

丸竹の形状・伐採時期と物理的・力学的特性の関係の解明に関する基礎的研究

Fundamental study on clarification of relationship between shape, harvesting conditions of full-culm bamboo and physical, mechanical properties

滋賀県立大学環境科学研究所 講師 永井拓生

(研究計画ないし研究手法の概略)

1. 研究計画の概略

竹は非常に強い再生力を持ち、無限の植物資源とまで言われるほどに短期的な成長力を有する。一方、中山間地域における放置竹林の拡大は深刻な問題であり、竹の持続的な活用は竹林や里山の環境保護という観点からも重要な課題であると言える。また、竹は軽く丈夫で、さらに手作業による加工が容易なため、仮設的な建築、とりわけ災害被災地における応急建築などの構造材として有効と考えられる。

しかし、国内での竹の利用、とりわけ建築への利用は積極的に行われおらず、東南アジアや中米には多くの事例が見られるものの、日本産の竹の物性の調査は、実用にあたっては全く不十分な状況である。例えば、竹材の生物的劣化を防止するためには、経験に基づく適正時期に伐採することが重要とされており、竹細工の職人や専門家の間では、8月の新月～冬季に刈るのがよいと言う慣習もある。しかし、科学的な裏付けは十分ではない。また、物性（形や物理的・機械的性質）のばらつきが非常に大きく、工学的な取り扱いが困難なことも敬遠される要因でもあると考えられる。

そこで、本研究では、竹の種別（モウソウチク：*Phyllostachys edulis*、マダケ：*Phyllostachys bambusoides*）、伐採時期、含水率、形状をパラメータとして、それらと竹の力学的特性との関係を解明し、工学的な評価やモデル化を行うことを目的とする。

(実験調査によって得られた新しい知見)

2. 丸竹の形態と力学的特性の関係

2.1. 研究の概要

本節の内容は発表論文 1, 2)にて発表予定（投稿済）であり、ここでは概要のみを示す。竹の構造利用の促進にあたっては、竹の力学的性質の把握、耐久性の定量的評価、工法の開発等、多くの課題がある。力学的性質は竹稈の部位や形状によって統計値が大きく変化するほか、繊維方向・直交方向で大きく物性値が異なる異方性を持つため、体系的な整理には今後も多くの実験調査が必要であり、未だ途上である。本研究では、竹（モウソウチク、マダケ）の力学的性質の解明に資することを目的とし、竹稈形態と力学的性質について調査した。

2.2. 得られた知見

両竹種の竹稈の外形態には特に顕著な違いが見出された。両者とも中間高さから頂部にかけて稈直径は直線的に減少するが、モウソウチクでは根際付近で稈直径が急激に増大するのに対し、マダケでは根際から5m前後までは稈直径の変化が小さい。一方、稈壁厚はモウソウチクのほうが平均的に大きい。稈軸に沿った変化は両者とも類似した形態となっている。

力学的特性値として調査した繊維平行方向圧縮強度，せん断強度，繊維直交方向曲げ強度の中では，繊維平行方向圧縮強度と竹稈形態との相関が最も大きい。また，曲げヤング係数は断面サイズによって大きく変化することが示唆された。これらの結果から，維管束の物性に強く依存すると考えられる繊維平行方向の強度・剛性は竹稈形態や比重に大きく影響を受け，繊維直交方向の応力に対する強度（せん断強度，繊維直交方向曲げ強度・・・etc.）は，比較的竹稈上の位置や断面寸法の影響を受けないことが，定性的に予測される。

3. 丸竹の曲げ破壊メカニズムと曲げ強度推定

3.1. 研究の概要

本節の内容は発表論文 3, 4, 6)にて発表しており，ここでは概要のみを示す。国産の丸竹稈の曲げ強度については複数の実験報告があるものの，竹稈の曲げ破壊メカニズムの解明やそれに基づいた曲げ強度の導出は行われておらず，今のところ，丸竹稈の曲げ強度を知るには，十分なせん断スパン比を確保した試験体について曲げ実験を行うほかない。本稿では，丸竹稈の曲げ破壊メカニズムの解明を目的とし，曲げを受ける丸竹稈に生じる繊維直交方向の曲げ応力について，理論定式化（Brazier 効果理論），数値解析および実験を通じ定量的検証を行った。

3.2. 得られた知見

Brazier 効果の理論定式化

- ・ 先行研究の方法に倣い，Brazier 効果理論（BET）の定式化，および節による断面扁平化の拘束効果について，節を剛体と仮定した場合の定式化を示した。
- ・ 国産マダケの平均的な物性値および断面寸法を用いた BET の計算例では，曲げモーメントによって生じる丸竹稈の繊維平行方向曲げ応力が 100 N/mm^2 前後の場合，繊維直交方向の曲げ応力の大きさは，平行方向の 6%程度である。
- ・ 断面扁平化の拘束効果は節間長比が一定値より小さい場合に生じ，拘束効果を生じる節間長比の下限值は，曲げ応力が大きいほど大きくなる。

