

接着重ね材の曲げ強度を評価するための寸法効果に関する検討

田上, 誠
(株) 織本構造設計

佐藤, 利昭
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

蜷川, 利彦
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

<https://doi.org/10.15017/4769757>

出版情報：都市・建築学研究. 40, pp.11-18, 2021-07-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

バージョン：

権利関係：

接着重ね材の曲げ強度を評価するための寸法効果に関する検討

Study on Size Effect for Evaluating Bending Strength of Glued Build-up Members

田上 誠*, 佐藤利昭**, 蛭川利彦**

Makoto TANOUE, Toshiaki SATO, Toshihiko NINAKAWA

Glued build-up members (GBM) are structural building members that are developed as an application to effectively utilize box-heart timbers. The purpose of this study is to establish a method for evaluating the bending performance of a GBM. In this paper, we analyze the effect of stress distribution and dimensions (Size effect) on the bending strength of GBM. As a result, in the evaluation of the bending strength of GBM, the tensile strength and bending strength of the bottom timber are reduced according to the dimensions, and the combined stress method is appropriate.

Keywords : Glued build-up members, Timber, Bending strength, Size effect

接着重ね材, 構造用製材, 曲げ強度, 寸法効果

1. はじめに

近年の国産木材の供給量は、樹齢 50~60 年の人工林の多くが主伐期を迎えたことによって増加している。そのため、国土の保全と木材の自給率の向上を図ることを目的として「公共建築物等における木材の利用促進に関する法律」が 2010 年に制定された。しかし、木質構造建築物の構造部材に占める国産材の割合は僅かであり、構造部材には輸入材が多く用いられているのが現状である。したがって、需要量が少ないことで特に供給過多の状況である心持ち製材は、その有効利用が喫緊の課題となっている。接着重ね材 (Glued Build-up Members: 以下, GBM) は、これらの状況を踏まえて、心持ち製材を積極的に活用するために開発された新しい木質構造部材であり、2018 年に日本農林規格 (以下, JAS) が制定されている¹⁾。

これまで筆者らは、GBM の構造設計に資する知見を得ることを目的として、120 mm 角および 150 mm 角のスギ製材を 2~5 段積層した実大 GBM 試験体の曲げ実験の結果を示す²⁾と共に、GBM の力学モデルを構築し、これらを用いて曲げに関わる設計手法の検証を行ってきた^{3), 4), 5)}。通常、GBM はロングスパンの横架材 (大断面部材) として用いられるため、木質材料の強度に影響を及

ぼす寸法効果を、設計においてどのように考慮することが適切であるかを明らかにすることは、GBM の設計手法の確立に欠かせない課題の一つである。そこで本論では、スギ製材で構成した GBM の曲げ強度に対する寸法効果について考察するため、寸法効果に関する先行研究を整理し、それで得られた知見に GBM の工学的な性質を踏まえて検討した結果を示す。

2. 既往研究

2.1 寸法効果に関する研究

材料強度は広く応力分布と体積の影響を受けることで知られ、これを一般に寸法効果と呼んでいる。接着重ね材の JAS¹⁾や GBM の大臣認定⁶⁾では、曲げ強度の寸法効果係数 K_{SR} として下式を用いている。

$$K_{SR} = \left(\frac{H_0}{H} \right)^{1/\kappa_{SR}} \quad (1)$$

ここで、 H は GBM の断面せい、 H_0 は標準断面せい、 κ_{SR} は寸法効果を表す定数であり、 $H_0=300$ mm、 $\kappa_{SR}=9.0$ 、 H と部材長さ L との比は $L/H=18$ とされている (図 1 (c))。 (1) 式は GBM の断面せいのみ関数として簡単な形で表わされているが、一般に断面せいと横架材の長さ (スパン) には相関関係があること等を考えると、これには応力分布や体積の影響も間接的に含まれていると考えられる。

寸法効果に関する中村の解説⁷⁾に拠ると、寸法効果を

* (株) 織本構造設計

** 都市・建築学部門

工学的に説明する試みとして、Weibull の破壊を確率論的にモデル化する最弱リンク理論があり⁸⁾、この理論を木材の寸法効果に適用した研究はこれまでに多くなされており^{9)~11)}、国内外の木材に対する強度の評価手法にも取り入れられている^{1), 12)~15)}。例えば Barrett はベイマツの繊維直交方向の引張強度について、体積 V_1 と応力 σ_1 、体積 V_2 と応力 σ_2 の組み合わせがあるとき、それぞれの確率密度関数の分布形状を表す形状パラメータ m や、広がりを表す尺度パラメータが両者で等しい (V_1 と V_2 の応力分布が相似形となる) とき、それぞれの破壊確率が等しくなる体積や応力分布の条件を寸法効果と考え、これらの関係を (2) 式で表現している¹⁰⁾。

$$\sigma_1 / \sigma_2 = \left(V_1 / V_2 \right)^{1/m} \quad (2)$$

一方、集成材の構造性能を評価するための試験方法を定めている北米規格 ASTM D 3737-91 では、(2)式で表わされる強度に及ぼす体積の影響を断面せい (H)、断面幅 (B)、部材スパン (L) の影響に分解し、それぞれに異なる値の寸法効果を表す定数を与え、木材の異方性を考慮する手法を提案している¹⁴⁾。この考え方を強度の寸法効果係数 K_V の形で表わすと下式のようになる。

$$K_V = \left(H_0 / H \right)^{1/\kappa_H} \left(B_0 / B \right)^{1/\kappa_B} \left(L_0 / L \right)^{1/\kappa_L} = K_H \cdot K_B \cdot K_L \quad (3)$$

ここで、 κ_H 、 κ_B 、 κ_L はそれぞれ断面せい、断面幅、部材長さに関する寸法効果を表す定数、 H_0 、 B_0 、 L_0 はそれぞれ断面せい、断面幅、部材長さの標準寸法、 K_H 、 K_B 、 K_L はそれぞれ断面せい、断面幅、部材長さの寸法効果係数である。(3)式に L/H と L_0/H_0 は等しく、断面幅の寸法効果の影響は小さい ($K_B=1.0$) という条件を加えれば、(1)式と等しい。

