

奈良県産スギ平角材の曲げ強度試験

中田欣作

高温乾燥された奈良県産スギ平角材 200 本の曲げ強度試験を行った。試験体の平均値は、気乾密度 0.41g/cm³、平均年輪幅 3.9mm、含水率 17.4%、最大節径比 13.9%であり、強度試験の結果は曲げヤング係数 8.9kN/mm²、曲げ強さ 49.3N/mm²であった。

曲げヤング係数は、縦振動ヤング係数およびたわみ振動ヤング係数と強い正の相関が認められ、特に後者と相関が高かった。曲げヤング係数および曲げ強さは、気乾密度および年輪数と正の相関が認められ、含水率、平均年輪幅、最大節径比および集中節径比と負の相関が認められた。

曲げ強さは、曲げヤング係数と強い相関が認められた。曲げヤング係数により等級区分すると、E70、E90、E110 および E130 の試験体はそれぞれ 46、94、57 および 3 本となった。E70、E90 および E110 の曲げ強さの 5% 下限値はそれぞれ 31.6、37.5 および 46.3N/mm² となり、建設省告示で示される基準強度と同等であった。本試験の試験体数は材料強度を設定する際に必要となるサンプリング数を上回っており、5% 下限値は奈良県産材の材料強度とみなすことができると考えられる。

高温乾燥されたスギ平角材は、天然乾燥されたスギ平角材および正角材と曲げヤング係数および曲げ強さが同等であり、両者は同じ材料強度を用いることができると考えられる。

1. はじめに

各種の木材を住宅等の構造材料として用いる際には、鉄やコンクリート等の建築材料と同様に強度性能を明示することが求められる。JIS、JAS に基づく木質材料は強度等級区分を行うことにより、各種のヤング係数および強度が与えられる。この強度等級区分の基となるのは曲げヤング係数であり、木質材料の曲げヤング係数は実測することが基本となっている。

構造用集成材では製品を構成する部材であるラミナの曲げヤング係数を、構造用製材では製品そのものの曲げヤング係数を測定する。実験室では曲げ試験機を用いて正確な曲げヤング係数を測定するが、製造工場ではグレーディングマシンを用いて迅速にヤング係数を測定する。グレーディングマシンには曲げ式と打撃式があり、それぞれ曲げヤング係数と縦振動ヤング係数が測定されるが、後者の方が良く用いられている。

奈良県では、JAS における機械等級区分および奈良県地域認証材の構造用製材は、グレーディングマシンによりヤング係数が測定される。ヤング係数が測定された製材は、強度等級区分により高い材料強度が与えられ、住宅等の構造材としての構造計算あるいはスパン表による梁せいの決定に有利である。なお、ヤング係数を測定していない目視等級区分構造用製材あるいは無等級材では、材料強度が低く設定されている。

奈良県産の製材の強度性能は、スギ材およびヒ

ノキ材について、これまでに多くの曲げ試験により測定されている。しかし、その多くは従来から行われている天然乾燥を行った製材に関するものであり、現在の一般的な乾燥方法である人工乾燥を行った製材の曲げ試験¹⁾は少ない。特に、スギ平角材の人工乾燥材の曲げ試験は少ない。

本研究では、奈良県産スギ平角材について、高温乾燥により人工乾燥した製材を用いて、ヤング係数の測定および曲げ試験を行い、ヤング係数の測定方法による精度の検討、等級区分による曲げ強度の推定を行った。

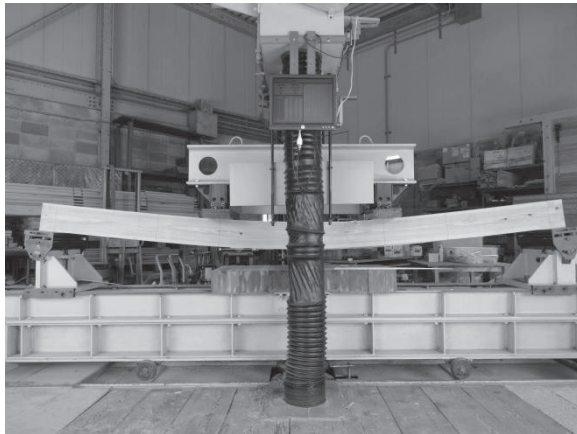
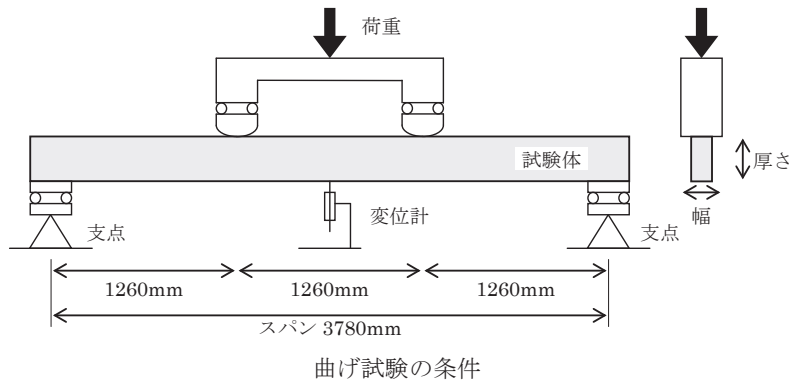
2. 材料と方法

2.1 供試材料

供試材料には、幅 105mm、厚さ 210mm、長さ 4000mm の奈良県産スギ平角材 200 本を用いた。スギ平角材は、高温乾燥を行った後、天然乾燥および中温乾燥を行った。高温乾燥では、乾球温度 95℃での蒸煮を 8 時間行った後、乾球温度 120℃、乾湿球温度差 30℃で 24 時間の高温セット、乾球温度 90℃、乾湿球温度差 30℃で 184 時間の蒸気式熱風乾燥を行った。中温乾燥では、乾球温度 70℃、乾湿球温度差 10～15℃で 24 時間、乾球温度 70℃、乾湿球温度差 20℃で 168 時間の蒸気式熱風乾燥を行った。天然乾燥は、屋外において 2～3 か月間行った。

