

ASME V&V40に基づいた 木材の曲げ試験に対するV&V

Verification and Validation for bending test based on ASME V&V40

福谷勇輝¹⁾, 増田悠星¹⁾, 棗田智香子¹⁾, 倉田和幸²⁾, 松井和己¹⁾, 都筑新³⁾,
三浦孝広⁴⁾, 山本剛大⁵⁾, 杉山裕文⁶⁾, 渡邊大⁷⁾, 呂学龍¹⁾, 山田貴博¹⁾

FUKUTANI Yuki, MASUDA Yusei, NATSUMEDA Chikako, KURATA Kazuyuki,
MATSUI Kazumi, TSUZUKI Arata, MIURA Takahiro, YAMAMOTO Takeki, SUGIYAMA Hirofumi,
WATANABE Dai, LYU Xuelong & YAMADA Takahiro

- 1) 横浜国立大学大学院環境情報学府 (E-mail: kzm@ynu.ac.jp)
- 2) テルモ株式会社 (E-mail: Kazuyuki_Kurata@terumo.co.jp)
- 3) ダッソー・システムズ株式会社 (E-mail: arata.tsuzuki@3ds.com)
- 4) サイバネットシステム株式会社 (E-mail: t-miura@cybernet.co.jp)
- 5) 広島大学大学院先進理工系科学研究科 (E-mail: takeki@hiroshima-u.ac.jp)
- 6) 山梨大学大学院総合研究部 (E-mail: hirofumis@yamanashi.ac.jp)
- 7) 芝浦工業大学システム理工学部 (E-mail: dai-wata@shibaura-it.ac.jp)

Wood, a biomaterial, exhibits variability in its mechanical properties. In this study, the objective is to quantify the bending Young's modulus variability of wood based on the results obtained from the material tests. Differences in Young's modulus in bending due to different derivation methods using strain and displacement are also discussed. understanding the bending Young's modulus variability of wood should be basis in any mechanical simulations for wooden products.

Key Words : 4-Point Bending Test, White Woods, Uncertainty

1. はじめに

シミュレーション結果の品質保証における基本的な考え方に V&V (Verification (検証) and Validation (妥当性確認)) がある。本研究では木工椅子を題材として、椅子の変形をシミュレーションで予測し実験と比較してシミュレーションモデルの妥当性を確認する^[1]。特に、ASME V&V-10^[2]が提示する階層型アプローチにおける最下層である材料試験を取りあげて、木材の物性値を同定するための曲げ試験に対するV&Vプロセスを実施する。

木材の機械的特性については、JIS Z2101:2009^[3]や構造用木材の強度試験マニュアル^[4]において様々な試験方法およびヤング係数の導出方法が規定されているが、治具の設置方法や荷重の負荷方法の詳細までは記述されていない。実験で得られる材料定数のばらつきは材料特性そのもののばらつきのみであることが理想であるが、実際には試験片形状の違いや治具との摩擦による影響が含まれる可能性がある。それらの影響を極力排除、あるいは適切に評価することが重要である。本稿では、まずは等方で均質な材料と考えられるポリアセタール材を用いて予備実験を実施し、材料試験方法の妥当性を確認する。

木材の曲げヤング係数を求める際には、文献^[3,4]ではBernoulli-Euler梁の曲げ理論の式を利用したものが提示されている。しかしながら、木材のせん断弾性係数はヤング係数に比べて非常に小さいため、断面のせん断変形を無

視できないと考える。そこで本研究では木材の物性値を決める際にTimoshenko梁の曲げ理論を用いる方法と比較して、文献で規定されている手法の妥当性を確認する。さらに、Timoshenko梁理論を用いることで、曲げ試験で観測されたたわみを曲げ変形によるものとせん断変形によるものに分解して、軸変形とせん断変形それぞれに関する材料パラメータを決定する。

