

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：15501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760651

研究課題名(和文)麻繊維の撚り構造により発現するグリーンコンポジットの引張特性

研究課題名(英文) Tensile properties of green composites result from the twist structure of ramie fibers

研究代表者

野田 淳二 (Noda, Junji)

山口大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：00398992

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、天然繊維強化複合材料(GC)に関して、1本の麻撚り糸を埋め込んだ単撚糸埋込複合材料と複数本から構成される一方向GC材料について強度特性を明らかにすることを目的とした。まず、単撚糸埋込複合材料についてのその場観察用引張試験システム的设计・製作を行った。次に、撚り数の異なる撚糸を用いて、単撚糸埋込複合材料を作成し、引張負荷下におけるその場観察を行った。その結果、複合材料中の撚糸の破断挙動は、1つの単糸の破断により周辺の単糸の破断を誘発することや、撚糸のはく離挙動、破断後の応力回復挙動が観察された。また、一方向GC材料を作成し、強度特性に及ぼす撚り数の依存性も明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study is to clarify the strength properties for the natural fiber reinforced composites (green composites, GC) from the single twist yarn composite (SYC) to unidirectional twist yarn GC laminates using ramie fibers. At first in-situ observation system during tensile tests under optical micro-scope was designed and conducted for SYC tests. Then SYC specimens with various twist per inch (TPI) were prepared and in-situ observation under tensile loading was carried out. Consequently it was confirmed that a breakage of one fiber involved other breakages, the splitting of yarn from matrix resin occurred and the stress recovery from yarn breakage was identified. Additionally the TPI dependence on the strength properties for unidirectional twist yarn GC laminates was clarified.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学 複合材料・物性

キーワード：有機・無機繊維 グリーンコンポジット

1. 研究開始当初の背景

21世紀の今日、地球環境問題の解決に向けた様々な取組みが行われている中で、材料分野には、力学特性や機能性の確保と同時に廃棄時に人や環境に害を及ぼさない持続可能なバイオマス材料の開発が要請されている。この流れを受けて、高強度天然繊維をバイオマス由来樹脂と複合化したグリーンコンポジット(天然繊維強化複合材料, GC)が自動車や電子機器を始めとする各種産業分野へ応用展開されている。麻やケナフなどの植物系天然繊維は、人工の炭素繊維等の化学繊維のような長繊維を得ることは不可能なので、毛糸のように多くの繊維を集合して撚りを加えた撚り糸として使用される。強化繊維として使用される撚り糸は、従来の化学繊維とは異なり、単位繊維の長さ、太さなどの幾何学的条件と繊維の剛性に加え、繊維工学で定義される撚り数(単位長さ当たりの撚り密度, TPI)がその機械的特性を決定する。これに樹脂が含浸したGCでは、単繊維同士のすべりや摩擦が抑制されるほか、撚り構造特有の荷重伝達機構が働き、その剛性は構成する繊維と樹脂の特性のみから一概に予測することは困難である。環境親和性を備えたGCの幅広い工業利用を進める上で、高剛性・高強度化を実現する撚り糸強化GCの基礎的な引張特性を明らかにすることが望まれている。

2. 研究の目的

本研究は、環境親和性を備えたGCの力学挙動を解明しうる天然繊維複合材料力学の確立という大きな研究目標の中で、最も基礎的な研究として位置づけられる「1本の撚り糸を埋め込んだ単撚り糸強化複合材料から、複数本の撚り糸から構成される一方向強化複合材料までの材料について、その引張・破壊特性を明らかにすること」が目的である。

3. 研究の方法

(1) その場観察用引張試験システムの開発

長繊維で強化された複合材料は、母材樹脂中において1つの繊維の中で複数の繊維破断を起こす繊維多重破断挙動を示すことにより、効率的に荷重を分担して高強度化が実現される。この繊維多重破断挙動は、繊維の強度特性や繊維-樹脂の界面特性に依存しており、強度特性は単繊維の引張試験から、界面特性は、単撚り糸埋込複合材料試験片の引張負荷下での観察により評価される。本研究では、1本の撚り糸を埋め込んだ単撚り糸強化複合材料を作成し、偏光顕微鏡下で引張試験可能な試験システムを構築した。試験機の概要を図1に示す。この試験機は、ロードセル(株共和電業製 LUX-A-1KN)、モーター(株オリエンタルモーター製 4LSB10-1)、コントローラ(株オリエンタルモーター製 US425-401)等から構成され、偏光顕微鏡(株ニコン製 Eclipse ME600)の焦点領域にて可動可能なシステムである。顕微鏡下に設置した様子を

