

VVUQプロセスにおいて何を比較すべきか？

What Should be a Comparator in VVUQ processes?

松井和己¹⁾, 森茂智彦^{1,2)}, 山田貴博¹⁾

Kazumi Matsui, Tomohiko, Morimo and Takahiro Yamada

1) 博(工) 横浜国立大学大学院環境情報研究院 准教授

(〒240-8501 横浜市保土ケ谷区常盤台79-7, E-mail: kzm@ynu.ac.jp)

2) 修(工) 岐阜県生活技術研究所 研究員 (〒506-0058 岐阜県高山市山田町1554)

In the validation process, in which simulation and experimental results are compared, we discuss the statistics of the physical quantities to be compared. Generally, simulations often use average values obtained from material tests, but it is often difficult to prepare sufficient samples of experimental results to compare with these. In particular, for materials with large individual variations, errors can become apparent when comparing such different statistics, so we present appropriate statistics.

Key Words : Verification & Validation, Uncertainty Quantification, Material Test, Wood

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。筆者らはこれまでに木工椅子を題材としてより簡単な事例でASME V&V-40[1]に基づくV&V プロセスを示してきた[2]。ASME V&V-10[3]が提示する階層型アプローチにおける最下層は材料試験であるが、木材については現代の数値シミュレーションに耐えうるモデルに対応した材料パラメータを同定する手法が確立されているとはいいがたい。

木材の機械的特性については、JIS Z2101:2009[4]などにおいて様々な試験方法およびそれぞれに応じたヤング係数の導出方法が規定されている。木材は自然由来の細胞質な材料であるため、特に個体差や機械的特性の異方性が強いことが広く知られており[5]、材料を使用する状況に応じて適切な機械的特性で表現しようとするものであると考えられる。しかしながら、このような直交異方性の弾性特性を表現するためには、少なくとも9個の材料パラメータが必要になるにもかかわらず、これらを網羅的に同定する手法は提案されていない。一方で、木材の示す力学的性質は変動性が大きく、その材質にもむらが多いので、あまり複雑な表現をしても意味がないという指摘もある[6]。

本稿では、筆者らがこれまでに実施してきたホワイトウッド材に対する各種材料試験をまとめ、木製品の力学挙動を評価する数値シミュレーションを3次元ソリッド要素で実施するために必要な材料特性を議論する。

2. 圧縮試験

木材の機械的特性を評価する材料試験のうち、最も簡単なものが圧縮試験である。木材が有する異方性に応じて、縦圧縮試験(繊維方向の圧縮試験)と横圧縮試験(繊維

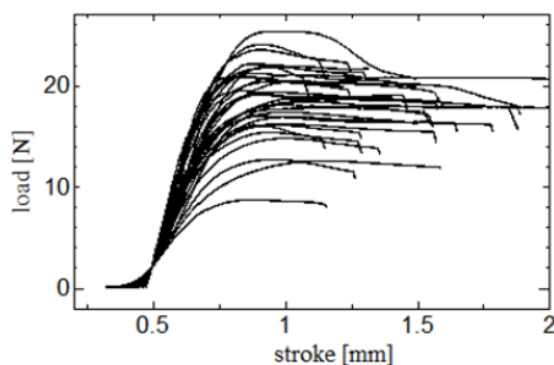


図-1 縦圧縮試験の荷重・変位関係

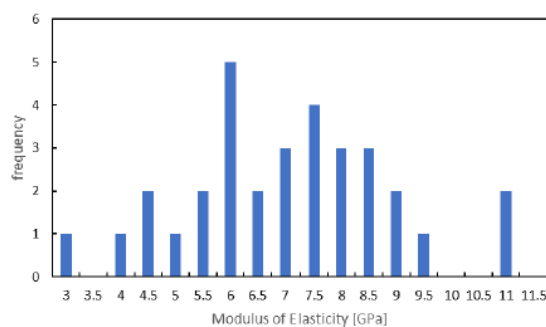


図-2 縦ヤング係数の分布

維方向に直交する2方向に対する圧縮試験)がJIS Z2101に規定されている。

(1) 縦圧縮試験

JIS Z2101で規定された縦圧縮試験の手順に従って、正方形断面の一边20 mm、繊維方向長さを40 mmとした試験片を各製材から1本ずつ、計32体作成した。

荷重-変位関係を図-1に示す。この応答のうち線形と判断できる範囲から算出したヤング係数(縦弾性係数)のヒストグラムを図-2(平均 7.29 GPa, 標準偏差1.82 GPa, 変動係数 0.25)である。たここで得られた結果は正規性

