

木材の曲げ弾性率と曲げ破壊係数への加重速さの影響

姜, 春遠
九州大学農学部林産学科

堤, 壽一
九州大学農学部林産学科

小田, 一幸
九州大学農学部林産学科

<https://doi.org/10.15017/10894>

出版情報：九州大学農学部演習林報告. 71, pp.47-56, 1994-12-20. 九州大学農学部附属演習林
バージョン：
権利関係：

木材の曲げ弾性率と曲げ破壊係数への荷重速さの影響*

姜 春 遠**・堤 壽 一**・小 田 一 幸**

抄 録

この研究は、木材の力学的性質への荷重速さの影響を明らかにすることであり、多様な荷重条件のもとでの力学的挙動を明らかにする研究の一部である。この実験的研究では針葉樹材、すなわちスギ材、コウヤマキ材、ヒノキ材、およびアカマツ材を対象にして、弾性率と曲げ破壊係数への荷重速さの影響を考察した。測定に数時間を要するので、実験中に試験片の含水率が変化することによって起こる影響を避けるために、2か月以上にわたって水浸して飽水状態に達した各試験片が実験に使われた。表1に示す試験片に、0.2から100kg/minの間で、比例限以下の荷重が繰り返し与えられた。その結果に基づいて、曲げ弾性率が荷重速さの変化によって受ける影響が考察された。さらに、比例限以下の繰り返し曲げ荷重を与えた後、各試験片ごとに、異なるたわみ速さのもとで曲げ破壊試験が行われ、概略、つぎの結果が得られた。

なお、この報告で表示される荷重速さとたわみ速さは、図1に示す曲げ荷重の与え方で、スパン中央部で測定された荷重とたわみに基づいている。

曲げ弾性率 (MOE) は荷重速さに影響を受けることがすべての試験片で確かめられた。すなわち、荷重速さの対数と曲げ弾性率の間には、正の高い相関関係が認められ、そこには樹種ごとに異なる相関関係が認められた。

たわみ速さが速くなるにつれて、曲げ破壊係数が高くなった。また、曲げ破壊係数 (MOR) に対する比例限度力度 (σ_p) の比、すなわち σ_p /MOR は、たわみ速さの増加に伴って大きくなった。なお、この実験で採用したスパンが28cm、曲げ試験片横断面が2cm×2cmの条件下では、たわみ速さが0.02mm/minのときの σ_p /MOR は約2/5で、4.0mm/minでは約2/3であった。さらに、たわみ速さによる比例限度力度への影響には樹種間の差が認められた。

比重と曲げ弾性率の間には、高い比重の樹種ほど荷重速さによる曲げ弾性率の変化が著しかった。

キーワード：曲げ弾性率 (MOE)、曲げ破壊係数 (MOR)、荷重速さ、たわみ速さ、 σ_p /MOR

1. はじめに

木材が構造用材として実地に使われるとき、長時間にわたって一様な静的荷重を受ける場面と、打撃や衝撃のように短時間に荷重速さが増加する動的荷重を受ける場面などがある。すなわち、荷重の速さを考慮して木材の力学的性質を把握することは、木材の実用場

* KANG, Chunwon, TSUTSUMI, Juichi and ODA, Kazuyuki : Effect of Loading Rate on Modulus of Elasticity and Modulus of Rupture in Bending of Wood.

** 九州大学農学部林産学科

Department of Forest Products, Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 812

面においてはもとより、力学現象としても重要であるとされる。そこで多様な荷重速さのもとで、木材の力学的挙動を明らかにすることを目標にして、一連の研究に着手している。

