

単一竹繊維強化生分解性樹脂複合材料のフラグメンテーション試験

高橋明宏・山元直行・小園一也¹・村雲未知夫²・野村國彦³・豊廣利信

Fragmentation Tests on a Single Bamboo Fiber Reinforced Biodegradable Resin Matrix Composites

Akihiro TAKAHASHI, Naoyuki YAMAMOTO, Kazuya KOZONO¹, Michio MURAKUMO²,
Kunihiko NOMURA³ and Toshinobu TOYOHIRO

(Received October 1, 2008)

Abstract Mechanical properties of bamboo fiber are investigated in terms of the effects of chemical treatment. Fiber fragmentation behavior in a single bamboo fiber reinforced biodegradable resin matrix composite is confirmed experimentally and further analytically. The weak alkali (1.6wt% concentration) treated bamboo fiber is showed the increase of tensile strength and elastic modulus. The results of fiber fragmentation tests are considered using the statistical approaches on composite materials. An extensive fiber pull-out failure is observed without alkali treated bamboo fiber in the fragmentation test. It is found that the alkali treatment is effective to exhibit the removal effects of the contaminations and the parenchyma cells on fiber surface. Furthermore, the narrow slits are formed into between fiber monofilaments. When the resin matrix was embedded into the slits, according to an anchor mechanism, composite interfacial shear stress, τ is enhanced. However, it is shown that the brittle fracture mode of composite is caused to the higher interfacial shear stress, τ .

Keywords [Fragmentation test, Bamboo fiber, Alkali treatment, Composite, Interfacial shear stress]

1 序論

地球規模で広がる環境問題に対応するため、我が国では平成5年に環境基本法が施行され、環境保全の推進と国民の健康で文化的な生活の確保、および自然環境の保全が必要な区域の木竹伐採等が規制事項として設けられている。荒れた竹林の拡大が日本各地で報道される中で、平成19年度に京都府では、市民団体や自治会の地域活動支援事業の一環として荒廃竹林の伐採整備を行っている¹⁾。また鹿児島県では平成20年度から三カ年計画で放置竹林整備事業を開始²⁾した。しかしながら、伐採した竹の廃棄方法の検討は行われているものの、全般的に有効資源と

しての活用方法について、それほど十分な議論が行われていないのが現状である。

従来、竹繊維は高弾性率・高強度を示す植物繊維であることが知られている³⁾。繊維の採取方法⁴⁾として、竹棹をローラー機に通して採取する機械処理、アルカリ溶剤を用いて採取する化学処理、そして高圧・高温を利用して採取する爆砕処理などがある。爆砕処理は採取コストが高価であるという欠点を有するが、他の処理に比べ長繊維状態が維持され大変剛直な状態を堅持したまま採取できる。そのため竹繊維は安全・安心な強化繊維として期待され、FRPの強化材であるガラス繊維からの代替候補と注目されている。最近では、竹繊維と生分解性樹脂をマト

1 東京理科大学

Tokyo Univ. of Sci.

2 株式会社シマノ

SHIMANO INC.

3 都城高専非常勤講師

Miyakonojo National College of Technology, A Part-Time Lecturer

リックスとして混合させたオールグリーン複合材料の試作と強度評価に関する研究が盛んに行われている³⁾。すでに竹繊維強化ポリ乳酸樹脂複合材料が、乗用車内装用の小物部品として実用化されている⁶⁾。しかしながら構造用材料への適用は未達である。

高強度繊維の力学的特性を複合材料へ効果的に反映させ、複合材料を強靱化させるためには、繊維/マトリックス間の界面接着性が良好であることや、マトリックスに作用する応力を繊維に有効的に伝達させることが必要である。界面接着力を向上させる目的として、ガラス繊維強化プラスチック(GFRP)のマトリックスにはマイレン酸を付加したポリプロピレンが多用されている⁷⁾。また無機材料と有機材料の結合剤として、シランカップリング剤⁷⁾がよく知られている。天然の綿繊維においては、アルカリ処理や酵素処理によって夾雑物の除去と繊維表面改質効果が報告されている⁸⁾。綿繊維と同様、竹繊維の主成分はセルロースであるため、アルカリ処理によって夾雑物・不要物の除去、繊維の機能化および複合化の際の界面接着性の向上などが期待できる。

