丸竹材の強度特性 (第2報)[†]丸竹材の強度性能の推定^{*1}堀江秀夫^{*2}Strength Characteristics of Bamboo Culm II.[†]Estimation of strength properties of bamboo culm^{*1}Hideo HORIE^{*2}

Strength tests of madake (*Phyllostachys reticulata*) and mosochiku (*Phyllostachys pubescens*) culms, which are useful bamboos in Japan, were conducted in the green condition. Internal diameter d was estimated from external diameter D in the culm by the known regression line $d=0.81D$. Section properties in the culm were calculated from D and d . Strength properties of the culm were calculated from the assumptions that the culm was homogeneous and a hollow circular cross-section material. As a result of tests, the strength properties of the culm could be expressed by several regression lines with external diameter D as explanatory variable. Of these, regression lines of stiffness data (flexural rigidity $E \cdot I$, axial rigidity $E \cdot A$, torsional rigidity $G \cdot J$) necessary for structural analysis of space frame are as follows, regardless of bamboo species.

$$\text{Log } E \cdot I = 3.49 \text{ Log } D - 2.49$$

$$E \cdot A = 403 D - 7885$$

$$\text{Log } G \cdot J = 3.90 \text{ Log } D - 6.60$$

Keywords: culm of bamboo, external diameter, structural member, stiffness data.

日本の有用竹であるマダケとモウソウチクの丸竹材(青竹)の強度試験を行った。このとき、丸竹材の内径 d は、外径 D と回帰式 $d=0.81D$ を用いて推定した。この内径と外径の値から断面性能を算出し、さらに丸竹材を均質な中空円形断面材と仮定して各種強度性能を算出した。試験結果から、丸竹材の強度性能は、外径 D を説明変数とする回帰式で表すことができた。このうち、立体骨組の構造解析に必要な剛性データ(曲げ剛性 $E \cdot I$ 、軸剛性 $E \cdot A$ 、捩り剛性 $G \cdot J$)の回帰式は、竹種に係わらず、次のとおりである。

$$\text{Log } E \cdot I = 3.49 \text{ Log } D - 2.49$$

$$E \cdot A = 403 D - 7885$$

$$\text{Log } G \cdot J = 3.90 \text{ Log } D - 6.60$$

1. 緒 言

本報は、丸竹材を仮設構造用の部材として利用す

るため、丸竹材の実用的な構造解析用部材データの蓄積を目的に行った研究の第2報である。前報¹⁾では、丸竹材の節間中央の外径と内径の間には強い相関関係があり、この関係を用いて外径から丸竹材の断面性能が推定できる可能性を確認した。

竹材についてのハンドブック^{2, 3)}はあるものの、丸竹材を構造用部材に使用するための設計データは記載されていない。また丸竹材の試験方法は、国際規格(ISO 22157)⁴⁾はあるが、日本では木材の規格⁵⁾のみである。竹材に関する強度特性の研究では、割竹材については多い⁶⁻²³⁾ものの丸竹材については少

[†] Report I: This journal 66, 87-92 (2020).

^{*1} Received January 18, 2021; accepted March 17, 2021. 本報の一部は、第63回日本木材学会大会(2013年3月、盛岡)において発表した。

^{*2} 富山大学芸術文化学部 Faculty of Art and Design, University of Toyama, Takaoka 933-8588, Japan
Corresponding author: H.Horie (hori2020lodge@ns.anc-tv.ne.jp)

ない²⁴⁻³⁶⁾。これは、丸竹材が不定形であるため構造用部材の強度特性の基礎である断面性能が確定しづらいこと、日本に試験規格がないこと等が影響している。

以上のような背景から、丸竹材の強度特性を明らかにするため、本報では、日本の有用竹であるマダケとモウソウチクの丸竹材を用いて、曲げ試験、縦圧縮試験、振り剛性試験を行った。このとき、丸竹材の外径から内径を推定する回帰式¹⁾による断面性能推定値および丸竹材は全長にわたって均質な中空円形断面材であるという仮定を用いて試験体の強度性能を算出した。これらの結果から、丸竹材の強度性能を把握するとともに、その推定が可能かを検討した。

2. 方 法

竹材の組織は、基本組織となる柔細胞の中に維管束が点在し、維管束の外側は維管束鞘に囲まれている。この維管束鞘が竹稈に強固性を与え、この性質および量が竹材の材質に大きな関係をもつと言われている²⁾。植物としての竹が風荷重を受けた時に、最も効果的に竹稈に発生する曲げ応力度分布に対応できるよう、稈壁厚方向に強度性能が傾斜分布した最適構造となっている¹⁷⁾。また、竹稈の節間中央付近と節付近では断面形状が異なり、さらに節付近では圧縮強度が減少し節で最小値となる¹⁰⁾。一方、丸竹材の曲げ試験においては、破壊性状が材軸方向によるものではなく、材軸直交方向に断面が変形し割裂が生じて破壊する丸竹特有の破壊モードであるため、有限要素法の解析結果から、材軸方向の曲げ耐力は材軸直交方向の曲げ耐力によって概ね定まり³¹⁾、通常材料力学の公式から求められる曲げ強度は見かけの曲げ強度である。

