

論文 (Original article)

製材品の曲げ強度における寸法効果パラメータの検討

井道 裕史^{1)*}、加藤 英雄¹⁾、長尾 博文¹⁾

要旨

「製材品の強度性能に関するデータベース」データ集の曲げ強度データを用いて、製材の日本農林規格に対応した基準強度に対する寸法効果パラメータを求めることを目的とした。まず、強度等級 E70 のスギの曲げ強度を用いて、スパン、材せい、スパン／材せい比が一定の場合の各寸法効果パラメータを求め、これらの値が文献値と概ね一致することを確認した。続いて、基準強度を材せいに応じて低減するための寸法調整係数を検討した。スギ、アカマツ、ベイマツの曲げ強度を既往の調整式を用いて標準的な試験条件下の値に調整し、樹種・等級・材せいごとに 5% 下限値を求めた。5% 下限値と製材の日本農林規格に対応する基準強度との比 (5% 下限値／基準強度) を算出し、標準材せいを 150mm とする寸法調整係数と比較した。その結果、寸法調整係数の標準荷重条件における寸法効果パラメータは 0.4 ～ 0.5 程度とするのが適当であると考えられた。

キーワード：寸法効果パラメータ、寸法調整係数、曲げ強度、製材品、データベース

1. はじめに

わが国の森林は、10 齢級以上の主伐期を迎える人工林が 2020 年には約 7 割になると見込まれ (林野庁 2018)、これらの人工林から伐採された丸太も大径化が進んでいる。丸太の大径化に伴い、従来のものより断面寸法が大きい製材を生産することが可能となってきた。断面寸法、特に材せいが大きいものは、木造建築物の梁桁など横架材としての利用が見込まれる。

一方、木材は寸法が大きくなるほど強度が低下する現象が認められ、これは寸法効果として知られている (宇京 2015, 鈴木 1997, 中村 2004a, b)。アメリカやヨーロッパでは ASTM D1990 – 16 (ASTM International 2016) (以下、ASTM D1990 とする)、EN 384:2016 (European Committee for Standardization 2016) (以下、EN 384 とする) などで、製材品の寸法が大きくなるのに従い強度の特性値を低減する方法が定められている。しかしながら、わが国の現行の製材の基準強度 (建設省 2000) においては、枠組壁工法構造用製材及び枠組壁工法構造用たて継ぎ材の日本農林規格 (農林水産省 1974) で、ASTM D1990 の方法を参考にした基準強度を低減する係数はあるものの、製材の日本農林規格 (農林水産省 2007) の構造用製材では、同様の係数に相当するものは存在しない。今後材せいのより大きな製材品が、住宅はもとより非住宅の木造建築物に使用されることが予想されるが、これらの製材品に対しても従来の基準強度を用いることについて強度的な懸念が生じる。以上のことから、わが国でも断面寸法の大きい木材に対

して基準強度を低減させる調整係数が必要であると考えられる。

この検討を行うためには、様々な寸法の木材から得られた大量の強度データが必要となる。その要請に応えるものとして、全国の公立試験研究機関により試験が行われ、森林総合研究所内の強度性能研究会により取りまとめられた『「製材品の強度性能に関するデータベース」データ集<8>』(強度性能研究会事務局 2013) がある。本データ集は、日本農林規格の改正、許容応力度等の見直しの際、速やかに検証データとして資するために取りまとめられたものである。運営方法には「本データベースは、日本農林規格の改訂、それに対応する許容応力度の設定 (中略) 等、に対してデータ提供を行う」とあり、本報の検討を行うのに最適な資料であると考えられる。

以上を踏まえ、本報では、データ集に収集された曲げ強度データを用いて寸法効果の影響を調べ、ASTM D1990 と EN 384 による寸法効果パラメータと比較検討し、製材の日本農林規格に対応した基準強度に対する寸法効果パラメータを求めることを目的とした。

2. アメリカおよびヨーロッパにおける寸法効果による曲げ強度の調整法

材料の寸法が大きくなるほど強度が小さくなることを寸法効果といい、材料が最弱リンク理論を用いた 2P ワイブル分布に従うとすると、以下の式が得られる (宇京 2015, 鈴木 1997, 中村 2004a, b)。

原稿受付：令和元年 6 月 13 日 原稿受理：令和元年 12 月 18 日

1) 森林総合研究所 構造利用研究領域

* 森林総合研究所 構造利用研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^s \quad (1)$$

ここで、 σ_1 、 σ_2 は体積が V_1 、 V_2 のときの強度、指数で表される s は寸法効果パラメータである。 V は体積であるので、材せい、長さ、材幅に分けられ、以下の様に変形できる。

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{s_d} \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^{s_L} \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^{s_b} \quad (2)$$

ここで、 d_1 、 L_1 、 b_1 および d_2 、 L_2 、 b_2 は強度がそれぞれ σ_1 、 σ_2 のときの材せい、長さ、材幅であり、 s_d 、 s_L 、 s_b はそれぞれ材せい、長さ、材幅の寸法効果パラメータである。また、曲げ試験において、長さ／材せい比が一定、すなわち $L_1/d_1 = L_2/d_2$ の場合の寸法効果パラメータを s_R とすると、(2) 式は以下のように変形できる。

