

卒業論文要旨

CNF 付着により繊維－樹脂界面を強化した GFRP の疲労損傷評価

システム工学群

材料強度学研究室 1240126 羽藤 愛

1. 緒言

ガラス繊維を強化材、樹脂を母材として複合させたガラス繊維強化プラスチック (GFRP) は、比強度や比剛性が大きく、耐食性に優れるという特徴がある。近年、GFRP の機械的性質の向上を目的として、ナノサイズの繊維や粒子を添加させる研究が盛んに行われている。そこで添加物として、カーボンナノチューブやナノクレイ、そしてセルロースナノファイバー (CNF) などが挙げられる。これらの中でも CNF は鉄の約 25 倍の比強度を持ち、植物由来の天然超極細繊維で、資源量も豊富であることから注目されている材料である。添加方法としては、マトリックス樹脂に混合する方法が最も一般的であるが、添加による樹脂の粘度の増加やコストなどの課題がある。他の添加方法としては、ガラス繊維表面に直接付着させる方法がある。この方法は少量の CNF でガラス繊維と樹脂の界面強度を直接的かつ効果的に強化することが可能となる報告がある。

GFRP におけるガラス繊維と樹脂との界面強化は静的な引張や圧縮よりもむしろ曲げや疲労などで比較的有效となることが知られている。樹脂は荷重が負荷されると配向が揃うようになりさらに、塑性変形が進行すると樹脂内部に白化現象が生じる。本研究では、平織のガラスクロスに直接 CNF を付着させ作製した GFRP について静的引張試験と疲労試験を行い、その荷重繰返しに伴う損傷挙動について樹脂の配向および白化状態の観点から定量的に調査を行った。

2. 材料および試験方法

2.1 材料

本研究では、強化材として平織ガラスクロス (KS2750, 日東紡, 繊維直径 $9.3\ \mu\text{m}$, 目付 $104\ \text{g/m}^2$, ガラス密度 $2.6\ \text{g/cm}^3$) を使用した。また、マトリックス樹脂として主剤にはエポキシ樹脂 (jER 801N, 三菱ケミカル株式会社) を、硬化剤にはダイトクラール 3080 (大都産業株式会社) を用いた。CNF は高知県紙産業技術センター提供の 2 wt% スラリーを希釈して使用した。

2.2 試験片の作製

CNF スラリーに純水を加え攪拌し CNF 水溶液 (0.05 wt%, および 0.1 wt%) を作製し、市販の霧吹きに入れ、 $150\ \text{mm} \times 150\ \text{mm}$ の大きさに切り出した平織ガラスクロスの両面に一定量スプレーし、12 時間以上乾燥させた。

続いて、一般的なハンドレイアップ法にてガラスクロス単層の GFRP 板を作製した。エポキシ樹脂の主剤と硬化剤を 1:0.425 となる重量割合で混合し攪拌、脱泡した後使用した。CNF を付着させていない材料を CNF0, CNF を 0.05 wt%, 0.1 wt% 付着させた材料をそれぞれ CNF05, CNF10 と表記する。厚さ 5 mm のアルミニウム合金板の上に CNF を付着させた

ガラスクロス 1 枚を置き、これにエポキシ樹脂をローラーで全体に含浸させた。その上にアルミニウム合金板を置いて挟み込み、常温で 40 時間以上硬化させた。硬化後、アルミ板から GFRP をはがし乾燥炉にて 80°C , 3 時間の条件でポストキュアを行った。

十分に硬化させた後、図 1 に示す形状、寸法の試験片を作製した。切断の際はカッターを用い、切断面を 240 番, 500 番, 1000 番のエミリー紙と水を使用し研磨した。研磨後、水分を飛ばすために乾燥炉で 80°C , 3 時間で乾燥させた。乾燥後、試験片つかみ部のタブに図 1 に示す寸法の厚さ 0.2 mm の軟鋼板を瞬間接着剤を用いて接着し試験片とした。試験片の厚みは 0.2 mm~0.3 mm の範囲であった。