このように生物体の特徴をもった丸竹材に対して、本報では、実用的な解析用部材データを得ることを主眼とするため、節間部と節部を区別せずに、丸竹材を均質な中空円形断面材と仮定している。このとき、各種試験体の外径値は、節間の中央の縦方向と横方向の外径を1/100 mm 読みノギスで実測したその平均値である。この外径値から、前報¹⁾で得られている外径 D と内径 d の回帰式 $d=0.81D$ を用いて内径を推定し、この推定値を試験体の内径値とした。この外径と内径の値から断面性能を計算し、その値を用いて弾性係数と強度を算出した。

供試材は、前報¹⁾と同様、富山県内の竹材販売業者から購入した市販品で、愛知県産のマダケ (*Phyllostachys reticulata*) と富山県・石川県産のモ

ウソウチク (*Phyllostachys pubescens*) である。また、強度性能が安定している竹齢3年以上²⁰⁾の伐採直後の青竹、竹稈の太さは小・中・大が揃うようにと指示して購入し、梢頭部を除去した長さ8~10 m 程度の丸竹材である(小径のため利用に適さない梢頭部は運搬時に切り落とされている)。なお供試材は市販品であるため、正確な竹齢や伐採位置は不明であるが、元口の節間長の傾向から、ほぼ根本部で伐採されていた。一方、前報¹⁾による丸竹材の形状測定結果から、丸竹材の根本部は稈壁厚が厚く回帰式 $d=0.81D$ が当てはまらない。このため、各種試験にあたっては、供試材の根本部を数十 cm 除去した上で、元口から末口に向かって所定の試験体長さに切断してゆき、1 供試材から数個の試験体采取了。なお試験体の含水率は、各試験終了後の試験体中央部を鋸断して約1 節間長の丸竹材采取了し、全乾法により求めた。

各種の強度試験には、荷重容量100 kN の万能材料試験機(5882型、インストロンジャパンカンパニーリミテッド)を用いた。

2.1 曲げ試験

丸竹材の曲げ試験では、節間に鞍型のブロックを介して圧縮形式で加力する試験方法が多く採用され^{24-26, 29-35)}、引張形式で加力する試験例はない。今後、各地に生息する竹の曲げ性能データを蓄積してゆくためには、各地の公設試験機関や大学等に一般的に設置されている万能材料試験機を用いて、手作りの鞍型ブロックを必要とせず、なるべく短スパンで安定した丸竹材の曲げ性能を測定できることが望ましい。このため、ワイヤー加力(引張加力)による3点曲げ方式と4点曲げ方式の2種類の曲げ試験を行い、両者の試験結果を比較して、簡便な丸竹材の曲げ試験方法について検討した。

また、3点曲げ方式では、夏季4ヶ月間、屋外に暴露して気乾状態になった乾燥竹も試験に供し、青竹と気乾状態の乾燥竹の曲げ強度性能の差についても検討した。

2.1.1 供試材

供試材は、マダケ11本(愛知県産の6月伐採9本と11月伐採2本)とモウソウチク30本(富山県・石川県産の6月伐採12本、9月伐採7本、10月伐採8本、11月伐採3本)である。供試材毎に、元口側から順に、曲げ試験時のスパン長(1 m または2 m)に合わせて切り出して数本の丸竹材采取了し、曲げ試験体とした。なお、全ての曲げ試験体において、支点から飛び出る両材端には節があるいわゆる節止めとし、支点から材端までの余長は数十 cm となっ

た。

2.1.2 試験方法

3点曲げ方式では、スパン中央付近の末口側の節間中央の外径を試験体の外径とした。4点曲げ方式では、スパン中央の節間中央の外径を試験体の外径とした。一方、乾燥竹からの試験体の外径は、乾燥前の青竹時の測定値を用いた。この外径値から計算した断面二次モーメントおよび断面係数を用いて、曲げヤング係数および曲げ強度を算出した。

乾燥竹の乾燥方法は、青竹状態の供試材を、6月末から10月までの126日間、富山県高岡市（富山大学高岡キャンパス内）の雨水と直射日光が当たる屋外に水平暴露して乾燥させた。その後、供試材毎に、割れの発生していない箇所から曲げ試験時のスパン長に合わせて数本の試験体を採取し、2週間ほど室

内に保管した後、3点曲げ方式により曲げ試験を行った。

曲げ試験の条件は、スパン中央付近の節間外径40 mm以上の試験体は、スパン2000 mm、荷重速度20 mm/分、直径30 mm 丸鋼製の曲率75 mmU字型支点である。節間外径40 mm未満の試験体は、スパン1000 mm、荷重速度10 mm/分、直径20 mm 丸鋼製の曲率50 mmU字型支点である。

試験方法を Fig.1 に示す。

3点曲げ方式では、スパン中央に節があるように試験体を設置し、その節に直径6 mm 鋼製ワイヤー2本をU字型にして加力した。また、加力点に取り付けた1/10 mm 読み巻き取り型変位計でスパン中央の全体撓みを測定した。このときのせん断スパンと外径の比率は、平均14.0（範囲7.6～25.7）であ

(A three-point bending test)

(A four-point bending test)

Fig.1. Method of bending test.