2.2 強度試験の方法

図 1 に強度試験の方法を示す。曲げ試験は東京衡



曲げ試験



たわみ振動試験

図1 強度試験の方法

機製造所製実大木材強度試験機を用いて、スパン3780mmの3等分点4点荷重で行った。荷重方向は、縦使い方向とした。荷重 P とスパン中央のたわみ変位 δ との関係を測定し、式(1)および式(2)を用いて曲げヤング係数 E_B および曲げ強さ σ_B を算出した。

$$E_B = \frac{Pa(3L^2 - 4a^2)}{4\delta bh^3 \times 10^3} \quad (\text{kN/mm}^2) \quad (1)$$

$$\sigma_B = \frac{3P_{\max} a}{bh^2} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (2)$$

ただし、 L :スパン、 a :支点と荷重点の距離、 b :幅、 h :厚さ、 P_{\max} :最大荷重。

これらの試験結果は、以下の方法²⁾により式(3)および式(4)を用いて標準条件の曲げヤング係数 E_M および曲げ強さ σ_M に調整した。式(5)および式(6)は曲げヤング係数および曲げ強さを含水率15%の標準条件に調整する係数、式(7)は曲げ強さを梁せい150mmの標準条件に調整する係数、式(8)および式(9)は曲げヤング係数および曲げ強さを標準の荷重条件に調整する係数である。本試験での調整係数 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 、および k_5 は、それぞれ0.92~1.06、0.88~1.09、1.07、1.00および1.07となった。

$$E_M = k_1 \cdot k_4 \cdot E_B \quad (3)$$

$$\sigma_M = k_2 \cdot k_3 \cdot k_5 \cdot \sigma_B \quad (4)$$

$$k_1 = 1.14 / (1.44 - 0.0200M) \quad (5)$$

$$k_2 = 1.25 / (1.75 - 0.0333M) \quad (6)$$

$$k_3 = (h/h_0)^{0.2} \quad (7)$$

$$k_4 = \frac{1 + 2.4h^2(E/G)/(3L^2 - 4a^2)}{1 + 2.4h_0^2(E/G)/(3L_0^2 - 4a_0^2)} \quad (8)$$

$$k_5 = \left(\frac{L + 5s}{L_0 + 5s_0} \right)^{0.2} \quad (9)$$

ただし、 M :試験時の含水率10%以下は10%、18%以上は18%とした含水率、 s :荷重点間距離、 h_0 :標準条件の梁せい(=150mm)、 L_0 :標準条件のスパン(=18 h_0 =2700mm)、 a_0 :標準条件の支点と荷重点の距離(=6 h_0 =900mm)、 s_0 :標準条件の荷重点間距離(=6 h_0 =900mm)、 E/G :真のヤング係数とせん断弾性係数の比(=15)。

以上の曲げヤング係数および曲げ強さの調整値は、以下では単に曲げヤング係数及び曲げ強さと記す。

両端自由条件におけるたわみ振動の1次の節の標準位置(両端から0.224 l 、 l :長さ)で試験体を支持し、試験体の材中央の上面をプラスチックハ

ンマーで打撃し、同位置において加速度ピックアップでたわみ振動周波数 f_F を測定した。打撃による加力方向は、縦使いおよび平使い方向とした。以下では、縦使い方向のヤング係数を単にたわみ振動ヤング係数、平使い方向のヤング係数をたわみ横振動ヤング係数と記す。たわみ振動周波数の解析は、エーティーエー社製グレーディングマシン HG-2001 を用いて行った。また、試験体を上記と同じ標準位置で支持し、試験体の木口面をプラスチックハンマーで打撃し、リオン社製 FFT アナライザー

SA-77 を用いて打撃音の縦振動周波数 f_L を測定した。

式 (10)³⁾ および式 (11)³⁾ を用いてたわみおよび縦振動ヤング係数 E_F および E_L を算出した。

$$E_F = \frac{48\pi^2 f_F^2 l^3 w}{4.730^4 bh^3 \times 10^6} \quad (\text{kN/mm}^2) \quad (10)$$