表1に国内外の強度の評価で用いられている規定、もしくは既往の研究で得られた寸法効果を表す定数を整理する。近年では曲げ強度や引張強度に対して H 、 B 、 L の寸法に着目した研究が行われており、それぞれに関する寸法効果を表す定数が示されている。Buchanan は¹⁶⁾、スプルス・パイン・ファーの曲げ試験や引張試験から寸法効果を表す定数を求め、断面せいに関する定数が引張強度で $\kappa_H=4.0$ 、曲げ強度で $\kappa_H=8.0\sim 15.0$ 、部材スパン (引張試験における加力点間距離又は曲げ試験における支点間距離) に関する定数が引張強度、曲げ強度共に $\kappa_L=4.0\sim 6.0$ と報告している。一方、井道らは¹⁷⁾、機械等級区分

表1 寸法効果に関する規定や既往研究

規定の名称 又は著者	対象強度	対象材料	標準寸法			本論の検討に用いる 寸法効果を表す定数			K_{450}/K_{300}
			H_0 (mm)	B_0 (mm)	L_0 (mm)	κ_H	κ_B	κ_L	
接着重ね材 のJAS ¹⁾	曲げ強度	接着重ね材, $L_0/H_0=18$	300	—	(5,400)	9.0	—	—	0.96
ASTM D 245-06 ¹²⁾	引張強度 曲げ強度	構造用製材, $L_0/H_0=14$ $B=51\sim 102$ mm程度	51	—	(714)	9.0	—	—	0.96
ASTM D 1990-00 ¹³⁾	引張強度 曲げ強度	実大試験体, $L_0/H_0=17$	< 89 >	—	< 1,513 >	3.4	—	7.1	0.84
ASTM D 3737-91 ¹⁴⁾	曲げ強度	集成材	305	130	6401	10.0	9.0	10.0	0.92
EN384 ¹⁵⁾	引張強度	構造用製材, $L_0/H_0=9$	150	—	(1,350)	5.0	—	5.0	0.85
	曲げ強度	構造用製材, $L_0/H_0=18$	150	—	(2,700)	5.0	—	5.0	0.85
Buchanan ¹⁶⁾	引張強度	スプルス・パイン・ファー $B=38$ mm(一定), $H=89\cdot 140$ mm $L=450\sim 3000$ mm	89	—	450	4.0	—	4.0~6.0 [5.0]	0.83
	曲げ強度	スプルス・パイン・ファー $B=38$ mm(一定), $H=89\cdot 140$ mm $L=840\sim 2440$ mm	89	—	840	8.0~15.0 [11.5]	—	4.0~6.0 [5.0]	0.89
井道ら ¹⁷⁾	曲げ強度	構造用製材 スギ E70 $H=120$ mm(一定), $L=1890\sim 3780$ mm	—	—	1,890	—	—	6.5	0.94
HOWTEC ¹⁸⁾	引張強度	ラミナカラマツ L70 $H=24$ (一定), $B=150$ mm(一定), $L=600\sim 1800$ mm	—	—	600	—	—	3.4	0.89

H :断面せい, B :断面幅, L :部材長さ (引張試験における加力点間距離又は曲げ試験における支点間距離), H_0 :標準断面せい, B_0 :標準断面幅, L_0 :標準部材長さ, κ_H , κ_B , κ_L :それぞれ断面せい, 断面幅, 部材長さに関する寸法効果を表す定数, < >内の数値は標準寸法が規定されていないため, 検討用に筆者が設定した値, ()内の数値は対象材料の L_0/H_0 から定まる値, []内の数値は中央値であり, 検討用に筆者が設定した, K_{450}/K_{300} は断面せいの寸法効果係数の場合は断面せいが 450 mm のときと 300 mm のときの比又は, 部材長さの寸法効果係数の場合は部材長さが 5400 mm のときと 8100 mm のときの寸法効果係数の比。

