

実大材および小試験体を用いた木材の 縦圧縮試験

中井 毅尚・中尾 哲也・浜武 正年
島根大学総合理工学部材料プロセス工学科

Compression Test in parallel direction to the grain of Wood using the Short Columns and the Small Clear Specimens.

Takahisa NAKAI, Tetsuya NAKAO and Masatoshi HAMATAKE
Department of Material Science, Faculty of Science and Engineering, Shimane University

Abstract

This study investigated the compression properties in parallel direction to the grain of wood using the short columns and the small clear specimens, and clarified the relation as described below.

1. Young's moduli and compression strength of the clear small specimens were bigger than those of the short columns.
2. As a result of the Kolmogorov-Smirnov test, the frequency distribution of compression strength was the normal distribution. Namely, the size effect could not be recognized on the compression strength.
3. When the type of failure of the small clear specimen was classified based on the standard of ASTM, the brooming or endrolling failure in Hinoki and the shearing failure in Beimatsu were mainly observed.

Key words: compression properties, normal distribution, size effect, shearing failure, brooming or endrolling failure

1. はじめに

構造材料としての木材の力学的性質の評価は、実際に使用される条件下で試験された結果を基本にするのが最も適切であるが、種々の制約があるため実際に使用されている条件下での調査はもとより、実大材の試験データもさほど多くない。実際、JISで規定されている木材の各種強度試験も、節をはじめとする欠点を含まない無欠点小試験体で使用されており、そこからえられた試験データをもとに評価体系がなされてきた。しかし、現実には木材を建築用構造材料として用いる場合には、ある一定以上の断面と長さを必要とするため、中には欠点を含む材料も存在する。この点を考慮して、これまで構造計算に用いられてきた許容応力度は、強度を安全側に見積もり、部材強度が過小評価されるのが現状であった。しかし近年、性能規定化あるいはPL法に関連して、製材品などの木質建材における強度性能をはじめ

めとする諸性能の明確化・保証がより一層求められている。また実大材における強度試験の重要性も再認識されつつある。

そこで本研究では、これまでの研究で特に実測データが不足していた実大材の縦圧縮試験の強度データの収集を行うと共に、無欠点小試験体のそれらとの比較も行った。

2. 理 論

材料の物理的性質は材料を構成する組織に対しての感受性から二つに大別できる¹⁾。一つは比重や比熱などの物理量である。組織中に不純物や欠陥などが存在しても、これらは物理的性質に対して加算的に影響を及ぼし、材料全体としてはあまり大きな影響を受けない。このような材料の組織に対して鈍感な性質を組織鈍感性という。これに対して、強度などは組織中に極めて小さな欠陥を含んでいても、それらが原因で破壊を生じ、破壊強さが大きく低下する場合がある。この場合、欠陥の影響は決して加算的ではなく、その欠陥の強度が材料全体の強度となり、それら欠陥が材料全体に大きな影響を及ぼすことになる。この性質を組織敏感性という。例えば、金属結晶の1億の格子点中に1個の転位と言われる格子欠陥を含んでいるだけで、塑性変形を起こさせるのに要する応力は、完全結晶体で予想される値の数百分の1に低下すると言われている¹⁾。このことは、材料強度がその微細組織の強度によって大きな影響を受けることを物語っている。

以上のように、最も弱い要素の強度が材料全体の強度を決定する、という考え方が最弱リンク理論で、要素が直列に配列しているモデルを用いて説明されている²⁾。この場合、ある要素Aはき裂などの欠陥を含むために他の要素に比べて強度が低い。例えば、直列モデルに引張力を負荷させると、各要素には均等に引張力が作用し、それが要素Aの強度値に達した時点で材料は要素Aより破壊する。他の要素ではまだ余力を残しているが、材料の強度は要素Aの強度によって決定される。一般に、き裂の数が多いほど破壊確率の大きい応力（平均破壊応力）は小さくなり、ばらつきも小さくなる。欠陥により材料の強度が決まる場合、試験体の強度は欠陥の強度分布の最小値分布となる³⁾。脆性破壊の破壊確率分布としてよく用いられるものにワイブル分布がある⁴⁾。いま、欠陥の強度 x が次式

$$F_0(x) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{x}{\beta} \right)^m \right\} \quad (1)$$

