

氏名(本籍)	Mouhamadou Moustapha SARR (セネガル共和国)			
学位の種類	博士(工学)			
学位記番号	甲第 389 号			
学位授与年月日	令和 4 年 3 月 17 日			
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項			
研究科・専攻名	工学研究科・基盤工学専攻			
学位論文題目	Improvement of the strength of fiber-reinforced polymer by grafting cellulose nanofibers onto the reinforcements			
論文審査	(主査)	高知工科大学 高知工科大学 岐阜大学 高知工科大学 高知工科大学	准教授 教授 教授 教授 准教授	高坂 達郎 楠川 量啓 仲井 朝美 川原村 敏幸 松本 泰典

審査結果の要旨

1. 論文の評価

本論文では CNF を樹脂に混合するのではなく、繊維またはプリフォームに直接 CNF を添加する手法を提案し、ガラス/エポキシ界面の界面せん断強度 (Interfacial Shear Strength, IFSS) の向上、FRP 積層板の曲げ疲労特性の改善、そして FRP 積層板のモード II 層間破壊じん性の向上を達成している。提案された手法では CNF の混合による樹脂粘性の増加を避けることが出来るため、従来の樹脂混合手法と異なり成形性が低下せず、またより少量の CNF による強化効果を見込むことが出来るため、工業的な価値が高い。また CNF の繊維表面添加によるガラス/エポキシ界面の IFSS の向上についてはこれまでほとんど報告が無く、非常にオリジナリティが高い手法である。

最初に、CNF 添加によるガラス/エポキシ界面の改質が試みられ、IFSS を向上させるための適切な条件が見いだされた。濃度 10 ppm wt% の CNF 分散水を用いることで、無処理の試験片に対して最大 78% の IFSS の向上を得ることができた。SEM 観察より、279 nm の CNF 層が強化繊維表面に形成され、樹脂含浸によって作られた CNF/エポキシ層により強度が向上することが分かった。また、CNF 分散水の濃度が高すぎる場合は CNF/エポキシ層への樹脂眼振が不十分となり、その結果 IFSS が低下することが明らかとなった。以上から、ガラス繊維表面への適切な CNF 層の形成が、強度向上に重要な役割を果たすことが分かった。これらの結果は CNF を用いた繊維表面処理手法の実用化に向けて有意義な学術的および工業的知見を示している。

次に、CNF 添加によるガラス/エポキシ積層板の曲げ疲労特性の向上が示された。本研究では従来とは異なり、CNF の分散水を VaRTM 法 (Vacuum assisted Resin Transfer Molding) によりプリフォームに含浸させて、プリフォームに直接 CNF 添加させた。試験片を切り出した後、三点曲げ静的試験と、応力比 0.1、周波数 5Hz で低サイクル三点曲げ疲労試験を行った。静的曲げ強度結果からは、CNF 分散水の濃度 0.1wt% で 6% 程度の強度向上が認められた。また、剛性には CNF 添加の影響はほとんど見られなかった。一方で疲労試験においては、同じ疲労回数に対して 5 倍程度の強度向上が認められた。破壊面の繊維表面には CNF が残留しており、ラフな破面の形成により疲労破壊寿命が向上したものと考えられる。処理の有無による破壊モードの違いなど興味深い知見が得られている。

最後に、CNF 添加による GF 積層板のモード II 層間破壊じん性の向上を試みた。本研究では、強化したい層間に注目して、スプレー法により CNF をプリフォームに添加する手法を採用した。積層板の中央層間に人口き裂を形成し、ENF (End Notch Fracture) 試験片に三点曲げにより負荷を与えて、

き裂進展に対するモード II 層間破壊じん性の測定を行った。その結果、0.05wt%の CNF の分散水を用いた処理によって、モード II 層間破壊じん性が無処理の試験片と比べて 28%増加することが明らかとなった。さらに破面監察結果より、破面に生じた大きなせん断変形により層間破壊じん性が向上したことが分かった。一方で 0.1wt%の CNF の分散水では、層間破壊じん性が低下する結果となったが、これは濃い濃度では CNF の分散性が悪化したためである。得られた知見は学術的にも興味深い、工業的にも意義が高い。

以上により、CNF のガラス強化繊維への添加によって、ガラス/エポキシ界面強度が向上することが分かった。さらにこの手法は強化繊維プリフォームの処理にも用いることが出来て、ガラス/エポキシ積層板の曲げ疲労強度向上、そしてモード II 層間破壊じん性の向上に大きく役立つことが分かった。一方で、CNF の表面への分散性低下や、CNF 堆積層の厚み増加によって樹脂含浸が不十分な部分が現れると、それを起点に破壊が生じて強度特性が低下する場合があるため、適切な量の CNF を適切な手法で処理することが重要であることが分かった。以上の結果は、学術的にも工業的にも意義の高いものであり、実用化に向けて高い発展性を望むことが出来る。

2.審査の経過と結果

- (1) 令和 4 年 1 月 12 日 5 名の審査委員のもと協議され、博士後期課程委員会で学位論文の受理を決定した。
- (2) 令和 4 年 2 月 15 日 公開論文審査発表会及び最終試験を実施した。
- (3) 令和 4 年 3 月 3 日 博士後期課程委員会で学位授与を可とし、教育研究審議会で承認された。