そこで本研究では、低濃度アルカリ溶液に浸した竹繊維単体の準静的負荷による引張試験と、アルカリ処理後の単一竹繊維で強化した生分解性樹脂複合材料によるフラグメンテーション試験⁹⁾を行うことでアルカリ処理効果を調査し、オールグリーン複合材料の靱化に関する力学的な基礎検討を行った。

2 実験方法

2.1 供試材

供試材は、香川産の5年生の孟宗竹(*Phyllostachys pubescens*)である。地上から3m迄を切り出し、それを1mごとに三等分した。さらに縦方向に四分割し、前報¹⁰⁾と同様な爆砕処理をバン株式会社所有の爆砕処理装置を用いて実施した。実験には竹断面の表皮近傍から採取した竹繊維束(以後、竹繊維と略記)を用いた。竹繊維を採取するときは湿ったタオルを用い、繊維に残留ひずみが導入されないように、どの作業も慎重に行った。

竹繊維のアルカリ処理は、1.6 wt% 水酸化ナトリウム(NaOH)溶液 300g に竹繊維 0.3g を浸漬させ、一昼夜静置した。市販試薬として入手した NaOH 粒を用いて NaOH 溶液を作製する際は化学反応熱によって溶液温度が上昇するため、その反応が落ち着いて溶液が一定温度になるまで待機した後、竹繊維を浸漬させた。その後一昼夜水洗し、竹繊維のアルカリ成分が残っていないかどうかを検査した。その後室温で二日間静置後、313Kで21.6 ksecの乾燥処理を行い、

試験に供した。アルカリ処理なしの竹繊維は、蒸留水に一昼夜浸漬させ、静置後に乾燥処理を行った。アルカリ処理した竹繊維は繊維直径の収縮が確認されたので、最終直径が全て0.410~0.415 mmの範囲になるように選択・採取した。アルカリ処理を行っていない繊維も最終的に同等の直径となるように選択・採取した。

2.2 竹繊維引張試験用試験片

竹繊維の準静的な引張試験は、JIS R 7601 法¹¹⁾および文献¹²⁾を参考にして行った。Fig.1は、竹繊維引張試験用試験片の形状および寸法である。試験片標点間距離は25mmとした。試験片の作製方法、および繊維断面積の楕円近似手順は前報¹⁰⁾と同様である。

2.3 フラグメンテーション試験用試験片

フラグメンテーション試験用の単一竹繊維複合試験片は、マトリックスにスターチベースの生分解樹脂(ランディ CP-300・ミヨシ油脂製)を用い、竹繊維は2.1節で前述したものを使用して作製した。金型内

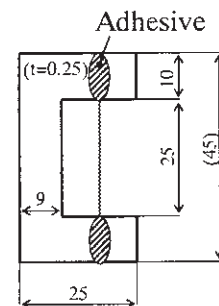


Fig.1 Schematic illustration of tensile specimen for Bamboo fiber

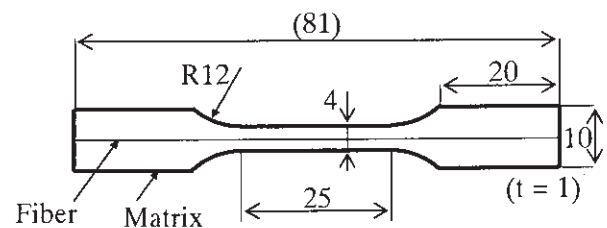


Fig.2 Appearance of specimen for the fragmentation test piece

に樹脂を敷き詰め、試験片中央に竹繊維を慎重に埋め込み・乾燥・熱間プレスするといった手順で作製した。プレス条件は433 K - 1MPaとした。Fig.2に、フラグメンテーション試験用試験片の形状・寸法を示す。試験片は各5ヶ作製した。また、竹繊維を含んでいない生分解性樹脂単体の引張試験片もFig.2と同様の形状・寸法で作製した。なお熱間プレスから

常温に冷却した際、竹繊維とマトリックスの線熱膨張係数の相違により、繊維に熱残留圧縮ひずみ $\epsilon_{r,r}$ が発生する。各相の熱膨張係数の差 ΔCTE と成形温度の差 ΔT から $\epsilon_{r,r}=(\Delta CTE \cdot \Delta T)/2$ として熱残留圧縮ひずみが求められる。計算の結果、0.486%であった。