のワイブル分布で定義されているものとする。ここで、 β と m はそれぞれ、確率密度関数の広がりに関係する尺度のパラメータと、形に関係する形状のパラメータである。体積 V の試験体中に、欠陥が単位体積あたり一定の密度 ρ で無秩序に分布しているとする、体積 V 中に存在する欠陥の総数 N は、 $N = \rho \times V$ となる。このとき試験体の強度 x の分布関数は次式

$$F(x) = 1 - \{1 - F_0(x)\}^N$$

$$\begin{aligned}
 &= 1 - \exp \left\{ -N \cdot \left(\frac{x}{\beta} \right)^m \right\} \\
 &= 1 - \exp \left\{ -\rho \cdot V \cdot \left(\frac{x}{\beta} \right)^m \right\}
 \end{aligned} \tag{2}$$

となり、平均値、標準偏差はいずれも $V^{-1/m}$ に比例して変化する。各パラメータは与えられたデータに対して平均値および標準偏差を算出してガンマ関数を解くことにより求められる。Freudenthal は材料の強度と体積との間に次式

$$\frac{S_1}{S_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{1/2\alpha} \tag{3}$$

が成立することを導いた⁵⁾。ここで、 S_1, S_2 はそれぞれ体積が V_1, V_2 のときの強度である。また、 2α は、ワイブル分布の形状のパラメータにあたり、寸法効果の大きさを示す定数で、 2α の値が小さいほど寸法効果が著しく、大きいほど寸法効果は少なくなり、分布の形も正規分布に似てくる。 $2\alpha \rightarrow \infty$ のとき寸法効果がないといえる。(3)式の両辺の対数をとると次式

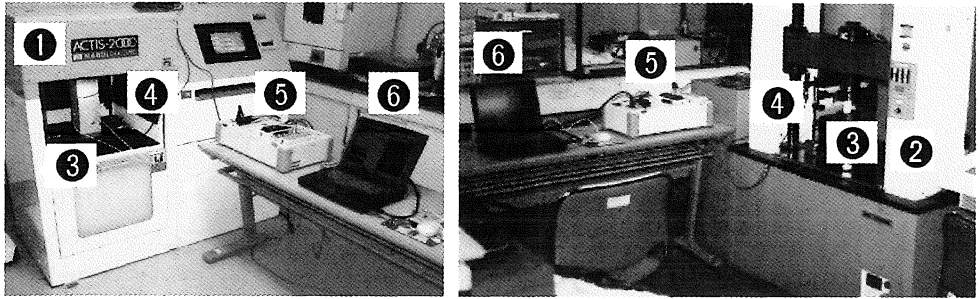
$$\log S_1 = \frac{\log \left(\frac{V_2}{V_1} \right)}{2\alpha} + \log S_2 \tag{4}$$

となり、 y 軸に $\log S, x$ 軸に $\log \frac{V_2}{V_1}$ をとり、強度試験により測定されたデータに対する回帰直線での傾きの逆数をとれば 2α の値がえられる。

一方、最弱リンクモデルに対して繊維束モデルでは、各要素が並列に配列しており、材料が破壊するのは各要素が全部破壊したときで、強度の分布は正規分布に従い、寸法効果はほとんど認められない。また、応力勾配のある場合(曲げ、ねじり)などの寸法効果は、厚さにわたっての負荷応力の平均値の違いにより説明されている⁶⁾。

3. 実 験

供試樹種は、ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* Endl.)、およびベイマツ (*Pseudotsuga menziesii* Franco) とし、試験体には、実大角材と無欠点小試験体の2種類を用意した。これら試験体は横断面を正方形とする直六面体とし、横断面の一辺の長さ： $a=10.5, 2.0$ cm、高さ： $h=3a$ とした。なお、ヒノキ実大材は心持ち材とし、角材以外に建築用構造材として一般によく用いられている背割り材(背割りの幅：7 mm、深さ：5 cm)も用意した。試験体の含水率および比重は平均でヒノキ：12.4%、0.48、ベイマツ：11.7%、0.50であった。Fig. 1に示すように実大材は室温条件下で電気油圧制御式圧縮試験機(HI-ACTIS-2000、㈱マルイ製)を用いて、また小試験体は、恒温・恒湿室(温度：20°C、湿度：60%)内で島津オートグラフ(AG-5000A、㈱島津製作所製)を用いてそれぞれ行った。この場合、荷重速



(a) Short column.

