

# 竹の繊維直交方向の力学的特性の解析および丸竹稈の弾性力学モデルの定式化

Analysis on mechanical properties of bamboo perpendicular to fiber and formulation of elastic mechanical model of full-culm bamboo

滋賀県立大学環境科学研究院 講師 永井拓生

## （研究計画ないし研究手法の概略）

竹は生長が早く、無限の植物資源とまで言われるほどに高い再生力を持っている。近年、国外においては国連 SDGs 目標の採択や低炭素社会実現を念頭に竹利用の関心が高まっており、竹構造に関する研究の急激な増加や、恒久的な実建築物の建設も数多く行われている。一方、実建築物の多くは宿泊や観光リゾートを目的としたものや、体育館やホールといった集客施設・空間構造が多く、日常的な居住空間の建設事例はあまり多くない。世界的には 2050～2100 年にかけて赤道近辺の発展途上国において爆発的な人口増加が予測され、当該地域における住居空間の整備は極めて重要な課題になると考えられるが、これらの地域は竹の植生域とも重なっており、各地域の竹を有効活用できれば、住居空間の持続的な整備の一助となりうる。その際、竹の物性値の正確な把握は重要な課題となる。

竹は、竹稈の軸に平行して強固な繊維組織を構成することで高い引張強度や剛性を確保しており、このことが素材としての魅力であり、構造利用のモチベーションともなっている。その反面、繊維直交方向の強度や剛性は相対的に非常に低く（繊維平行方向の 1/5～1/20 程度）、研究活動においても軽視されがちであるが、実際には弱軸である繊維直交方向の特性が竹稈の破壊メカニズムに決定的な影響を持つ。したがって、竹稈の繊維直交方向の物性を把握することは、竹構造物の適切な性能・安全性評価を実現することに加え、竹構造物の設計の自由度と利用範囲の拡大を目指すうえで非常に重要な課題であると言える。そこで、竹稈壁の面内における繊維平行方向・直交方向の弾性定数を求め、弾性構成式を定式化することを目的とし、本課題では以下の 2 項目について研究を行った。

## 【1】竹の繊維直交方向の力学試験方法の確立・実施

竹稈壁の繊維直交方向の曲げ強度は、竹同士の接合部の耐力の決定的因子になりうるほか、強軸方向の曲げ破壊において決定的な影響を持つことが過去の研究で分かっている。したがって、丸竹を梁や根太、耐風要素として用いる場合など、多くの場合に曲げに対する設計が必要となることから、非常に重要な特性値と言える。特に、丸竹稈の曲げ破壊は竹稈壁の繊維直交方向の割裂によって生じるため、外皮側の繊維直交方向曲げ強度を知ることが肝要となる。ISO 22157 では、繊維直交方向の曲げ強度を横圧縮試験（Bending strength and stiffness perpendicular to fibres）で求めるよう定めているが、この方法では内皮・外皮のどちら側で破壊を生じるか制御できない。そこで、竹稈にあらかじめヒンジを設け破壊モードを限定した試験方法を考案し、これらの手法について、多くのテストを通じて ISO 2157 の方法により求まる特性値との比較を行い、有効性を検証した。

## 【2】竹稈の面内弾性定数の定式化

前項の検証により確立された手法を用い、マダケ・モウソウチクの繊維直交方向曲げ強度、曲げヤング係数の算出を行ったほか、竹稈壁の面内各方向のポアソン比の算出を行った。これらの諸特性値を用い、曲げを受ける竹稈の稈壁の応力状態を平面応力と仮定し、直交異方性を仮定した弾性構成式の導出を行った。また、竹稈の曲げ実験を行い、各部の歪みを計測し、構成式により得られる歪みとの比較を行った。

### （実験調査によって得られた新しい知見）

#### 【1】繊維直交方向の効果的な曲げ試験方法の確立

ISO22157の繊維直交方向曲げ試験（Edge bearing test または Diametric compression test）は輪切りにした竹稈を直交断面に平行に圧縮し、稈壁の曲げ破壊を誘発する試験方法である。これに対し、我々の提案する方法は、図1に示すように断面内の直交する4点（NSEW）の対称位置の2か所にあらかじめヒンジを設けておき、試験時の破壊箇所を限定する方法である。ヒンジを設ける位置により、EW ヒンジ付試験、NS ヒンジ付試験と称する。