2. 試験条件

(1) 試験体

本研究では曲げヤング係数を評価するための4点曲げ試験を採用した。JIS規格に準じて試験体の寸法は20×20×280 [mm]の直方体として作成した。一般にホワイットウッド材として販売されている欧州唐檜の2x4製材60本から、1体、または2体ずつ計100体の試験体を採取し、すべての寸法を0.01 [mm]単位で計測した。このとき、試験体の概形を変化させるような欠点は含まないように配慮したが、試験体にまったく欠点が存在しない無欠点試験体ではない。また、試験体作成時には柁目や板目などの木取りは考慮していないため、これらが試験結果として得られる機械特性をばらつかせる要因になると考えられる。

(2) 試験機

曲げ試験の実験装置をFig.1に示す。試験にはテンシロン万能試験機(RTF-1350, 荷重容量50 [kN])を使用した。

支点間距離を240 [mm]、荷重点間距離は支点間距離の1/3である80 [mm]として、曲げ試験を行うための治具を設置した(Fig.2). なお、この治具上部には万能試験機とは独立したロードセルを設置できるようにしており、本実験では荷重容量50 [kN]のロードセル (9E01-L23-50KN)を設置した. 木材の下面のたわみを測定するために支点間中央にレーザー変位計(KEYENCE IL-065)を設置し、载荷部の変位はカンチレバー型の変位計で計測する. また、試験体中央のひずみの曲げ成分、軸成分を計測するために、試験体中央の上下面にそれぞれひずみゲージ(東京測器研究所製、ゲージ長 5mm)を貼付してひずみを計測する.

3. ポリアセタール材の曲げ試験

曲げ試験の妥当性を確認するための予備実験として、均一性材料であるポリアセタール材(POM, ヤング率約3 [GPa])に対する曲げ試験を行った. 予備実験では以下の2点に注目した.

- ・純曲げ状態になるか？ すなわち支持点・载荷点の拘束により軸成分の変形が生じていないこと
- ・純曲げの仮定において、中央のたわみと上下面のひずみそれぞれから算出する曲げヤング係数が一致するか.

(1) 純曲げ変形

負荷・除荷 1 サイクルにおいて、試験片上下面に貼り付けたひずみゲージそれぞれから得られるひずみを軸成分 ε_a と曲げ成分 ε_b に分解する.

$$\varepsilon_a = (\varepsilon_{\text{low}} + \varepsilon_{\text{up}}) / 2 \quad (1)$$

$$\varepsilon_b = (\varepsilon_{\text{low}} - \varepsilon_{\text{up}}) / 2 \quad (2)$$

この式を用いて評価した ε_a と ε_b の時間変化をFig.3に示す. 曲げ成分の最大値が5570 μST であるのに対して、軸成分の最大値は65 μST と十分に小さく、载荷部スパンにおいて純曲げ状態にあると判断した.

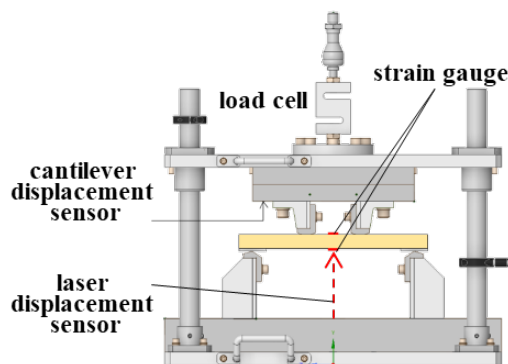


Fig.1 Bending test equipment

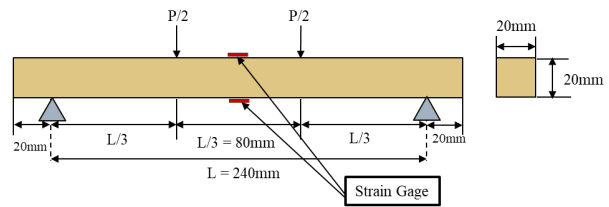


Fig.2: Illustration of dimensions for bending test

(2) たわみ、曲げひずみから算出する曲げヤング係数

構造用木材の強度試験マニュアル^[4]では、木材の4点曲げ試験における試験片中央のたわみとひずみは、それぞれBernoulli-Euler梁の理論を用いて次のように規定されている.