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_2}{\sigma_1} &= \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{s_d} \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^{s_L} \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^{s_b} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{s_d} \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^{s_L} \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^{s_b} \\ &= \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{s_d+s_L} \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^{s_b} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{s_R} \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^{s_b} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、長さを何とするかが問題となるが、ASTM D1990 では、長さをスパン（支点間距離）としている。また、荷重条件はスパンが材せいの 17 倍の 3 等分点 4 点荷重方式が前提であり、スパン／材せい比、荷重点間距離／材せい比を一定としている。これらの条件を踏まえた上で、曲げ強度に対して s_d 、 s_L 、 s_b の値としてそれぞれ 0.29、0.14、0 を与えている。以上を (3) 式に代入すると以下のように変形できる。

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_2}{\sigma_1} &= \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{s_d} \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^{s_L} \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^{s_b} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{s_d+s_L} \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^{s_b} \\ &= \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{0.29+0.14} \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^0 = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{0.43} \end{aligned} \quad (4)$$

すなわち、スパン／材せい比、荷重点間距離／材せい比が一定の場合の寸法効果パラメータ s_R は 0.43 となる。わが国の枠組壁工法構造用製材及び枠組壁工法構造用たて継ぎ材の日本農林規格に対応する甲種および乙種構造材の基準強度においては、この値や他の資料を参考にして、標準材せいを 89mm とした上で、寸法効果パラメータを 0.4 とした寸法調整係数が設定されている（中島 2001）。

一方、EN 384 は、基本となる考え方は ASTM D1990 と同じであるが、材せいの標準寸法 d_0 を 150mm、スパンが材せいの 18 倍となる 3 等分点 4 点荷重方式を採用している。この荷重条件下で 150mm とは異なる材せい d mm で曲げ試験を行なった場合、曲げ強度から以下の調整係数 k_h を除することとしている。

$$k_h = \left(\frac{150}{d}\right)^{0.2} \quad (5)$$

(5) 式はスパンが材せいの 18 倍となる 3 等分点 4 点荷重方式が前提であるため、スパン／材せい比、荷重点間距離／材せい比が一定である。そのため、(5) 式の調整は、スパン／材せい比、荷重点間距離／材せい比が一定の場合の寸法効果パラメータ s_R が 0.2 であることを示していると考えられる。

また、荷重条件がスパンが材せいの 18 倍となる 3 等分点 4 点荷重方式と異なる場合は、曲げ強度から以下の調整係数 k_ℓ を除する。

$$k_\ell = \left(\frac{L_0+5S_0}{L+5S}\right)^{0.2} = \left(\frac{48d}{L+5S}\right)^{0.2} \quad (6)$$

ここで、 L_0 、 S_0 はそれぞれスパンが材せいの 18 倍となる 3 等分点 4 点荷重方式のスパン ($L_0=18d$)、荷重点間距離 ($S_0=6d$)、 L 、 S はそれぞれ試験時のスパン、荷重点間距離である。例えば $d=120\text{mm}$ 、 $L=2040\text{mm}$ 、 $S=600\text{mm}$ ($5d$)、支点荷重点間距離 $=720\text{mm}$ ($6d$) の 4 点曲げ試験を行い、曲げ強度の値として σ_{test} N/mm² が得られたとする。(5) 式より $k_h=(150/120)^{0.2}=1.046$ が、(6) 式より $k_\ell=\{(48 \times 120)/(2040+5 \times 600)\}^{0.2}=1.027$ が得られる。両者の積を σ_{test} から除した $0.931\sigma_{\text{test}}$ が、材せい 150mm でスパンが材せいの 18 倍となる 3 等分点 4 点荷重方式に調整された曲げ強度となる。

ところで、現行の EN 384 では、旧版 (European Committee for Standardization 2004) とは異なり、曲げ強度の 5% 下限値を調整するのではなく個々のデータを調整すること、 d が 150mm 未満、密度が 700kg/m³ 以下のものを調整することとし、(5) 式による k_h か 1.3 の小さい方（概ね $d=40\text{mm}$ 程度が境界となる）を用いることと改訂されている。

3. 方法

3.1 寸法効果の検討に用いたデータ

本報で用いたデータは『製材品の強度性能に関するデータベース』データ集<8>』に収録されたものの元データである。ただし、本データ集は各公立試験研究機関がそれぞれの目的に応じて試験を行ったデータを収集したものであるため、必ずしも全国の平均的なデータとは限らず、また、様々な寸法や荷重条件によって実施されたものである。本報ではまず、材せい、長さ、スパン／材せい比が一定の場合のそれぞれの寸法効果パラメータを検討し、次いで、材せいの大きい材料に対して基準強度を低減させるための係数の算出を検討した。前者に対しては、データ数が最も多く、様々な材せいが含まれるスギのデータを用い、後者に対しては、わが国の横架材として用いられることの多いスギ、アカマツ、ベイマツのデータを用いた。元データのう

