

# 竹の特異な構造形態に学ぶ円筒体の最適な曲げ抵抗メカニズムについて

北海道大学大学院工学院 学生会員 ○佐藤 諭佳  
 北海道大学大学院工学院 学生会員 丸山 俊樹  
 北海道大学大学院工学研究院 正会員 佐藤 太裕  
 山梨大学大学院総合研究部 非会員 島 弘幸

## 1. はじめに

竹は高い強度と柔軟性を併せ持つ特異な植物であり、古くからそのしなやかさと強さを活かして構造材や日用品など多くの用途で使われてきた。竹は自重を必要以上に増すことなく外力に対して効率よく抵抗するために中空円筒として成長していくが、中空円筒は一般に曲げに対して断面がつぶれやすいという欠点も有する。

本研究は、竹の適者生存の進化の過程で獲得した特徴的な節と組織構造に着目し、これらが竹の曲げ抵抗性にどのような影響を与えるかを構造力学的観点から検証し、最適な力学形状を知ることが目的とする。

具体的には実際の竹の寸法のデータを収集するとともに、節を有する竹の曲げ変形に対し断面偏平抑制効果を表す指数の値  $\Omega$  を計算し、その曲げ特性について検証する。また、竹の断面の組織構造は、表皮側で維管束鞘の密度が高く、内側で低く分布していることが知られている<sup>2)</sup>。この特徴も竹の曲げ抵抗性の要素であると考え、竹の断面の弾性係数の変化が楕円化率に与える影響と曲率との関係を調べた。

## 2. 曲げと節の関係

### 2.1 節間隔の変化

今回の研究を行うにあたり、まず平成26年9月に長野県中野市の竹林にて竹のデータ収集を行った。

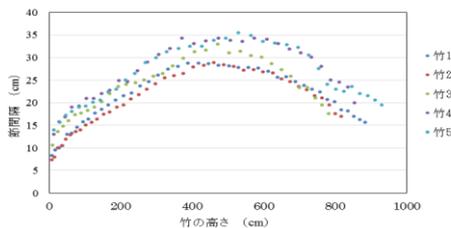


図-1 高さ  $x$  と節間隔  $s$  の関係

図-1 は竹の節間隔について、根本から先端にかけての

変化を示した実測値である。このグラフから、根本では近で再び間隔が短くなるという特徴が得られた。これは、根元付近では自重に対する抵抗性を高め、中間付近では自重を増さずにある程度の柔軟性を保持し、先端付近では節から生える葉をできるだけ増やし且つそれらを支えるためであると推察される。

### 2.2. 曲げモーメントと竹の関係

構造力学的には、竹は根本を固定された片持ち梁とみなすことができ、竹にかかる曲げモーメントは根本で大きく、先端にかけて小さくなるといえる。直感的には 2.1 で示した節間隔が小さいほど、曲げに対する抵抗性が強いと考えられるが、節間隔の実測値はその傾向を完全に示しているものではなかった。そこで Calladine により導出されている両端固定円筒殻の断面偏平抑制効果を表す以下の無次元定数  $\Omega$  の値を計算する<sup>3)</sup>。

$$\Omega = \sqrt{tL^2/r^3} \tag{1}$$

ここで、 $t$  は壁の厚さ、 $L$  は節間隔、 $r$  は外周半径をそれぞれ表す。

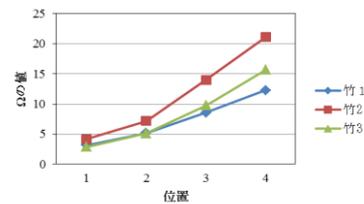


図-2 ひずみ係数( $\Omega$ )の変化

図-2 は、根本から先端にかけて、 $\Omega$  の値の変化を示したものである。位置 1 は根本側、位置 4 は先端側である。このグラフから  $\Omega$  の値は根元から先端にかけて単調に増大していくことがわかる。したがって、竹は外力により生じる曲げモーメントに対して、自重をいたずらに増さないように、壁厚、半径も最適に制御していると考えられる。

キーワード Bamboo, Fiber, Tube Bending, Buckling Mode, Energy Method

連絡先 〒060-0808 札幌市北区北 8 条西 5 丁目 北海道大学大学院工学院 TEL011-706-61

3. 維管束と楕円化の関係

3.1 竹断面における弾性係数の変化

図-3は竹断面の維管束鞘の分布を表している。図の上が表皮側、下が竹管の中心側である。この図からわかるように、竹断面の維管束鞘は表皮側では密であるが、竹管の中心にかけて疎になっていく。

