

炭素繊維強化組物円筒パイプの研磨による曲げ強度への影響

齋藤 毅 (京都工芸繊維大学 先端ファイブ科学, tsaito@mizuno.co.jp)

大谷 章夫 (岐阜大学 複合材料研究センター, a_ohtani@gifu-u.ac.jp)

仲井 朝美 (岐阜大学 工学部 機械工学科, nakai@gifu-u.ac.jp)

The influence of braided structure on bending strength of CFRP pipes with grinding

Takeshi Saito (Advanced Fibro-Science Division, Kyoto Institute of Technology, Japan)

Akio Ohtani (Composite Materials Center, Gifu University, Japan)

Asami Nakai (Mechanical and Systems Engineering Division, Gifu University, Japan)

要約

ゴルフシャフトの性能には、質量、曲げ剛性、ねじれ剛性、強度、振動などがある。スイング中にシャフトに掛かる曲げモーメントはグリップ部とシャフト先端が大きくなる傾向にあり、ボールのインパクト時にはシャフト先端部は最大になる。スイング中のシャフトの動きを考えると、シャフトの設計の中で特に重要なのは先端である。質量と強度を満たしながら曲げ剛性値を設定することが必要となる。組物を強化形態とした複合材料は、力学的特性に優れるとともに組角度や繊維束間距離を変化させることにより、断面形状を自由に設計できるという特長がある。組物複合材料のゴルフシャフトは3次元構造を持つことにより、独特のフィーリングを得ることができる。しかし、組物複合材料のゴルフシャフトは繊維束が厚さ方向に交差しているために凹凸が生じているため、寸法精度を出すために研磨するため、ゴルフシャフトで一般的な製法であるシートワインディング製法の研磨量よりも倍以上多いという欠点がある。よって、研磨量の曲げ強度への影響は非常に重要な問題である。本研究では研磨による曲げ強度の影響を検討した。まずは4点曲げ試験において研磨量と強度への影響を検討した。次に、ゴルフシャフトの片持ち曲げ試験を行い、研磨量と強度への影響を検討した。この2つの曲げ強度について研磨量の影響を明らかにした。

キーワード

組物複合材料, ゴルフシャフト, 曲げ試験, 研磨, 内部構造

1. 緒言

組物とは織物や編物などと同様、テキスタイルの一種である。代表的な組物の模式図を図1に示す。また、図2に組物作製装置(組機)の機構模式図組機の模式図を示す。組糸と呼ばれる斜めに配向した多数本の繊維束により構成されており、織物と同様の内部構造を有している。また、中央糸と呼ばれる繊維束を長手方向に沿って組糸間に挿入することが可能である。この組物の特徴の一つとして、これら多数本の組糸と中央糸が長手方向に連続していることが挙げられる。そのため、例えば端部に外力を負荷した場合、すべての繊維束が荷重を伝達する。もう一つの特徴として、斜めに配向した組糸の角度を自由に設定できる点にある。また図1の組物は円筒形状を有しているが、組物技術を用いることにより様々な断面形状、例えばH型、T型の様な形状を有する組物も作製可能であることも特徴としてあげられる。以上の様な特徴を有した組物を、炭素繊維やガラス繊維などの優れた力学的特性を有する繊維を用いて作製し、これを強化基材として繊維強化複合材料に適用した場合、上記のように繊維の角度や断面形状を自由に付与でき、なおかつ繊維が連続しているため、優れた力学的特性を有する構造部材を作製することが可能となる。

これまで、組物複合材料に関する研究は盛んに行われており、力学的特性に関しては様々な検討がなされてきた(横山他, 1998; 前川他, 1992; 濱田他, 1992; Nakai et al., 1992;