たわみ

$$w_{\text{center}} = \frac{\frac{L}{3} \left(3L^2 - 4 \left(\frac{L}{3} \right)^2 \right) P}{48I} = \frac{23}{1296} \frac{PL^3}{EI} \quad (3)$$

ひずみ

$$\varepsilon = \frac{h}{2I} \frac{M}{E} = \frac{Lh}{12I} \frac{P}{E} \quad (4)$$

ここで、 L は支点間距離、 I は断面2次モーメント、 P は荷重、 w_{center} は試験片中央のたわみ量、 h は試験片高さ、 ε は上下面のひずみゲージから得られる曲げ成分である. 上式から载荷時に得られる上下面のひずみ、試験体中央のたわみからそれぞれヤング係数の導出をする. それぞれのヤング係数の導出式を以下に示す.

たわみから

$$E_w = \frac{\frac{L}{3} \left(3L^2 - 4 \left(\frac{L}{3} \right)^2 \right) P}{48I} \frac{P}{w_{\text{center}}} = \frac{23L^3}{1296I} \frac{P}{w_{\text{center}}} \quad (5)$$

ひずみから

$$E_b = \frac{Lh}{12I} \frac{P}{\varepsilon} \quad (6)$$

このようにして求めたヤング係数は $E_w = 2.36 \text{ GPa}$, $E_b = 2.32 \text{ GPa}$ であり、両者の差は1%程度であるため一致していると判断できる. つまり、ここでの予備実験から、実験装置が適切に4点曲げ試験を実施できること、すなわち実験装置の妥当性が確認できた.

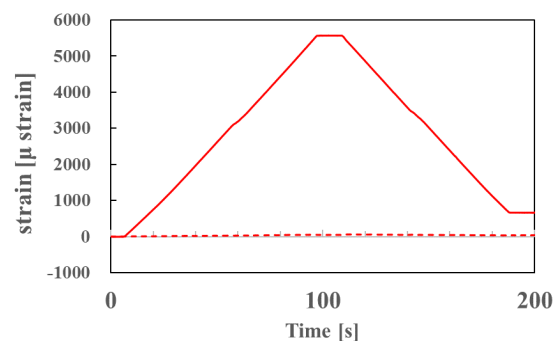


Fig. 3 Strain components in bending test

4. 木材の曲げ試験

2.1節で述べた木材の試験体100体に対して4点曲げ試験を行った。JIS Z2101で比例限度領域とされている8~17 [GPa](荷重換算でおよそ 200 ~ 400 [N])ではなく、木材に対する事前試験の荷重-たわみ線図から、比例領域が400~800[N]の範囲であると判断し、この区間における荷重・たわみ・ひずみそれぞれの変化量を用いて曲げヤング係数を評価した。この荷重範囲に対して式(5)、ならびに式(6)を適用して評価した E_w (平均 10.68 [GPa], 標準偏差 2.31 [GPa], CV 0.216), E_b (平均 13.27 [GPa], 標準偏差 4.32 [GPa], CV 0.325)の度数分布をFig. 4に、 E_w と E_b の相関関係をFig.5に示す。今回実施した木材の曲げ試験の中では、 E_w に比べ、 E_b のほうが大きな値となる傾向が見られる。また、2つの方法で求めたヤング係数が一致した試験片はほとんど存在しなかった。

5. 木材のたわみ変形に対する考察

実験結果より、木材のたわみはBernoulli-Euler 梁の曲げ理論を用いて求めたたわみ (式 (5)) より大きくなることからわかる。そこで曲げ試験による木材のたわみは曲げ変形によるものに加え、断面のせん断変形が寄与していると考えられる。

木材は方向により力学的性質が異なり、木目に対して繊維方向(L)、半径方向(R)、および接線方向(T)を主軸とする直行異方性体として扱われることが多い^[5]。文献では曲げ試験で評価できる繊維方向のヤング係数(E_L)に対して断面のせん断係数(G_{RT})が 1/1000 程度と非常に小さいことが指摘されている。したがって、せん断変形による試験片のたわみを無視することができない可能性を確認する。

曲げ試験によるたわみ変形を曲げ変形によるものとせん断変形によるものに分けて考えるためにTimoshenko梁の曲げ理論を用いる。Timoshenko梁理論による4点曲げ試験のたわみを次式に示す。

