

氏 名	た な か か ず と 田 中 和 人
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	論 工 博 第 3662 号
学位授与の日付	平 成 14 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	繊 維 強 化 樹 脂 基 複 合 材 料 の 衝 撃 お よ び 疲 勞 破 壊 特 性 に 及 ぼ す 環 境 効 果

論文調査委員	(主 査) 教 授 駒 井 謙 治 郎	教 授 落 合 庄 治 郎	教 授 北 條 正 樹
--------	------------------------	---------------	-------------

論 文 内 容 の 要 旨

炭素繊維あるいはアラミド繊維を強化繊維とする樹脂基複合材料と実構造により近いサンドイッチ材について、衝撃、疲労破壊特性に及ぼす環境の影響を検討した。以下に、本論文で得られた結果を総括する。

第1章は緒論であり、本論文の研究分野における研究紹介とその背景についてふれ、研究目的とその意義について述べている。

第2章では、炭素繊維強化PEEK樹脂基複合材料AS4/PEEKをとりあげ、擬似等方強化材の落すい式衝撃試験と衝撃後の圧縮試験を行い、走査型超音波顕微鏡像を用いた演算処理により、衝撃による層間はく離面積を正確に求め、AS4/PEEKは樹脂のじん性や繊維/樹脂界面強度が高いため、耐衝撃はく離特性、耐水環境特性に優れていることを明らかにした。一方、PEEK樹脂の電子線照射による硬化のため、層間はく離に及ぼす電子線照射の影響は吸水の影響よりも大きい。損傷形態の相違により、残存圧縮強度に及ぼす電子線照射効果は見られず、残存圧縮強度は衝撃エネルギーのみによって決定されることを示した。さらに、新たに考案したその場観察法からAEパラメータと破壊因子の関係を明らかにした。

第3章では、炭素繊維強化PEEK樹脂基複合材料AS4/PEEKの $\pm 45^\circ$ 斜交積層材をとりあげ、正弦波波形下と、最小あるいは最大応力時に保持時間を有する正パルス波・負パルス波波形下で疲労試験を行い、引張破壊特性に及ぼす吸水効果がほとんど見られない本材料においても、疲労荷重下では、繰返し荷重による樹脂破壊や界面はく離のため吸水が促進され、繊維/樹脂界面が劣化して疲労寿命は低下することを明らかにし、動的応力下での環境効果を解明する重要性を指摘した。さらに、最大応力保持によるクリープ損傷、強化繊維の荷重軸方向への回転によるコンプライアンス減少効果、荷重変動効果を明らかにして、応力波形効果を系統的に明らかにした。

第4章では、炭素繊維強化エポキシ樹脂基複合材料MM-1/982Xの擬似等方強化材の破壊に及ぼす、水環境と電子線照射が重畳して作用する複合環境効果に注目して検討した。吸水材に対して高照射率(13.3MGy/h)で電子線照射を行うと、層間、層内にかかわらず損傷が生じることから、複合環境効果を解明する必要性を指摘し、吸水による繊維/樹脂界面強度の低下と電子線照射による樹脂のぜい化が、衝撃による層間はく離の支配機構であることを明らかにした。AS4/PEEKと比べ、MM-1/982Xは層間はく離面積に及ぼす吸水の影響は大きい。また、電子線照射の影響は小さい。また、衝撃後の圧縮強度は、衝撃により生じる層間はく離面積と対応し、吸水電子線照射材と吸水材で最小となるが、衝撃エネルギーが大きくなるほど環境による差が小さくなった。

第5章では、実構造により近い炭素繊維強化エポキシ樹脂/アラミドハニカムサンドイッチ材に注目し、成形法や水環境の影響を検討した。衝撃によりハニカムに損傷が生じるしきい値の存在を明らかにするとともに、衝撃による層間はく離面積に対しては、成形法(ホットプレス法、オートクレーブ法)や、吸水の影響がほとんど見られないことを明らかにし、表面材において樹脂劣化が生じないことと、繊維/樹脂界面強度が適度に低下していることがその原因であることを指摘した。一方、実用上重要である衝撃後の残存圧縮強度、残存曲げ強度については、吸水の影響は見られないが、表面材に欠陥が殆

ど見られないオートクレーブ材がホットプレス材よりも優れていることを明らかにした。また、衝撃後の残存強度の評価には、低衝撃吸収エネルギーでの残存強度低下を評価できる圧縮試験が適していることを示した。

第6章では、アラミド繊維強化エポキシ樹脂基複合材料 Kevlar49/828 の擬似等方強化材をとりあげ、Kevlar49/828 は繊維のスプリッティング破壊により、AS4/PEEK よりも衝撃による表面損傷が小さく、衝撃による耐表面損傷性に優れているが、衝撃により層間はく離を生じやすく、吸水によりさらにはく離が増大することを示した。また、本材料は、繊維自身の圧縮強度と繊維/樹脂界面強度が低く、吸水によりさらには強度低下が生じるため、衝撃後の残存圧縮強度が極めて低く実用上単独の使用はできないことを示した。MM-1/982X については、未衝撃材の圧縮強度は最大となるが、衝撃後の圧縮強度は AS4/PEEK よりも劣り、また、吸水による強度低下も大きく、実用的観点からは AS4/PEEK が最も優位にあることを結論として得た。