$$E_L = \frac{4f_L^2 lw}{bh \times 10^6} \quad (\text{kN/mm}^2) \quad (11)$$

ただし、 w : 重量。

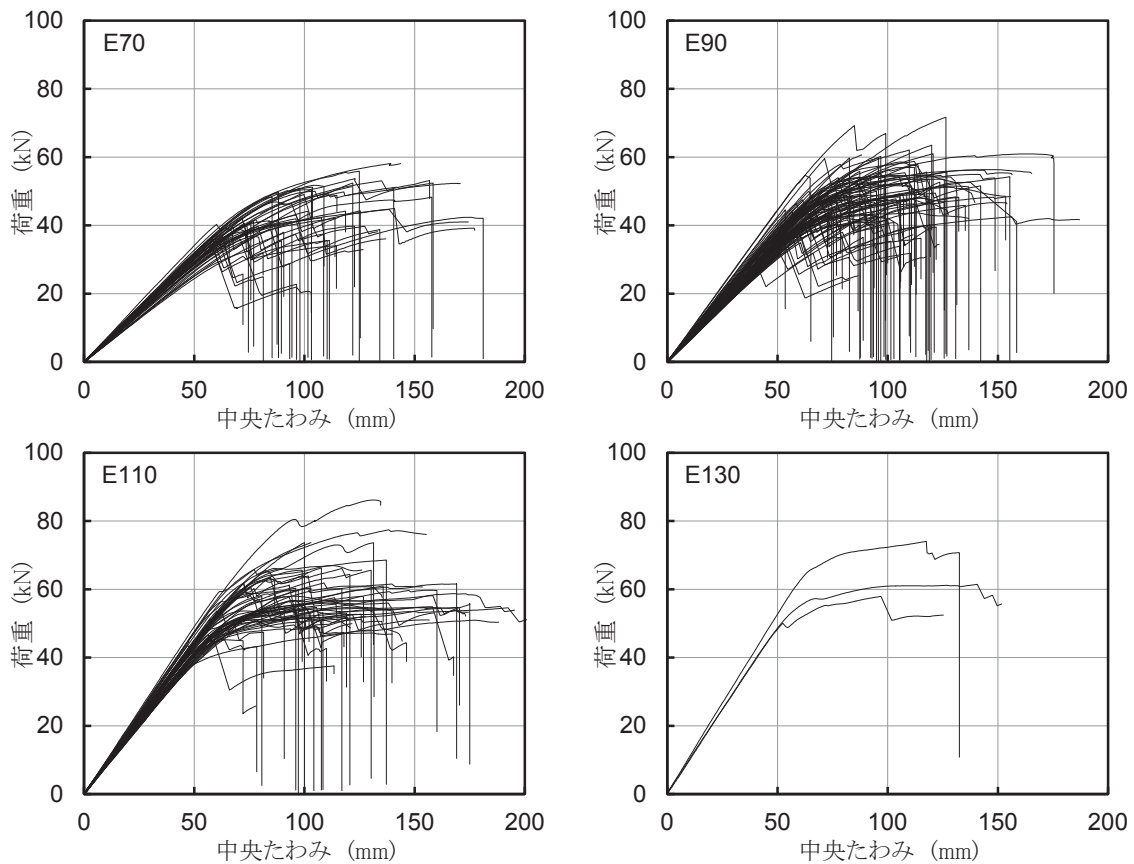


図2 曲げ試験における荷重—中央たわみ曲線

表1 強度試験の結果

条件	本数	密度		平均 年輪幅 (mm)	含水率 (%)	節径比		曲げヤン グ係数 ^{b)} (kN/mm ²)	応力 ^{c)}		比強度 ^{d)}	
		試験時 (g/cm ³)	気乾 ^{a)} (g/cm ³)			最大節 (%)	集中節 (%)		比例限度 (N/mm ²)	曲げ強さ (N/mm ²)	ヤング (kN/mm ²)	曲げ強さ (N/mm ²)
全体	200	0.42	0.41	3.9	17.4	13.9	27.2	8.9	32.4	49.3	21.8	120.7
標準偏差		0.04	0.03	1.0	4.7	4.5	11.5	1.3	6.5	7.9	2.4	16.0
変動係数(%)		9.5	7.3	25.6	27.0	32.4	42.3	14.6	20.1	16.0	11.0	13.3
最大値		0.55	0.49	6.8	40.1	28.6	59.5	12.4	51.9	71.2	27.9	166.6
最小値		0.34	0.34	1.5	8.9	0.0	0.0	6.1	18.8	30.4	15.6	73.7
範囲		0.21	0.15	5.3	31.2	28.6	59.5	6.3	33.1	40.8	12.3	92.9
E70	46	0.39	0.38	4.6	17.5	15.5	32.5	7.2	27.0	42.7	19.0	112.8
E90	94	0.41	0.40	4.0	17.8	13.9	27.4	8.7	31.4	47.6	21.6	118.3
E110	57	0.44	0.44	3.3	16.9	12.7	22.7	10.5	37.7	56.8	24.0	130.4
E130	3	0.46	0.45	2.9	16.2	12.7	23.4	12.2	46.5	61.5	27.0	136.4

a : 含水率15%への調整値、b : 含水率および荷重条件による調整値、c : 含水率、梁せいおよび荷重条件による調整値、d : 気乾密度で除算

曲げ試験後に、荷重点付近から厚さ2～3cmの試験片を2枚採取し、全乾法により含水率を測定した。密度は試験体全体の重量および体積より求め、これと含水率を用いて含水率15%時の気乾密度を算出した。試験時の加力方向において樹心から試験体表面までの年輪数の多い方を年輪数とし、同方向において厚さをすべての年輪数で除して平均年輪幅を求めた。

3. 結果と考察

3.1 強度試験の結果

図2に曲げ試験における荷重－中央たわみ曲線を示す。後述する等級区分E70、E90、E110およびE130のスギ平角材では、それぞれ中央たわみが58～175mm、54～163mm、59～192mmおよび97～141mmで最大荷重を示した。曲げ破壊は、試験体下面付近の節あるいは目切れ部分から生じる場合が多かった。ただし、等級区分E110の2体では、水平せん断破壊が生じた。

