

氏名	ほう じょう まさ き 北 條 正 樹
学位の種類	工 学 博 士
学位記番号	論 工 博 第 2368 号
学位授与の日付	平 成 2 年 5 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 5 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	炭素繊維強化樹脂複合材料の層間はく離疲労き裂伝ば挙動の破壊力学的研究

論文調査委員 (主 査)  
教授 大谷隆一 教授 三浦 精 教授 駒井謙治郎

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文では、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の一方向積層板の層間はく離疲労き裂伝ば挙動およびこれに及ぼす水環境の影響を、破壊力学および複合材料科学の立場から検討したもので、9章から構成されている。

第1章では、CFRPの破壊における層間はく離の重要性を指摘し、本研究の目的と意義を明らかにするとともに、本論文の構成について述べている。

第2章では、DCB (Double cantilever beam) 試験片を用いたモードI層はく離疲労き裂伝ば試験法の開発について述べている。コンピュータを導入した疲労試験システムを開発し、低伝ば速度領域でのき裂長さの自動測定を実現している。また、荷重漸減試験における荷重減少条件を確立している。

第3章では、エポキシ樹脂を母材とする2種類のCFRP積層板を用いて、下限界近傍のモードI疲労き裂伝ば挙動を観察し、伝ばの下限界が存在すること、中伝ば速度領域でき裂伝ば速度と破壊力学パラメータの間にべき乗の関係が成立することを明らかにしている。さらに、負荷応力比効果を検討し、伝ば挙動を規定する新しいパラメータとして等価応力拡大係数を提案し、より汎用性の高い伝ば則を導いている。またき裂伝ば挙動は、繰返し荷重より最大荷重に大きく支配されることを明らかにしている。

第4章では、第3章と同じ2種類の積層板を対象として、水環境中でのモードI疲労き裂伝ば挙動を検討している。ここでは、短期間および長期間水中浸漬の2種の条件について水環境の及ぼす影響を比較し、短期間ではき裂伝ば抵抗が若干増大するのに対し、長期間では著しい劣化が見られることを示している。また、劣化が著しい場合、破壊機構が樹脂破壊から界面破壊に変化することを破面の走査電子顕微鏡観察によって明らかにしている。

第5章では、靱性の向上が期待されている熱可塑性樹脂 PEEK (Polyetheretherketone) を母材とするCFRP積層板のモードI層間はく離疲労き裂伝ば挙動を検討し、伝ば下限界値がエポキシを母材とする場合と比較して著しく向上することを明らかにしている。また、き裂伝ばは繰返し荷重に大きく支配されることを明示し、破面の走査電子顕微鏡観察からも静的破壊との破壊機構の違いを確認している。

第6章では、同じ積層板のモードⅠ層間はく離疲労き裂伝ば挙動に及ぼす水環境の影響を検討し、短期間および長期間の水中浸漬とも水環境の影響は小さいこと、下限界の存在が認められず、べき乗の関係線図が折れ曲がり、低伝ば速度領域の方が高伝ば速度領域よりべき数が小さくなることを明らかにしている。また、繰返し速度を変えた実験から、水中では時間依存性の現象が発生しており、そこでは破面に大きな塑性変形が認められ、破壊機構が異っていることを明らかにしている。

第7章では、モードⅠとモードⅡの混合モードの試験を行うためのCLS (Cracked lap shear) 試験片について、幾何学的非線形性がエネルギー解放率に及ぼす影響を検討し、薄い試験片を用いれば非線形性の影響がほとんどないことを明らかにしている。また、エネルギー解放率のモードⅠとモードⅡの比率を有限要素解析で求め、モードⅡが全体の70%となってモードⅡ支配に近いことを示している。

第8章では、エポキシ樹脂を母材とするCFRP積層板のモードⅠとⅡの混合モードでの疲労き裂伝ば挙動をCLS試験片を用いて検討している。伝ば挙動にはモードⅡ成分の寄与が大きく、混合モードでのき裂伝ば下限界がほぼ全エネルギー解放率範囲一定の条件で与えられることを明らかにしている。

第9章では、本研究で得られた主要な結論をまとめている。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の一方方向積層板を対象として、疲労荷重下での層間はく離の進展の下限界近傍領域を中心に、負荷応力比、水環境、母材樹脂、および荷重モードの影響を総合的に検討することにより、層間はく離疲労き裂伝ばの機構を解明し、伝ば挙動の定量的予測および複合材料設計のための基礎を確立することを目的としている。得られた成果の主なものは以下のとおりである。

1. 2種類のエポキシ樹脂およびPEEK (Polyetheretherketone) を母材とするCFRP積層板の下限界近傍モードⅠ層間はく離疲労き裂伝ば速度に関するべき数が金属材料や高分子材料で報告されている値と比べはるかに大きいこと、また伝ばの下限界が存在することを明らかにした。さらに、き裂伝ばの下限界値は、エポキシを母材とする場合と比べ、PEEKを母材とする場合は著しく増大することを明らかにした。

2. 疲労き裂伝ば挙動に及ぼす応力比の影響を詳細に検討し、応力拡大係数範囲、エネルギー解放率範囲などの従来の破壊力学パラメータを用いても応力比依存性を十分に説明できないことを示し、新たに応力拡大係数範囲、最大応力拡大係数およびそれぞれの寄与度を含んだ等価応力拡大係数範囲なる統一的パラメータを提案した。このパラメータをもとに、エポキシを母材とする場合は最大荷重の寄与が大きいこと、PEEKを母材とする場合は繰返し荷重の寄与が大きいことを明らかにし、破面観察においても両者でのき裂伝ば機構の違いを見出した。

3. モードⅠ疲労き裂伝ば挙動に及ぼす水環境の影響を、短期および長期の2種の水中浸漬条件について検討した。エポキシを母材とする場合は短期浸漬では下限界値が上昇するなどの強度増加も見られるが、長期浸漬では著しい劣化が起ることを示し、この劣化は、破壊機構がプリプレグ積層界面の樹脂破壊から界面破壊に変化することと対応していることを明らかにした。PEEKを母材とする場合は水環境の影響は比較的少ないが、繰返し速度を変えた実験によって時間依存性の現象が発生していることを見出した。

4. モードⅡ成分が約70%をしめるモードⅠとⅡの混合モードでの疲労き裂伝ば試験を行い、疲労き裂

伝ばに対してモードⅡ成分の寄与が大きく、かつ、伝ば下限界条件は全エネルギー解放率範囲一定で表されることを明かにしている。

以上、要するに本論文は、CFRP積層板の層間はく離を対象として疲労荷重下での下限界近傍のき裂伝ば挙動を実験的に検討することによって、破壊機構と関連づけた新たな支配力学パラメータを提案し、水環境効果の機構および母材材質による違いを解明し、さらに混合モードでの下限界値の基準を提案したものであって、今後の構造物へのCFRPの利用に当たって、その損傷許容性、信頼性の向上に貢献するとともに、複合材料開発のための重要な指針を与える基礎となるものであり、学術上、實際上寄与するところが大きい。よって工学博士の学位論文として価値あるものと認める。

また、平成2年3月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問した結果、合格と認めた。