

有節材の強度推定に関する研究

畑 山 蟻 男⁽¹⁾Yoshio HATAYAMA : A New Estimation of Structural Lumber
Considering the Slope of the Grain Around Knots

要 旨：実大木材強度に最も大きな影響を与えるのは節の存在である。ASTM では有節材の強度を推定する場合、節を単に断面欠損として扱っているが、この方法によって求めた推定強度値は実験値とあわないことが多い。節による強度低減には節そのものの強度のほかに節周辺の繊維走向傾斜が関係していることがすでに多くの研究者によって指摘されている。しかし、これまで強度との関連で節周辺の繊維走向について研究しているものはない。筆者はベイツガ、ベイモミ、スギ、アカマツの節周辺の材を細分して行った引張試験の結果から、樹種や節の品質（生節、死節）および節の大きさによってそれぞれ節周辺の繊維走向傾斜 θ (deg) の分布に特性のあることを見出し、つぎのような一般式を導いた。

$$\theta = \frac{15\sqrt{N\phi}}{\sqrt{x}} - \phi - 5$$

ただし、 N は樹種および節の品質によって決まる定数、 ϕ は節の平均接線径 (cm)、 x は節の端からの水平距離 (cm) である。一方、 θ と引張強度、引張ヤング係数および圧縮強度との関係を実験によって確かめ、HANKINSON 式を適用して、それぞれの定数を求めた。つぎにこれらの実験式を用いて求めた節周辺の強度分布から有節材の引張、圧縮および曲げ強度を推定し、実験値との比を求めた結果、それぞれ平均 0.94, 0.99, 0.91 となり、かなりよく一致することが確かめられた。このことから有節材の諸強度は節そのもののほかに節周辺の繊維走向傾斜が強く関係し、むしろそれが本質的なものであることが数値的に確認された。ここに提案する有節材の強度推定法が広く応用されることを期待したい。

目 次

I 緒 論	72
II 節による引張強度の低減	75
1. 節の引張強度および節周辺における引張強度の分布	75
1. 実験材料および実験方法	76
1) 実験材料	76
2) 引張試験方法	80
3) 繊維走向傾斜の測定方法	81
2. 実験結果	81
1) 節の引張強度および節周辺における縦引張強度の分布	81
2) 節周辺における引張ヤング係数の分布	83
3) 節周辺における繊維走向の傾斜の分布	83
4) 節周辺における繊維走向の傾斜と引張強度との関係	92
5) 節周辺における繊維走向の傾斜と引張ヤング係数との関係	94
3. 考 察	95
2. 有節材の実大引張試験	96
1. 実験材料と実験方法	97

1) 実 験 材 料	97
2) 実大引張試験方法	98
2. 実 験 結 果	99
3. 考 察	106
3. 節周辺における繊維走向傾斜の分布式による有節材の引張強度の推定	106
III 節による圧縮強度の低減	115
1. 節の圧縮強度および節周辺における圧縮強度の分布	115
1. 実験材料および実験方法	117
1) 実 験 材 料	117
2) 圧縮試験方法	124
2. 実 験 結 果	124
3. 考 察	125
2. 有節材の実大圧縮試験	128
1. 実験材料および実験方法	128
1) 実 験 材 料	128
2) 実大圧縮試験方法	129
2. 実 験 結 果	129
3. 考 察	135
3. 節周辺における繊維走向傾斜の分布式による有節材の圧縮強度の推定	135
IV 節による曲げ強度の低減	140
1. 有節材の実大曲げ試験	141
1. 実験材料および実験方法	141
1) 実 験 材 料	141
2) 実大曲げ試験方法	141
2. 実験結果および考察	141
2. 節周辺における繊維走向傾斜の分布式による有節材の曲げ強度の推定	150
V 総 括	163
謝 辞	164
引 用 文 献	164
Summary	166

この論文に用いた主な記号 The symble used in this paper are as follows;

A	断 面 積	Cross-section area
a	距離, 支点と荷重点間の距離	Distance, Distance from reaction to nearest load point in bending
b	幅	Width
□b	(添字) 曲 げ	Bending
C	ス ギ	Sugi (<i>Cryptomeria japonica</i> D. DON.)
□c	(添字) 圧 縮	Compression
D	死 節	Dead knot
E	ヤ ン グ 係 数	Young's modulus
e	中立軸の位置	Position of neutral axis

$\square_{est}$	(添字) 推定値	Estimated value
$\square_{exp}$	(添字) 実験値	Experimental value
F	ベ イ モ ミ	Fir (<i>Abies amabilis</i> (DOUGL.) FARBES)
f	端 距	Distance from the edge of the beam to the edge of the knot
f'	補 正 端 距	Corrected distance from the edge of the beam to the edge of the knot
K	抜 節	Knot hole or Loose knot
H	ベ イ ツ ガ	Hemlock (<i>Tsuga heterophylla</i> SARG.)
h	はりせい, 厚さ	Depth of the beam, Thickness
I	断面二次モーメント	Moment of inertia
K_{ar}	節 断 面 積 比	Ratio of knot area to cross-section area
L	生 節	Intergrown knot
L	ス パ ン	Span of the beam
l	標 点 距 離	Gauge length
Δl	変 形 量	Deformation
M	半 死 節	Partially intergrown knot
M	曲げモーメント	Bending moment
N	中 立 軸	Neutral axis
N	樹種と節の品質に依存する定数	Constant which differs according to the species and knot quality
n	試 験 体 数	Number of specimen
O	中 心	Position of the center
P	ア カ マ ツ	Akamatsu (<i>Pinus densiflora</i> SIEB. & ZUCC.)
P	荷 重	Load
P_m	最 大 荷 重	Maximum load
p	部 分 荷 重	Partial load
R	半 径	Radius
r	比 重	Specific gravity at test
S	ASTM による強度比	Strength ratio
$\square_t$	(添字) 引 張	Tension
X	中 心 軸	Center axis
x	節端からの距離	Horizontal distance from the knot
Y	強 度 比	Strength ratio on compression
y	た わ み	Deflection of beam
α	角 度 (度)	Angle
β	角 度 (度)	Angle
ϵ	ひ ず み	Strain

- n 中立軸からの距離 Distance from the neutral axis
 θ 繊維走向の傾斜角 Slope of grain of wood passing around knot
 ρ 曲率半径 Radius of curvature
 σ 応力 Stress
 ϕ 節径 Knot diameter
 ϕ' 補正節径 Corrected knot diameter
 $\square_{\parallel}$ (添字) 平行, 0° 方向 Parallel to grain, 0° direction
 $\square_{\perp}$ (添字) 直角, 90° 方向 Perpendicular to grain, 90° direction
 $\square_0$ (添字) 基準強度, 対照材の基準値 Basic strength
 $\bigcirc$ 生節 (図) Intergrown knot
 $\triangle$ 半死節 (図) Partially intergrown knot
 $\times$ 死節, 抜節 (図) Dead knot or Knot hole
204 材 桝組壁工法用製材の日本農林規格による寸法型式 204 の材で断面寸法が 38 mm (約 $1\frac{1}{2}$ inch) $\times$ 89 mm (約 $3\frac{1}{2}$ inch) のもの
2-by-4 inches dimension lumber
206 材 同じく 38 mm (同上) $\times$ 140 mm (約 $5\frac{1}{2}$ inch) のもの
2-by-6 inches dimension lumber
208 材 同じく 38 mm (同上) $\times$ 184 mm (約 $7\frac{1}{4}$ inch) のもの
2-by-8 inches dimension lumber
210 材 同じく 38 mm (同上) $\times$ 235 mm (約 $9\frac{1}{4}$ inch) のもの
2-by-10 inches dimension lumber

I 緒 論

木材は細胞の壁厚や大きさを異にする早材部と晩材部によって構成される年輪構造をなすことや、細胞の配列が三軸方向で異なることなど生物の遺体としての材料特性をもち、工業製品に多い均質等方体の材料とは異なった力学挙動を示す。また、木材を構造材として使用する場合には、節や割れなどの欠点の介入が避けられず、これら欠点による強度低減をどのように評価するかが重要な課題であり、多くの研究が行われてきている。

実大材の強度にもっとも大きな影響をおよぼす因子は節の存在であって、世界諸国における構造用木材の設計に用いる強度値（許容応力度）や、強度等級区分法のきめ方として、節による強度低減を基本にしているものが多い。

節による各種の強度低減は、従来、節を材料の断面欠損と見なして計算する方法がとられている。このような簡単な方法で実際の強度を推測できるものであれば何ら問題はないわけであるが、事実はその簡単ではない。これまで発表されている節による各種の強度低減に関連するいくつかの研究結果について概観すればつぎのようになる。

(1) 有節材の縦引張強度に関する既往の研究

節が木材の強度を弱める影響は、引張強度において特に大きい。引張強度は少数の生節で 45～55%、

多数の生節では 80~90% 低下する¹⁾。森²⁾³⁾によれば有節材(節軸が材軸とほぼ直交する場合)と無節材との縦引張強度との比(Y)は節径と材径との比(K_{ar})のみに支配され、樹種および節の品質には無関係(生節と死節を区別せず、節はすべて抜節と見なす。すなわち断面が欠損しているものとする)であって、この関係式は、 $Y = 1 - K_{ar}$ で表せる。ゆえに $\sigma_{tk\parallel}$ を無節材の縦引張強度、 σ_{tk} を節径と材径との比が K_{ar} である有節材の縦引張強度、 Y_k を節径と材径の比が K_{ar} であるときの Y とすれば $\sigma_{tk} = Y_k \cdot \sigma_{tk\parallel}$ となると報告している。

北原⁴⁾は、ヒノキの 1.5 mm 厚さの単板の引張試験を行い、生節(L)、半死節(M)、死節(D)の差は決定しがたいとしながらも、有節材の縦引張強度 σ_{tk} は、それぞれ、 $\sigma_{tk}(L) = 110.24/x$ 、 $\sigma_{tk}(M) = 112.11/x$ 、 $\sigma_{tk}(D) = 114.52/x$ の双曲線で表せるとしている。ただし x は材幅(b)から節径(ϕ)を差引いた値と材幅との比 $(b - \phi)/b$ である。これによれば $K_{ar} = 0.24$ で σ_{tk} が半分になると報告している。

佐々木⁵⁾はヒノキの有節材(厚さ 3 mm, 幅 75 mm, 長さ 500 mm)の縦引張試験を行い、 σ_{tk} は節を断面減少として定量化はできないとして森の結論に反論している。この理由として応力塗料によるひずみ分布の測定などを基にして、生節と死節とでは、節周辺部の木理を乱す程度が異なること、破壊と性状が局部的なものから生じるものとそうでないものがあること、人工孔と比較してみた結果、節の周縁部はかなり組織的に補強されていることなどをあげている。特に生節と死節とでは周りの繊維の乱れが異なり、同時に死節の場合にはひずみ分布が節の上下方向で対称的でなく、生節と死節が強度におよぼす程度が異なることを示していることが目立っている。

A. YLINEN⁶⁾は Kiefernholz の縦引張試験を行い、節周辺の伸びひずみの測定から、節まわりの応力集中中は 7 倍に達するものがあることを指摘するとともに、節の影響のおよぶ範囲などを検討している。

P. S. Dawe⁷⁾は European Redwood の有節材(厚さ 5/8 inch, 幅 3 inch, 長さ 4 feet 6 inch)の縦引張試験を行い、節の寸法(接線径 ϕ を測定)を材の表裏に現れた中の大きい方(ϕ_L)、両面の平均径(ϕ_A)、材断面に占める節の断面積の割合(knot area ratio; K_{ar})で表し、それぞれ有節材の縦引張強度との関係は一次式が成立つとともに、 ϕ_L 、 ϕ_A 、 K_{ar} とも大差がないとし、材幅の中央に節がある場合 1/2 inch 節径が増大すれば 2600 psi の割合で縦引張強度が減少すると結論している。

R. H. KUNESH ら⁸⁾は Douglas-fir 2 inch $\times$ 8 inch ディメンションランバーの有節(単独節)の実大材(長さ 78 inch)の縦引張試験を行い、材の比重と縦引張強度との相関は低いこと、節径の増大にともない縦引張強度がやや直線的に減少し、節が材幅の中央に位置しているものの方が材縁の近くに位置しているものに比べて強度は相対的に大きいこと、そして 1/2 inch 節径が増大すれば、中央節では 1000 psi, 材縁節では 800 psi 減少するとし、中央節と材縁節の縦引張強度低減に差のあることを指摘しているが、その理由は不明であると結論している。

(2) 有節材の縦圧縮強度に関する既往の研究

木材の圧縮強度におよぼす節の影響は引張強度ほど大きくはない。少数の生節で 8~15%, 多数の生節で 15~25% 強度が減少する¹⁾としているものもある。

森²⁾³⁾は有節材(短柱で節軸が材軸とほぼ直交する場合)と無節材との縦圧縮強度の比(Y)は節径と材幅との比(x)および節の品質のみに支配され、樹種には無関係であるとし、この関係は双曲線 $Y = 1 - (1 - y_1)/x$ で表せると結論している。ただし、式中の y_1 は節の品質による定数で、生節: 0.6~0.5, 半死節: 0.5~0.2, 死節: 0.2~0.1, 抜節: 0 の値をとる。

筆者らが枠組壁工法用の 204 材について、ASTM⁹⁾ に準じた方法で、ベイツガ、スギ、アカマツ、エゾマツ、トドマツ、ソ連カラマツの有節材の縦圧縮試験を行った結果、圧縮強度は、材の横断面に占める節の木口への投影面積の比 K_{ar} と高い相関があり、ASTM D 245¹⁰⁾ の圧縮強度比算定式がおおむね適合することを確認した¹¹⁾¹²⁾。

(3) 有節材の曲げ強度に関する既往の研究

有節材が曲げをうける場合、同じ大きさの節でも節の位置によって曲げ強度におよぼす影響の度合いが異なる。一般に節が危険断面の近くの引張域にあれば曲げ強度は相当に減少する。圧縮域にある節の影響は引張域のものに比べれば少ない。中立軸付近にあって水平せん断力をうける節の影響はほとんどないともいわれている。はりのスパン中央にある一個の大節は、合計が同じ大きさの径となる同じ群に属する小節群よりも曲げ強度を減少させるといわれている¹³⁾。これと同様なことを、平嶋ら¹³⁾ も針葉樹合板の実大曲げ強度について確認し報告している。

E. GABER¹⁴⁾ は曲げ強度の減少ははりの断面係数が節の面積だけ減少するものと考え、つぎのような式を与えている。いま矩形断面のはりの幅を b 、はりせいを h 、節径を ϕ とし、節孔がはりの引張側の材縁から t の位置にあって、節が中立面に平行になっており、引張側材縁から x の距離に節の重心軸があるものとする、節のないときのはりの断面係数 Z_0 と節によって縮小された断面係数 Z' の比は $Z'/Z_0 = (I'/I_0) \cdot (1 - m/1 - 2mn)$ となる。ただし、 m は節の相対的な大きさ ϕ/h 、 n は節の相対的な位置 t/h 、 I_0 および I' はそれぞれ Z_0 、 Z' に対応する断面二次モーメントである。ただし、この式は節が下方の縁維に達すると成立しなくなる。

米国の ASTM-D 245¹⁰⁾ や Wood handbook¹⁵⁾ では、節はすべてはりの断面欠損として扱い、欠損した断面をもったはりのモーメントと節のないはりのもっているであろうモーメントの比を、 $SR = (1 - \phi/h)^2$ として与えている。ただし、 SR : 強度比、 ϕ : 節の接線径、 h : 節を含むはりのはりせいであり、材縁にある節の影響に対する基本式としている。

中村¹⁶⁾ は、集成材のラミナの flat wise の曲げ試験を行い、節が板幅の中央にある場合と端にある場合、後者の曲げ強度の方が小さい傾向があること、生節と死節との間に曲げ強度および曲げヤング係数に有意の差が認められないこと、板目板では節を単に断面欠損と仮定したときの強度比より実際には一般に大きい実験結果のなかには著しく強度比の低下する例がみられることから、節を単に断面欠損と一様に仮定して強度比をきめることは危険であると考えている。

B. MADSEN¹⁷⁾ は強度等級区分されて市販している 2 inch × 6 inch 材の曲げ試験を行った結果、1 級材と 2 級材（2 級材は 1 級材よりも大きな節を許容している）との間に曲げ強度の差がなく、強度の高い方ではむしろ 2 級の方が高い結果となったこと、カナダの現行の等級区分（米国と規格上は同一となっている¹⁸⁾¹⁹⁾）では、製品の 60% 以上のものが必要強度値の 2 倍以上の強度を保有していたと報告している。これらの結果から、従来樹種を数グループに分けて許容応力度を与えてきているものの、樹種グループ間の差はそれほどには大きくないこと、実大材の破壊モードが小試験体の破壊モードとは異なるので、現行のように小試験体の強度値を基準にして許容応力度を誘導するのは危険であること、さらにはりせいの異なるはり材に同じ許容応力度を与えている矛盾を指摘し、有節材の強度を決定する要因は節の大きさではなく、節の周囲の繊維走向の傾斜であると結論している。

筆者ら¹¹⁾ が枠組壁工法に用いられる 構造用材の実大曲げ試験を ASTM-D 198 に準じて行った結果で

も、ASTM-D 245 の曲げ強度比算定式はかならずしも適合しないこと、特にはりせいの大きいものは適合度が悪いこと、節の大きいものでは ASTM-D 245 の強度比を下まわるものが多いことなどを確認している。

以上の多くの研究で共通して見られることは、節を断面欠損と見なして強度の評価が可能かどうかということが検討されていることであろう。縦圧縮強度のようにやや適合するものもあるがかなり疑問を残しているものも少なくない。

筆者は、B. MADSEN らも強調しているように節による強度の減少は節そのものによる強度の減少は勿論であるが、節の周辺の繊維走向の乱れに基因するものと考えている。ただ実用的に節を、断面欠損と見なして求めた強度値が実際とよく適合するものであれば好都合なわけであるが、やはりそう簡単に置き換えられないことが次第に明らかにされてきた。

一方このような現状のなかで、一方検査能率の向上と信頼性をたかめる目的から、木材の諸強度がその材の曲げ剛性と相関が高いとして曲げ剛性を測定して各種の強度を推定する方法が提案されている。D. V. DOYLE と L. J. MARKWARD²⁰⁾ はディメンションランバーの曲げ剛性によって引張強度を推定することを提案している。同様の考え方で実大材の強度等級区分を行おうとする Machine-grading については、中村¹⁶⁾、P. H. MULLER²¹⁾、J. F. SENFT ら²²⁾、L. G. SUNLEY ら²³⁾、L. W. WOOD²⁴⁾、L. G. SUNLEY ら²⁵⁾、D. E. KENNEDY ら等の研究がある。ところでこのような考え方は多分に工学的あるいは実用的見地から考案されたものであって真の木材の性質にせまるものではない。節による木材の強度の減少は、節そのものの強度および節の周辺の繊維の性状に基因するものであれば、やはり繊維の乱れの性状をまず検討してみる必要があろう。しからば一方、木材組織学の分野において節周辺の組織構造が明らかにされているかといえば、これまたこの関係の研究はきわめて少なく、アカマツ材について行った酒井²⁶⁾²⁷⁾²⁸⁾の研究があるのみである。

すでに述べたように筆者らが行った梓組壁工法構造用木材の強度試験結果等から、筆者はかねて樹種により、あるいは生節、死節によって節周辺の繊維の乱れが異なり、強度値がそれに関連して減少すると考えてきた。したがって、節による木材の強度の減少を究明するには従来の工学的な手法のみではなく生物材料的な因子、つまり節周辺の繊維の傾斜を考慮する必要があると考えるに至った。本論文は針葉樹材の縦引張強度を基本にして節周辺の繊維走向の傾斜の分布を決定し、ついでこの繊維走向の傾斜とヤング係数、引張強度および圧縮強度との関係を実験的に検討して、これらの結果を基にして実大有節材の引張強度、圧縮強度および曲げ強度を推定する方法を提案しようとするものである。

II 節による引張強度の低減

この章ではまず節の周辺の材について引張強度および引張ヤング係数を求めるとともに、これに関連する繊維走向の傾斜を測定し、これらが樹種、生節や死節のような節の品質、節の大きさとどのような関係にあるかを明らかにする。ついで実大有節材の引張試験について述べ、最後に樹種、節の品質、節の大きさと関連で求めた節の周辺の材の引張強度の分布から実大有節材の引張強度を推定する方法について検討する。

II.1. 節の引張強度および節周辺における引張強度の分布

有節材の強度は、節の強度のほかに節の周りの木理が強く関係していることは多くの研究者が認めてい

るところであるが、節の周りの繊維の走向がどのようになっている、それがどのように木材の強度に関係しているかということについて論求しているものはない。ここでは節の周辺の材の引張強度と節そのものの引張強度とを分離して考えることにする。まず節の周辺の材を幹軸方向に沿って順次樹皮側に向かって細分し、それぞれの引張試験を行って引張強度を求めるとともに引張破断面の繊維走向の傾斜を測定して両者の関係を明らかにし、さらに節の周辺の繊維走向の傾斜による引張強度の低減とを比較して節周辺の材の引張強度の分布を樹種や節の品質および節の大きさで表現できるような実験式を誘導した。また節そのものの引張強度は樹種、節の品質に関係なく、すべてのものがほとんど無視できるほど小さいことを確認した。

II. 1. 1. 実験材料および実験方法

1) 実験材料

供試材の樹種は、ベイツガ (*Tsuga heterophylla* SARG.), ベイモミ (*Abies amabilis* (DOUGL.) FARBES), スギ (*Cryptomeria japonica* D. DON), アカマツ (*Pinus densiflora* SIEB. & ZUCC.) の4樹種である。ベイツガとベイモミは日本農林規格、枠組壁工法構造用製材の寸法型式206乾燥材(断面寸法38mm×140mmカナダ国産, Kiln dry 含水率15%)。スギは茨城県の大子営林署管内産, アカマツは福島県の福島営林署管内産の丸太より5cm×10~20cmの断面に製材し十分に天然乾燥を行ったものである。

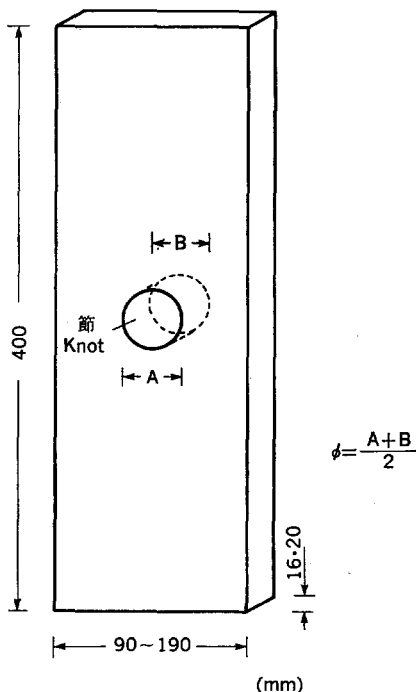


Fig. 1. 節周辺の引張強度解析用原板
Diagram of knotted board.
Average knot diameter is defined as the average of the widths of the knot between enclosing lines parallel to the longitudinal center line of the board, measured on both faces of the board.

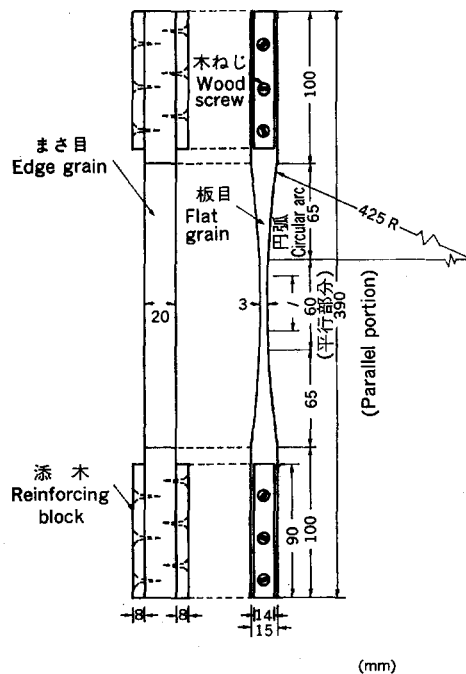


Fig. 2. 基準引張強度試験用 JIS 型試験体
Diagram of standard JIS tension test specimen for determining of the tensile strength parallel to the grain σ_t , and Young's modulus parallel to the grain E_t .