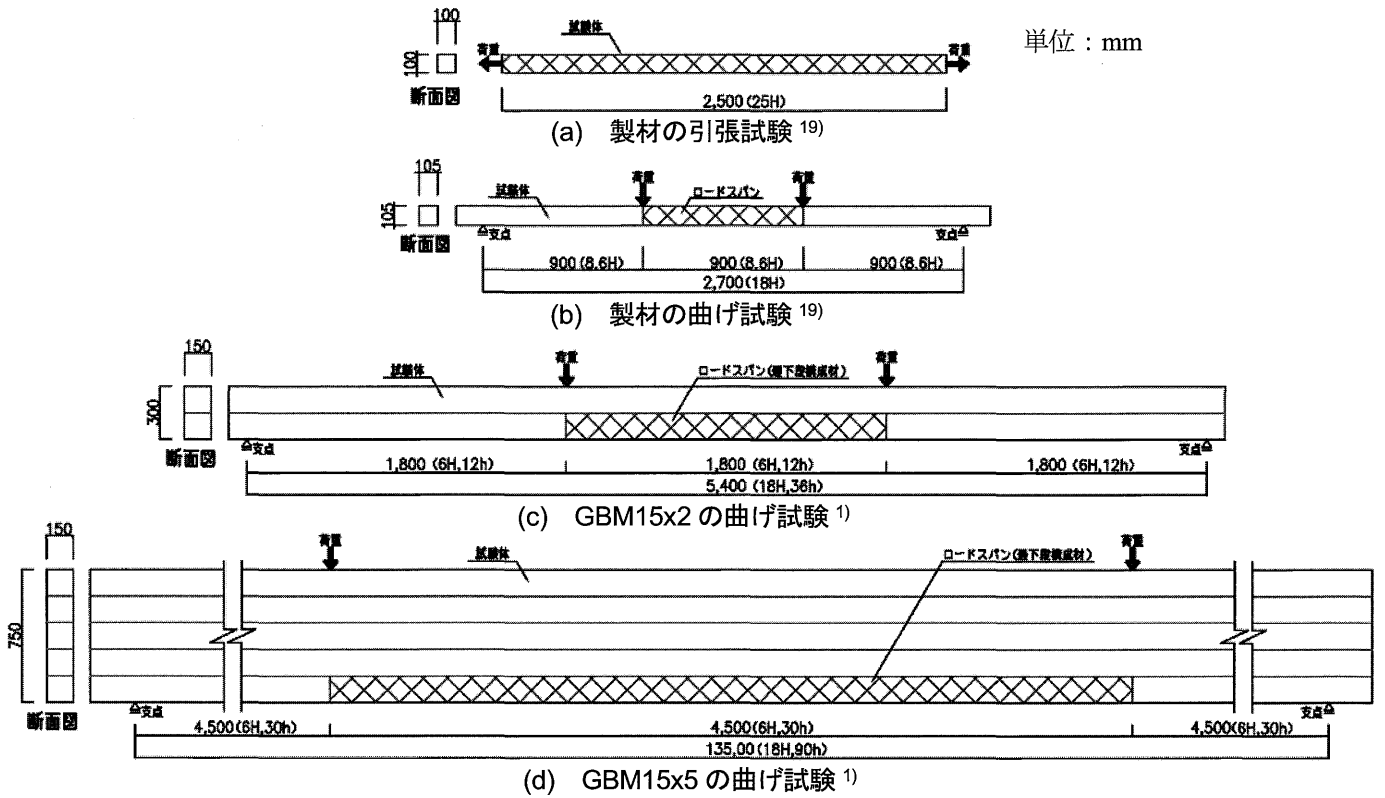


図1 製材とGBMの標準試験体

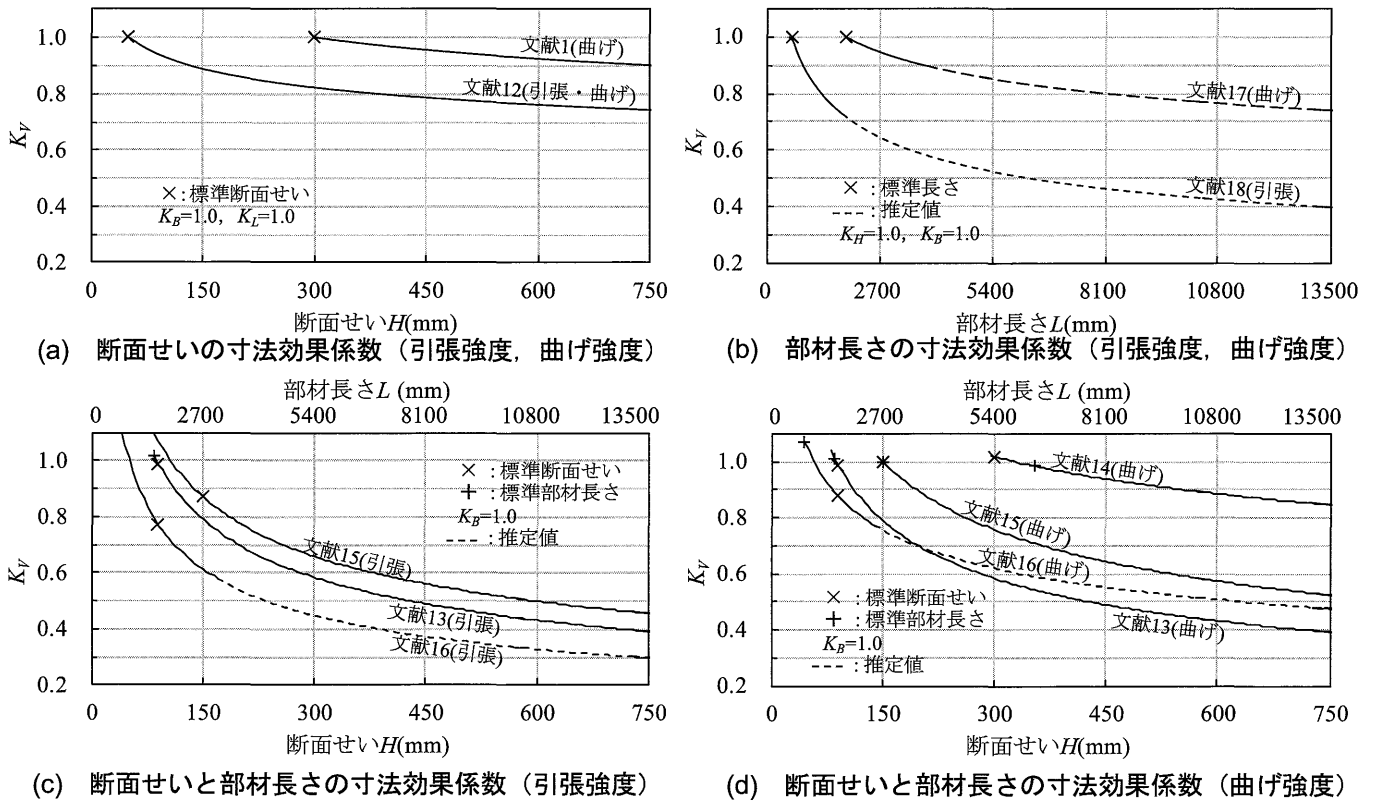


図2 寸法効果係数 K_v と断面せい又は部材長さの関係

E70 のスギ製材の曲げ試験から寸法効果を表す定数を求め、部材長さ（支点間距離）に関する定数が $k_L=6.5$ と報告している。さらに、日本住宅・木材技術センター (HOWTEC) では¹⁸⁾、機械等級区分 L70 のカラマツラミナの引張試験から寸法効果を表す定数を求め、部材スパン（加力点間距離）に関する定数が $k_L=3.4$ と報告している。

表1 に示した研究等の標準寸法と寸法効果を表す定数から求まる寸法効果係数と断面せいもしくは部材長さ（引張試験における加力点間距離又は曲げ試験における支点間距離）の関係を図2 に示す。同図において文献16～18 の実験の範囲を超える場合の寸法効果係数の値は、推定値として破線で示している(図2 (b), (c), (d))。同図よ

り、個々の寸法効果の影響は大きく異なるように見えるが、それらの標準寸法は異なっていることから、寸法効果係数を直接比較して考察を行うことは適切ではない。そこで、断面せいが 450 mm の寸法効果係数を 300 mm の寸法効果係数で除した値 (K_{450}/K_{300}) を用いて寸法効果について考察する。それぞれの K_{450}/K_{300} の値を表 1 に示す。 K_{450}/K_{300} の値は 0.83~0.96 であり、各研究等で大きくは違わない。また、引張強度の寸法効果は、曲げ強度の寸法効果とほぼ等しいか、若干小さくなる。