① $0 < x < \frac{L}{3}$ のとき

$$w_1(x) = -\frac{1}{12} \frac{P}{EI} x^3 + \frac{1}{18} \frac{PL^2}{EI} x + \frac{1}{2} \frac{EI}{GA} \frac{P}{EI} x \quad (7)$$

② $\frac{L}{3} < x < \frac{L}{2}$ のとき

$$w_2(x) = -\frac{1}{36} \frac{P}{EI} \{(1-x)^3 + x^3\} + \frac{2}{81} \frac{PL^3}{EI} + \frac{1}{6} \frac{EI}{GA} \frac{PL}{EI} \quad (8)$$

ここで I は断面2次モーメント、 P は荷重、 A は断面積である。式(1)の右辺第1項、第2項はそれぞれ曲げ変形によるたわみ、右辺第3項はせん断変形によるたわみに対応する。断面内のせん断変形を一樣な場であると仮定し、せん断項の補正係数は1とした。せん断変形によるたわみが曲げ変形によるたわみに対して影響が小さい場合、右辺第1項、第2項が残り、Euler梁による4点曲げ試験の理論解と一致する。また、今回用いた試験片による中央のたわみは次式で表せる。

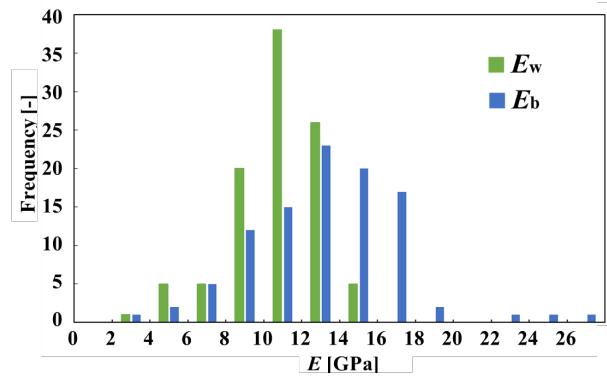


Fig. 4 Histogram of Elastic Modulus

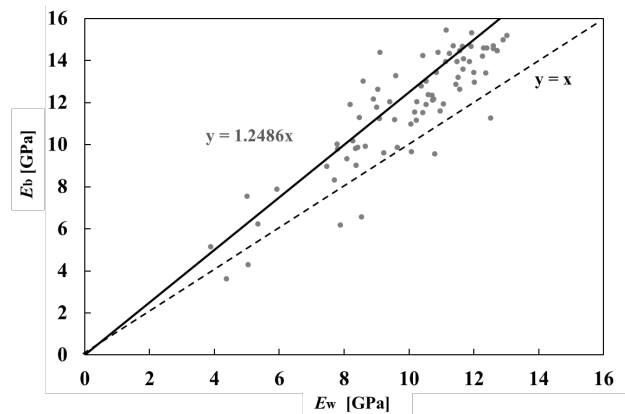


Fig.5 Relationship b/w E_w - E_b

$$\begin{aligned} w_{\text{center}}\left(\frac{L}{2}\right) &= \frac{23}{1296} \frac{PL^3}{EI} + \frac{1}{6} \frac{EI}{GA} \frac{PL}{EI} \\ &= \frac{23}{1296} \frac{PL^3}{EI} + \frac{1}{6} \frac{EI}{GA} \frac{PL^3}{EI} \\ &= \frac{23}{1296} \frac{PL^3}{EI} + \frac{1}{6} \frac{EI}{GA} \frac{PL^3}{EI} \end{aligned} \quad (9)$$

上式より曲げ変形とせん断変形によるたわみの寄与は $\frac{PL^3}{EI}$ の係数を比べることからわかる。ここで試験体が等方弾性体と仮定するとヤング係数とせん断係数の比はポアソン比を用いて次の式で表される。

$$\frac{E}{G} = 2(1 + \nu) \quad (10)$$

等方弾性体では $E/G = 3$ 程度でありこのとき曲げ成分に対するせん断成分は $1/60$ 程度であり無視できる程に小さい。しかし文献値による $E/G = 1000$ を考えると曲げ成分に対するせん断成分は $125/23$ とたわみの寄与分はとても大きくなるため、4点曲げ試験においてせん断変形によるたわみを無視できないと判断する。