Fig. 2. Method of compression test.

Fig. 3. Method of twisting stiffness test.

った。

4点曲げ方式では、スパン中央に節間中央があるように試験体を設置し、等モーメント区間長を試験体中央部の節間長に合わせ、直径6mm鋼製ワイヤー2本をU字型にして節部に加力した。また、スパン中央の節間に取り付けた1/10mm読み巻き取り型変位計で全体撓みを測定した。このときのせん断スパンと外径の比率は、平均12.4(範囲6.0~28.0)

であった。

2.2 縦圧縮試験

丸竹材の縦圧縮性能を把握するため、青竹の縦圧縮試験を行った。

2.2.1 供試材

供試材は、マダケ12本(愛知県産の6月伐採2本と7月伐採7本と11月伐採3本)とモウソウチク11本(富山県・石川県産の6月伐採1本、9月伐採7

本, 11月伐採3本)である。通直な供試材を選び, 元口側から順に両木口を平行にして3節間長分を切り出して数本の丸竹材を採取し, 縦圧縮試験体(長さ809~1097 mm)とした。

2.2.2 試験方法

試験体中央部の節間中央の外径を試験体の外径とした。この外径値から計算した断面積を用いて, 圧縮ヤング係数および圧縮強度を算出した。

試験体の下端は平板, 上端は球座で支え, 荷重速度1 mm/分で加力した。2節間長分の長さに対する変位を2台の1/1000 mm読み変位計で測定し, その平均を縦圧縮変位とした。

試験方法を Fig. 2 に示す。

2.3 振り剛性試験

構造物の立体解析においては, 部材の振り剛性データが必要である。このため, 丸竹材の振り剛性を把握するための青竹の振り剛性試験を行った。

2.3.1 供試材

供試材は, マダケ5本(愛知県産の6月伐採4本と11月伐採1本)とモウソウチク6本(富山県・石川県産の6月伐採3本, 11月伐採3本)である。通直な供試材を選び, 元口側から順に4節間長分を切り出して数本の丸竹材を採取し, 振り剛性試験体とした。

2.3.2 試験方法

試験体両端部に丸鋼を通して回転自由な支点で支え, 一方の丸鋼は固定し, 他方の丸鋼に錘とモーメントアームを利用して回転力を与えた。なお, 回転力は, 最大せん断応力度がおおよそ1 MPaになるまで加力した。2節間長分の長さ位置に固定した2台の1/100度読み角度計で2点の振れ角を測定し, そ

の差を2点間の振り角とした。

試験体中央部の節間中央の外径を試験体の外径とした。この外径値から計算した断面積と断面二次極モーメントを用いて, せん断弾性係数およびせん断応力度を算出した。

試験方法を Fig. 3 に示す。

3. 結果と考察

3.1 曲げ試験

3.1.1 簡便な曲げ試験方法の検討

青竹を用いた3点曲げ方式と4点曲げ方式の曲げ試験結果を Fig. 4 に, 破壊形態の代表例を Fig. 5 に示す。なお, 曲げ試験体の含水率は, マダケが平均80% (範囲56~110%, 変動係数20%), モウソウチクが平均60% (範囲24~108%, 変動係数26%)であった。

Fig. 4 から, 3点曲げ方式と4点曲げ方式による曲げ剛性 EI , 最大曲げモーメント $M_{\max}$ に差がないことが分かる。また両方式とも, ワイヤー加力された節付近の圧縮側から圧壊が始まり, 断面が潰れて割裂が起こり破壊した。なお, 両方式とも, 水平せん断破壊および支点による断面の潰れは見られず, また支点(U字形丸鋼)の丸竹材へのめり込みは微小であった。これは, 材端の節止めが支点部分の水平せん断や潰れの防止に有利にはたらくこと, また支点の丸鋼の丸みと曲率とが丸竹材の丸い断面に対して馴染みが良かったためと思われる。

通常, 木材の曲げ試験においては, 荷重を分散して加力点の局部的破壊および水平せん断破壊をできるだけ除く最短のスパンとして, せん断スパンと梁背の比を7倍で行うことが規定されている⁵⁾。今回

Fig. 4. A comparison of three-point loading and four-point loading in bending tests.

Legend: D : external diameter, I : moment of inertia, E_b : Young's modulus of bending, $M_{\max}$: maximum bending moment.

Fig. 5. Typical types of failure in bending tests.

