生分解性プラスチック-竹粉複合ボードの試作とその強度評価†

高木 均* 田倉 隆輝**

The Manufacture and Mechanical Properties of Composite Boards Made from Starch-Based Biodegradable Plastic and Bamboo Powder

by

Hitoshi TAKAGI* and Ryuki TAKURA**

Recently, bamboo has been reevaluated from the environment-friendly viewpoint. Bamboo is a typical yearly-renewable bio-resource and inherently has an advantage in the high growing speed. With the increase in the use of the bamboo, it is anticipated that the quantity of bamboo powder discharged in the various cutting processes will also increase. It is, therefore, important for bamboo powder to develop an adequate recycling technology. For this purpose, we developed biodegradable composite boards with bamboo powder and a starch-based plastic. It is found that the biodegradable composite boards fabricated with bamboo powder of 0.5mm in diameter had an acceptable high bending strength and high bending modulus. It is also shown that an alkali treatment to the bamboo powder affects the mechanical properties of the biodegradable composite boards with an increased bending strength of about 20 percents.

Key words : Biodegradable composite boards, Bamboo powder, Starch-based plastic, Bending strength, Bending modulus, Alkali treatment

1 緒 言

汎用プラスチックは軽くて丈夫、その成型加工が容易などの特徴を有するため、我々の身の周りにある商品に多用されている。しかし、プラスチックの大量生産・大量消費に伴い、使用済みプラスチックの廃棄処理は大きな社会問題となっている。^{1), 2)} プラスチックは埋め立て処分しても自然分解されないため、現在の埋め立て地不足の問題をさらに進行させる原因となっている。また、焼却すると膨大な熱エネルギーを放出して焼却炉を傷めたり、あるいはその種類によっては有毒ガスが発生することなどが報告されている。また別の観点からは、自然界に廃棄されたプラスチックが海岸に打ち寄せられて景観を悪化させている問題や、エサと間違えてプラスチックを飲み込んだ動物が被害を受けるといった問題も指摘されている。

この様な廃棄問題を解決する方法の一つとして汎用プラスチックの代替として生分解性プラスチックを使用することが挙げられる。特にトウモロコシ、でんぷんなどの植物性原料から製造された生分解性プラスチックは、廃棄後、自然界の微生物によって分解されて最終的には水と二酸化炭素になることで再び植物に吸収されて自然循環する特徴をもっている。そのため、生分解性プラスチックはグリーンプラとも称され、近年、様々な商品に生分解性プラスチックが適用されるようになってきた。^{2), 3)}

しかし、生分解性プラスチックは自然循環する長所を有する反面、汎用プラスチックに比べてコストが高く、強度が低いという欠点があるためその利用分野が限定さ

れている。生分解性プラスチックを幅広い分野で利用するためには、コスト低減と強度向上の両方を兼ね備えた技術開発によるブレークスルーが必要である。

この課題に対する一つの大きな流れとして、低コストで生分解性を有する植物繊維との複合化が試みられ、グリーンコンポジットとも呼ばれる生分解性複合材料に関する研究に注目が集まっている。すなわち安価な天然繊維を生分解性プラスチックに添加し、生分解性プラスチックの使用量減少によるトータルの材料費の低減と共に天然繊維による強化を達成するわけである。このため近年、竹^{4), 5)}のみならず、麻⁶⁾、綿⁷⁾、ジュート⁸⁾、パイナップル⁹⁾などの天然植物繊維と生分解性プラスチックの複合化が盛んに試みられている。

中でも竹は成長が早く、伐採しても短い間に再生するため、環境に与える負荷が小さく、その繊維は他の天然繊維と比較しても高強度の部類に属する。これまでに長い竹繊維により強化した複合材料に関する研究^{4), 5)}が行われているが、本研究で取り扱うような竹粉を使用したグリーンコンポジットに関する研究は実施されていない。しかし今後、竹ならびに竹繊維の利用拡大に伴って、竹粉（のこ屑）の発生量も多くなると予想されるため、この竹粉に対する利用技術の開発は重要になると思われる。そこで本研究では、実際に排出された竹粉とスターチベースの生分解性プラスチックを組み合わせた生分解性プラスチック-竹粉複合ボード（以下、複合ボードと呼ぶ）の試作を行い、その強度特性と竹粉のアルカリ処理の影響について調査した。

† 原稿受理 平成 14 年 7 月 10 日 Received July 10, 2002

* 正 会 員 徳島大学工学部機械工学科 〒770-8506 徳島市南常三島町, Dept. of Mech. Eng., The Univ. of Tokushima, Minamijosanjima-cho, Tokushima, 770-8506