Norman et al., 2000; Wan et al., 2005; Ahmadi et al., 2009)。しかしながら寸法設計に関しては難しく、例えば積層した場合の厚さ方向の寸法を予測することは、織物複合材料などと同様、はまり込みを考慮しないといけなため非常に難しいといえる。特に組物においては、組角度や繊維束間距離を自由に設定できるため、織物積層材よりもはまり込みの影響が大きく、さらに隣り合う組物層で異なる内部構造を有する場合は更に予測が困難となる。そのため、実際に組物複合材料構造部材を利用する場合、現状では表面を研磨することにより寸法を調整している。例えば近年では組物複合材料ゴルフシャフトが市販されているが、組物シャフトの外径を研磨して所定の寸法とし、ヘッドにシャフトを挿入し接合している。このように組物複合材料を適用する場合に厳しい寸法精度が必要な場合、現状では研磨が必要となるが、研磨により繊維

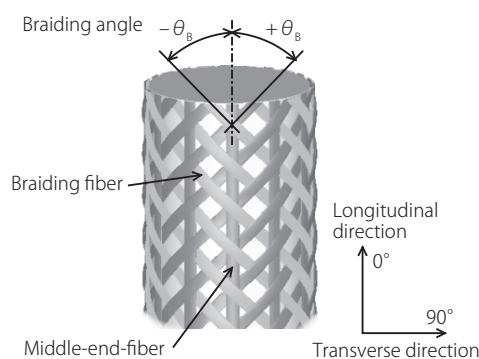


図1: 円筒形状組物(丸打組物)

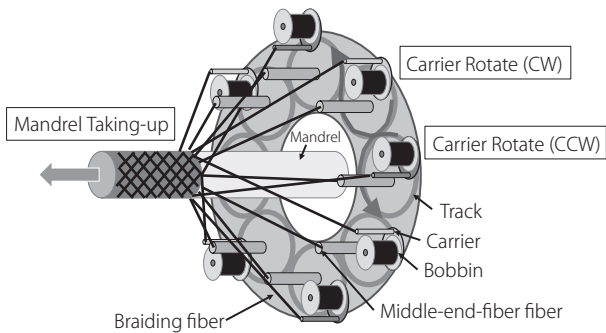


図2：組物作製装置(組機)の機構模式図

が切断され、繊維の連続性が失われることにより、力学的特性が低減することが懸念される。材料設計において、この研磨の弾性率や強度に及ぼす影響を明らかとすることにより、材料設計が可能となる。しかしながら過去のテキスタイル複合材料の研究において、研磨による力学的特性への影響について述べられたものは、筆者の知る限り無いと言える。

そこで本研究においては、組物複合材料に関して研磨の有無やその量が力学的特性へ及ぼす影響について検討を行った。組物複合材料円筒の外周を研磨し、その量を変化させた場合の、曲げ特性、横圧縮特性、ねじり特性に及ぼす影響、およびそれぞれの破壊様相に及ぼす影響について詳細に検討を行った。

2. パイプ強度試験

2.1 試験片および試験片

材料には、炭素繊維 UTS50 (12 k (= 12000) フィラメント、東邦テナックス (株) 製) にエポキシ樹脂が 38 wt% 含まれたプリプレグヤーン (UTS50-12k-RC38、JX 日鉱日石エネルギー (株) 製) を使用した。表1に用いた炭素繊維のフィラメント数、フィラメント径、引張強度、弾性率、織度、密度を示す。このプリプレグヤーンを組糸、中央糸に使用し、直径 12 mm の円柱状マンドレルに4層積層した。内側より1層目は組糸を16本、2層目、3層目には組糸16本、中央糸を8本、4層目には組糸を16本用い、組角度は各層45度とした。組物を積層した後、PPテープをその上に巻きつけ、圧力を負荷し、その後、恒温槽にて加熱硬化させることにより複合材料を成形した。硬化条件は 130 °C で2時間とした。その後、脱芯機を用いて組物複合材料をマンドレルから脱芯させ、試験片とした。試験片の外径は 16.6 mm であった。作製した成形品を回転させた円盤状の砥石が備わった湿式の研磨機を用いて表面研磨し、研磨量の違いにより4種類の試験片を作製した。研磨量は外径の違いにより、研磨無し (16.6 mm)、16.4 mm、16.3 mm、16.0 mm とした。各試験片の詳細を表2に示す。表2に示した研磨率は、最外層 (4層目) が研磨された割合として定