の試験においてもこの考えから、せん断スパンと梁背の比をほぼ7倍以上とし、かつ節間部の荷重点の潰れを避けるために節部に加力し、材端の余長を節止め形式で十分にとった。このようにして行った4点曲げ方式の試験結果と、3点曲げ方式の試験結果に差が見られなかったことから、ワイヤー加力による3点曲げ方式は、等モーメント区間長を試験体毎に調整しなければならない4点曲げ方式と比較して、簡便で安定した曲げ性能の測定方法といえる。なお、本試験でのせん断スパンと外径の比率の最小値は3点曲げ方式が7.6および4点曲げ方式が6.0であり、水平せん断破壊や支点部分で潰れる試験体は皆無であったことから、試験体の材端を節止め形式にして余長を十分にとることを前提に、木材の規格⁵⁾に倣ってせん断スパンと外径の比率を7倍以上とすることが妥当と思われる。

3.1.2 青竹と乾燥竹の曲げ性能比較

夏季4カ月間、屋外暴露状態で乾燥した乾燥竹の3点曲げ方式の試験結果と、比較のため3.1.1の青竹の3点曲げ方式の試験結果を合わせて Fig. 6 に示

す。また乾燥竹の曲げ破壊形態では、青竹と同様に、水平せん断破壊や支点部分での潰れは見られなかった。なお、乾燥竹の試験体の含水率は、マダケが平均13%（範囲12~16%、変動係数8%）、モウソウチクが平均14%（範囲11~21%、変動係数22%）であり、小さな割れは見られるものの生物劣化は観察されなかった。

伐採後2年間の室内保管（福岡県にて）したマダケとモウソウチクの例では含水率が10.4~12.9および11.9~14.7%であり⁹⁾、伐採後2年5か月間の屋内保管（石川県にて）したモウソウチクの例では含水率14%程度となっている³²⁾ことから、今回の乾燥竹の試験体は気乾状態の丸竹材と言える。

Fig. 6 から、屋外暴露により気乾状態となった乾燥竹の曲げ強度性能は、青竹の曲げ強度性能と同一であると判断できる。つまり、生物劣化が進んでいない丸竹材は、青竹状態から気乾状態の含水率範囲では一定の曲げ強度性能値を示すことが分かった。

また、気乾状態のモウソウチク（石川県金沢市産の竹齢3年以上）68本から長さ2000 mm の丸竹材の

Fig. 6. Comparison of green specimens and air-dry specimens in results of three-point bending tests.

Notes: D , I , E_b , M_{max} : See Fig. 4.

試験体を採取して行ったスパン1800 mm 3等分点4点曲げ方式の曲げ試験の報告³²⁾では、これまで多くの研究で採用されている圧縮加力および加力点にブロックを用いる曲げ試験方式であるが、本報と同じ石川県産モウソウチクを用いており、スパンは本報が2000 mmに対して1800 mmとほぼ同じである。この報告では、平均外径97.7 (範囲75.9~120.6) mmの乾燥丸竹材の平均最大曲げモーメントは4260 (範囲1530~6960) N·mであったことが報告されており、本報の結果 (Fig. 6参照) と一致している。

このことから、ワイヤーによる引張加力の3点曲げ方式は、これまでの研究結果と矛盾しない結果となっており、簡便な丸竹材の曲げ試験方式と判断できる。また、鞍型ブロックを必要とする圧縮加力方式と比べても、荷重点に鋼製ワイヤーと支点にU字型丸鋼を用いる本報の引張加力方式は、試験治具の寸法について規格化しやすい試験方式である。

3.1.3 まとめ

全ての曲げ試験体の結果を、両対数グラフの形でFig. 7に示す。

この図から、竹種にかかわらず、丸竹材の外径と曲げ強度性能の間には強い相関関係 (危険率1%で有意) があることが分かる。つまり、生物劣化が進んでいない丸竹材は、青竹状態と気乾状態に関わらず一定の曲げ強度性能を示し、その曲げ強度性能は簡便なスパン中央部の外径測定により推定可能である。

竹種により、曲げ剛性に差は見られないが、強度には差が見られた。同じ外径であれば、モウソウチクの方がマダケよりも曲げ強度は優れていた。

曲げ強度性能は、青竹状態から気乾状態の含水率範囲では一定と見做してよいことがわかった。既報では、竹稈の節間部から採取した割竹小片における

マダケ・モウソウチク・ハチクの圧縮強度、マダケ・モウソウチクの引張強度、マダケ・モウソウチクの膨潤過程、マダケ・モウソウチク・ハチクのせん断強度からそれぞれ求めた繊維飽和点の平均値は、17.2%, 16.5%, 12.9%, 20.4%と報告されている^{9~12)}。つまり、竹材の繊維飽和点は本材と比較して低く、本報における乾燥竹の含水率 (マダケ13%, モウソウチク14%) は繊維飽和点付近であったことから、青竹と気乾状態の乾燥竹とで曲げ強度性能に差が見られなかったと思われる。

竹種に係わらず、曲げヤング係数および曲げ強度は、外径が小さいほど、言い換えると、竹稈の地上高が高い位置ほど大きな値を示している。このことは、マダケとモウソウチクとハチクの節間部から採取した気乾状態の割竹小片における地上高と圧縮強度・引張強度を調べた報告¹³⁾と同様の傾向である。