ち、試験体寸法、含水率、荷重条件、見かけの曲げヤング係数、曲げ強度が明示されており、4点曲げ試験で行われたものを対象とした。

3.2 含水率による曲げヤング係数・曲げ強度の調整

含水率が様々な曲げヤング係数・曲げ強度のデータを同一に比較するには、それぞれの含水率による曲げヤング係数・曲げ強度を一定の含水率状態での値に調整する必要がある。曲げヤング係数・曲げ強度の調整式が示されている規格等では、ASTM D1990、ASTM D245 – 06 (Reapproved 2011) (ASTM International 2011)、ASTM D2915 – 98 (ASTM International 1998) (以下、旧 ASTM D2915 とする)、旧 ASTM D2915 を準用した日本国内の曲げ試験結果の解析による提案式(飯島ら 2011) (以下、HOWTEC 法とする)がある。このうち、わが国で最も用いられている方法が HOWTEC 法であると思われる。HOWTEC 法は、旧 ASTM D2915 を準用しているため、両者の調整方法は調整する含水率の範囲が異なること以外は同じであり、ともに以下の式を用いる。

$$\sigma_2 = \sigma_1 \frac{\alpha - \beta M_2}{\alpha - \beta M_1} \quad (7)$$

ここで、 σ_2 は含水率 M_2 での弾性係数または曲げ強度、 σ_1 は含水率 M_1 での弾性係数または曲げ強度、 M_1 と M_2 はそれぞれの状態での含水率、 α 、 β は弾性係数に対してそれぞれ 1.44、0.0200、曲げ強度に対してそれぞれ 1.75、0.0333 である。旧 ASTM D2915 は、含水率が 22% 以上はすべて生材とみなし、5% 以上の含水率の調整は避けるべきであるとしている。一方、HOWTEC 法は、曲げに対して含水率 10% 以下は 10%、18% 以上は 18% として (7) 式を用いる。本報では、ASTM D1990 は個々の値ではなく強度の 5% 下限値に対するものであること、ASTM D245 – 06 (Reapproved 2011) は生材状態から係数を乗じて強度値を増加させる方法であること、本報に用いたデータは含水率が高いものから低いものまで様々な状態があることなどを踏まえ、HOWTEC 法を用いることとした。標準含水率を 15% として、この状態に曲げヤング係数・曲げ強度を調整した。

3.3 荷重条件による曲げヤング係数の調整

曲げ強度を用いて寸法効果を検討するためには、曲げヤング係数の違いによる曲げ強度のばらつきを避けるために、同一等級内の曲げヤング係数における曲げ強度を用いる必要がある。曲げヤング係数は、曲げ強度と同様、荷重条件により得られる値が異なるため、以下の方法で荷重条件による曲げヤング係数の調整を行った。

製材の日本農林規格に示された曲げ試験の荷重条件はスパンを材長の 3/4 以上とした 3 等分点 4 点荷重方

式である。ただし、スパン／材せい比が 18 倍を超えるものに対しては、スパン／材せい比を 18 倍に調整するための係数が示されており、この荷重条件が標準だと考えられる。本報もこれに従い、スパンを材せいの 18 倍とした 3 等分点 4 点荷重方式を標準荷重条件とし (以下、スパンを材せいの 18 倍とした 3 等分点 4 点荷重方式を単に標準荷重条件と呼ぶ)、それ以外の荷重条件で得られた見かけの曲げヤング係数に対しては、『木質構造設計規準・同解説』(中井ら 2006) に記載された調整式に従い、(8) 式を用いて標準荷重条件での値に調整した。

$$E_{app} = E_b \frac{1+2.4d^2(E/G)/(3L^2-4a^2)}{1+2.4d_0^2(E/G)/(3L_0^2-4a_0^2)} \quad (8)$$

ここで、 E_{app} は標準荷重条件の見かけの曲げヤング係数、 E_b は試験時の見かけの曲げヤング係数、 E/G はせん断弾性係数に対する真のヤング係数の比 (=15)、 d 、 L 、 a はそれぞれ試験時の材せい、スパン、荷重点支点間距離、 d_0 、 L_0 、 a_0 はそれぞれ標準荷重条件の材せい、スパン、荷重点支点間距離 (後述するように d_0 = 150mm、 L_0 = 2700mm、 a_0 = 900mm とする) である。

以上の方法で算出された見かけの曲げヤング係数に対して、製材の日本農林規格の機械等級区分構造用製材の曲げヤング係数の基準による等級区分 (以下、E 等級とする) に従ってデータを区分した。

3.4 スギ E70 による寸法効果パラメータの検討

(7)、(8) 式により、含水率 15%、標準荷重条件に調整したスギの E 等級の度数分布を Fig. 1 に示す。全 7690 体のうち 3233 体 (42%) が E70 に区分された。そこで、スギ E70 のデータを寸法効果パラメータの検討に用いることとした。

まず、スギ E70 に区分された 3233 体のうち、曲げ試験時の荷重条件が標準荷重条件によって行われた 2881 体の曲げ強度を用いて、長さ、材せい、スパン／材せい比が一定の場合の各寸法効果パラメータを検討した。材幅に関しては、ASTM D1990 および EN 384 で寸法効果を考慮していないこと、既報 (長尾ら 2014) で材幅の影響は認められなかったことを踏まえ、検討から除外した。

また、元データには様々な寸法が含まれていたため、Table 1 のように材せい d とスパン L の範囲を区分し、代表値としての d と L を決めた。 d 、 L 、 L/d の度数分布をそれぞれ Fig. 2 に示す。Fig. 2 から度数の多いものについて検討することとし、スギ E70 のうち、 d = 120mm (597 体)、 L = 2700mm (1839 体)、 L/d = 18 (606 体) を選択した。 d = 105mm、 L/d = 24、27 も度数は多かったが、例えば、 d = 105mm 内の L はほぼ 1890mm と 2700mm のみで、うち L = 2700mm が約 8 割を占めるなどの、分布の偏りがあったため採用しなかった。