表2：試験片の仕様

Diameter (mm)	Wt. (g)	Length (mm)	Grinding Rate (%)
16.0	2.63	19.8	59.4
16.3	2.78	19.4	28.9
16.4	2.95	20.1	16.0
16.6	3.07	20.2	0.0

義した。算出方法を式 (1) に示す。研磨率は、研磨無しの質量から研磨後の質量を引き、その質量を最外層の質量で除した値と定義した。研磨率は、研磨無し、16.4 mm、16.3 mm、16.0 mm に対し、0.0 %、16.0 %、28.9 %、59.4 % となった。

$$\text{Grinding ratio} = \frac{\text{Grinding quantity of the outermost layer}}{\text{Quantity of the outermost layer}} \quad (1)$$

研磨率は、試験片 1 (0.0 %)、試験片 2 (16.0 %)、試験片 3 (28.9 %)、試験片 4 (59.4 %) となった。外径は非接触型レーザー外径測定器により測定をした。試験片の仕様を表2に示す。

2.2 4点曲げ試験

曲げ試験は4点曲げ試験とした。試験機はインストロン万能試験機を使用した。試験片長は 200 mm、四点間距離 L は 300 mm、圧子と支点間距離は 100 mm、圧子治具の試験片と接する面は R5 mm とした。試験片両端よりスチール製の棒を 50 mm 挿入した。図3に4点曲げ試験図を示す。試験速度は 3 mm/分とした。試験時の最大曲げ応力 σ_{\max} は式 (2)、式 (3) にて求め、その値を曲げ強度とした。 P は最大荷重値、 a は支点から圧子までの距離、 Z は断面係数 D は外径、 d は内径とする。

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{Z} = \frac{P \times a}{Z} \quad (2)$$

$$Z = \frac{\pi}{32D} (D^4 - d^4) \quad (3)$$

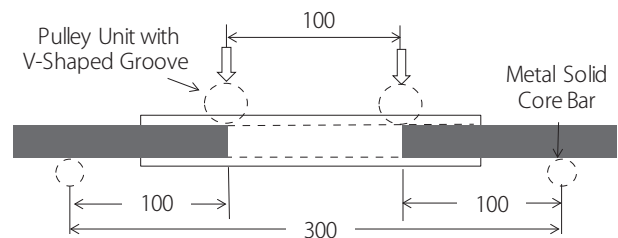


図3：4点曲げ試験図

表1：炭素繊維の物性

Type of Material	Number of filament	Diameter of filament (μm)	Tensile strength (Mpa)	Young's modulus (Gpa)	Tex (g/1000m)	Density (g/cm^3)
UTS50-12K	12000	6.9	5100	245	800	1.8

2.3 試験結果

研磨率と最大荷重および研磨率と曲げ強度との関係を図4および図5に示す。研磨率が大きくなると、最大荷重は減少する傾向であった。しかしながら、曲げ強度は一定の値を示した。