さらに、曲げヤング係数と曲げ強度の間には強い相関関係 (危険率1%で有意) が見られた。このことは、モウソウチクの節間部から採取した気乾状態の割竹小片における地上高と曲げヤング係数・曲げ強度・せん断強度の関係を調べた報告^{6, 7)}と同様の結果である。しかしこの既報⁷⁾では、曲げヤング係数 E_b (GPa) と曲げ強度 σ_b (MPa) の関係は $\sigma_b = 14.3E_b$ で表されており、本報での回帰直線式 $\sigma_b = 7.48E_b + 5.7$ とは大きく異なっている。既報⁷⁾は、節間部の梁背3 mmの中実矩形断面の割竹小片に対する通常の曲げ強度値である。一方、本報は節を含む中空断面の丸竹材特有の曲げ破壊 (材軸直交方向の曲げ耐力によって概ね定まる破壊モード³¹⁾) でありながら、簡便のため通常の材料力学の公式から求めた見かけの曲げ強度値である。既報⁷⁾と本報とで回帰直線式が大きく異なったのは、試験体寸法・形状の違いのほか、通常の曲げ強度値と見かけの曲げ強

Fig. 7. Bending properties of bamboo of all bending tests.

度値の違いによるものと思われる。

いずれにせよ木材同様に、丸竹材においてもストレスグレーディングが可能である。

ワイヤーによる引張加力の3点曲げ方式は、これまでの研究結果と矛盾しない結果となっており、簡便な丸竹材の曲げ試験方式といえる。

3.2 縦圧縮試験

マダケ14体中14体が、モウソウチク18体中16体が、球座で支持された加力点側の試験体部分（末口側の

部分）が圧縮強度（最大圧縮応力度）を過ぎた後に曲がり出す屈曲破壊であり、その代表例を Fig. 8 に示す。一方、モウソウチクの2体のみ（外径66 mm, 細長比40, 圧縮強度43 MPa および外径79 mm, 細長比47, 圧縮強度48 MPa）は、竹程が破裂するようにぱっくり割れる圧縮破壊形態であった。

なお試験体の含水率は、マダケが平均56%（範囲35~70%, 変動係数24%）、モウソウチクが平均64%（範囲48~83%, 変動係数17%）であった。

Fig. 8. Typical type of failure in compression tests.

Fig. 9. Relationship between slenderness ratio λ and compression strength σ_c .

Fig. 9 に、細長比と圧縮強度の関係を示す。図中には、部材端が両端ともピン支持と仮定したときと、一端ピン他端固定と仮定したときの 2 本のオイラー曲線も図示している。本試験の方法は、試験体上部を球座で支持し下部を平板上に載せて特別な固定はしていない条件のため、図中の 2 本のオイラー曲線の間に試験結果は入るはずである。しかし、本試験では細長比が 100 以下の範囲であったため、オイラー曲線との関係が不明確となったが、細長比に係らずほぼ一定値となる傾向が見られた。

木材で言うところの樹冠部分の節部では、Fig. 10 (節間の外径が 50 mm 程度のモウソウチク節部の縦断面と横断面の写真) に示したように、ハート型の横断面形状は節の上下で逆転し、さらに節部の縦断面形状や繊維走向が不均一であることは明白であ

Fig. 10. Sectional plan of a node for mosochiku.

り、枝下部分の節部でも不均一なものと思われる。このような節を有する丸竹材の形状および材質の不均一性が偏心モーメントを発生させ、座屈の原因になると思われる。さらに、通直な竹稈を選んだ場合でも、僅かではあるが節間毎に「くの字」に曲っており、この形状特性も偏心モーメントを発生させると思われる。このような偏心モーメントを発生させる特性は、試験体中の節の数が増えるほど顕著に表れることが予想される。

以上のことから、細長比が小さい場合でも、節が数個以上ある実大長さの丸竹材は、座屈長さの影響以外に座屈を起こし易い形状・材質特性を持っており、安定した圧縮強度を測定することは難しいと思われる。

Fig. 11 に縦圧縮試験結果を示す。細長比 100 以下および外径 100 mm 以下の試験体の範囲では、外径との関係において、圧縮剛性、圧縮ヤング係数、最大圧縮荷重との間に強い相関関係（危険率 1% で有意）が認められたが、圧縮強度との間には認められず圧縮強度の平均は竹種に係らず 42 MPa となった。また、圧縮ヤング係数と圧縮強度との間にも相

Fig. 11. Compression properties of bamboo from compression tests.

関は認められなかった。

既報では、マダケ（青竹）の平均外径51 mm かつ節が一つある状態かつ長さ200 mm での縦圧縮試験の場合、圧縮強度の平均値は45 MPa 程度と図示されている²⁶⁾。また、マダケの有節の丸竹（青竹）で試験体長20・50・100・200 mm の圧縮強度は概ね50 MPa と報告がされている²⁸⁾。マダケとモウソ

ウチクの外径100 mm 前後かつ節が一つある状態での縦圧縮試験の場合、圧縮強度の平均値はマダケ62.8 MPa（平均含水率7%）、モウソウチク49.6 MPa（平均含水率7%）および69.2 MPa（平均含水率11%）と報告されている²⁹⁾。モウソウチクを天然乾燥し、乾燥20日後（平均含水率65.7%）と49日後（平均含水率14.5%）と182日後（平均含水率11.9%）に