(b) Small clear specimen.

Fig. 1. The measurement system of load and displacement.

Legend: ①: Testing machine (HI-ACTIS-2000), ②: Testing machine (AG-5000A), ③: Test specimen, ④: Transducer, ⑤: Data acquisition controller (DE1200IF), ⑥: Personal computer.

度は実大材：10 N/cm²/sec, 無欠点小試験体：0.5 mm/min とした。

4. 結果と考察

4.1 ヤング率および圧縮強さ

実験よりえられたヤング率, 圧縮強さの平均値を比重の平均値と併せて Table 1 にまとめて示した. 表から明らかなように, ヤング率, 圧縮強さは, ヒノキ, ベイマツ共に無欠点小試験体が最も大きい値を示した. ヤング率では, 無欠点小試験体に対してヒノキ実大角材, ヒノキ実大背割り材, およびベイマツ実大角材はそれぞれ25.8%, 28.1%, および10.0%の低下が認められた. また圧縮強さでは, それぞれ3.6%, 6.4%, および6.3%の強度低下であり, ヤング率ほどの低下は認められなかった. ここで, ヒノキ実大角材と背割り材との強度的關係を調べると, 角材に対して背割り材は, ヤング率では3.0%, 圧縮強さでは2.9%の低下を示したが, それらの値はほぼ同等であった. 心持ち材の場合, 背割りを入れることにより, 材内の残留応力が解放され, 材料の割れやねじれなどを抑制する効果が期待できることが知られている. これまでそれらの強度面についてはあまり言及されてこなかったが, 今回の結果より, 角材に対する強度面における低減率もさほど認められないことから, 軸力のみに対しては背割りを入れることは非常に有効であるといえる.

4.2 確率分布曲線のあてはめ⁷⁾

Fig. 2 にそれぞれの試験体における圧縮強さの度数分布を示した. なお, 度数分布の階級の決定式として次式

$$k = 1 + 3.32 \log_{10} n \quad (5)$$

Table 1 Obtained results of Young's moduli (E), compression strength (σ_{\max}) and specific density (ρ) of each specimen.

		E (GPa)	σ_{\max} (MPa)	ρ
(a) Hinoki Short columns ($n=50$)	Ave.	9.3	39.8	0.52
	Max	11.7	46.4	0.55
	Min	7.7	35.1	0.47
	STD	0.8	2.4	0.02
	COV (%)	9.1	6.0	4.12
(b) Hinoki Short columns with a sawn slit parallel to the grain ($n=40$)	Ave.	9.0	38.6	0.50
	Max	12.2	49.5	0.56
	Min	5.2	28.5	0.44
	STD	2.2	5.9	0.03
	COV (%)	24.8	15.2	6.06
(c) Hinoki Clear small specimens ($n=57$)	Ave.	12.5	41.3	0.45
	Max	13.9	49.3	0.49
	Min	9.7	32.7	0.41
	STD	0.8	2.3	0.02
	COV (%)	6.0	5.5	4.29
(d) Beimatsu Short columns ($n=53$)	Ave.	11.3	41.1	0.50
	Max	14.8	55.4	0.58
	Min	8.0	25.3	0.44
	STD	1.4	6.4	0.04
	COV (%)	12.6	15.5	7.64
(e) Beimatsu Clear small specimens ($n=50$)	Ave.	12.5	43.9	0.50
	Max	14.8	48.8	0.56
	Min	9.8	35.6	0.43
	STD	1.2	3.6	0.03
	COV (%)	9.3	8.3	5.99