2.2 製材の曲げ強度と引張強度に関する研究

次に、寸法効果を考察する上では、基準となる強度がどのように設定されたものが明らかになっている必要があることから、GBM の構成材になる製材の引張と曲げの基準強度に関する既往研究について整理する。H12 建設省告示第 1452 号で定められているスギ製材の基準強度（以下、単に基準強度と呼ぶ）では、各機械等級内の引張基準強度 F_t と曲げ基準強度 F_b の比は $\gamma = F_t/F_b = 0.6$ としている。これは、実大のスギ製材を用いた引張試験と曲げ試験から、両試験結果による強度の 95% 下限値の比 γ として $\gamma = 0.64$ が得られたことに基づいている¹⁹⁾。両者の強度の差異はそれぞれの応力分布の相違により生じたものと考えられるが、両試験では試験体の寸法が異なる（図 1 (a), (b)）ため、 γ の値には応力分布に加えて体積の影響も含まれていることになる。現時点ではこれらの試験結果における応力分布、断面せい、断面幅、部材長さのそれぞれの影響を明確に分離することは困難である。一方、引張試験の試験体の断面せいと断面幅は、曲げ試験の試験体の約 0.95 倍であるのに対し、引張試験体の加力点間距離は、曲げ試験体のロードスパンの約 2.8 倍であることから、両者の各寸法が同じときの γ は $\gamma = 0.64$ よりも大きい値になることが示唆される。このような状況も踏まえて、次章では GBM の曲げ強度の評価において、どのように寸法効果の影響を考慮することが妥当であるかについて検討する。

3. GBM の曲げ強度に対する寸法効果の検討

3.1 検討手法

積層する各製材を一様な弾性体とみなし、GBM に断面の平面保持の仮定が成り立つとき、部材に下端引張となる曲げモーメントが作用すると、最下段製材に生じる垂直応力は図 3 のようになる。最下段製材の垂直応力は段数が多いほど引張成分が大きくなることから、筆者らは GBM では部材の曲げ強度を引張成分と曲げ成分の組み合わせ応力で評価することが適切であると考えている⁴⁾。一般に、製材（無垢材）では断面せい (H) と断面幅 (B) および部材長さ（支点間距離 L もしくはロードスパン S ）には相関関係があるため、(1)式を用いて寸法効果を評価することに理論的に大きな矛盾があるとは考え

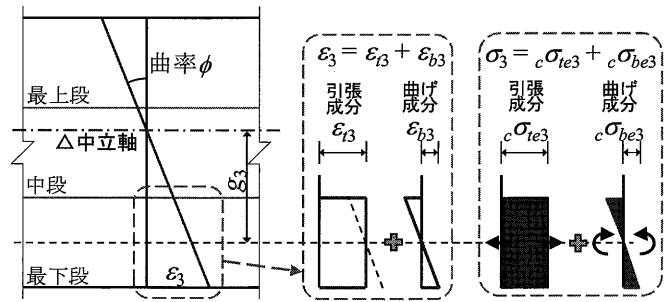


図 3 GBM 断面内のひずみと垂直応力分布 (3 段重ねの場合)⁴⁾

ていない。一方で、GBM における組み合わせ応力での曲げ強度の評価は、最下段製材に着目して、その応力状態と強度に基づくことから、GBM の断面せいのみからでは寸法効果を適切に評価することができない可能性がある。また、GBM を構成する製材の断面寸法は一般に寸法効果の影響を考慮する大きさではないため、組み合わせ応力で強度を評価すれば、GBM では寸法効果を考慮しなくとも差し支えないのかについても考える必要がある。

文献 19 の試験体寸法を図 1 (a), (b) に、接着重ね材の JAS¹⁾ の 2 段・5 段重ね GBM (符号: GBM15x2, GBM15x5) の標準曲げ試験体寸法を図 1 (c), (d) に示す。引張試験では断面内の応力は一様に近くなり、曲げ試験では最大応力が引張縁付近に発生することから、ロードスパン部分の体積と引張縁の面積に着目して各試験体を比較すると、5 段重ねの GBM (図 1 (d)) の最下段製材は、引張試験体 (図 1 (a)) の体積の約 4 倍、曲げ試験体 (図 1 (b)) の引張縁の面積の約 7 倍にもなる。これは、段数の多い GBM ではスパンが大きくなるからであるが、このことは GBM では部材スパンに関する寸法効果を考慮することが適切であることを示唆している。そこで、本論では製材の強度について、その長さに関する寸法効果も考慮して検討を行うこととする。なお、寸法効果を考慮する際の標準寸法は文献 19 の試験体寸法とし、引張強度と曲げ強度にはスギ製材の基準強度を用いる。以下に、検討に用いる製材の引張強度と曲げ強度の寸法効果係数を示す。

最下段製材の引張強度の寸法効果係数 $K_{\gamma t}$ は下式とする。

$$K_{\gamma t} = \left(\frac{H_{0t}}{h_n} \right)^{1/\kappa_{Ht}} \left(\frac{B_{0t}}{B} \right)^{1/\kappa_{Bt}} \left(\frac{L_{0t}}{S} \right)^{1/\kappa_{Lt}} \\ = K_{Ht} \cdot K_{Bt} \cdot K_{Lt} \quad (4)$$

ここで、 H_{0t} 、 B_{0t} 、 L_{0t} はそれぞれ文献 19 の引張試験の試験体 (図 1 (a)) の断面せい ($H_{0t} = 100$ mm)、断面幅 ($B_{0t} = 100$ mm)、荷重点間距離 ($L_{0t} = 2,500$ mm) の寸法、 h_n 、 B 、 S はそれぞれ GBM の最下段製材の断面せい、断面幅、ロードスパンの寸法、 κ_{Ht} 、 κ_{Bt} 、 κ_{Lt} はそれぞれ断面せい、断面幅、部材スパンの寸法効果を表す定数、 K_{Ht} 、 K_{Bt} 、 K_{Lt} はそれぞれ断面せい、断面幅、部材長さの寸法効果係数である。一方、最下段製材の曲げ強度の寸法効果係数 K_{Ab}

は下式とする。

$$K_{Ab} = \left(\frac{B_{0b}}{B} \right)^{1/\kappa_{Bb}} \left(\frac{S_{0b}}{S} \right)^{1/\kappa_{Lb}} = K_{Bb} \cdot K_{Lb} \quad (5)$$

ここで、 B_{0b} 、 S_{0b} はそれぞれ文献19の曲げ試験の試験体(図1(b))の断面幅($B_{0b}=105$ mm)、ロードスパン($S_{0b}=900$ mm)の寸法、 κ_{Bb} 、 κ_{Lb} はそれぞれ断面幅、部材長さの寸法効果を表す定数、 K_{Bb} 、 K_{Lb} はそれぞれ断面幅、部材長さの寸法効果係数である。