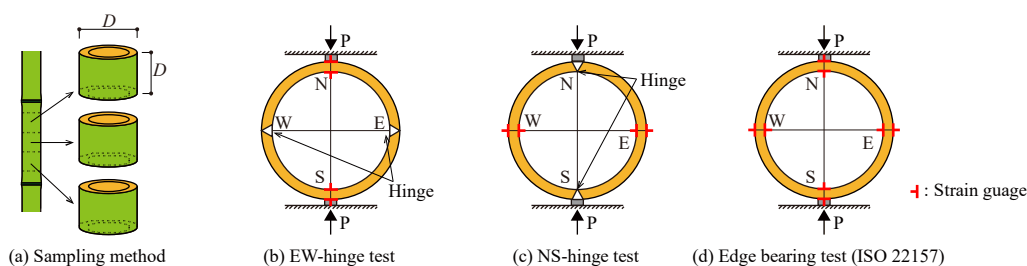


図1 繊維直交方向曲げ試験（横圧縮試験）

上図に示す3手法について、各手法から求まる繊維直交方向曲げ強度、同方向曲げヤング係数、および最大ひずみについて比較を行った。各手法について約30体ずつの試験体を用い比較を行ったところ、ヒンジ付試験により求まる繊維直交方向の曲げ特性値は、ISO 22157試験により求まるそれと非常によく整合することが確認された。ISOとヒンジ付き試験には前者には初期応力（生長応力）が存在するのに対し、後者はヒンジを設けることでそれが解放されることになるが、結果的に初期応力は強度と比べ非常に小さいことが分かり、実用上は初期応力を考慮する必要はなさそうである。

#### 【2】竹稈壁の力学的特性値および竹稈の曲げ破壊メカニズムに対する影響

ヒンジ付横圧縮試験に加え、図2に示す方法で短柱圧縮試験を行い、稈壁のひずみを計測することで、竹稈壁の面内ポアソン比を求めた。これら両試験の結果から、せん断を除く面内の弾性定数が求まり、弾性構成式が得られた。

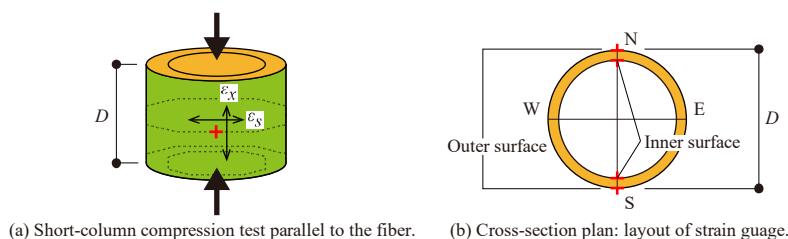


図2 竹稈の短柱圧縮試験

次に、得られた弾性構成式を用い、丸竹稈が稈軸に沿った曲げを受ける時の応力分布および曲げ破壊メカニズムに対する影響を検証した。丸竹稈が稈軸に沿った曲げを受けるとき、直交断面が扁平化し、竹稈壁に生じる繊維直交方向の曲げ破壊が起因となって最大荷重に達する。したがって、丸竹稈の曲げ強度の推定にあたっては、稈軸の曲げに付随して生じる繊維直交方向の曲げ応力を評価することが重要となる。そこで本研究では、曲げを受ける梁の直交断面変形の理論として知られる Brazier 効果理論に基づき、曲げを受ける竹稈の稈壁に生じる応力の定式化を行い、マダケとモウソウチクを用いた曲げ実験の結果と比較を行った。実験の結果、稈壁に生じる繊維直交方向の歪みは、微小変形領域において Brazier 効果理論とよく整合することが確認できた。

一方、応力歪み関係は変形が大きくなるにつれて理論値から乖離が見られた。この理由として、竹稈の節による拘束の影響が考えられる。竹稈の節の変形拘束効果についてはすでに理論的に検証した事例があるが、一方で、歪みや応力に対する影響を定量的に評価した研究はあまりない。そこで、まずは非線形有限要素解析により竹稈の節による変形拘束の効果を定量的に確認したいと考える。また、丸竹稈の弾性曲げをうまく活用した竹構造システムの開発を行っていきたい。

#### ( 発 表 論 文 )

- [1] T. Nagai: Formulation of elastic stress in the fiber transverse direction of full-culm bamboo subjected to bending, *Proceedings of the IASS 2024 Symposium Redefining the Art of Structural Design*, August 26-30, 2024, Zurich Switzerland, Philippe Block, Giulia Boller, Catherine DeWolf, Jacqueline Pauli, Walter Kaufmann (eds.) (投稿済み・採用決定)
- [2] T. Nagai, K. Oki: Study on the formulation of compression strength for full-culm bamboo columns - comparison of buckling tests and linear buckling analyses on small-scale specimens, *AIJ Journal of Technology and Design*, vol. 30, no. 74, pp. 83-87, 2024. 2. <https://doi.org/10.3130/aijt.30.83>
- [3] 沖恵輔, 永井拓生: 丸竹柱の圧縮耐力に関する基礎的研究-圧縮耐力評価式と実験値の比較-, 第 18 回コロキウム構造形態の創生と解析 2023, 日本建築学会, pp. 25-30, 2023. 11.
- [4] 永井拓生: 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 その 2 ポアソン比を考慮した検証, 第 18 回コロキウム構造形態の創生と解析 2023, 日本建築学会, pp. 31-36, 2023. 11.