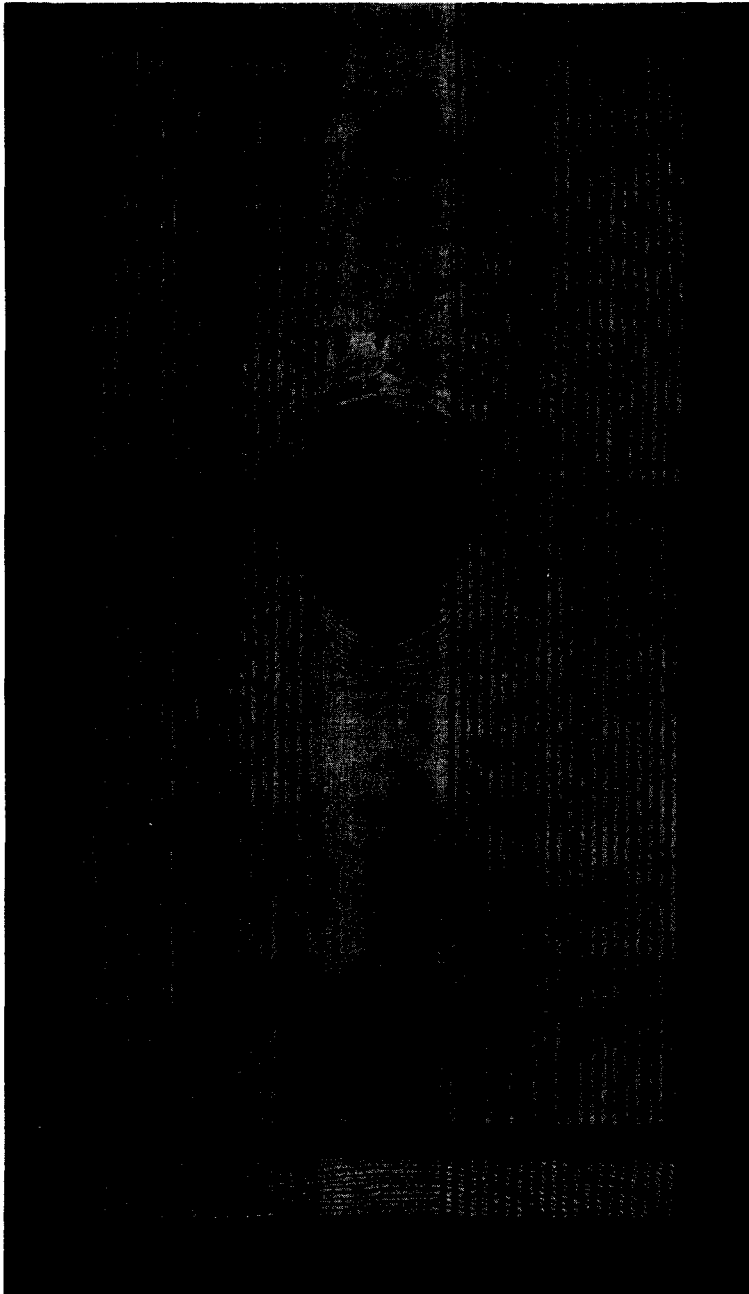


Fig. 3. 節周辺の引張強度解析用試験体の木取り
Sampling of tension test specimens from knotted board.

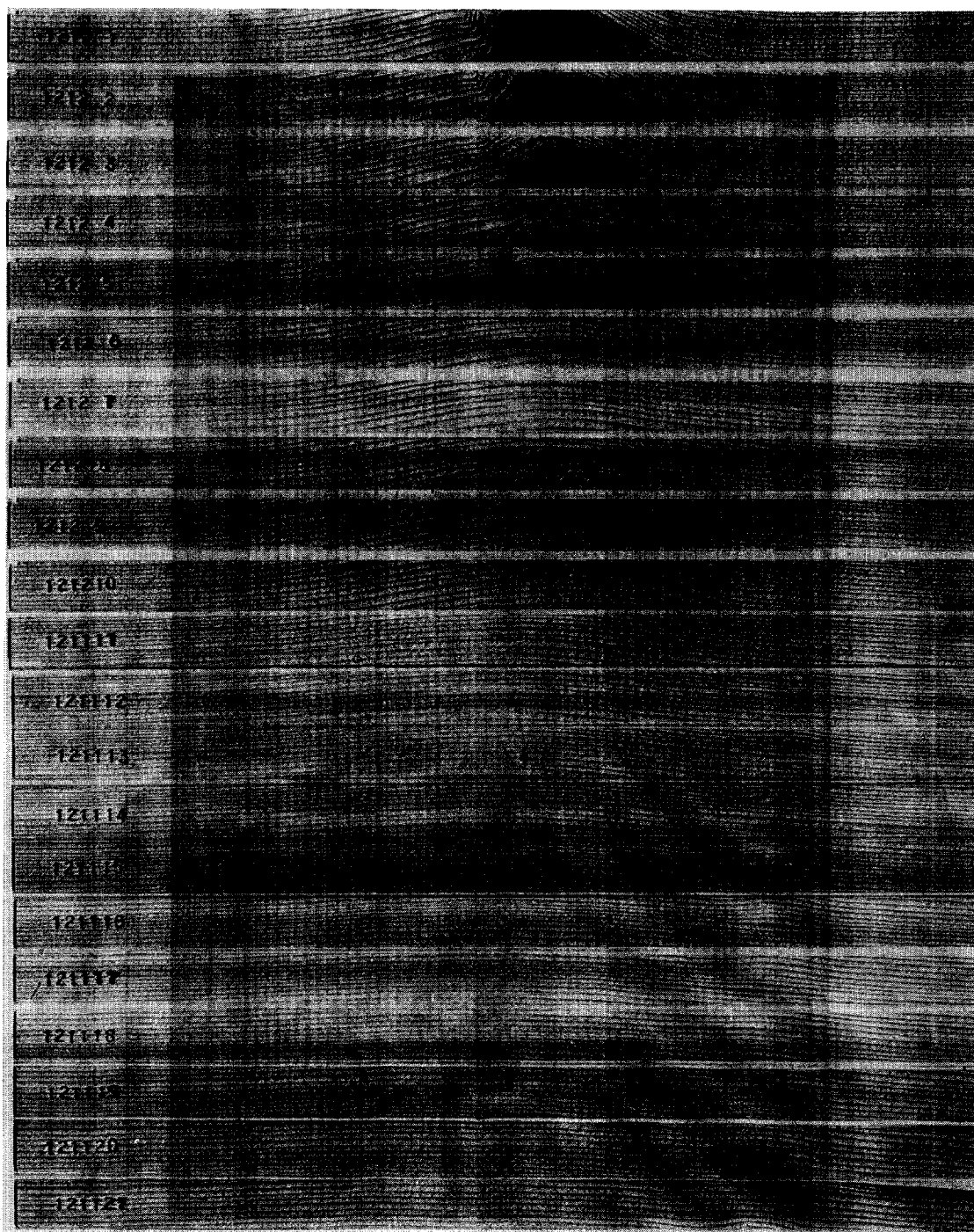


Fig. 4. 節周辺の引張強度解析用試験体の例

Fig. 3 の節隣接部から次第に材縁部（上から下へ）に向って木取られた試験体のまさ目面を示めす。

An example of tension test specimens.

これらの材料より、節軸が材軸と直交する材(正板目材)を選定し、節が材長の中央に位置するようにして、Fig. 1 に示すような寸法に木取った。含まれる節は、各樹種ごとに生節、死節、抜節(節あな)に分け、それぞれ節径が数 mm から 5~6 cm にわたる一連のものをできるだけそろえるようにした。ただし、スギで採材できた最大径は 4.3 cm である。Fig. 1 に示すように採取した板は正板目材のようなものであるから節はほとんど円節に近い形態となるが、ここでいう節径とは、材軸に平行にひいた接線で囲まれる節の直径、いわゆる接線径である。なお、節径は木裏と木表両面の平均値として、節ばかまは含まれていない。



Photo. 1 引張試験体加工専用倣い面取盤
Copying shaper for making standard
JIS tension test specimen.

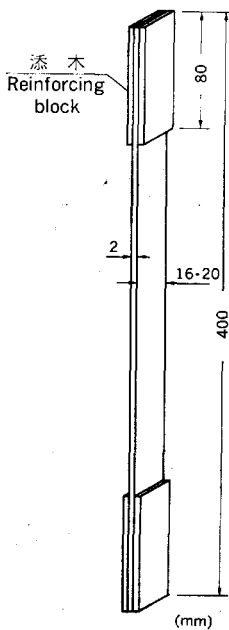


Fig. 5. 節周辺の引張強度
解析用試験体
Diagram of tension test
specimen.

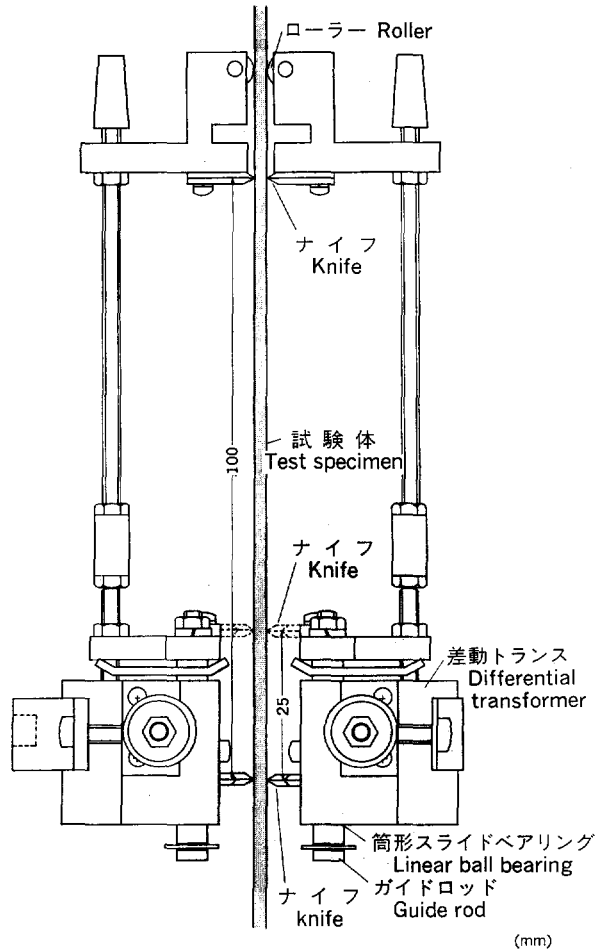


Fig. 6. 伸 び 計
Diagram of the extensometer.

また、これとは別に、節の影響のないところの正常材の基準強度を求めるために、前に採取した有節材に隣接した部分より長さ 45 cm の材を木取り、Fig. 2 に示すような JIS Z 2112 に規定されている縦引張試験体を材の幅方向に連続してできるだけ数が増えるように採った。試験体のつかみ部分にはケヤキ材の添木を木ネジで取り付けた。なお、JIS 型縦引張試験体の作成は、Photo. 1 に示すような引張試験体加工専用の倣い面取盤（菊川製）を使用したので、加工時に無理な力がかからず均一に仕上げられている。

有節材はさらに、Fig. 3, 4 に示すように幅方向の両材縁より、厚さ 2 mm になるようにチップソーで連続して節に接するところまで鋸断し、引張試験体とした。鋸断された材面はかなり斉一であることが認められたのでそれ以上の仕上げは行っていない。また、チャック切れのおそれがあるものには、厚さ 2 mm のカバ材の添板を酢酸ビニール系接着剤で接着して補強した。試験体の形状を Fig. 5 に示した。

2) 引張試験方法

各試験体はあらかじめ室温 20°C、関係湿度 75% の恒温恒湿室で含水率約 15% に調整してから試験に供した。試験体の横断面の寸法を、それぞれ試験の直前に、曲率半径の大きい測定子を取りつけたデジタル式ダイヤルゲージを用いて 0.01 mm まで測定した。引張試験機には大部分のものはオルセン型材料試験機の最大容量 1 tonf のものを用いたが最大荷重が 1 tonf を超えるものは、最大容量 5 tonf のオルセン型材料試験機をフルスケール 2 tonf に切り換えて使用した。引張試験に際し、同時に伸び変形量も測定したが、伸び計には Fig. 6 に示すような治具を用いた。これには最大変位量 ± 1 mm、精度 0.002 mm の差動トランス（新光電気製）が取付けてあり、差動トランスの動きを円滑にするために 2 本のガイド棒を直径 0.5 mm のスチールボールで構成された筒形の特殊スライドベアリングで支えてある。伸びは節の中心から水平に延長した点を中心に標点距離を 10 cm にとって相対する両面で測定した。ただし、JIS の試験体では標点距離を 2.5 cm にとった。

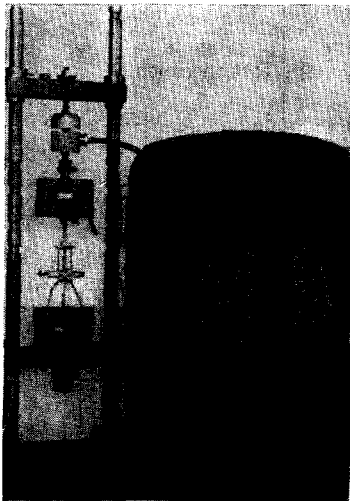


Photo. 2 引張試験装置
Tension test specimen in the
1 tonf testing machine.

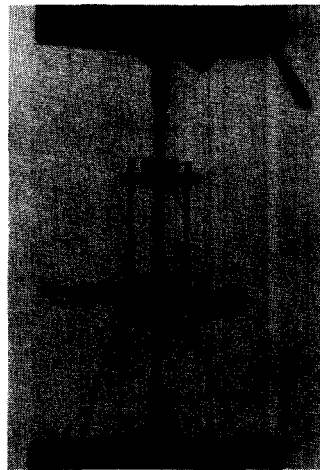


Photo. 3 伸 び 計
Extensometer assembly mounted
in position on specimen.

荷重の測定には、容量 1 tonf (共和製, 出力 $4,000 \times 10^{-6}$) および 5 tonf (共和製, 出力 $6,000 \times 10^{-6}$) のロードセルと動ひずみ計 (共和製, 最大出力 10 V) を用いた。

なお、加力時に材軸と荷重軸が一致するようにするために試験機のカロスヘッドとロードセルの間にセルフアライメントを挿入した。それぞれの試験は大体 4 分間で破断するように荷重速度を調節した。

数千本の試験体を用意したが、節からだんだん遠くなるにしたがって引張強度が増大し、試験体の木理が通直に近づくと、断面を一樣にしているためにチャック切れを起こすようになるのでそれ以後の試験は省略することにした。したがって実際に有効な結果を得た試験体数は少なくなり、約 2,000 本となった。試験装置の概要を Photo. 2~3 に示す。

3) 繊維走向傾斜の測定法

引張試験ののち、破断面における繊維走向の傾斜を測定した。傾斜角度は Fig. 7 に示すように、直交する二材面で材の稜線に対する傾斜角 α および β を万能投影器 (日本光学製) で $\times 10$ に拡大した像に回転角度測定盤の基線を重ねる方法によって測定し、次式によって材軸に対する真の繊維走向の傾斜角 θ を求めた。

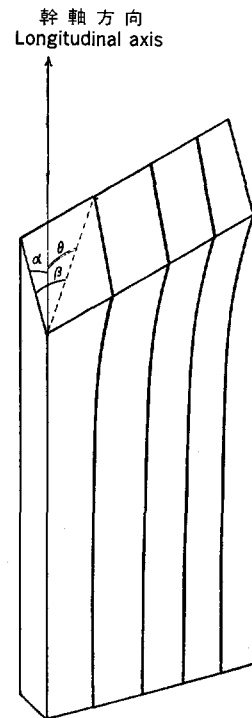
$$\tan \theta = \sqrt{\tan^2 \alpha + \tan^2 \beta}$$

なお、 α および β は度読みとし、1 度以下の端数は省略した。ところで、破断した箇所は、その試験体での最弱部と考えられるが、節に近く近いところでは必ずしも試験体中での繊維走向の傾斜の最大のところとは限らない。節に近いところでは繊維傾斜がかなり大きくなっているが、このような部分は圧縮あて材が形成されているものが多く、むしろその部分より少し離れて繊維走向の傾斜が少し小さくなりかけたところで破断するようなものが多い。この論文で節周辺における繊維走向の傾斜と定義するのは、個々の試験体で引張破断を生じた個所の繊維傾斜である。すなわち、引張破断は試験体中の最弱部分で生じたものと考ええる。いま目的とする節周辺における引張強度の分布、引張ヤング係数の分布などを解明するための繊維走向の傾斜のことであって、節周辺における組織構造的な繊維走向の傾斜を求めたものではないことを明記しておきたい。

II.1.2. 実験結果

1) 節の引張強度および節周辺における引張強度の分布

節そのものの引張強度は、抜節の場合は断面欠損であるから当然 0 と考えてよい。死節も節の繊維と材の繊維とが連続することがなく、また、節と材との間に樹皮や樹脂が含まれていたり隙間のあるものが多いので引張強度は 0 と考えてよい。生節は、節のみに引張力がかかるような試験体を作って実験を行ってみたが、ほとんど荷重が検出されないほど抵抗力はなかった。これは製材品の中の節のほとんどが割れをとまっていることによる。筆者はこの実験で扱った 4 樹種の原木について詳細に観察したが割れの発生していない生節を見出すことはできなかった。



$$\tan \theta = \sqrt{\tan^2 \alpha + \tan^2 \beta}$$

Fig. 7. 繊維走向の傾斜 θ の測定

Determination of the direction of the grain θ on the failure section in tension test specimen.

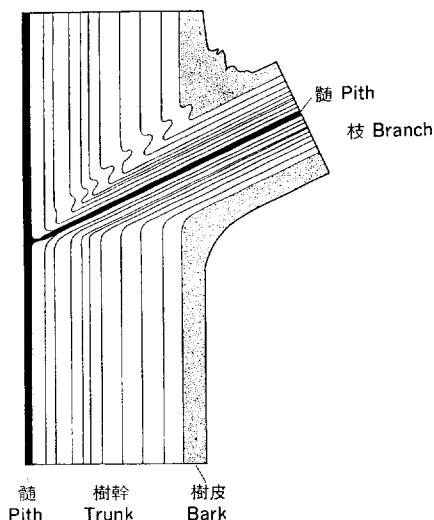


Fig. 8. 枝基部における樹幹の繊維走向²⁹⁾

Diagram illustrating the burial of branch bases by secondary xylem.

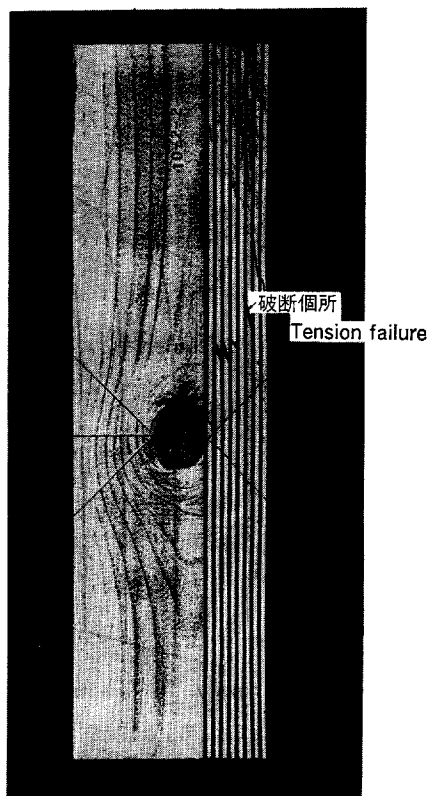


Fig. 9. 節周辺の引張試験体破断例 (アカマツ Akamatsu)

An example tension failure in tension test specimen.

た。

以上のことから、有節材の引張強度に関しては、節の品質に関係なく、少なくとも節の部分だけは断面欠損とみてよいと思われる。

つぎに節周辺における縦引張強度をみるとつぎのようである。

節に接するところから順次、試験体厚 2 mm、挽きみち幅 2 mm で採った試験体の引張試験の結果、引張強度は節から離れるにしたがって増大していく傾向があることがわかった。また、各樹種とも節に近い部分では圧縮あて材が形成されていて組織的な補強が施されていることも注目される。したがって節にごく近いところの試験体では、節の部分から少し離れ、しかも圧縮あての補強が弱くなった個所で破断が生じている。一般に圧縮あて材の形成されているところの繊維走向の傾斜は大きく、90° 近いものもある。節の周辺の繊維の巻き込みは、Fig. 8²⁹⁾ にみられるように三次元的に変化しており、枝の軸に沿って流れる部分ではかなり大きな傾斜となるのが普通である。またこの部分には枝を支えるよう

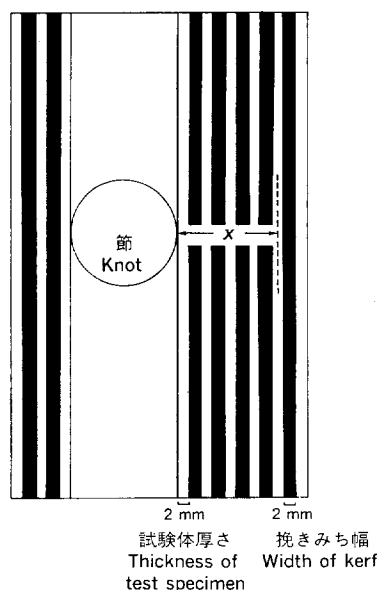


Fig. 10. 節端からの距離 x

The symbol " x " stand for a horizontal distance from the knot to the middle of specimen.