直径と高さの比率が1:2の試験体（節1個ありと節なしの2種類）を採取して行った縦圧縮試験の場合、圧縮強度は「節あり」と「節なし」との有意差はなく、含水率65.7%のとき平均49.4 MPa、含水率14.5%のとき平均50.8 MPa、含水率11.9%のとき平均61.6 MPaと報告されている³⁶⁾。なお、天然乾燥の含水率65.7%青竹時と含水率14.5%気乾時を比較すると、平均49.4 MPaと平均50.8 MPaのほぼ同じ値となっている。このことから、有節の丸竹材の圧縮強度は、日本における木材の平均気乾含水率15%を上回る含水率状態であれば、同一の強度性能を示すものと思われる。

このような既報^{26, 28, 29, 36)}におけるマダケとモウソウチクの縦圧縮強度値のうち、含水率が15%程度以上かつ最小値に注目すると50 MPa程度であるが、節を数個含む実大の丸竹材（青竹）の長さ1 m前後の短柱または中間柱の縦圧縮強度は、本報の節2個を有して座屈を伴った最大圧縮応力度が平均

42 MPaであったことを考慮して、マダケとモウソウチクとも42 MPa程度と見做すことが安全と思われる。

3.3 振り剛性試験

振り剛性試験結果を Fig. 12に示す。なお試験体の含水率は、マダケが平均70%（範囲44~131%、変動係数49%）、モウソウチクが平均54%（範囲26~87%、変動係数35%）であった。

Fig. 12から、曲げ性能および縦圧縮性能と同様に、竹種に係わらず振りスパン中央部の外径と振り剛性の間には強い相関関係（危険率1%で有意）が認められた。また、外径とせん断弾性係数の間には、モウソウチクでは強い負の相関関係（危険率1%で有意）が認められ、マダケでは外径の範囲が狭いため明確な傾向は分らなかった。

モウソウチクのせん断弾性係数は、外径が小さいほど、言い換えると、竹稈の地上高が高い位置ほど大きな値を示した。このことは、モウソウチクでは

Fig. 12. Torsional properties of bamboo from twisting stiffness tests.

Legend: J : polar moment of inertia, G : shear modulus.

Notes: D , R^2 , **: See Fig. 7.

Fig. 13. Relationship between external diameter D and Young's modulus E_b , E_c .

Notes: E_b , E_c , R^2 , **: See Fig. 7 and Fig. 11.

地上高が高くなるとともにせん断強度も増大する傾向があること⁶⁾と呼応している。一方、マダケの場合、外径30 mm以下の丸竹では試験体を作製することができず、結果として試験体数が少なくなり、マダケのせん断弾性係数の傾向を把握できなかった。

本報でのマダケとモウソウチクのせん断弾性係数は2.0~4.0 GPaの範囲であった。一方、節間から採取した小片について振動試験によりせん断弾性係数を求めた研究では、マダケ1.47 GPa、モウソウチク1.63 GPaと報告²¹⁾されており、節を含む丸竹材の本試験結果とは大きく異なっている。この差は、丸竹材の節がせん断力に対して補強効果を持っているために現れたためと思われる。

3.4 引張ヤング係数の検討

本報では、丸竹材の引張試験は装置上難しいため実施していない、かつ過去に節を含む丸竹材の引張試験例はない。モウソウチクの無節の割竹小片から厚さ1.5 mm肉厚の試片と肉厚方向に2分割した試片と肉厚そのままの試片との比較から、試片の稈壁厚が厚くなると引張強度は小さくなることが報告されている¹⁸⁾ことから、節を含む稈壁厚そのままでの引張試験が重要である。しかし、節を含む割竹小片の引張試験報告^{22, 23)}は稈壁厚1~3 mmの試験片であり、稈壁厚そのままと思われる試験報告はモウソウチクの1例³⁵⁾のみしかない。そこで、本報の曲げ試験結果と縦圧縮試験結果に基づき、実測値のない丸竹材の引張ヤング係数について検討する。

本試験で得られた3点曲げ方式の曲げヤング係数と縦圧縮ヤング係数を比較すると、Fig. 13のとおり、マダケとモウソウチクで回帰直線は一致しないものの、曲げヤング係数と縦圧縮ヤング係数の値は概ね一致している。曲げヤング係数は圧縮ヤング係数と引張ヤング係数の複合であるから、曲げと圧縮とが概ね一致していることは、木材同様に、丸竹材のヤ

ング係数は曲げ $\approx$ 圧縮 $\approx$ 引張と見做しても、実用上は差し支えないと思われる。

4. 結 論

竹材を、軽くて強い丸竹のまま乾燥処理や油抜き処理等を行わず、耐久性の低さが問題とならない仮設構造物の部材として利用することは、簡便かつ合理的な利用方法である。この考えに従い、丸竹材を仮設構造物の部材として利用するため、市販のマダケとモウソウチクの青竹について強度性能を測定した。このとき、丸竹材の外径 D の実測値と内径 d の回帰式($d=0.81D$)¹⁾を用いて断面性能を計算し、次にその断面性能から弾性係数と強度を算出した。

丸竹材の曲げ試験方法は、スパン中央の節にワイヤー加力を行い、試験体の材端は節止めとし余長を十分にとった上で、せん断スパンと外径の比が7倍以上の3点曲げ方式が、簡便かつ安定した結果が得られる方法であった。