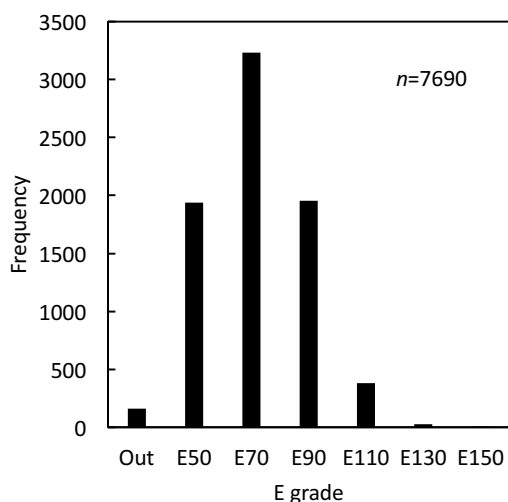


Fig. 1. 製材の日本農林規格によるスギのE等級の度数分布

Frequency distribution of E grade of sugi (Japanese cedar) according to the Japanese Agricultural Standard (JAS) for sawn timber.

Symbol: n , number of specimens.

以上をまとめると、標準荷重条件で行われたスギ E70 の曲げ強度を用いて、 $d=120\text{mm}$ の場合の L の影響 s_L 、 $L=2700\text{mm}$ の場合の d の影響 s_d 、 $L/d=18$ の場合の L と d の影響 s_R の各寸法パラメータを検討した。

3.5 製材の日本農林規格に対応した基準強度に対する寸法調整係数の検討

スギ、アカマツ、ベイマツのデータを用いて、曲げ強度と基準強度とを比較し、材せいの大きい材料に対して日本農林規格に対応した基準強度を低減させるための寸法調整係数の検討を行った。

すなわち、まず、等級区分するために曲げヤング係数を含率率 15%、標準荷重条件での値に調整後、EN 384 の方法を用いて曲げ強度を含率率 15%、標準荷重条件での値へ調整した。続いて、材せいと、スパン／材せい比が一定の場合の寸法効果パラメータを変化させて、複数の寸法調整係数を求めた。これと曲げ強度の下限値と基準強度の比（5% 下限値／基準強度）とを比較し、適切な寸法調整係数を提案した。

具体的には、まず、(7)、(8) 式により、スギ、アカマツ、

Table 1. 材せい d 、スパン L 、 L/d の階級値

Classes of the specimen depth (d), span (L), and span/specimen depth ratio (L/d).

Specimen depth d (mm)		Span L (mm)		L/d	
Class mark	Class interval	Class mark	Class interval	Class mark	Class interval
15	0–22.5	270	0–405	3	0–4.5
30	22.5–37.5	540	405–675	6	4.5–7.5
45	37.5–52.5	810	675–945	9	7.5–10.5
60	52.5–67.5	1080	945–1215	12	10.5–13.5
75	67.5–82.5	1350	1215–1485	15	13.5–16.5
90	82.5–97.5	1620	1485–1755	18	16.5–19.5
105	97.5–112.5	1890	1755–2025	21	19.5–22.5
120	112.5–127.5	2160	2025–2295	24	22.5–25.5
135	127.5–142.5	2430	2295–2565	27	25.5–28.5
150	142.5–165	2700	2565–2970	30	28.5–31.5
180	165–195	3240	2970–3510	33	31.5–34.5
210	195–225	3780	3510–4050	36	34.5–37.5
240	225–255	4320	4050–4590	39	37.5–40.5
270	255–285	4860	4590–5130	42	40.5–43.5
300	285–315	5400	5130–5670	45	43.5–46.5
330	315–345	5940	5670–6210	48	46.5–55.5

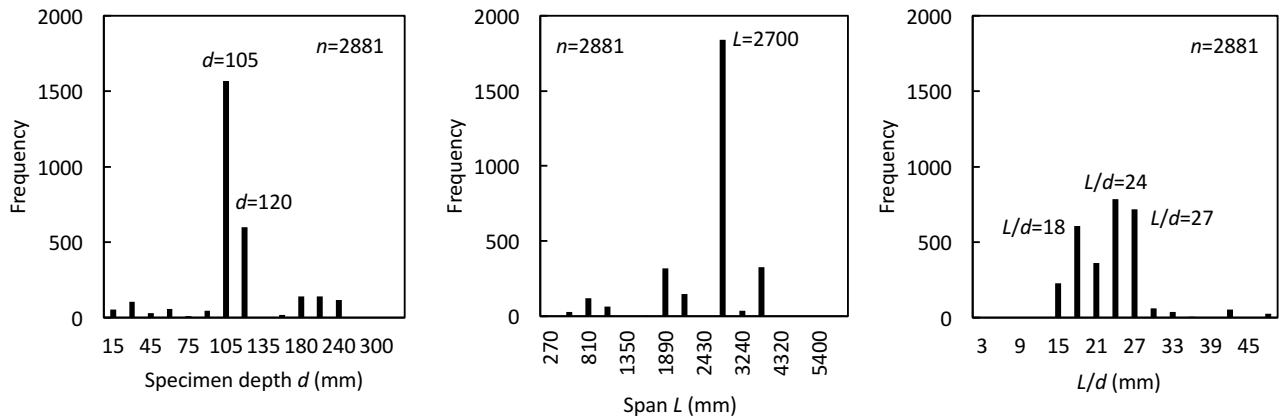


Fig. 2. スギ E70 における材せい d 、スパン L 、 L/d の度数分布

Frequency of the specimen depth (d), span (L), and span/specimen depth (L/d) of E70 grade sugi (Japanese cedar).