6. 樹脂の曲げ試験における E/G

POM材の試験片による4点曲げ試験から、荷重と中央のたわみの関係・ひずみの曲げ成分とモーメントの関係を

Fig.6, Fig.7に示す. 2つのグラフから100N ~ 400Nの荷重範囲において線形関係が成り立つと判断し, この範囲のひずみとモーメントからヤング係数 E を同定した. 同定したヤング係数から式(9)右辺第1項より100N ~ 400Nの荷重増分に対する曲げ変形によるたわみ増分を計算する. その後, 実験で計測したたわみ増分と曲げ変形によるたわみ増分から式(9)を用いれば E/G が評価できる.

均一性材料であるポリアセタール材を等方弾性体と仮定すると E/G はポアソン比を用いて式(10)で表せる. そこで樹脂材の中央上下面に2軸のひずみゲージを貼り, 軸方向のひずみとそれに垂直な方向のひずみを計測することでポアソン比を評価した.

式(9)を用いて求めた E/G と実験から得られたポアソン比, 等方性を仮定したときの E/G をTable.1に示す.

2つの導出から求めた E/G が同じオーダーであるため, 式(9)を用いてせん断変形に関するパラメータ E/G を求めることが妥当であると判断する.

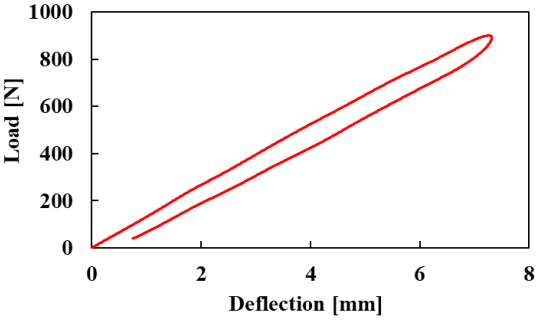


Fig. 6 Load vs Deflection

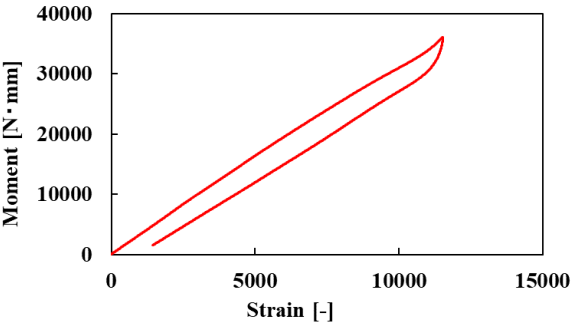


Fig. 7 Moment vs Strain

Table.1 Comparison of E/G

E/G by eq.(9)	1.79
Poisson's ratio	0.39
E/G by eq.(11)	2.78

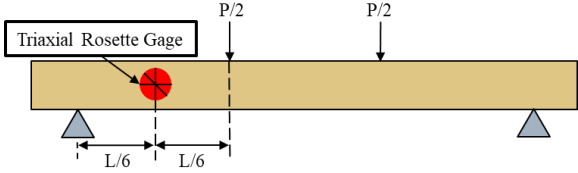


Fig.8 Position of Triaxial Rosette Gage

7. 木材の曲げ試験

・木材のせん断変形

木材のせん断変形が無視できないことを検証するため, Fig.8に示すように試験体の支点と載荷点の間の面に3軸ひずみゲージを貼り付け, せん断変形の様子を観察する. 800Nの載荷, 除荷の1サイクルにおけるそれぞれの最大せん断ひずみとゲージの位置におけるモーメントの関係をFig.9に示す. 等方弾性体と仮定したPOMに比べ木材のせん断ひずみが多いことから, 5節で述べたように木材のせん断変形がたわみに与える影響を考慮したパラメータの決定が必要であると判断した.