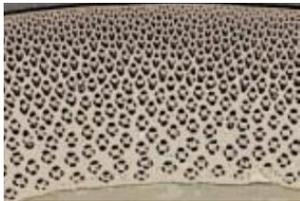


図-3 竹の断面図

この密度の変化を考慮するため、厚さ  $h$  の竹の壁の中立面を基準とし半径方向外向きを正とする座標を  $t$  とすると弾性係数  $E_f$  は  $t$  の関数となり、次式で表される<sup>2)</sup>。

$$E_f(t) = E_0 + \frac{E}{h}t \quad \left(-\frac{h}{2} \leq t \leq \frac{h}{2}\right) \quad (2)$$

3.2. ひずみエネルギーと楕円化率の関係

式(2)を用いて純曲げを受ける竹の曲率と断面の楕円化率を計算する。まず全ひずみエネルギーは式(3)で表せる。

$$U = U_\theta + U_z \quad (3)$$

ここで  $U_\theta$  は円周方向の、 $U_z$  は軸方向のひずみエネルギーを表し、それぞれ次式となる。

$$U_\theta = \frac{a}{2} \iiint E_f(t) (\epsilon_\theta^2 + 2a\kappa\epsilon_\theta + a^2\kappa^2) dz dt d\theta \quad (4)$$

$$U_z = \frac{a}{2} \iiint E_f(t) \left\{ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 - \left( \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) a \right\} dz dt d\theta \quad (5)$$

$a$  は半径、 $u, v, w$  はそれぞれ軸方向、円周方向、半径方向の変位を表す<sup>4)</sup>。

$$\epsilon_\theta = \frac{v'+w}{a} + \frac{1}{2} \left( \frac{v-w'}{a} \right)^2 \quad (6)$$

$$\kappa = \frac{\beta'}{a} = \frac{v-w'}{a^2} \quad (7)$$

ここで、楕円化率  $\zeta$  を用いて各変位を、

$$w = a\zeta \cos 2\theta \quad (8)$$

$$v = -\frac{1}{2} a\zeta \sin 2\theta \quad (9)$$

$$u = C \left( z - \frac{L}{2} \right) [a \sin \theta + w \sin \theta + v \cos \theta] \quad (10)$$

と仮定する。ここで  $C$  は曲率を表す。これらの式をエネルギーの式(3)に代入し、楕円化率で微分して、

$$\frac{\partial U}{\partial \zeta} = 0 \quad (11)$$

という停留条件より  $\zeta$  を求める。

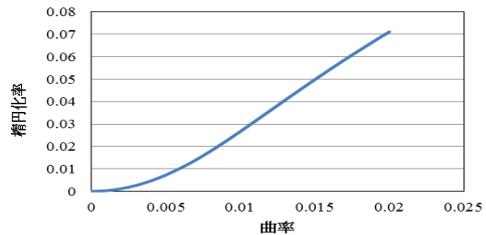


図-4 楕円化率と曲率の関係

図-4は現地調査の結果から、代表値として半径  $a=2.6\text{cm}$ 、厚さ  $t=0.394\text{cm}$ 、を代入して得られた曲率  $C$  と楕円化率  $\zeta$  の関係を示したものであり、弾性係数が一定の場合と(2)式で表される場合のどちらも同じ曲線で表される結果となった。この結果は、弾性係数の変化は剛性の傾斜機能性を有した構造であることに対応し、外側の剛性を内側の剛性に対して相対的に高めることで曲げ抵抗性を増すであろうという予想に反する結果となった。

4. まとめ

竹の節間隔は、根本、先端付近では短く、中間付近では長いことが実測により明らかとなった。しかし、曲げ抵抗性を示す無次元パラメータについては、根元から先端にかけて単調に増大していた。このことから、竹は節間隔、壁の厚さ、半径を巧みに変化させることで、自身の細くて軽い中空円筒の構造を変形から守っていることが、曲げ特性の観点から明らかになった。また、竹は内部で維管束鞘の分布密度を変えて弾性係数を変化させることにより、曲げ抵抗性の高い構造形態をもっていると予想されるが、現在検討中である。

参考文献

- 1) Calladine, C.: Theory of Shell Structures, Cambridge Univ. Press, 1983.
- 2) 有尾一郎, 森田千尋, 陶山裕之, 佐藤英一, 藤井堅: 竹の異方性組織構造に観る複合積層モデルに関する力学的考察, 日本機械学会論文集 (A 編) 69 巻 677 号 No.02-0183, 2003-1.
- 3) ビルタ・クレスリング, 川崎敏和: 訳: 折った筒と亀甲竹, 折り紙の数理と科学, 森北出版, p192-201, 2005.
- 4) Bruth, D.O. and Almroth, B.O.: Buckling of Bars, Plates and Shells, McGraw-Hill, 1975.