OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	織物積層複合材料の疲労寿命推定法とヒステリシスループに基づく減衰特性の評価手法に関する研究
Author(s)	藤本, 森峰
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/91965
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　藤本　森峰　）	
論文題名	織物積層複合材料の疲労寿命推定法と ヒステリシスループに基づく減衰特性の評価手法に関する研究

論文内容の要旨

本論文は，繊維強化複合材料(FRP)の中でも織物積層複合材料について，実験によって取得された一方向繊維強化複合材料(UD-FRP)の応力振幅-繰り返し数(S-N)特性に基づき疲労寿命を損傷進展解析により推定する手法，ならびに疲労試験中に取得した応力-ひずみ特性のヒステリシスループを取得し，除荷時の挙動に着目した減衰特性の評価手法に関する論文であり，全6章で構成した．

第1章ではFRPの輸送機器への採用の増加と課題を示し，実験と数値解析による疲労寿命推定の現状と課題の分析を行った．今後，社会に広くFRPの利活用を進めるためには数値解析を援用し低コスト，省リソースで疲労寿命を評価する手法が求められているとした．また，FRPの減衰特性の評価に関する既往研究を調査した結果，繰り返し負荷下に伴う除荷の影響と減衰特性の関係が不明瞭である点を基に，本論文の目的について述べた．

第2章では，織物積層複合材料に対し損傷進展解析による突発型損傷と，繰り返し負荷に伴う消耗型損傷の２つの損傷形態を考慮した疲労寿命推定法を提案した．特に，繰返し負荷下において突発型損傷もしくは消耗型損傷を判定する場合，応力再配分による損傷進展の再計算を伴うため，疲労サイクル数を上回る膨大な回数の計算が生じる．これに対し計算回数低減の観点から，Miner則に基づき各要素の残存寿命を推測し，消耗型損傷が発生するサイクル数までスキップする解析リソース低減手法を提案した．

第3章では，4層積層の平織ガラス繊維/エポキシ樹脂複合材料を解析対象として数値モデリングを実施し，疲労寿命推定を行い，疲労寿命および繊維束に生じる損傷進展挙動の評価が可能であることを示した．また，疲労寿命に関わる消耗損傷度の蓄積を可視化し，多層材料の積層中央部と最外層では繊維束の損傷進展挙動が異なることを明らかにした．得られたS-N特性のプロット点は実験結果の$\pm 3\sigma$（σ:標準偏差)内に収まることを確認した．また，提案した解析リソース低減手法により，実験における10^4オーダーの疲労試験を2%程度の計算回数で推定可能であることが確認できた．

第4章では，輸送機器に求められる振動減衰性能に着目し，強化繊維にポリアリレート繊維やアラミド繊維を用いたFRPの減衰性能を評価する方法について述べ，除荷過程の影響も評価するため応力ーひずみ曲線のヒステリシスループに着目した減衰特性の評価手法を提案した．

第5章では，4章の手法を基にポリアリレート繊維ならびにアラミド繊維にエポキシ樹脂で複合化した織物積層複合材料を対象に，繰り返し負荷に伴う減衰特性の変化を評価した．その結果，剛性のみの評価と比べてヒステリシスループに基づき算出した減衰比の方が材料別の減衰特性の差異が明瞭であり，また，ヒステリシスループ内の面積である消散エネルギーが支配的であることを明らかにした．さらに，静的強度に対し50%の応力を最大応力として与えた疲労試験では，サイクル数の増加に伴い負荷方向繊維束内のはく離が発生し，破断面の観察結果より繊維束交差部でのはく離や横繊維束のトランスバースクラックにより織構造の特性が活かせず，消散エネルギーの低下に繋がることを明らかにした．