・物性値の推定

4節で行った曲げ試験の実験結果に対して, 試験片中央で計測したひずみから式(3)を用いてヤング係数 E を求める. また, 6節で行った手順と同様の計算からせん断変形の寄与に関するパラメータ E/G を決定する. 実験から得られたヤング係数 E と E/G の度数分布をFig.10, Fig.11に示す.

E/G は20~80に分布しているものが多く, せん断変形によるたわみが曲げ変形によるたわみの1/10~4/10程度であることを確認した.

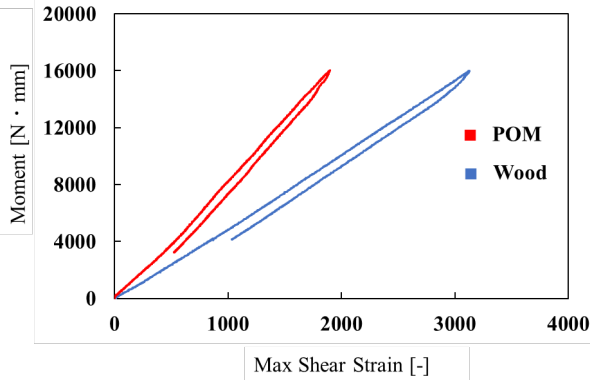


Fig. 9 Max Shear Strain b/w POM and Wood

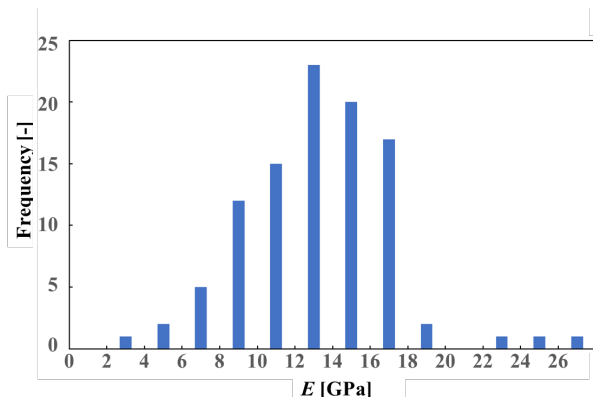
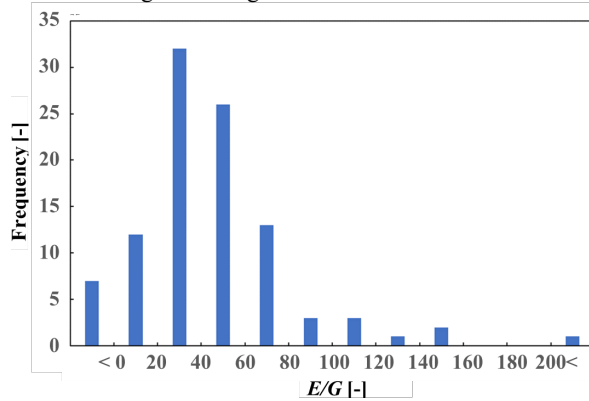


Fig. 10 Histogram of Elastic Modulus

Fig. 11 Histogram of E/G

8. おわりに

本稿では V&V プロセスの最下層である材料試験における曲げ試験の妥当性を確認した。式(5)の梁理論式は、載荷時の軸ひずみや断面の形状変化などを考慮していない点から生じたものであると考え、Timoshenko梁理論を用いて実験の結果を評価した。今後木材のシミュレーションにこれらの結果を適用する際に、どのように定量化するのが適当であるかなどの検討をする。

参考文献

- [1] 松井和己, 倉田和幸, 三浦孝広, 都筑新, 渡邊大, 山本剛大, 杉山裕文, 棗田智香子, 山田貴博: ASME V&V40 に基づいた木製椅子に対するシミュレーションの品質保証, 計算工学講演会論文集, 27, 2022.
- [2] ASME: *ASME V&V-10 2019 Standard for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics*, ASME 2019.
- [3] 日本規格協会, JIS Z 2101:2009 木材の試験方法, 2009.
- [4] (公財)日本住宅・木材技術センター: 構造用木材の強度試験マニュアル, 2011.
- [5] 日本木材学会編: 木質の物理, 文永堂出版, 2007.