Symbol: n , number of specimens.

ベイマツの曲げヤング係数を含水率 15%、標準荷重条件に調整して E 等級に区分した。続いて、(7) 式により曲げ強度を含水率 15% 時の値に調整後、標準荷重条件での値に調整した。曲げ強度の標準荷重条件への調整方法は EN 384 の (6) 式を用いたが、(6) 式の調整係数 k_l は曲げ強度を除するものである。本報で用いる調整係数は曲げ強度に乘じるものとし、(6) 式の分母と分子を入れ替えた標準荷重条件への調整係数 k_2 を求める (9) 式に変換した。

$$k_2 = \left(\frac{L+5S}{L_0+5S_0} \right)^{0.2} = \left(\frac{L+5S}{48d} \right)^{0.2} \quad (9)$$

(9) 式に元データの L 、 S 、 d を代入して k_2 を求めた。これを含水率 15% 時の値に調整した曲げ強度に乘じて、含水率 15%、標準荷重条件での曲げ強度とした。 k_2 は (6) 式 k_l の逆数であるため、例えば、2 章で示した $k_l = 1.027$ の場合、 $k_2 = 1/1.027 = 0.974$ となる。

このようにして得られた含水率 15%、標準荷重条件での曲げ強度を元に、製材の日本農林規格の機械等級区分による基準強度との比を算出した。ただし、基準強度は、5% 下限値に相当すると考えられる (建設大臣官房技術調査室 1992, 井道 2018)。そのため、標準荷重条件での各曲げ強度から、樹種・等級・材せい d ごとに 5% 下限値を求めた。

まず、同一 E 等級内で Table 1 に示した d で区分して等級・ d ごとのロットを作成した。続いて、このロットに対して、ASTM D2915 に示された順位法で信頼水準 75% の 5% 下限値を求める方法により、各ロットの曲げ強度の 5% 下限値を算出した。ASTM D2915 の表に記載された最少の試験体数である 28 体以上の試験体数があるロットを下限値の算出に採用した。なお、表の上限の 1089 体を超えたものは、正規分布を仮定した 5% 下限値とした。その結果、採用したロットは、スギでは E50 (d (mm)=30、90、105、120、180、210、

240、270)、E70 (d (mm)=30、45、60、90、105、120、180、210、240)、E90 (d (mm)=30、105、120、180、210、240)、E110 (d (mm)=105、120、240)、アカマツでは E70 (d (mm)=105、240)、E90 (d (mm)=105、210、240)、E110 (d (mm)=105、120、210)、E130 (d (mm)=105、210)、ベイマツでは E110 (d (mm)=240、300)、E130 (d (mm)=240、300) の合計 40 ロットであった。最後に、算出された各ロットの 5% 下限値と当該ロットの基準強度との比 (5% 下限値/基準強度) を求めた。この比と以下の方法で求める寸法調整係数とを比較することにより、スパン/材せい比 (L/d) が一定の場合の寸法効果パラメータ s_R について検討した。

寸法調整係数を検討するにあたり、まず基準となる標準材せい d_0 を決める必要がある。現行の製材の日本農林規格による目視等級区分製材の基準強度の元となった値は、正角と平角の実験値から算出したとされている (井道 2018) ことから、本機械等級区分による検討もこれと同様と仮定し、さらに、EN 384 の d_0 が 150mm とされていることも踏まえ、 d_0 を 150mm とした。また、本報の趣旨は d の大きい材料の基準強度を低減することにあるため、 d が 150mm 以下のロットの 5% 下限値は調整しないこととした。検討する L/d が一定の場合の s_R の値は、後述する結果を参考に $s_R = 0.3$ 、0.4、0.5、0.6 とした。(5) 式の指数部分を任意とした (10) 式を標準荷重条件における寸法調整係数 k_1 を求める式とし、この式に $s_R = 0.3 \sim 0.6$ 、各ロットの d (30 ~ 300mm) を代入して k_1 を算出した。 k_1 と、先に示した各樹種・等級ごとの 5% 下限値/基準強度とを比較することにより、適切な s_R を提案した。

$$k_1 = \begin{cases} 1, & (d \leq 150) \\ \left(\frac{150}{d} \right)^{s_R}, & (d > 150) \end{cases} \quad (10)$$

4. 結果と考察

4.1 スギ E70 による各寸法効果パラメータが曲げ強度に及ぼす影響

Fig. 3 に、スギ E70 における、a) 材せい d が一定の場合のスパン L と曲げ強度との関係、b) L が一定の場合の d と曲げ強度との関係、c) L/d が一定の場合の d と曲げ強度との関係を示す。また、本報、ASTM D1990、EN 384、Fernández-Golfín ら (2002) がまとめた文献値による寸法効果パラメータを Table 2 に示す。Fig. 3 に示すように、各寸法効果パラメータは長尾ら (2014) と同様の方法で求めた。すなわち、 L または d を x 軸に、曲げ強度を y 軸にとり、累乗近似式 $y=ax^b$ をモデルとする回帰分析によって係数 a と b を求めた。寸法効果パラメータの値は係数 b の絶対値に相当する。

