圧縮成形によるマダケの機械的性質の向上[†]

高木 均* 興津 嘉人**

Enhanced Mechanical Properties of Press-Formed Japanese Timber Bamboo

by

Hitoshi TAKAGI* and Yoshihito OKITSU**

Japanese timber bamboo (Madake) was hot-pressed in order to obtain increased mechanical properties, such as flexural strength, flexural modulus and impact strength. The hot-pressing conditions were varied in the following range: temperature, room temperature to 220°C; pressure, 5 to 100MPa. The flexural strength, compressive strength and Izod impact strength increased with increasing molding temperature up to 160°C, showing the maximum peak values, but thereafter decreased. The effect of molding pressure on the mechanical properties was also examined. Densification at both vascular bundles and parenchyma cells region was achieved at the molding pressure of 50MPa.

Key words: Bamboo, Hot press, Densification, Flexural properties, Compressive strength, Impact strength

1 緒 言

竹は、イネ科の多年生常緑草本植物であり、日本を含めたアジアの温帯域・熱帯域の気候が温暖で湿潤な土壌で繁殖する。¹⁾工業材料の視点で竹を見ると、木材と比べて高強度であり、かつ柔軟さを備えており、また他の木質材料にない特異な中空構造を有するため、物干し竿、旗棒、釣り竿、建築現場の足場材、筏など様々な素材として使用されてきた。^{2)~4)}これに加えて、竹は直立生で成長が早く、1年で高さ15~20mになる。このため再生に長い年月を必要とする木材よりも短期間で環境修復が可能であるため、持続可能な未利用バイオマスとして近年注目を浴びている。⁵⁾

しかし、現在、我々の身の回りで多用されているガラス繊維強化型複合材料(GFRP)の特性と比較すると、竹の強度特性は汎用GFRPの特性には及ばず、そのままの状態では代替できる状況にはなっていない。強度特性のみならず天然木質材料はGFRPよりも耐水性、耐熱性にも劣るためこれらの耐環境特性における改善も併せて実施する必要がある。

竹に関しては、その構造に着目した研究が行われており、竹の高強度、高弾性という特性が内部で一方向に配列した長い竹繊維に由来することを明らかにしている。^{2)~3)}また、Zhangらは竹単体ではなく竹とアルミニウム材を複合化させてより優れた強度特性を有する工業材料の開発を行っている。⁶⁾また藤井ら⁵⁾と高木ら⁷⁾は竹内部に含まれる繊維を抽出してこれと樹脂とを組み合わせたいわゆるグリーンコンポジットとよばれる複合材料を開発している。

一方、木材に目を向けると、木材の強度を向上させるために、これまでに圧密処理に関する研究が行われてき

た。^{8)~10)}そして、木材のもつ水分を利用して圧縮変形の固定化が可能であることが報告されている。¹⁰⁾この形状固定化技術を竹に適用した報告は少なく、著者らが知る限り井上らによる報告があるのみである。井上らは木材の場合と同様に竹を加熱成形し、その曲げ強度特性を評価した。そして成形材が金属と同等の曲げ強度を有することを報告している。¹¹⁾しかし、圧縮強度ならびに衝撃強度など基本的な特性については未だ不明である。

本研究では、竹の曲げ強度、圧縮強度、衝撃強度などの機械的性質の改善を目的として、代表的な緻密化処理である1軸ホットプレス加工をマダケに対して行った。そして強度特性に及ぼすホットプレス成形条件の影響について検討した。

2 実験方法

2.1 原材料

原材料として兵庫県で採取した推定2~4年生のマダケ(*Phyllostachys bambusoides*)を使用した。高木らの報告¹²⁾によると、試験片の採取部位によって竹ならびに竹繊維の強度が変化することが報告されている。このような採取部位による影響を避けるため、本実験では地上高2mまでの部分を使用した。

次に、採取したマダケから短冊状(10×200mm)の試料を鋸、鉋などの木工用工具を使用して削り出した。この際、試料に竹の節部が入らないように注意した。このようにして準備した短冊状の試料を水道水中に浸漬した状態で温度5°Cに保った冷蔵庫の中で保管した。ホットプレス成形前における試料中の水分量による影響を軽減するため、すべての試料に対して予め50°C×22時間の乾燥処理を施した。この処理により、成形前の試料水分率は5±3wt.%に保った。

[†] 原稿受理 平成19年9月10日 Received Sep. 10, 2007 ©2008 The Society of Materials Science, Japan

* 正会員 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部 〒770-8506 徳島市南常三島町, Inst. of Tech. and Sci., The Univ. of Tokushima, Minamijosanjima-cho, Tokushima, 770-8506