に示すスタージェス式を用いた。この式にデータ数 n を代入して階級 k を計算した。えられた度数分布に対して確率分布曲線のあてはめを行った。すなわち、ヒノキおよびペイマツの実大材と無欠点小試験体の圧縮強さに対する観測度数と、正規分布、対数正規分布、2母数(2P)ワイブル分布の理論度数を計算し、相対適合度の計算(Kolmogorov-Smirnov(KS)検定)で階段状の累積度数関数 $S_n(x)$ を作成し、最尤法による推定母数から計算される累積分布関数 $F(x)$ を用いて、 d_n 値

$$d_n = \max |F(x) - S_n(x)| \quad (6)$$

を計算した。 i 番目の $S_n(x_i)$ は、

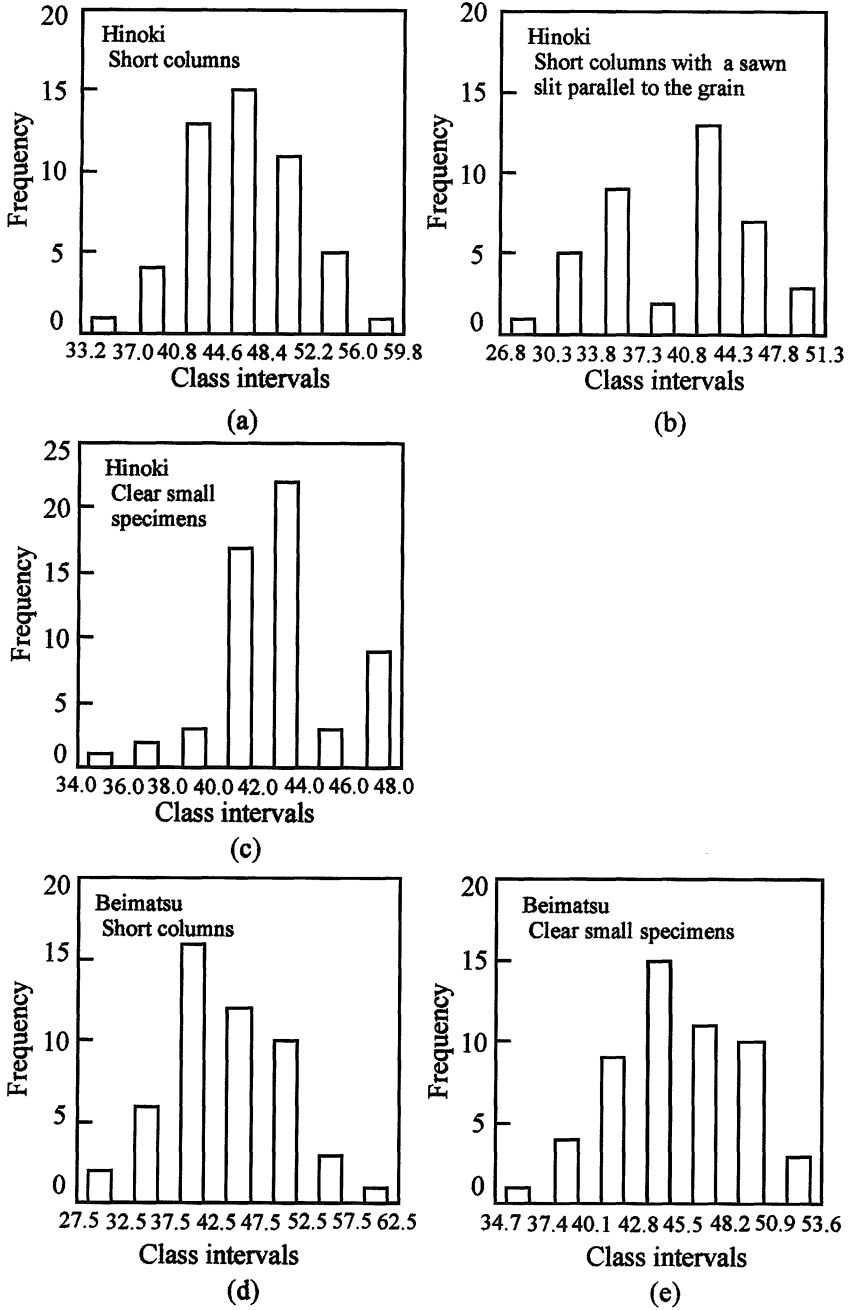


Fig. 2. Frequency distribution of the compression strength of each specimen.