な圧縮力をうけて、圧縮あて材が形成されている。

破断個所の分布をみると、Fig. 9 に示すように節に接するところから順次ある角度で上昇し、節に行く近いところを除けば、その後は最も繊維走向の傾斜の大きいところを追っていくようにみえる。一つの試験体の中には節を中心にして対称的に上下に繊維走向の傾斜の大きな部分が出現するが、引張破断は、そのうちのどちらか弱い方が選択されるものと考えられる。

樹種ごとに、生節、死節に分けて、節からの距離（節の端から試験体の厚さの中心までの距離、Fig. 10 の x ）と縦引張強度との関係を示したのが Fig. 11 である。ここにはそれぞれ代表的な節径 ϕ についてのみ示している。

各樹種とも節径の小さなものは、節端からそれほど遠くないところで相当な強度に達するが、節径の大きなものでは節から数 cm はなれてもなお引張強度はかなり弱く、節径の小さなものに比べて増加の傾向が緩慢であることがわかる。また、生節と死節を比較してみれば節径が同じでも生節の方が引張強度の増加の傾向が緩やかであることがわかる。これらの傾向は樹種によっても多少異なり、スギではあまり差が認められなかったが、ベイツガ、アカマツでは明らかに差が認められる。このことは、同じ節径でも樹種が異なれば、節の周りの引張強度に影響する度合いが異なるような樹種の特性が存在することを示している。また、同じ節径でも生節と死節によっても異なることをあらわしている。

2) 節周辺における引張ヤング係数の分布

引張による破断強度を求めると同時に伸び量を測定し、引張ヤング係数を求めた。伸び計は標点距離を 10 cm にとり、節のあった部分が中心になるように取り付けた。破断する個所をあらかじめ正確に予測することが困難なために標点距離を大きくとらざるを得なかったが試験体中では繊維走向が部分的に変化しているので、当然それぞれの個所で伸びひずみも異なるものと考えられる。したがってここで測定した伸び量は 10 cm の間における平均のような値と考えられる。このようにして求めた引張ヤング係数は破断個所の真の引張ヤング係数よりもかなり大きな値となる。実際、JIS 型試験体で求めた基準引張ヤング係数（繊維走向の傾斜 0 度）と引張解析試験体で繊維走向の傾斜がだんだん 0 度に近づくあたりの引張ヤング係数とを比較したところ平均 1.4 倍になっていた。そこで引張解析試験から求められた引張ヤング係数をすべて 1.4 で除して調整することにした。

この調整した引張ヤング係数と節からの距離 x との関係を示したのが Fig. 12 である。ここには各樹種、節の品質ごとに代表的な節径のものを示してあるが一様の傾向がみられよう。すなわち、引張ヤング係数の間にも引張強度とほぼ同じような傾向が見出され、同じ樹種の同じ節径の生節と死節との間では引張強度と同様、前者の方が節からの距離に対応して引張ヤング係数の増大する傾向が緩く、4 樹種間でも明らかな樹種の特性が認められる。

3) 節周辺における繊維走向の傾斜の分布

引張試験ののち、それぞれの試験体について破断した個所の材軸に対する繊維走向傾斜を測定した。材部の引張強度や引張ヤング係数を減少させているものはいうまでもなく繊維走向傾斜の増大が最大の要因となっている。すなわち、傾斜が大きいほど引張強度や引張ヤング係数は減少する。

繊維走向傾斜の測定結果をまとめて、樹種、生節、死節に分けて節径ごとに節からの距離との関係を図示すると Fig. 13 のようになる。多少の凹凸はあるがかなり一様の傾向のあることが認められ、前に述べた引張強度の分布および引張ヤング係数の分布との関連でみても矛盾はない。このことから、もし個々

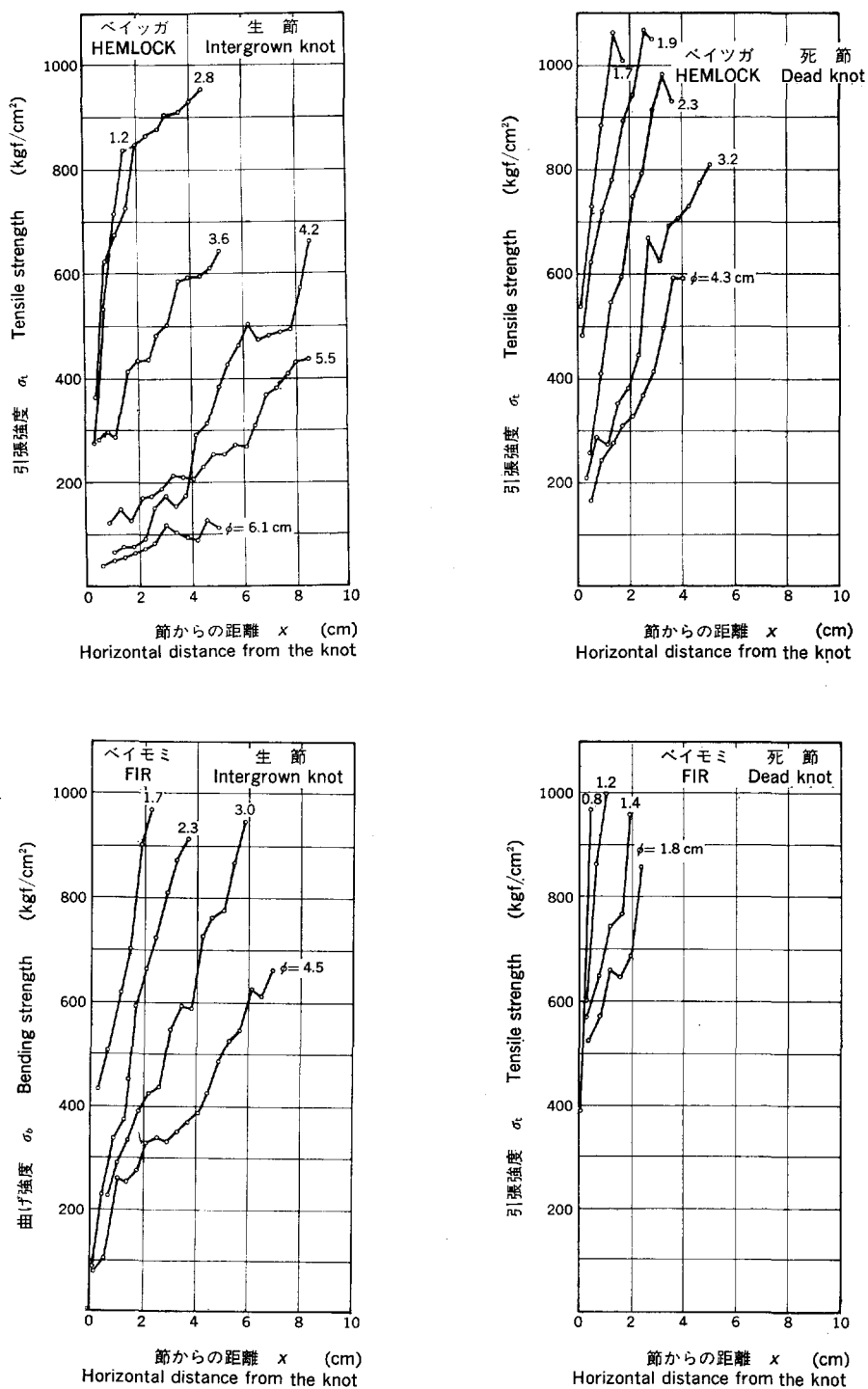


Fig. 11. 節周辺における引張強度の分布
Tangential distribution of tensile strength in passing
around various knots.

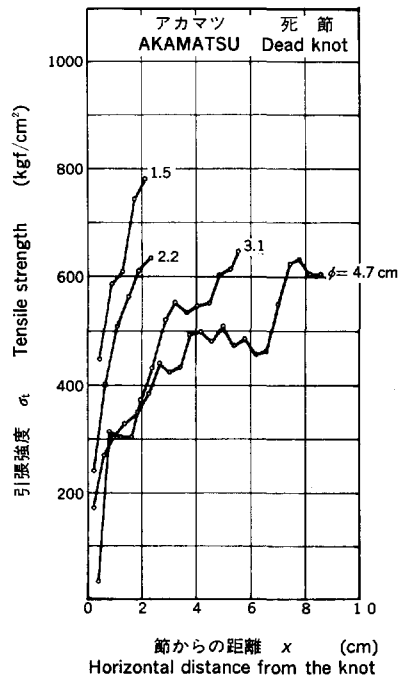
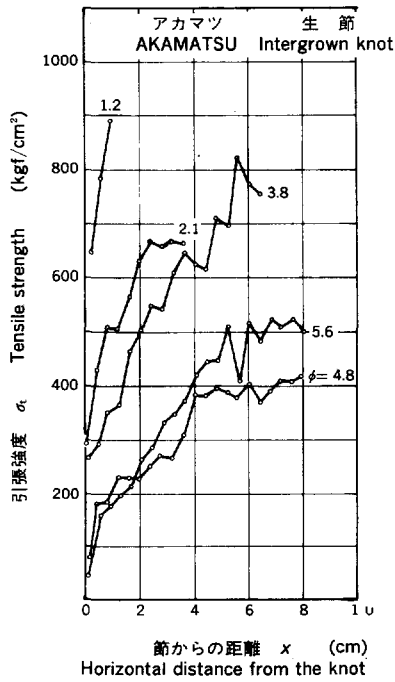
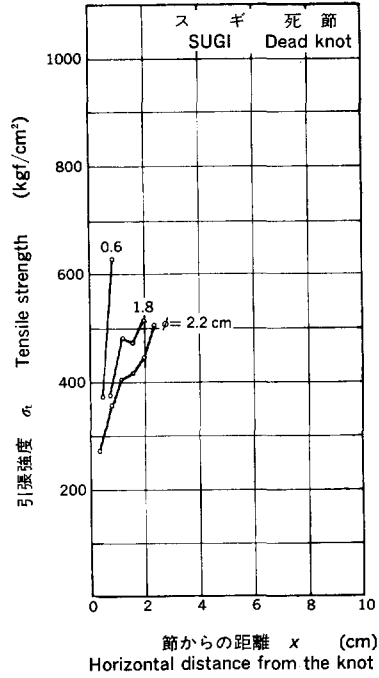
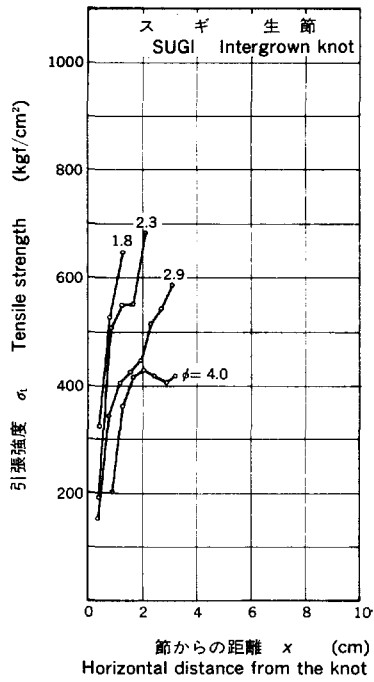


Fig. 11. (つづき) (Continued)

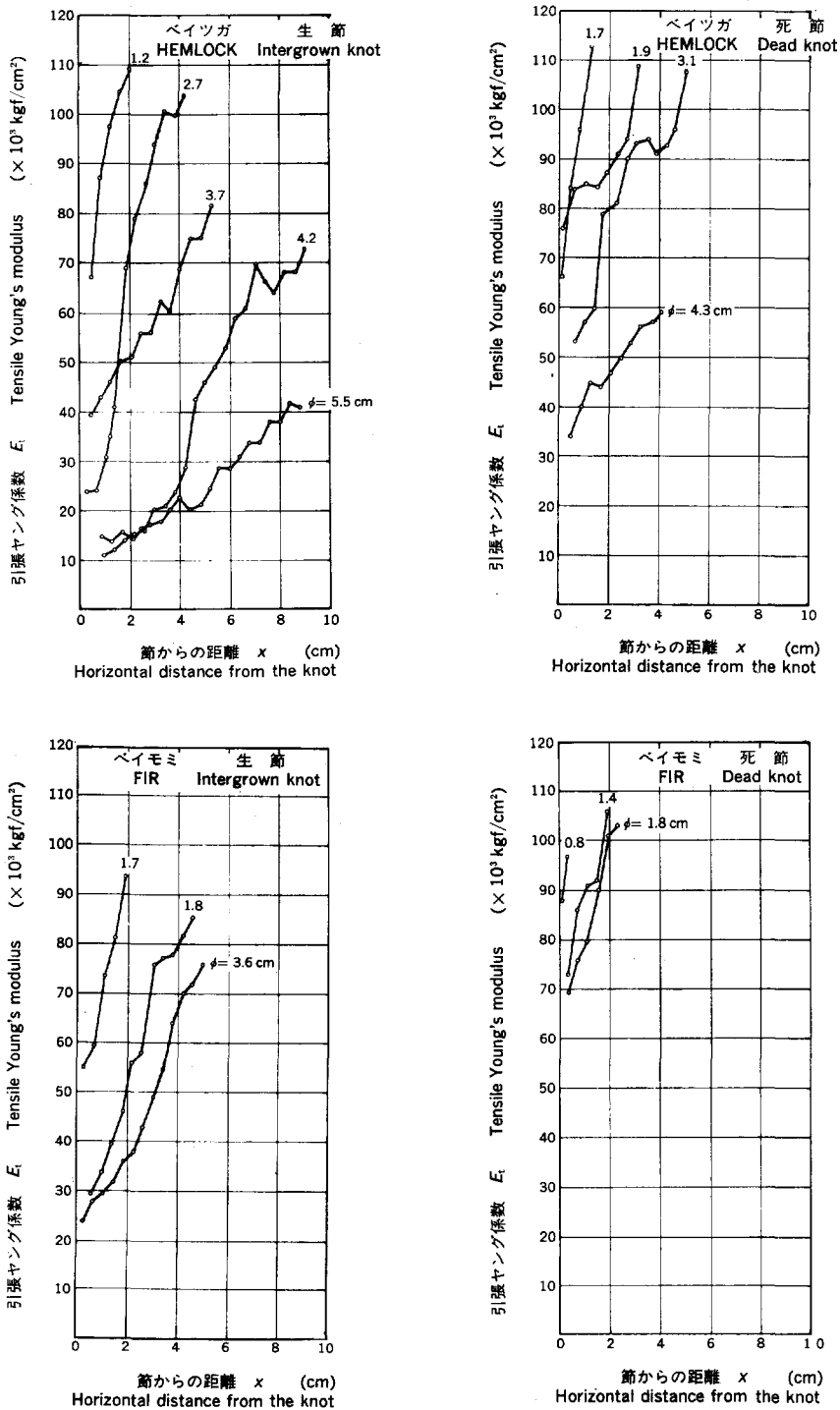


Fig. 12. 節周辺における引張ヤング係数の分布
Tangential distribution of tensile Young's modulus
in passing around various knots.

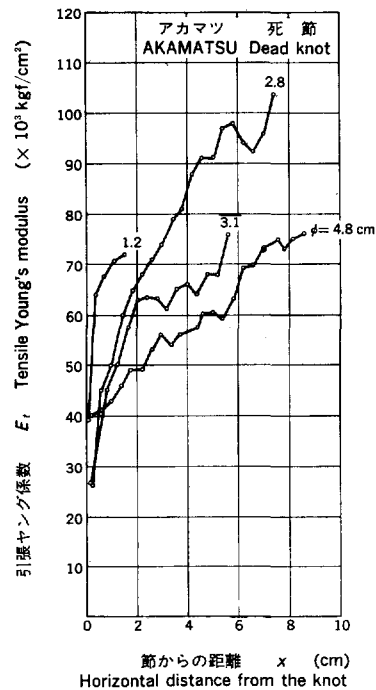
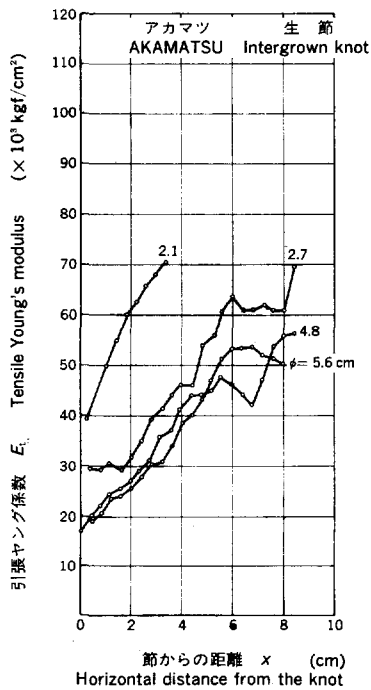
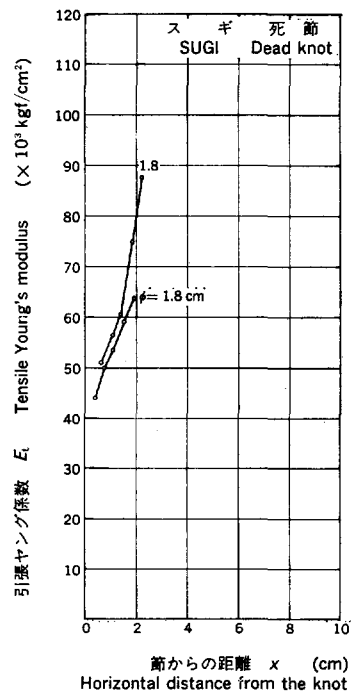
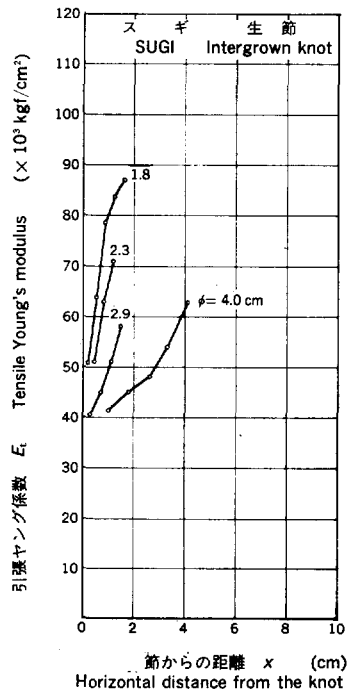


Fig. 12. (つづき) (Continued)

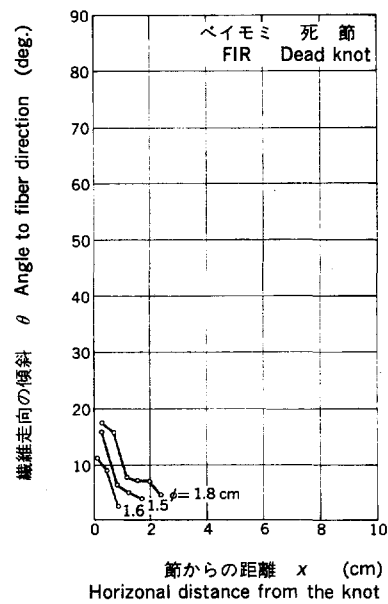
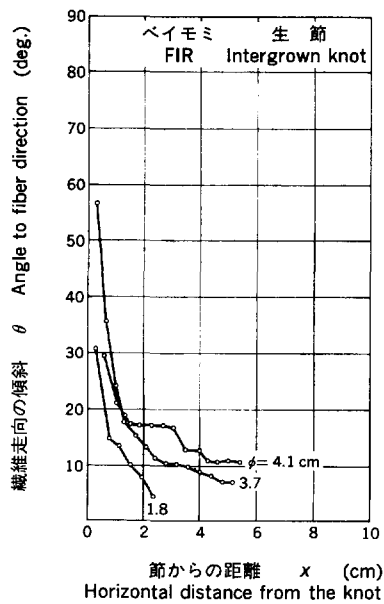
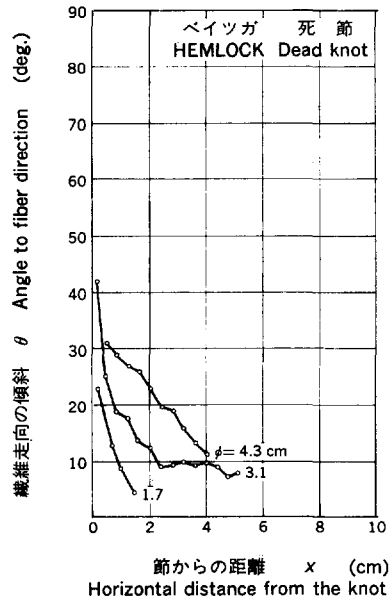
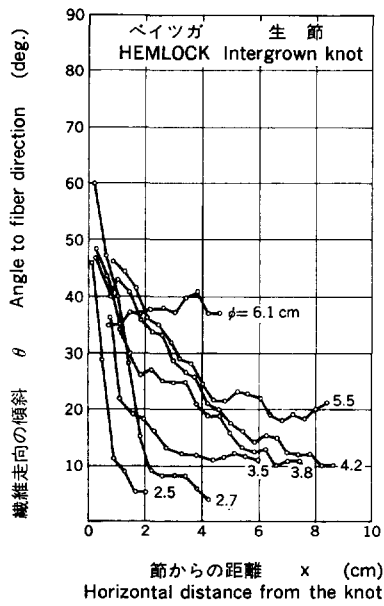


Fig. 13. 節周辺における繊維走向の傾斜の分布
Tangential distribution of the sloping grain in passing
around various knots.

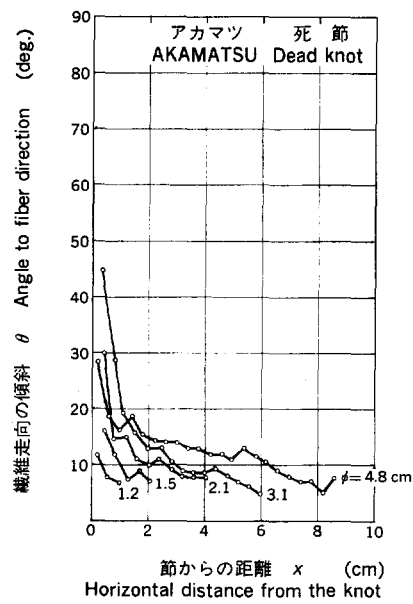
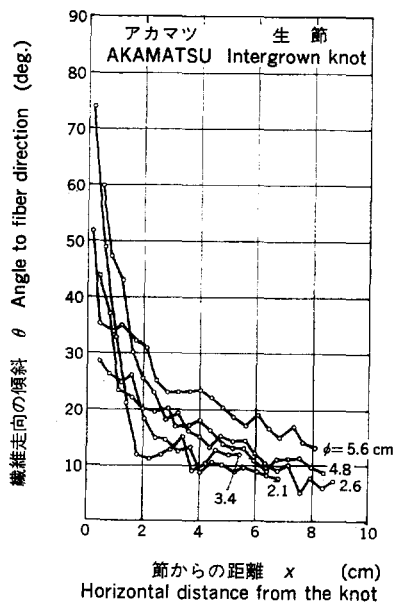
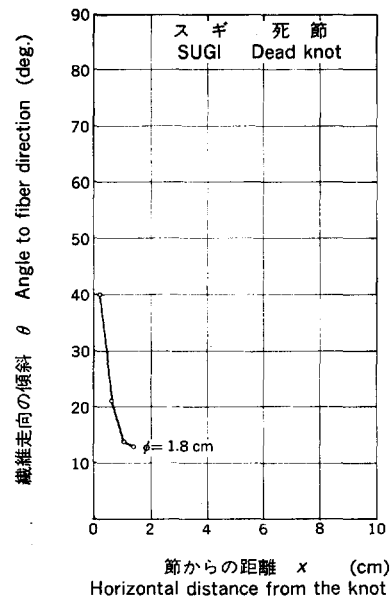
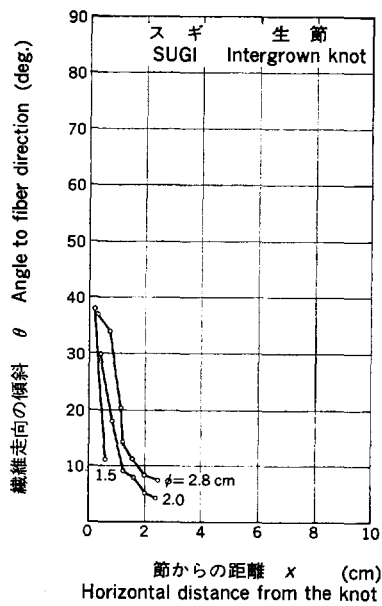


Fig. 13. (つづき) (Continued)

の節についてその周辺の繊維走向の傾斜の分布がきめられれば、同時に引張強度および引張ヤング係数の分布が推定可能となることが予想される。そこで樹種、節の品質ごとに節周辺の繊維走向の傾斜を、節径および節からの距離の関数として一般化できないかを検討した。その結果、おおよそ次式のような双曲線関数が適合することがわかった。

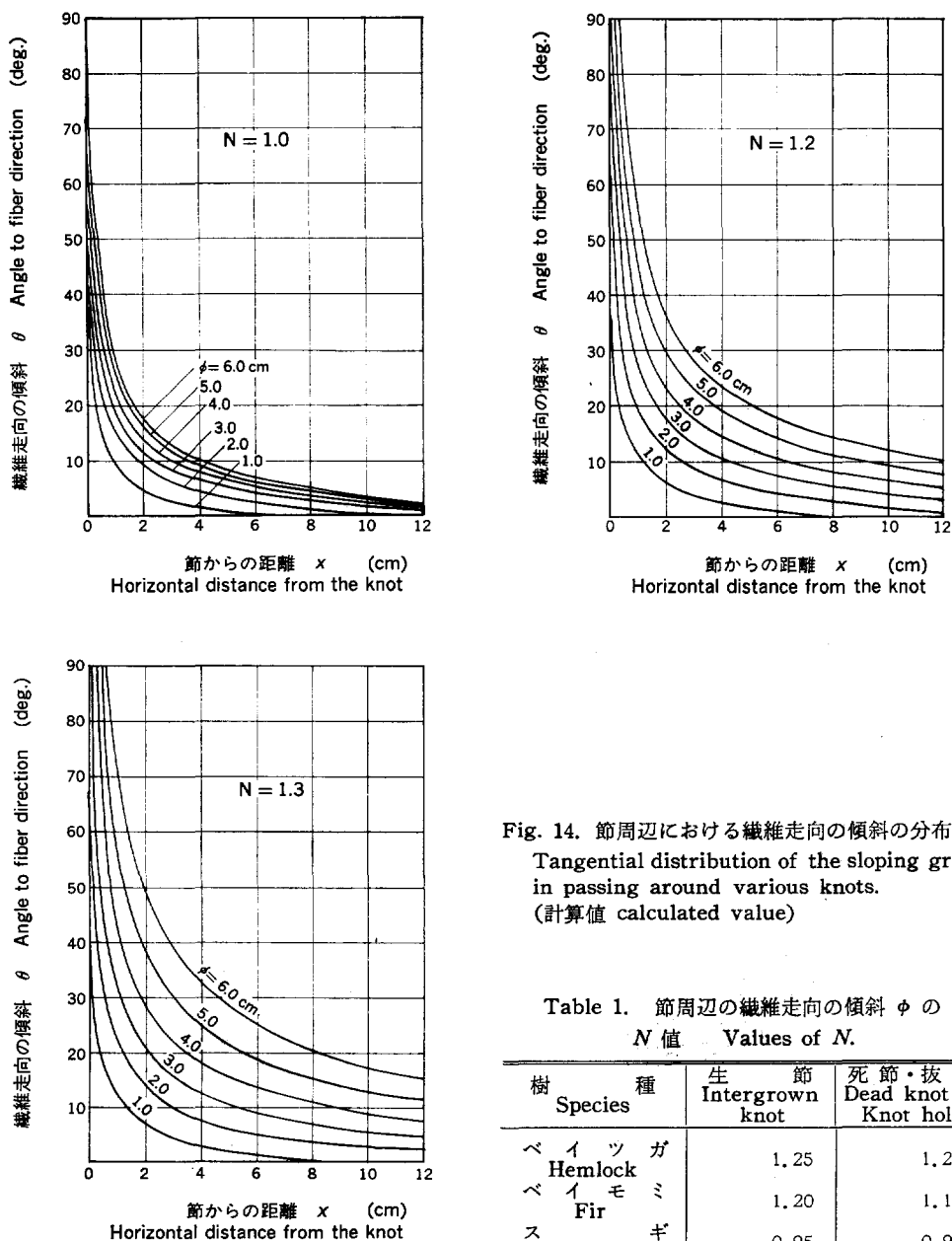


Fig. 14. 節周辺における繊維走向の傾斜の分布
Tangential distribution of the sloping grain
in passing around various knots.
(計算値 calculated value)

Table 1. 節周辺の繊維走向の傾斜 ϕ の
 N 値 Values of N .