2に示す。別途高解像度デジタルカメラ(株キヤノン製 EOS kiss X5)を鏡筒に設置し、偏光像を観察することにより、図3に示すような繊維破断部を観察した。同図に示すように本システムにより繊維破断部がX字型の偏光像として観察できる。

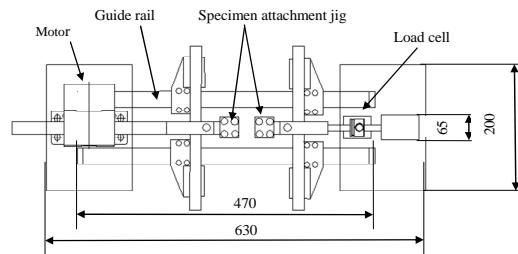


図1 単撚り糸引張試験機



図2 その場観察用引張試験システム



図3 繊維多重破断挙動

(2) 単撚り糸埋込GC材の破壊挙動観察

本節では、天然繊維としてラミー麻繊維(株トスコ製 16番手糸)を用意し、単糸を3本引き抜いて手動により3本撚り糸を作成した。撚り数TPIは3.5, 6.5, 9.5/インチとした。この撚り糸を樹脂型に固定し、バイオマス由来樹脂を流し込み、単撚り糸埋込GC試験片とした。樹脂には大豆由来アクリレートエポキシ樹脂(株ダイセルサイテック製 EBECRYL860)を、硬化剤にペルオキシ安息香酸(株和光純薬工業製 T-BUTYL)を用いた。樹脂と硬化剤の混合比率は200:1とした。恒温槽にて100℃で2時間硬化させた後、120℃で2時間後硬化して供試状態とした。試験片寸法は、L50×W10×t4mmの短冊形状で、ゲージ部長さL₀を10mmとした。クロスヘッド速度0.5mm/minで引張試験を実施し、負荷ひずみ0.5%毎に試験を適宜停止し、多重破断の様子を観察した。撚り糸の界面特性の評価には、以下のKelly&Tysonの式を用いた。

$$\tau = \frac{2\sigma_f A_f}{L_c q} \quad (1)$$

ここで A_f は 3 本撚糸の断面積, q は周囲長さであり, 別途 3 本撚糸の引張試験を実施して得られた引張強度を σ_f とした. L_c は式(2)で定義される応力回復長さであり, 観察される破断数 n と L_0 より算出される.

$$L_c = \frac{4 L_0}{3 n} \quad (2)$$

(3) 一方向 GC 材の破壊挙動

本節では, ラミー麻繊維を手動撚り機を用いて TPI1.5, 3.5, 6.5, 9.5 の撚糸を用意した. この撚糸を 12 本並べ, バイオマス由来樹脂を VaRTM 法にて含浸し, 一方向 GC 材を成形した. 樹脂成分や硬化条件は単撚糸埋込 GC 試験片と同様である. 一方向 GC 材の破壊挙動を調べるために, 引張試験と 4 点曲げ試験を実施した. 試験片寸法は, 引張試験片として, $L150 \times W15 \times t2\text{mm}$ の短冊形状に $L30\text{mm}$ のアルミタブを接着しゲージ部長さを 90mm としたものを用意し, また曲げ試験片として $L60 \times W15 \times t3\text{mm}$ の短冊形状のものを用意した. クロスヘッド速度 $1\text{mm}/\text{min}$ で試験を実施し, 破断まで負荷を行った. さらに, 破断後の破面観察を行って破壊モードを調査した. 曲げ特性に対しては, 撚糸の撚り数を考慮した式(3)のコンプライアンスマトリックスを計算して破壊モードの推定を行った.

$$G_{xz} = \frac{1}{S_{55}^y} \quad (3)$$

ここで, G_{xz} は横弾性係数であり, S_{55}^y は, Byun&Chou らの提案した撚糸の撚り角を考慮したコンプライアンスマトリックスである.

4. 研究成果

(1) 単撚糸埋込 GC 材の破壊挙動

まず, 前述の単撚糸の破壊挙動について説明する. 図 3 に示した破断面観察様相から, 1 つの単糸の破断により周辺の単糸の破断を誘発することが観察され, 撚糸の破壊は単糸の破壊挙動が相互に影響を及ぼすことがわかった.

