

氏 名	らむふる らびどう RAMFUL RAVIDUTH
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	博 甲 第 1 0 0 2 号
学位授与の日付	令和 3 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研 究 科 ・ 専 攻	工芸科学研究科 先端ファイブ科学専攻
学 位 論 文 題 目	INVESTIGATION OF FRACTURE MECHANISMS OF BAMBOO CULM BY EXPERIMENTAL AND FINITE ELEMENT METHODS FOR IMPROVED DURABILITY PERFORMANCE IN CONSTRUCTION (建設における耐久性性能を改善するための実験的および有限 要素法による竹稈の破壊メカニズムの調査)
審 査 委 員	(主査)教授 佐久間淳 教授 鋤柄佐千子 教授 PEZZOTTI Giuseppe

論文内容の要旨

本論文は、環境に優しい建物や建築を検討するため、鉄鋼やコンクリートなどの建築材料の優れた代替品と見なされている木材と同様の機械的特性を有する天然素材である竹を対象として、その特性を最適化する方法の検討を目的とする。特に、竹は破壊挙動に強く影響する中空の不均一な構造を有していることから、その機械的特性に関する諸課題を解決する方法について研究を実施した。

第 1 章から第 4 章において、この研究の背景と本論文の目的および構成について記述した。

第 5 章においては、竹の破壊メカニズムに対する材料組織と幾何学的属性の関係を調査することを目的として、有限要素法 (FEM) によってさまざまな荷重モードの影響を調べた。特に、その組織形態から最大主ひずみを基準とする破壊を分析したところ、単純な中実形状モデルとは大きく異なって、その独特の中空構造と不均質な性質のために、その破壊挙動を曲げモードとせん断モードによって分類できる巨視的フラクトグラフィーを確立した。

第 6 章において、竹のボルト接続法に関して、その一軸引張における破損モードに関して、繊維方向を考慮した FEM によって調べた。ここでは、木材に代表される不均一な材料とは異なって、竹を模擬した中空の不均一なモデルにおいては、せん断破壊の影響が大きいことを明らかにした。ボルトの直径に相当する局所領域においては、材料の直交異方性が高いために軸方向の強度が高くなったが、半径方向および接線方向の強度は低くなった。また、局所的なひずみ集中は、ボルトと竹の接触界面での破壊を促進する結果となることを示した。

第 7 章においては、竹の機械的挙動に対する諸処理法の影響をさらに解明するため、マダケ (*Phyllostachys bambusoides*) の階層構造の機械的特性に対する煙処理の偶発的な影響を調査した。曲げひずみと比エネルギー吸収の分析では、適用された処理に関係なく非対称の変形挙動を確認し、また煙処理された竹は熱劣化によって最外層の疎水性が増加したことによって脆性が高まり、未処理のものとは対照的に最も外側の繊維が引張荷重に耐える能力が損なわれる結果とな

ることを示した。

第 8 章においては、竹の収縮挙動に対する影響を調査する目的で、熱変性による数値シミュレーションによって分析を実施した。まず、竹の試料に対する熱変性の影響に関する実験で半径方向および接線方向の寸法変化が長手方向の寸法変化を大幅に上回っている結果を示した。また高温における構造の化学的な構造変化をフーリエ変換赤外分光法で確認した。また巨視的な収縮挙動を観る FEM シミュレーションの結果において、亀裂が長軸方向に伝播するパターンが再現できることを示した。

第 9 章においては、竹の破壊の開始とその伝播メカニズムについて、実験および FEM によって調査した。3 点曲げ試験による評価では、接線方向の破壊靱性が高いことを確認し、これに対して横方向に関して高い層間剥離を示す特性を明らかとした。また FEM の結果から、この破壊パターンが直交異方性に対応する剛性分布モデルで表現できることを示した。

第 10 章においては、本研究で得られた知見をまとめ、今後の展望について述べた。

論文審査の結果の要旨

本博士論文は、天然素材である竹を建材として活用する方法の検討を目的とする。特に、竹は破壊挙動に強く影響する中空の不均一な構造を有していることから、その機械的特性に関する諸課題を解決する方法について研究を行い、その成果について報告したものである。

まず、竹の破壊メカニズムに対する材料組織と幾何学的属性の関係を調査することを目的として、有限要素法 (FEM) によってさまざまな荷重モードの影響を調べた。また竹のボルト接続法に関して、木材に代表される不均一な材料とは異なって、竹を模擬した中空の不均一なモデルにおいては、せん断破壊の影響が大きいことを明らかとし、ひずみ集中がボルトと竹の接触界面での破壊を促進することを示した。竹の機械的挙動に対する諸処理法の影響を解明するため、煙処理の影響を調査した結果から、マダケの階層構造の機械的特性に対する分析を実施した。さらに収縮の効果を熱変性による数値シミュレーションによって分析を実施し、併せて構造の化学的な高温における構造変化をフーリエ変換赤外分光法で確認した。この巨視的な収縮挙動を観る FEM シミュレーションの結果においては、亀裂が長軸方向に伝播するパターンが再現できることを示した。最後に、竹の破壊の開始とその伝播メカニズムについて、実験および FEM によって調査した。3 点曲げ試験による評価では、接線方向の破壊靱性が高いことを確認し、これに対して横方向に関して高い層間剥離を示す特性を明らかとした上で、また FEM の結果から破壊パターンが直交異方性に対応する剛性分布モデルで表現できることを示した。

本論文の基礎となっている学術論文は、レフェリー制度の確立した雑誌に掲載および掲載が決定された、申請者を筆頭著者とする次の 4 編である。

1. Raviduth Ramful and Atsushi Sakuma, Investigation of the Effect of Inhomogeneous Material on the Fracture Mechanisms of Bamboo by Finite Element Method, Materials, Vol.13(21), 15 pages, 2020.
2. Raviduth Ramful and Atsushi Sakuma, Effect of Smoke Treatment on Flexural Strength of Bamboo Hierarchical Structure, Journal of Materials Science and Chemical Engineering, BioResources, Vol.16(1), pp.387-402, 2021.

3. Raviduth Ramful, Failure Analysis of Bamboo Bolt Connection in Uniaxial Tension by FEM by Considering Fibre Direction, Forest Products Journal, 掲載決定済.
4. Raviduth Ramful, Thefye P. M. Sunthar, Wenliang Zhu and Giuseppe Pezzotti, Investigating the Underlying Effect of Thermal Modification on Shrinkage Behaviour of Bamboo Culm By Numerical Simulation, Materials, 掲載決定済.

以上の結果より，本論文の内容は新規性と独創性，さらに学術的な意義があり，博士論文としての水準に到達していると審査員全員が認めた．