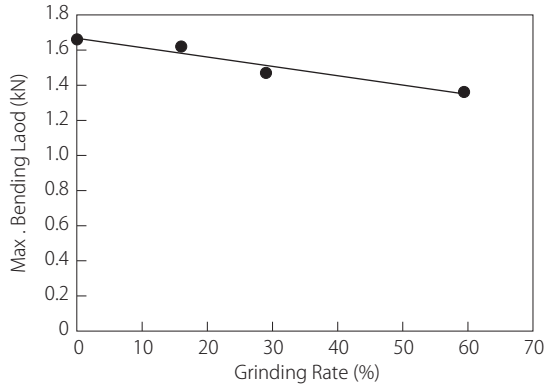


図4：研磨率と最大荷重の関係

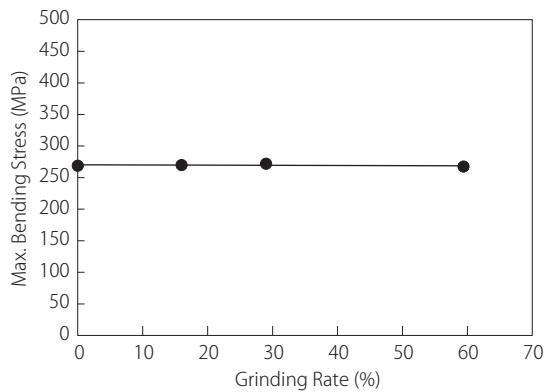


図5：研磨率と曲げ強度の関係

次に、試験片の破壊様相について検討するため、断面観察を行った。図6に、研磨率0.0%、図7に研磨16.0%の破壊後の曲げ試験片の圧縮側および引張側の断面写真を示す。パイプの長手方向の断面を観察面となるように切り出し、エポキシ樹脂を用いて包埋した後、切断、研磨し、断面観察を行った。研磨には、粒度220、400、800、1200、2000番のサンドペーパーを順に使用し、次に粒子径が1.0 μm、0.1 μm、0.05 μmのアルミナ粒子を用いてバフ仕上げをした。研磨後の断面を倒立型金属顕微鏡OLYMPUS-PME3（オリンパス（株）製）を用いて観察し、デジタルカメラで撮影した。撮影した断面写真は画像編集・加工ソフト Adobe Photoshop CS2（Adobe（株）製）のPhotomerge機能を用いて貼り合わせた。どちらの試験片においても、圧縮側において長手方向に配向した中央系の座屈破壊が発生し、斜めに破壊進展していることがわかった。引張側においては、中央系が破断していた。このことより、層内の中央系の破壊が曲げ破壊の支配要因であると考えられる。この破壊様相から、組物複合材料円筒において、最外層の研磨量は曲げ強度に影響しないことが示唆された。

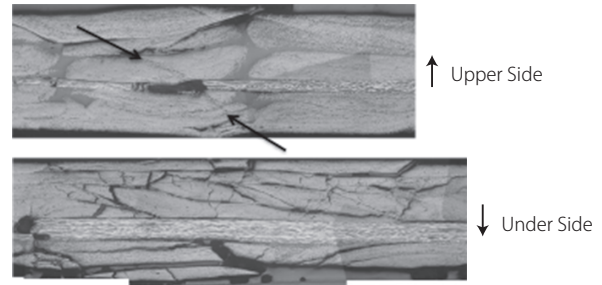


図6：研磨率0.0%の0°方向断面写真

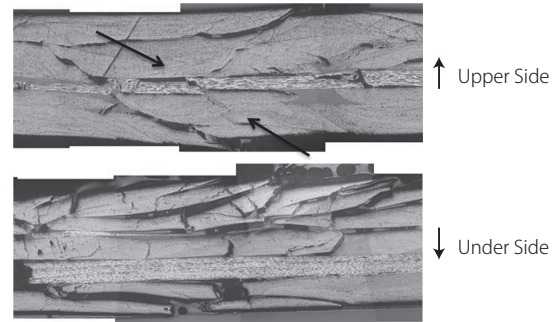


図7：研磨率16.0%の0°方向断面写真

3. ゴルフシャフト強度試験

次に、ゴルフシャフトを用いた検討を行った。ゴルフシャフトは大きなたわみ量と伴うため、試験方法の確立が課題であった。ここでヘッドスピード50 m/sのプロゴルファーにおけるインパクト直前のシャフトに掛かる曲げモーメントを図8に示す。特にシャフト先端部に大きな曲げモーメントが掛かっていることがわかる（芦田他, 1994）。そこでゴルフクラブと同様に、シャフトの先端部を支点とした片持ち曲げ試験を実施した。

