

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K14821

研究課題名(和文) 圧縮成形の高速化と疲労強度の最大化を実現する繊維強化複合材料の開発

研究課題名(英文) Development of fiber reinforced composites to optimize high speed compression molding and fatigue strength

研究代表者

松尾 剛 (Matsuo, Tsuyoshi)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・首席研究員

研究者番号：80589490

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000 円

研究成果の概要(和文)：本研究では、2種類の繊維強化タイプのランダム配向炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の疲労特性を温度条件を常温・50℃・75℃の3パターンで比較・検証した。2種類は、繊維構造がマット系のものと、チョップドテープ系のものである。どちらもマトリックスにはポリプロピレン(PP)を用いており、高速プレス成形が可能で、生産性に優れる。この2種類のランダム配向CFRPの温度条件による疲労特性の変化を検証するために、それぞれのPP単体の引張疲労試験を同じ温度条件で実施した。その結果、PP単体の疲労特性が、ランダム配向CFRPの破壊モードに影響を与えることが分かり、疲労強度を推定できることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

軽量かつ生産性に優れる、ランダム配向型炭素繊維強化プラスチック(CFRP)は、航空機・自動車・船舶などの構造体に金属の代替材料として適用できれば、運用時のGHG削減や省エネにつながる。一方、本材料の疲労特性を、温度を変えて検証した研究例は過去にない。構造物の信頼性を評価する上で、重要な検証結果を得た。加えて、その疲労特性が、CFRPを構成する特にマトリックスの疲労強度の温度依存性に大きく影響を受けることを示せたため、構造物の疲労強度設計における信頼性を担保するための主要な指針となり得る。本研究は、軽量素材の普及拡大に大きく貢献し、環境負荷の低減を加速させる基盤技術となる期待が持てる。

研究成果の概要(英文)：In this research, the fatigue characteristics of two types of randomly oriented CFRP, mat-type and chopped tape-type, were investigated. In addition, the influence of matrix resin on their fatigue behaviors were considered about the temperature dependence of their fatigue strengths. As a result, it was estimated that the fatigue properties of matrix resin on interface or interlaminar between carbon fibers influenced the fracture mode of randomly oriented CFRP and the temperature dependence of fatigue behaviors of CFRP.

研究分野：材料工学

キーワード：複合材料 疲労強度 熱可塑性CFRP 温度依存性

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

熱可塑性樹脂を母材とする繊維強化複合材料（熱可塑性 FRP）は、重量比力学性能に優れるだけでなく、高速プレス成形が可能という特徴を有し、金属に代替される新材料として注目されている。

高速・連続生産のためには、繊維に樹脂が十分に含浸された仮成形シートを中間基材として活用することが好ましい。予め加熱溶融させた中間基材シートを金型に搬送し、瞬時に加圧・冷却固化することによって高サイクルを実現する。中間基材には、繊維強化率を低下させないよう制御された長繊維を、面内ランダムな方向に配置させたマット型シート（Fig.1 の CMT sheet）、一方向単層材を任意長さにカットしてランダム積層させたチョップドテープ型シート（Fig.1 の CTT sheet）がある。このようなランダム型 FRP を高生産・低コストかつ高品質が要求される構造体に適用しようと様々な研究が行われている。一方、長期耐久性に関する研究実績が少なく、より高い信頼性確保のためには、疲労強度に関する実験的・理論的な現象解明が要望される。

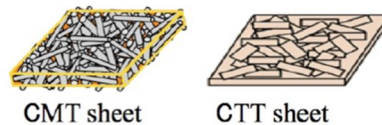


Fig.1 Image of randomly-oriented CFRP

2. 研究の目的

Fig.1 のランダム配向 FRP は、どちらもマトリックスにポリプロピレン（PP）を用いている。PP は、比較的破断伸びの大きい熱可塑性樹脂であり、層間や繊維界面の亀裂進展が樹脂延性によって抑えられ、破壊靱性値が従来の熱硬化性 FRP より高くなる期待が持てる。そこで本研究では、Fig.1 に示す 2 種類のランダム配向 CFRP を用いて、繰り返し一定曲げ応力振幅を与える疲労試験を実施し、SN 疲労特性や疲労限度線図の適用性を検証して、繊維強化構造の違いによって SN 曲線が異なることや、疲労強度の予測・設計が疲労限度線図によって適用可能であるかどうかを調査することを目的とした。さらに、マトリックス樹脂が FRP の疲労特性に与える影響を調べるために、それぞれの 2 種類のランダム配向 FRP に用いた PP 樹脂単体をそれぞれ対象として、引張疲労試験を実施して、疲労特性の発現メカニズムを考察した。