表1に強度試験の結果を示す。

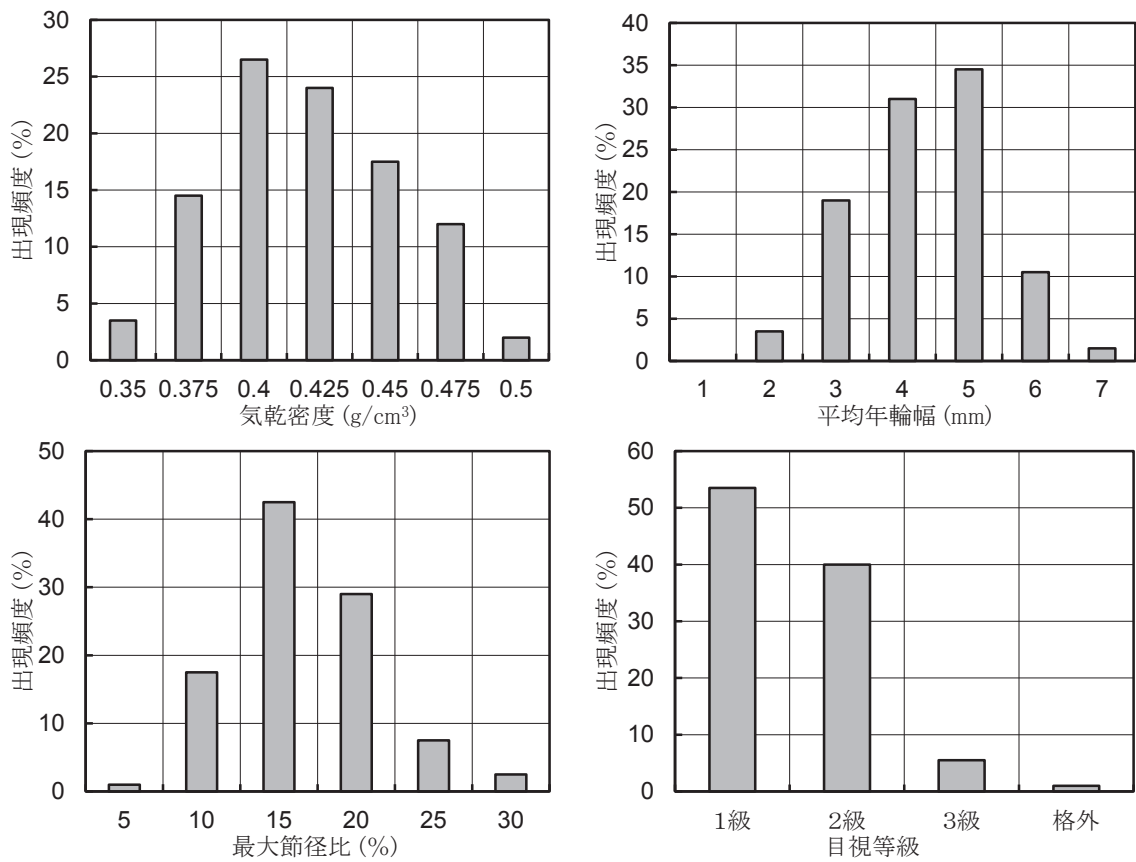


図3 各種因子の出現頻度

注) 目視等級以外のヒストグラムの横軸はデータ区間の上限値を示す。

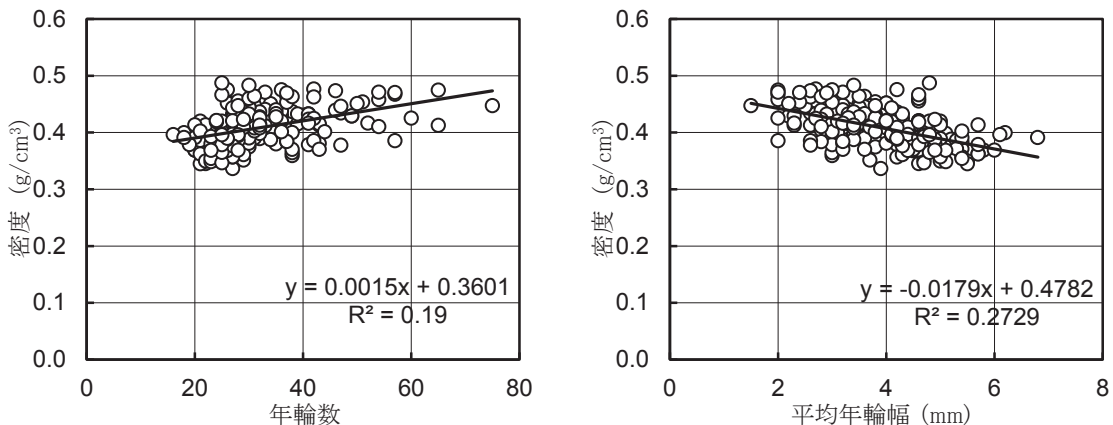


図4 密度と年輪との関係

曲げヤング係数が5.9～7.7、7.8～9.7、9.8～11.7および11.8～13.6をそれぞれ等級区分E70、E90、E110およびE130に区分した。等級区分E70、E90、E110およびE130に区分されたスギ平角材はそれぞれ46、94、57および3本であった。

節は狭い材面、広い材面の材縁部および中央部について最大節および集中節を測定し、すべての節径比により等級を決定した。

図3に各種因子の出現頻度を示す。横軸はデータ区間の上限値を記した。気乾密度は0.34～0.49g/cm³の範囲に分布し、平均値は0.41g/cm³であった。平均年輪幅は1.5～6.8mmの範囲に分布し、平均値は3.9mmであった。最大節径比は0.0～

28.6%の範囲に分布し、平均値は13.9%であった。目視等級は、1級および2級がそれぞれ53.5および40.0%と多く、3級および格外はそれぞれ5.5および1.0%と少なかった。1級は107体であった。2級は80体であり、等級は、狭い材面の節で決定したのは2体のみであり、78体では広い材面の節で決定し、多くは材縁部の最大節で決定した。3等および格外においても、等級は材縁部の最大節で決定したものが多かった。

