竹材のクリープ挙動の部位依存性[†]

青柳晶子* 中野隆人**

Effect of Longitudinal and Radial Position on Creep for Bamboo

by

Shoko AOYAGI* and Takato NAKANO**

Change of relaxation properties of bamboo in the longitudinal and radial direction were examined on the basis of results of creep measurement and the micro-structure observation in cross section using the stereoscopic microscope. Creep compliance $J(t)$ was greater in the bottom and inner side than in the top and outer side. $J(t)$ versus $\ln(t)$ was represented by the Nutting equation. The number of vascular bundle per mm^2 , that is its dispersion, increases with locating to the top and outer side of bamboo. Various values of relaxation properties, $J(t)$, $J(t)-J(0)$, and $dJ(t)/d\ln t$, was characterized by just density of bamboo which was linear to the number of vascular bundle per mm^2 . Our results show that bamboo changes relaxation properties in the longitudinal and radial direction by controlling the dispersion of vascular bundles.

Key words: Relaxation properties, Micro structure, Moisture content, Bamboo

1 はじめに

竹は古くから食料あるいは生活用品として用いられてきた生物資源・材料である。定性的な特性は、したがって、よく知られている。しかしながら、その微細構造との関連でその特性を検討された研究は少ない。国内の竹の物理的性質の総合的研究は、古くは鈴木 寧^{1)~3)}や大田 基^{4)~8)}によるものがあるが、そこでは竹の力学特性とりわけ緩和挙動に関しては極めて限られた条件で検討されたに過ぎない。近年、竹の利用に関する研究が盛んになり、力学特性も検討されるようになってきた。竹そのものの引張特性やその繊維の特性が検討され、また、力学モデルを用いた解析が試みられている。^{9)~15)}粘弾性特性に関しても、応力緩和挙動が測定され複合理論の適用に基づく解析が試みられている。¹²⁾

上記のように、近年竹の力学特性に関する研究は盛んになってきたが、竹の部位の違いによる力学特性に関する研究はほとんど行われていない。竹の長さ方向の材質に関しては、成長過程の竹材に於いて部位によって化学的組成が異なることが報告されており、^{16), 17)}そのことが力学特性に影響を与えていることが予想される。本研究では、竹の半径方向および長さ方向における緩和特性をクリープ挙動に基づき検討することを試み、微細構造との関係を絶乾条件において考察する。

2 実験方法

2・1 試料

供試試料は、2004年10月に採取した島根県産のモウソウチクである。竹齢は、枝数から6年と推定した。伐

採した根部を除き、地上に現れている節を第一節とし、先端に向かって節間に番号をつけた。全節間数は27個であった。

それぞれの節間の中央部から長さ方向に約100mmを裁断した。採取した部位から外皮と内皮を取り除いた後、鉋で目切れを生じないように注意して所定の部位を採取しサンドペーパーで細部を整えて90 (L) × 1.5 (R) × 8.5 (T) (mm) の試片を作製した。横断面の中央部より外皮側と内皮側に分け、それぞれの中央部付近から試片を採取し、それらを外部試片と内部試片とした。

予備的に実施した測定では内部応力の影響が認められたので、試片を煮沸処理し内部応力を解放した。すなわち、減圧注入処理により水を注入した試片を30min煮沸処理した後室温まで放冷した。この処理を2度繰り返した。煮沸処理後、軽く圧搾して水分を除去した後、緩やかに風乾した。次いで、60℃で一昼夜減圧乾燥した。上記処理を施した試片を、水分吸着を防ぐためにポリ袋に入れクリープ測定に供した。

2・2 アルカリ抽出処理

ヘミセルロース含量を確認するためにアルカリ抽出処理を施した。節間中央部から採取した部位試片からミルを使って粉碎試料を作製した。試料はほぼ繊維状であった。これをNaOH1%水溶液に浸漬した。24hr浸漬した後、新しいNaOH1%水溶液に交換し、さらに24hr浸漬処理した。処理後、蒸留水で1週間水洗した。上記の処理前後の絶乾重量から節間ごとの重量減少率を算出し、長さ方向の抽出率を算出した。

[†] 原稿受理 平成20年5月21日 Received May 21, 2008 ©2009 The Society of Materials Science, Japan

* 朝日ウッドテック(株) 〒541-0054 大阪市中央区南本町, ASAHI WOODTEC CORPORATION, Cyyuou-ku, Osaka, 541-0054

** 正会員 京都大学大学院農学研究科 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町, Laboratory of Biomaterials Design, Division of Forest and Biomaterials Sci., Graduate School of Agriculture, Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502