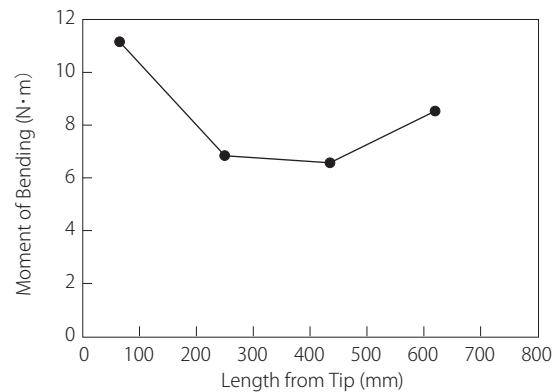


図8：衝撃時の曲げモーメント

3.1 材料および試験片

材料は炭素繊維TR50S-12k（三菱レイヨン（株）製）にエポキシ樹脂が36 wt%含浸されたプリプレグヤーンHMT701-TR50S-12k（三菱レイヨン（株）製）を使用した。12kはフィラメント数が12000本であることを意味する。表4に繊維情報を示す。組物作製後、PPフィルムテープを組物上に巻きつけ、

表3：試験片の仕様

Specimen	Outer diameter (mm)	Ground outer diameter (mm)	Inner diameter (mm)	Grinding rate (%)
1	10.03	10.03	4.60	0.0
2	10.03	9.40	4.60	51.6
3	9.85	9.40	4.40	36.9
4	9.76	9.40	4.20	29.5

表4：炭素繊維の物性

Type of material	Number of filament	Diameter of filament (μm)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Tex (g/1000m)	Density (g/cm ³)
TR50S-12K	12000	6.9	5100	245	800	1.8

表5：試験片の積層構成

Layer	Branding angle (°)	Branding yarns	Middle-end yarns
1	40	8	0
2	40	4	0
3	35	16	8
4	16	16	8
5	10	16	0

テープラッピングした。その後、恒温槽にて加熱硬化させた。硬化条件は80℃で2時間(1次硬化)、130℃で2時間(2次硬化)とした。その後、脱芯機を用いて試験片をマンドレルから脱芯させた。先端径φ4.6のストレート形状のマンドレルを用いた。表3のマンドレル3種類に同じ積層条件の組物を作製した。試験片は表面の研磨量を変えた4種類をした。表5に積層情報を示す。積層条件は上記4点曲げ試験片とは異なり、ゴルフシャフトの性能に必要な曲げ剛性値を達成するために最外層の組み角度は10度と少ない設定にした。試験片2は試験片1と共通のマンドレルを使用し、設定の外径φ9.4に設定し、NC研磨機により先端を研磨した。試験片3は試験片1よりもマンドレルを0.2mm細く設定した。外径はφ9.4と共通としNC研磨機により先端を研磨した。試験片4は更にマンドレルを0.2mm細く設定した。外径はφ9.4mmと共通とした。よって、試験片4はマンドレルが最も細いため研磨後の外径は細くなる。結果、研磨量も少なくなり肉厚が厚くなる。研磨率は試験片1(0.0%)、試験片2(51.6%)、試験片3(36.9%)、試験片4(29.5%)となった。

外径は被接触型のレーザー外径測定器にて測定した。最外層の肉厚は断面観察手法を用いて画像処理・解析ソフトImageJ(アメリカ国立衛生研究所製)を使用して最外層の肉厚を測定した。

3.2 片持ち曲げ試験

片持ち曲げ試験は、ゴルフクラブ同様にシャフト先端部にセルロース製ゴルフクラブ用ソケットを厚入した状態で行った。試験片先端に取り付ける治具を図9に、試験方法の模式図を図10に示す。曲げ荷重時に試験片がずれないように治具