$$\frac{i-1}{n} < S_n(x_i) \leq \frac{i}{n} \tag{7}$$

となり、 d_n 値は

$$d_n = \max \left\{ \left| F(x_i) - \frac{i-1}{n} \right|, \left| \frac{i}{n} - F(x_i) \right| \right\} \tag{8}$$

となる。以上の計算を1からnまで行い d_n 値を求め、KS 検定を行ったところ、ヒノキおよびベイマツの実大材と無欠点小試験体の圧縮強さの分布は、いずれの場合も正規分布があてはまることが分かった。このことは(4)式を用いた Fig. 3 の結果からも明らかである。直線 ($y = Ax + B$) 回帰の結果、ヒノキの寸法効果定数： $2\alpha (= 1/A)$ は、角材では-120.5、背割り材では-59.2、またベイマツでは-69.4となり、 $A = 0$ の検定を行うと、5%の危険率で仮説は棄却できず、寸法効果は認められなかった。つまり前述の KS 検定の結果同様、圧縮強さの分布は正規分布であることが分かる。

ここで、ヒノキおよびベイマツ実大材と無欠点小試験体の下限値（信頼率75%の5%下側許容限界）を計算すると、それぞれヒノキ実大角材：36.9 MPa、ヒノキ実大背割り材：31.3 MPa、ヒノキ無欠点小試験体：38.3 MPa、ベイマツ実大角材：33.6 MPa、およびベイマツ無欠点小試験体：38.8 MPaであった。また、無欠点小試験体に対する実大材の下限値の低減率は、ヒノキ実大角材：3.5%、ヒノキ実大背割り材：18.1%、ベイマツ角材：13.5

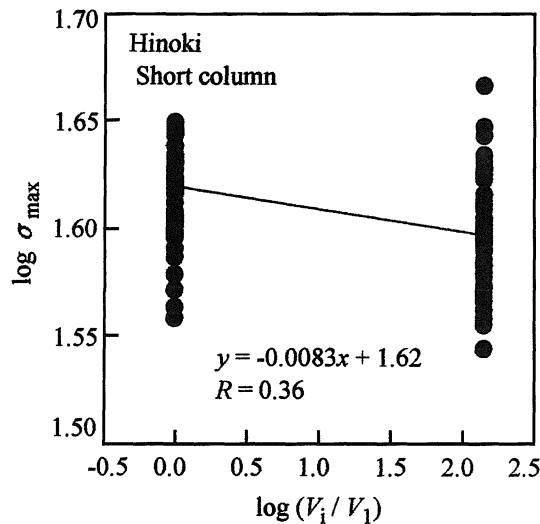


Fig. 3. Example of the size effect on the compression strength.

Legend: V_i : Volume of each specimen, V_1 : Volume of the small clear specimens, σ_{max} : Compression strength.

%であった。

4.3 圧縮強さと節径比との関係

ヒノキ実大角材の集中節径比および最大節径比と圧縮強さとの関係を Fig. 4 に例示した。節がない状態、すなわち図中の $x=0$ の圧縮強さの値を読みとると、集中節径比で 41.6 MPa、最大節径比で 40.0 MPa となり、Table 1 に示した無欠点小試験体の圧縮強さの平均値とほぼ同等な値がえられた。なお、その他の試験体でも同様な傾向であった。一方、集中節径比の平均はヒノキ実大角材、背割り材ではそれぞれ 18.9%、17.8%、またベイマツ実大角材では 12.8% であった。このときの圧縮強さはそれぞれ 39.8 MPa、38.2 MPa、および 41.1 MPa であり、無欠点小試験体の圧縮強さの平均値 (Table 1) に対してそれぞれ 96.4%、92.5%、93.6% の値を示した。有欠点材で許容される強さは無欠点小試験体に対して 70% であると定められているが、今回の結果では、無欠点小試験体に対して実大材ではいずれも 90% を越える強さを示した。つまり、上記の節径比に対応するほど、圧縮強さの実測値は低下しておらず、節はある程度強度をもつものとして取り扱う必要があると思われる。しかし、この点については今後さらなる検討が必要である。