2.4 引張試験

引張試験は、インストロン型引張試験機(JT トーシ製 LSC-1/30 容量 1000N)を用いて行い、引張速度は 1mm/min.(ひずみ速度 : 6.7×10^{-4} [1/s])として行った。試験片は各 30 ケ準備し試験に供した。なお、試験環境は、室温 298 ± 2 K、湿度 $33 \pm 5\%$ RH とした。竹繊維の試験、フラグメンテーション試験および樹脂単体の試験のすべての引張試験は、同一の試験機および条件にて行なった。試験後の破断様相をデジタルマイクロスコプを用いて観察し、アルカリ処理による破断状況の比較を行った。

3 実験結果

3.1 竹繊維引張試験結果

Fig.3 は、竹繊維引張試験における代表的な応力-ひずみ曲線である。アルカリ処理の有無に関わらず、引張負荷開始直後から線形的な変形挙動を示し、最終的に最高応力で破断するといった応力ひずみ応答を示した。

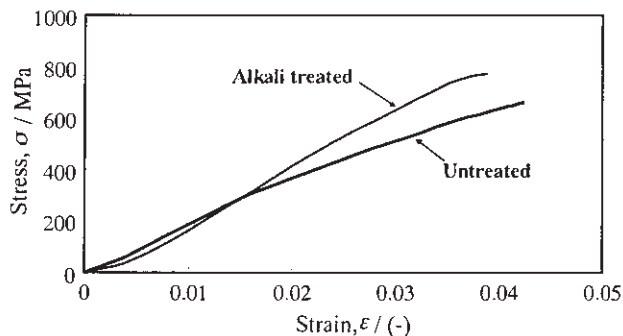


Fig.3 Typical stress-strain curves after the tensile tests of the bamboo fibers with alkali treated and untreated

Fig.4 は、竹繊維の引張強度、縦弾性係数および破断ひずみに及ぼすアルカリ処理の影響を示したものである。黒丸および白丸は各値の単純平均値を示している。アルカリ処理を施すことで、引張強度は約 10% 向上し、縦弾性係数は約 30% 向上した。逆に破断ひずみは約 2.8% 低下した。

Fig.5 は、アルカリ処理および未処理の竹繊維引張試験後の破断形態の違いを示したものである。両者ともに典型的な束繊維体の破壊形態であるスプリッキング破壊¹³⁾を呈した。アルカリ処理を行った竹

繊維は、竹繊維モノフィラメント一本一本が大きく広がって散在して破壊していた。一方、未処理の竹繊維は先端のみモノフィラメントが広がり、アルカリ処理した竹繊維に比べ、モノフィラメントのちらばりに差が認められた。

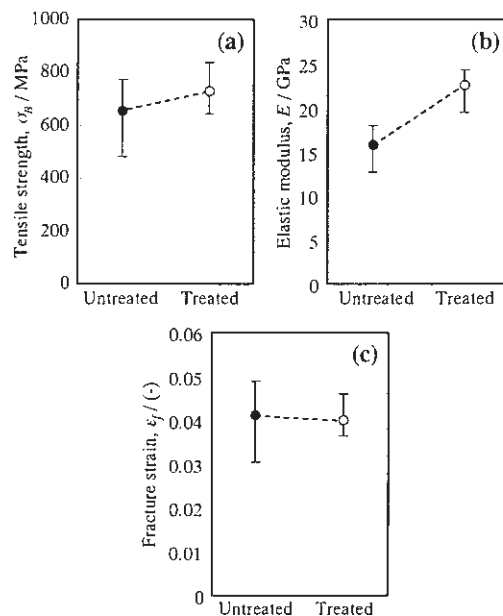


Fig.4 Tensile strength, (a), elastic modulus, (b) and fracture strain, (c) of the alkali treated and untreated bamboo fibers

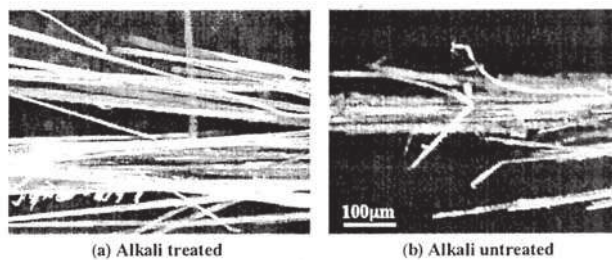


Fig.5 Fracture morphologies after the tensile tests in bamboo fibers with alkali treated and untreated