検討で用いる寸法効果を表す定数の値は、2.1節で述べた国内外の規定^{1),12)~15)}、もしくは既往の研究^{16)~18)}より、本論では $\kappa_{Ht}=\kappa_{Bt}=\kappa_{Lt}=5.0$ 、 $\kappa_{Bb}=\kappa_{Lb}=10.0$ とする。このとき、 K_{450}/K_{300} の値は引張強度で0.90、曲げ強度で0.96となり、既往研究等から求めた K_{450}/K_{300} (表1)に近い。

組み合わせ応力(最下段製材の引張応力度 $c\sigma_m$ と曲げ応力度 $c\sigma_{bn}$)は、既に筆者らが提案しているGBM断面モデル(図4)⁴⁾を用いて算定する。製材の強度を(6)式のように引張と曲げの単純和の組み合わせで評価するとき、GBMの曲げ強度 $\text{SUM}M_a$ は(7)式となる。

$$\frac{c\sigma_m}{F_m \cdot K_{Vm}} + \frac{c\sigma_{bn}}{F_{bn} \cdot K_{Abn}} = 1 \quad (6)$$

$$\text{SUM}M_a = \frac{F_{bn} \cdot K_{Abn} \cdot (EI)_e}{E_n \{h_n/2 + g_n \cdot K_{Abn} / (\gamma \cdot K_{Vm})\}} \quad (7)$$

ここで、 $(EI)_e$ はGBM断面の等価曲げ剛性、 F_m 、 F_{bn} 、 E_n 、 h_n 、 g_n はそれぞれ最下段製材の引張強度、曲げ強度、曲げヤング係数、断面せい、断面の図芯からGBM断面の中立軸までの距離、 K_{Vm} 、 K_{Abn} はそれぞれ引張強度および曲げ強度の寸法効果係数である。

3.2 断面解析結果を用いた検討

本節ではGBMにおける寸法効果の定性的な傾向について検討する。 γ の値は基準強度の比 $\gamma=F_t/F_b=0.60$ とする。また、GBMの寸法は接着重ね材のJAS¹⁾における曲げ試験体の標準寸法(例えば3段では図1(c)、5段では図1(d))として検討する。図5に構成材(製材)の引張強度と曲げ強度に乗ずる断面せい(K_{Ht})、断面幅(K_{Bt} 、

K_{Bb})、部材長さ(K_{Lt} 、 K_{Lb})の寸法効果係数を120 mm角および150 mm角の製材のそれぞれについて示す。また、図には(1)式で求まる接着重ね材のJAS¹⁾における寸法効果係数 K_{SR} の値も併せて示している。図6に120 mm角および150 mm角の製材を積層したGBMの $\text{SUM}M_a/M_a$ とGBM断面せい H (ロードスパン S)の関係を示す。図の縦軸の $\text{SUM}M_a/M_a$ は、(7)式で得られるGBMの曲げ強度 $\text{SUM}M_a$ を、各製材を一様な弾性体とみなして、組み合わせ応力では評価せず(無垢の製材と同様の手法で評価した)GBMの曲げ強度 M_a で除した値である。ここで、 M_a は最下段の製材縁において曲げ応力度 σ_{bn} と曲げ強度 F_{bn} の関係が(8)式となるときの曲げの大きさであり、(9)式で求めることができる²⁾。

$$\frac{\sigma_{bn}}{F_{bn}} = 1 \quad (8)$$

$$M_a = \frac{F_{bn} \cdot (EI)_e}{E_n (g_n + h_n/2)} \quad (9)$$

また、図には組み合わせ応力による評価で寸法効果を考慮しない($K_{Vt}=1.0$ 、 $K_{Ab}=1.0$)場合の値も併せて示している。ここで、図6の縦軸の $\text{SUM}M_a/M_a$ には、寸法効果がGBMの曲げ強度に及ぼす影響に加えて、組み合わせ応力に用いる引張強度と曲げ強度の差異の影響も含まれているため、GBMの寸法効果係数を、各段数において寸法効果を考慮したときの $\text{SUM}M_a/M_a$ の値と考慮しないときのそれとの比とみなし、その比の値を図7に示す。また、図には(1)式で求まる K_{SR} の値も併せて示している。

構成材(製材)の強度に乗じる寸法効果係数に着目すると、GBMを構成する製材の断面寸法は段数により変わらないので、幅とせいに関する寸法効果係数は段数によらず一定の値となるが、各製材の長さはGBMの断面せいに応じて長くなるため、図5に示すように、部材長さに関わる寸法効果係数の値がGBM断面せいに応じて小さくなる。これにより、図6に示すような寸法効果が現れることから、組み合わせ応力でGBMの曲げ強度を評価する場合も、長さに関する寸法効果も考慮して寸法効果係数を適切に設定する必要があると考えられる。一方、製材の断面の寸法に着目すると、同じGBM断面せい(ロードスパン)では、GBMの寸法効果係数は(図7)、120 mm角よりも150 mm角の値が小さくなり、検討の範囲では両者に5%ほどの差が見られる。これは、120 mm角と150 mm角では長さに関する寸法効果(K_{Lt} と K_{Lb})が同じ値となるので、断面せいと幅に関する寸法効果係数(K_{Bt} 、 K_{Bb}) (図5)の差により生じるものである。図7に示すGBMの寸法効果係数の値と(1)式で求まる K_{SR} との差は、本論では引張強度に乗ずる部材長さに関する寸法効果係数(K_{Lt})の寸法効果を表す定数($\kappa_{Lt}=5.0$)に接着重ね材のJAS($\kappa_{SR}=9.0$)のそれよりも小さい値を設定したことにより、段数が多いほど差が大きくなって