次に図 4 に単撚糸埋込 GC 材の繊維多重破断挙動の計測結果を示す. 同図には, 負荷ひずみに対する撚糸破断数を示した. 撚糸の最弱部で破断した後も, 樹脂界面の接着により撚糸の応力が回復されるので多数の破断が現れる様子がわかる. 同図からは撚糸破断数の増加特性に及ぼす TPI の影響は見られない.

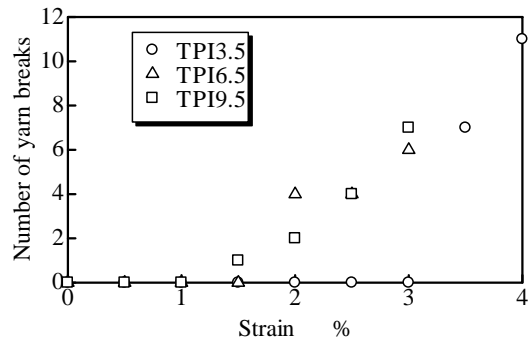


図 4 単撚糸埋込 GC 材の多重破断挙動

表 1 に単撚糸埋込 GC 材の多重破断特性を示す. 同表には, 上から各 TPI における撚糸引張試験数, 単撚糸埋込 GC 材試験数, 推定繊維半径, 周囲長, 断面積に続き, 破断ひずみ, 撚糸引張強度, 飽和繊維破断数, 応力回復長さ, 界面せん断強度を示した. 以上より, TPI の増加に伴い撚糸引張強度が低下するため, 界面せん断強度が低下することが明らかとなった. これは TPI の増加に伴い, 撚糸表面の凹凸が増加するため, 界面接着性が低下することが原因であると考えられる. 実際に TPI が増加すると撚糸のはく離長さが増加する傾向も確認されており, 単撚糸の強化機構としては, 繊維破断挙動において, はく離の成長に撚り数の影響が現れることが明らかとなった.

表 1 単撚糸埋込 GC 材の多重破断特性

TPI	3.5	6.5	9.5
Number of specimens for 3yarn	8	5	8
Number of specimens for 3YNFC	1	2	2
Estimated radius of the fiber[mm]	0.0153	0.0150	0.0146
Perimeter length of 3yarn [mm]	0.289	0.283	0.275
Cross-section of 3yarn[mm ²]	0.00222	0.00213	0.00200
Breaking strain of 3yarn[%]	2.27	2.03	2.15
Tensile strength of 3yarn[MPa]	538	398	270
Saturated break point number	11	6	7
Stress recovery length[mm]	1.21	2.22	1.90
Interface shear strength[MPa]	6.80	2.69	2.07

(2) 一方向 GC 材の破壊挙動

図 5 に一方向 GC 材の引張試験により得られた応力-ひずみ線図を示す. Neat の表記は, 樹脂単体の結果を, AR は GC 材を示す. 同図より, 樹脂単体に比べ, 撚糸強化により強度と剛性の大幅な増加が確認できる. また, TPI の増加に伴い, 強度と剛性は増加することがわかり, 破断ひずみは低下することが明らかとなった. これは TPI が増加すると撚糸の撚り角度が引張方向に向くので, 荷重負担能が増加することに起因する. 同じ理由から引張方向に対する変形能が低下するため, 破断ひずみが低下する.

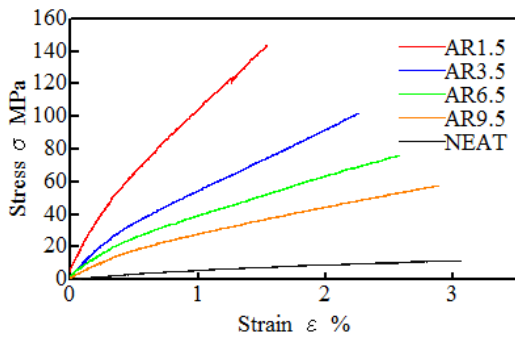


図5 一方向 GC 材の引張特性

次に、図6に一方向 GC 材の4点曲げ試験により得られた曲げ応力-たわみ線図を示す。同図より、樹脂単体に比べ曲げ特性の増加は確認されるものの、TPI1.5と3.5において、引張特性で確認された強度順序と異なる傾向が確認される。ここで図7に曲げ破断後の試験片の端面観察結果を示す。比較のため、TPI1.5と9.5の例を示すが、最上部の引張側における引張破壊が両者で確認されるものの、第2層でせん断破壊がTPI1.5の場合に観察される。TPI9.5ではせん断破壊は観察されず、TPI3.5と6.5でも同様であった。