3. 研究の方法

（1）使用する材料

本研究に用いた材料を Fig.1 に示す。それぞれの材料の略書と特徴を以下に示す。図中の CMT（Carbon-fiber Mat reinforced Thermoplastics）は、不連続の炭素繊維を単繊維レベルで等方・均質に分散したマットに、熱可塑性樹脂を含浸させた中間基材である。CTT（Chopped carbon fiber Tape reinforced Thermoplastics）は、炭素繊維のロービングに熱可塑性樹脂を含浸したプリプレグテープを切断し、ランダムに散布・積層した中間基材である。マトリックス樹脂は全てポリプロピレンとした。これらの中間基材をプレス成形することで成形板を得た。一方、樹脂単体試験では、CMT、CTT の繊維に含浸するポリプロピレンそのものを用いた。どちらも、繊維界面接着強度を高める変性処理を施しており、基本特性は PP 由来であるが、それぞれ力学性能は異なるものである。

（2）曲げ疲労試験片

FRP の疲労試験に使う試験片は上記成形板から切り出して作成した。JIS K7119 に準拠した試験片形状を Fig.2 に示す。一方、樹脂単体引張疲労試験では、CMT 用 PP では ASTM D638 に準拠し、CTT 用 PP では ISO 527-1（JIS 7161-1）に準拠した、どちらもダンベル型の射出成形品を用いた。

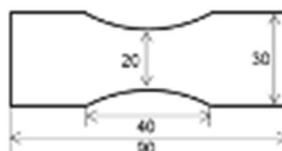


Fig.2 Geometry of CFRP fatigue specimen (unit:mm)

Table 1 Fatigue test condition

Material	Standard	Frequency	Mode	Stress ratio
CMT / CTT	JIS K7119	20	Bending	0
PP	JIS K7161	20	Tensile	0

(3) 試験条件

樹脂単体の引張疲労試験および FRP の曲げ疲労試験の条件を Table1 にまとめて示す。FRP の曲げ疲労試験では、繰り返し平面曲げ疲労が可能な試験機を用い、樹脂単体引張疲労試験では、繰り返し引張荷重負荷が可能な試験機を用いた。与える応力波はサイン曲線であり、周波数を 20Hz とし、最大応力に対する最小応力の比（応力比 R）0 の片振り試験を実施した。また、FRP の曲げおよび樹脂単体の引張どちらも恒温槽を用い、常温（25℃）、50℃、75℃の雰囲気温度下において、試験片温度が一定に保っていることを確認しながら疲労試験を実施した。

4. 研究成果

(1) SN 曲線と疲労限度線図

常温下の FRP 曲げ疲労特性 S-N 線図を Fig.3 に、応力比を変えて曲げ疲労試験を実施した疲労限度線図を Fig.4 に 2 種類の材料に分けてそれぞれ示す。縦軸は別途測定した静的な四点曲げ強度に対する疲労破壊応力の比率として記載した。10⁷ サイクルまで明確な疲労限界が確認されず、一般的な樹脂と同様の挙動を示した。