4.4 試験体の破壊形態

木材の縦圧縮試験における試験体の破壊型は、(a): Crushing (圧座型)、(b): Wedge split (楔状き裂型)、(c): Shearing (せん断型)、(d): Splitting (割裂型)、(e): Compression and shearing parallel to the grain (繊維に平行方向の圧縮とせん断の複合型)、(f): Brooming or endrolling (ほうき状横倒し型)、の計 6 タイプに定義されている⁸⁾。これに基づき本研究でえられた無欠点小試験体の破壊型を分類したところ、ヒノキではほうき状横倒し型が、また

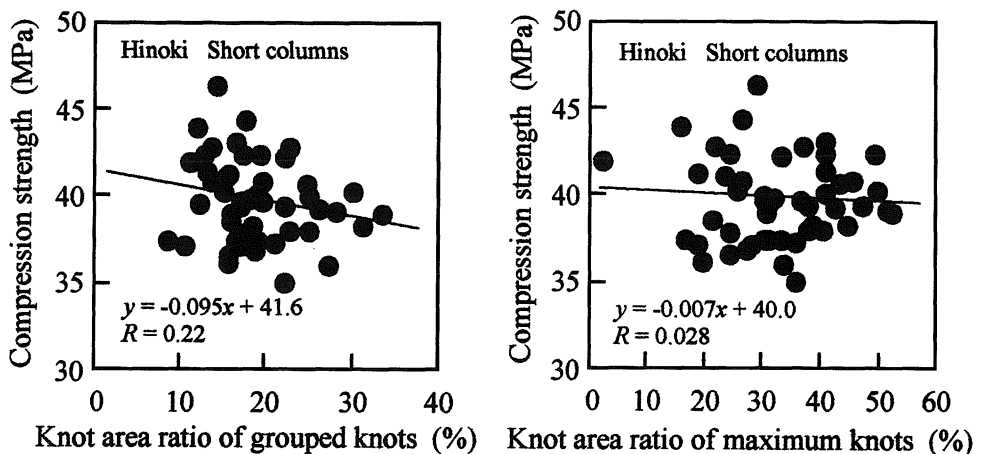


Fig. 4. Relation between the compression strength and knot area ratio of grouped (maximum) knots.

ベイマツではせん断型が最も多く観察できた。一般に、縦圧縮試験の破壊型は、巨視的には放射組織の走向と早晚材の層状構造，ならびにすべり面（すべり線，細胞壁のある部分に生じる微細な裂け目状のき裂面（線））の力学的性質に左右される。ヒノキの場合，早材から晩材への移行は緩やかであるが，厚壁にはならないため晩材幅は極めて狭い。これに対してベイマツは早材から晩材への移行が急である上，晩材は高密度である。つまり，このような組織的な違いが上述のような破壊型の違いとして現れたと予測できるが，この点については今後の検討課題としたい。

謝 辞

本研究を実施するにあたり，供試材料の提供について，院庄林業株式会社のご援助をいただいた。ここに記して厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 河本 実，横尾武夫，宮川松男（1966）：材料強度工学ハンドブック，朝倉書店，p. 4-5.
- 2) 堀 素夫（1973）：破壊現象におけるランダムネス，数理科学，**122**，p. 22-28.
- 3) 横尾武夫（1974）：材料強度学（第2版），岩波全書，p. 209-215.
- 4) 岡村弘之，板垣 浩（1979）：破壊力学と材料強度学講座（6巻）一強度の統計的取扱い一，培風館，p. 137.
- 5) Fraudenthal, A. F. (1968): Statical Approach to Brittle Fracture -Fracture II-, Academic Press, p. 591-619.
- 6) 横尾武夫（1974）：材料強度学（第2版），岩波全書，p.301-302.
- 7) 勲日本住宅・木材技術センター（1999）：構造用木材の強度試験法，pp. 56.
- 8) ASTM D 143-52.