Fig.6 は、単一竹繊維複合材料のフラグメンテーション試験における代表的な応力-ひずみ曲線である。比較のため、生分解性樹脂単体の引張応力-ひずみ曲線も併せて掲載した。単一竹繊維複合材料の場合、最高引張強度に達するまで直線的な変形抵抗を示し、その後急激な応力低下が現れた。その応力の低下はマトリックス樹脂の変形抵抗レベルまで低下するといった応答であった。本研究で使用したマトリックス樹脂は半透明であるため、試験中に繊維が損傷する様子を目視観察が可能であり、最高引張強度のところで繊維が破断していることが確認できた。その

ため、フラグメンテーション試験における応力低下は繊維破断によるものとわかった¹⁴⁾。アルカリ処理を施した場合、未処理材に比べ最高引張強度・縦弾性係数・破断ひずみがそれぞれ低下することが認められた。例えば、最高引張強度は未処理材の30.4MPaに対して、アルカリ処理材は約33%低下した値を示した。

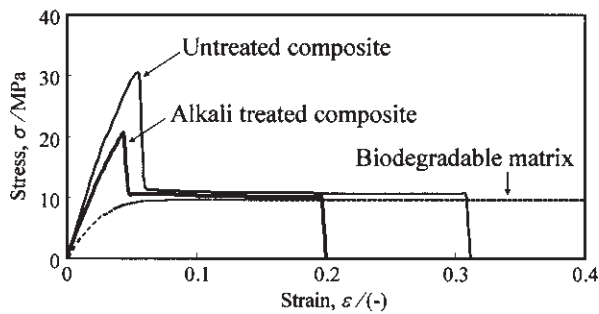


Fig.6 Typical stress-strain curves after the fragmentation tests and tensile test with biodegradable matrix resin

Fig.7は、単一竹繊維複合材料のフラグメンテーション試験後のマクロ的な破断状況を示したものである。アルカリ処理材では、内部の破断した竹繊維が引き抜かれており、pull-out破壊¹⁵⁾を示した。未処理材も同様な破壊を示したが、引き抜かれた竹繊維の長さが大きく異なっていた。そのために、未処理材では竹繊維とマトリックスの破断位置が異なっていたが、アルカリ処理材の破断位置はほぼ同じであり、繊維とマトリックスの最終的な破断が同時に一致して起こることがわかった。アルカリ処理材の内部に埋め込まれた竹繊維は早期に損傷するが、未処理材のそれよりも低ひずみレベルで発生したことも確認できた。

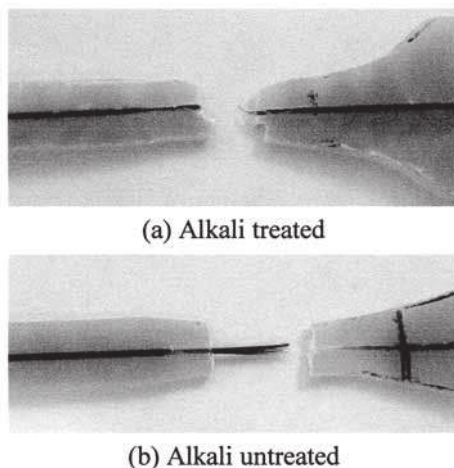


Fig.7 Variation of fracture morphologies after the fragmentation tests

3 考察

3.1 単一竹繊維複合材料の複合則

複合材料の強度特性は、強化相やマトリックス相の構成相における相互作用が律速になるケースがある。またその他の物性は、例えば各相の密度等のような材料固有の値の代数和によって決まるケースもある。

