

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：23201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420023

研究課題名(和文) PBO繊維の引張および疲労強度に及ぼすキンクバンドの影響

研究課題名(英文) Effects of Kink Band on Tensile and Fatigue Strength of Poly-p- Phenylene Benzobisoxazole (PBO) Fibers

研究代表者

堀川 教世 (HORIKAWA, NORIYO)

富山県立大学・工学部・准教授

研究者番号：10363871

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではPBO繊維の引張および疲労強度に及ぼすキンクバンドの影響を調べた。実験の結果から、PBO繊維の引張強度はキンクバンド密度の増加と共に低下し、キンクバンドは引張強度に対して損傷として働くことを明らかにした。ワイブル解析の結果からキンクバンドを持つPBO繊維の引張強度は有効体積の概念で説明できることを明らかにした。キンクバンドを持つPBO繊維に紫外線照射を行った場合、キンクバンド部分で自動酸化が生じるため、引張強度が大きく低下することを明らかにした。キンクバンドを持つPBO繊維の疲労強度は最大応力で整理できることを示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, effects of kink band on tensile and fatigue strength of Poly-p- Phenylene Benzobisoxazole (PBO) fibers were investigated. As a result of Weibull analysis, it was found that kink bands act as defects that degrade the tensile strength. A Weibull analysis demonstrated that the concept of effective volume explains the tensile strength of PBO fiber. When the PBO fiber with kink band was subjected to ultraviolet light, the residual strength is greatly reduced due to the auto-oxidation generated in the kink damaged region. The maximum stress was most suitable parameter to describe the fatigue strength of PBO fiber with kink band.

研究分野：材料強度、破壊力学、信頼性工学

キーワード：キンクバンド 高分子繊維 紫外線劣化 強度特性

1. 研究開始当初の背景

(1)PBO 繊維について

PBO (Poly-p-Phenylene Benzobisoxazole) 繊維は芳香環とヘテロ環を持つ剛直な分子構造を有しており、液晶紡糸法を用いて PBO の分子鎖を繊維方向に高配向させて得られる高強度 (アラミド繊維の約 2 倍、炭素繊維の約 1.6 倍) 高弾性率繊維である。用途は、主に構内配線用光ファイバケーブルの緊張材であるが、長距離通信用の太径の光ファイバケーブルや携帯端末の電源ケーブル、さらに曲げ曲率半径の小さい電線の補強繊維としての用途が期待されている。

(2)キンクバンドと引張強度

結晶性の高分子繊維は、引張強度に比べて圧縮強度が低いために曲げ変形によって容易にキンクバンドと呼ばれる帯状の膨らみを生じるが、PBO 繊維も例外ではない。PBO 繊維に生じるキンクバンドはマイクロフィブリルの座屈によるものと考えられており、引張荷重を負荷すると座屈したマイクロフィブリルの延伸によりキンクバンドが細くなる。このため繊維の引張強度に対しては、引張荷重を与えることで分子鎖の延伸により座屈が消失もしくは軽減され、強度に与える影響は小さいと考えられてきた。

(3)社会のニーズと問題点

今後、PBO 繊維のような結晶性高分子繊維については小型携帯端末の電源ケーブルやさらに曲げ曲率半径の小さい電線の補強繊維といった曲げや折り曲げによってキンクバンドを生じやすい用途での使用の期待が高まっているが、キンクバンドを持つ PBO 繊維の強度 (引張強度だけでなく疲労強度も含めて) に関する研究報告例は極めて少ない状況にある。また、PBO 繊維は他の高分子繊維と同様に紫外線照射により強度低下を起こすことが報告されており、繊維は常に被覆等により紫外線の当たらない環境で使用されている。しかしながら長期間の使用では被覆材の破損により紫外線が当たること考えられ、キンクバンドが発生した PBO 繊維の強度が紫外線照射によりどのような影響を受けるか明らかにすることは繊維強度の信頼性向上の観点から重要である。

