

京都大学	博士（工学）	氏名	佐藤 颯彦
論文題目	GFRP 構造物の疲労特性評価および補修方法に関する研究		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、強化繊維を樹脂に含浸して作られる先端複合材料である繊維強化プラスチック（Fiber Reinforced Plastics、FRP）を対象に、近年では、歩道橋や小型の水門など、土木施設へのその適用が拡大していることを踏まえ、土木構造物で用いられるFRPの疲労強度や疲労損傷の知見の蓄積と、構造部材として供用した際の疲労特性に関する検討を目的としている。また、FRP構造物の使用限界状態にも着目し、材料試験片レベルの剛性低下を基に、供用期間中の道路橋構造部材の残存剛性について検討し、国内外の設計関連資料と対比して、疲労損傷を考慮する際のFRP構造物の使用性限界状態に対して提案を行ったものであり、8章からなっている。</p> <p>第1章では、研究の背景としてFRPの疲労に関して材料レベル・構造部材レベルで既往研究から収集した知見をまとめている。FRP材料の疲労強度や影響を与える因子、疲労損傷と剛性低下の特徴、FRP構造部材に対して疲労試験例に基づき、使用性に関してFRP材料と構造部材の疲労特性の間に相関関係が存在するのか不明であること、土木FRP構造物の疲労損傷の評価方法や損傷探知手法、補修方法に関する知見が不足しているという課題を指摘し、本研究の目的設定を取りまとめている。</p> <p>第2章では、ハンドレイアップ成形GFRP（Glass FRP）を対象に引張疲労試験を実施し、疲労強度や繰り返し载荷時の剛性低下について考察するとともにJIS規格およびASTM規格を参考に、試験結果からS-N曲線を取得している。試験結果から、GFRPの板厚が静的強度に与える影響は小さく、疲労強度についても板厚2~3.5 mmの範囲では板厚の影響は小さいことを示している。また、疲労試験中の特定の繰り返し数で実施した断面観察と静的载荷から、疲労損傷と静的弾性係数の関係を明らかにしている。</p> <p>第3章では、面内せん断や圧縮の繰り返し応力に着目し、ハンドレイアップ成形GFRPに対する疲労試験を実施している。特に、前例の少ない圧縮疲労実験の実験方法を示している。面内せん断応力や圧縮応力を縦軸としたS-N曲線を描くとともに、疲労損傷と面内せん断弾性係数、圧縮弾性係数の関係を明らかにしている。せん断疲労試験では、層間剥離が十分に進展する前に疲労破壊を生じる特徴を示し、圧縮疲労試験では载荷直交方向のき裂は少なく、層間剥離の進展が主であることを示し、剛性低下曲線を提示している。</p> <p>第4章では、板曲げ振動疲労試験機を用いたGFRP厚肉積層板の曲げ疲労試験方法を開発している。開発した試験方法により、板厚15.5 mmのGFRP積層板の曲げ疲労強度、残存剛性、振動特性を明らかにしている。10⁷回疲労限は静的強度に対して0.2であり、曲げ疲労強度に対する板厚の影響は小さいことを明らかにしている。また、曲げ疲労試験の場合も疲労損傷により剛性が低下することを確認し、振動特性と疲労損傷との関係を調べ、疲労試験中の固有振動数はほとんど一定であることを明らかにしている。</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	佐藤 顕彦
------	--------	----	-------

第5章では、引張疲労損傷による剛性低下を有限要素解析に実装する手法を提示し、曲げ疲労試験を模擬した解析を通して残存剛性や応力の分布について検証している。剛性の低下は応力集中部から進行し、繰り返し数の増加に伴い周辺領域に拡大することを明らかにしている。しかし、引張疲労損傷による剛性低下のみを考慮する場合は、実験で計測された剛性低下を精度よく再現することができず、層間せん断弾性係数に着目したパラメータ解析を実施して、層間せん断弾性係数が部材剛性に与える影響は小さく、圧縮域も含めた縦弾性係数の変化を有限要素解析に反映する必要性を示している。また、引張・圧縮・面内せん断疲労損傷による剛性低下を有限要素解析に実装するよう解析方法をアップデートし、既存の曲げ疲労試験が実施された GFRP 道路橋桁を対象に解析を行い、活荷重の2倍の荷重を200万回載荷しても、部材剛性は全く低下しないことを示し、GFRP 道路橋桁はたわみ制限により断面が決定されるため作用応力が十分に低いことを明らかにしている。