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

2・2 プレス成形方法

2・1節で述べた方法で準備した試料を自作の金型（パンチ寸法：10 × 200mm）に納めた後，加熱プレス（IMC-16EF，井元製作所）を使用してホットプレス成形を行った．この際，ホットプレス成形したマダケの強度特性に及ぼす成形条件の影響を調査するため，成形温度は室温～220℃の範囲，成形圧力は5～100MPaの範囲で変化させた．なお，成形時間は10分で統一して成形した．

2・3 曲げ試験方法

万能材料試験機（Model 5567，インストロン）を使用して3点曲げ試験を室温大気中で行った．試験片の寸法は幅10mm，長さ100mmである．厚さは3～5mmで成形条件によって変化する．試験速度は1.0mm/min，スパン長さ50.0mmの条件で実施した．試験の際，マダケ試料の表皮側が引張になるようにした．試験片数は2～4本で平均強度と95%信頼区間を求めて評価した．

2・4 圧縮試験方法

圧縮試験も万能材料試験機（Model 5567，インストロン）を使用して室温大気中で行った．試験片の寸法は，幅10mm，長さ25mm，厚さは3～5mm，試験速度は1.0mm/minである．

2・5 衝撃試験方法

衝撃試験はアイゾット衝撃試験機（No. 158，安田精機製作所）を使用して，ノッチ無しの条件でひょう量5.5Jのハンマを用いて室温大気中では実施した．試験の際，ハンマがマダケ試料の表皮側に当たるように試験片を置いて試験を行った．

2・6 内部組織の観察方法

マダケ内部の組織ならびに強度試験後の破壊様相を光学顕微鏡，実体顕微鏡を用いて観察した．内部組織を観察する際には，試験片をポリエステル樹脂に埋め，研磨機で研磨した後に観察を行った．

3 実験結果および考察

3・1 成形温度の影響

室温から220℃の温度範囲で，成形圧力50MPa，保持時間10分の条件で成形したマダケ試料の曲げ試験結果をFig. 1～Fig. 3に示す．Fig. 1, 2, 3は，それぞれ曲げ強度，曲げ弾性係数，曲げ破断ひずみと成形温度の関係を表している．図中の破線は未成形のマダケに対する結果を示す．Fig. 1より曲げ強度は，成形温度の上昇につれて増加し，160℃付近の温度域でピーク強度320MPaを示した後，急激に低下することがわかる．最大曲げ強度は未成形マダケの強度の2.7倍に相当し，ホットプレス成形により著しい強化が可能であることが明らかとなった．一方，Fig. 2に示した曲げ弾性係数では，成形温度の上昇につれてほぼ直線的に増加する傾向が認められる．220℃で成形したマダケの曲げ弾性係数は，25GPa以上に達し，ガラス繊維で強化したFRPの曲げ弾性係数に匹敵することがわかる．次に，Fig. 3に示した曲げ破断ひずみに注目すると，80℃以下の温度で成形した場合，曲げ破断ひずみは未成形マダケとほぼ同一の値を示す．し

Fig. 1 Flexural strength versus molding temperature. Dotted line indicates flexural strength for raw bamboo.

Fig. 2 Flexural modulus versus molding temperature. Dotted line indicates flexural modulus for raw bamboo.

Fig. 3 Flexural fracture strain versus molding temperature. Dotted line indicates flexural fracture strain for raw bamboo.

かし、これより高い温度域では、成形温度が高くなるにつれて曲げ破断ひずみは低下する。

Fig. 4 は Fig. 1 ~ Fig. 3 と同様に種々の温度で成形したマダケの圧縮強度と成形温度との関係を示す。圧縮強度は Fig. 1 に示した曲げ強度の場合と同様に、成形温度の上昇につれて増加し、160℃付近でピーク強度 150MPa を示した後、急激に低下する。この最大強度は未成形マダケの圧縮強度（図中の破線）の約 2.7 倍に相当し、曲げ強度の場合と同様に、ホットプレス成形により圧縮強度を向上させることが可能になる。

アイゾット衝撃試験結果を Fig. 5 に示す。アイゾット衝撃値も、曲げ強度と圧縮強度の場合と同様の成形温度依存性を示すことがわかる。しかし、室温で成形した場合、アイゾット衝撃値は未成形材の値（図中の破線）よりも低くなり、ぜい化していることがわかる。アイゾット衝撃試験後の試験片の破断部近傍の拡大写真を Fig. 6

Fig. 4 Compressive strength versus molding temperature. Dotted line indicates compressive strength for raw bamboo.

Fig. 5 Izod impact strength versus molding temperature. Dotted line indicates Izod impact strength for raw bamboo.

Fig. 6 Aspect of samples after Izod impact test; (a) raw bamboo sample and (b) sample hot-pressed at RT and 50MPa.