2. 研究の目的

(1)キンクバンドを生じさせた PBO 繊維の引張試験を行い、キンクバンドが繊維の引張強度に及ぼす影響を明らかにする。

(2)キンクバンドを生じさせた PBO 繊維に紫外線照射を行い、紫外線照射が引張強度に及ぼす影響を明らかにする。

(3) (1)、(2)において疲労試験を行いキンクバンドおよび紫外線照射が疲労強度に及ぼす影響を明らかにする。

3. 研究の方法

(1)実際のキンクバンドの発生状況を模擬するために図 1 に示すように PBO 繊維を鋼棒に巻き付ける。数種類の直径の鋼棒に PBO 繊維を巻き付けキンクバンドの密度の異なる PBO

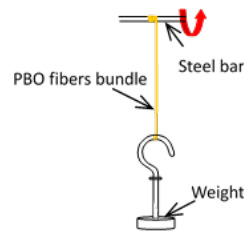


図 1 キンクバンド導入方法

繊維を得る。キンクバンドを生じさせた PBO 繊維について単繊維引張試験を行い、得られた引張強度に対してワイブル解析を行う。

(2)キンクバンドを生じさせた PBO 繊維に紫外線照射を行い、単繊維引張試験により引張強度を求め、ワイブル解析を行う。

(3)キンクバンドを生じさせた PBO 繊維に紫外線照射を行い、EPMA 分析によりキンクバンド部分の元素分析を行い元素量の変化を見る。

(4) キンクバンドを生じさせた PBO 繊維について単繊維の疲労試験を行い、S-N 特性を調べる。

4. 研究成果

(1)キンクバンドを生じさせた PBO 繊維の引張強度特性

図 2 は PBO 繊維に図 1 の巻き付けによる方法で生じさせたキンクバンドを光学顕微鏡で観察したもので縦の黒い線がキンクバンドである。図には 10 個のキンクバンドが確

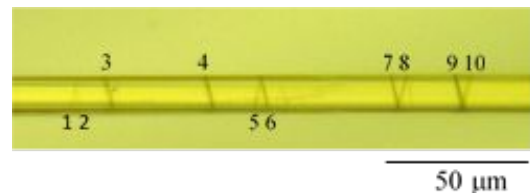


図 2 PBO 繊維のキンクバンド

認される。

図 3 は一例として直径 0.65mm の鋼棒に PBO 繊維を巻き付け、キンクバンドを生じさせた PBO 繊維の残存強度比とキンクバンド密度の関係を表したものである。PBO 繊維は引張強度に対して直径方向に寸法効果があり、直径が細くなると引張強度が高くなることや直

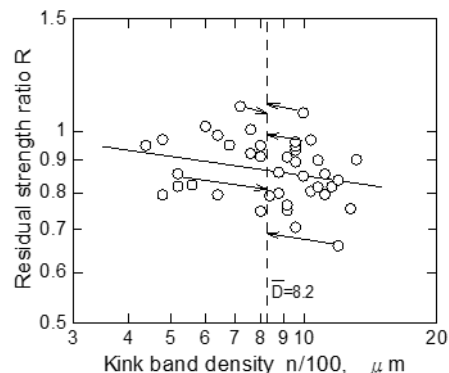


図 3 キンクバンドを生じさせた PBO 繊維の残存強度比とキンクバンド密度の関係

径と引張強度の関係は代表者が既に明らかにしているため残存強度比はキンクバンドの生じた PBO 繊維の引張強度を繊維直径から推定されるキンクバンドを生じていない PBO 繊維の引張強度で除したものである。キンクバンド密度は繊維長さ 100 μm あたりのキンクバンド数である。図よりキンクバンド密度が高くなると残存強度比が低下しており、キンクバンドが引張強度に対して永久損傷として働くことが分かった。

図 4 は異なる直径の鋼棒に繊維を巻き付けキンクバンドを生じさせた PBO 繊維の残存強度比をワイブル確率紙にプロットしたものである。図 4 の残存強度比については、キンクバンド密度は巻き付ける鋼棒の直径が同じでもばらつきがあるため図 3 のようにデータを回帰線に沿って平均のキンクバンド密度まで平行移動し、平均キンクバンド密度に相当する残存強度比に換算している。図より、残存強度は直線で近似できることから 2 母数ワイブル分布に従うことが分かった。