樹種 Species	生節 Intergrown knot	死節・抜節 Dead knot & Knot hole
ベイツガ Hemlock	1.25	1.20
ベイモミ Fir	1.20	1.10
スギ Sugi	0.95	0.95
アカマツ Akamatsu	1.30	1.10

$$\theta = \frac{15\sqrt{N\phi}}{\sqrt{x}} - \frac{\phi}{2} - 5 \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに θ : 節周辺における繊維走向の傾斜 (deg.)

N : 樹種および節の品質によってきまる定数, $0.90 \leq N \leq 1.30$

ϕ : 節の平均接線径 (cm)

x : 節の端からの水平距離 (cm)

この式で計算した, $N=1.0$, $N=1.2$, $N=1.3$ の場合の例を示したのが Fig. 14 である。また, 先に示した Fig. 13 について, それぞれ適合する N の値を示したのが Table 1 である。実際の場合, 半死節のような節もあるが, その場合の N は生節と死節の中間の値をとるか, または生節にほとんど近い

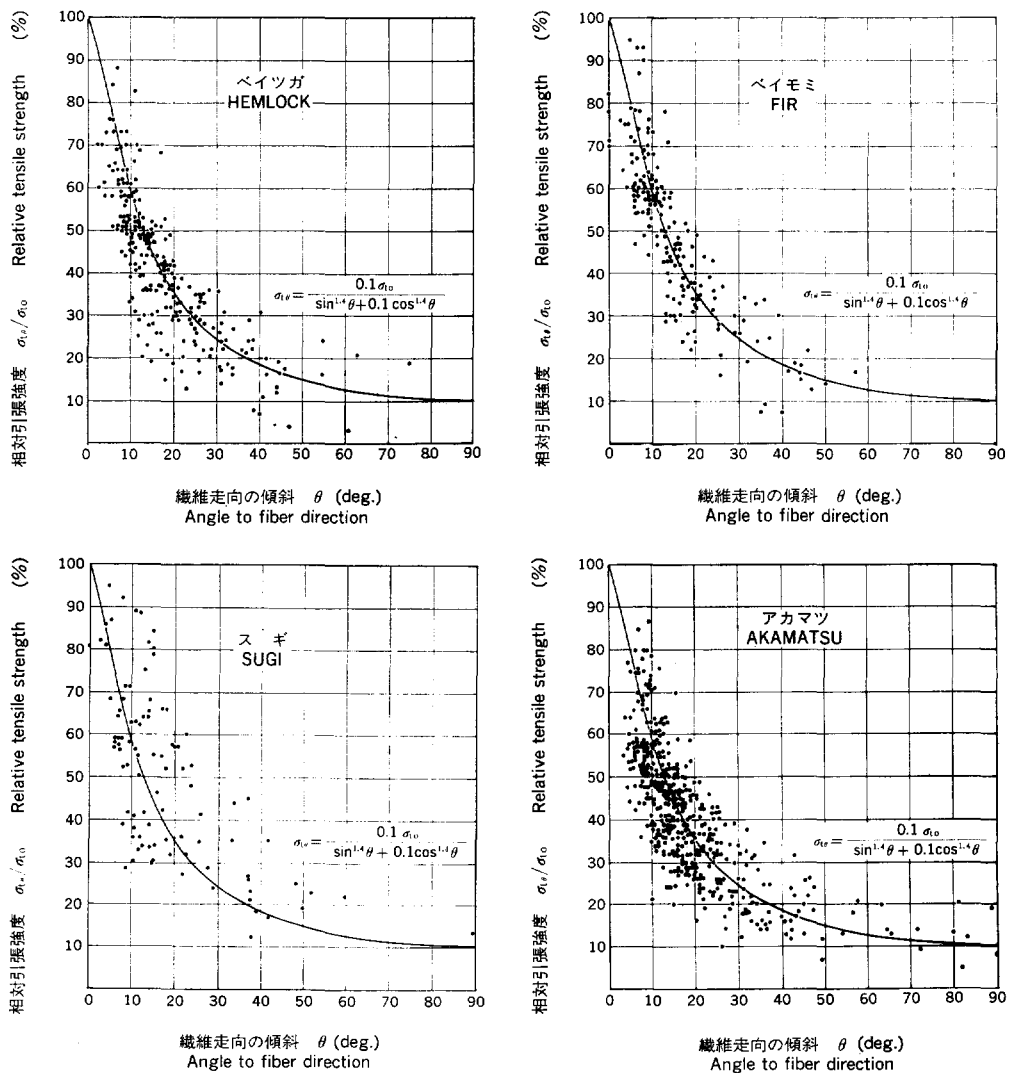


Fig. 15. 節周辺における繊維走向の傾斜と引張強度との関係

Effect of grain angle on tensile strength.

か、死節に近いかで判断する必要がある。

4) 節周辺における繊維走向の傾斜と引張強度との関係

各引張解析試験体ごとの破断面における 繊維走向の材軸に対する傾斜 θ と引張強度 σ_t との関係を各樹種ごとにまとめて示したのが Fig. 15 である。

まえに述べたように繊維走向の傾斜の分布は節の品質によって異なるが、繊維走向の傾斜と引張強度との関係は節の品質には影響されないと考えてよい。したがって図中の点は生節と死節の両者から得られた値が混在している。ここで 4 樹種を比較してみても傾向は大体同じで差がないことがわかる。そこで、一般に木材の繊維走向の傾斜と強度との関係をあらわすのに最もよく適合するといわれている次式のような HANKINSON の式が適合するかを検討した。

$$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma_{\parallel} \sigma_{\perp}}{\sigma_{\parallel} \sin^m \theta + \sigma_{\perp} \cos^m \theta}$$

ここに σ_{θ} : 繊維走向の傾斜が θ° の場合の強度

$\sigma_{\parallel}$: 同じく 0° の場合の強度

$\sigma_{\perp}$: 同じく 90° の場合の強度

m : 外力の種類に依存する定数

一般に素材の引張強度では $m = 1.5 \sim 2.0$ が適合し、 $\sigma_{\parallel} = 100$ とすれば $\sigma_{\perp} = 10$ 以下の値をとるものが多いが⁸⁰⁾、筆者がベイツガとベイモミで節と無関係の素材について測定した結果を Fig. 16 に示したが、図からわかるようにベイツガとベイモミとでは若干の差はあるが平均すれば $\sigma_{\perp}$ は $\sigma_{\parallel}$ に対して 5% の値をとり、 $m = 1.3$ が適合すると考えられる。

一方、節の影響によって繊維走向の傾斜したものでは 4 樹種を平均して m の値は素材の場合よりも若

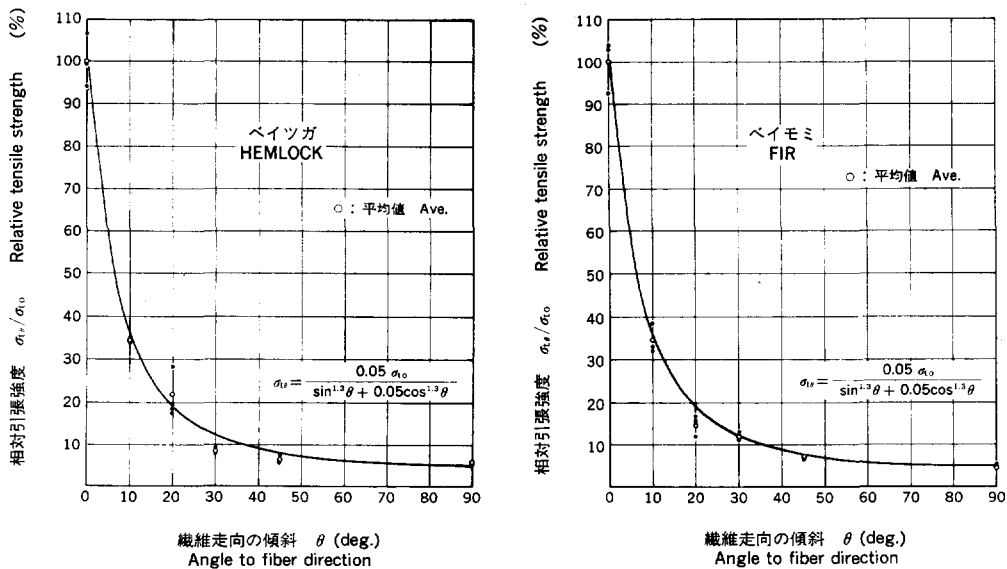


Fig. 16. 繊維走向の傾斜と引張強度との関係

Effect of grain angle on tensile strength.

(節と無関係の場合 in the unrelated case to knot)

干大きく, $m=1.4$ となり $\sigma_{\perp}$ は素材の場合ほど低下せず 10% が適合すると考えられる。すなわち厳密にみれば 4 樹種間で若干の相違はあるが, 今後この値を基準にして, 節による各種強度低減を検討していく場合, あまり複雑になることを避けて全樹種に共通して用いる目的で次式のようにきめた。

$$\sigma_{t\theta} = \frac{0.1 \sigma_{t0}}{\sin^{1.4} \theta + 0.1 \cos^{1.4} \theta} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに σ_{t0} : 節周辺における繊維走向傾斜 θ° のときの引張強度 (kgf/cm²)

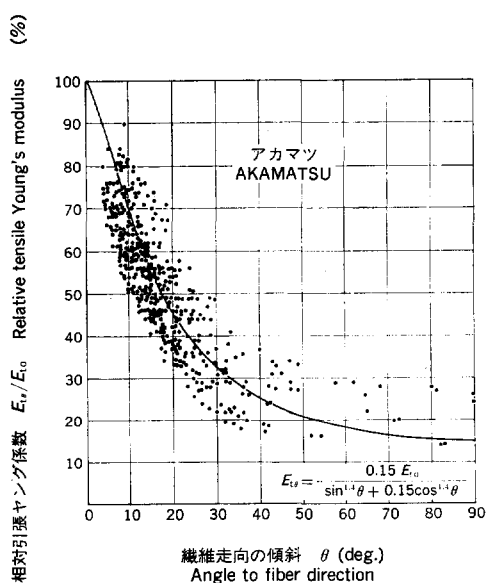
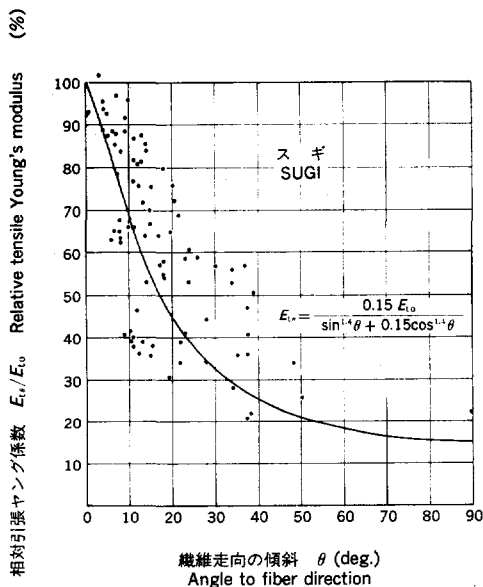
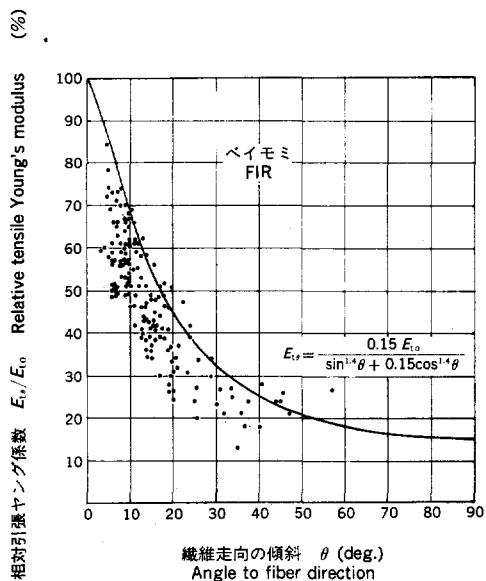
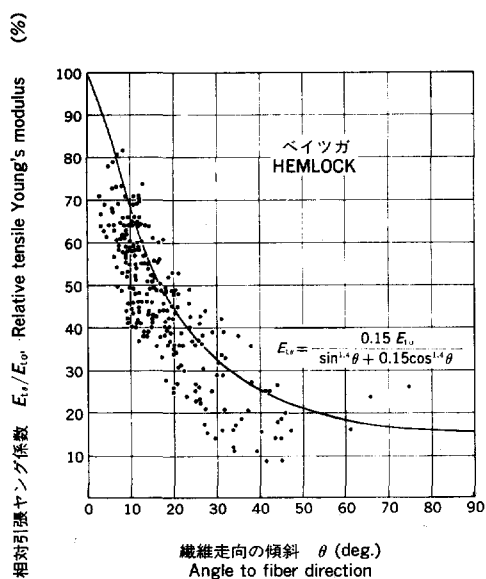


Fig. 17. 節周辺における繊維走向の傾斜と引張ヤング係数との関係

Effect of grain angle on tensile Young's modulus.

σ_{t0} : 繊維走向傾斜 0° のときの基準縦引張強度 (kgf/cm²)

θ : 繊維走向の傾斜 (deg.)

式 (2) によって求めた曲線を Fig. 15 に示したが、おおむね適合しているとみてよい。

5) 節周辺における繊維走向の傾斜と引張ヤング係数との関係

前項の引張強度と同様にして各試験体ごとの破断面における繊維走向の材軸に対する傾斜 θ と引張ヤング係数 E_t との関係を各樹種ごとにまとめて示したのが Fig. 17 である。

ここでも σ_{t0} の場合と同様に節の品質による区別はせず、同じ図上にプロットしている。図をみてわかるように σ_{t0} とほぼ同じような傾向を示しており、HANKINSON の式が適合しそうである。これとは別に同じグループのベイツガ、ベイモミについて節と無関係の素材について繊維走向の傾斜と引張強度の関係を求める実験を行い、同時に標点距離 2.5 cm にとったときの伸びを測定して引張ヤング係数を求めた結果、素材の繊維走向の傾斜 (目切れ) と引張ヤング係数との関係は、Fig. 18 に示すように HANKINSON の式で $m = 2.4$, $E_{\perp} = 0.02 E_{\parallel}$ が適合した。

節周辺の繊維走向の傾斜と引張ヤング係数との関係は Fig. 17 に示しているような $m = 1.4$, $E_{\perp} = 0.15 E_{\parallel}$ が最もよく適合する。すなわち、次式のようにあらわせる。

$$E_{t\theta} = \frac{0.15 E_{t0}}{\sin^{1.4} \theta + 0.15 \cos^{1.4} \theta} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに E_{t0} : 節周辺における繊維走向傾斜 0° のときの引張ヤング係数 (kgf/cm²)

E_{t0} : 繊維走向傾斜 0° のときの基準引張ヤング係数 (kgf/cm²)

θ : 繊維走向の傾斜 (deg.)

以上 2 つの実験結果からわかるように節周辺の節によって繊維が傾斜したものの方が目切れによって繊維

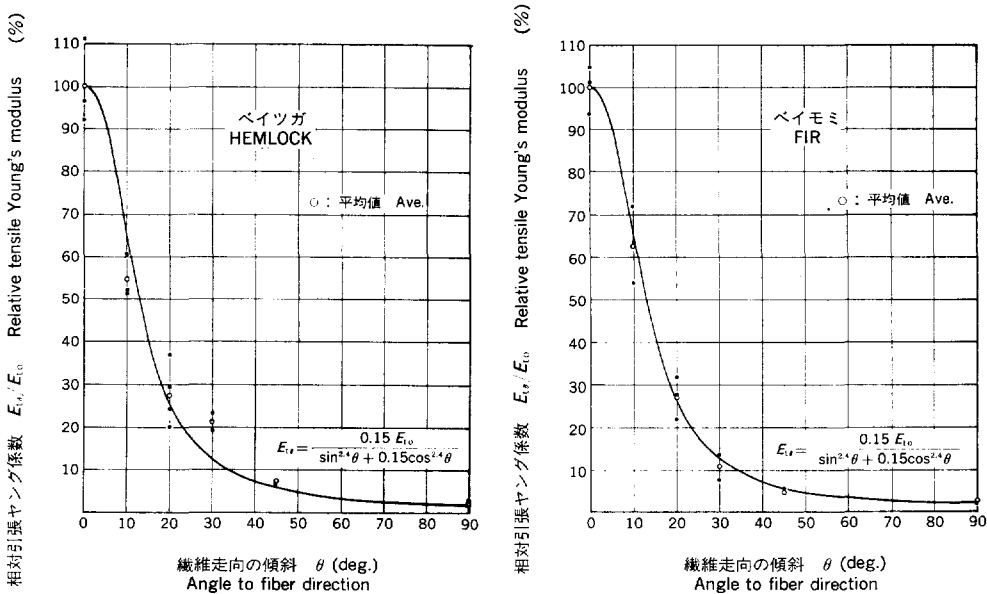


Fig. 18. 節周辺における繊維走向の傾斜と引張ヤング係数との関係

Effect of grain angle on tensile Young's modulus.

(節と無関係の場合 in the unrelated case to knot)

維が傾斜したものよりも、傾斜の大きいところでの引張ヤング係数の減少がはるかに少ないこと（たとえば 90° で $E_{\perp} = 0.02 E_{\parallel}$ ）が注目される。すなわち、ここでも素材の目切れとは異なり、節の近傍の繊維走向の傾斜の大きなところでは生物組織的に補強されていることがうかがえる。

II.1.3. 考 察

以上の実験から得られた結果を要約すれば次のようになる。

① 針葉樹材の節周辺の繊維走向の傾斜は、節径の関数式であらわせるような法則性があるとみてよい。

② 繊維走向の傾斜と引張強度および繊維走向の傾斜と引張ヤング係数との関係には、HANKINSON の式の適用が可能であり、この場合、樹種による差はないとしてよい。

③ 節周辺の繊維走向の傾斜は、節径が同じでも、樹種による差が認められる。

④ 節周辺の繊維走向の傾斜は、同じ樹種でも節の品質により多少異なることが認められる。

①については、これを力学的にみて、樹木における枝を支えるために組織の合理的な配列がなされていると解することもできよう。さらには、繊維が急傾斜するところには必然的に圧縮材を形成して保護しているものとも考えることもできる。つぎに、節径の大小と繊維走向が傾斜している範囲が関連していることも注目される。杵組壁工法用材など木材の強度等級区分を行う際、材の 15 cm 区間における節径の合計が等しければ同一の強度を与えるような規準にすることが多いが¹⁰⁾¹⁸⁾、節径の合計が等しくても大径の節の集団と小径の節の集団とでは、前者が後者よりも強度で減少させることがこの実験結果からも十分予想され、SHIMES¹⁾、平嶋・神谷¹⁸⁾の主張を裏付けるものと思われる。

②については、従来の一般式である HANKINSON の式が節周辺の繊維走向の傾斜の場合も適用できるが、傾斜の大きいところでは素材にくらべてやや高い強度を有することがわかった。

③については、節周辺の繊維の傾斜する程度は樹種によって特性のあることが明らかにされた。樹種によって枝のつき方や枝の形状、樹幹と枝との角度、マツ (*Pinus*) 属のように枝が輪生するもの、枝の枯れ易いものなど、それぞれ枝の性状を異にすることからも、樹幹における節周辺の繊維の巻き込み方に相違のあることが容易に想像できる。また、これらの性状が異なるために同じ大きさの節でも木材の強度に与える影響の程度が樹種によって異なってくるものと考えられる。このことは、後述する有節材の曲げ試験結果や B. MADSEN¹⁷⁾の実験からも指摘されているところである。

④のことから、北原⁴⁾、佐々木・満久⁵⁾、森⁸⁾らも指摘しているように、生節、死節によって木材の強度におよぼす節の影響が異なるものと考えてよい。ただスギ材では生節と死節との差はほとんど認められなかった。スギ材は他の 3 樹種に比較して基礎強度は低い材であるが、節による強度の減少が比較的少ないからである。

つぎにこの実験からきめられた一般式 (1) (2) (3) を用いて求めた節周辺における引張強度および引張ヤング係数の分布の計算例を示せば、Fig. 19 および Fig. 20 のとおりである。節が木材強度におよぼす影響は意外に広範囲にわたっていることがわかる。この図はまた木材中の節の周りの強度の不均一性を示しているものともいえるだろう。もちろんこの分布は材を細分して求めたものであって、実際にこれが一体となって外力に抵抗する場合は異なるかも知れない。また、節の周りには応力集中が生じることも考えられる。しかしながら、この図に示された傾向は有節実大材の強度に強く関係すると考えて間違いない。そこでつぎにこれらの関係を基にして有節実大材の諸強度を検討してみることにする。

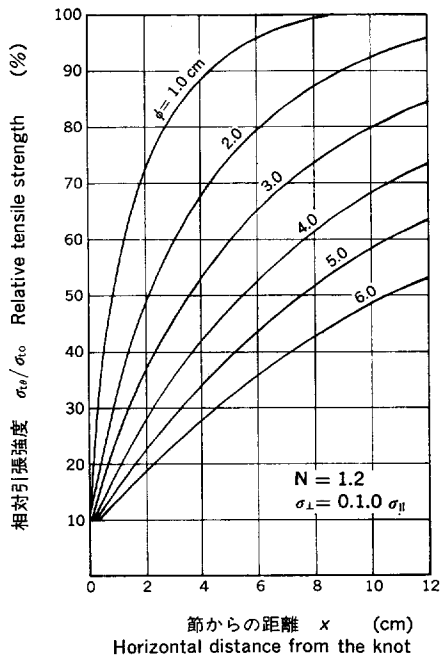


Fig. 19. 節周辺における引張強度の分布
Tangential distribution of tensile strength in passing around various knots.

(計算値 calculated value)

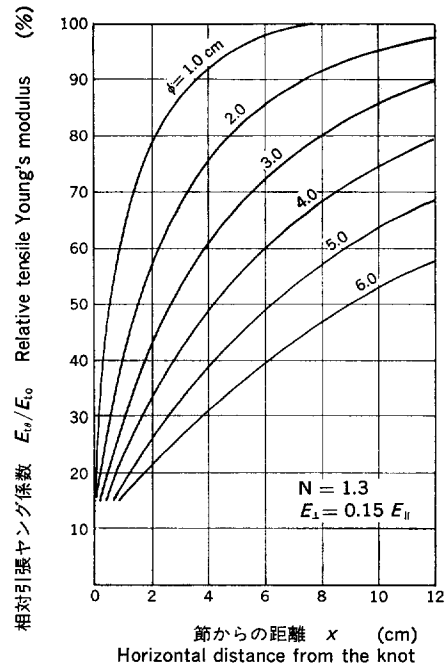


Fig. 20. 節周辺における引張ヤング係数の分布
Tangential distribution of tensile Young's modulus in passing around various knots.

(計算値 calculated value)

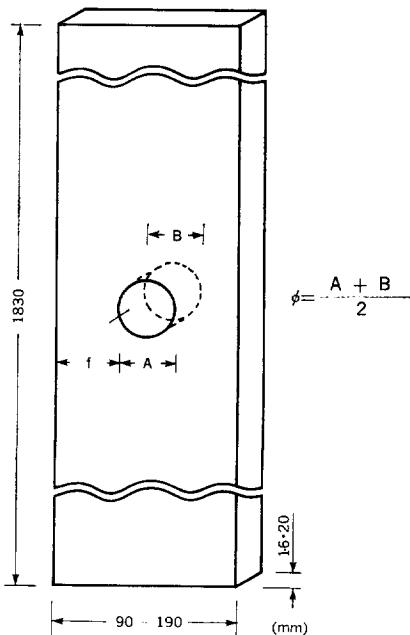


Fig. 21. 実大引張試験体
Diagram of knotted tensile specimen.