含水率15%以上の丸竹材は、含水率に依存しない曲げ強度性能を示した。既報の試験結果³⁶⁾も考慮すると、圧縮・引張・せん断の強度性能も同様の傾向を示すと思われる。

丸竹材の曲げ・縦圧縮・振りの強度性能は、丸竹材の外径との間に強い有意な相関関係が認められた。また、丸竹材の引張試験は行わなかったが、曲げ試験と縦圧縮試験の結果から、木材同様に、丸竹材のヤング係数は曲げ $\approx$ 圧縮 $\approx$ 引張と見做すことができた。

つまり、限られた産地と試験体数の結果からではあるが、丸竹材の強度性能は外径 D (mm)を説明変数とする回帰式で表すことができた。この回帰式をTable 1に示す。

なお、本報ではせん断強度と引張強度を求めているが、接合部のデータを除いて考えると、半剛節

Table 1. Empirical formula for the relationship between external diameter D (mm) and strength properties.

Strength properties		madake	mosochiku	Remarks
Yang's modulus $E(=E_b \approx E_c \approx E_t)$	(GPa)	$E = -0.264D + 29.6$	$E = -0.111D + 22.9$	Fig.13
Shear modulus G	(GPa)	—	$G = -0.0151D + 4.42$	Fig.12
Flexural rigidity $E \cdot I$	(N·m ²)	$\text{Log} E \cdot I = 3.49 \text{Log} D - 2.49$		Fig. 7
Axial rigidity $E \cdot A$	(kN)	$E \cdot A = 403D - 7885$		Fig.11
Torsional rigidity $G \cdot J$	(kN·mm ²)	$\text{Log} G \cdot J = 3.90 \text{Log} D - 6.60$		Fig.12
Maximum bending moment $M_{\max}$	(N·m)	$\text{Log} M_{\max} = 2.20 \text{Log} D - 0.95$	$\text{Log} M_{\max} = 2.47 \text{Log} D - 1.23$	Fig. 7
Bending strength σ_b	(MPa)	$\text{Log} \sigma_b = -0.796 \text{Log} D + 3.31$	$\text{Log} \sigma_b = -0.534 \text{Log} D + 3.02$	Fig. 7
Maximum compression load $P_{\max}$	(kN)	$P_{\max} = 1.40D - 39.8$		Fig.11
Compression strength σ_c	(MPa)	42		Fig.11

立体骨組の構造解析プログラム³⁷⁾への入力データとして必要な剛性値が高い精度で回帰式から推定可能であるため、丸竹材による仮設構造物設計における大きな支障とはならないと考えられる。

以上のことから、簡便な丸竹材の外径測定という作業だけで、現代の構造設計手法に則った竹製仮設構造物の構造解析が可能であることを確認した。今後は、多くの産地の丸竹材の強度データを蓄積して回帰式による強度性能の推定精度を高め、また定量的に評価できる接合方法を確立することにより、具体的な部材設計を可能とすることが重要と思われる。

謝 辞

本研究の一部は、平成23年度(財)富山第一銀行奨学財団助成研究として行った。各種の実験をお手伝いいただきました富山大学芸術文化学部生(当時)の矢島なつき氏、吉野真希氏、川崎弥生氏に感謝いたします。