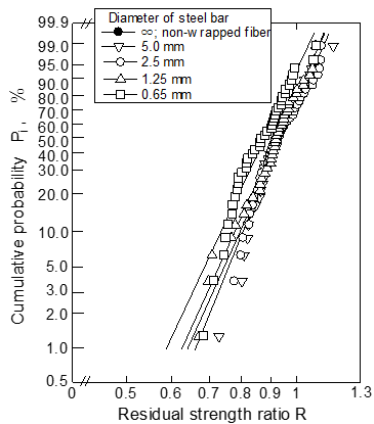


図 4 キンクバンドを生じさせた PBO 繊維の残存強度比の分布 (ワイブル確率紙)

図 5 は図 4 のワイブル解析から得られた尺度母数と平均キンクバンド密度との関係を示している。平均キンクバンド密度が 4 以上では残存強度比の代表値である尺度母数は低下する傾向にあり、近似直線の勾配の逆数から得られる形状母数は 8.21 である。こ

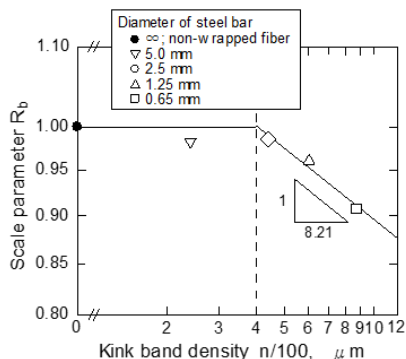


図 5 キンクバンドを生じさせた PBO 繊維の尺度母数と平均キンクバンド密度の関係

の値は図 4 のワイブル解析から得られた形状母数 (鋼棒径 2.5mm、1.25mm、0.65mm に対して形状母数はそれぞれ 10.96、10.88、10.51) の平均値 10.78 に近いものであった。このことから、PBO 繊維のキンクバンドは引張強度に対して永久損傷として働き、強度低下は有効体積の概念で説明可能であることが明らかとなった。

(2) 紫外線照射を受けた PBO 繊維 (キンクバンドを生じさせた) の引張強度特性

図 6 は大気中において紫外線放射照度 8 W/m^2 で紫外線を照射した PBO 繊維 (キンクバンドを生じさせた) の残存強度比とキンクバンド密度を示したものである。赤塗り印は 1 時間、黒塗り印は 10 時間の紫外線照射後の PBO 繊維の残存強度比である。PBO 繊維の紫外線照射による強度低下については、代表者は既に紫外線照射により繊維の表面から徐々に自動酸化が進み劣化層が形成されることを明らかにしている。この劣化層は引張荷重を負担できないほど弱く、これによって紫外線照射時間の増加とともに強度低下が進む。キンクバンドが生じている場合には、赤塗り印に見るように短時間の紫外線照射では白抜き印の紫外線未照射に対して同程度の強度低下となっており、これは劣化層の形成により荷重を分担する有効断面が減少したためと考えられる。しかし、長時間の紫外線照射では黒塗り印に見るように 10% 程度の強度低下の推定線 (下の破線) よりも大

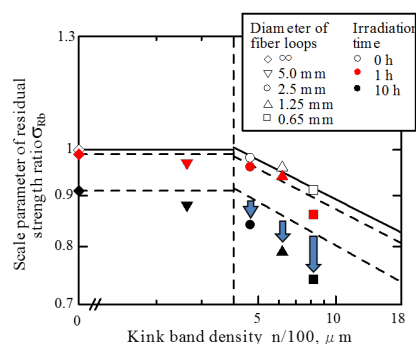
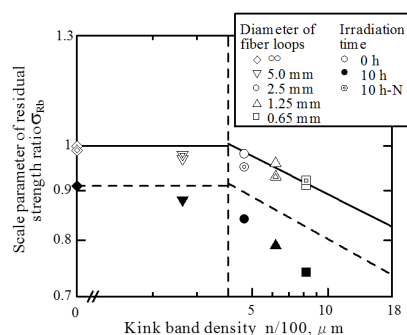