Table 2 から、 d が一定の場合の L の寸法効果パラメータ s_L について、本報の 0.153 は、ASTM D1990 や文献値と近い値にあった。 L が一定の場合の d の寸法効果パラメータ s_d について、本報の 0.227 は、ASTM D1990 の 0.29 よりもやや小さかったが、文献値の範囲内にあった。 L/d が一定の場合の寸法効果パラメータ s_R について、本報の値 0.285 は、EN 384、ASTM D1990、文献値の概ね 0.2 ~ 0.5 の範囲内にあった。長尾ら (2014) の $L/d=18$ における $s_R=0.25 \sim 0.35$ とも概ね一致した。また、ASTM D1990 などでは s_d と s_L は独立したものと考え、 s_R は両者を足したものになっているが、各パラメータを別々に算出した本報の $s_R=0.285$ は、 s_d と s_L の合計 0.38 よりも小さかった。

また、(6) 式を用いて標準荷重条件以外のスギ E70

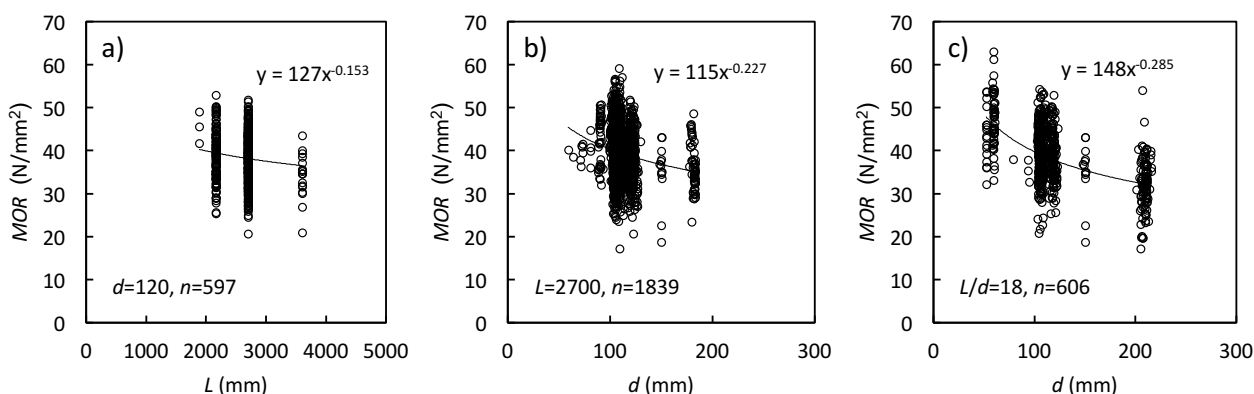


Fig. 3. スギ E70 における、a) 材せい d が一定の場合のスパン L と曲げ強度との関係、b) L が一定の場合の d と曲げ強度との関係、c) L/d が一定の場合の d と曲げ強度との関係

a) Relationship between the span, L , and bending strength, MOR , with the constant specimen depth, d , b) relationship between d and MOR with constant L , and c) relationship between d and MOR with constant L/d , of the E70 grade sugi (Japanese cedar).

Symbol: n , number of specimens.

Table 2. 本報、ASTM D1990、EN 384、文献の寸法効果パラメータ
Size effect parameters from this study, ASTM D1990, EN 384, and from the literature.

	Length effect with constant depth, s_L	Depth effect with constant length, s_d	Depth and length effect with constant L/d , s_R
Sugi E70 (this study)	0.153 ($d = 120$)	0.227 ($L = 2700$)	0.285 ($L/d = 18$)
ASTM D1990	0.14	0.29	0.43 ($L/d = 17$)
EN 384			0.20 ($L/d = 18$)
Barrett and Fewell (1990)	0.17	0.23	0.4
Madsen (1992)	0.2	0	0.2
Ehlbeck and Colling (1990)	0.15	0.15	0.3
Bury (1981)			0.4
Fewell and Curry (1983)			0.39
Barrett and Griffin (1989)			0.46
Johnson et al. (1989)			0.4

Symbols: d , specimen depth; L , span.

Note: The test conditions are shown in parentheses.

の曲げ強度を標準荷重条件へ調整した結果、合計 3233 体の曲げ強度が得られた。この曲げ強度を用いて Fig. 3 c) と同様のグラフを描いたところ、 $s_R=0.267$ となった。これは標準荷重条件による曲げ試験のみの値である $s_R=0.285$ と概ね一致し、EN 384 による (6) 式は荷重条件の調整法として有効であることがわかった。

4.2 基準強度に対する寸法調整係数と 5% 下限値／基準強度との比較

材せい d と、各樹種・等級ごとの 5% 下限値／基準強度および標準荷重条件における寸法調整係数 k_1 との関係、Fig. 4 に示す。まず、5% 下限値／基準強度は、非常にばらつきが大きい結果となったものの、 d が 30 ～ 105mm あたりまでは 1 より大きい値を、 d が 120 ～ 180mm あたりは 1 に近い値を、 d が 210mm を超えると 1 より小さくかつ減少傾向を示した。 d が 150mm 前後での 5% 下限値／基準強度は概ね 1 に近い値が得られたことから、本報で標準材せいを 150mm としたことは概ね適切であったと考えられた。次に、 k_1 について、 k_1 は d が 150mm までは一定であるが、150mm を超えると低下し、その低下度合いは s_R が大きくなるほど増加する。5% 下限値／基準強度と k_1 とを比較すると、 d が 150mm を超える範囲において、 k_1 は 1 より小さくかつ s_R が大きくなるほど小さくなるが、 s_R が 0.3 ～ 0.6 のとき、5% 下限値／基準強度と概ね一致した。