2・3 横断面の画像解析

横断面写真を所定倍率で顕微鏡を用いて撮影し、得られた画像データを二値化した。得られたデジタルデータを市販解析ソフト (Quick Grain Standard, イノテック(株)) で維管束分布などの画像データを解析した。

2・4 クリープ測定

片持ち梁曲げ変形の荷重様式でクリープ測定を実施した。荷重方向は外皮側からとし、LT面に荷重を与えた。測定温度は23℃のチャンバー内で行った。試片には、線型内の十分小さな荷重を与えた。すなわち、外皮側試片には122g、内皮側試片には61gを負荷した。荷重を付与した直後から、片持ち梁曲げ装置に設置した変位計を用いて変位を経時的に測定した。測定はいずれの試片も絶乾状態で実施した。

3 結果と考察

3・1 クリープ挙動

測定した全ての節間において、瞬間コンプライアンス $J(0)$ には明瞭な部位依存性が認められたが、クリープはそれぞれの長さ方向の部位において顕著ではなかった。得られた結果を Fig. 1 にクリープ曲線を両対数表示 $\ln[J(t)]$ vs. $\ln[t]$ の関係として示した。図において、当然であるが瞬間コンプライアンスは図示されていない。クリープコンプライアンスは、節間番号が小さいほど、すなわち根元に近いほど大きい傾向であり、 $\ln[J(t)]$ vs. $\ln[t]$ の関係は、測定時間内においては直線関係であった。すなわち、両者の関係は Nutting の式で記述された。この傾向は、断面の外側と内側ともに、認められた。

Fig. 1 の瞬間コンプライアンス $J(0)$ および $t = 3 \times 10^4$ (sec) の正味のクリープコンプライアンス $J(3 \times 10^4) - J(0)$

Fig. 1 Creep curves of outer and inner samples in cross section for the longitudinal position of bamboo. The number in the figure presents the position from a root to a top of bamboo.

について、竹稈の部位に対する依存性を Fig. 2 に示す。図の横軸は地面部の節間を 1 として先端部に向かって番号付けした節間番号である。いずれも、部位依存性が認められた。その程度は断面外側に比べて内側に顕著に表れた。断面内側において、節間番号 10 まで $J(0)$ と $J(3 \times 10^4)$ は急激に減少し、節間番号 10 ~ 20 で比較的平坦となり、節間番号 20 以上において再び減少する傾向が認められた。このことは、竹の長さ方向の力学特性が部位によって異なることを示すと同時に、横断面の厚さ方向にもまた違いがあることを示している。断面外側においては、内部ほど顕著ではないが、同様の傾向が認められた。

Fig. 2 において認められた $J(3 \times 10^4) - J(0)$ の部位依存性の差異は、緩和挙動に関して部位依存性があることを示唆する。そこで、緩和の程度を評価するために Fig. 1 から得られる傾きを比較検討した。 $\ln[J(t)]$ vs. $\ln[t]$ の直線関係は、Nutting の関係式 $J(t) \propto t^n$ (n : 定数, 定荷重) の成立を示すものであり、緩和の程度は式における指数 (Fig. 1 における傾き) によって評価することができる。

そこで、 $\ln[J(t)]$ vs. $\ln[t]$ の関係を直線回帰しその傾きを求めた。結果を Fig. 3 に示す。傾きには部位依存性があり、内部試片では根元から先端にむかって直線的に減少した。他方、外部試片は特徴的部位依存性を示した。傾向を概観すると、根元付近では緩和しやすく先端部では緩和しにくい傾向があり、中央部の節間番号 10 ~ 20 においてはほぼ一定であった。

3・2 維管束分布

竹の力学挙動は、維管束の分布に影響されることが報告されている。^{11)~14)} それによれば、維管束の相と柔細胞の相からなる複合材料としての取り扱いが可能である。そこで、Fig. 1 ~ 3 に見られたクリープ挙動に対する長さ

Fig. 2 Creep compliance at $t = 0$ and 3×10^4 sec of outer and inner samples in the cross section for the longitudinal position of bamboo.

Fig. 3 Relationships between the internode number ordered from a root of bamboo and the slope of Nutting equation $d \ln[J(t)]/d \ln[t]$.