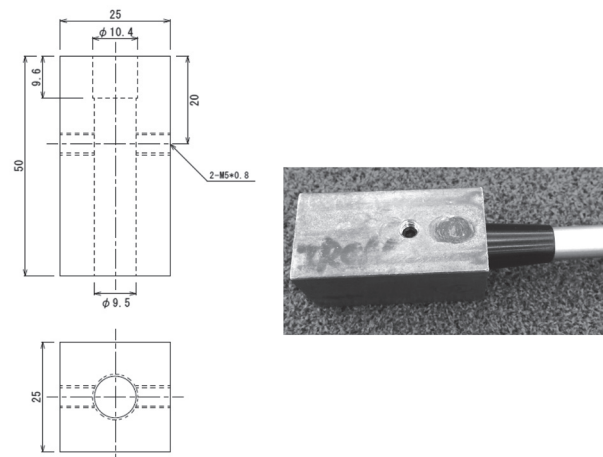
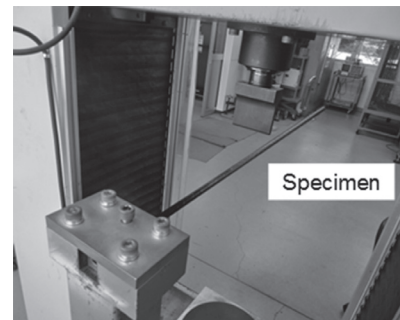
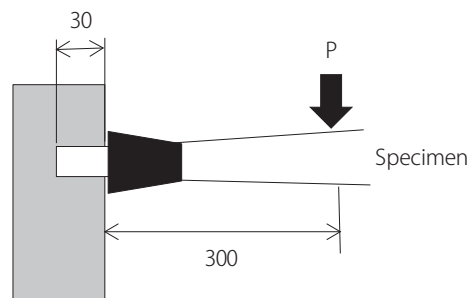


図9：治具



(a) 試験風景



(b) 模式図

図10：試験方法

の外部よりシャフトを上下方向からネジを固定した。ゴルフヘッドに取り付けるための装着長さとして30 mmを図9の治具の中に挿入した。また、治具端面での破壊が起きないように、ゴルフクラブヘッド同様に段差をつけた構造とした。試験片取り付け端面より300 mmの位置において、圧子 $R=5$ において曲げ荷重を加えた。曲げ試験は島津製作所製オートグラフを使用して行った。このときの曲げ試験速度は100 mm/secとした。

片持ち曲げ試験での曲げ応力の算出方法は、片持ち梁の先端荷重 P として扱う。最大曲げモーメント M_{max} は固定端が最大になるため、固定端から荷重までの距離 l として、式(4)で表せる。

$$M_{max} = P \times l \quad (4)$$

その時の、曲げ応力 σ_{max} は式(5)にて求め、その値を曲げ強度とした。パイプの断面係数 Z は式(3)で表すことはできる。

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{Z} \quad (5)$$

3.3 試験結果

図11に研磨率と最大荷重の関係を示す。研磨率は最外層の肉厚計算値に対する研磨肉厚とした。その結果、研磨率がより多くなるに従い、最大曲げモーメントは減少する傾向となった。次に、図12に研磨率と曲げ強度との関係を示す。研