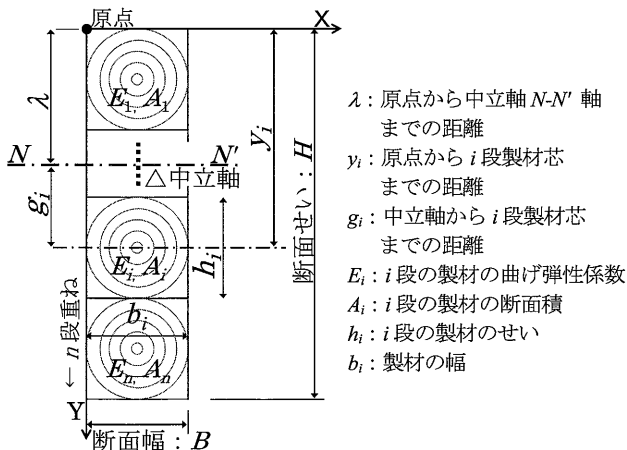
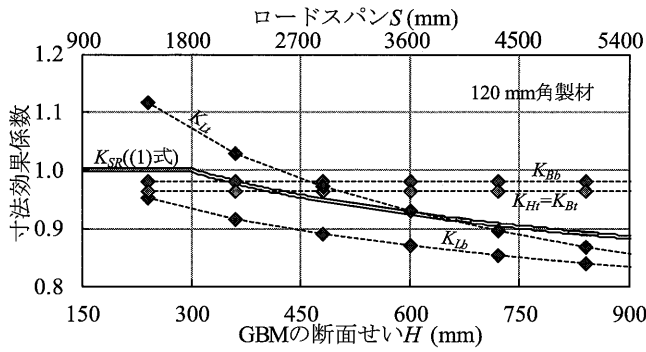
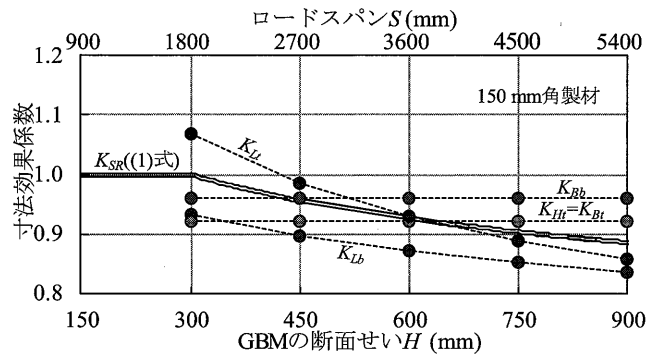


図4 GBM断面モデル⁴⁾



(a) 120 mm 角製材



(b) 150 mm 角製材

図5 GBMの構成材(製材)の寸法効果係数とGBMの断面せいとの関係

- ◇ 120角製材_組み合わせ応力_寸法効果無視⁴⁾
- ◆ 120角製材_組み合わせ応力_寸法効果考慮
- 150角製材_組み合わせ応力_寸法効果無視⁴⁾
- 150角製材_組み合わせ応力_寸法効果考慮

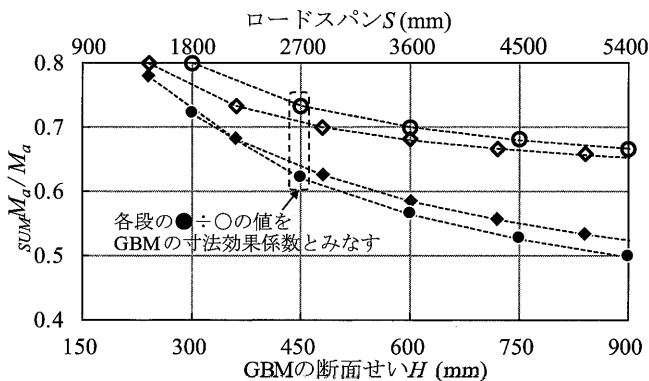


図6 $\sum M_b/M_a$ と GBM 断面せい (ロードスパン) の関係

- 曲げ応力のみ $K_{SR}((1)式)$
- ◆ 120角製材_組み合わせ応力_寸法効果考慮 ÷ 寸法効果無視
- 150角製材_組み合わせ応力_寸法効果考慮 ÷ 寸法効果無視

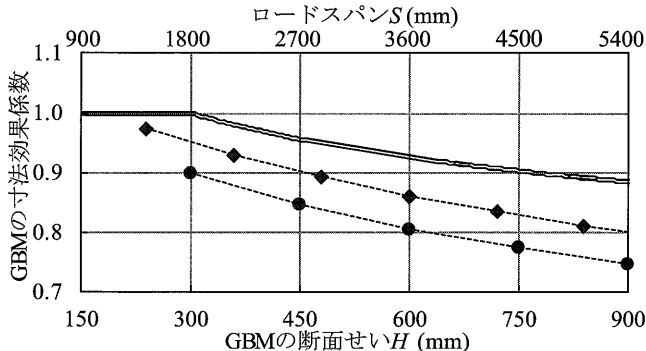


図7 GBMの寸法効果係数とGBMの断面せい (ロードスパン) の関係

いる。例えば、150 mm 角製材の GBM の断面せいが 300 mm (2 段) では 0.10 であるが、600 mm (4 段) では 0.13 の差となる。ここで、組み合わせ応力での評価と曲げ応力でのみの評価では寸法効果係数の算定における標準寸法が異なっているため、図 7 に示す GBM の寸法効果係数の値を、2.1 節に示した K_{450}/K_{300} と同様に、断面せいが 450 mm のときと 300 mm のときの比で比較すると、 K_{450}/K_{300} は 120 mm 角で 0.96、150 mm 角で 0.94 となり、接着重ね材の JAS ((1)式) による K_{450}/K_{300} の値の 0.96 (表 1) に近い値になっている。

4. 実大 GBM 試験体の実験結果を用いた寸法効果の検証

著者らが文献 2 で示したスギ GBM の実大曲げ実験結果を用いて、前章で示した寸法効果を考慮した GBM の曲げ強度の評価方法について検証を行う。表 2 に各 GBM 試験体の寸法を示す。なお、この実験では、試験体のせん断スパン (a) やロードスパン (S) の GBM 断面せい (H) に対する比率が、図 1 (c), (d) の標準寸法の比率よりも小さいものもある。製材に生じる応力の算定に用いる断面モデルは前章と同様に図 4 の GBM 断面モデル⁴⁾ とするが、各製材の曲げヤング係数には縦振動法による測定値 (E_{fn}) を用いる。また、寸法効果を考慮する前の引張強度と曲げ強度には最下段製材の E_{fn} により基準強度を線形補間した強度 (それぞれ F_t と F_b) (図 8) を用いる²⁾。これらの強度に乗じる各試験体の寸法効果係数を表 3 に示す。