図4に密度と年輪との関係を示す。密度は、年輪数と正の相関、平均年輪幅と負の相関が認められた。

図5に各種のヤング係数の関係を示す。曲げヤング係数は、縦振動ヤング係数、たわみ振動ヤン

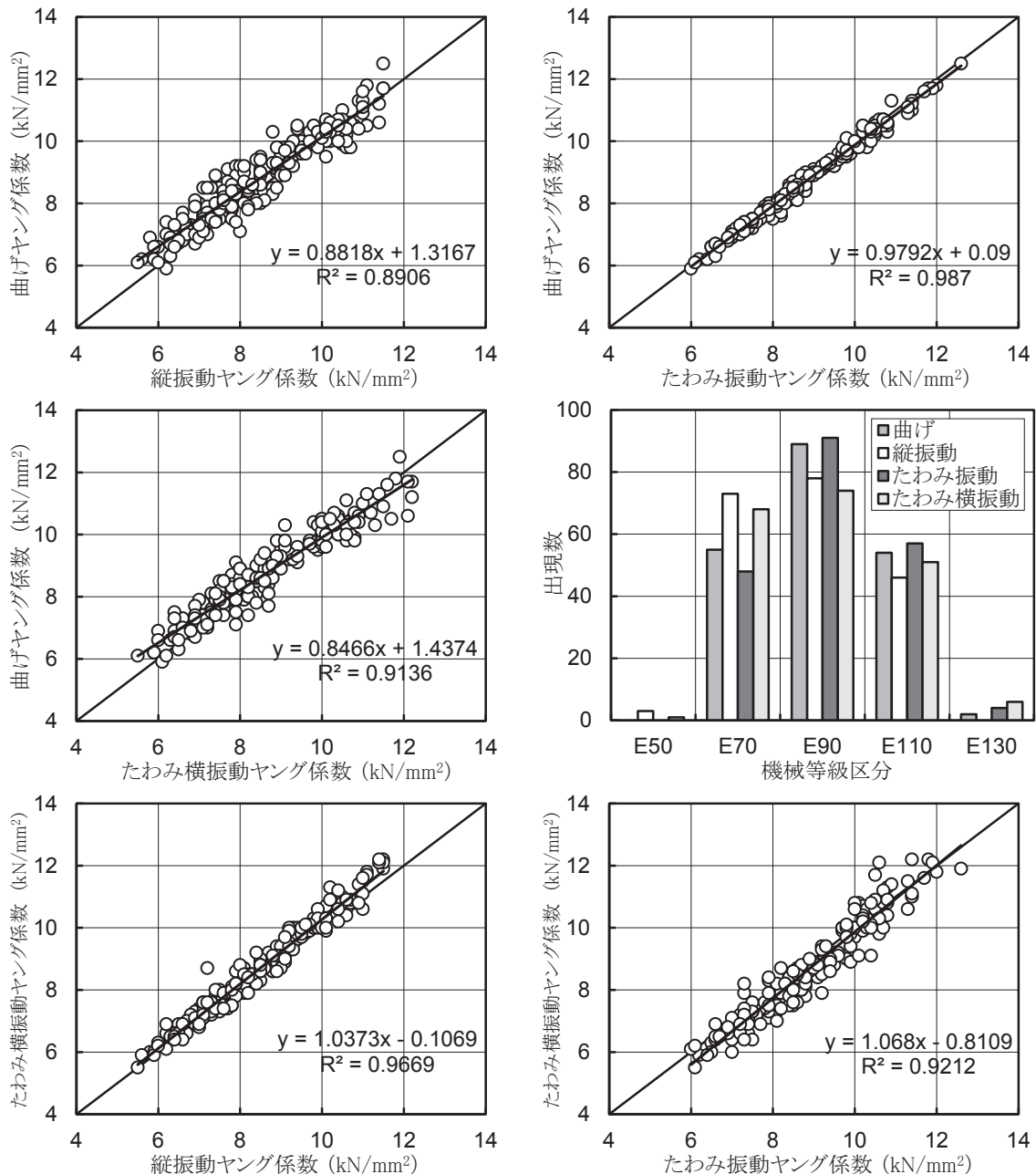


図5 各種のヤング係数の関係

グ係数およびたわみ横振動ヤング係数と強い正の相関が認められ、特にたわみ振動ヤング係数と相関が高かった。縦振動ヤング係数、たわみ振動ヤング係数およびたわみ横振動ヤング係数における等級区分が曲げヤング係数におけるそれと一致する割合は、それぞれ 78、92 および 82% であり、たわみ振動ヤング係数と曲げヤング係数の等級区分はよく一致した。縦振動ヤング係数およびたわみ横振動ヤング係数における等級区分は曲げヤング係数におけるそれよりやや低く、前者における E70 の出現率は後者におけるそれより高く、E90 および E110 での出現率は逆に低くなった。

たわみ横振動ヤング係数と縦振動ヤング係数との関係では、曲げヤング係数と縦振動ヤング係数との関係よりも相関が高くなり、縦振動ヤング係数は厚さの小さい製材の測定に適していると考えられる。

たわみ横振動ヤング係数とたわみ振動ヤング係数との関係では、曲げヤング係数とたわみ振動ヤング係数との関係よりも相関が低くなり、平角材では平使い方向と縦使い方向のヤング係数は同一ではなく、後者の方がやや高いと考えられる。

