、航空機構造体、機械部材およびスポーツ・レジャー用品などに広く用いられている。これらの用途では、ポリアクリロニトリル(PAN)系 CFRP が最も多く使用されているけれども、その高い引張強度と比べて曲げ強度が低いという問題を抱えている。この原因は、強化繊維方向の圧縮応力により座屈破壊を生じやすいことにある。すなわち、曲げ荷重を負荷した場合、圧縮側の破壊による曲げ破壊が生じる。このため CF の引張強度を改善しても、CFRP としての圧縮強度が上昇しない限り、曲げ強度の向上につながらない。しかし、PAN 系 CF の圧縮強度を大きく改善することは困難である。

本論文では、PAN 系 CF よりも大きな圧縮破断ひずみを有するピッチ系低弾性率 CF に着目した。すなわち、圧縮破壊を起こしにくいピッチ系 CF を用いて PAN 系 CFRP を補強するハイブリッド構造とし、PAN 系 CFRP で生じる座屈破壊を抑制して、曲げ衝撃強度およびエネルギー吸収特性を高めることを試みた。圧縮側の最外部に、ピッチ系 CF 補強層を種々の構成で配置した層間ハイブリッド一方向強化材を用いて、その曲げ衝撃特性を PAN 系 CFRP 単独の場合と比較することにより、ハイブリッド化が曲げ強度特性に与える補強効果を明らかにした。また強度特性向上のメカニズムを、有限要素(FE)解析を用いて力学的に検討した。さらにこのハイブリッド構造を、高い曲げ衝撃特性が求められるゴルフシャフトに適用した。

第1章では、従来の PAN 系 CF と比較しながら、ピッチ系低弾性率 CF の機械的特性に関する特長を述べた。また PAN 系 CFRP の圧縮および曲げ破壊挙動に着目し、曲げ強度が向上しにくい要因を明らかにしたうえで、圧縮破壊を起こしにくいピッチ系 CF で PAN 系 CFRP を補強する層間ハイブリッド構造により、その曲げ強度特性を改善する基本的考え方を述べた。

第2章では、PAN 系 CFRP (繊維の引張弾性率:230 GPa)をコア材として使用し、その両最外部にピッチ系低弾性率 CF (55~155 GPa)を補強層として配置した層間ハイブリッド CFRP 一方向強化材を用いて曲げ衝撃特性を評価した。その結果、PAN 系 CF のみを用いた場合と比べて、1.2 倍から 2.5 倍のエネルギー吸収量を得ることができた。SEM を用いた破壊面観察によれば、ハイブリッド材の圧縮側では、単独では圧縮破壊しないピッチ系低弾性率 CF 補強層が微小座屈にともなう圧縮破壊を起すようになる。またコア材の PAN 系 CFRP も、ピッチ系 CF 補強層と同じ圧縮破壊様相を示すことが確かめられた。曲げ衝撃応力-たわみ挙動では、最大荷重点以前において荷重の急激な低下はみられない。

すなわち、ピッチ系 CF 補強層の圧縮破壊開始まで、PAN 系コア材の座屈破壊が抑制される、すなわちその圧縮破壊強度が増加することが示唆された。

第 3 章では、ハイブリッド化により曲げ強度特性が向上するメカニズムを明らかにするために、FE 解析による力学的検証を行った。曲げ最大応力が一定値に達したときに PAN 系コア材の圧縮破壊が起こると仮定することにより、曲げ破壊挙動を模擬した。PAN 系コア材の圧縮強度として、セラニーズ圧縮試験法で測定された強度を用いた場合、計算された破壊強度は、衝撃試験結果と比べて 20 %～36 %小さい値となった。この結果は、ハイブリッド化により PAN 系コア材の圧縮破壊強度が増加することを示している。実験による最大荷重から PAN 系コア材の圧縮強度を推定した結果、圧縮強度が 33 %～60 %増加していると計算された。

PAN 系コア材の圧縮強度が増加する要因を明らかにするため、曲げ荷重点近傍の応力状態に着目した。層間ハイブリッド材の場合、ピッチ系 CF 補強層により PAN 系コア材の圧縮破壊の開始が遅れるため、一方向材の長手方向に加えて、厚さ方向にも圧縮応力が作用し、荷重点近傍に 2 軸圧縮応力が生じる。この 2 軸応力状態が静水圧と同等の効果を有し、PAN 系コア材の座屈破壊を抑制するため、その圧縮破壊強度が増加すると推論した。文献によれば、200 MPa の静水圧を加えた場合、PAN 系 CFRP の圧縮強度が 1540 MPa から 2250 MPa に増加する。FE 解析によれば、211 MPa の側圧が生じているときに、PAN 系コア材の圧縮強度が 1470 MPa から 2355 MPa へ増加する。これは、文献による実験結果と同程度である。