第6章では，各章で得られた研究成果と今後の展望をまとめ，結論とした．

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名	（　藤本　森峰　）

論文審査担当者	（職）	氏　名
主 査	教授	倉敷　哲生
副 査	教授	上西　啓介
副 査	教授	大畑　充

論文審査の結果の要旨

強化繊維を織構造とした織物積層複合材料は、比剛性・比強度、賦形性・成形性に優れ、繊維強化複合材料の輸送機器等の量産品への適用が進む中でその重要性が増している。一般的に輸送機器には、繰り返し負荷が作用するため、疲労寿命の推定が重要な設計要素となる。しかし、繊維含有率や積層数など設計パラメータが多く、全ての組合せを疲労試験により評価するには時間ならびに経済的コストの面から困難であり、数値解析を援用した疲労寿命推定法が期待される。また、輸送機器には振動が生じるため、振動減衰特性も重要な設計要素となる。減衰性能に優れる有機繊維を用いた複合材料が期待されているが、繰り返し負荷下における減衰特性の評価は十分になされていない。これらの点から本論文では織物積層複合材料を対象に数値解析を用いた疲労寿命推定法と、繰り返し負荷下でのヒステリシスループに基づく減衰特性の評価手法を提案し、その有効性を検討している。以下に成果を要約する。

(1) 織物複合材料に対し多層積層を考慮した数値モデリングを実施し、損傷進展解析による突発型損傷と、繰り返し負荷に伴う消耗型損傷の２つの損傷形態を考慮した疲労寿命推定法を提案している。４層積層の平織ガラス繊維／エポキシ樹脂複合材料に本手法を適用し、繊維束において繰り返し負荷に伴う消耗型損傷の蓄積を可視化し、多層積層の積層中央部と最外層では繊維束の繊維進展挙動が異なることを明らかにしている。また、本手法を基に織物積層複合材料の疲労寿命を S-N（応力振幅－繰り返し数）曲線として数値解析により評価可能としており、数値解析により得られた S-N 曲線の勾配は、実験結果の±3σ（σ:標準偏差）内に収まることを明らかにしている。

(2) 繰返し負荷下において突発型損傷もしくは消耗型損傷を数値解析により判定する場合、応力再配分による損傷進展の再計算を伴うため、疲労サイクル数を上回る膨大な回数の計算を実行する必要がある。これに対し、数値解析に要する計算回数低減の観点から、Miner 則に基づき各要素の残存寿命を推測し、消耗損傷が発生するサイクル数までスキップする解析リソース低減手法を提案し、解析プログラムに実装している。前述の解析対象に適用した結果、実験における 10^4 オーダーの計算を 2%程度の計算で推定可能であることを明らかにしている。

(3) 織物積層複合材料について、繰返し負荷を伴う剛性低下ではなく、除荷過程の影響も評価するため応力－ひずみ曲線のヒステリシスループに着目した減衰特性の評価手法を提案している。ポリアリレート繊維ならびにアラミド繊維にエポキシ樹脂で複合化した織物積層複合材料を対象に、繰り返し負荷に伴う減衰特性の変化を評価した結果、剛性のみの評価と比べてヒステリシスループに基づき算出した減衰比の方が材料別の減衰特性の差異が明瞭であり、また、ヒステリシスループ内の面積である消散エネルギーが支配的であることを明らかにしている。さらに、静的強度に対し 50%の応力を最大応力として与えた疲労試験では、サイクル数の増加に伴い負荷方向繊維束内のはく離が発生し、破断面の観察結果より繊維束交差部でのはく離や横繊維束のトランスバースクラックにより織構造の特性が活かせず、消散エネルギーの低下に繋がることを明らかにしている。

以上のように、本論文は織物積層複合材料に関して、突発型損傷・消耗型損傷を考慮し解析リソース低減を考慮した数値解析により疲労寿命推定を可能とし、さらに、繰り返し負荷下におけるヒステリシスループに着目することにより数種の有機繊維複合材料の減衰特性の差異を明確としたものである。本論文の提案手法により、繰り返し負荷下での織物積層複合材料の損傷進展と減衰性能のリアルタイムでの評価への展開が期待できる。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。