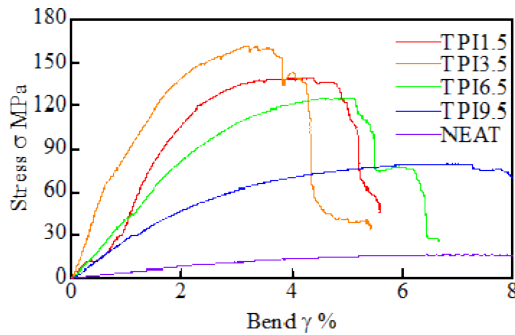
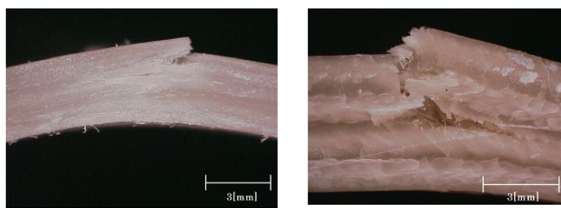


図6 一方向 GC 材の曲げ特性



(a)TPI 1.5

(b) TPI 9.5

図7 一方向 GC 材の破面観察 (曲げ)

そこで、横弾性係数 G_{xz} に及ぼす撚り数の TPI 依存性の計算結果を図8に示す。この計算値は、図5で得られた引張特性のうち剛性が実験結果と一致するように繊維堆積含有率 V_f を求め、撚り数の撚り角度に対する式(3)の横弾性係数を求めたものであり、横弾性係数の撚り角度依存性と V_f 依存性を同時に示したものである。撚り表面の撚り角度を計測し各 TPI に対する横弾性係数を矢印を用いて追記した。同図より、TPI の増加に伴い、横弾性係数の増加が確認され、この大きな横弾性係数がせん断破壊を促し引張破壊を起こす前にせん断破壊を伴って破壊したため、TPI1.5では破壊モードが変化したと考えられる。

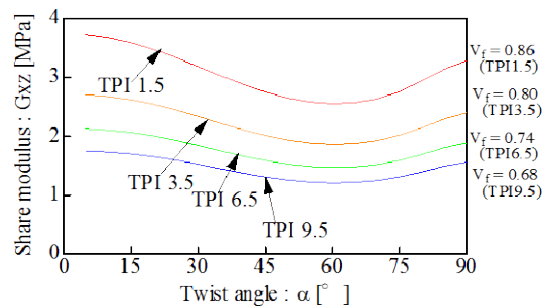


図8 横弾性係数の TPI 依存性

(3) まとめ

本研究では、天然繊維強化複合材料 (GC) に関して、1本の麻撚り糸を埋め込んだ単撚り糸埋込複合材料から、複数本の麻撚り糸から構成される一方向強化複合材料までの GC 材料について引張特性と曲げ特性を明らかにして、その特性の発現機構の解明を行うことを目的とした。まず、単撚り糸埋込複合材料についてのその場観察用引張試験システムの設計・製作を行った。次に、撚り数の異なる天然繊維撚り糸を用いて、撚り糸を埋め込んだ単撚り糸埋込複合材料を作成し、引張負荷下におけるその場観察を行った。その結果、複合材料中の天然撚り糸の破断挙動は、1つの単糸の破断により周辺の単糸の破断を誘発することや、撚り糸のはく離挙動、破断撚り糸の応力回復挙動を明らかにすることができた。また、複数本撚り糸の複合材料を作成し、引張特性と曲げ特性に及ぼす撚り数の依存性も明らかにした。以上から、環境親和性を備えた GC の力学挙動を解明しうる天然繊維複合材料力学の基礎を明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計3件)

Junji Noda, Yuta Furutani, Kota Imazu, Koichi Goda, Kenji Aoki, "TPI effect on impregnation in VaRTM and its mechanical properties for natural fiber composites", 19th International Conference on Composite Materials, July/28/2013, Montreal, Canada

平本裕太, 杉田朋洋, 野田淳二, 合田公一, 単撚り糸複合材料の引張負荷下における繊維多重破断挙動, 第37回複合材料シンポジウム, 2012年10月18日, 名古屋市中小企業振興会館, 名古屋市

Junji Noda, "Effect of variation in cross-sectional area on tensile properties for natural fibers", 16th International Conference on Composite Structures, June/29/2011, Porto, Portugal

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野田 淳二 (NODA Junji)

山口大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 398992