図6に曲げヤング係数と各種因子との関係を示す。

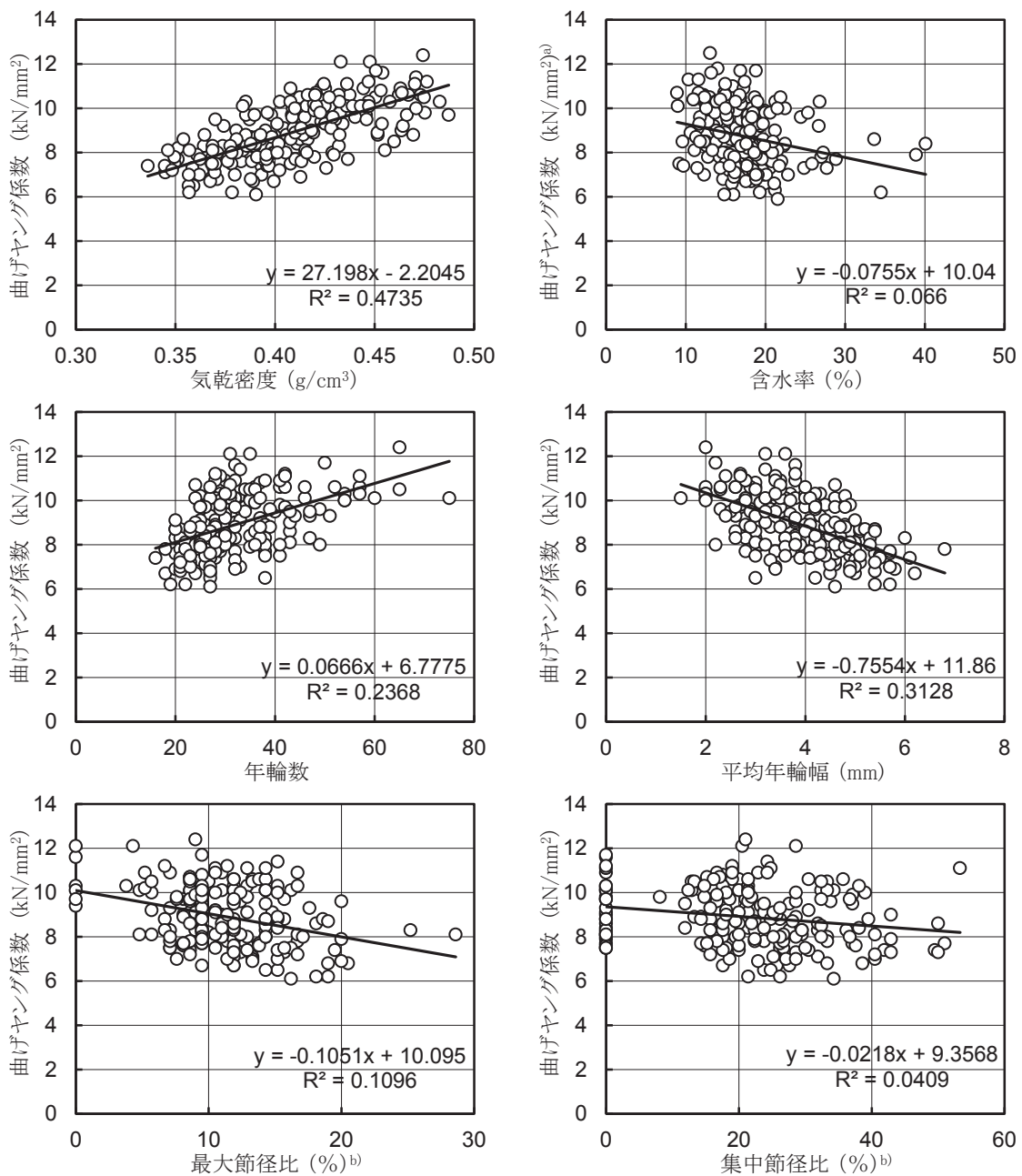


図6 曲げヤング係数と各種因子との関係

注) a: 調整を行っていない測定値、b: 荷重点間の節のみを対象とした節径比

曲げヤング係数と含水率との関係では、曲げヤング係数は調整を行っていない測定値を用いた。最大節径比および集中節径比は、曲げヤング係数に及ぼす影響が大きい荷重点間の節のみを対象とした。曲げヤング係数は、気乾密度および年輪数と正の相関、平均年輪幅と負の相関が認められた。また、曲げヤング係数は、含水率、最大節径比および集中節径比と弱い負の相関が認められた。

図7に曲げ強さと各種因子との関係を示す。曲げ強さと含水率との関係では、曲げ強さは調整を行っていない測定値を用いた。最大節径比および集中節

径比は、曲げ強さに及ぼす影響が大きい荷重点間の節のみを対象とした。曲げ強さは、気乾密度と正の相関、含水率および平均年輪幅と負の相関が認められた。また、曲げ強さは、年輪数と弱い正の相関、最大節径比および集中節径比との弱い負の相関が認められた。