** 徳島大学大学院工学研究科エコシステム工学専攻 〒770-8506 徳島市南常三島町, Dept. of Ecosystem Eng., Graduate School of Eng., The Univ. of Tokushima, Minamijosanjima-cho, Tokushima, 770-8506

2 実験方法

2・1 原材料

プラスチック原料として水分散型の生分解性プラスチック（ミヨシ油脂株式会社，CP-300）を用いた。このプラスチックの特徴は、平均粒径 $6\mu\text{m}$ 、不揮発分 40% の高強度エマルジョンタイプであることである。この生分解性プラスチックの代表的な物性値を Table I に示す。

竹粉は、孟宗竹 (*Phyllostachys pubescens*) を切断加工した際に排出されるこの屑を使用した。竹粉の大きさによる影響を少なくするため予め目開き 0.5mm のふるいかけた 0.5mm から微粉までの竹粉を用いた。使用した竹粉の外観写真を Fig. 1 に示す。ふるいかけをしているためほぼ大きさが揃っているが、少量の細長い竹粉が混入していることがわかる。

2・2 竹粉のアルカリ処理

複合ボードの強度を高めるためには、竹粉表面の改質を行い、竹粉と生分解性プラスチックとの結合力を高める必要がある。中でもアルカリ処理^{8), 10), 11)}は天然繊維に対して多用されている表面処理方法であるため、本研究では、以下の手順で竹粉のアルカリ処理を行った。

まず 5mass% NaOH 水溶液を準備し、この水溶液に対して 10mass% の竹粉を入れてかく拌した。そして 10min ごとに 30s 間かく拌する作業を 10 回行った後に竹粉を取り出し、精製水で数回洗浄した。最後に恒温乾燥器を用いて 105°C で 2h 乾燥した。

2・3 試料の作製方法

試料の作製手順は以下のとおりである。所定の割合になるように計量した竹粉と生分解性プラスチックを容器に入れ混合する。これを平板状の形に整えた状態で恒温乾燥器に入れ、 105°C で 2h 乾燥させ水分を除去した。次

にこの乾燥した試料をプレス用金型（曲げ試験用： $100 \times 15\text{mm}$ 、引張試験用： $100 \times 10\text{mm}$ ）に充填し、プレス型と試料を電熱線を使用して加熱した。金型の温度が目標温度 130°C まで達したところでプレスを開始し、圧力 20MPa まで加圧した。その状態で一定時間 (15min) 保持した後、圧力を解放した。そして直ちに試料が入った金型を扇風機を用いて空冷し、室温まで冷却して、試料を取り出した。

竹粉無添加材と竹粉 66.6mass% 添加材の密度はそれぞれ $1.18\text{g}/\text{cm}^3$ 、 $1.24\text{g}/\text{cm}^3$ 、また、含水率はそれぞれ 2%、3% であった。

2・4 強度試験方法

作製した試料の強度特性を評価するためインストロン万能材料試験機 (Model5567) を使用して引張試験と 3 点曲げ試験を行った。両試験とも各試料作製条件で作製した試験片について 5 回行い、強度の平均値と 95% 信頼区間を求めた。

曲げ試験片の形状は、長さ 100mm 、幅 15mm 、厚さ 1.5mm であり、支点間距離 50mm 、試験速度 $1.0\text{mm}/\text{min}$ で試験を行った。

引張試験に用いた試験片形状は短冊形で寸法は、長さ 100mm 、幅 10mm 、厚さ 1.5mm 、標点間距離を 30mm とした。試験速度 $1.0\text{mm}/\text{min}$ で試験を行った。また、チャックによる試料損傷を防ぐために、瞬間接着剤を用いて厚さ 2mm のアルミタブを試験片のつかみ部に貼り付けた。

2・5 コンポスト中での分解試験方法

2・3 節の手順で作製した未アルカリ処理試料を家庭用バイオ式生ゴミ処理機 (BGD-150, 日立製作所) に 7 日間投入して、複合ボードの生分解挙動を調査した。予め数日間、生ゴミのみで試運転を行って菌を活性化した後、

Table I. Basic properties of biodegradable plastic.

Density (g/cm^3)	1.18
Melting point ($^\circ\text{C}$)	58
Softening point ($^\circ\text{C}$)	57
Water absorption (%)	2
Tensile strength (MPa)	11
Tensile elongation (%)	550
Young's modulus (MPa)	431

Fig. 1. Photograph of bamboo powder.