図 6 大気中で紫外線を照射した PBO 繊維 (キンクバンドを生じさせた) の残存強度比の低下



大きく低下しており、劣化層の増加以外に主要因があると考えられる。なお、図7は窒素雰囲気中での実験結果であり、二重線印は10時間紫外線照射を行ったPBO繊維の結果である。黒塗り印は大気中の結果であるが、同じ照射時間でも酸素がないと紫外線照射の影響はないことが分かる。

(3) キンクバンド部分のEPMA分析結果

図8はキンクバンド部分のEPMA分析結果を示したものである。繊維はエポキシ樹脂に埋め込みウルトラミクロトームで繊維を長さ方向に半分にしたものである。図8(c)に見るように紫外線を照射した場合はキンクバンド部分で赤色が強く表示されており酸素の偏析が確認された。このことからキンクバンド部分で自動酸化が優先的に生じていることが分かった。

図9はキンクバンドの生じたPBO繊維に紫外線を照射した場合の模式図である。紫外線照射により表面から自動酸化が進み劣化層(緑色部分)が増えるが、照射時間が長くなると赤色で示すキンクバンド部分で自動酸化が起こり、内部まで劣化が進む。図6の黒塗り印に見る大幅な強度低下は繊維表面からの劣化層の進行に加えてキンクバンド部分の自動酸化により劣化が局所的に内部まで進行するため引張強度低下が大きくなると考えられる。

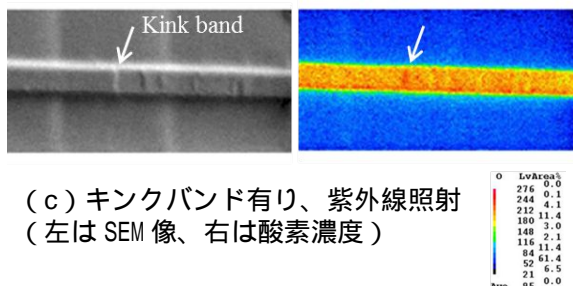
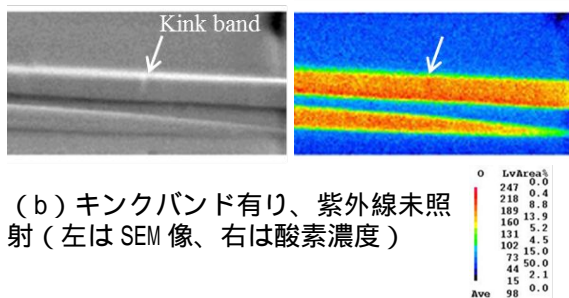
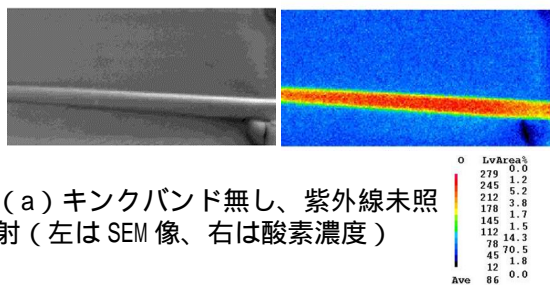
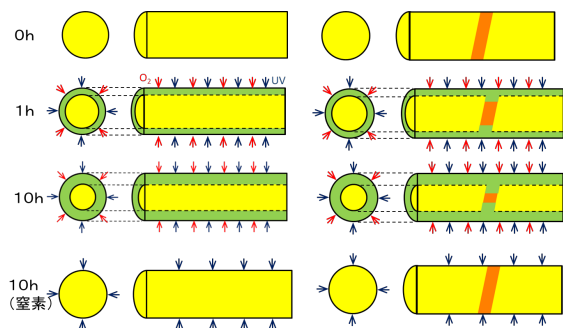