第 4 章では、ハイブリッド構造実用化のため、高い曲げ衝撃特性が求められる CFRP 製ゴルフシャフトへの適用を試みた。PAN 系 CF を用いた従来のシャフトに対して、最外周部に低弾性率 CF 補強層を配置したハイブリッド CFRP パイプを用いて、曲げ衝撃特性を評価した。その結果、PAN 系 CF のみのシャフトと比べて 24 %高い曲げ強度と 3.5 倍のエネルギー吸収量が得られ、ハイブリッド構造の有効性が示された。曲げの最大応力が一定値に達したときに CFRP が破壊すると仮定した FE 解析から、PAN 系 CFRP 層の圧縮強度の増加を推定した。これにより、低弾性率 CF の補強により、PAN 系 CFRP 層の圧縮強度が 56 %増加することが推論された。

第 5 章では、0° および 90° の 2 方向について CFRP の曲げ強度特性を改善するため、ピッチ系低弾性率 CF の織り物プリプレグによりハイブリッド化することを試みた。PAN 系コア材の最外部に低弾性率 CF 平織りプリプレグを配置したハイブリッド材を用いて曲げ衝撃特性を評価した。その結果、厚さ方向における CF の褶曲(クリンプ)を有する平織りで補強した場合でも、一方向プリプレグを用いて 0° および 90° 方向に直交補強したハイブリッド材と同等の補強効果が得られることが示された。

またコア材として、より高い引張弾性率を有する PAN 系 CF を使用することを検討した。引張弾性率 300 GPa および 440 GPa の PAN 系 CF をコア材に使用し、両最外面にピッチ系低弾性率 CF を配置した。その結果、ハイブリッド化により曲げ衝撃試験のエネルギー吸収量が、1.4 倍から 5 倍に向上した。このとき、PAN 系コア材の圧縮破壊強度が PAN 系単独の場合と比べて 60 %～90 %増加する。これも、ピッチ系 CF 補強層が圧縮側での微小座屈破壊を抑制する効果である。

第 6 章は総括であり、本研究の成果をまとめた。

以上のように本論文では、PAN 系 CFRP の曲げ強度特性を改善することを目的として、圧縮破壊が

生じにくいピッチ系低弾性率 CF で補強するハイブリッド構造を考案し、曲げ強度およびエネルギー吸収量を改善することに成功した。また FE 解析により、その力学的根拠を明らかにすることができた。

以上

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 野 口 徹
副 査 教 授 但 野 茂
副 査 教 授 成 田 吉 弘

学 位 論 文 題 名

層間ハイブリッド化による

炭素繊維一方向強化材の曲げ特性改善に関する研究

炭素繊維強化複合材料 (CFRP) は航空機構造体、各種機械部材およびスポーツ用品などに広く用いられている。これらの用途では、ポリアクリロニトリル (PAN) 系CFRPが最も多く使用されているけれども、その高い引張強度に比べて曲げ強度が低く、またこれを改善することが難しいという問題がある。この要因はPAN系CF (炭素繊維) の低い圧縮強度にある。すなわち、PAN系CFでは繊維方向の圧縮により容易に微小座屈破壊が生ずるため、一方向強化材では、圧縮側の損壊による曲げ破壊が生じる。本論文は、PAN系CFよりも大きな圧縮破断ひずみを有するビッチ系低弾性率CFに着目し、PAN系CFRPをビッチ系CFで補強する層間ハイブリッド構造として用いることによって、曲げ衝撃強度およびエネルギー吸収特性を高めることを試み、成功させたものである。本論文は次の6章で構成されている。

第1章では、従来のPAN系CFと比較したビッチ系低弾性率CFの機械的特性に関する特長を述べた。またPAN系CFRPの圧縮および曲げ破壊挙動に着目し、曲げ強度が向上しにくい要因を明らかにした上で、圧縮破壊を起こしにくいビッチ系CFでPAN系CFRPを補強する層間ハイブリッド構造により、その曲げ強度特性を改善する基本構想を述べた。