数値解析

- ・ BET と非線形有限要素解析による計算例の比較を行った。
- ・ 数値解析では節の拘束効果が確認され，変形は，節間長比が小さければ線形理論に，節間長比が大きければ BET に近づく。
- ・ 数値解析では曲げモーメントが大きくなるほど応力分布の対称性が乱れ，節間長比が小さいモデルでは特に顕著である。その際の曲げ応力絶対値の大小関係は，繊維平行方向・直交方向のいずれも圧縮縁 > 引張縁となる。

実験

- ・ 丸竹稈の曲げ実験を行い，竹稈の複数個所において外皮表面の繊維平行方向・直交方向のひずみを測定した。
- ・ 載荷点の直下では応力の対称性が乱れるが，載荷点から離れた点の応力分布は BET とよく整合する。
- ・ 最大荷重は，繊維直交方向の曲げひずみが横圧縮試験によって求まる繊維直交方向の最大曲げひずみに達することで生じる。
- ・ BET は，応力レベルが弾性範囲であり，かつ節による断面扁平化の拘束効果が小さい条件において，実際の繊維直交方向の応力分布を推定するのに有効だと考えられる。

4. 結論

4.1. 研究成果の総括

以上の成果と、本研究のタイトルである「丸竹の形状・伐採時期と物理的・力学的特性の関係」との関連について、以下の知見が得られた。

- ・形状と比重－比重は稈直径サイズと負の相関関係を持ち、元口から末口に向かって大きくなる。これは維管束体積密度が元口から末口に向かって相対的に大きくなるためである。
- ・含水率・比重と力学的性質－含水率が大きいと強度・剛性は低下する。また比重が大きいと強度・剛性は増加する。これは木材と同様の傾向である。
- ・伐採時期と含水率－国産竹については8～10月に含水率が高い傾向がある。したがって、自然乾燥期間を短くするためには、これらの季節に伐採することが有効だが、一方、同時期はでんぷんや糖質含有量が大きいという報告もあり、耐久性の観点からは弱点となる可能性もある。耐久性に関連して、適切な伐採時期は今後も検討が必要である。
- ・竹稈の節は、一定以下の大きさの曲げモーメントに対し、稈壁の局部座屈や繊維直交方向の曲げ破壊を防ぐ効果が期待できる。また、節の配置は竹稈の全長に亘り非常に効率的に配置されていることが確認された。

4.2. 今後の課題

竹稈形態と力学的性質については、試料数を拡大するとともに、力学的特性値と竹稈形態の幾何学的関係について統計的定式化を行うことを目標として研究を進めたい。

丸竹の曲げ破壊メカニズムについては、繊維直交方向の応力分布をより正確に評価するには、節の拘束効果および材料非線形性を考慮した数値解析を行う必要があると考えられる。しかし、丸竹稈の形状や物性を正確な有限要素モデルとして再現するのは非常に手間がかかり、現実的に可能かどうか疑問が残る。そこで、本稿に示した BET の定式化をもとに、節の拘束効果と材料非線形性を考慮した定式化について検討を行いたい。

また、横圧縮試験により求まる繊維直交方向の曲げ強度から丸竹稈の曲げ強度を推定しうることが確認できたが、上述の解析の正確性を向上させるとともに、繊維直交方向の材料構成式をより正確に調査し、妥当性を検証する必要がある。

(発表論文)

- [1] T. Nagai : Preliminary study on relationship between culm morphology and mechanical characteristics of Japanese bamboo, 日本建築学会大会 (近畿) 学術講演梗概集, 構造 OS (植物構造オプト) 選抜梗概, 2023. 9. (投稿済・発表決定)
- [2] T. Nagai : Preliminary study on relationship between culm morphology and mechanical characteristics of Japanese bamboo, *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2023 Integration of Design and Fabrication*, 10–14 July 2023, Melbourne, Australia, 2023. 7. (投稿済・審査中)
- [3] 永井拓生, 沖恵輔, 長野容平, 木原湧 : 丸竹稈の曲げ破壊メカニズムおよび曲げ強度に関する基礎的考察 竹稈壁に生じる曲げ応力の Brazier 効果理論・数値解析・実験による比較検証, 構造工学論文集, Vol. 69B, 日本建築学会, pp. 119-128, 2023. 4.
- [4] 永井拓生, 沖恵輔, 長野容平, 木原湧 : 曲げを受ける丸竹稈に生じる応力分布および曲げ破壊に関する考察, 第 17 回コロキウム構造形態の創生と解析 2022, 日本建築学会, pp. 99-104, 2022. 10.
- [5] 有村美千路, 山田宮土理, 永井拓生 : 竹材の建築への活用に関する基礎的研究 -建築事

例調査に基づく竹材の活用方法の分析-, 日本建築学会大会（北海道）学術講演梗概集, pp. 1161-1162, 2022. 9.

- [6] 永井拓生: 丸竹の曲げ破壊メカニズムおよび曲げ強度推定に関する考察 - Brazier 効果理論と実験の比較 -, 日本建築学会大会（北海道）学術講演梗概集, 構造 OS（植物構造オプト）選抜梗概, pp. 789-792, 2022. 9.
- [7] 木原湧, 永井拓生: 高温加熱による竹の含水率測定に関する基礎的研究, 日本建築学会大会（北海道）学術講演梗概集, 構造 3, pp. 69-70, 2022. 9.