第7章では、アラミド繊維強化エポキシ樹脂基複合材料 Kevlar49/#2500 の $\pm 45^\circ$ 斜交積層材に対して、疲労破壊特性に及ぼす応力波形と水環境の影響について検討し、最大応力保持時間によるクリープ損傷、強化繊維の回転によるコンプライアンス減少、疲労損傷によるコンプライアンス上昇の3種類の破壊機構による波形効果を解明するとともに、吸水材では、吸水による繊維/樹脂界面強度の低下と樹脂の膨潤により、引張強度と疲労強度が低下するため、応力波形効果は空中と比べて小さくなることを示した。

第8章では、Kevlar49 単繊維の疲労破壊特性に及ぼす応力波形と湿潤環境の影響を、新たに設計・製作した環境質制御微小材料疲労試験機により検討した。アラミド繊維の疲労強度は鉄鋼材料などに比べて耐繰返し疲労特性に優れており、S-N 曲線の傾きが小さいこと、湿潤空気中での疲労強度は空中疲労よりも大きく低下し、湿潤環境の影響は引張強度よりも疲労強度に大きく表れ、疲労破壊特性に及ぼす環境効果が重要であることを示した。さらに、繊維表面の観察結果から、湿潤空気中では放置しておくだけで繊維表面には nm オーダの損傷が生じること、疲労試験中に生じる nm オーダの繊維表面のふくれ、あるいは、軸方向のうねりが各応力波形下の最終破断の前兆として表れることを見いだした。

第9章は、アラミド繊維/エポキシ樹脂界面破壊特性に及ぼす水環境効果を、新たに考案した単繊維引き抜き試験により評価し、同界面強度、繊維破断荷重、界面摩擦力の吸水時間に伴う低下量を定量的に評価することに成功した。さらに、引き抜き試験中に実施したその場観察と AE 信号解析結果から、引き抜き過程の AE 信号を破壊過程により4種類に分類し、AE 信号より、最大荷重時の不安定き裂進展や繊維破断が同定できることを示した。

第10章は、本論文により得られた成果をとりまとめたものである。

論文審査の結果の要旨

本論文は、炭素繊維あるいはアラミド繊維により強化された樹脂基複合材料と実構造により近いサンドイッチ材について、水環境や電子線照射環境等の過酷環境が先進複合材料の衝撃、疲労破壊特性に及ぼす影響を解明したもので、得られた主な成果は以下のとおりである。

1. 炭素繊維強化 PEEK 樹脂基複合材料 AS4/PEEK は、樹脂のじん性や繊維/樹脂界面強度が高いため、耐衝撃はく離特性、耐水環境特性に優れているが、層間はく離に及ぼす電子線照射の影響は樹脂硬化により大きくなることを明らかにした。エポキシ樹脂基複合材料は、未衝撃材の圧縮強度は最大となるが、衝撃後の圧縮強度、吸水効果を考慮した実用的観点からは AS4/PEEK が最も優位にあることを結論として得た。アラミド繊維強化材は衝撃による表面損傷は小さいが、衝撃により層間はく離を生じやすく、また、吸水による層間はく離面積の増大が顕著であり、実用上単独の使用はできないことを示した。一方、実構造に近いサンドイッチ材では、衝撃によりハニカムに損傷が生じるしきい値が存在し、破壊特性に及ぼす水環境の影響があまり見られないことを明らかにした。
2. 炭素繊維強化 PEEK 樹脂基複合材料とアラミド繊維強化エポキシ樹脂基複合材料の斜交積層板について、正弦波と最小あるいは最大応力時に保持時間を有する正パルス波・負パルス波を用いた疲労試験を行い、最大荷重保持時間によるクリープ損傷、強化繊維の回転によるコンプライアンス減少、疲労損傷によるコンプライアンス上昇の3種類の破壊機構が、疲労寿命に重要な役割を演じることを明らかにして、疲労破壊特性に及ぼす応力波形と水環境の影響を系統的に解明した。
3. アラミド繊維単体の疲労特性を、新たに設計・製作した環境質制御微小材料疲労試験機により検討し、アラミド繊維の

疲労強度は鉄鋼材料などに比べて耐繰返し疲労特性に優れているが、湿潤環境の影響は、引張強度よりも疲労強度で大きく表れること、nm オーダの繊維表面性状の変化が各応力波形下における最終破断の前兆となっていることを明らかにした。

4. 新たに考案した単繊維引き抜き試験により、繊維/樹脂界面強度、繊維破断荷重、界面摩擦力の吸水時間に伴う低下量を定量的に評価するとともに、引き抜き過程のその場観察から、AE 信号より破壊因子が特定できることを示した。

以上要するに本論文は、今後の利用拡大が予想されている先進樹脂基複合材料の、水環境や電子線照射環境等の過酷環境中における衝撃、疲労破壊特性に及ぼす影響を系統的に解明したもので、実使用環境を考慮した機械・構造物の設計、耐環境特性に優れた先進複合材料の開発・改良に貢献する研究であり、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14年2月22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。