第2章では層間ハイブリッドCFRP一方向強化材の曲げ衝撃特性を評価した。PAN系CFRP (繊維の引張弾性率230 GPa) をコア材とし、その両最外部にビッチ系低弾性率CF (55~155 GPa) を補強層として配置した。その結果、PAN系CFのみを用いた場合と比べて1.2倍から2.5倍のエネルギー吸収量を得ることができた。またSEMを用いた衝撃破壊面のフラクトグラフィーより、ハイブリッド材の圧縮側では、単独では圧縮破壊を起さないビッチ系低弾性率CF補強層が、微小座屈にともなう圧縮破壊を起すこと、またコア材のPAN系CFRPも、ビッチ系CF補強層と同じ圧縮破壊様相を示すことを確かめた。曲げの衝撃応力-たわみ挙動では、最大荷重点以前では曲げ荷重の急激な低下が見られなかった。これは、ビッチ系CF補強層の圧縮破壊が始まるまで、PAN系コア材の座屈破壊が抑制される、すなわち、ビッチ系CF補強層によってPAN系CFの圧縮破壊強度が増加することを示唆する。

第3章では、ハイブリッド化により曲げ強度特性が向上するメカニズムを明らかにす

るために、FE解析を用いた力学的検証を行った。繊維に生じる軸方向応力が一定値に達した時にコア材の圧縮破壊が起こると仮定することにより、曲げ破壊挙動を模擬した。PAN系コア材の圧縮強度としてセラニーズ圧縮試験法による強度を用いた場合、計算された破壊強度は衝撃試験結果と比べて20 %～36 %小さい。すなわちハイブリッド化によりPAN系コア材の圧縮破壊強度が増加することが示唆された。実験による最大荷重からPAN系コア材の圧縮強度を推定した結果、強度が33 %～60 %増加すると結論された。

その理由を明らかにするため、曲げ荷重点近傍の応力状態に着目した。荷重点近傍では板厚方向の圧縮応力があり、繊維方向の圧縮とともに2軸圧縮応力の状態となっている。PAN系単独の場合には、2軸応力状態に拘わらず、軸方向応力によって微小座屈破壊が生ずるけれども、層間ハイブリッド材の場合には、2軸応力状態が静水圧と同等の効果を有し、PAN系コア材の座屈破壊を抑制することによって、圧縮破壊強度が増加すると推論された。FE解析によれば、約200 MPaの側圧が生じた場合、PAN系コア材の圧縮強度は約1500 MPaから2360 MPa、すなわち約60%増加すると算定された。これは文献による、静水圧下でのPAN系CFの圧縮強度上昇の実験結果と同程度であり、推論は妥当なもの認められた。

第4章では、ハイブリッド構造を実用化するため、これを高い曲げ衝撃特性が求められるCFRP製ゴルフシャフトに適用した。PAN系CFを用いた従来のシャフトに対し、最外周部に低弾性率CF補強層を配置したハイブリッドCFRPパイプを製作し、曲げ衝撃特性を評価した。その結果、PAN系CFのみを用いたシャフトと比べて24 %高い曲げ強度と3.5倍のエネルギー吸収量が得られ、ハイブリッド構造がゴルフシャフトの曲げ強度特性を改善する上で有効であることが示された。さらに、繊維の最大応力が一定値に達した時にCFRPが破壊すると仮定したFE解析から、PAN系CFRP層の圧縮強度の増加を推定した。このFE解析から、低弾性率CFで最外部を補強することにより、PAN系CFRP層の圧縮強度が約60%増加すると結論された。

第5章では、0° および90° の2方向についてCFRPの曲げ強度特性を改善するため、ピッチ系低弾性率CFで製造した織物プリブレグによりハイブリッド化することを試みた。PAN系コア材の最外部に低弾性率CF平織りプリブレグを配置したハイブリッド材を製作して曲げ衝撃特性を評価した。その結果によれば、厚さ方向に褶曲（クリンプ）を有する平織りCFで補強した場合でも、一方向プリブレグを用いて0° および90° 方向に直交補強したハイブリッド材と同等の補強効果が得られることが示された。またコア材として、より高い引張弾性率（300～400GPa）を有するPAN系CFを使用した場合でも、ハイブリッド化によりエネルギー吸収量が1.4倍から最大5倍に向上し、通常の弾性率の場合と同様のハイブリッド化の効果があることが示された。

第6章は総括であり、本研究によって得られた成果をまとめた。

以上のように本論文は、炭素繊維一方向強化材の曲げ強度特性を改善することを目的として、PAN系CF構造をピッチ系低弾性率CFで補強するハイブリッド構造を提案し、曲げ強度およびエネルギー吸収量を大幅に改善することに成功し、またFEMを用いた力学的検討によって強度特性改善効果の力学的根拠を明らかにしたものであって、機械材料工学ならびに設計工学の分野に貢献するところ大である。よって著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。