複合材料の単位面積に対する強化繊維とマトリックスの割合をそれぞれ V_f と $(1-V_f)$ とすると、引張軸方向の応力 σ_t は次のように表される¹⁵⁾。

$$\sigma_t = V_f \sigma_f + (1 - V_f) \sigma_m \quad (1)$$

ここで、 σ_f および σ_m は繊維応力およびマトリックス応力である。

また、複合材料の引張軸方向における縦弾性係数 E_t は次の式による¹⁶⁾。

$$E_t = V_f E_f + (1 - V_f) E_m \quad (2)$$

ここで、 E_f および E_m はそれぞれ繊維弾性率およびマトリックス弾性率である。

本研究で作製したフラグメンテーション試験片標点距離内における竹繊維の体積割合 V_f および生分解性樹脂マトリックスの体積割合 V_m は、 3.341mm^2 および 96.659mm^2 と算出された。式(1)の複合則から求められる複合材料の強度は、アルカリ処理材で37.2MPa、未処理材で35.0MPaであり、それぞれの実験値は計算値よりも45.1%、13.1%低い値を示した。また式(2)の複合則から求められる複合材料の縦弾性係数は、アルカリ処理材で1091MPa、未処理材で881MPaであり、それぞれの実験値は計算値よりも50.3%、22.6%低い値を示した。このような大きな有意差は、本研究の複合材料の強度や弾性率が複合則に対応しないことを意味している。複合材料の性質には強化材/マトリックスの界面状態が大きな影響を与えることが知られており⁹⁾、さらに式(1)および(2)は繊維とマトリックスの相互作用やあるいは界面状態を考慮していないため、実際の値の下限値を与えているといった主張¹⁵⁾もある。そこで次節以降では、繊維強度分布の統計学的な評価を行い、実際の界面状態および破断後の観察から得られる繊維/マトリックスの界面破断面の様相などを踏まえ、界面強度とフラグメンテーション挙動との関係について考察したい。

3.2 竹繊維の強度分布

竹繊維の引張試験によって求められる繊維の強度分布は、一般に Weibull 分布に従うとして整理されている。その場合の累積分布関数が二母数 Weibull 分布で表されるとすると、以下の式が導かれる¹⁷⁾。

$$F(\sigma) = 1 - \exp\left\{-\frac{L}{L_0}\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right\} \quad (5)$$

ここで、 $F(\sigma)$ は応力 σ における標点間距離 L の繊維の破壊確率である。 m は形状母数、 σ_0 は尺度母数である。本研究の L_0 は25mmである。さらに式(5)は自然対数を二回とって以下の式に展開できる。

$$\ln[-\ln\{-F(\sigma)\}] = m \ln \sigma - m \ln \sigma_0 + \ln \frac{L}{L_0} \quad (6)$$

式(6)の右辺の σ を独立変数と考えてグラフの横軸にとり、縦軸に左辺の値をプロットすると直線関係が得られ、その勾配から m 値が求められる。なお総母数 N は試験片本数を意味し、本研究は $N=30$ である。引張強度データを高い順に並べ、 i 番目の引張強度データを σ_i とすると、その時の繊維の破断確率 $F(\sigma_i)$ は以下のように表すことができる。

$$F(\sigma_i) = \frac{i - \frac{3}{8}}{N + \frac{1}{4}} \quad (7)$$

さらに Weibull 解析における期待値を平均破断強度 σ_{ave} として算出するには以下の式を用いた。

$$\sigma_{ave} = \sigma_0 \left(\frac{L}{L_0}\right)^{-\frac{1}{m}} \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (8)$$

Fig.8 は、竹繊維引張試験から得られた繊維強度の分布を Weibull 分布に対応させた結果である。平均強度 σ_{ave} はアルカリ処理材では728MPaであり、未処理材に比べて11%向上した。また、アルカリ処理した場合の m 値および σ_0 値は12.2および759MPaであり、一方の未処理の場合のそれらは10.5および679MPaであった。松尾らは、10 wt% NaOH 溶液でアルカリ処理した竹繊維は、未処理と比べて強度が向上した

ことを報告している¹⁸⁾。また石原らは、アルカリ処理したエゾマツの縦弾性係数の変化を系統的に調査しており、その結果、低濃度のアルカリ溶液で処理した場合は、処理しなかった場合に比べ縦弾性係数