表-1 横弾性係数の試験結果

製材	A	B	C	D
試験体数	37	28	40	21
平均 [MPa]	102	232	359	162
標準偏差 [MPa]	31.2	59.2	157.6	77.8
変動係数	0.307	0.255	0.438	0.481

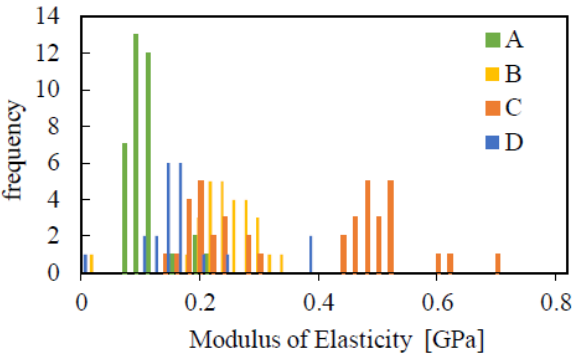


図-3 横弾性係数のヒストグラム

の検定 ($p < 0.05$) により、正規分布に従わないと判断した。

(2) 横圧縮試験

JIS Z2101[5]で規定された横圧縮試験の手順に従って、繊維方向に直交する向きに高さ（45 mm）を取り、1辺の長さを15 mmとする正方形断面となるように試験片を切り出した。横圧縮試験では、剛性が木目の影響を強く受けると推測して同じ製材内でも比較するため、1本の製材から試験片を40 体ずつ、計160 体ほど作成した。なお、製材内の採取箇所は隣同士で連続的になるようにした。

これらの試験片に対して、荷重容量5 kNのロードセル（PSD-S1-5kN）を設置し、クロスヘッドの移動速度を1 mm/min、荷重の上限300 Nで実験を行った。横圧縮試験の初回の載荷では木目部分ですべりが見られたため、除荷時の荷重－変位関係における線形部分からヤング係数（横弾性係数）を算出した。明瞭な線形応答が確認できなかった試験体についてはデータ整理の対象外とした。横弾性係数を製材ごとにまとめたものを表-1に、全試験体から求めた横弾性係数を製材ごとに整理しながら作成したヒストグラムを図-3に示す。

3. 曲げ試験

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体の試験体を採用し、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りうる。

表-2 曲げ弾性係数の比較

弾性係数	E_w	E_b
試験体数	100	100
平均 [GPa]	10.7	13.3
標準偏差 [GPa]	2.31	4.32
変動係数	0.216	0.325

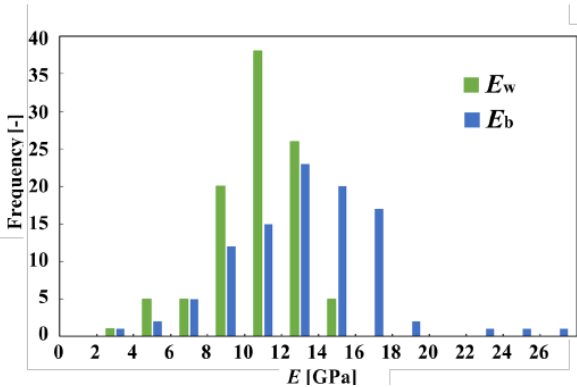


図-4 曲げ弾性係数のヒストグラム

100体の試験体に対して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・たわみ関係から求めた曲げ弾性係数（たわみ、 E_w ）、モーメント・曲げひずみ関係から求めた曲げ弾性係数（曲げ、 E_b ）それぞれの変化量を用いて曲げヤング係数を評価した。ここから得られた曲げヤング係数のヒストグラムを図-4に示す。また、それぞれの統計量を表-2に示す。

ここで示した曲げ試験では、 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存在していない。

4. おわりに

同じ製材のほぼ同じ場所から採取した試験体であっても、軸方向のヤング率にそうとする縦弾性係数と曲げヤング係数がまったく一致しないことが確認できた。さらに各試験結果に見られる変動係数が20~40%と非常に大きいのが木材の特徴であるため、これらを3Dシミュレーションに実装するための方策を講演会で紹介する。

参考文献

[1] ASME: ASME V&V-40 2018 Assessing Credibility of Computational Modeling Through Verification and Validation: Application to Medical Devices, ASME 2018.
[2] 松井和己ら: 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.
[3] ASME: ASME V&V-10 2019 Standard for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, ASME, 2020.
[4] 日本規格協会: JIS Z 2101:2009 木材の試験方法, 2009.
[5] 日本木材学会編: 木質の物理, 文永堂出版, 2007.
[6] 沢田稔: 直交異方性材料としての木材の弾性および強度, 材料, Vol.12, pp.749-753, 1963.