木材の弾性率は荷重速さの対数に比例的に増加し、この弾性率への荷重速さの影響は樹種の相違とは無関係で、木材全般に普遍的であることが報告されている (R. G. Pearson, 1972) (E. Karacabeyli and J. D. Barrett, 1993)。また、Maxwell model による線型粘弾性理論を適用し、ひずみ速さと圧縮破壊係数、比例限度力度、弾性率などとの関係が検討されている (奥山ら, 1970)。一方、木材の破壊係数は荷重速さの影響を受けるが、弾性率への荷重速さの影響は小さいという報告がある (杉山ら, 1984)。すなわち、木材の力学的性質への荷重速さの影響はほぼ明らかにされているが、応力～ひずみ関係に関連する比例限度力度の把握、および比較的小さい変形範囲内での弾性・粘弾性的変動などについては、未だに残された課題が多い。

他方、力や電場などの外的刺激を物質が受けたとき、その外的刺激の速さによって、物質の物理的挙動に著しい不連続性を生じることが認められている。たとえば、力の刺激が正弦波で与えられると想定したとき、超低周波数領域から高周波数領域にわたる力に対して、ある周波数を中心にして弾性率が急激に変化し、ここではエネルギー損失の極大値が認められる。すなわち、力学分散と称される現象である (中川ら, 1959)。木材の力学分散現象については、木材物理的に興味あるとともに、動的弾性率を使った木材の非破壊検査が実用に供され始めたいま、応用的にも重要な研究課題である。

以上のような背景を踏まえたこの研究では、スギ材を含む4樹種の針葉樹材を使って、曲げ弾性率と曲げ破壊係数への荷重速さとたわみ速さの影響が求められた。

2. 実験方法

2.1. 試験片

スギ (*Cryptomeria Japonica*)、コウヤマキ (*Sciadopitys verticillata*)、ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*)、アカマツ (*Pinus densiflora*) の無欠点材から、2 cm (R方向) × 2 cm (T方向) × 32 cm (L方向) の無欠点小試験片を木取り、比重と年輪幅を測定した。

Table 1 Specifications of specimens used in this experiment.

表1 試験片の性状

Species	Number of specimens	Moisture content (%)	Specific gravity	Width of annual ring (cm)
Sugi (<i>Cryptomeria japonica</i>)	10	176	0.31	0.30
Koh-yamaki (<i>Sciadopitys verticillata</i>)	12	77	0.35	0.23
Hinoki (<i>Chamaecyparis obtusa</i>)	14	78	0.38	0.41
Akamatsu (<i>Pinus densiflora</i>)	11	111	0.50	0.26

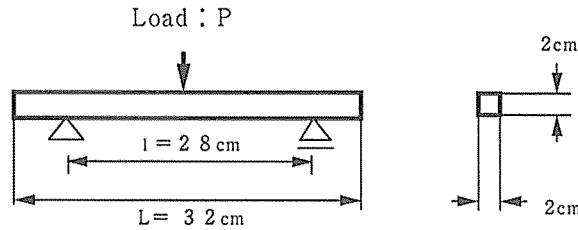


Fig. 1 Schematic diagram of static bending test by center loading on two edges at end points.

図1 中央集中荷重方式による荷重の与え方

ところで、木材の力学的性質が含水率の変動に大きな影響を受けることと、この実験的研究が同一試験片で長期間にわたる測定を行うことから、試験片の含水率変化に懸念が残らないように配慮した。すなわち、試験片を2か月にわたって水浸したあと、飽水状態で強さ試験に供した。なお、試験片の性状は表1に掲げられている。

2.2. 荷重速さが曲げ弾性率に与える影響の測定

図1に示すように、スパン28cmの試験片に対して、まさ目面に中央集中荷重を加えた。荷重測定には最大荷重能力250kgfのオルセン型材料試験機を使い、曲げたわみ量の測定はデジタル・ダイヤルゲージを使用した。

まず、対照材を使って、破壊までの荷重—たわみ線図から比例限度を求めた。その後、比例限度以下の荷重範囲で、荷重速さは0.20kgf/minから100kgf/minまでを数段階に分けて、試験片はりのスパン中央に荷重が繰り返し与えられた。ここで言う荷重速さとは、材料試験機で単位時間に与えた負荷として算出した平均荷重速さである。なお、この実験操作にあたっては、比例限度よりも十分に低い曲げ荷重を与えているので、試験片に重大な負荷履歴は生じていないものと想定しているが (R. Kitahara and J. Tsutsumi, 1987)、このことは今後の研究で詳細に検討する計画である。