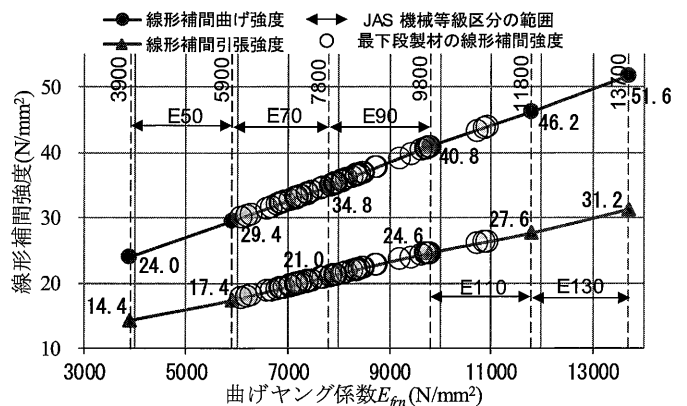


図8 強度の線形補間 (F_t, F_b)²⁾

表2 GBM 試験体²⁾

Series	n_t	B, h	H	a	S	L
GBM12x2	2	120	240	5.0H	5.0H(10.0h)	15.0H(30.0h)
GBM12x3	3		360	5.7H	4.2H(12.6h)	15.6H(46.8h)
GBM12x5	5		600	4.5H	3.3H(16.5h)	12.3H(61.5h)
GBM15x2	2	150	300	5.7H	5.7H(11.4h)	17.0H(34.0h)
GBM15x3	3		450	5.7H	5.4H(16.2h)	16.8H(50.4h)
GBM15x4	4		600	4.5H	3.3H(13.2h)	12.3H(49.2h)
GBM15x5	5		750	4.5H	2.5H(12.5h)	11.5H(57.5h)

n_t : 段数, B : GBM 幅, h : 製材せい, H : GBM せい, a : せん断スパン, S : ロードスパン, L : 支点間距離, 単位: [mm]

表3 GBM試験体の寸法効果係数

Series	K_{SR}	K_{Htm}	K_{Btm}	K_{Ltm}	K_{Vtm}	K_{Bbn}	K_{Lbn}	K_{Abn}
GBM12x2	1.000	0.964	0.964	1.158	1.077	0.982	0.972	0.954
GBM12x3	0.980	0.964	0.964	1.106	1.028	0.982	0.949	0.932
GBM12x5	0.926	0.964	0.964	1.048	0.974	0.982	0.924	0.907
GBM15x2	1.000	0.922	0.922	1.079	0.917	0.960	0.938	0.901
GBM15x3	0.956	0.922	0.922	1.006	0.855	0.960	0.905	0.869
GBM15x4	0.926	0.922	0.922	1.048	0.891	0.960	0.924	0.887
GBM15x5	0.903	0.922	0.922	1.059	0.901	0.960	0.929	0.892

K_{SR} : 接着重ね材の JAS¹⁾における曲げ強度の寸法効果係数,
 K_{Vtm} : 最下段製材の引張強度の寸法効果係数 ($K_{Vtm}=K_{Htm} \cdot K_{Btm} \cdot K_{Ltm}$),
 K_{Htm} , K_{Btm} , K_{Ltm} : それぞれ断面幅, 部材, 部材長さの寸法効果係数,
 K_{Abn} : 最下段製材の曲げ強度の寸法効果係数 ($K_{Abn}=K_{Bbn} \cdot K_{Lbn}$),
 K_{Bbn} , K_{Lbn} : それぞれ断面幅, 部材長さの寸法効果係数

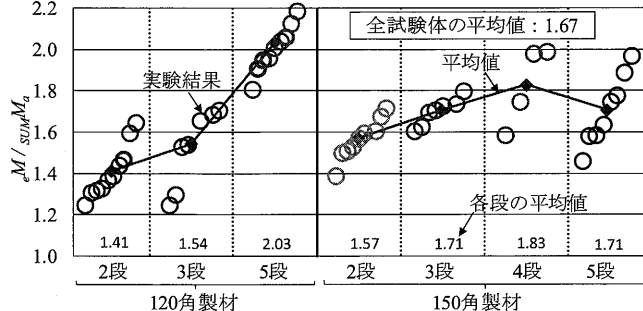


図9 組み合わせ応力に寸法効果を考慮した実験値/計算値

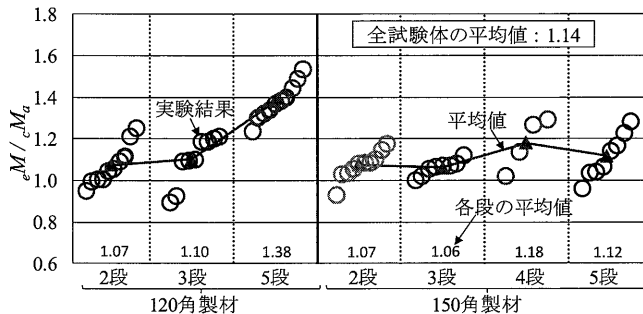
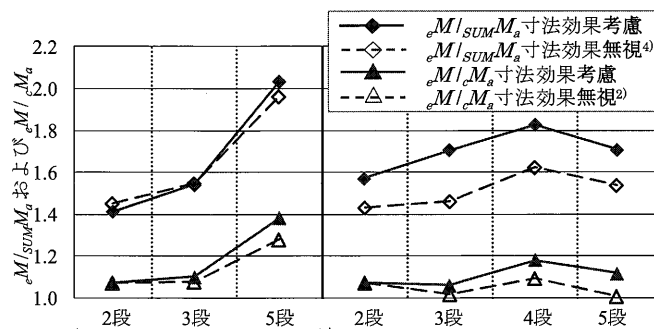
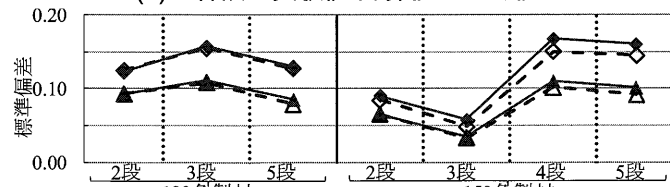