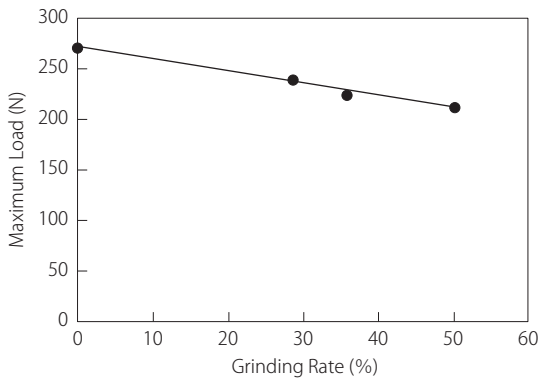


図11：最大荷重と研磨率の関係

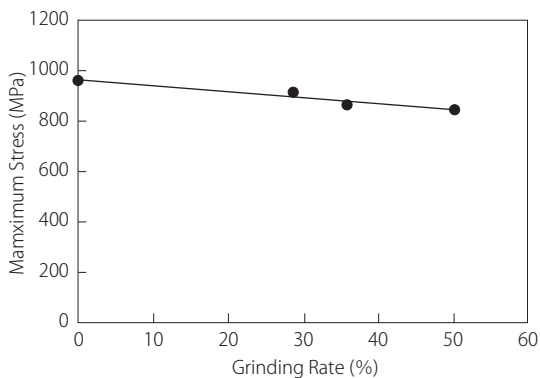


図12：曲げ強度と研磨率の関係

磨量が増加するに伴い、曲げ強度は低下する傾向となった。この結果は図5で示された結果とは異なる結果となった。

次に破壊様相について検討するために、破壊部周辺の断面観察を実施した。破壊後の各試験片の断面写真を、図13(a)～(d)に示す。各試験片共に圧縮側のみでの破壊であったため、各々圧縮側の断面写真のみを示す。荷重は上側から負荷しているため、写真の下側がシャフトの外周となる。試験片1(研磨率0.0%)の破壊位置はシャフトの先端より30 mmの治具端面の圧縮側における中央系でき裂が発生、その後、厚さ方向にき裂が伸張し破壊に至った。次に最も研磨量が多い試験片2(研磨率51.6%)の場合、破壊位置はシャフト先端から約55 mmの圧縮側で破壊が発生していたが、試験片1の様に中央系の座屈破壊ではなく、シャフト外周の組糸のはく離が進展し破壊に至った。試験片3(研磨率36.9%)の場合、破壊位置はシャフト先端から手元側45 mmの圧縮側でき裂が発生、その後、厚み方向斜めでき裂が伸張し破壊に至った。試験片4(研磨率29.5%)の場合、破壊位置はシャフト先端から手元側に45 mmの圧縮側でき裂が発生、その後、厚み方向にき裂が伸張し破壊に至った。

以上の様に、研磨量に応じて破壊様相が大きく異なることが明らかとなった。研磨量が多い場合は組糸のはく離が支配

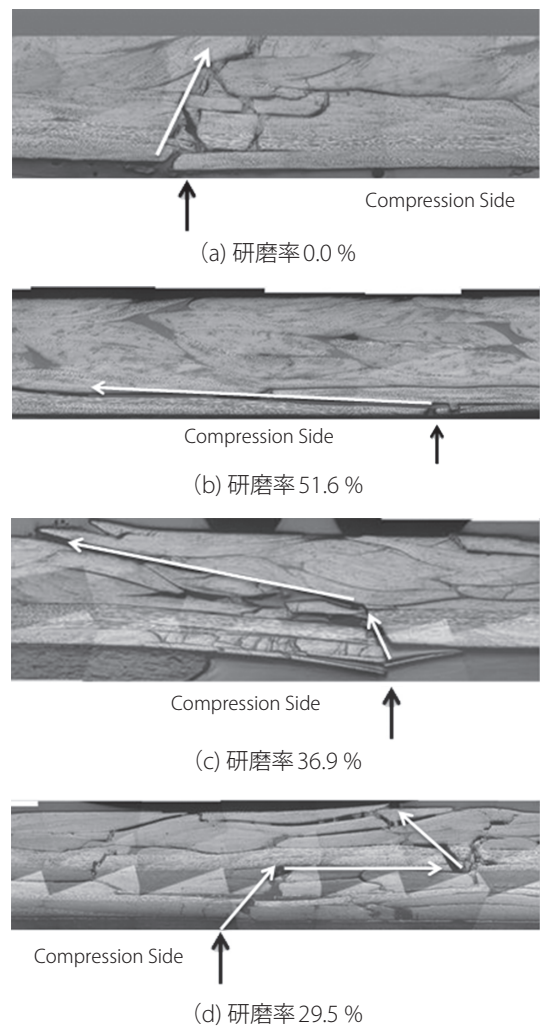


図13：試験後断面写真

的な破壊様相であり、研磨量が少ない場合は中央系の座屈破壊が支配的であった。これは、研磨することにより組系の連続性がなくなり、組系が剥離しやすくなったため、破壊挙動が変化し、力学的特性が低下したものと考えられる。しかし、前章の曲げ試験の結果より、研磨の影響がなかったという知見が得られていたことから、本章の結果とは一致しないと言える。この結果の相違に関しては組系の角度に依存しているものと考えられる。前章では、圧縮応力の方向に対して組系の配向角度が45°であったため、中央系と比較して組系に対する応力分担が少なく、その結果研磨による組系への影響が少なかったと考えられる。そのために、曲げ強度の値が研磨量が増加しても一定であったと言える。一方、本章の結果においては、圧縮応力の方向に対して組系の角度が10°であるため、中央系と比較して応力分担が大きくなり、研磨による組系への影響が大きく反映された結果、研磨量が増加するに伴い破壊様相が変化し、強度が低下したといえる。