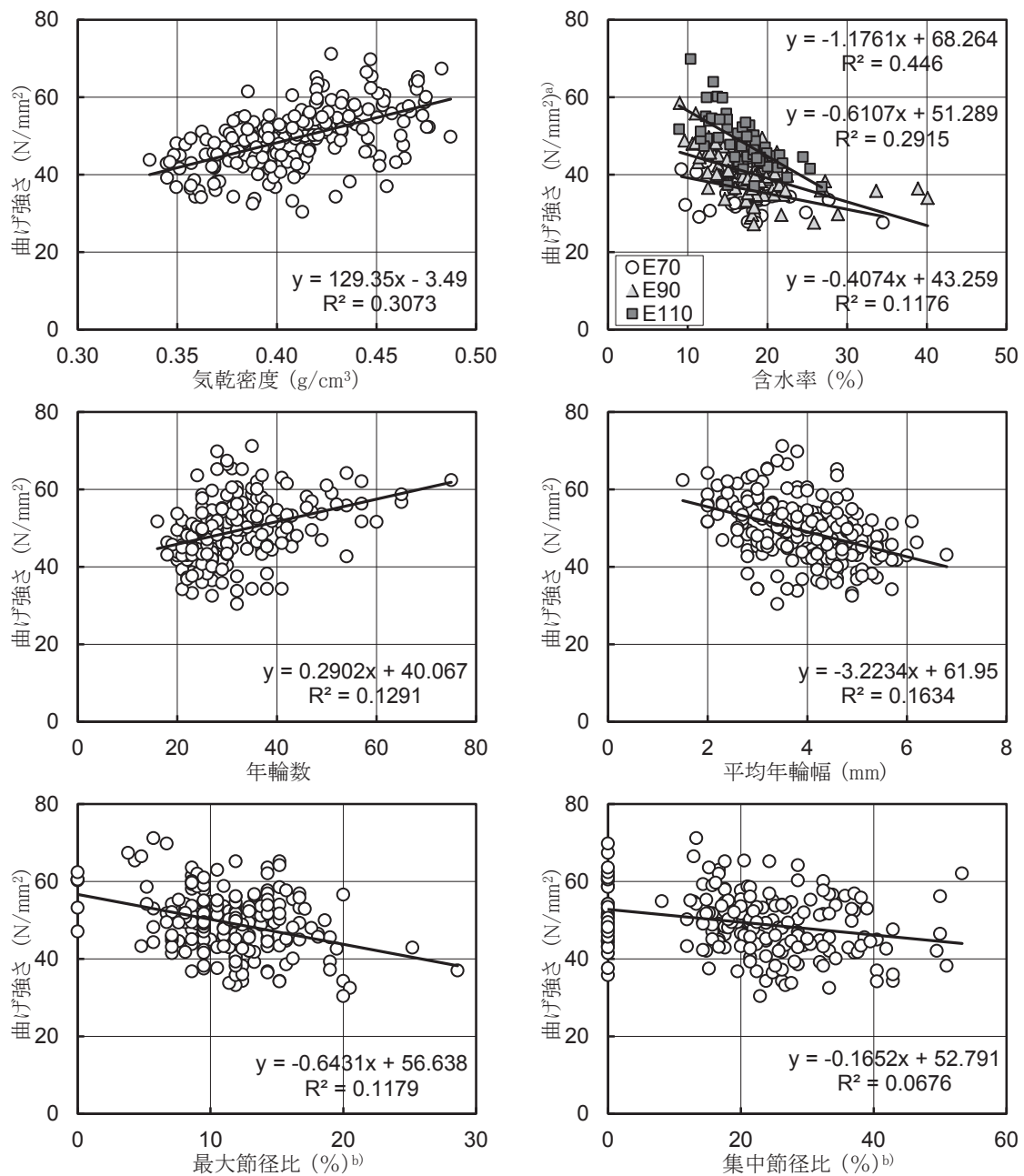


図7 曲げ強さと各種因子との関係

注) a: 調整を行っていない測定値、b: 荷重点間の節のみを対象とした節径比。

3.2 等級区分ごとの曲げ強さ

図8に曲げ強さと曲げヤング係数との関係を示す。曲げ強さは、曲げヤング係数と強い正の相関が認められた。等級区分ごとの曲げ強さは、等級が大きくなるに従って大きくなり、E70、E90およびE110の平均値はそれぞれ42.7、47.6および56.81N/mm²となった。

表2に等級区分ごとの曲げ強さを示す。式(12)⁴⁾を用いて信頼水準75%のときの95%下側許容限界値(以下、5%下限値と略す。)を算出した。

$$T = \bar{x} - K \cdot S \tag{12}$$

ただし、 \bar{x} : 平均値、 K : 試験体数に依存する定数、 S : 標準偏差。

式(13)²⁾を用いて材料強度の評価を行う際に求められる試験体のサンプリング数を算出した。等級区分E70、E90およびE110でのサンプリング数はそれぞれ32、23および16本となった。本試験の試験体数はこれらを上回っており、本試験で求めた5%下限値は奈良県産材の材料強度とみなすことができると考えられる。また、5%下限値は建設省告示⁵⁾で示される基準強度と同等であった。

$$n \geq 0.1537 (CV)^2 \tag{13}$$

ただし、 n : サンプリング数、 CV : 変動係数(%)。

奈良県産材の天然乾燥されたスギ平角材^{6,7)}および正角材^{6,8)}について、図9に曲げ強さと曲げヤング係数との関係、表3に曲げ試験の結果を示す。曲げヤング係数および曲げ強さは、前述の式(3)および(4)を用いて標準条件の値に調整した。なお、正角材の梁せいの標準寸法は105mmとした。本試験の高温乾燥された平角材の曲げヤング係数および曲げ強さは、天然乾燥された平角材および正角材のそれらと同等であった。これは、両者の気乾密度および平均年輪幅が同等であるためと考えられる。しかし、天然乾燥されたスギ平角材および正角材では、等級区分ごとの基準強度を下回る試験体が認められた。これは平角材では含水率および最大節径比が高く、正角材では最大節および集中節径比が高いためと考えられる。

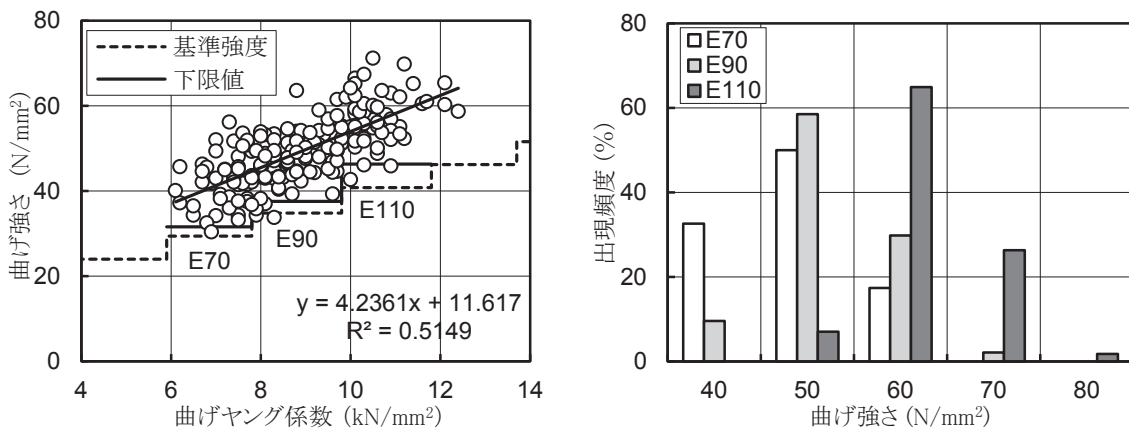


図8 曲げ強さと曲げヤング係数との関係

注) ヒストグラムの横軸はデータ区間の上限値を示す。

表2 等級区分ごとの曲げ強さ

等級区分	曲げヤング係数 (kN/mm ²)	本数 (本)	曲げ強さ				基準強度 ^{a)} (N/mm ²)	
			平均値 (N/mm ²)	標準偏差 (N/mm ²)	変動係数 (%)	K 値		
E70	5.9~7.7	46	42.7	6.1	14.3	1.820	31.6	29.4
E90	7.8~9.7	94	47.6	5.7	12.0	1.764	37.5	34.8
E110	9.8~11.7	57	56.8	5.8	10.2	1.804	46.3	40.8
E130	11.8~13.6	3	61.5	3.5	5.7	3.152	50.5	46.2
全体		200	49.3	7.9	16.0	1.732	35.6	—