2.3. たわみ速さが曲げ破壊係数と比例限度に与える影響の測定

比例限度よりも十分に低い荷重で弾性率が求められた後、つぎの実験を行った。すなわち、曲げ破壊係数と比例限度へのはりのたわみ速さの影響を求めるために、スパン中央部におけるたわみ速さを測定しながら最終の破壊に至らせた。なお、たわみ速さは図1のスパン中央部で算出し、0.02mm/minから4mm/minまでの間を数段階に分けてたわみ速さを設定し、それぞれの速さに対する曲げ破壊係数と比例限度を求めた。

3. 結果と考察

3.1. 曲げ弾性率への荷重速さとたわみ速さの影響

図2にはスギ材、図3にはコウヤマキ材、図4にはヒノキ材、そして図5にはアカマツ材について、荷重速さを変えたときの弾性率が示されている。なお、各試験片で得られた実測値から近似計算式を求め、その結果を図中に直線で示されている。図の横軸には荷重

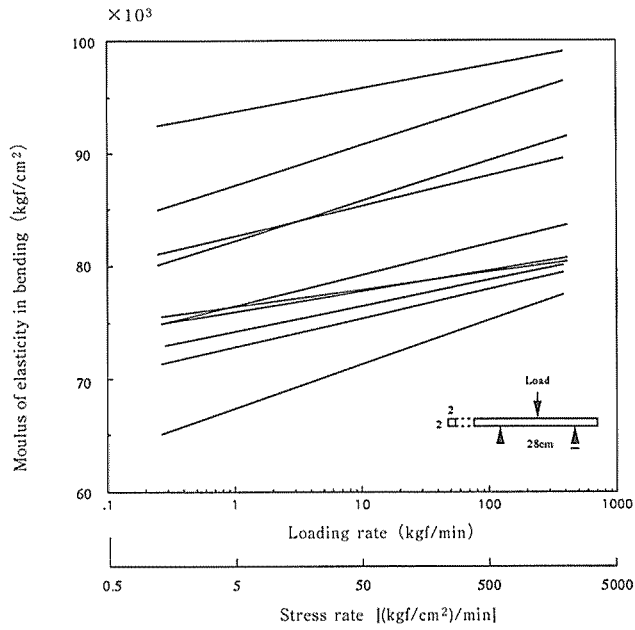


Fig. 2 Relationships between MOE in bending and loading rate for 10 sugi-wood specimens.

図2 10本のスギ材の曲げ弾性率と荷重速さの関係

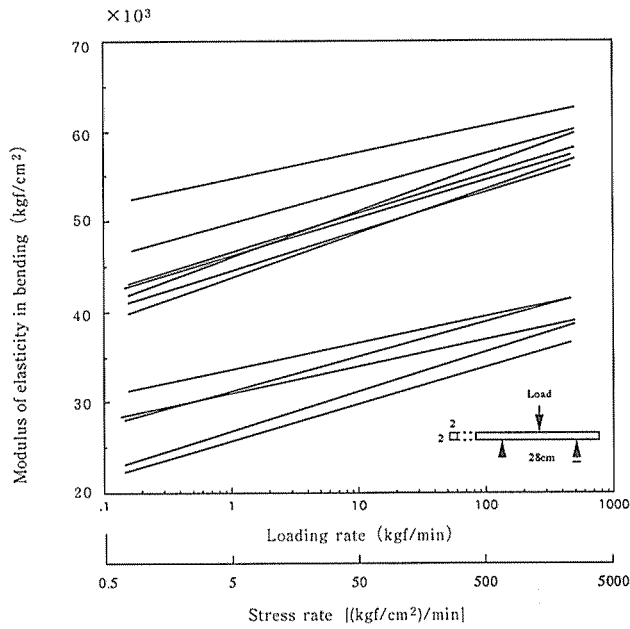


Fig. 3 Relationships between MOE in bending and loading rate for 12 koh-yamaki-wood specimens.