5. 結言

本研究では、組物複合材料円筒に対して、外周を研磨した場合の力学的特性への影響について、曲げ試験を実施し検討を行った。

45°の組角度を有する組物複合材料円筒においては、研磨量を変化させた場合において、強度に対する影響は見られなかった。破壊様相観察から、最終破壊は圧縮側の中央系の座屈が支配的な要因であり、そのために研磨の影響は見られなかったことが明らかとなった。

一方、ゴルフシャフトにおいて研磨量を変えた場合、前述の結果とは異なり研磨量の増加に伴い曲げ強度が低下することが明らかとなった。断面観察により破壊様相について検討したところ、研磨量が少ないものではシャフトの圧縮側の中央系での破壊、多いものでは圧縮側にある組系の端部から発生した繊維束のはく離が曲げ強度の支配的要因であった。

破壊様相および曲げ強度が異なった理由は、組系の配向角度に原因があり、圧縮応力の負荷方向に、繊維がより配向しているゴルフシャフトで、組系が研磨されて不連続になった影響が見られ、45°に配向した場合は応力分担が少なく、影響がほとんど見られず曲げ強度が変わらなかったと言える。

引用文献

- 芦田浩規・斎藤毅・鳴尾丈司・佐藤文宣 (1994). ゴルフクラブのスイング中の動的挙動. 日本機械学会講演論文集, 940-59, (S): 86-90.
- 濱田泰以・藤田章洋・仲井朝美 (1995). 組物複合材料円筒の設計に関する研究. 日本機械学会論文集 (A編), Vol. 61, No. 587, 1460-1466.
- 前川善一郎・濱田泰以・藤田章洋・西澤洋・大石橋弘治 (1992). 炭素繊維三軸織物強化複合材料の引張特性. 繊維学会誌, Vol. 48, No. 9, 454-460.
- Ahmadi, M. S., Johari, M. S., Sadighi, M. and Esfandeh, M. (2009). An experimental study on mechanical properties of GFRP braid-pultruded composite rods. *eXPRESS Polymer Letters*, Vol. 3, No. 9, 560-568.

Nakai, A., Hamada, H. and Hoa, S. V. (1996). Influence of braiding structure on torsional properties of braided composite tube. *Computer Technology: Applications and Methodology*, Vol. 326, 125-130.

Harte, A. M. and Fleck, N. A. (2000). On the mechanics of braided composites in tension Anne-Marie Harte. *A/Solids*, Vol. 19, 259-272.

横山敦士・前川善一郎・濱田泰以・上田祐男・岩崎康彦・小林秀光 (1988). 組物構造を有するFRPの力学的特性 (第2報) 円筒の引張挙動. 繊維機械学会誌論文集, Vol. 43, No. 4, 57-63.

横山敦士・前川善一郎・濱田泰以・堀野恒雄・上田祐男 (1988). 組物構造を有するFRPの力学的特性 (第3報) 円筒の曲げ挙動. 繊維機械学会誌論文集, Vol. 41, No. 6, 45-53.

Wan, Y. Z., Chen, G. C., Huang, Y., Li, Q. Y., Zhou, F. G., Xin, J. Y. and Wang, Y. L. (2005). Characterization of three-dimensional braided carbon/Kevlar hybrid composites for orthopedic usage. *Materials Science and Engineering*, Vol. A398, 227-232.

(受稿：2015年6月25日 受理：2015年7月6日)