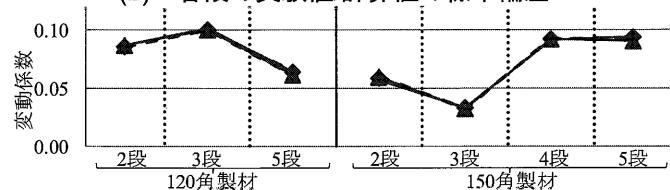
図10 曲げ応力に寸法効果を考慮した実験値/計算値



(a) 各段の実験値/計算値の平均値



(b) 各段の実験値/計算値の標準偏差



(c) 各段の実験値/計算値の変動係数

図11 寸法効果の評価手法の比較

図9に実験の最大荷重発揮時にロードスパン内に生じる曲げモーメント eM を(7)式で得られる GBM の曲げ強度の計算値 $_{SUM}M_a$ で除した実験値と計算値の比 ($eM / _{SUM}M_a$) を段数毎に示す。また、図10に組み合わせ応力を用いず、接着重ね材の JAS¹⁾における GBM の寸法効果係数 K_{SR} ((1)式) を考慮した最下段製材の曲げ強度 F_b に GBM の断面係数 $Z (=B \cdot H^2/6)$ を乗じて求めた GBM の曲げ強度の計算値 $cM_a (=F_b \cdot K_{SR} \cdot Z)$ で eM を除した実験値と計算値の比 (eM / cM_a) を段数毎に示す。さらに、寸法効果の評価手法について考察するため、図9と図10の各段の $eM / _{SUM}M_a$ および eM / cM_a の平均値と標準偏差および変動係数に、文献2と文献4で示した寸法効果を考慮しない ($K_{Vtm}=1.0$, $K_{Abn}=1.0$, $K_{SR}=1.0$) 場合のそれらを加えて図11に示す。なお、図9と図10の実験値/計算値は、図の重なりを避けるため、昇順に示す。

寸法効果を考慮する場合と考慮しない場合の平均値の差は(図11), 120 mm 角と150 mm 角の eM / cM_a では段数が多くなる(断面せいが大きくなる)ほど大きくなっているが、150 mm 角の本論で示した方法で寸法効果を考慮している $eM / _{SUM}M_a$ では段数が多くなっても差が大きくなってはいない。これは、文献2の実験では荷重装置上の制限により、試験体のロードスパン(S)の GBM の断面せい(H)に対する比率が一定となっておらず(S/H が標準寸法の比率よりも小さいものもある)、部材長さに関する寸法効果係数と断面せいの相関性が一律となっていないためと考えられる。また、寸法効果を考慮する場合としない場合で、各段の標準偏差は概ね同じ値となり、各段の変動係数はほぼ等しい値となる。

5. おわりに

本論では、寸法効果に関する国内外の強度評価に用いられている規定と既往の研究を整理し、それらから得られた知見を基に GBM の工学的な性質を踏まえて、寸法効果を考慮する方法について検討した。

- ①国内外の規定と既往の研究では、断面せいに関する寸法効果だけでなく、断面幅や部材長さに関する寸法効果の検討もなされている。これらにおいて、引張強度の寸法効果は曲げ強度の寸法効果とほぼ等しいか、若干小さくなる。
- ②GBM の曲げ強度を組み合わせ応力で評価する場合は、最下段製材の応力状態と強度に基づくことになり、GBM を構成する製材の断面寸法は一般に寸法効果の影響を考慮する大きさではないが、その長さが GBM の断面せいに応じて長くなるため、GBM の寸法効果係数の値は段数が増えると小さくなる。そのため、組み合わせ応力で評価する場合も、GBM を構成する製材の寸法効果を考慮することが適切であると考えられる。

なお、製材の引張試験と曲げ試験において、断面せいと断面幅および部材長さ（引張試験における加力点間距離と曲げ試験におけるロードスパン）を同じ寸法としたときの寸法効果を表す定数や引張強度と曲げ強度が明らかになれば、本論で用いた組み合わせ応力による GBM の曲げ強度の評価方法が、より適切なものになると考えられる。これらは今後の課題である。

参考文献

- 1) 農林水産省: 接着重ね材の日本農林規格, JAS 0006
- 2) 田上誠, ほか 3 名: スギ製材を 2~5 段積層した接着重ね材の実大曲げ実験 心持ち製材を積層した接着重ね材の曲げ性能 その 1, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 83, No. 754, pp. 1821-1831, 2018. 12
- 3) 田上誠, ほか 3 名: 心持ち製材を積層した接着重ね材の構造力学的考察, 日本建築学会構造工学論文集, Vol. 65B, pp. 165-171, 2019. 3
- 4) 田上誠, ほか 3 名: 心持ち製材を積層した接着重ね材の組み合わせ応力による曲げ耐力の評価手法, 日本建築学会技術報告集, 第 25 巻, 第 61 号, pp. 1121-1125, 2019. 10
- 5) 田上誠, ほか 3 名: 製材内の成熟材と未成熟材の力学的な性質の相違が接着重ね材の曲げ耐力に及ぼす影響, 日本建築学会構造工学論文集, Vol. 66B, pp. 37-44, 2020. 3
- 6) 建築基準法第 37 条第二項, 大臣認定番号: MWCM-0022, 0023, 0024, 0025
- 7) 中村昇, 他: ティンバーメカニクス 木材の力学理論と応用, 海青社, pp.18~22, 2015. 10
- 8) Weibull, W.: A statistical distribution function of wide applicability, ASME, Journal of Applied Mechanics, pp. 293-397, 1951.9
- 9) Bohannon, B.: Effect of size on bending strength of wood members, FPL 56, 1966. 5
- 10) Barrett, J. D.: Effect of size on tension perpendicular to-grain strength of douglas-fir, Wood and fiber, Vol. 6(2), pp. 126-143, 1974.
- 11) Madsen, B. and Buchanan, A. H.: Size effect in timber explained by a modified weakest link theory, Can. J. Civ. Eng., 13(2), pp. 218-232, 1986
- 12) ASTM D 245-06: Standard practice for establishing structural grades and related allowable properties for visually graded lumber, 2006.
- 13) ASTM D 1990-16: Standard practice for establishing allowable properties for visually-graded dimension lumber from in-grade tests of full-size specimens, 2016.
- 14) ASTM D 3737-91: Establishing Stresses for Structural Glued Laminated Timber (Glulam), 1991.

- 15) EN384: Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density, 2016.
- 16) Buchanan, A. H. (1984): Strength model and design methods for bending and axial load interaction in timber members, Dissertation, University of British Columbia, pp. 243-245, 1984
- 17) 井道裕史, ほか 2 名: 製材品の曲げ強度における寸法効果パラメータの検討, 森林総合研究所研究報告 Vol. 19-No. 1, pp. 79-87, 2020.
- 18) 日本住宅・木材技術センター: エンジニアリングウッド性能評価事業 報告書, pp. 104-129, 1998
- 19) 木材強度・木質構造研究会: 構造用木材—強度データの収集と分析, pp. 42-51, 1988.3

(受理: 令和 3 年 5 月 27 日)