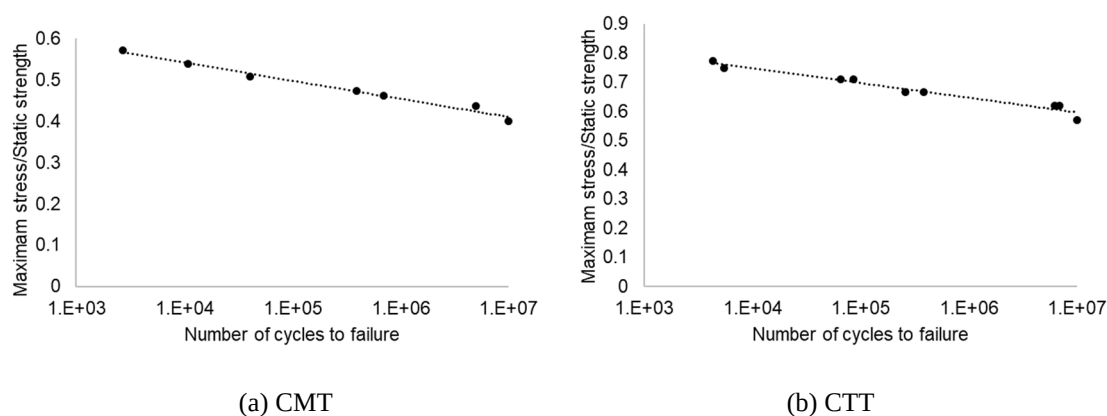


Fig.3 S-N curves of fatigue test

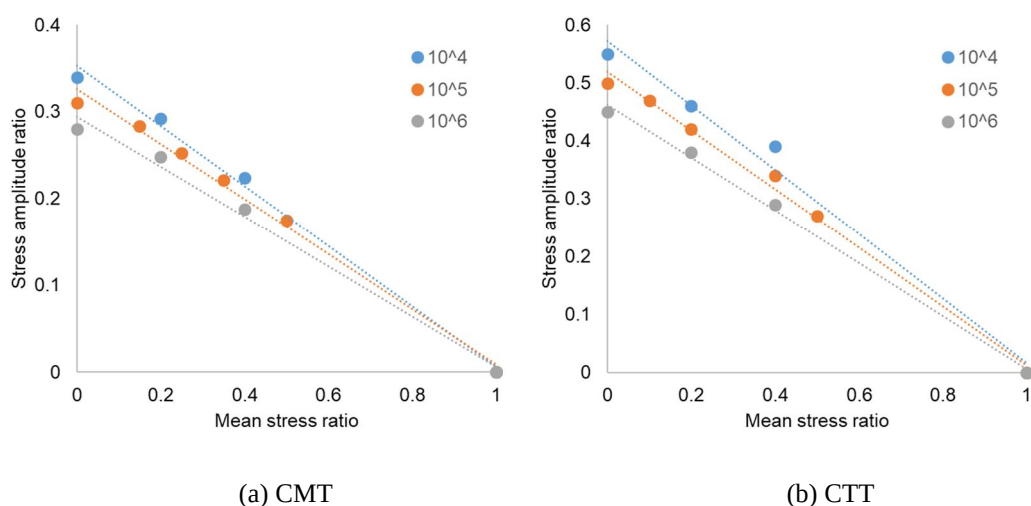


Fig.4 Mean stress – Stress amplitude diagram

また、Fig.4 に示す疲労限度線図では、サイクル数 10⁴、10⁵、10⁶における平均応力と応力振

幅の測定結果をそれぞれの材料においてプロットした。縦軸、横軸ともに静的な曲げ強度で除した値を曲げ強度に対する比率として示している。この結果から、次式(1)に示す修正 Goodman 線図に対して、実験結果が適合することが分かり、疲労限度を予測できることを示唆している。

$$\sigma_a = \sigma_w \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_b} \right) \quad (1)$$

ここで σ_a は応力振幅、 σ_m は平均応力、 σ_w は両振り状態における疲労強度、 σ_b は静的な曲げ強度を表す。

(2) 温度依存性

Fig.5 に、各材料の疲労特性の温度依存性の測定結果を示す。縦軸は、測定した疲労強度を同温度での静的曲げ強度で除した値を示している。どの材料においても、高温になるにしたがって静的強度、疲労強度ともに低下するが、静的強度に対する比率は温度ごとに異なっていることが分かった。また、高温になるにつれて疲労強度の相対比が高くなる傾向はどちらの FRP でも確認された。