方向の部位依存性を考察するために、本研究に用いた試料について維管束分布を調べた。

節間番号7の断面について CCD カメラで撮影後二値化した維管束分布の一例を Fig. 4 に示す。写真上部が外側である。節間断面における維管束分布は均一ではなく外側ほど密の分布であり、これまで報告された竹材に認められたものと同様の維管束分布が観測された。この断面における維管束分布が、長さ方向にどのように変化するかを検討した。長さ方向の全ての27節の節間についての二値化した横断面写真について、維管束の占有する数を全面積で除した単位面積あたりの維管束数を算出した。これを、実質断面中央を境に内側と外側について行った。

本実験における竹材の維管束の単位面積あたりの数（維管束密度）と長さ方向の節間番号との関係を Fig. 5 に示す。維管束密度は竹材の先端に位置するほど増大した。その増大の程度は外側の方が大であるように見えた。試片密度と維管束分布密度との関係を Fig. 6 に示す。両者の関係はほぼ直線関係であった。図の縦軸切片から得られる柔細胞の密度は0.33であり、中馬ら¹¹⁾の得たモウソウチクの結果0.45よりは少し小さかった。維管束密度と試片密度との直線関係は、竹材の力学特性に維管束分布が密接に関与することを示しており、このことは、中馬らによる複合則による解析からも明らかである。

Fig. 4 Dispersion of vascular bundle in cross section of bamboo for the internode number 7.

Fig. 5 Relationships between the internode number ordered from a root of bamboo, and the number of vascular bundle per mm^2 and density.

Fig. 6 Relationship between the number vascular bundle per mm^2 and the density of outer and inner sides of an internode.

糖類・多糖類の影響を知るために、その含量を NaOH 抽出処理で調べた。結果を Fig. 7 に示す。先端部ほど直線的に糖類・多糖類の含量が低下した。以上の結果は、竹の先端部に行くほど、維管束密度は高くなり、すなわち材密度が増大し、さらに、糖類の含量が減少することを示している。

維管束は厚壁細胞である維管束鞘を有し剛直な力学特性を有する。維管束鞘はマイクロフィブリル傾角が繊維方向に配向した層とそれにほぼ直交配向した層が交互に積相した多層構造をしていると言われている。^{18), 19)}したがって、この層の比率が高いほど緩和しにくくなる。他方、

Fig. 7 Relationship between the internode number ordered from a root of bamboo and weight loss fraction by extraction with NaOH aqueous solution.

柔細胞は栄養分の補給場所であり、そこに多く含まれる多糖類は非晶高分子であり柔軟性を有した特性を有している。こうした力学特性を考慮するならば、Fig. 4～6の微細構造に関する結果は、先端ほど緩和特性が低いすなわち剛直な傾向を示したFig. 1～3の結果を支持する。

3.3 クリープ挙動に及ぼす維管束分布の影響

以上の議論は竹の緩和挙動が維管束とりわけ維管束鞘の割合に依存することを強く示唆する。したがって、その割合を反映した物理量である密度に関して緩和挙動を見るならば、部位に関係なく統一的に取り扱うことが可能であることが期待できる。そこで、得られた緩和挙動の密度依存性を検討した。Fig. 8は、Fig. 2において示した結果を密度について表したものである。図は、 $t = 0$ (sec) と $t = 3 \times 10^4$ (sec)でのクリープコンプライアンスに関するものである。クリープコンプライアンスが密度によって統一的に記述されることを示している。同様に、Fig. 9は緩和速度に関するFig. 3の結果を密度について表したものである。

Fig. 8と9は、長さ方向および断面の内・外部の緩和特性の違いが竹材の密度で統一的に記述できることを示している。すなわち、竹材の緩和特性は維管束密度に強く支配されている。このことは、竹材の緩和特性を支配する維管束と柔細胞の力学特性が長さ方向において大きく異なることを示しており、両者の組成比率の違いが長さ方向の緩和特性を変化させていると結論できる。

以上の結果は、竹の立っている条件を考えると理解できる。竹は重力に抗して地上に対し垂直に立っている。

Fig. 8 Density dependence of creep compliance at $t = 0$ and 3×10^3 sec for outer and inner samples in the cross section of bamboo.

Fig. 9 Relationship between density of outer and inner sides of internode and the slope of Nutting equation $d \ln[J(t)]/d \ln[t]$.