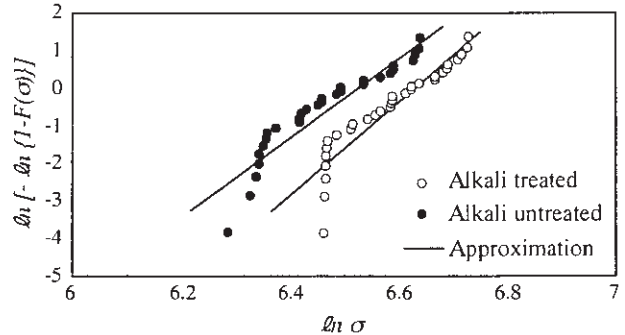


Fig.8 Weibull plots of the fiber distributions for bamboo fibers with alkali treated and untreated

が向上することを報告している¹⁹⁾。アルカリ溶液の濃度や詳細な処理方法、あるいは供試材が異なるといった違いがあるが、本研究の結果はこれらの研究結果に対して定性的な傾向が一致している。

3.3 界面せん断応力の評価と破壊機構

複合材料の界面力学特性には、マトリックスの繊維軸方向に垂直な引張応力と繊維軸方向の界面に沿うせん断応力に大別され、特に界面せん断応力は複合材料の構造に敏感な特性として重要である¹⁶⁾。フラグメンテーション試験では、Kellyら²⁰⁾によって式(9)の界面せん断応力 τ の解析が多用されている。これは式(9)に示すように、限界アスペクト $\ell_{cr}/d = \sigma_{cr}/2\tau$ から、この限界フラグメント長さ ℓ_{cr} における平均強度 σ_{cr} を用いて界面せん断強度 τ を求めることができる。限界フラグメント長さ ℓ_{cr} は、内在繊維の破断時における平均フラグメント長さ ℓ_{ave} から求めることができる。実験で得られた ℓ_{ave} は、アルカリ処理材で1.2mm、未処理材で4.8mmであった。

$$\tau = \frac{\sigma_{cr} d}{2\ell_{cr}} \quad (9)$$

$$\ell_{cr} = \frac{4}{3} \ell_{ave} \quad (10)$$

ここで d は竹繊維の直径であり、代表値として $d=0.413mm$ を用いた。また式(11)に示す限界フラグメント長さにおける平均強度 σ_{cr} は、竹繊維引張強度データを Weibull 解析した際に求められた m 値等のパラ

メータを代入して算出できる。

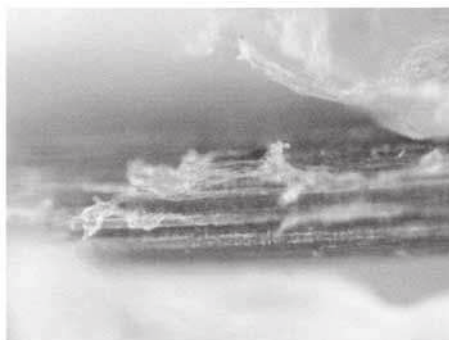
$$\sigma_{cr} = \left(\frac{L_0}{\ell_{cr}} \right)^{\frac{1}{m}} \sigma_0 \quad (11)$$

Table1 は、本研究で求められた限界フラグメント長さにおける平均繊維強度 σ_{cr} 、および界面せん断応力 τ の一覧を示したものである。この結果から、アル

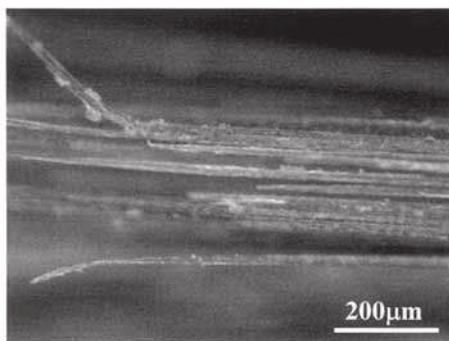
Table 1 Change in interfacial shear stress, τ with alkali treated and untreated based on Kelly's model

	Treated	Untreated
Average fiber strength at critical fragment, σ_{cr} / MPa	950	774
Interfacial shear stress, τ / MPa	123	25.0

カリ処理を行うことによって平均繊維強度および界面せん断応力が向上することがわかる。言い換えれば、アルカリ処理を行うことで、繊維破断近傍における繊維/マトリックス界面の応力伝達の高効率化が達成できたことを示している。しかしながら本研究で行った Fig.6 の結果から、アルカリ処理材の最高