II. 2. 有節材の実大引張試験

従来、木材の実大引張強度に関する資料はきわめて少ない。これは試験機の容量がかなり大型になることや、試験体のつかみ機構の難しいこと³¹⁾なども大きな理由であろう。一方、いままで木材が引張力をうけるような使い方が比較的少なく厳密な資料がなくとも何とか間に合わせてきた事情もあったと思われる。実大材の引張試験資料のほとんどないわが国では、引張許容応力度を曲げの許容応力度と同じ値として与えており³²⁾、北米では曲げ(形状係数を乗ずる前の値)の55%を引張許容応力度ときめている¹⁰⁾が、近年木構造の様式が多様化してくる中で構造用木材の引張強度資料の早急な整備が望まれている。このような背景もあり、まずこの研究では最初に断面に一樣な垂直応力が作用するような有節材の縦引張強度について実験的な検討を試み、さらに II. 3. ではそれらが計算のうえから推定が可能かどうかを検討す

る。

II.2.1. 実験材料および実験方法

1) 実験材料

実験に供した原材料は II.1. と同じグループのものである。ベイツガ、ベイモミは枠組壁工法用の寸法型式 206 材の 12 feet 材を用い、この材の厚さ 3.8 cm をテーブルバンドソーで二つ割りにして 1.6 cm 厚にプレーナ仕上げを行った。スギ、アカマツは厚さ 2 cm を標準としてプレーナ仕上げを行った。幅はベイツガ、ベイモミでは 13 cm、スギは 9~10 cm、アカマツは 9 cm および 19 cm の 2 種類とした。含

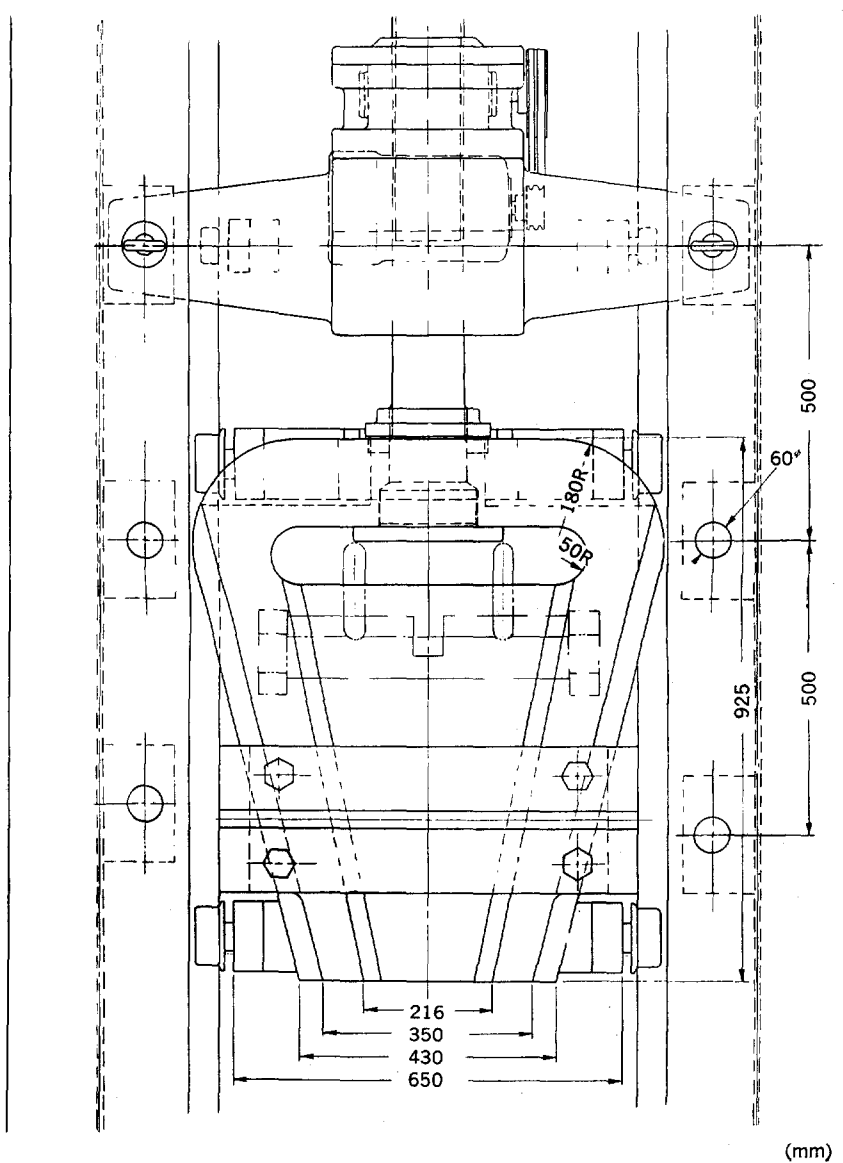


Fig. 22. 引張グリップ

Side view of horizontal tensile grips for structural members.

水率はすべて約 15% に調整した。

節が材長の方向でできるだけ中央に位置するようにして、試験体の長さが 183 cm になるように切り出した。各樹種について生節、死節、抜節（節あな）のそれぞれの節径が数 mm のものからできるだけ大きな節径のものまで一連のものをそろえるようにしたが、スギ、アカマツでは十分な数が入手できなかった。とくにスギでは小さい節をもつ材は未成熟材を含むものが多くなり、試験結果に影響のあったものもあった。実大引張試験体の概要を Fig. 21 に示した。

なお、対照として無節材の基準強度を求めるために II. 1. の場合と同様の方法で有節実大引張試験体に隣接した部分から、JIS Z 2112 に準じた試験体を木取った。

2) 実大引張試験方法

試験のまえに常法にしたがい各試験体の寸法、重量、節径を測定した。さらに材幅方向での節の位置を表現するために端距を測定した。この場合の端距とは材縁から節の外縁までの距離の意味である。

引張試験は、最大容量 100 tonf の油圧式横型材料試験機（前川試験機製）を用いた。引張グリップの詳細を Fig. 22 に示した。引張グリップは両方とも材軸がねじれる方向には自由に回転できるが、材軸を曲げる方向の回転は抑えられている。鋼製の締め板の試験体に接する面は交差した波形の刃が刻まれており、締め板の先端部は、ASTM-D 198 に示されている値に準拠して逃げ角をとっている。

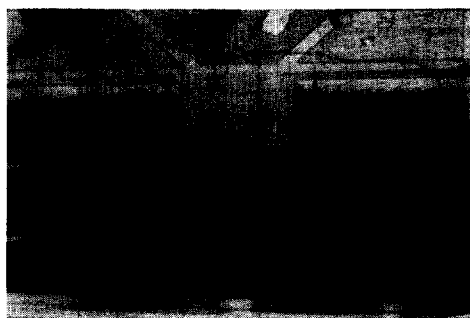


Photo. 4 実大引張試験
(100 tonf 油圧式横型材料試験機)
General view of 100 tonf testing
machine for tension.

節を中心において 標点距離を 20 cm にとり、金属抵抗線式変位計（東京測器製、ストローク 5 mm、感度 $2,000 \times 10^{-6}/\text{mm}$ ）を材幅面の両面に木ネジで取り付け、伸び量を測定した。荷重の計測はロードセルを用いた。30 tonf 容量の圧縮型ロードセル（共和製、出力 $4,000 \times 10^{-6}$ ）を籠形に挿入し、動ひずみ計を介して XY 記録計に変位計の出力とともに記録させた。荷重速度は破壊までの時間が 5～7 分になるように油圧の給油弁を調整して一定にした。

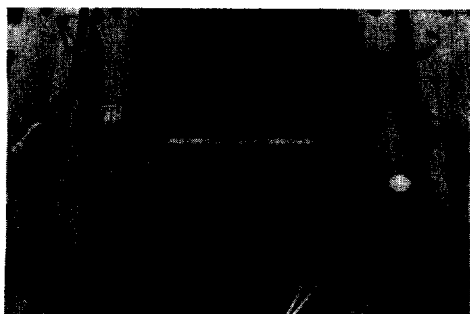


Photo. 5 実大引張試験
Full size tension test specimen
in the 100 tonf testing machine.

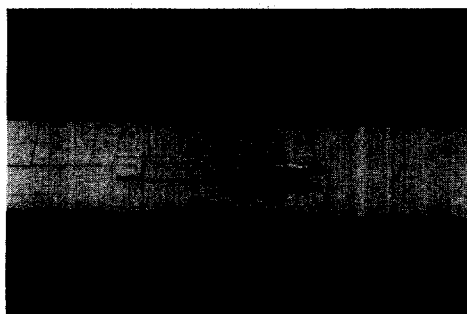
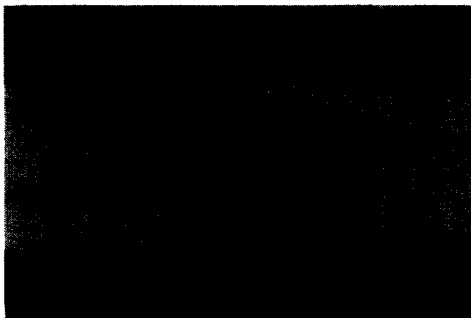


Photo. 6 金属抵抗線式変位計
Electronic extensometer.

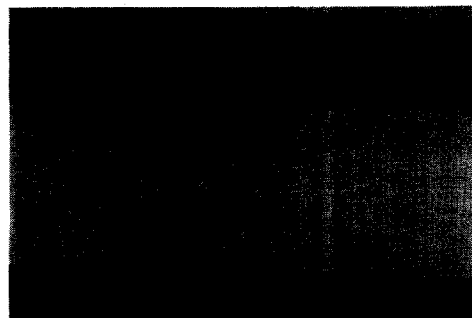
II.2.2. 実験結果

引張破断の多くは狙った節が起因となって発生したが、節の周辺以外のところに圧縮あて材のあるものは破壊性状が正常でなかった。また、スギ材ではグリップの横圧に耐えきれず、いわゆるチャック切れを生じたものもあった。アカマツでは、樹種特性から輪生枝による「くるま節」を形成することが多く、明らかにかくれた別の節の影響があると認められたものもあり、このような破壊性状の正常でないものは結果の集計から除外した。

主な破壊性状を Photo. 7 に示した。



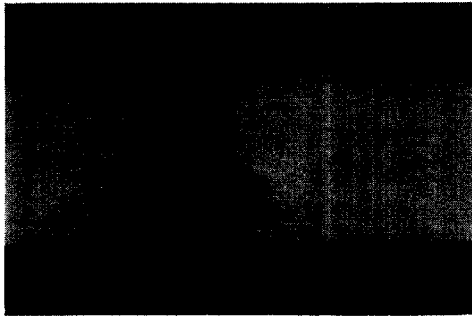
ベイツガ Hemlock



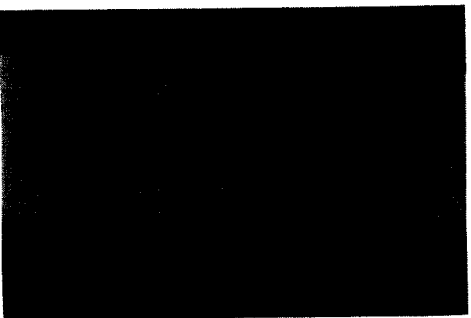
ベイツガ Hemlock



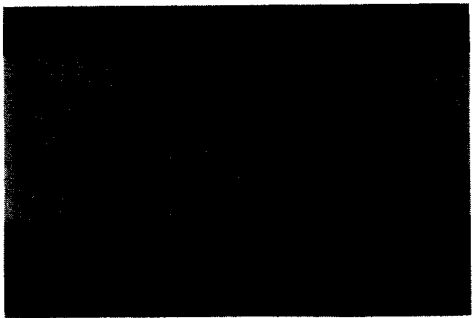
ベイツガ Hemlock



ベイツガ Hemlock

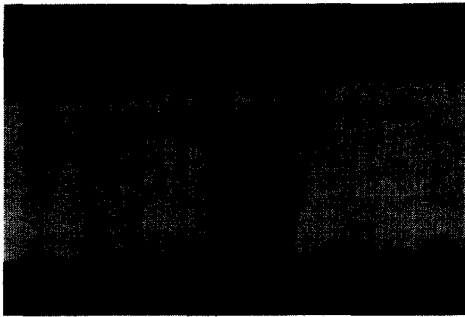


ベイツガ Hemlock

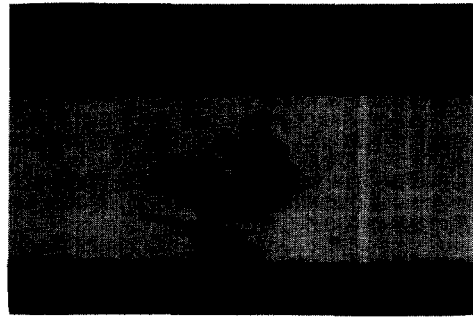


ベイツガ Hemlock

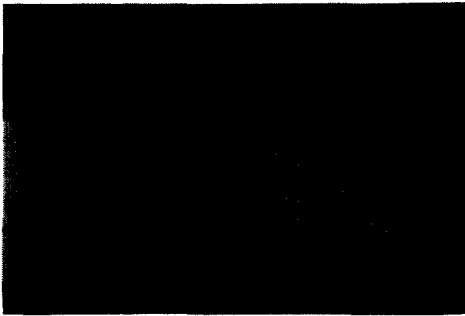
Photo. 7 有節材の引張破断性状
Example of tension failure caused by knot.



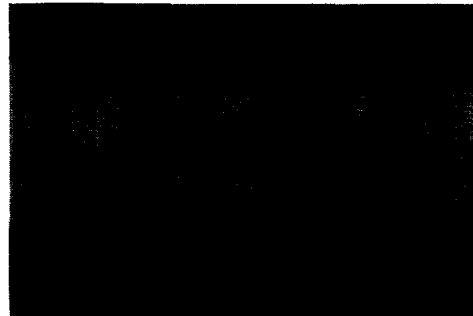
ベ イ モ ミ Fir



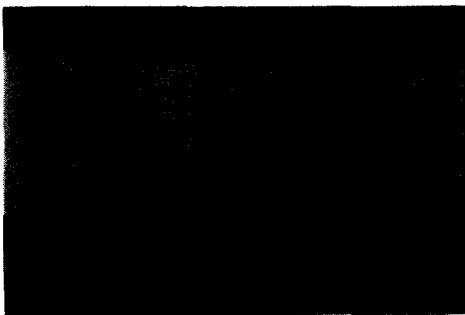
ベ イ モ ミ Fir



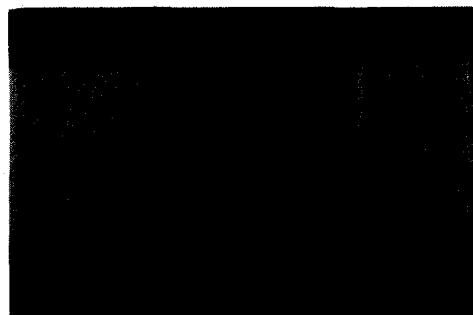
ベ イ モ ミ Fir



ベ イ モ ミ Fir



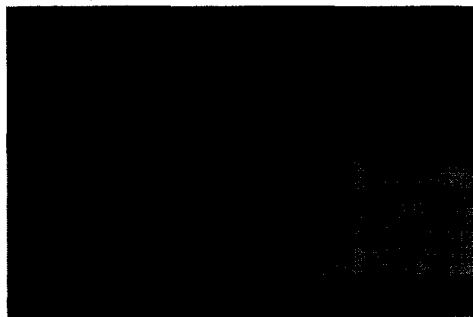
ベ イ モ ミ Fir



ベ イ モ ミ Fir

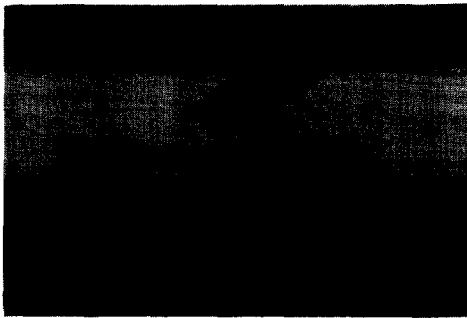


ス ギ Sugi

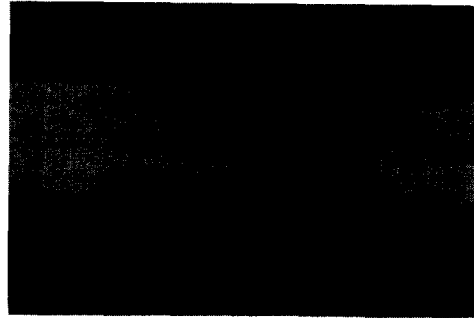


ス ギ Sugi

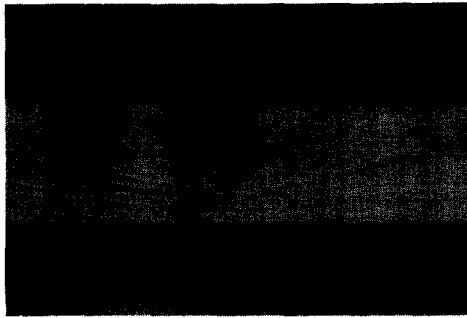
Photo. 7 有節材の引張破断性状
Example of tension failure caused by knot.



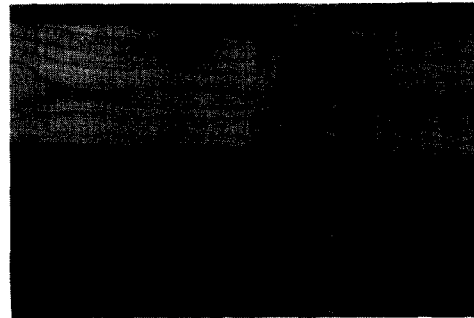
スギ Sugi



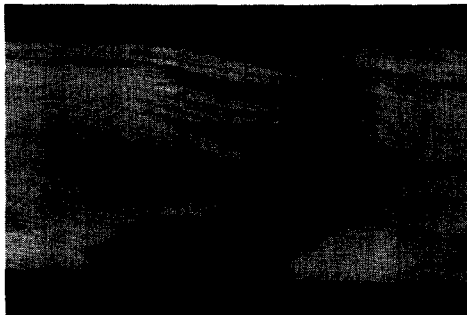
スギ Sugi



スギ Sugi



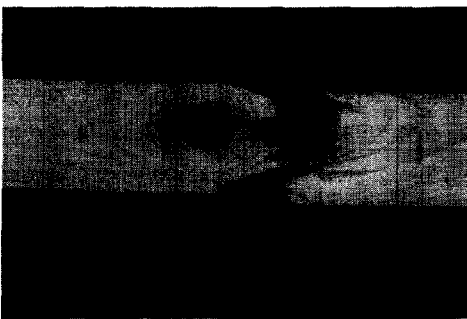
スギ Sugi



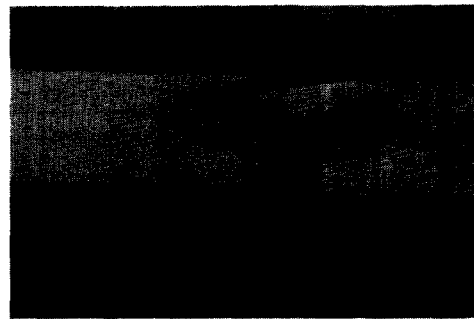
アカマツ Akamatsu



アカマツ Akamatsu



アカマツ Akamatsu



アカマツ Akamatsu

Photo. 7 有節材の引張破断性状
Example of tension failure caused by knot.

Table 2. 有節材の引張試験結果
Results of tension test for knotted lumber.

樹 種	実 大 有 節 材									無 欠 点 小 試 験 体		$\frac{\sigma_t}{\sigma_{t0}}$	$\frac{E_t}{E_{t0}}$	有効断面 面積比	(A)	(B)
	Full size knotted lumber									Small clear specimen						
	No.	厚 さ	幅	長 さ	比 重	節の品質 Knot quality & Knot diameter ϕ	最 大 重 荷	引 張 強 度	引 張 ヤ ン グ 係 数	引 張 強 度	引 張 ヤ ン グ 係 数					
		Thick- ness	Width	Length	Spe- cific gravity at test	Max. load	Ten- sile streng- th	Ten- sile Young's modu- lus	Ten- sile streng- th	Ten- sile Young's modu- lus						
Species	h (cm)	b (cm)	l (cm)	r	P_m (kgf)	σ_t (kgf/cm ²)	E_t ($\frac{10^8}{\text{kgf/cm}^2}$)	σ_{t0} (kgf/cm ²)	E_{t0} ($\frac{10^8}{\text{kgf/cm}^2}$)	(A)	(B)	1- K_{ar} (C)				
H	22-1	1.61	13.0	183.1	0.54	L2.30	8600	412	110.0	1364	139.4	0.302	0.789	0.82	0.37	0.97
	24-1	1.61	13.0	183.1	0.52	L2.85	8400	401	88.2	1351	149.7	0.297	0.589	0.78	0.38	0.75
	27-1	1.60	13.0	183.2	0.54	L3.00	9230	444	122.4	1532	160.3	0.290	0.764	0.77	0.38	0.99
	34-2	1.61	13.0	188.3	0.47	L3.05	6200	296	68.9	1053	117.0	0.281	0.589	0.77	0.36	0.76
	34-1	1.60	13.0	183.1	0.46	L3.10	6100	293	102.9	1053	117.0	0.278	0.879	0.76	0.37	1.16
	36-1	1.60	13.0	183.0	0.59	L3.45	4400	212	80.6	924	85.3	0.229	0.945	0.73	0.31	1.29
	35-1	1.60	13.0	183.2	0.49	L3.90	4100	198	71.9	850	103.2	0.233	0.697	0.70	0.33	1.00
	42-1	1.60	13.0	183.2	0.46	L4.40	3330	160	50.0	895	98.6	0.179	0.507	0.66	0.27	0.77
	44-1	1.61	13.0	183.2	0.50	L5.00	4770	228	40.9	1034	113.4	0.221	0.361	0.73	0.30	0.49
	45-1	1.60	13.0	182.9	0.56	L5.50	3800	183	29.2	856	81.6	0.214	0.358	0.71	0.30	0.50
	44-2	1.60	13.0	182.6	0.50	L5.95	2030	98	43.9	1073	137.8	0.091	0.319	0.54	0.17	0.59
	7-2	1.61	13.0	183.1	0.52	M1.15	13500	646	167.7	1396	150.5	0.463	1.114	0.81	0.57	1.37
	3-1	1.53	13.0	183.0	0.57	M1.85	17520	881	160.9	1704	118.7	0.517	1.356	0.86	0.86	1.58
	2-1	1.62	13.0	183.0	0.53	D1.55	14000	665	148.6	1424	169.4	0.467	0.877	0.88	0.53	1.00
	19-1	1.60	13.0	183.0	0.66	D1.55	11380	547	87.9	1201	101.5	0.455	0.866	0.88	0.52	0.98
	4-1	1.62	13.0	183.1	0.51	D1.85	11950	567	130.4	1471	147.1	0.385	0.886	0.86	0.45	1.03
	16-2	1.60	13.0	183.1	0.50	D2.05	6720	324	95.3	816	101.9	0.397	0.935	0.84	0.47	1.11
	13-1	1.61	13.0	183.0	0.57	D2.35	7950	380	82.6	1171	133.0	0.325	0.621	0.82	0.40	0.76
	7-1	1.61	13.0	183.1	0.52	D2.45	8800	419	148.4	1396	150.5	0.300	0.986	0.81	0.37	1.22
	13-2	1.60	13.0	183.0	0.55	D2.80	8960	431	109.8	1362	150.0	0.316	0.732	0.78	0.40	0.94
12-1	1.60	13.0	183.0	0.62	D3.05	7600	365	112.4	1477	216.7	0.247	0.519	0.77	0.32	0.67	
16-1	1.61	13.0	182.2	0.52	D4.30	3600	172	66.3	816	101.9	0.211	0.651	0.67	0.31	0.97	
F	1-1	1.60	13.0	182.9	0.51	L1.60	9500	457	130.5	1078	135.5	0.424	0.963	0.88	0.48	1.09
	20-1	1.60	13.0	183.2	0.46	L1.95	7680	369	102.6	982	128.7	0.376	0.797	0.85	0.44	0.94
	18-1	1.60	13.0	182.7	0.47	L2.10	11480	552	118.1	1390	139.3	0.397	0.848	0.84	0.47	1.01
	21-1	1.60	13.0	183.2	0.48	L2.15	15050	724	128.2	1489	158.4	0.486	0.809	0.83	0.59	0.98
	23-1	1.60	13.0	183.1	0.48	L2.40	9050	435	69.1	1311	156.0	0.332	0.443	0.82	0.40	0.54
	30-2	1.61	13.0	183.0	0.46	L2.65	6490	310	107.9	984	145.5	0.315	0.742	0.80	0.39	0.93
	29-2	1.60	13.0	183.4	0.45	L2.70	6120	294	110.1	927	114.7	0.317	0.960	0.79	0.40	1.21