図3 12本のコウヤマキ材の曲げ弾性率と荷重速さの関係

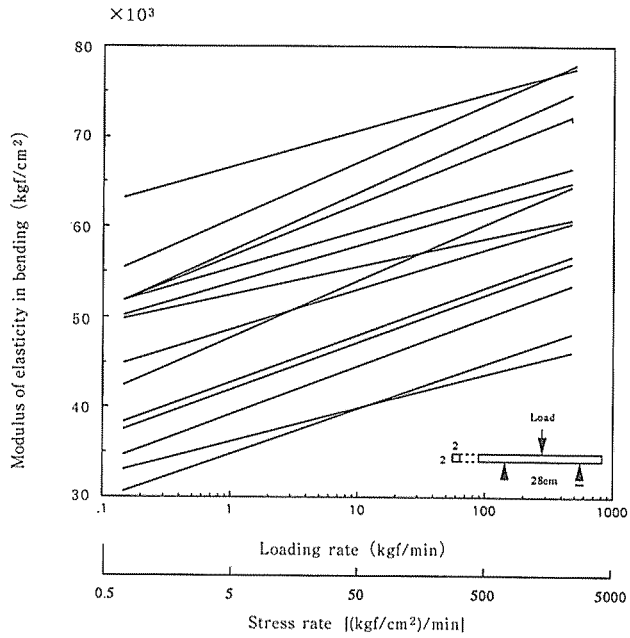


Fig. 4 Relationships between MOE in bending and loading rate for 14 hinoki-wood specimens.

図4 14本のヒノキ材の曲げ弾性率と荷重速さの関係

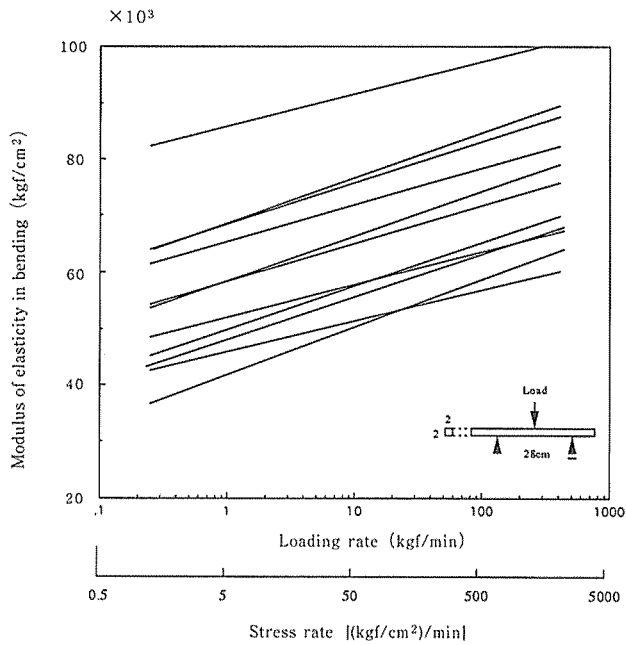


Fig. 5 Relationships between MOE in bending and loading rate for 11 akamatsu-wood specimens.

図5 11本のアカマツ材の曲げ弾性率と荷重速さの関係

速さを曲げ応力度速さに換算して併記している。すなわち、すべての樹種で、荷重速さが増すにつれて弾性率が高くなった。荷重速さが大きくなることに伴う弾性率の変化量として、図2—図5の結果からつぎの概算値が得られた。すなわち、荷重速さが0.5kgf/minのときの曲げ弾性率を基準にとるとき、荷重速さが200倍すなわち100kgf/minになれば、スギでは平均7.9%、コウヤマキでは25%、ヒノキでは25%、アカマツでは30%の曲げ弾性率の上昇が認められた。