ここで、 d が 150mm 以上のデータ（外れ値であるアカマツ $d=240$ mm のプロットを除く）を回帰分析して

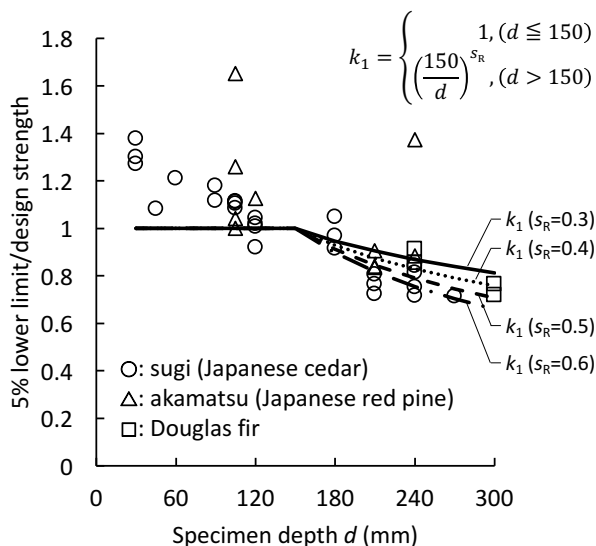


Fig. 4. 材せい d と、各樹種・等級ごとの 5% 下限値を基準強度で除したものおよび k_1 との関係
Relationship between the specimen depth and 5% lower limit/design strength and the size effect factor.

Symbols: k_1 , size adjustment factor; s_R , size effect parameter with constant L/d ; L , span; d , specimen depth.

s_R を求めた結果、 $s_R=0.482$ となり、これは $s_R=0.4$ と 0.5 の間に位置していた。そのため、製材の日本農林規格に対応する基準強度を材せいに応じて低減するための係数 k_1 にかかる寸法効果パラメータ s_R は 0.4 ～ 0.5 程度とするのが適当であると考えられた。

5. 結論

アメリカやヨーロッパとは異なり、わが国の製材の日本農林規格に対応する基準強度に対しては、寸法の増加に伴い基準強度を低減する調整係数に相当するものは存在しない。今後、丸太の大径化に伴い、これまでより材せいの大きい製材品の利用が増加することが予想される。したがって、寸法効果の影響を考えると、材せいの大きい製材品に対して従来の基準強度を用いることに対する懸念が生じる。そこで、『製材品の強度性能に関するデータベース』データ集<8>』に集積された曲げ強度のデータを用いて、寸法効果の影響を調べるとともに寸法効果パラメータの値について検討した。

まず、スギの曲げヤング係数を含水率 15%、スパンを材せいの 18 倍とした 3 等分点 4 点荷重方式の標準荷重条件に調整し、等級区分を行なった。この結果、最もデータ数の多かったスギ E70 のうち、標準荷重条件によって曲げ試験が行われた 2881 体の曲げ強度を含水率 15% 時の値に調整し、スパン、材せい、スパン／材せい比が一定の場合の各寸法効果パラメータを算出した。その結果、スギ E70 の寸法効果パラメータは文献値と概ね近い値にあった。

さらに、基準強度を材せいに応じて低減するための標準荷重条件における寸法調整係数 k_1 について検討した。まず、スギに加えて、アカマツ、ベイマツの曲げヤング係数と曲げ強度を含水率 15% および標準荷重条件の値に調整した。曲げヤング係数に基づき等級区分し、樹種、等級、材せい d ごとに曲げ強度の 5% 下限値を求め、製材の日本農林規格に対応する基準強度との比 (5% 下限値／基準強度) を算出した。次に、標準材せい d_0 を 150mm とし、 d が 30 ～ 300mm、寸法効果パラメータ s_R が 0.3 ～ 0.6 の場合の寸法調整係数 k_1 をそれぞれ算出し、5% 下限値／基準強度と比較した。その結果、 s_R は 0.4 ～ 0.5 程度にするのが適当であると考えられた。

謝 辞

本報は、日本建築学会木質構造運営委員会木質材料強度検証小委員会 (2016 年 4 月～2020 年 3 月、主査：中島史郎) の一環として行ったものである。また、「製材品の強度性能に関するデータベース」の参画機関である公立試験研究機関の担当者の方々に感謝する。