Table 2. (つづき) (Continued)

樹 種 No.	実 大 有 節 材 Full size knotted lumber								無 欠 点 小 試 験 体 Small clear specimen		$\frac{\sigma_t}{\sigma_{to}}$	$\frac{E_t}{E_{to}}$	有効断面 面積比 Effective sectional area ratio 1- K_{ar}	(A)	(B)	(C)
	厚 さ Thick- ness h (cm)	幅 Width b (cm)	さ 長 Length l (cm)	比 重 Spe- cific gravi- ty at test r	節の品 質, 節 径 Knot quali- ty & Knot diam- eter ϕ (cm)	最 大 荷 重 Max. load P_m (kgf)	引 張 強 度 Ten- sile strength σ_t (kgf/ cm ²)	引 張 ヤ ン グ 係 数 Ten- sile Young's modu- lus E_t (10 ⁸ kgf/ cm ²)	引 張 強 度 Ten- sile strength σ_{to} (kgf/ cm ²)	引 張 ヤ ン グ 係 数 Ten- sile Young's modu- lus E_{to} (10 ⁸ kgf/ cm ²)						
F 29-1	1.60	13.0	183.1	0.44	L 3.00	6330	305	82.3	1076	126.3	0.283	0.652	0.77	0.37	0.85	
25-1	1.60	13.0	183.0	0.50	L 3.15	9180	441	102.6	1383	140.6	0.319	0.730	0.76	0.42	0.96	
30-1	1.60	13.0	183.2	0.45	L 3.20	8000	385	93.8	1402	146.7	0.275	0.639	0.75	0.37	0.85	
41-1	1.61	13.0	183.2	0.42	L 4.20	4200	201	73.0	1179	136.2	0.170	0.536	0.68	0.25	0.79	
41-2	1.61	13.0	182.7	0.41	L 4.40	3910	187	68.0	1179	136.2	0.159	0.499	0.66	0.24	0.76	
40-1	1.61	13.0	183.2	0.46	L 4.60	2450	118	41.6	782	123.8	0.151	0.336	0.64	0.23	0.52	
11-1	1.60	13.0	183.1	0.40	D 2.80	6800	327	80.2	1000	129.2	0.327	0.621	0.78	0.42	0.80	
15-1	1.60	13.0	183.2	0.46	D 3.70	7500	361	78.0	1176	146.2	0.307	0.534	0.72	0.43	0.74	
C 19-1-2	2.00	9.5	155.2	0.40	L 2.00	5370	284	67.6	634	58.3	0.448	1.160	0.79	0.57	1.47	
4-1-2	2.00	9.6	150.4	0.38	L 2.10	4750	247	65.1	608	70.5	0.406	0.923	0.78	0.52	1.18	
18-1-2	2.00	9.6	150.6	0.36	L 2.25	5720	298	75.4	783	83.1	0.381	0.907	0.77	0.49	1.18	
16-2-2	2.00	10.0	153.4	0.44	L 2.40	7120	356	68.5	775	66.1	0.459	1.036	0.76	0.60	1.36	
7-1-2	2.00	9.5	161.2	0.38	L 3.70	2650	139	43.6	480	53.2	0.290	0.820	0.61	0.47	1.34	
17-1-2	2.00	9.6	136.8	0.39	M 2.25	5260	274	63.0	784	65.8	0.349	0.957	0.77	0.45	1.24	
14-1-2	2.00	9.2	151.9	0.39	D 1.30	3400	185	36.1	382	32.6	0.484	1.107	0.85	0.57	1.30	
16-1-2	2.00	10.0	149.8	0.43	D 1.60	5380	273	65.4	563	56.8	0.485	1.151	0.83	0.58	1.39	
P 10-1-2	2.01	19.0	151.2	0.47	L 3.00	10500	275	71.9	888	100.9	0.310	0.713	0.84	0.37	0.85	
8-1-2	2.00	19.0	151.4	0.51	L 3.90	9730	258	89.7	898	91.9	0.287	0.976	0.79	0.36	1.23	
6-2-1	2.01	19.0	156.4	0.47	M 5.05	12930	342	58.5	1054	104.2	0.324	0.561	0.73	0.44	0.77	
5-2-2	2.00	19.0	154.3	0.53	M 5.10	13080	344	63.2	1298	112.6	0.265	0.561	0.73	0.36	0.77	
5-1-2	2.02	19.0	156.6	0.54	M 6.25	9600	253	72.9	1223	127.0	0.207	0.574	0.67	0.31	0.86	
9-1-2	2.00	19.0	151.9	0.53	D 3.00	18750	497	88.4	1270	122.8	0.391	0.720	0.84	0.46	0.86	
6-2-2	2.00	19.1	151.9	0.49	D 5.50	12500	327	68.9	1154	118.7	0.283	0.580	0.71	0.40	0.82	
4-1-2	2.00	9.2	152.6	0.54	L 3.55	3720	202	74.9	1534	144.1	0.132	0.520	0.61	0.22	0.85	
3-2-2	2.00	9.4	165.6	0.49	M 3.55	4120	221	79.1	1162	112.6	0.190	0.702	0.62	0.31	1.13	
3-1-2	2.00	9.4	166.6	0.50	M 3.60	4920	262	74.8	1452	121.8	0.180	0.614	0.62	0.29	0.99	

樹 種 H : ベイツガ Hemlock
 Species F : ベイモミ Fir
 C : スギ Sugi
 P : アカマツ Akamatsu

L : 生 節 Intergrown knot
 M : 半死節 Partially intergrown knot
 D : 死 節 Dead knot

試験の結果を樹種ごとに生節、死節に分け、節径の大きさの順にならべて示したのが Table 2 である。節を木口面に投影し、その面積が材の横断面に占める割合を節面積比 (K_{ar}) と定義すれば、材の有効断面面積比は $1 - K_{ar}$ と表現できる。無欠点小試験体の JIS Z 2112 に準じて行った試験から求めた基準縦引張強度 σ_{t0} で有節材の縦引張強度 σ_t を割った値 σ_t/σ_{t0} (強度比) と有効断面面積比 ($1 - K_{ar}$) との比である $(\sigma_t/\sigma_{t0})/(1 - K_{ar})$ をみれば、節を断面欠損として引張強度が推定可能かどうか判断できる。

計算の結果は Table 3 に示したとおりで、かなりバラツキの大きいことがわかる。ベイツガの生節で 0.34、死節が 0.42、ベイモミの生節で 0.39、死節で 0.43、スギは生節と死節とでほとんど差がなく全体の平均で 0.53、アカマツは生節と死節の差は認められるが全体で半死節が多くて、それぞれの平均は出しにくい、全体の平均では 0.32 となった。

この数値をみると、節をたんに断面欠損とみなして計算した縦引張強度よりも有節材の実際の縦引張強度はかなり低くて、有効断面面積の 30~60% 程度となり、節の引張強度が 0 となっているほかに II. 1. で検討した節周辺の繊維走向の傾斜と関連していることがうかがえる。すなわち、ベイツガの生節およびアカマツは 0.3 台で繊維走向の乱れの大きいこと、ベイモミはそれよりもやや乱れが小さく、スギでは 0.5 台でかなり乱れの小さい傾向が現れている。さらに生節と死節との間でも差があることは、同じ節径でも繊維走向の乱れの程度が異なることを示している。またスギでは II. 1. の実験でも生節と死節との間で同じ大きさの節周辺の繊維走向の傾斜の程度の差が明確でなかったが、有節材の引張強度にも明らかな差が認められなかった。全体に節径が大きくなるとともに $(\sigma_t/\sigma_{t0})/(1 - K_{ar})$ が低下する傾向のあることも節周辺の繊維走向の傾斜の分布を測定した結果とよく一致している。

Table 3. 実大引張試験 $-(\sigma_t/\sigma_{t0})/(1 - K_{ar}), (E_t/E_{t0})/(1 - K_{ar})$ の総括—

Results of tension test for knotted lumber.

Summary of $(\sigma_t/\sigma_{t0})/(1 - K_{ar}), (E_t/E_{t0})/(1 - K_{ar})$.

樹 種 Species	試験体数 Number of specimen n	節径の範囲 Knot diameter ϕ (cm)	$(\sigma_t/\sigma_{t0})/(1 - K_{ar})$				$(E_t/E_{t0})/(1 - K_{ar})$			
			最 小 Min.	平 均 Mean	最 大 Max.	標準偏差 S.D.	最 小 Min.	平 均 Mean	最 大 Max.	標準偏差 S.D.
ベイツガ Hemlock	L 10	2.30~5.95	0.27	0.34	0.38	0.04				
	D 9	1.15~4.30	0.31	0.42	0.53	0.08				
	全 22	1.15~5.95	0.17	0.40	0.86	0.14	0.49	0.95	1.58	0.28
ベイモミ Fir	L 13	1.60~4.60	0.23	0.39	0.59	0.10				
	D 2	2.80~3.70	0.42	0.43	0.43	0.01				
	全 15	1.60~4.60	0.23	0.39	0.59	0.10	0.52	0.86	1.21	0.19
スギ Sugi	全 8	1.30~3.70	0.45	0.53	0.60	0.06	1.18	1.31	1.47	0.10
アカマツ Akamatsu	全 10	3.00~6.25	0.22	0.32	0.46	0.12	0.77	0.91	1.23	0.16
全 体 Total	55		0.17	0.41	0.86	0.12	0.49	0.87	1.47	0.25

L : 生節 Intergrown knot

D : 死節 Dead knot

全 : 全体 半死節を含む Whole, included partially intergrown knot

節が材幅に対して著しく偏在しているものは概して縦引張強度が小さい傾向がある。このことから試験体断面で応力が平均化されず垂直応力以外の力が生じていることが予想される。このことは、西田⁸³⁾、PETERSON⁸⁴⁾らの1個の偏心円孔を持つ帯板が引張力をうける場合の応力集中の計算例や、筆者が応力塗料を用いて実験した木材に円孔をあけ、円孔が材幅の中心にある場合と偏心している場合とでは円孔の周りのひずみ分布が異なるという結果⁸⁵⁾⁸⁶⁾からみても明らかであり、R. H. KUNESH・J. W. JOHNSONのDouglas-firの有節材の縦引張試験の結果⁸⁾と同様の傾向を示していると考えられる。

引張ヤング係数についても同様の解析を試みているが、樹種、節の品質、節径との間に判別できるほどの差は認め難く、全体で0.49から1.58の間に分散していた。

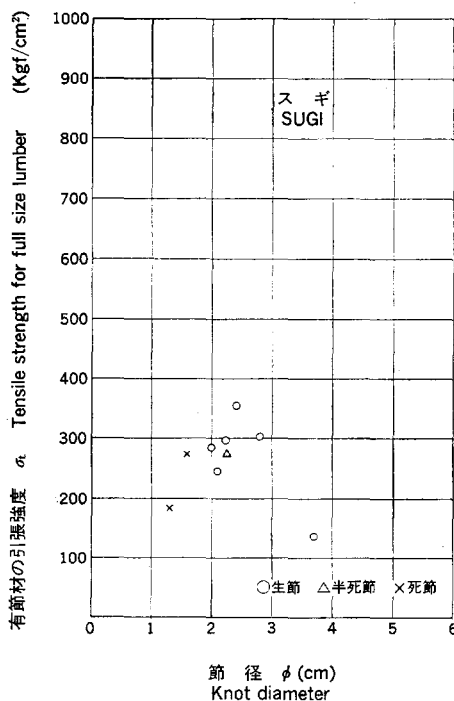
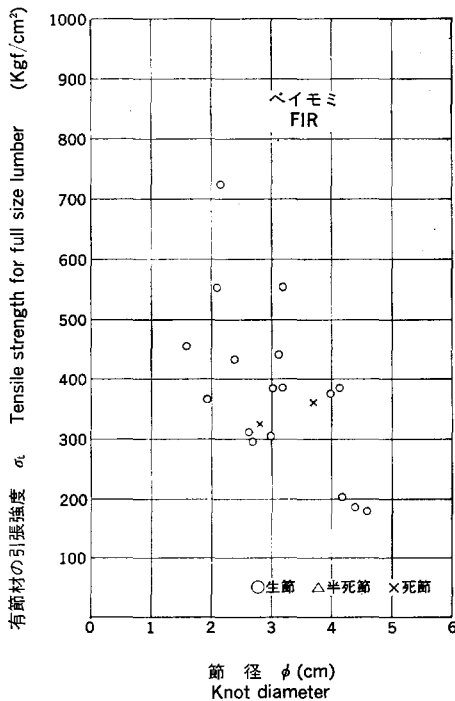
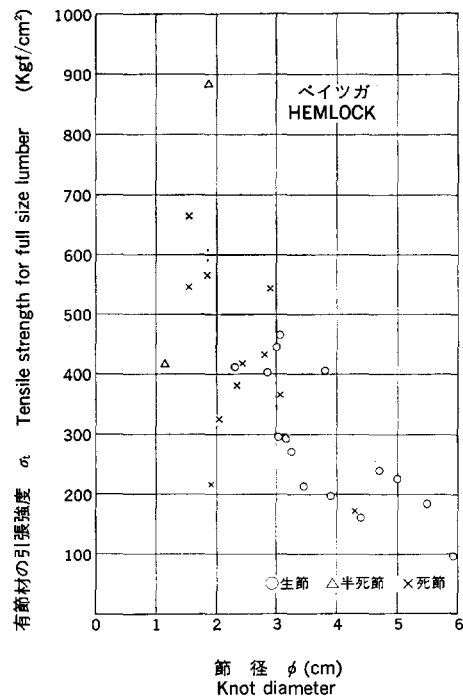


Fig. 23. 節径と引張強度との関係
Relation of tensile strength to knot diameter in full size test.

○: 生節 Intergrown knot, △: 半死節 Partially intergrown knot, ×: 死節, 抜節 Dead knot

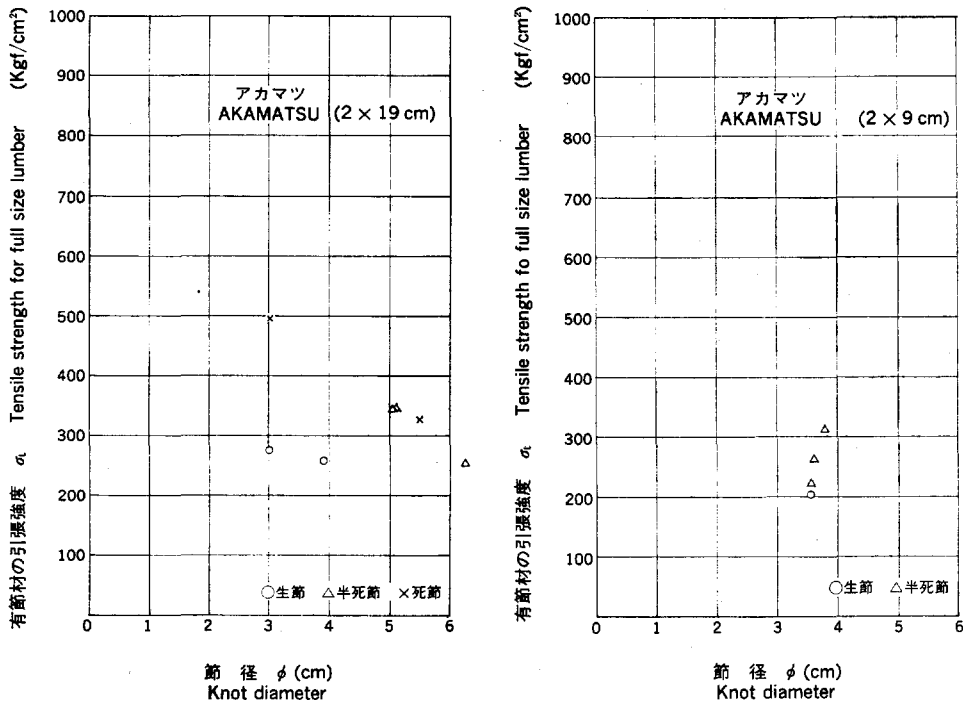


Fig. 23. (つづき) (Continued)

各樹種ごとの節径と引張強度との関係を Fig. 23 に示した。

II. 2. 3. 考 察

有節材の実大縦引張試験の結果から、つぎのことが明らかになった。

- ① 有節材の縦引張強度は節を単に材の横断面の欠損として求められる強度値に比べて、かなり低い値 (30~60%) となり、節のみを断面欠損として推定することはむづかしい。
 - ② 節による縦引張強度の減少の程度は、同じ節径でも、樹種、節の品質によっても異なることが明らかで、このことは II. 1. で考察を行った節周辺における繊維走向の傾斜の分布の相連と強く関連しているものと考えられる。
 - ③ 節を含む 標点距離 20cm 区間の引張ヤング係数と材の引張強度との関係が見出し難く、引張ヤング係数、あるいは材の曲げ剛性から有節材の引張強度を推定する方法は期待できないと考えられる。
- 以上のような結果を基に、つぎに節周辺の繊維走向の傾斜の分布から、有節材の実大引張強度が推定可能か、どうか、その解析方法を検討する。

II. 3. 節周辺における繊維走向傾斜の分布式による有節材の引張強度の推定

II. 1. で求めた、式 (1) — 節周辺における 繊維走向の傾斜 θ の分布式 — に樹種および節の品質に依存する定数 N と、節径 ϕ を入れて試験体の節周辺における θ の分布をきめる。つぎに、式 (3) — 節周辺における θ と引張ヤング係数 E_t の関係式 — に、実験によって求めたその材の基準引張ヤング係数 E_{t0} を入れて節周辺における E_t の分布を求めたのち、式 (2) — 節周辺における θ と引張強度 σ_t との関係式 — に、実験によって求めたその材の基準引張強度 σ_{t0} を入れて、節周辺における各点の最大引張強度を求め

る。

このような手順で求められる節周辺における E_t , σ_t の分布は大體, Fig. 24 のようになる。このような不均一な材料に引張力が作用した場合, 応力集中が生ずることも考えられるが, ここでは応力集中係数を入れずに単純に計算した値を試験で求めた値と比較してみることにする。

いま, Fig. 25 に示すように, X 方向に引張力が働き, 材長 a が Δa だけ伸びたとき, x_1 , x_2 , x_3 , $\dots$, x_n の各層の伸びはそれぞれ等しく, x_1 , x_2 , x_3 , $\dots$, x_n のヤング係数を E_1 , E_2 , E_3 , $\dots$, E_n , 引張応力をそれぞれ σ_1 , σ_2 , σ_3 , $\dots$, σ_n とすれば,

$$\frac{\Delta a}{a} = \varepsilon = \frac{\sigma_1}{E_1} = \frac{\sigma_2}{E_2} = \frac{\sigma_3}{E_3} = \dots = \frac{\sigma_n}{E_n}$$

となる。全引張力 P に対する各層の負担力を p_1 , p_2 , p_3 , $\dots$, p_n とし, それぞれの断面積を A_1 , A_2 , A_3 , $\dots$, A_n とすれば,

$$p_i = \sigma_i A_i$$

となり

$$P = \sum_{i=1}^n p_i$$

となる。

II.2. でも述べたように, 節の部分だけの引張試験を行った結果, 死節はもちろん生節でも引張強度は無視できるほど小さかったので, ここでは節の引張強度は 0 として計算をすすめることにする。

上式において, ε が漸次増大したときの応力を求めて, 式 (2) より求めた各層における最大引張強度と比較してみると, まず節に近い層が最大引張強度を超え, それより外側に向かって順次最大引張強度に達していくことがわかる。このことは有節材の引張破断は節あるいは節に近いところから発生し, 順次外側に向かって進行するということを意味し, しかも破断は連続的に進行することを示している。いいかえれば, まず最初に節あるいは節に近い部分で引張外力に耐えきれずに局部的にでも引張破断が生ずれば, それを出発点にしてかなり急速に破断が伝播していく性状を示しているということになる。このことは実験における引張破断の現象ともよく一致している。無欠点小試験体の引張試験でも, よく前兆もなく突然破壊する。有節材の荷重-伸び線図は

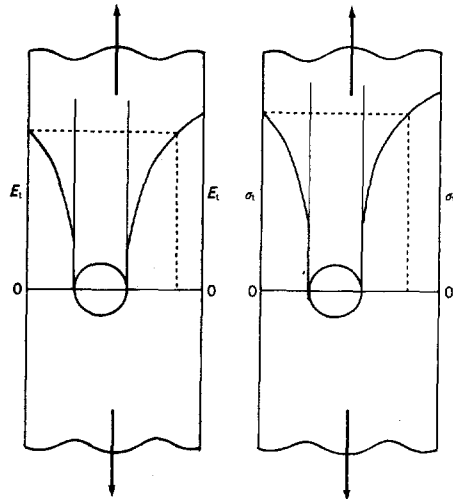


Fig. 24. 有節材における引張ヤング係数および引張応力の分布

Tangential distribution of Young's modulus (E_t) and tensile stresses (σ_t) in knotted lumber.

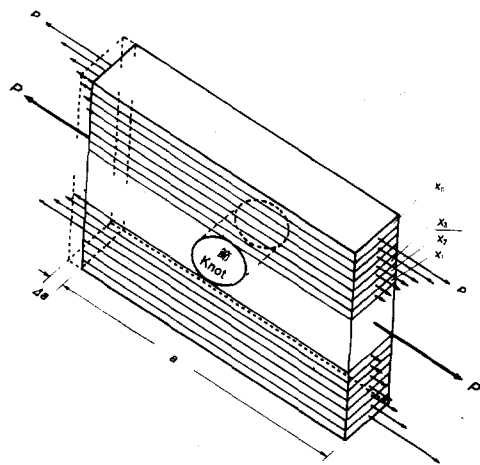


Fig. 25. 有節材の引張による伸びおよび荷重分布

Distribution of elongation and tensile load in knotted lumber.

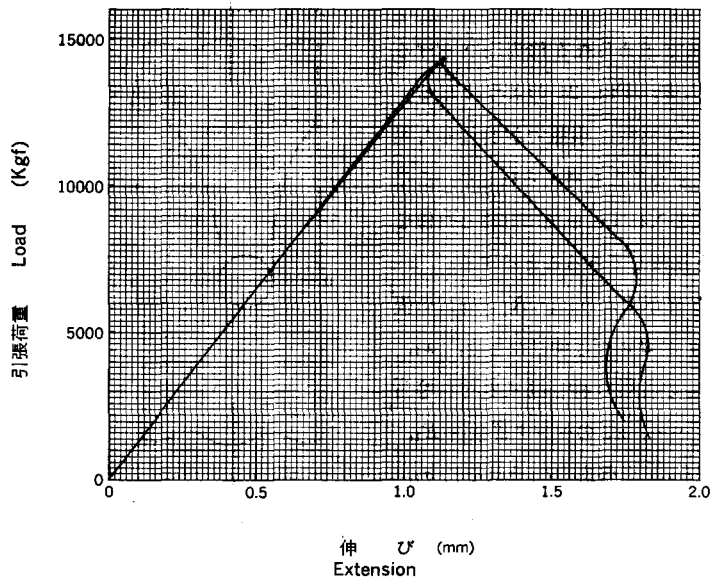


Fig. 26. 有節材の引張荷重-伸び線図

試験体の両面に取付けたひずみ計による二つの引張荷重-伸び線図を示す

Typical load-extension curves for tension test of knotted lumber measured at the both faces of the specimen.

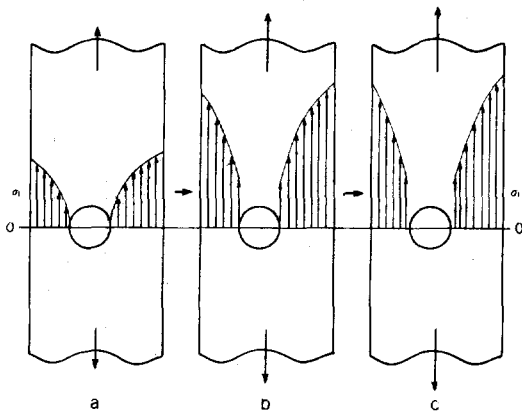


Fig. 27. 有節材の引張応力分布の推移
Stress distribution in a knotted lumber
at increased stress.