Fig. 2. Surface view of biodegradable composites made from starch-based plastic and bamboo powders; content of bamboo powder is (a) 33.3mass% and (b) 66.6mass%.

試料を投入した。その際、分解の進行により試料が崩壊して、回収が困難になるのを防ぐため、試料をナイロン製の網の中に入れて分解実験を行った。試験後、試料の外観ならびに表面の様子を実体顕微鏡、光学顕微鏡で観察した。

3 実験結果および考察

3・1 複合ボードの外観

Fig. 2 に試作した 33.3mass% と 66.6mass% の竹粉を含有する複合ボードの外観写真を示す。両ボードとも竹粉が均一に分散していることがわかる。竹粉を 33.3mass% 添加した試料は大部分が樹脂であるため、少量の竹粉の存在が確認できるが、外観は樹脂単相材に似ている (Fig. 2(a))。竹粉の添加量が増した 66.6% 材では、用いた生分解性プラスチックが光学的に半透明であるため、含まれる竹粉が浮き上がって見える (Fig. 2(b))。このためプラスチックを着色することによって複合ボードの意匠性をさらに向上させることが可能と考えられる。

3・2 曲げ強度特性に及ぼす竹粉添加量の影響

竹粉添加量を変化させて作製した複合ボードを曲げ試験した際の代表的な応力-たわみ線図を Fig. 3 に示す。図中には比較のためプラスチック単体試料の応力-たわみ曲線も併せて示している。竹粉添加量が増すにつれて、曲げ強度は増大し、最大たわみは減少することがわかる。このように、竹粉添加による強化を確認することができた。

作製した複合ボードの曲げ強度ならびに曲げ弾性率と竹粉添加量の関係を Fig. 4 に示す。曲げ強度と曲げ弾性率は共に竹粉添加量が増すにつれて直線的に増加することがわかる。竹粉添加量 66.6mass% で両者共に最大になり、最大曲げ強さ 36.7MPa、最大曲げ弾性率 4.3GPa が得られた。これらの結果は、藤元ら¹²⁾が竹材小片を用いて作製したパーティクルボードに対して報告している曲げ強度 (27.0MPa) と曲げ弾性率 (4.0GPa) より高い値である。また、渋谷¹³⁾は竹の小片を使用して作製した竹のパーティクルボードの曲げ特性について報告し、最大で 39MPa の曲げ強度を有すること、ならびに、この値はパーティクルボードの規格値 (19.6MPa) を超えることを報告している。以上の結果から、本研究で試作した複合ボードもこの規格値以上の強度特性を有することが明らかになった。

Fig. 3. Typical stress-deflection curves as a function of content of bamboo powder.

Fig. 4. The relationship between bending strength and bending modulus and content of bamboo powder.

3・3 引張強度特性に及ぼす竹粉添加量の影響

0.5mm の竹粉を用いて竹粉添加量を変化させて作製した複合ボードを引張試験した際の代表的な応力-ひずみ線図を Fig. 5 に示す。この図にも比較のためプラスチック単体試料の応力-ひずみ曲線を示している。Fig. 3 に示した曲げ試験の結果と同様の竹粉添加量依存性を有することがわかる。

作製した複合ボードの引張強さならびに引張弾性率と竹粉添加量の関係を Fig. 6 に示す。この場合も、曲げ試験結果と同様に引張強さと引張弾性率は共に竹粉添加量

Fig. 5. Typical stress-strain curves as a function of content of bamboo powder.

Fig. 6. The relationship between tensile strength and Young's modulus and content of bamboo powder.

Fig. 7. Fracture behavior of biodegradable composites after (a) bending test and (b) tensile test.

が増すにつれて増加する。そして竹粉添加量 66.6mass% で両者共に最大になり、その最大値は、引張強さ 25.8MPa、引張弾性率 2.9GPa が得られた。

3・4 破面観察結果

強度試験を行った 66.6mass% の竹粉を添加した複合ボードの破断状況を Fig. 7 に示す。曲げと引張の両方の破面には引き抜かれた繊維が認められ、破壊は繊維と樹脂の界面で生じていた。この傾向は竹粉添加量に依らず同一であり、竹粉と樹脂との界面の結合力の向上が強度改善に重要であることを示している。

3・5 アルカリ処理の影響

NaOH でアルカリ処理を施した竹粉を使用して作製した複合ボードの曲げ試験結果を Fig. 8 に示す。図中には比較のため未処理材の結果も示している。なお両者とも竹粉添加量は 66.6mass%、使用した竹粉の大きさは 0.5mm である。アルカリ処理により曲げ強度は約 20% 増加し、同時に最大たわみも増加しており、竹粉と樹脂との界面結合力が上がっていることが推察される。

アルカリ処理した竹粉と未処理の竹粉の表面を SEM 観察した結果を Fig. 9 に示す。アルカリ処理材の表面には細かい凹凸が現れ、竹粉と樹脂との接触面積の増加により結果的に結合力が上がったと推察される。また、Mohanty ら⁸⁾が報告しているようにアルカリ処理には天

Fig. 8. Effect of alkali treatment on the bending behavior of biodegradable composites.