上の結果から曲げ弾性率 E_b (kgf/cm²) と荷重速さ x (kgf/min) との間には、つぎの実験式が得られた。すなわち、

$$\begin{aligned} \text{スギ:} & E_b = 79 \times 10^3 + 2.6 \times 10^3 \log(x) \\ \text{コウヤマキ:} & E_b = 40 \times 10^3 + 4.0 \times 10^3 \log(x) \\ \text{ヒノキ:} & E_b = 50 \times 10^3 + 5.0 \times 10^3 \log(x) \\ \text{アカマツ:} & E_b = 58 \times 10^3 + 7.0 \times 10^3 \log(x) \text{ となった。} \end{aligned}$$

なお、曲げ弾性率 E_b (kgf/cm²) とはりのたわみ速さ y (mm/min) との間係を4樹種について算出し、つぎの間係が得られた。

$$\begin{aligned} \text{スギ:} & E_b = 83 \times 10^3 + 2.7 \times 10^3 \log(y) \\ \text{コウヤマキ:} & E_b = 45 \times 10^3 + 4.1 \times 10^3 \log(y) \\ \text{ヒノキ:} & E_b = 56 \times 10^3 + 5.2 \times 10^3 \log(y) \\ \text{アカマツ:} & E_b = 68 \times 10^3 + 7.4 \times 10^3 \log(y) \end{aligned}$$

他方、上に得られた実験式に類似の結果として、奥山は、たわみ速さが0.001—10cm/minの曲げ実験結果として、全乾ベイマツ材のたわみ速さ y (cm/min) と曲げ弾性率 E_b (kgf/cm²) との関係に正の相関関係を認め、つぎの式を与えた。

$$E_b = 133 \times 10^3 + 1.6 \times 10^3 \log(y)$$

3.2. 曲げ破壊係数へのたわみ速さの影響

図6には、はりのたわみ速さと曲げ破壊係数との関係が示されている。すべての樹種について、たわみ速さが速くなるに伴って、曲げ破壊係数が高くなることが確認された。

加藤ら(1992)は、たわみ速さが速いとき、物質はガラス状態に類似するとした。すなわち、たわみ速さが増せば変形しにくくなり、たわみ速度が遅ければ変形しやすくなる、という解釈を提示した。

加藤ら(1992)によると、たわみ速さが0.1cm/minのときの曲げ破壊係数を基準にすると、たわみ速さが10000倍すなわち1000cm/minになれば、曲げ破壊係数は約13.4%の増加を示すと報告している。他方、本研究で得られた結果によると、0.02mm/minを基準にしてたわみ速さが500倍すなわち10mm/minになれば、曲げ破壊係数の増加はスギでは約33%、コウヤマキでは約56%、ヒノキでは約70%、アカマツでは約177%であった。

3.3. 比例応力度と σ_p /MOR に及ぼすたわみ速さの影響

図7にはたわみ速さの大小に伴う比例応力度の変化を、図8には σ_p /MOR のたわみ速さ依存性を示している。図示するように、たわみ速さが増すにつれて、すべての樹種で比例応力度が高くなった。さらに、たわみ速さが増やすとともに、曲げ破壊係数と比例応力度との比 σ_p /MOR が大きくなった。なお、たわみ速さが0.02mm/minのときの