Fig. 26 に示したように圧縮試験や曲げ試験とは大いに趣を異にし、ほとんど直線の上昇を続け、曲線部分がほとんどないか、あるいは、あっても極めて少ないまま突然破壊してしまう。このような破壊性状の場合、引張破断が最初にどの部分に発生し、どのように進んだかは肉眼ではほとんど確認できない。そしてこのような破壊性状こそが正常な引張破断であって節から遠い材縁から破断が生じたものは、その部分に何らかの引張強度を弱めるような異常組織または欠点があったか、あるいは引張力が均一でなく、材に大きな曲げの力が作用していた場合に限られる。

ここに提案する実験に基づいて導いた式 (1), (2), (3) を用いて、有節材の引張強度を推定する方法は正常な引張破断とよく一致していて矛盾がないと考えられる。

Fig. 27 に材の引張破断にいたる応力の分布を模式的に示した。a が初期段階、b が節の近くで引張破断寸前の状態を表わしている。b に達したその直後に節に最も近いところが最大引張強度を超えてそのまま材全体の破断に進展するものもあるが、c のように節の近傍は破断するが全体の応力がさらに上昇してから全体破断に移行するものもある。

Table 4. 有節材の引張強度推定の計算例 (Type 1)
 Calculated examples of estimated tensile strength for knotted lumber. (Type 1)
 H 36-1, $h=1.60\text{cm}$, $b=13.0\text{cm}$, $\phi=L$ 3.45cm, $P_{max}=4400\text{kgf}$.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
01	103	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
00	102	104	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
99	101	103	106	0	0	0	0	0	0	0	0	0
98	100	102	105	107	0	0	0	0	0	0	0	0
97	99	102	104	106	109	0	0	0	0	0	0	0
96	99	101	103	106	108	111	0	0	0	0	0	0
96	98	100	102	105	107	110	113	0	0	0	0	0
95	97	99	102	104	107	109	112	115	0	0	0	0
95	97	99	101	104	106	109	111	114	117	0	0	0
94	96	98	101	103	105	108	111	114	117	120	0	0
94	96	98	100	102	105	107	110	113	116	119	123	0
93	95	97	99	102	104	107	110	112	115	119	122	125
93	95	97	99	101	104	106	109	112	115	118	121	125
92	94	96	98	101	103	106	108	111	114	117	121	124
92	94	96	98	100	103	105	108	111	114	117	120	124
91	93	95	98	100	102	105	107	110	113	116	119	123
91	93	95	97	99	102	104	107	110	113	116	119	122
90	92	94	97	99	101	104	106	109	112	115	118	122
90	92	94	96	99	101	103	106	109	112	115	118	121
90	92	94	96	98	100	103	106	108	111	114	117	121
89	91	93	95	98	100	103	105	108	111	114	117	120
89	91	93	95	97	100	102	105	107	110	113	117	120
89	91	93	95	97	99	102	104	107	110	113	116	119
88	90	92	94	97	99	101	104	107	109	112	116	119
88	90	92	94	96	99	101	104	106	109	112	115	119
88	90	92	94	96	98	101	103	106	109	112	115	118
87	89	91	93	96	98	100	103	106	108	111	114	118
87	89	91	93	95	98	100	103	105	108	111	114	117
87	89	91	93	95	97	100	102	105	108	111	114	117
87	88	90	92	95	97	99	102	104	107	110	113	117
86	88	90	92	94	97	99	102	104	107	110	113	116
86	88	90	92	94	96	99	101	104	107	110	113	116
86	88	90	92	94	96	98	101	104	106	109	112	116
85	87	89	91	94	96	98	101	103	106	109	112	115
85	87	89	91	93	95	98	100	103	106	109	112	115
85	87	89	91	93	95	98	100	103	105	108	111	115
85	87	89	91	93	95	97	100	102	105	108	111	114
84	86	88	90	92	95	97	99	102	105	108	111	114
84	86	88	90	92	94	97	99	102	104	107	110	114
84	86	88	90	92	94	96	99	102	104	107	110	113
84	86	88	90	92	94	96	99	101	104	107	110	113
84	85	87	89	91	94	96	98	101	104	107	110	113
83	85	87	89	91	93	96	98	101	103	106	109	112
83	85	87	89	91	93	96	98	100	103	106	109	112
83	85	87	89	91	93	95	98	100	103	106	109	112
83	85	87	89	91	93	95	97	100	103	105	108	112
83	84	86	88	90	93	95	97	100	102	105	108	111
82	84	86	88	90	92	95	97	100	102	105	108	111
82	84	86	88	90	92	94	97	99	102	105	108	111
82	84	86	88	90	92	94	97	99	102	105	107	111
82	84	86	88	90	92	94	96	99	102	104	107	110
82	83	85	87	89	92	94	96	99	101	104	107	110
82	83	85	87	89	91	94	96	98	101	104	107	110
81	83	85	87	89	91	93	96	98	101	104	107	110
81	83	85	87	89	91	93	96	98	101	103	106	109
81	83	85	87	89	91	93	95	98	100	103	106	109
81	83	84	86	88	91	93	95	98	100	103	106	109
81	82	84	86	88	90	93	95	97	100	103	106	109
81	82	84	86	88	90	92	95	97	100	103	105	109
80	82	84	86	88	90	92	95	97	100	102	105	108
80	82	84	86	88	90	92	94	97	99	102	105	108
80	82	84	86	88	90	92	94	97	99	102	105	108
80	82	84	85	87	90	92	94	97	99	102	105	108

80	82	83	85	87	89	92	94	96	99	102	105
80	81	83	85	87	89	91	94	96	99	101	104
80	81	83	85	87	89	91	94	96	99	101	104
79	81	83	85	87	89	91	93	96	98	101	104
79	81	83	85	87	89	91	93	96	98	101	104
79	81	83	85	87	89	91	93	96	98	101	104
79	81	83	84	86	88	91	93	95	98	101	103
79	81	82	84	86	88	91	93	95	98	100	103
79	80	82	84	86	88	90	93	95	98	100	103
79	80	82	84	86	88	90	93	95	97	100	103
78	80	82	84	86	88	90	92	95	97	100	103
78	80	82	84	86	88	90	92	95	97	100	103
78	80	82	84	86	88	90	92	94	97	100	102
78	80	82	83	85	88	90	92	94	97	99	102
78	80	81	83	85	87	90	92	94	97	99	102
78	80	81	83	85	87	89	92	94	97	99	102

101 102 104 105 107 109 110 112 113 115 116 118

各欄は右の方に向って1mmの層が順次破壊していく過程を示している。それぞれの数字はその層の引張強度に対する応力の比を百分率で表している。したがって、0および100以上の数字のところは引張破壊を生じていることを示している。

最後の行には推定した全荷重と実験で求められた最大荷重の比を百分率で示している。

この試験体の推定破壊荷重は実験で求められた最大荷重の101%である。

The column, reading rightward, gives a course of failure by steps of 1 mm, and each cell values gives ratio (%) of tensile strength to stress of those layer. Thus, layers of zero or exceeded 100 mean failure.

The last row gives ratio (%) of calculated total load to experimental maximum load.

Stress ratio of cause entirety failure of this specimen is 101%.

Table 5. 有節材の引張強度推定の計算例 (Type 2)

Calculated examples of estimated tensile strength for knotted lumber. (Type 2)

H 2-1, $h=1.62$ cm, $b=13.0$ cm, $\phi=D1.55$ cm, $P_{m\exp}=14000$ kgf.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
96	98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
95	96	98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
93	95	97	98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
92	93	95	97	99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
91	92	94	96	97	99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
89	91	93	95	96	98	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
88	90	92	93	95	97	99	101	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
88	89	91	93	94	96	98	100	102	0	0	0	0	0	0	0	0	0
87	88	90	92	93	95	97	99	101	103	0	0	0	0	0	0	0	0
86	88	89	91	93	94	96	98	100	102	105	0	0	0	0	0	0	0
85	87	88	90	92	94	95	97	99	102	104	106	0	0	0	0	0	0
85	86	88	89	91	93	95	97	99	101	103	105	108	0	0	0	0	0
84	85	87	89	90	92	94	96	98	100	102	104	107	109	0	0	0	0
83	85	86	88	90	92	93	95	97	99	101	104	106	109	111	0	0	0
83	84	86	87	89	91	93	95	97	99	101	103	105	108	110	113	0	0
82	84	85	87	89	90	92	94	96	98	100	102	105	107	110	112	115	0
82	83	85	86	88	90	92	93	95	97	100	102	104	107	109	112	114	117
81	83	84	86	88	89	91	93	95	97	99	101	103	106	108	111	114	117
81	82	84	85	87	89	91	92	94	96	98	101	103	105	108	110	113	116
80	82	83	85	87	88	90	92	94	96	98	100	102	105	107	110	113	116
80	82	83	85	86	88	90	91	93	95	97	100	102	104	107	109	112	115
80	81	83	84	86	87	89	91	93	95	97	99	101	104	106	109	112	114
79	81	82	84	85	87	89	91	93	95	97	99	101	103	106	108	111	114
79	80	82	83	85	87	88	90	92	94	96	98	101	103	105	108	111	113
79	80	82	83	85	86	88	90	92	94	96	98	100	102	105	107	110	113
78	80	81	83	84	86	88	90	91	93	95	97	100	102	104	107	110	112
78	79	81	82	84	86	87	89	91	93	95	97	99	102	104	107	109	112
78	79	81	82	84	85	87	89	91	93	95	97	99	101	104	106	109	112
77	79	80	82	83	85	87	89	90	92	94	96	99	101	103	106	108	111
77	79	80	82	83	85	86	88	90	92	94	96	98	101	103	105	108	111
77	78	80	81	83	84	86	88	90	92	94	96	98	100	103	105	108	110
77	78	80	81	83	84	86	88	89	91	93	95	98	100	102	105	107	110

76	78	79	81	82	84	86	87	89	91	93	95	97	100	102	104	107	110
76	78	79	81	82	84	85	87	89	91	93	95	97	99	102	104	107	109
76	77	79	80	82	83	85	87	89	91	93	95	97	99	101	104	106	109
76	77	79	80	82	83	85	87	88	90	92	94	96	99	101	104	106	109
76	77	78	80	81	83	85	86	88	90	92	94	96	98	101	103	106	109
75	77	78	80	81	83	84	86	88	90	92	94	96	98	101	103	106	108
75	77	78	79	81	83	84	86	88	90	92	94	96	98	100	103	105	108
75	76	78	79	81	82	84	86	88	89	91	93	95	98	100	102	105	108
75	76	78	79	81	82	84	86	87	89	91	93	95	97	100	102	105	107
75	76	77	79	80	82	84	85	87	89	91	93	95	97	100	102	105	107
75	76	77	79	80	82	83	85	87	89	91	93	95	97	99	102	104	107
74	76	77	79	80	82	83	85	87	89	91	93	95	97	99	102	104	107
74	76	77	78	80	81	83	85	87	89	90	92	94	97	99	101	104	107
74	75	77	78	80	81	83	85	86	88	90	92	94	96	99	101	104	106
74	75	77	78	80	81	83	84	86	88	90	92	94	96	99	101	103	106
74	75	76	78	79	81	83	84	86	88	90	92	94	96	98	101	103	106
74	75	76	78	79	81	82	84	86	88	90	92	94	96	98	101	103	106
73	75	76	78	79	81	82	84	86	88	89	91	94	96	98	100	103	106
73	75	76	78	79	81	82	84	86	87	89	91	93	96	98	100	103	105
73	75	76	77	79	80	82	84	85	87	89	91	93	95	98	100	103	105
73	74	76	77	79	80	82	84	85	87	89	91	93	95	97	100	102	105
73	74	76	77	79	80	82	83	85	87	89	91	93	95	97	100	102	105
73	74	76	77	78	80	82	83	85	87	89	91	93	95	97	100	102	105
73	74	75	77	78	80	81	83	85	87	89	91	93	95	97	99	102	104
73	74	75	77	78	80	81	83	85	87	88	90	92	95	97	99	102	104
72	74	75	77	78	80	81	83	85	86	88	90	92	94	97	99	101	104
72	74	75	76	78	79	81	83	84	86	88	90	92	94	96	99	101	104
72	74	75	76	78	79	81	83	84	86	88	90	92	94	96	99	101	104
72	73	75	76	78	79	81	82	84	86	88	90	92	94	96	99	101	104
72	73	75	76	78	79	81	82	84	86	88	90	92	94	96	98	101	103
72	73	75	76	78	79	81	82	84	86	88	90	92	94	96	98	101	103
72	73	74	76	77	79	80	82	84	86	87	89	91	94	96	98	101	103
72	73	74	76	77	79	80	82	84	85	87	89	91	93	96	98	100	103
72	73	74	76	77	79	80	82	84	85	87	89	91	93	96	98	100	103
72	73	74	76	77	79	80	82	83	85	87	89	91	93	95	98	100	103
71	73	74	76	77	78	80	82	83	85	87	89	91	93	95	98	100	103
71	73	74	75	77	78	80	82	83	85	87	89	91	93	95	98	100	103
71	73	74	75	77	78	80	82	83	85	87	89	91	93	95	97	100	102

90 92 93 94 95 95 96 97 98 99 99 100 101 101 102 102 103 104

各欄は右の方に向って1mmの層が順次破壊していく過程を示している。それぞれの数字はその層の引張強度に対する応力の比を百分率で表わしている。したがって、0および100以上の数字のところは引張破壊を生じていることを示している。

最後の行には推定した全荷重と実験で求められた最大荷重の比を百分率で示している。

この試験体の推定破壊荷重は実験で求められた最大荷重の97%である。

The column, reading rightward, gives a course of failure by steps of 1mm, and each cell values gives ratio (%) of tensile strength to stress of those layer. Thus, layers of zero or exceeded 100 mean failure.

The last row gives ratio (%) of calculated total load to experimental maximum load.

Stress ratio of cause entirety failure of this specimen is 97%.

Table 6. 有節材の引張強度 — 実験値と推定値との比較 —
Results of tension test for knotted lumber.
Comparison of the experimental results with estimated results.

樹 種	実 大 有 節 材 の 実 験 値								無欠点小試験体 Experimental values of small clear specimen		推 定	最大荷重	
	Experimental values of full size knotted lumber												
	No.	厚 さ	幅	長 さ	節の品質 節 径	端 距 Distance from the edge of the lumber to the edge of the knot	最 大 荷 重	引張強度	引張ヤング係数	引張強度	引張ヤング係数		Esti- mated max. load
		Thick- ness	width	Length	Knot quality & Knot diameter	to the edge of the knot	Max. load	Tensile strength	Tensile Young's modulus	Tensile strength	Tensile Young's modulus		$P_{m \text{ est}}$ $P_{m \text{ exp}}$
Species	<i>h</i>	<i>b</i>	<i>l</i>	ϕ dia- meter	<i>f</i> edge of the knot	$P_{m \text{ exp}}$	σ_t	E_t	σ_{t0}	E_{t0}	$P_{m \text{ est}}$		
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(kgf/ cm ²)	(^{10⁸} kgf/ cm ²)	(kgf/ cm ²)	(^{10⁸} kgf/ cm ²)	(kgf)		
H	22-1	1.61	13.0	183.1	L 2.30	4.5	8600	412	110.0	1364	139.4	9030	1.05
	24-1	1.61	13.0	183.1	L 2.85	5.2	8400	401	88.2	1351	149.7	7056	0.84
	27-1	1.60	13.0	183.2	L 3.00	1.5	9230	444	122.4	1532	160.3	8492	0.92
	34-2	1.61	13.0	183.3	L 3.05	2.3	6200	296	68.9	1053	117.0	5518	0.89
	34-1	1.60	13.0	183.1	L 3.10	3.8	6100	293	102.9	1053	117.0	5002	0.82
	36-1	1.60	13.0	183.0	L 3.45	1.4	4400	212	80.6	924	85.3	4356	0.99
	35-1	1.60	13.0	183.2	L 3.90	8.2	4100	198	71.9	850	103.2	3526	0.86
	42-1	1.60	13.0	183.2	L 4.40	4.2	3330	160	50.0	895	98.6	2564	0.77
	44-1	1.61	13.0	183.2	L 5.00	9.5	4770	228	40.9	1034	113.4	4293	0.90
	45-1	1.60	13.0	182.9	L 5.50	9.8	3800	183	29.2	856	81.6	3344	0.88
	44-2	1.60	13.0	182.6	L 5.95	5.4	2030	98	43.9	1073	137.8	2030	1.00
	7-2	1.61	13.0	183.1	M 1.15	1.6	13500	646	167.7	1396	150.5	16065	1.19
	3-1	1.53	13.0	183.0	M 1.85	3.2	17520	881	160.9	1704	118.7	14191	0.81
	2-1	1.62	13.0	183.0	D 1.55	4.0	14000	665	148.6	1424	169.4	13580	0.97
	19-1	1.60	13.0	183.0	D 1.55	5.6	11380	547	87.9	1201	101.5	11152	0.98
	4-1	1.62	13.0	183.1	D 1.85	4.3	11950	567	130.4	1471	147.1	12309	1.03
	16-2	1.60	13.0	183.1	D 2.05	8.4	6720	324	95.3	816	101.9	6518	0.97
	13-1	1.61	13.0	183.0	D 2.35	4.8	7950	380	82.6	1171	133.0	7950	1.00
	7-1	1.61	1.30	183.1	D 2.45	8.1	8800	419	148.4	1396	150.5	9504	1.08
	13-2	1.60	13.0	183.0	D 2.80	3.8	8960	431	109.8	1362	150.0	7974	0.89
	12-1	1.60	13.0	183.0	D 3.05	0.6	7600	365	112.4	1477	216.7	9120	1.20
	16-1	1.61	13.0	183.2	D 4.30	11.5	3600	172	66.3	816	101.9	5400	1.50
F	1-1	1.60	13.0	182.9	L 1.60	4.9	9500	457	130.5	1078	135.5	9880	1.04
	20-1	1.60	13.0	183.2	L 1.95	6.2	7680	369	102.6	982	128.7	7603	0.99
	18-1	1.60	13.0	182.7	L 2.10	2.6	11480	552	118.1	1390	139.3	11021	0.96
	21-1	1.60	13.0	183.2	L 2.15	5.2	15050	724	128.2	1489	158.4	10836	0.72
	23-1	1.60	13.0	183.1	L 2.40	3.3	9050	435	69.1	1311	156.0	8960	0.99
	30-2	1.61	13.0	183.0	L 2.65	3.4	6490	310	107.9	984	145.5	6101	0.94

Table 6. (つづき) (Continued)

樹 種	実 大 有 節 材 の 実 験 値								無欠点小試験体		推 定		
	Experimental values of full size knotted lumber								values of small clear specimen		最大荷重		
	No.	厚 さ	幅	長 さ	節の品質	端 距	最 大	引張強度	引張ヤン	引張強度	引張ヤン	Esti- mated max. load	$\frac{P_{m\ est}}{P_{m\ exp}}$
		Thiek- ness	width	Length	Knot quality & Knot diameter	Distance from the edge of the lumber to the edge of the knot	load	Tensile strength	Tensile Young's modulus		Tensile Young's modulus		
Species	h	b	l	ϕ	f	$P_{m\ exp}$	σ_t	E_t	σ_{t0}	E_{t0}	$P_{m\ est}$		
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(kgf/ cm ²)	($\frac{10^8}{\text{kgf}}\text{cm}^2$)	(kgf/ cm ²)	($\frac{10^8}{\text{kgf}}\text{cm}^2$)	(kgf)		
F	29-2	1.60	13.0	183.4	L2.70	1.2	6120	294	110.1	927	114.7	6181	1.01
	29-1	1.60	13.0	183.1	L3.00	4.4	6330	305	82.3	1076	126.3	5634	0.89
	25-1	1.60	13.0	183.0	L3.15	3.1	9180	441	102.6	1383	140.6	6885	0.75
	30-1	1.60	13.0	183.2	L3.20	4.1	8000	385	93.8	1402	146.7	6800	0.85
	41-1	1.61	13.0	183.2	L4.20	2.7	4200	201	73.0	1179	136.2	4200	1.00
	41-2	1.61	13.0	182.7	L4.40	6.5	3910	187	68.0	1179	136.2	3949	1.01
	40-1	1.61	13.0	183.2	L4.60	6.6	2450	118	41.6	782	123.8	2499	1.02
	11-1	1.60	13.0	183.1	D2.80	2.0	6800	327	80.2	1000	129.2	7004	1.03
	15-1	1.60	13.0	183.2	D3.70	0.3	7500	361	78.0	1176	146.2	6975	0.93
C	19-1-2	2.00	9.5	155.2	L2.00	0.0	5370	284	67.6	634	58.3	5531	1.03
	4-1-2	2.00	9.6	150.4	L2.10	3.5	4750	247	65.1	608	70.5	4133	0.87
	18-1-2	2.00	9.6	150.6	L2.25	5.3	5720	298	75.4	783	83.1	5148	0.90
	16-2-2	2.00	10.0	153.4	L2.40	1.1	7120	356	68.5	775	66.1	5696	0.80
	7-1-2	2.00	9.5	161.2	L3.70	0.0	2650	139	43.6	480	53.2	2571	0.97
	17-1-2	2.00	9.6	136.8	M2.25	2.3	5260	274	63.0	748	65.8	5155	0.98
	14-1-2	2.00	9.2	151.9	D1.30	0.9	3400	185	36.1	382	32.6	3536	1.04
	16-1-2	2.00	10.0	149.8	L1.60	0.3	5380	273	65.4	563	56.8	5649	1.05
P	10-1-2	2.01	19.0	151.2	L3.00	10.7	10500	275	71.9	888	100.9	10290	0.98
	8-1-2	2.00	19.0	151.2	L3.90	1.0	9730	258	89.7	898	91.9	9438	0.97
	6-2-1	2.01	19.0	156.4	M5.05	5.4	12930	342	58.5	1054	104.2	10085	0.78
	5-2-2	2.00	19.0	154.3	M5.10	7.9	13080	344	63.2	1298	112.6	11380	0.87
	5-1-2	2.01	19.0	156.6	M6.25	2.6	9600	253	72.9	1223	127.0	9120	0.95
	9-1-2	2.00	19.0	151.9	D3.00	7.4	18750	497	88.4	1270	122.8	18375	0.98
	6-2-2	2.00	19.1	151.9	D5.50	11.2	12500	327	68.9	1154	118.7	10625	0.85
	4-1-2	2.00	9.2	152.6	L3.55	1.4	3720	202	74.9	1534	144.1	3571	0.96
	3-2-2	2.00	9.4	165.6	M3.55	1.3	4120	221	79.1	1162	112.6	3790	0.92
	3-1-2	2.00	9.4	166.6	M3.60	1.3	4920	262	74.8	1452	121.8	4772	0.97

樹 種 H: ベイツガ Hemlock

L: 生 節 Intergrown knot

Species F: ベイモミ Fir

M: 半死節 Partially intergrown knot

C: スギ Sugi

D: 死 節 Dead knot

P: アカマツ Akamatsu

つぎに実際の計算例を示せば Table 4 および Table 5 のようになる。Table 4 は II.2. で実験したベイツガ No. H 36-1, Table 5 は同じく No. H 2-1 の計算例である。それぞれ節に接する部分から外側に向かって分割層の厚さを 1mm として計算している。節の両側で対称の形になるので狭い方の端距分は共通の計算として使える。表ではこの共通に使える境界のところに一行スペースをおいて区分している。縦にならんでいる数字は同一の伸びひずみの下で生ずる各層の応力の、その層の最大引張強度に対する比を百分率で示したものである。したがって 100% までは破断せずにもちこたえ、101% で破断するものとすれば實際上 100% 以上にはなり得ない値であり、ここで破断した後はその層の応力が 0 になるものとする。式 (1), (2), (3) の性格からもわかるように、材中における最弱の層は節に接しているところで、ここでは $x=0.1$ cm の層である。いま、 $x=0.1$ cm の層が破断すればこの層の応力は 0 となるから $x=0.2$ cm 以降の層で P と釣り合うことになる。その後さらに P が増大するとともに ε も増大し、やがて $x=0.2$ cm の層が破断してこの層の応力もまた 0 になるだろう。この表はこのように P が漸次増大して、厚さ 1mm の層が順次破断していく過程を計算したものである。破断の伝播に 2 つの型があり、Type 1 は Table 4 のように $x=0.1$ cm の層が破断すると同時につぎの層が 100% を超えて破断してしまい、さらにつぎつぎと 100% を超して破壊が進行するようなものである。すなわち、このような Type では $x=0.1$ cm の層が破断したときの状態からあと P は増大しないと考えてよい。つぎに Type 2 は、Table 5 に示すように $x=0.1$ cm の層が最初に破断し、この層が負担していた引張抵抗力の分だけ残っている各層の負担が増すことになるが、そのままの P ではつぎの層の最大引張強度に達せず、 P の増大があつてはじめて破壊が進行するような経過をたどるものである。表の数値から、前の層が破断して応力が 0 になっても、すぐには 100% を超えずさらに P が増大することによってやがて Type 1 に移行していく様子が読みとれる。

これらの表から何層目までの層が破壊したときに全体破壊に進行するかが判断できる。この全体破壊に進行する直前の P を求め (P_{mest})、実験で求められた最大荷重 P_{mexp} との比を百分率であらわし表の最後の行に示している。なお表は $x=0.1$ cm の層が破断したときからの計算を示しているが、試験体によっては、この段階ですでに $x=0.2$ cm の層が 100% を超えているものもある。このようなものは $x=0.1$ cm の層がちょうど 100% のときの P をその材の P_{mest} と判定した。

Table 7. 有節材の引張強度の推定 — P_{mest}/P_{mexp} の総括—Summary of P_{mest}/P_{mexp} .