a : 建設省告示

4. まとめ

高温乾燥された奈良県産スギ平角材 200 本の曲げ強度試験を行った。

曲げ強さは曲げヤング係数の増加とともに増加し、両者には強い相関が認められた。曲げヤング係数により等級区分した E70、E90 および E110 の平角材の曲げ強さの 5% 下限値は建設省告示で示される基準強度と同等であった。本試験の試験体数は材料強度を設定する際に必要となるサンプリング数を上回っており、本試験で求めた 5% 下限値は奈良県産材の材料強度とみなすことができると考えられる。

本試験で得られたスギ平角材の材料強度は、現在の一般的な乾燥方法である人工乾燥されたスギ平角材に対応したものであり、住宅等の構造材としての構造計算あるいはスパン表による梁せいの決定に用いることができると考えられる。

高温乾燥されたスギ平角材は、天然乾燥されたスギ平角材および正角材と曲げヤング係数および曲げ強さが同等であり、両者は同じ材料強度を用いることができると考えられる。

引用文献

- 1) 中田欣作, 小野広治, 寺西康浩, 大前善則: 高周波・蒸気複合乾燥を施したスギ製材品の強度性能. 奈良県森技セ木材加工資料. 31, 7-14(2002).
- 2) (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”. 東京, (財)日本住宅木材・技術センター, 2011, 84-91, 149-151.
- 3) 祖父江信夫: Mokuzai Gakkaisi. 32(4), 274-279(1986).
- 4) (財)日本建築学会: ”木質構造設計基準・同解説”. 東京, (財)日本建築学会, 2006, 374.
- 5) 平成 12 年建設省告示 1452 号
- 6) 江口 篤, 倉谷幸作: 市販構造用製材品の曲げ強度を低減する要因について. 奈良林試研報. 14, 40-48(1984).
- 7) 中田欣作, 杉本英明: 川上村産スギ製材品の曲げ試験結果. 奈良県林試木材加工資料. 28, 41-49(1999).
- 8) 海本 一, 杉本英明, 中田欣作: ヤング係数によるスギ正角材の強度等級区分. 奈良県林試木材加工資料. 24, 1-7(1995).

(2017 年 4 月 25 日受理)

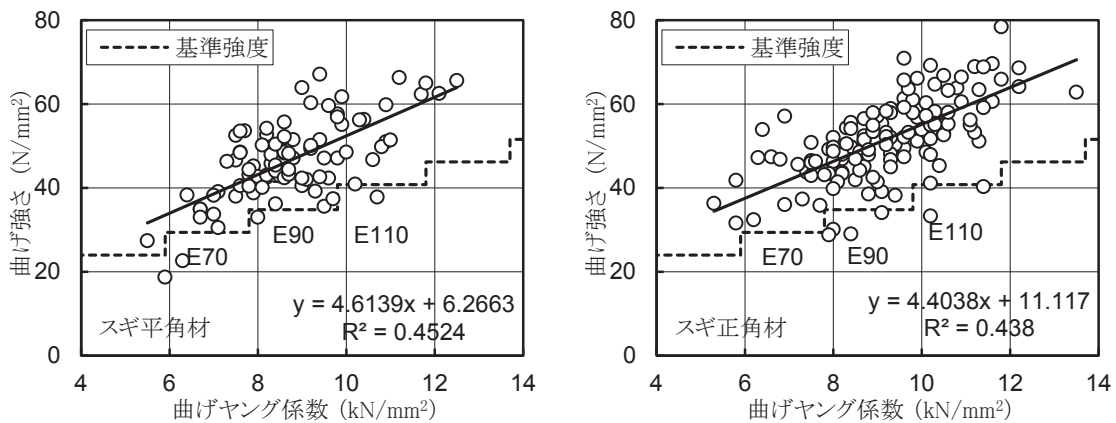


図 9 天然乾燥されたスギ材の曲げ強さと曲げヤング係数との関係

表 3 スギ平角材および正角材の曲げ試験の結果

断面	条件	本数 (本)	気乾 密度 ^{a)} (g/cm ³)	平均 年輪幅 (mm)	含水率 (%)	節径比		曲げヤン グ係数 ^{b)} (kN/mm ²)	応力 ^{c)}		比強度 ^{d)}	
						最大節 (%)	集中節 (%)		比例限度 (N/mm ²)	曲げ強さ (N/mm ²)	ヤング 係数 (kN/mm ²)	曲げ強さ (N/mm ²)
平角材	高温乾燥	200	0.41	3.9	17.4	13.9	27.2	8.9	32.4	49.3	21.8	120.7
平角材	天然乾燥	91	0.40	3.1	31.5	17.6	23.7	8.7	30.7	46.6	21.8	116.2
正角材	天然乾燥	133	0.42	3.3	16.2	20.2	30.2	9.2	37.5	51.8	21.9	122.7

a: 含水率15%への調整値、b: 含水率および荷重条件による調整値、c: 含水率、梁せいおよび荷重条件による調整値、d: 気乾密度で除算