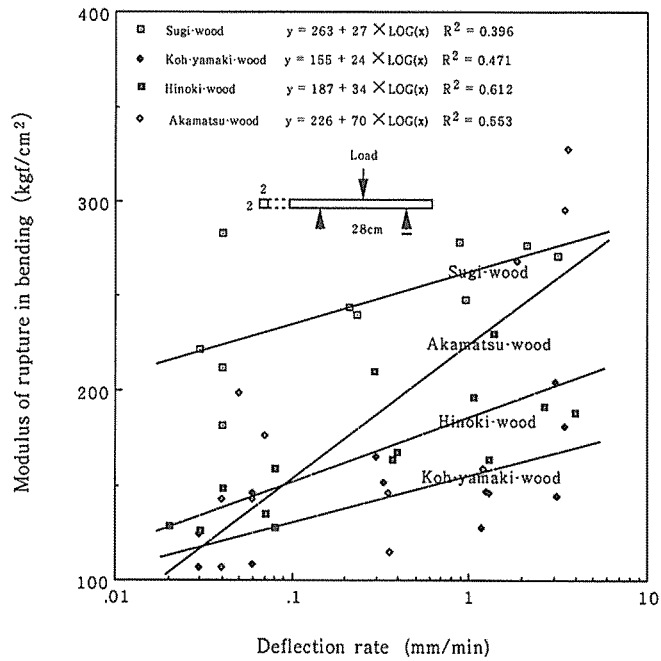


Fig. 6 Relationships between modulus of rupture (MOE) in bending and deflection rate.

図6 曲げ破壊係数とたわみ速さの関係

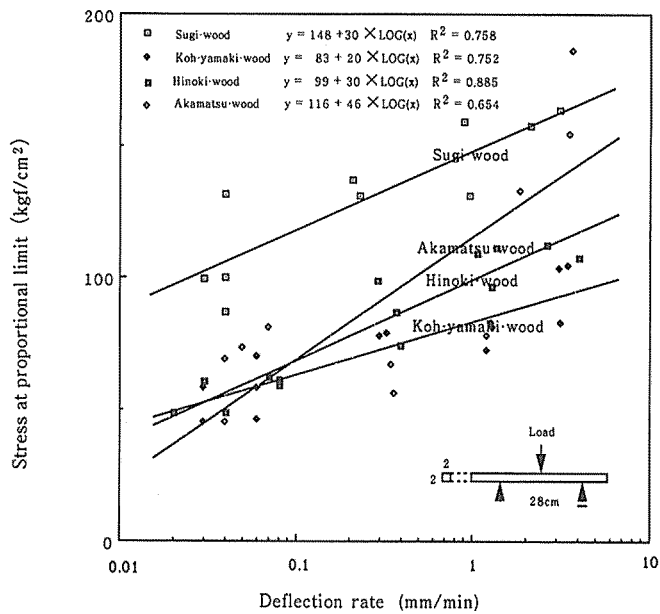


Fig. 7 Relationships between stress at proportional in bending and deflection rate.

図7 比例限度力度とたわみ速さの関係

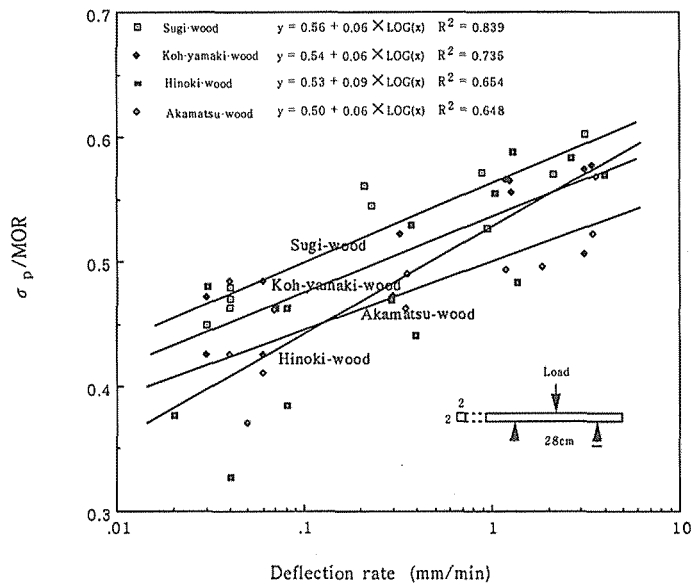


Fig. 8 Relationships between the ratio of stress at proportional limit to ultimate strength (σ_p/MOR) and deflection rate.