に示す。固定部での変形・破壊に注目すると、未成形材では圧縮側の座屈変形が顕著であるのに対して、室温成形材ではこの座屈変形が少なく、加えてき裂が圧縮側表面近傍まで達している。このような変形とき裂伝播挙動の違いにより、吸収エネルギーの低下がもたらされたと推察される。また室温で 50MPa を 10 分間作用させた試料を観察すると、成形による内部組織の緻密化が不均一に生じていることがわかった。すなわち、外側表面よりも繊維含有率の低い内側表面層で緻密化が生じており、この局所的な緻密化によって内側表面層の衝撃吸収能が低下したことに由来すると推察される。またアイゾット衝撃値の最大値は未成形材に対する衝撃値の約 1.3 倍に過ぎず、曲げ強度と圧縮強度の場合よりも強化作用が小さくなる。

Fig. 7 にマダケ試料の密度と成形温度の関係を示す。密度は室温で成形することによって約 1.4 倍に増加すると共に、成形温度が高くなるにつれてほぼ直線的に増加する傾向が確認される。この試料密度における増加傾向 (Fig. 6) と曲げ強度 (Fig. 1), 曲げ弾性係数 (Fig. 2), 圧縮強度 (Fig. 4), アイゾット衝撃値 (Fig. 5) での特性向上傾向は定性的に同じであり、成形温度上昇に伴う試料密度向上が主たる原因と推察される。また、このような試料密度の増加に伴う諸特性の向上は他の木質材料でも確認されている。¹⁰⁾

Fig. 7 Density versus molding temperature. Dotted line indicates density for raw bamboo.

天然繊維の強度特性におよぼす熱処理条件の影響を調査した研究¹³⁾では、本研究と同じ温度域でぜい化現象が生じることが報告されている。すなわち、竹繊維の場合、160℃以上で熱処理すると未処理材と比較して破断伸びが約40%低下し、これに対応して引張強さも低下する結果が示されている。従って、ピーク温度以下で成形した場合は熱処理温度の上昇に伴う緻密化により曲げ強度が向上し、それ以上の温度域では竹繊維のぜい化現象により強度が低下すると考えられる。アイゾット衝撃値に関して160℃付近で衝撃値が未成形材よりも大きくなる理由として、上述したように材料の緻密化に伴う高強度化によって変形抵抗が高くなることが挙げられる。これより高い温度では変形能の低下が生じ、このため160℃付近でピーク値を示すと考えられる。しかし、このように定性的なことしかわかっておらず、今後さらなる検討が必要である。

未成形材と成形材の内部組織写真の一例を Fig. 8 に示す。未成形材では導管と篩管がはっきりと見られるが、成形材では、この導管と篩管の部分がつぶれて消失している様子がうかがえる。また、維管束鞘の回りを占める柔細胞部分も減少しており、同時に柔細胞部分の緻密化も進行していることがわかる。つまり、これらの内部組織変化に対応して密度が増加することが明らかとなった。

3・2 成形圧力の影響

3・1節の結果から成形温度として160℃を選び、5MPaから100MPaの成形圧力範囲、保持時間10分の条件で成形したマダケ試料の曲げ強度、曲げ弾性係数、曲げ破断ひずみをそれぞれ Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11 に示す。これらの図で成形圧力0MPaのデータは、未成形材の結果である。曲げ強度は成形圧力が高くなるにつれて増大する。しかしその増加傾向は次第に減少し、40MPa以上では曲げ強度はほぼ飽和する傾向が認められる。曲げ弾性係数の場合も、同様の成形圧力依存性を示すが、40MPa以上でも漸増する点が曲げ強度の場合との違いである。

Fig. 8 Internal microstructures of bamboo ; (a) before molding and (b) after molding at 180°C and 50MPa. Arrows show a pressing direction.

Fig. 9 Flexural strength versus molding pressure.

一方、曲げ破断ひずみには成形圧力に依存せずに、未成形材の曲げ破断ひずみの約50%の値になることがわかる。この傾向は Fig. 3 に示した曲げ破断ひずみに対する成形温度の依存性とは異なる。後述するように、50～100MPaの圧力で成形した場合、その密度変化は0.058g/cm³と比較的小さい。一方、成形温度を変化させた場合の密度変化は、成形圧力を変化させた場合よりも大きくなる。このように曲げ破断ひずみと密度変化との関係が示唆されるが、詳細は不明であり今後の課題としたい。

Fig. 10 Flexural modulus versus molding pressure.

Fig. 12 Compressive strength versus molding pressure.

Fig. 11 Flexural fracture strain versus molding pressure.

Fig. 13 Izod impact strength versus molding pressure.