図8 PBO繊維内部のキンクバンド部分のEPMA分析結果



(a) キンクバンド有り (b) キンクバンド無し

図9 キンクバンドを生じさせたPBO繊維の劣化(自動酸化)過程

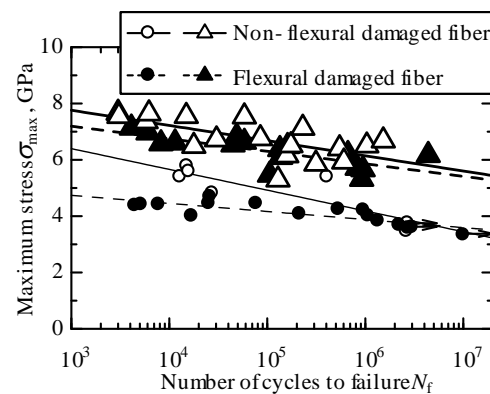


図10 キンクバンドを生じさせたPBO繊維のS-N線図

(4) キンクバンドを生じさせたPBO繊維の疲労強度特性

図10にキンクバンドを生じさせたPBO繊維の単繊維疲労試験結果を示す。丸印は汎用タイプPBO繊維、三角印は高弾性率タイプの実験結果である。キンクバンドを生じさせたPBO繊維の実験データは汎用タイプ、高弾性率タイプ共に直線で近似できることから最大応力で整理することによって疲労強度を一義的に推定することができる。なお、紫外線照射を行ったキンクバンドを生じさせたPBO繊維のS-N特性については現在実験結果を検討中であり、今後随時発表する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0件)

〔学会発表〕(計 11件)

堀川教世、キンク損傷を有するPBO繊維の疲労強度特性、日本機械学会北陸信越支部 第54期総会・講演会 2017年3月9日、金沢大学

堀川教世、キンク損傷がPBO繊維の疲労破壊挙動に及ぼす影響、日本機械学会 M&M2016 材

料力学カンファレンス、2016年9月20日、
神戸大学

N. HORIKAWA, Effect of Kinking Damage on
Fatigue Strength of High-modulus Type PBO
Fiber, The 10th Asian-Pacific Conference on
Fracture and Strength 2016 (APCFS-2016),
20 September 2016, Toyama(Japan)

堀川教世、キンク損傷を有する高弾性率タイ
プ PBO 繊維の疲労強度、日本機械学会 2016
年度年次大会、2016年9月12日、九州大学

N. HORIKAWA, Tensile Strength of Poly-p-
Phenylene Benzobisoxazole (PBO) Fiber
with Kinking Damage, 21st European
Conference on Fracture (ECF21), 24 June
2016, Catania(Italy)
DOI:10.1016/j.prostr.2016.06038

堀川教世、PBO 繊維の疲労強度に及ぼすキン
ク損傷の影響、日本材料学会第 65 期総会・
講演会、2016年5月29日、富山大学

堀川教世、キンク損傷が PBO 繊維の引張破
壊挙動に及ぼす影響、日本機械学会北陸信越
支部 第 53 期総会・講演会、2016年3月5日、
信州大学

堀川教世、キンク損傷を有する PBO 繊維の紫
外線照射による強度低下要因の検討、日本機
械学会 2015 年度年次大会、2015年9月15
日、北海道大学

N. HORIKAWA, Fatigue Property of PBO Fiber
Considering Size Effect in Diametral
Direction, The 3rd Japan-China Joint
Symposium on Fatigue of Engineering
Materials and Structures, 6 November 2014,
Takayama (Japan)

堀川教世、巻き付けによりキンク損傷を与え
た PBO 繊維の引張強度評価、日本設計工学会
平成 26 年度 秋季研究発表講演会、2014 年
10月4日、山形大学

堀川教世、キンク損傷を与えた PBO 繊維の引
張強度の確率分布、日本機械学会 M&M2014 材
料力学カンファレンス、2014年7月20日、
福島大学

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者
堀川 教世 (HORIKAWA NORIYO)
富山県立大学・工学部・准教授
研究者番号: 10363871

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者