図8 比例限応力度と曲げ破壊係数との比とたわみ速さの関係

σ_p/MOR を基準にすると、たわみ速さが500倍すなわち10mm/minになれば、 σ_p/MOR の上昇はスギでは約38%、コウヤマキでは約37%、ヒノキでは約60%、アカマツでは約36%の増加を示し、つぎの実験式が得られた。

スギ： $\sigma_p/MOR = 0.56 + 0.06 \log(y)$

コウヤマキ： $\sigma_p/MOR = 0.54 + 0.06 \log(y)$

ヒノキ： $\sigma_p/MOR = 0.53 + 0.09 \log(y)$

アカマツ： $\sigma_p/MOR = 0.5 + 0.06 \log(y)$

であった。なお、 y はたわみ速さ (mm/min) である。この曲線回帰には、高い決定係数 (平均 0.719) が得られている。

比例限応力度は、一般に、曲げ破壊係数の約2/3ほどに位置すると言われる。ところが、この実験的研究の結果によると、たわみ速さが4.0mm/minでは53-60%の位置に、たわみ速さが0.02mm/minでは約38-46%の位置に比例限応力度が認められた。

3.4. 曲げ弾性率への荷重速さと木材比重の影響

曲げ弾性率は、木材の密度に著しい影響を受けるとされている。そして、曲げ弾性率 E_b (kgf/cm²) と荷重速さ x (kgf/min) との関係が、実験式 $E_b = a + b \cdot \log(x)$ で表せることは、すでに3.1項で明らかにした。しかも、式中の a と b の値は、樹種ごとに異なることも判っている。そこで x と E_b との関係が樹種に左右される原因の1つが比重にあると想定して、 b と比重との関係に着目してみた。すなわち、図9に示すように、4つの樹種で得られた全データを図示すると、 b の値、すなわち荷重速さの変化による曲げ弾性率への関与を示す値は、比重の増加につれて直線的に増加することが判った。しかも、図9

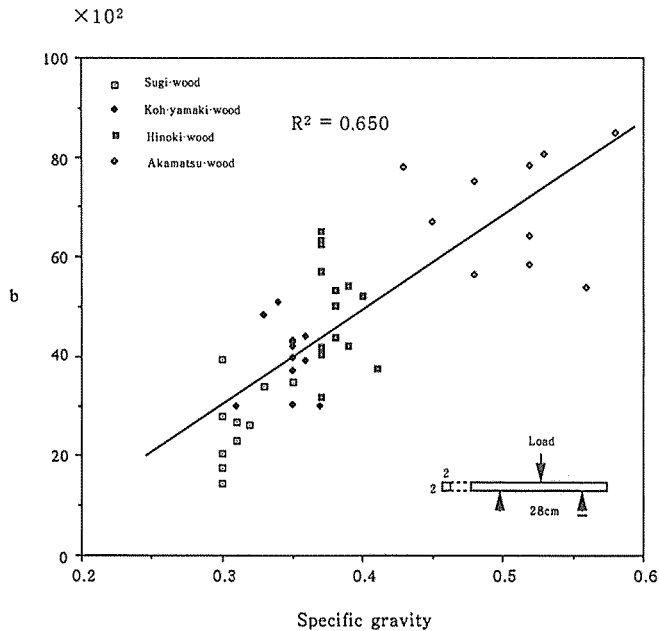


Fig. 9 Relationships between the ratio of MOE variation in bending and specific gravity.