Fig. 12 と Fig. 13 はそれぞれ圧縮強度とアイゾット衝撃値の成形圧力に対する依存性を示す。40MPa 以上の成形圧力域では他の曲げ強度、曲げ弾性率と同様に、成形圧力に依存せずほぼ一定の値になる。一方、40MPa 未満の低成形圧力域に注目すると、20MPa 付近で極値をとり、他の曲げ強度、曲げ弾性率とは異なる成形圧力依存性を呈している。すなわち、圧縮強度は20MPa 付近で最大強度 140MPa、そしてアイゾット衝撃値は最小値 55kJ/m²を示す。この特異な成形圧力依存性も 3・1 節のアイゾット衝撃試験結果で述べたように、マダケ内表面近傍の局所的な緻密化によって、圧縮強度の向上とそれに伴う変形能低下にもたらされるぜい化による現象と推察される。

Fig. 14 にマダケ試料の密度と成形圧力の関係を示す。40MPa 未満の低圧力域では、密度は成形圧力が高くなるにつれて急激に大きくなり、それ以上の高圧域では漸増する傾向が認められる。この成形圧力依存性は曲げ弾性係数の成形圧力依存性に極めて類似していることがわかる。

Fig. 14 Density versus molding pressure.

4 結 言

マダケの特性改善, 特に機械的性質の向上を目指して, 種々の条件でホットプレス成形処理したマダケの強度評価を行った. 得られた結果をまとめると以下ようになる.

(1) 調査した範囲では 160°C, 50MPa でホットプレス成形した場合, 最大の曲げ強度 (320MPa) が得られる. この最大曲げ強度は未処理材の 2.7 倍に相当する.

(2) 曲げ弾性係数, 圧縮強度でも同様の著しい強化が認められる. しかし, アイゾット衝撃値での強化割合は 1.3 倍であり, 衝撃特性の大幅な改善にはならない.

(3) 成形材の内部組織観察から, ホットプレス成形すると導管・師管部ならびに木質部の緻密化が進行して高密度になることがわかった.

本研究の一部は, 平成 18 年度徳島大学学長裁量経費研究プロジェクト「レジンレス竹繊維強化グリーンコンポジットの新規開発と応用」による補助を受けて実施した. 記して感謝の意を表する.

参 考 文 献

- 1) V. Kleinhenz and D. J. Midmore, "Aspects of Bamboo Agronomy", *Advances in Agronomy*, Vol.74, pp.99-145 (2001).
- 2) J. Oda, "Morphological analysis of bamboo from the viewpoints of engineering", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. A*, Vol.46, No.409, pp.997-1006 (1980).
- 3) S. Amada, Y. Ichikawa, T. Munekata, Y. Nagase and H. Shimizu, "Fiber texture and mechanical graded structure of bamboo", *Composites Part B*, Vol.28, No.1-2, pp.13-20 (1997).
- 4) S. Amada and R. S. Lakes, "Viscoelastic properties of bamboo", *Journal of Materials Science*, Vol.32, pp.2693-2697 (1997).
- 5) T. Shito, K. Okubo and T. Fujii, "Development and mechanical properties eco-composites using bamboo fiber", *Bamboo Journal*, No.19, pp.15-23 (2002).
- 6) J. Y. Zhang, Q. Y. Z. Zeng, T. X. Yu and J. K. Kim, "Residual properties of reformed bamboo/aluminium laminates after hygrothermal aging", *Composites Science and Technology*, Vol.61, No.8, pp.1041-1048 (2001).
- 7) H. Takagi and Y. Ichihara, "Effect of fiber length on mechanical properties of 'green' composites using a starch-based resin and short bamboo fibers", *JSME International Journal Series A*, Vol.47, pp.551-555 (2004).
- 8) M. Inoue, M. Norimoto, Y. Ohtsuka and Y. Yamada, "Surface compression of coniferous wood lumber: A new technique to compress the surface layer", *Mokuzai Gakkaishi*, Vol.36, No.1, pp.969-975 (1990).
- 9) Y. Ito, M. Tanahashi, M. Shigematsu, Y. Shinoda and C. Ohta, "Compressive-molding of wood by high-pressure steam-treatment: part 1. development of compressively molded squares from thinnings", *Holzforschung* Vol.52, No.2, pp.211-216 (1998).
- 10) E. Uda, "Studies on the production of compressed wood of Japanese cedar by a closed heating system and the control of set recovery of compressive deformation", *Doctoral Thesis at Shimane University*, pp.1-14 (2005).
- 11) M. Inoue and M. Norimoto, "Possibilities of bamboo based high strength materials", *Proceedings of the 5th International Wood Science Symposium*, p.402 (2004).
- 12) H. Takagi and R. Takura, Y. Ichihara, S. Ochi, H. Misawa and R. Niki, "The mechanical properties of bamboo fibers prepared by steam-explosion method", *Journal of The Society of Materials Science, Japan*, Vol.52, No.4, pp.353-356 (2003).
- 13) S. Ochi, H. Takagi and R. Niki, "Mechanical properties of heat-treated natural fibers", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.51, No.10, pp.1164-1168 (2002).