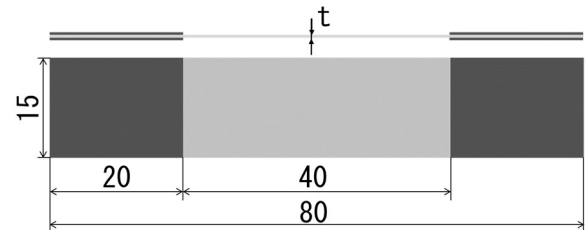


Fig.1 Specimen

2.3 実験方法

本実験で用いた GFRP の機械的性質を求めるために静的引張試験を行った。油圧式疲労試験機 (EHF-F1, 島津製作所, 容量 10 kN) を用いて、 $0.5\ \text{mm/min}$ の変位速度で試験を行った。疲労試験は、同様の試験機を用いて、応力比 0.1, 繰返し速度 10 Hz, 正弦波の条件下で荷重制御にて試験を行った。

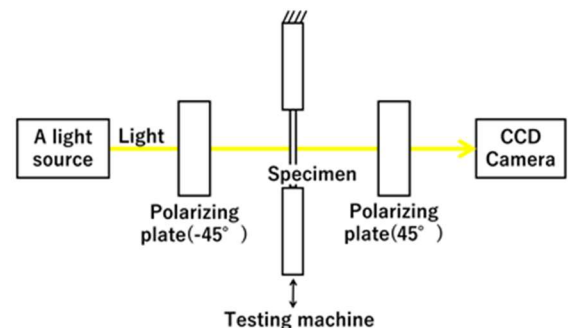


Fig.2 Layout for test to transmitted light

白化現象や樹脂の配向の変化を観察するために試験中の試験画像を USB カメラ (HOZAN L-836, HOZAN L-815 倍率 2.5) を用いて取得した。樹脂の配向の変化について図 2 に示すように、光源 (MEGALIGHT 100, SCHOTT, right cont 50%), 偏光板 (-45°), 試験片, 偏光板 (45°), カメラの

順で設置して画像を取得した。静的引張試験では、1s ごとに画像を取得した。疲労試験では、1 回繰返しした後、所定の繰返し数ごとに試験を中断し、画像を取得した。

記録した画像 (640×480 画素) データのデジタル処理として、全ピクセルの RGB (0~255) の平均値を合計した後、ピクセル数で割った値を出した。本研究ではこの値を明度と定義した。

3. 実験結果及び考察

3.1. 静的引張試験

静的引張試験において得られた CNF0 と CNF05 および CNF10 の荷重変位線図の一例を図 3 に示す。荷重と変位は、荷重が 0.1 kN に達するまで比例関係にあり、その後傾きを減少させながら破断に至る。荷重変位線図に CNF 付着の影響はほとんど見られなかった。

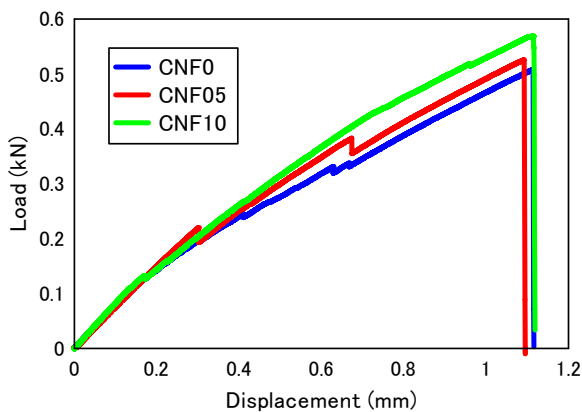


Fig.3 Load-Displacement curve of GFRP

CNF0 と CNF05 および CNF10 の試験片について 8 本ずつ試験を行った。各試験片で、破断荷重とそのばらつき、およびヤング率をまとめて図 4 に示した。機械的特性について両材料の差はほとんど確認できなかった。