図9 弾性率の変化率と比重の関係

から理解できるように、樹種の代りに比重を因子としたとき、比重と b との間には $R^2 = 0.65$ という良好な適合を認めることができた。

4. 結 論

針葉樹の中から、スギ、ヒノキ、コウヤマキ、アカマツの4樹種を選び、木材の力学的性質への荷重速さの影響が、実験的に考察された。なお、この研究で進める実験は各供試片ごとに長時間の測定を伴うために、実験中に含水率が変ることによる力学的性質への影響を懸念した。そこで、飽水状態の試験片を使って、実験中に含水率が変ることによる力学的性質への影響を避けた。試験片には、0.2から100kg/min にわたる荷重速さが数段階に分けて与えられた。すなわち、比例限度以下以下の荷重が数段階の荷重速さで加えられ、荷重速さごとの曲げ弾性率が求められた。異なる荷重速さで繰り返して曲げ試験を行って、荷重速さ別に曲げ弾性率を求めた後、各試験片ごとにたわみ速さを変えて曲げ破壊に至る試験を行った。この実験的研究で、つぎの結果が得られた。

- 1) 曲げ弾性率には荷重速さへの依存性が認められた。すなわち、対数で表わした荷重速さが増加するに伴い、曲げ弾性率は直線的に上昇し、その傾向には樹種間で相違が認められた。
- 2) たわみ速さが増すに伴い、曲げ破壊係数が高くなった。なお、たわみ速さの対数と曲げ弾性率との間には、直線関係が認められた。

曲げ破壊係数 (MOR) に対する比例限度力度 (σ_p) の比, すなわち σ_p /MOR は, たわみ速さの増加に伴って大きくなり, 0.02mm/min の速さでは約2/5, 4.0mm/min の速さでは約2/3の σ_p /MOR 値が得られた。

3) 比重が高いほど曲げ弾性率への荷重速さの関与は著しかった。

引用文献

- R. G. Pearson (1972) : The effect of duration of load on the bending strength of wood. Holzforschung Bd. 26 : 153-160
- R. Kitahara and J. Tsutsumi (1987) : A concept on stress-strain behavior of wood. -Effect of compressive stress parallel to the grain-. Bull. Kyushu univ. For. 57 : 175-184
- E. Karacabeyli and J. D. Barrett (1993) : Rate of loading effects on strength of lumber. Forest Prod. J. 43(5) : 28-36
- 中川鶴太郎・神戸博多郎 (1959) : レオロジー. みすず書房 : p. 429
- 奥山剛・都築一雄・浅野猪久夫 (1970) : 木材の力学的性質に及ぼすひずみ速度の影響 (II) -圧縮応力-ひずみ曲線について-. 木材学会誌 16 : 20-25
- 杉山英男・R. O. Foschi・B. Rovner (1984) : The effect of repetitive loading and rate of loading on bending strength and stiffness of Hem-fir 2×6's. 木材学会誌 30 : 894-906
- 加藤英雄・伏谷賢美・佐藤敬一 (1992) : 集成材の曲げ強度性能に及ぼすたわみ速度の影響. 東京農工大学農学部演習林報告 31 : 57-71

(1994年6月15日受付; 1994年9月22日受理)

Summary

This study deals with the mechanical properties of wood to examine the dynamic behavior under several loading rates. Wood specimens used in this study is as shown in Table 1. Effect of loading rate and deflection rate on modulus of elasticity in bending was measured with repetitive loading test over the loading rate of 0.2-100kg/min in which applied load was less than proportional limit. Hence the effect of deflection rate on modulus of rupture and σ_p /MOR were tested, where σ_p means proportional limit and MOR means modulus of rupture. The results may be summarized as follows.

From the measured values, the modulus of elasticity, the MOE was given by the empirical equation, $Y = a + b \times \log(x)$, where a and b are constants, x is loading rate (mm/min), and y is MOE (kgf/cm²).

This relationships between MOE and loading rate are described in from Fig. 2 to Fig. 5. The MOE increased linearly with the logarithm of loading rate.

Modulus of rupture depended on the deflection rate as shown in Fig. 6, and the values, σ_p /MOR increased with logarithm of deflection rate as shown in Fig. 8. The value of σ_p /MOR at speed 0.02 mm/min was about 2/5 and at speed 4.0mm/min was about 2/3.

From the result as shown in Fig. 9, it is assumed that the value of b in the formula above-mentioned is proportional to the specific gravity.

Key words : MOE ; MOR ; loading rate ; deflection rate ; σ_p /MOR.