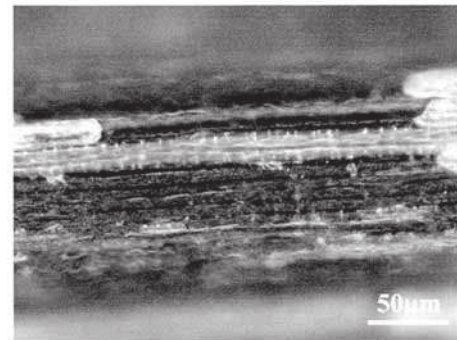


(a) Alkali treated

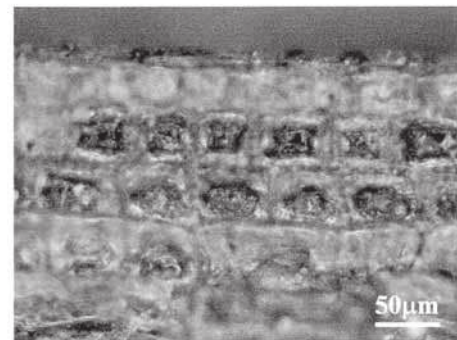


(b) Alkali untreated

Fig.9 Fracture surfaces of the bamboo fibers embedded into resin matrix after the fragmentation testing. Fiber pull-out is observed both specimens.



(a) Alkali treated



(b) Alkali untreated

Fig.10 Surface morphologies of the bamboo fibers after alkali treated and untreated. The contaminations and parenchyma cells are removed.

強度および破断ひずみは未処理材のそれらよりも低くなることがわかっている。

Fig.9 はフラグメンテーション試験後の写真であり、pull-out した竹繊維の表面性状に及ぼすアルカリ処理の影響に着目して観察したものである。その結果、アルカリ処理材では竹繊維表面にマトリックス樹脂が広域にわたって張り付き、逆に未処理材では樹脂の付着はほとんど観察されなかった。引き抜かれた竹繊維の表面にマトリックス樹脂が付着しているということは、繊維/マトリックス界面ではく離破壊を起こしていないことを意味する。従って、アルカリ処理材の繊維/マトリックス界面の結合状態が連続的で大変強固であったことが推察される。

Fig.10 は、フラグメンテーション試片を作製する前段階の竹繊維であり、アルカリ処理直後および未処理による表面状態の違いを示したものである。未処理材の表面には、矩形の柔細胞組織が全表面を覆い尽くしていた。一方、アルカリ処理材の表面は、アルカリ溶液の作用により色素が抜け落ちて白色化した柔細胞組織が点在して残っているものの、ほとんどが除去されており、モノフィラメント繊維が長手方向に配列している様子が明確に確認できる。さらにモノフィラメント繊維間に小規模のすき間が存在している様子も認められた。そもそも竹繊維表面

から容易に柔細胞組織をはく離させる手段として爆砕処理を施すため、柔細胞組織は大変低い作用ではがれ落ちるものと考えられる。それを裏付けるように、Fig.9(b)の pull-out 破壊した竹繊維の表面に柔細胞組織が全く観察されなかった。

以上のように、両者のフラグメンテーション試験における界面破壊形態の相違が観察され、アルカリ処理によってマトリックス樹脂との密着性を阻害するような表面上の夾雑物や繊維上に付着する柔細胞組織等の物質が取り除かれることが判明した。また竹繊維モノフィラメント間にすき間が形成されたため、成形加熱段階で粘性が低下し流動的になったマトリックス樹脂がすき間に進入し、冷却後はマトリックス樹脂がくさびとして働き、いわゆる機械的なアンカー効果によって繊維/マトリックス界面の接着性が向上したと考えられる。しかしながら本研究のように、マトリックス樹脂がモノフィラメントのすき間を充填し、繊維/マトリックスの連続性を成立させることで応力伝達効率を増大させた場合、繊維切断によるマイクロクラックのクラック先端の応力集中によってマトリックス樹脂に直接高応力場が形成されることで、より脆性的な破壊様式が引き起こされたと考えられる。Fig.7 で観察されたように、アルカリ処理材の破断点周辺のネッキング変形が未処理材ほど発達していないことから、アルカリ処理材はき裂伝播に対する抵抗が低かったものと示唆される。界面せん断応力が高くなったとはいえ、複合材料全体の強度・靱性が増大したわけではなく、上記のような破壊機構が作用したためFig.6のような強度低下につながったものと推察される。