Fig. 9. SEM photomicrographs of bamboo powder (a) with NaOH treatment and (b) without treatment, showing surface features.

然繊維の表面近傍にある疎水性のリグニンを除去する作用があるので、竹粉表面におけるリグニンの減少も樹脂／竹粉間の結合力の向上に寄与していると予想される。

3・6 複合ボードの生分解挙動

7 日間の分解試験前後における試料の外観写真を Fig. 10 に示す。試料は巨視的に分解しており、細かい破片状に崩壊していることがわかる。表面の拡大写真 (Fig. 11) を見ると、特に表面の樹脂部分が優先的に浸食されて消失し、表面に細かい凹凸ができています。この傾向は、生分解性プラスチックの埋設試験結果¹⁴⁾と定性的に一致し、試作した複合ボードが実際に生分解することが明らかとなった。

Fig. 10. Macroscopic photographs of biodegraded specimens: (a) before test and (b) after 7 days.

Fig. 11. Microscopic photographs of surface of biodegraded specimens: (a) before test and (b) after 7 days.

4 結 言

孟宗竹を切断した際に排出される竹粉とスターチベースの生分解性プラスチックを使用して生分解性プラスチック-竹粉複合ボードの作製を行った。引張試験、曲げ試験により試作材の強度特性を検討し、併せて強度特性に及ぼすアルカリ処理の影響についても検討した。

その結果、0.5mmの竹粉を使用して作製した生分解性プラスチック-竹粉複合ボードは、曲げ強度 36.7MPa、曲げ剛性 4.3GPa を有し、十分実用に耐えうる強度を有していることが明らかにした。また、更なる強度向上を目指して竹粉のアルカリ表面処理を行い、アルカリ処理した竹粉を使用した場合、未処理材と比較して約 20% 曲げ強度が向上することを実験的に示し、アルカリ処理の有効性を確認した。

本研究の一部は、文部科学省科学技術振興事業団の地域研究開発促進拠点支援事業（RSP 事業）による支援を受けた。本研究を進めるに当たり、バン(株)の今獅々映男氏より竹粉を提供して頂いた。また生分解実験では徳島大学大学院生の越智真治氏の協力を得た。記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 草川紀久, “よくわかるプラスチックリサイクル”, p.15 (1999) 工業調査会.
- 2) 土肥義治, “生分解性高分子材料”, p.11 (1990) 工業調査会.
- 3) 土肥義治, “生分解性プラスチックのおはなし”, p.41 (1991) 日本規格協会.
- 4) 蔣 建業, 藤井 透, 強化プラスチック, **45**, 365 (1999).
- 5) 藤井俊宏, 高木 均, 田倉隆輝, 田中秀行, 仁木龍祐, 成形加工シンポジウム'00, 91 (2000).
- 6) 高木 均, 藤井俊宏, 田倉隆輝, 越智真治, 田中秀行, 第 30 回記念 FRP シンポジウム講演論文集, 117 (2001).
- 7) L.Jiang and G.Hinrichsen, Die Angewandte Makromolekulare Chemie, **268**, 13 (1999).
- 8) A. K. Mohanty, M. A. Khan, S. Sahoo and G. Hinrichsen, Journal of Materials Science, **35**, 2589 (2000).
- 9) S. Luo and A. N. Netravali, Polymer Composites, **20**, 367 (1999).
- 10) A. Valadez-Gonzales, J. M. Cervantes-Uc, R. Olayo and P. J. Herrera-Franco, Composites Part B, **30**, 309 (1999).
- 11) D. Ray, B. K. Sarkar and N. R. Base, Composites Part A, **33**, 233 (2002).
- 12) 藤元嘉安, 中島靖博, 河辺純一, 又木義博, 久門重富, 木材工業, **53**, 212 (1998).
- 13) 洪沢龍也, 林業技術, **672**, 23 (1998).
- 14) 土肥義治, “生分解性プラスチックハンドブック”, p.370 (1995) エヌ・ティー・エス.