引用文献

- ASTM International (1998) ASTM D2915 – 98 Standard practice for evaluating allowable properties for grades of structural lumber.
- ASTM International (2011) ASTM D245 – 06 (Reapproved 2011) Standard practice for establishing structural grades and related allowable properties for visually graded lumber.
- ASTM International (2016) ASTM D1990 – 16 Standard practice for establishing allowable properties for visually-graded dimension lumber from in-grade tests of full-size specimens.
- Barrett, J. D. and Fewell, A. R. (1990) Size factors for the bending and tension strength of structural timber. Proceedings of CIB-W18 Meeting 23, Paper 23-10-3.
- Barrett, J. D. and Griffin, H. (1989) Size effects and property relationships for Canadian 2-inch dimension lumber. Proceedings of CIB-W18 Meeting 22, Paper 22-6-1.
- Bury, K.V. (1981) Statistical analysis of NLGA bending tests. University of British Columbia.
- Ehlbeck, J. and Colling, F. (1990) Bending strength of glulam beams – A design proposal – Proceedings of CIB-W18 Meeting 23, Paper 23-12-1.
- European Committee for Standardization (2004) EN 384:2004 Structural timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density.
- European Committee for Standardization (2016) EN 384:2016 Structural timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density.
- Fernández-Golfín, J. I., Hermoso, E. and Díez, M. R. (2002) Analysis of the effect of volume on the bending strength of the spanish scot and laricio pine timber. *Materiales de Construcción*, 334, 43-55.
- Fewell, A. R. and Curry, W. J. (1983) Depth factor adjustments in the determination of characteristic bending stresses for visually graded timber. *Structural Engineer*, 61B, No. 2.
- 井道 裕史 (2018) 我が国の製材規格と許容応力度の変遷. 森林総合研究所研究報告, 17 (1), 1-33.
- 飯島 泰男・園田 里見・青井 秀樹 (2011) 構造用木材の強度評価法および基準値算出法. 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”, 88-92.
- Johnson, L. A., Evans, J. W. and Green, D.W. (1989) Volume effect adjustments for the in-grade data. In-grade testing of structural lumber. Forest Products Research Society, Proceedings No. 47363.
- 建設大臣官房技術調査室 (1992) I. 木材の機械的強度等級区分法 (案). “建設省総合技術開発プロジェクト 新木造建築技術の開発 報告書 第2巻 構造設計に関する技術開発”, 1-5.
- 建設省 (2000) 平成 12 年 5 月 31 日建設省告示第 1452 号. 木材の基準強度 F_c 、 F_t 、 F_b 及び F_s を定める件. (最終改正: 平成 27 年 8 月 4 日国土交通省告示第 910 号).
- 強度性能研究会事務局 (2013) “「製材品の強度性能に関するデータベース」 データ集 < 8 > ”, 54pp.
- Madsen, B. (1992) *Structural behaviour of timber*. Timber Engineering Ltd, 405pp.
- 長尾 博文・井道 裕史・加藤 英雄・三浦 祥子・下田 優子 (2014) スギ製材の曲げ強度に対する寸法効果 材せいと材幅の影響. 木材学会誌, 60 (2), 100-106.
- 中井 孝・藤井 毅・鈴木 秀三・長尾 博文 (2006) 4. 材料の許容応力度および弾性係数. “木質構造設計規準・同解説 一許容応力度・許容耐力設計法一”, 日本建築学会, 149-168.
- 中島 史郎 (2001) 6.4.5 寸法効果に対する評価. 国土交通省建築研究所編著 “改正建築基準法の構造関係規定の技術的背景”, ぎょうせい, 208-210.
- 中村 昇 (2004a) 木質構造のここが分からない 第 1 回 一寸法効果 その 1 ー. *Journal of Timber Engineering*, 17 (3), 60-63.
- 中村 昇 (2004b) 木質構造のここが分からない 第 2 回 一寸法効果 その 2 ー. *Journal of Timber Engineering*, 17 (4), 87-92.
- 農林水産省 (1974) 昭和 49 年 7 月 8 日農林水産省告示第 600 号. 枠組壁工法構造用製材及び枠組壁工法構造用たて継ぎ材の日本農林規格. (最終改正: 令和元年 6 月 27 日農林水産省告示第 475 号).
- 農林水産省 (2007) 平成 19 年 8 月 29 日農林水産省告示第 1083 号. 製材の日本農林規格. (最終改正: 令和元年 8 月 15 日農林水産省告示第 661 号).
- 林野庁 (2018) “平成 30 年版 森林・林業白書”, 全国林業改良普及協会, 15.
- 鈴木 直之 (1997) 木材強度の寸法効果. 木材工業, 52 (6), 278-282.
- 宇京 斉一郎 (2015) 寸法効果. 中村 昇他編 “ティンバーメカニクス 木材の力学理論と応用”, 海青社, 18-25.

Influence of the size effect parameter on the bending strength of lumber

Hirofumi IDO ^{1)*}, Hideo KATO ¹⁾ and Hirofumi NAGAO ¹⁾

Abstract

The purpose of this study was to determine the size effect parameter for the design strength that corresponds to the Japanese Agricultural Standard for lumber. This was performed using an existing database that contains lumber strength properties. Initially, each size effect parameter for the constant span, specimen depth, and span/specimen depth ratio of the E70 grade sugi (Japanese cedar) was obtained using its bending strength, and each size effect parameter was confirmed to agree with the values reported in previous studies. Then, the size effect factor was considered with an objective to reduce the design strength based on the specimen depth. The bending strengths of sugi, akamatsu (Japanese red pine), and Douglas fir were adjusted to the values under the standard loading conditions using an existing adjustment formula. In addition, the 5% lower limit of the bending strength was obtained for each species, grade, and specimen depth. The ratio of the 5% lower limit of bending strength and the design strength corresponding to the Japanese Agricultural Standard for lumber (5% lower limit/design strength) was calculated and compared with the size adjustment factor for the standard specimen depth of 150 mm. Thus, under the standard loading conditions, it was inferred that the value of the size effect parameter for the size adjustment factor was approximately 0.4–0.5.

Key words: size effect parameter, size adjustment factor, bending strength, lumber, database

Received 13 June 2019, Accepted 18 December 2019

1) Department of Wood Engineering, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

* Department of Wood Engineering, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 JAPAN; e-mail: ido@ffpri.affrc.go.jp