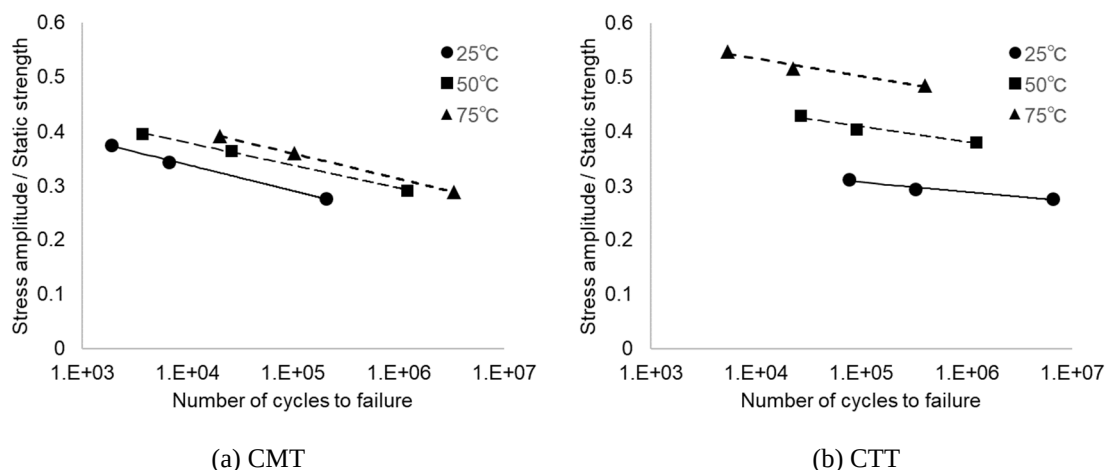


Fig.5 Temperature dependence of fatigue property of FRP

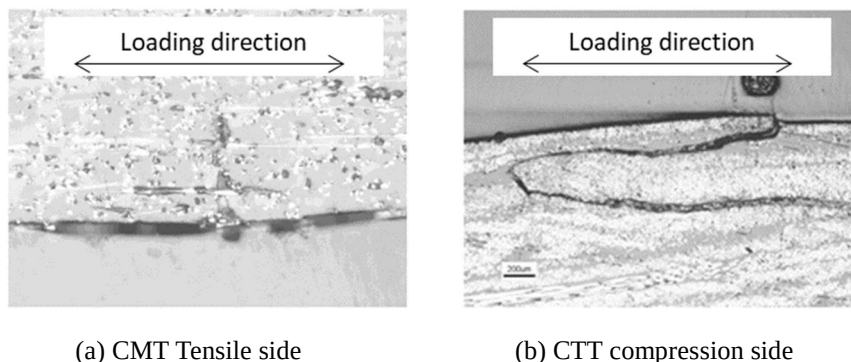


Fig.6 Micrographs of fatigue damage area

Fig.6 に疲労破壊後の試験片の断面写真を示す。CMT は亀裂が厚さ方向に伝播していることから、繊維破断を伴って疲労損傷が進行していると考えられる。温度依存性の小さい繊維破断の影響を強く受ける傾向から、疲労強度と静的強度の相対比の温度差が比較的小さくなったと考察される。一方で、CTT はテープ間の樹脂内を亀裂が蛇行するように疲労破壊が進行している様子が確認できる。このようなモードにおいては、層間の破壊靱性による亀裂進展抵抗が重要な要素となり得る。

(3) 樹脂疲労特性の影響

Fig.7 に PP 単体の引張疲労 SN 曲線を示す。どちらの SN 特性も、温度依存性については同様の傾向を示すが、CMT 用 PP の方がやや疲労破壊までの繰り返し数が多く、静的引張試験において破断までの伸びが CTT 用 PP よりやや高いことと整合する。ただし、温度依存性に着目した場合、いずれの PP でも高温になるにつれて疲労強度が高くなるようなことは無く、前述の FRP における傾向とは異なる結果となった。つまり、樹脂特性のみで FRP の疲労特性を説明で

きないと言える。一方で、CMT 用 PP の方が耐久性が高いが、CFRP の疲労においては CTT よりも破断までの繰り返し数が少ないことから、CMT の方が繊維周り、特に繊維端でのひずみ・応力集中が、CTT のそれよりも大きいことが示唆される。以上を鑑みると、それぞれ強化構造において、面内負荷が与えられた際の層間あるいは繊維周りの応力・ひずみ状態を力学的に解明する必要性がある。

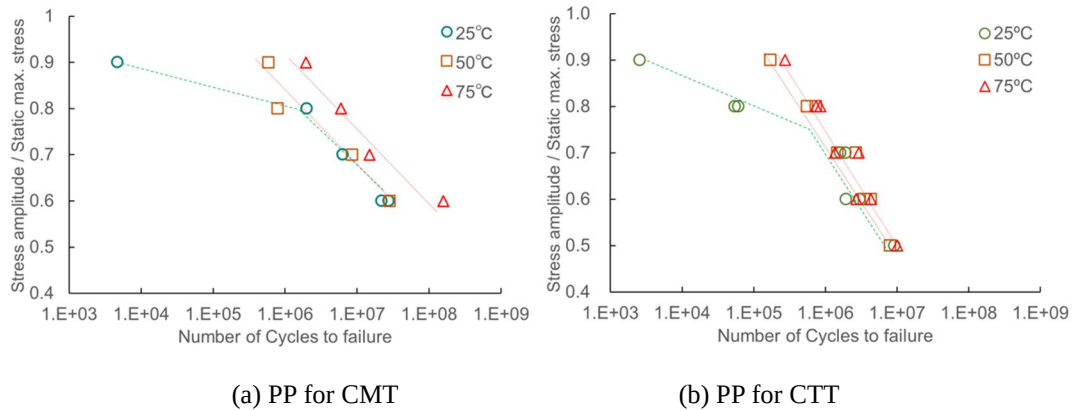


Fig.7 Fatigue property of matrix resin PP

以上より、実験的に樹脂単体の引張疲労特性を検証した結果、その SN 曲線には明確な温度依存性が確認できず、CFRP の SN 疲労特性と直接的な相関関係が無いことが分かった。一方、疲労破壊の損傷モードが強化構造によって大きく異なることを鑑みて、繊維周りやテープ層間における樹脂に与えられる応力・ひずみ状態を紐解く必要があることが示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Murakami Takashi、Matsuo Tsuyoshi、Sumiyama Takuya	4. 巻 55
2. 論文標題 Experimental method and evaluation for interlaminar shear properties of randomly oriented strand thermoplastic composites based on modified double-notch specimen and two dimensional digital image correlation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Composite Materials	6. 最初と最後の頁 1315～1330
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/0021998320967719	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 —

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松尾 剛
2. 発表標題 ランダム配向CFRPの疲労強度に及ぼす樹脂特性の影響に関する考察
3. 学会等名 第12回日本複合材料会議
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

—

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------