その高さは20m以上にもなる。枝葉は先端部に集中する。こうした条件で生育し続けるには、固有の力学特性を有する必要がある。重量構成は先端部にいくほど軽量でなくてはならない。しかし先端部は枝葉を保持する必要がある。このことは、先端部が剛直で弾性に富んだ特性を要求するであろう。他方根元は、風圧によるトルクを最も受ける部位である。受け止めた風圧のエネルギーを受け止め解放することが求められる。その結果、弾性ととも粘性的特性を有し力学的エネルギーを熱エネルギーとして変換するような材料特性をより多く根部にそなえたものと推察される。中央部は、これら両端に比べて中庸で均質な材質である方が都合よい。竹は、こうした要請される特性を維管束の分布を調整することで実現していると推察される。竹は木材に比べて比較的単純な組織構造を有してはいるが、生育に適した巧みな材料特性の構成をしていることは明らかである。

4 結 論

竹は先端ほどそして外側ほど緩和特性が低く、剛直な傾向を示した。クリープコンプライアンスと時間との関係は、Nuttingの式で記述された。すなわち、それらは両対数プロットにおいて直線関係にあった。竹の組織は先端部に行くほど維管束密度は高くなり、すなわち材密度が増大し、さらに、糖類の含量が減少した。維管束分布密度は竹の密度と高い相関で直線関係にあった。その結果、緩和特性は竹の密度で統一的に記述できた。すなわち、クリープコンプライアンスは密度の増大にともなって幾何級数的に減少した。本研究の結果から、竹は自らの長さ方向および半径方向の力学的特性を維管束分布の調整によってコントロールしていることが明らかになった。

参 考 文 献

- 1) Y. Suzuki, "Study on bamboo (I)", Bulletin of Tokyo University Forests, Vol.36, No.20, pp.136-156 (1948).
- 2) Y. Suzuki, "Study on bamboo (IV)", Bulletin of Tokyo University Forests, Vol.36, No.20, pp.206-221 (1948).
- 3) Y. Suzuki, "Study on bamboo (VI)", Bulletin of Tokyo University Forests, Vol.38, No.50, pp.181-186 (1950).

- 4) M. Ota, "Studies on the properties of bamboo stem (VII)", Bulletin of the Kyushu University, Vol.19, pp.25-43 (1951).
- 5) M. Ota, "Studies on the properties of bamboo stem (IX)", Bulletin of the Kyushu University, Vol.22, pp.87-108 (1953).
- 6) M. Ota, "Studies on the properties of bamboo stem (X)", Bulletin of the Kyushu University, Vol.23, pp.155-164 (1954).
- 7) M. Ota, "Studies on the properties of bamboo stem (XII)", Bulletin of the Kyushu University, Vol.24, pp.73-84 (1955).
- 8) M. Ota, "Studies on the properties of bamboo stem (XIII)", Bulletin of the Kyushu University, Vol.25, pp.121-131 (1955).
- 9) J. Oda, "Biomaterials and machine for strength", Kikai no Kenkyu (Machine Research in Japanese), Vol.33, pp.705-712 (1981).
- 10) J. Oda, "Optimization methods and its application", Kikai no Kenkyu (Machine Research in Japanese), Vol.41, pp.1063-1070 (1989).
- 11) S. Chuma, M. Hirohashi and Y. Kasahara, "Composite structure and tensile properties of mousou bamboo", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.39, pp.847-851 (1990).
- 12) A. Chuma and M. Hirohashi, "Mechanical and Viscoelastic properties for composite structure of bamboo", Bulletin of the Faculty of Technology Chiba University, Vol.42, No.2, pp.1-11 (1991).
- 13) S. Chuma, M. Hirohashi, T. Ohgama and Y. Kasahara, "Composite structure and mechanical property of mousou bamboo", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.40, pp.21-26 (1991).
- 14) I. Ario, C. Morita, H. Suyama, E. Sato and K. Fujii, "Mechanical consideration of the laminated composite structure modeled on the anisotropic organization of bamboo", Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers (A), Vol.69, No.677, pp.148-153 (2003).
- 15) H. Takagi, R. Takura, Y. Ichihara, S. Ochi, H. Hisawa and R. Niki, "The mechanical properties of bamboo fibers prepared by steam-explosion method", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.52, pp.353-356 (2003).
- 16) Y. Gujii, J. Azuma, R. H. Harchessault, F. G. Morin, S. Aibara and K. Okamura, "Chemical composition change of bamboo accompanying its growth", Holzforschung, Vol.47, pp.109-115 (1993).
- 17) T. Otoh, "Lignification of bamboo during its growth", Holzforschung, Vol.44, pp.191-200 (1990).
- 18) N. Parameswaran and W. Liese, "On the fine structure of bamboo fiber", Wood Science and Technology, Vol.10, pp.231-246 (1976).
- 19) N. Parameswaran and W. Liese, "Ultrastructural aspects of bamboo cells", Cellulose Chemistry and Technology, Vol.14, pp.587-609 (1980).