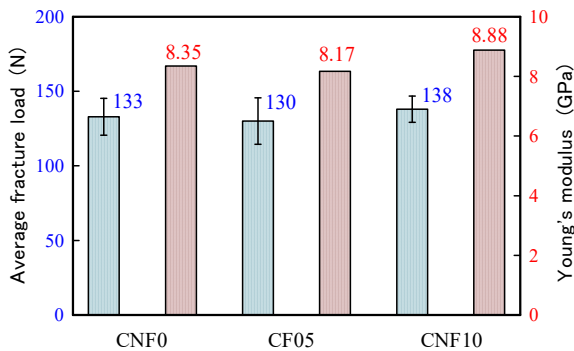


Fig.4 Fracture strength of GFRP

3.2. 疲労試験

疲労試験における荷重振幅 P_a と破断までの繰返し数 N_f の関係を図 5 に示す。 N_f が 10^5 回以下の範囲において近似曲線を引いた。 $N_f = 10^5$ 以上では、それ以下の場合と比べ曲線の勾配は非常に小さくなった。全寿命領域にわたり、CNF05 は CNF0 と比較して疲労強度が大きく、特に P_a が大きい範囲において顕著であった。

荷重振幅 167 N において CNF0 と CNF05 について疲労試験中の透過光明度 L_t の変化を測定した。結果を図 6 に示す。

横軸は破断直前の繰返し数で繰返し数を割り標準化した。透過光の明度は、繰返し数 100 回の時の明度 L_{t0} を基準に標準化した。最大明度に達するまでの明度の増加率は、CNF0 より CNF05 のほうが大きかった。その後の破断繰返し数の約 60 %に達するまでの明度は、CNF0 に比べ CNF05 は緩やかに減少していった。

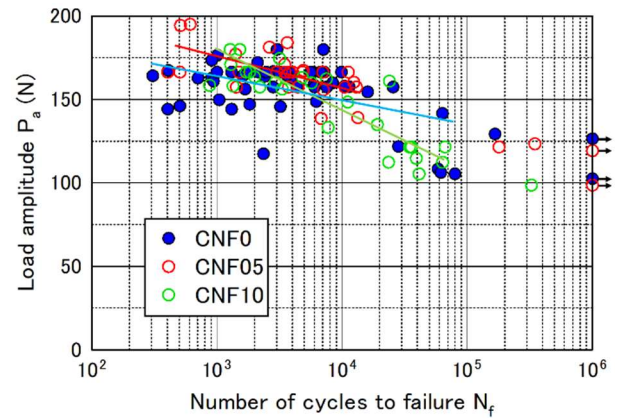


Fig.5 Load amplitude-Number of cycles curve

透過光を連続的に観察すると、繊維が存在しない領域の明度が強くなると同時にガラス繊維周辺の明度が低下する様子が確認できた。上記の $N = 100$ は、この樹脂部の明度がほぼ最大となる繰返し数である。初めに、樹脂の明度が増加し最大明度となった。次に、繊維の交差部から明度が低下し、破断繰返し数が多い試験片は、最終的に繊維部分全体の明度が低下した。しかし、破断繰返し数が比較的少ないものは、繊維部分全体の明度が低下する前に破断した。CNF0 と CNF05 で明度変化の流れに差はみられなかった。この明度変化の挙動より、CNF を繊維に付着させた GFRP では CNF を付着させない GFRP に比べて疲労寿命の前半 60 %くらいまでの損傷が抑えられ、結果として疲労強度が向上したと考えられる。

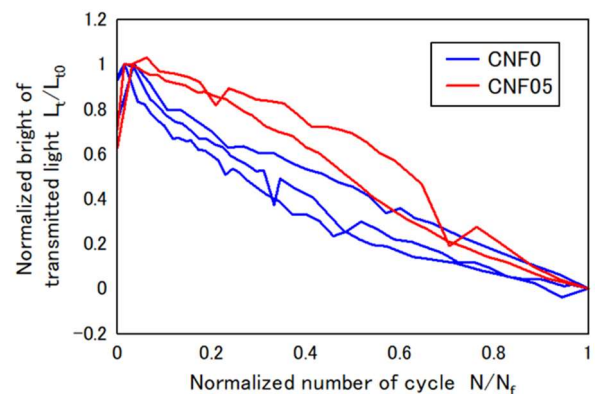


Fig.6 Standardization bright for fatigue test

4. 結言

静的引張強度では、CNF の付着による強度改善の効果はみられなかった。疲労試験では、CNF により N_f が 10^5 回までの範囲において疲労強度の向上が確認された。透過光の明度の変化から、CNF05 では破壊の約 60%に達するまでは GFRP の損傷が遅れることが分かった。

文献 省略