5 結論

爆砕処理によって取り出した竹繊維を供試材とし、力学的性質に及ぼす低濃度アルカリ処理の影響を調査した。さらに単一竹繊維で強化した生分解性樹脂複合材料によるフラグメンテーション試験を行い、アルカリ処理による効果や界面破壊形態の違いなどを調査した。本研究で得られた知見をまとめると以下ようになった。

- 1) 竹繊維に対して低濃度アルカリ処理を施すことにより、引張変形挙動に大きな変化は示さないものの、繊維強度、縦弾性係数が向上することが確認された。
- 2) フラグメンテーション試験結果を解析し、アルカリ処理の有無によって界面せん断応力 τ が異なることを示した。
- 3) アルカリ処理を行うことで、竹繊維表面の夾雑

物や柔細胞組織等が取り除かれ、モノフィラメント間に小規模なすき間が生成された。このすき間にマトリックス樹脂が充填されることで、機械的なアンカー効果が形成され、時として連続的なき裂伝播を引き起こし、脆性的な破壊様式となることが示唆された。

謝辞

竹類に関する多くの御指導と御助言を御教授下さいました、京都市洛西竹林公園専門員 農学博士 渡邊 政俊様に深甚なる感謝の意を表します。また本研究の一部は、科学研究費補助金(若手研究(B)16760554)によったことを付記し、御援助に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 京都新聞,平成 19 年 7 月 7 日
- 2) 朝日新聞,平成 20 年 1 月 27 日
- 3) 大窪和也,高木均,合田公一:グリーンコンポジットとその研究の新展開,材料,Vol.55, No.4, pp.438-444, 2006
- 4) 藤井透 監修:竹の基礎科学と高度利用技術,シーエムシー出版,2008
- 5) J.Jiang and T.Fujii : Fabrication of Biodecomposable Composites using Bamboo Fibers and Their Strength Properties, REINFORCED PLASTICS, Vol.45, pp.365-371, 1999
- 6) 広田民郎:自動車の製造と材料の話,グランプリ出版,2007
- 7) フィラー研究会:複合材料とフィラー,シーエムシー出版,2004
- 8) 宮本武明,赤池敏宏,西成勝好:天然・生体高分子材料の新展開,シーエムシー出版,2003
- 9) 中尾富士夫:コンポジット材料の製造と応用,シーエムシー出版,2000
- 10) 高橋明宏,山元直行,石山裕介,野村國彦:爆砕処理法により取り出した竹繊維の動的引張特性,都城工業高等専門学校研究報告,Vol.41,pp.25-32,2007
- 11) 日本規格協会 JIS ハンドブック:JIS R 7601, pp.750-765, 2004
- 12) 越智真治,高木均,仁木龍祐:加熱処理した天然繊維の力学的特性,材料, Vol.51, No.10. pp.1164-1168, 2003
- 13) 箕島弘二,鶴一隆,駒井謙治郎: アラミド繊維の引張破壊特性に及ぼす真空・水環境効果と繊維損傷の AFM 微視観察日本機械学会論文集(A

- 編),Vol.63,No.614,pp.66-72,1997
- 14)T.H.Courtney:Mechanical Behavior of Materials 2nd ED.,McGRAW-HILL,2000
 - 15)西田義則:金属基複合材料入門,コロナ社,2001
 - 16)日本学術振興会先端材料技術第 156 委員会(委員長:小林俊郎):材料システム学,共立出版,1997
 - 17)荻原慎二,小池靖人,丸山克也,小林訓史,向後保雄,単一炭素繊維強化プラスチックの繊維破断挙動に及ぼす負荷速度の影響,材料,Vol.53, No.6, pp-667-672, 2004
 - 18)松尾晃,北村佳之,合田公一,大木順司,友永文昭:射出成形による竹粉グリーンコンポジットの強度評価,日本機械学会 2005 年度年次大会講演論文集, No.05-1, Vol.1, pp.541-542, 2005
 - 19)石原由紀子,中野隆人:アルカリ処理による木材の弾性率の変化,木材学会誌,Vol.50,pp.214-219,2004
 - 20)A.Kelly:Strong Solids,Oxford University Press,1966