文 献

- 堀江秀夫：丸竹材の強度特性(第1報) 丸竹材の断面形状の推定. 木材学会誌 **66**(2), 87-92 (2020).
- “木材工業ハンドブック 第5版”, 農林省林業試験場編, 丸善, 東京, 1967, pp. 907-925.
- “日本産主要竹類の研究”, 青木尊重編, 葦書房, 福岡, 1987, pp. 27-59.
- ISO22157-1: “Bamboo – Determination of physical and mechanical properties – Part 1: Requirements”, the International Organization for Standardization (2004).
- JIS Z 2101: “木材の試験方法”, 日本規格協会 (2009).
- 鈴木 寧：竹材の研究 第1報 伊豆産モウソウチクの部分による材質の相違. 東京大学農学部演習林報告 **36**, 135-156 (1948).
- 鈴木 寧：竹材の研究 第3報 本邦各地産モウソウチクの竹程内比重分布並びに曲げ強度分布に就いて. 東京大学農学部演習林報告 **36**, 187-203 (1948).
- 鈴木 寧：竹材の研究 第4報 モウソウチクの節の曲げ強度に就いて. 東京大学農学部演習林報告 **36**, 205-223 (1948).
- 太田 基：竹材の性質に関する研究(第7報) 竹片の構成因子と比重及び圧縮強度. 九州大学農学部演習林報告 **19**, 25-47 (1951).
- 太田 基：竹材の性質に関する研究(第8報) 竹の節間内に於ける材質の変化. 九州大学農学部演習林報告 **21**, 71-82 (1953).
- 太田 基：竹材の性質に関する研究(第9報) 竹材の圧縮強度と含水率との関係. 九州大学農学部演習林報告 **22**, 87-108 (1953).
- 太田 基：竹材の性質に関する研究(第10報) 竹片の引張強度と含水率との関係. 九州大学農学部演習林報告 **23**, 155-164 (1954).
- 太田 基：竹材の性質に関する研究(第11報) 膨潤及び乾燥過程から求めた竹材の繊維飽和点について. 九州大学農学部演習林報告 **24**, 61-72 (1955).
- 太田 基：竹材の性質に関する研究(第13報) 竹材の剪断強度と含水率との関係. 九州大学農学部演習林報告 **25**, 121-131 (1955).
- 太田 基：竹材の性質に関する研究(第15報) 強度的性質, 比重及び壁厚相互間の関係. 九州大学農学部演習林報告 **29**, 1-34 (1957).
- 上田恒司：モウソウチクの強度性能 程壁内のヤング係数分布について. 北海道大学農学部演習林研究報告 **37**(3), 817-836 (1980).
- 尾田十八：竹材の力学的構造と形態. 機械学会論文集 **46**(409), 997-1006 (1980).
- 中馬 丞, 広橋光治, 大釜敏正, 笠原康弘：モウソウチクの複合構造と引張特性. 材料 **39**(442), 847-851 (1990).
- 矢頭盛吾, 井上正文, 田中 圭：竹材の引張強度試験法に関する実験的研究(その1) 引張試験片の形状が強度性能に及ぼす影響. 日本建築学会九州支部研究報告 **39**, 445-448 (2000).
- 大内成司, 中原 恵, 阿部 優, 寒竹愼一：同一竹林内における竹材の曲げ強度特性について. 大分県産業科学技術センター研究報告 **2002**, 108-111 (2003).
- Kubojima, Y., Inokuchi, Y., Suzuki, Y.: Shear modulus of several kinds of Japanese bamboo by flexural vibration test. *J. Wood Sci.* **56**, 64-70 (2010).
- 木村文則, 谷口与史也：工芸用割竹の引張特性と推定指標に関する実験的研究. 日本建築学会構造系論文集 **75**(650), 839-848 (2010).
- 金井隆太郎, 永井托生, 新谷真人一：竹材の構造物への利用に関する基礎的研究. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, 2011, pp. 131-132.
- 林 知行, 寒竹愼一, 軽部正彦, 原田真樹：竹

- 材の圧縮・曲げ強度に及ぼす円孔の影響. 木材工業 54(9), 420-425 (1999).
- 25) K.F.Chung, W.K.Yu: Mechanical properties of structural bamboo for bamboo scaffoldings. *Engineering Structures* 24, 429-442 (2002).
- 26) 藤川将登, 田中 圭, 宮内裕之, 角上靖和, 足達浩一, 井上正文: 丸竹の材料特性に関する基礎研究(その1) 圧縮実験及び曲げ実験. 日本建築学会九州支部研究報告 43, 345-348 (2004).
- 27) 藤川将登, 角上靖和, 足達浩一, 田中 圭, 井上正文: 丸竹の材料特性に関する基礎研究(その2) 竹の含水率が圧縮及び引張強度に与える影響. 日本建築学会九州支部研究報告 44, 457-460 (2005).
- 28) 田中 圭, 藤川将登, 角上靖和, 足達浩一, 井上正文: 丸竹の材料特性に関する基礎研究(その3) 圧縮強度及び座屈の挙動に関する考察. 日本建築学会九州支部研究報告 44, 461-464 (2005).
- 29) 池 智大, 依田浩敏: 竹の建築構造材利用のための実験的研究. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, 2007, pp. 33-34.
- 30) 額田直子, 江島諒介, 陶器浩一: 丸竹の曲げ耐力に関する実験的研究(その1) - 材料実験および部材としての曲げ実験. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, 2010, pp. 55-56.
- 31) 江島諒介, 額田直子, 陶器浩一: 丸竹の曲げ耐力に関する実験的研究(その2) - 材料強度と部材としての曲げ耐力との関係. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, 2010, pp. 57-58.
- 32) 滝本裕美, 松元 浩: タケ材の実大曲げ試験. 日本木材学会中部支部大会講演要旨集, 三重, 2012, pp. 64-65.
- 33) 澤 修平, 生駒岳大, 額田直子, 永井拓生, 陶器浩一: 丸竹曲げによる空間構造の設計と施工 その2 引張耐力・曲げ耐力の算定. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, 2012, pp. 699-700.
- 34) 成尾建治, 澤 修平, 永井拓生, 陶器浩一: 竹の構造材料としての特性に関する基礎的研究 その1 竹の伐採時期および養生期間と材料特性の関係. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, 2013, pp. 1093-1094.
- 35) 永井拓生, 陶器浩一: 竹の設計強度の算定および人力設計が可能な接合法の開発 - 竹を構造材料として用いた応急仮設建築物の設計・施工の実例 その2 -. 日本建築学会技術報告集 22(52), 925-928 (2016).
- 36) 定成政憲, 吉田競人: 人工乾燥されたモウソウチクの長期暴露試験後の圧縮強度と色彩の変化. 技能科学研究 35(1), 25-29 (2019).
- 37) 竹村富男: “生物系のための構造力学 構造解析とExcelプログラミング”, 海青社, 大津, 2009, pp. 125-190.