第6章では、土木構造部材として供用中の FRP が断面欠損や疲労損傷を生じた場合を想定し、補修板の接着による補修方法を検討している。GFRP 補修試験体について一軸引張試験と有限要素解析を実施し、荷重伝達と引張強度の回復率および破壊モードに関する考察を行った結果、補修板の荷重伝達は理論計算値とよく一致し、剛性の向上に有効であることを示している。また、切り込みを入れた GFRP に補修板を接着した場合も引張強度は健全状態まで回復しないことが課題であり、切り込み周辺や補修板端部での応力集中が GFRP 母材の破壊に影響していることを明らかにしている。

第7章では、国内外の疲労設計に関する文献について安全性と使用性の観点から調査を実施し、本研究で実施した FRP 構造物の疲労特性評価のまとめとして、本研究結果と文献を比較検討し、使用性限界状態に関して、材料の低減係数を解析的検討で最適化することを提案している。

第8章では、本研究で得られた成果および結論を要約して述べ、FRP 疲労設計、損傷探知、補修の分野における今後の展望について述べている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、ガラス繊維や炭素繊維といった強化繊維を樹脂に含浸して作られる先端複合材料である繊維強化プラスチック (Fiber Reinforced Plastics, FRP) が近年、我が国では土木施設 (歩道橋、水門など) へその適用が拡大している現状を踏まえ、欧米のように道路橋へも展開することを目的として、土木構造物で用いられる FRP 材の疲労強度や疲労損傷・補修方法の知見と、FRP 構造部材として供用した際の疲労特性に関して取りまとめたものである。本論文において得られた主な研究成果は以下の通りである。

- ① ハンドレイアップ成形法で作製された GFRP を対象に、材料試験片を用いた引張・面内せん断・圧縮疲労試験を実施している。いずれの疲労試験でも材料の疲労破壊を確認しており、その疲労強度を S-N 曲線で示している。また、試験中の疲労損傷の進展を観察するとともに、静的弾性係数を計測することで、疲労損傷と剛性低下との関連性を明らかにしている。さらに、試験結果を用いて剛性低下と繰返し数の関係式を提示し、設計資料としている。
- ② 実構造物の構造寸法を想定した GFRP 厚肉積層板に対して板曲げ振動疲労試験機を用いた曲げ疲労試験方法を開発している。開発した試験方法により、FRP としては極厚の板厚 15.5 mm の GFRP 積層板の曲げ疲労強度、残存剛性、振動特性を明らかにしている。
- ③ 疲労損傷による剛性低下が応力集中部から発生し、繰返し数の増加とともに剛性の低い領域が拡大する傾向を、有限要素解析に実装する手法を示し、曲げ疲労試験を模擬した解析を通して残存剛性や応力の分布について検証している。さらに、道路橋桁部材の曲げ疲労を評価するため、引張・面内せん断・圧縮の組合せによる剛性低下モデルをシェル要素に実装している。道路橋桁部材の曲げ疲労損傷と剛性低下について検討を行い、変動応力が小さいために構造部材レベルでは剛性の低下が生じず、道路橋主部材へ適用可能性を確認している。
- ④ 国内外の FRP 橋梁に関する設計資料を示し、本研究成果と対比しつつ各設計資料における疲労設計手法についてまとめている。FRP 構造物の設計に際して、その使用限界状態として、構造解析により剛性低下の有無を検討し、部分安全係数の一つである材料係数の低減係数を最適化することを提案している。

本論文は、以上のように、土木構造物で用いられる FRP 材の疲労強度や疲労損傷・補修方法の知見と、FRP 構造部材として供用した際の疲労特性に関して取りまとめたものであり、学術上、実務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、令和 5 年 2 月 21 日、論文内容とそれに関連した事項について諮問を行い、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公開可能日： 令和 5 年 6 月 23 日以降