樹 種 Species	試験体数 Number of specimen <i>n</i>	節径の範囲 Knot diameter ϕ (cm)	最 小 Min.	平 均 Mean	最 大 Max.	標準偏差 S.D.	変動係数 CV (%)
ベ イ ツ ガ Hemlock	22	1.15~5.95	0.77	0.98	1.50	0.16	16.5
ベ イ モ ミ Fir	15	1.60~4.60	0.72	0.94	1.04	0.10	10.6
ス ギ Sugi	8	1.30~3.70	0.80	0.96	1.05	0.09	9.4
ア カ マ ツ Akamatsu	10	3.00~6.25	0.78	0.92	0.98	0.07	7.4
全 体 Total	55		0.72	0.96	1.19	0.12	12.8

以上のような手順で II. 2. で行ったベイツガ、ベイモミ、スギ、アカマツの実大引張試験で求めた最大荷重 P_{mexp} と推定最大荷重 P_{mest} との比を求めた結果を、Table 6 に示した。

少数のものを除けば実験値と推定値はかなりよく一致している。概していえば、節の周辺以外にも圧縮あて材が形成されていた材や、節が極端に偏心していたものはやや適合が悪い。

Table 7 に P_{mest}/P_{mexp} を総括して示す。最小 0.72 から最大 1.19 の範囲であるが、平均 0.96 という値はきわめてよい精度といえることができる。

ここにとり上げた樹種は、針葉樹中からわずか 4 樹種のみではあるが、ベイツガとベイモミが針葉樹の平均的な N 値を示すと考えられ、スギが節周辺における繊維走向の傾斜およびその範囲の最も小さい樹種であり、アカマツのような *Pinus* 属のものは節周辺における繊維走向の傾斜およびその範囲の最も大きい樹種と思われる。したがって、構造用材として使われる針葉樹全体を考慮しても大体とり上げた 4 樹種の N 値の範囲に入ると考えてよい。要するに樹種や節の品質に依存する定数 N 値を割り当てることができて、さらにその材の基準引張強度 σ_{t0} と基準引張ヤング係数 E_{t0} がわかれば、針葉樹実大材の引張強度がかなりよい精度で推定が可能であると結論することができる。

III 節による圧縮強度の低減

節による圧縮強度の低減については、204 材での結果を既に報告している¹²⁾。その報告では、ベイツガ、ベイモミ、スギ、アカマツの他にヒノキ、ソ連カラマツ、エゾマツ、トドマツの 8 樹種について断面 $38\text{ mm} \times 89\text{ mm}$ 、(枠組壁工法構造用製材の日本農林規格の寸法型式 204 材) 材長 2,800 mm の縦圧縮試験を扱っている。実験の結果、節を木口面に投影し、その面積が材の横断面に占める割合を節面積比 (K_{ar}) とすれば、いずれの試験体も材中における最大の節面積比を与える節の近傍で圧縮破壊が認められた。有節材の圧縮強度 σ_c と、その材に接続する無節材の圧縮強度 σ_{c0} との比 (σ_c/σ_{c0}) を圧縮強度比 Y とすれば、ほぼ $Y = 1 - K_{ar}$ の関係が成立することが認められた。この結果はまた、森²⁾が有節材の短柱圧縮試験で得た結果とほぼ同様である。筆者らの行った実験は、実用的見地から、多数個の節を有する実大長さの材で圧縮加力試験を行ったものであるが、細長比が大きいことによる横座屈を抑制しているので、すべて材中における最大節面積比を与える節の近傍で圧縮破壊が生じており、本質的には短柱圧縮試験と考えてよい。

これから述べる実験は、まず節そのものの圧縮強度および節周辺における繊維走向の傾斜との関連で節周辺の圧縮強度の分布を明らかにし、つぎに有節材の実大圧縮試験を行うとともに、II. 1. 2. 3) で求めた節周辺における繊維走向の傾斜の分布式を用いて有節材の圧縮強度の推定計算を試み、その適合性について検討したものである。

III. 1. 節の圧縮強度および節周辺における圧縮強度の分布

節の圧縮強度および節周辺の圧縮強度の分布を明らかにするために、正板目の板から、節の部分の短柱圧縮試験体を取り、さらに節の左右両側から解析用短柱試験体を連続して数個ずつとって、圧縮試験を行った。II. 1. で行った引張試験とは異なり圧縮試験体は細長比の関係から極端に小さな断面にすることができず、引張解析の場合のように細分することは難しい。一方また、短柱解析試験体は、圧縮破壊が生ずる場所をできるだけ確に予想するとともに、その位置が試験体の中央になるように木取る必要がある。そこでまず III. 2. の実験を先に行い、その結果生じた圧縮破損線 (compression failure line) を木

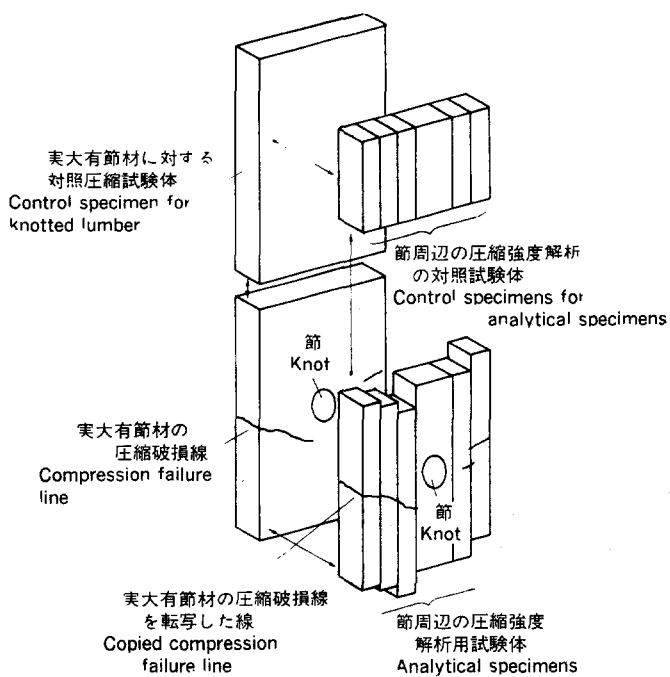


Fig. 28. 節周辺の圧縮強度解析用試験体の木取り
Sampling of compression test specimens from knotted board.

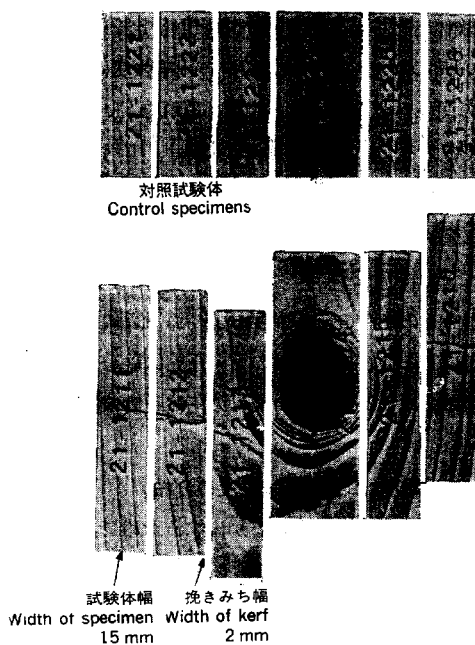


Fig. 29. 節周辺の圧縮強度解析用試験体の木取り例
An example of compression test specimens.

取りの前にこの試験に用いる試料原板の上に転写しておき、実験の精度を向上させるように配慮した。

なお、この実験では節の周りの厳密な密度の分布は測定していないが、各解析試験体の容積重を求め密度の分布の目安を得た。

III.1.1. 実験材料および実験方法

1) 実験材料

実験に供した材は、ベイツガ、ベイモミ、スギ、アカマツの4樹種でIIの引張試験に用いた原木と同じものである。ベイツガおよびベイモミについては Fig. 28 に示すように正板目の206材の厚さを二つ割りにし、ここで得られた同じ節をもつ二枚の板の一方をIII.2.の実験に用い、他の一枚をこの実験の試料原板とした。なお、ここで二分した髓に近い方の板と樹皮に近い方の板との選択は特に行わなかった。

節周辺における圧縮強度の最弱部分の位置を予想するためにIII.2.の実大圧縮試験の結果生じた圧縮破損線をこの実験に用いる試料原板の上に転写し、この圧縮破損線がほぼ中央に位置するようにして、長さ8cm、厚さ1.6cm、幅1.5cmの解析用試験体を作成した。なお、節を含む試験体は、Fig. 29 に示すように節の両側に約0.5cmの材を残すように木取った。各試験体は、それぞれ端から末尾番号1～7を付してある。また、これと対称に基準強度値を求めるために、Fig. 28 のように解析用試験体と同じ断面積で長さ5cmの対照試験体を木取った。

スギおよびアカマツの解析試験体はIII.2.の実験に用いた原板とは別の原板を用いたので圧縮破損線の転写は行っていないが、ベイツガおよびベイモミとはほぼ同様の手順によって木取った。なお、スギのみは試験体の断面を2.0cm×2.0cmとした。

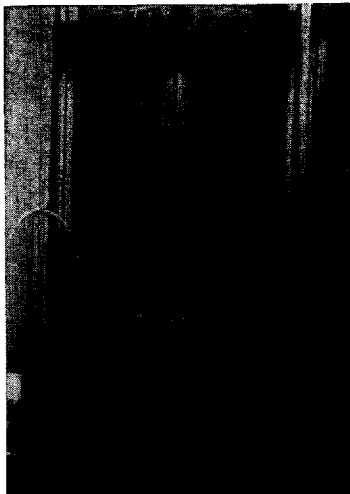


Photo. 8 試験体に取り付けた
縮み計

Compressometer assembly
mounted in position on
specimen.

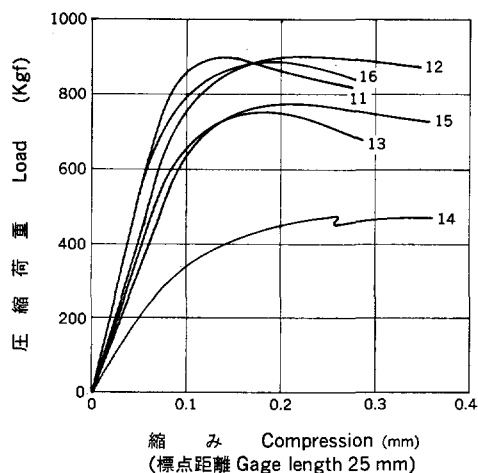


Fig. 30. 節周辺材の圧縮試験における荷重-縮み線図
Load-compression diagram for lumber in
passing around knot.

(例) ベイモミ (F 15-1) 抜節 ϕ 2.85cm
(Example) Fir Knot hole

11→12→13→14→15→16

14: 抜節を含む with knot hole

Table 8. 有節材の圧縮解析試験結果
Results of analytical compression test

樹 種 Species	No.	対 照 試 験 体 Control specimen			節 周 辺 の 解 析 試 験 体 Analytical compression test specimen								$\frac{r}{r_0}$	$\frac{\sigma_c}{\sigma_{c0}}$	$\frac{\sigma_{cw}}{\sigma_{c0}}$	
		比 重 Spec- ific gravi- ty at test r_0	最 荷 Max. load P_{m0} (kgf)	大 重 Crush- ing strength σ_{c0} (kgf/cm ²)	節の品 質, 節 径 Kont quali- ty & Knot diam- eter ϕ (cm)	材幅一 節 節 径 Width of Speci- men — Knot diam- eter b' (cm)	比 重 Spec- ific gravi- ty at test r	最 荷 Max. load P_m (kgf)	圧 縮 強 度 Crushing strength		中央織 維傾斜 角 Grain angle at the mid- dle of speci- men θ (deg)					
									σ_c (kgf/cm ²)	σ_{cw} (kgf/cm ²)						
(ベ イ ツ ガ Hemlock)																
H 62-1	1	0.56	1252	527	L 1.90	1.04	0.57	1272	532	903	4.0	1.02	1.01	1.77		
	2	0.59	1444	613			0.60	1380	577		5.7	1.02	0.94			
	3	0.55	1293	540			0.58	1429	593		8.8	1.05	1.10			
	4	0.53	1255	527			0.59	1115	469		15.3	1.11	0.89			
	5	0.52	2413	512			0.74	1522	319			1.42				
	6	0.50	1050 8707	437			0.59	1092 7810	455		15.3	1.18	1.04			
H 47-1	1	0.41	990	405	L 2.45	0.42	0.44	858	355	1566	12.1	1.07	0.88	3.91		
	2	0.40	930	390			0.51	637	273		22.6	1.28	0.70			
	3	0.42	1830	401			0.71	1050	230			1.69				
	4	0.39	865	357			0.45	590	247		22.6	1.15	0.69			
	5	0.42	965	400			0.43	825	343		12.1	1.02	0.86			
	6	0.44	1031 6611	424			0.42	886 4846	365		8.2	0.95	0.86			
H 27-1	1	0.54	1252	506	L 2.48	0.52	0.55	1238	504	1194	8.3	1.02	1.00	2.52		
	2	0.51	1149	469			0.54	1145	472		12.2	1.06	1.01			
	3	0.52	1165	473			0.66	999	416		22.8	1.27	0.88			
	4	0.53	2300	473			0.83	998	208			1.57				
	5	0.56	1234	514			0.65	1015	425		22.8	1.16	0.83			
	6	0.56	1305 8405	535			0.58	1202 6597	496		12.2	1.04	0.93			
H 60-2	1	0.48	1080	469	L 2.60	0.49	0.53	992	433	2171	12.8	1.10	0.92	4.93		
	2	0.50	1070	443			0.60	975	402		23.8	1.20	0.91			
	3	0.49	2185	440			0.89	1685	342			1.82				
	4	0.47	1002	417			0.59	725	309		23.8	1.26	0.74			
	5	0.48	925	386			0.49	850	352		12.8	1.02	0.91			
	6	0.48	995 7257	410			0.49	944 6171	393		8.9	1.02	0.96			
H 36-2	1	0.54	1103	500	L 3.05	0.79	0.53	1052	459	1573	10.4	0.98	0.92	3.54		
	2	0.50	1140	467			0.56	908	372		14.6	1.12	0.80			
	3	0.47	1060	433			0.64	1015	416		25.2	1.36	0.96			
	4	0.50	2807	444			0.91	2022	327			1.82				
	5	0.52	1040	421			0.58	945	383		25.2	1.12	0.91			
	6	0.56	1166 8316	478			0.57	937 6869	383		14.6	1.02	0.90			
H 36-1	1	0.51	1166	467	L 3.70	0.73	0.66	982	404	1001	30.7	1.29	0.87	2.27		
	2	0.49	3138	441			0.92	1186	116			1.88				
	3	0.49	1087	443			0.67	913	376		30.7	1.37	0.85			
	4	0.54	1250	512			0.58	962	395		18.1	1.07	0.77			
	5	0.57	1305 7946	536			0.57	1127 5170	460		13.2	1.00	0.86			
H 9-2	1	0.44	1701	348	M 2.40	0.66	0.74	665	135	628		1.68		1.81		

L : 生 節 Intergrown knot

M : 半死節 Partially intergrown knot

D : 死 節 Dead knot

K : 抜 節 Knot hole

* 材幅寸法を b' として求めた圧縮強度

When width of specimen take the value b'

Table 8. (つづき) (Continued)

樹 種 Species	No.	対 照 試 験 体 Control specimen			節 周 辺 の 解 析 試 験 体 Analytical compression test specimen								$\frac{r}{r_0}$	$\frac{\sigma_c}{\sigma_{c0}}$	$\frac{\sigma_{cw}}{\sigma_{c0}}$
		比 重 Spec- ific gravi- ty at test r_0	最 荷 Max. load P_{m0} (kgf)	大 重 Crush- ing strength σ_{c0} (kgf/ cm ²)	節の品質、 節 径 Kont quali- ty & Knot diam- eter ϕ (cm)	材幅、 節 径 Width of Speci- men — Knot diam- eter b' (cm)	比 重 Spec- ific gravi- ty at test r	最 荷 Max. load P_m (kgf)	圧 縮 強 度 Crushing strength		中央繊維傾斜 角 at the mid- dle of speci- men θ (deg)				
									σ_c (kgf/ cm ²)	σ_{cw}^* (kgf/ cm ²)					
H 9-2	2	0.47	851	354			0.48	433	184			1.02	0.52		
	3	0.45	841	350			0.44	657	272			0.98	0.78		
	4	0.46	835	348			0.53	734	304			0.93	0.87		
	5	0.43	881	367			0.43	825	341			1.00	0.93		
	6	0.45	919	380			0.44	851	354			0.98	0.93		
			6028					4165							
H 12-3	2	0.60	1432	577			0.60	1365	551			0.5	1.00	0.96	
	3	0.59	1493	603			0.61	1380	559			3.6	1.03	0.93	
	4	0.60	998	599	D0.40	0.63	0.74	760	457	745		1.23		1.26	
	5	0.61	1585	643			0.61	1414	583			3.6	1.00	0.91	
	6	0.62	1545	629			0.63	1422	586			0.5	1.02	0.93	
			7053					6341							
H 3-1	1	0.58	1245	522			0.72	675	279			9.8	1.24	0.53	
	2	0.58	2163	539	D1.30	1.27	0.77	955	233	471		1.33		0.88	
	3	0.58	1285	535			0.61	1121	472			9.8	1.05	0.88	
	4	0.57	1254	528			0.60	1268	523			5.0	1.05	0.99	
	5	0.57	1272	528			0.57	1222	506			3.0	1.00	0.96	
	6	0.58	1268	527			0.58	1240	509			1.8	1.00	0.97	
	7	0.57	1297	529			0.59	1320	533			1.0	1.04	1.01	
			9784					7801							
H 12-1	1	0.58	1200	489			0.59	1280	518			7.7	1.02	1.06	
	2	0.58	1270	523			0.62	1180	482			14.5	1.07	0.92	
	3	0.58	2136	516	K1.80	0.81	0.72	700	166	536		1.24		1.04	
	4	0.59	1297	529			0.62	1253	517			14.5	1.05	0.98	
	5	0.56	1306	532			0.60	1395	569			7.7	1.07	1.07	
	6	0.59	1310	532			0.61	1398	571			5.0	1.03	1.07	
			8519					7206							
H 17-2	1	0.55	1161	477			0.57	1110	461			7.9	1.04	0.97	
	2	0.55	1185	490			0.62	1100	463			14.9	1.13	0.95	
	3	0.52	1927	446	K1.85	0.89	0.70	656	153	472		1.35		1.06	
	4	0.51	1000	419			0.60	1008	423			14.9	1.18	1.01	
	5	0.51	970	406			0.54	992	415			7.9	1.06	1.02	
	6	0.54	1045	435			0.52	1032	428			5.2	0.96	0.98	
			7288					5898							
H 9-1	1	0.41	805	327			0.46	650	266			16.8	1.12	0.81	
	2	0.45	1352	323	K2.00	0.65	0.66	450	106	435		1.46		1.35	
	3	0.42	710	294			0.47	730	307			16.8	1.12	1.04	
	4	0.43	770	315			0.44	770	318			8.8	1.02	1.01	
	5	0.44	830	343			0.44	862	355			5.8	1.00	1.04	
	6	0.43	840	344			0.42	875	359			4.1	0.98	1.04	
			5807					4337							
H 8-1	1	0.54	2940	497	K2.85	0.82	0.69	575	97	437		1.28		0.88	
	2	0.55	1288	533			0.63	962	403			21.8	1.15	0.76	
	3	0.54	1295	536			0.57	1140	471			12.4	1.06	0.88	
	4	0.55	1280	532			0.55	1250	512			8.6	1.00	1.00	
	5	0.54	1270	518			0.54	1137	467			6.5	1.00	0.90	
	6	0.54	1153	496			0.53	1070	469			5.1	0.98	0.95	
			9226					6134							
H 59-1	1	0.49	870	359			0.53	630	264			30.1	1.08	0.74	
	2	0.51	2675	373	K3.80	0.66	0.71	620	86	576		1.40		1.67	

Table 8. (つづき) (Continued)

樹 種 Species	No.	対 照 試 験 体 Control specimen			節 周 辺 の 解 析 試 験 体 Analytical compression test specimen										$\frac{r}{r_0}$	$\frac{\sigma_c}{\sigma_{c0}}$	$\frac{\sigma_{cw}}{\sigma_{c0}}$
		比 重 Spe- cific gravi- ty at test r_0	最 大 荷 重 Max. load P_{m0} (kgf)	圧 縮 強 度 Crush- ing strength σ_{c0} (kgf/cm ²)	節の品質 節質, 節 Kont quali- ty & Knot diam- eter ϕ (cm)	材幅 節径 Width of Speci- men — Knot diam- eter b' (cm)	比 重 Spe- cific gravi- ty at test r	最 大 荷 重 Max. load P_m (kgf)	圧 縮 強 度 Crushing strength		中央繊維傾斜 Crain angle at the mid- dle of speci- men θ (deg)						
									σ_c (kgf/cm ²)	σ_{cw}^* (kgf/cm ²)							
H 51-1	3	0.43	2485	336	K4.00	0.59	0.62	520	70	546		1.45			1.63		
	4	0.42	780	324			0.49	411	170		31.6	1.17	0.53				
	5	0.42	822 5746	331			0.45	660 2896	267		18.2	1.07	0.81				
H 59-2	1	0.52	902	368			0.52	685	282		21.9	1.00	0.77				
	2	0.56	975	400			0.70	627	266		38.8	1.25	0.67				
	3	0.49	3025	368	K4.65	0.42	0.70	482	59	709		1.43			1.93		
	4	0.46	845	342			0.57	620	256		38.8	1.24	0.75				
	5	0.48	865 6612	353			0.53	727 3141	298		21.9	1.10	0.84				
(ベ イ モ ミ Fir)																	
F 21-1	1	0.46	1035	425			0.47	1014	417		6.3	1.02	0.98				
	2	0.46	1018	420			0.49	1031	427		9.5	1.07	1.02				
	3	0.47	1035	430			0.54	901	374		18.5	1.15	0.87				
	4	0.46	1724	424	L2.10	0.49	0.73	1150	276	1456		1.59			3.43		
	5	0.46	1030	421			0.52	939	383		18.5	1.13	0.91				
	6	0.46	992 6834	408			0.46	930 5965	383		9.5	1.00	0.94				
H 21-3	1	0.48	1098	446			0.53	1055	428		18.2	1.10	0.96				
	2	0.47	1848	430	L2.20	0.51	0.72	1327	304	1622		1.53			3.77		
	3	0.43	927	380			0.49	760	315		18.2	1.14	0.83				
	4	0.44	936	389			0.44	835	343		9.7	1.00	0.88				
	5	0.47	1000	414			0.45	916	375		6.5	0.96	0.91				
	6	0.47	1050 6859	433			0.48	1022 5915	420		4.7	1.02	0.97				
F 28-2	1	0.44	867	350			0.47	630	254		14.2	1.07	0.73				
	2	0.43	855	352			0.51	555	231		24.7	1.19	0.66				
	3	0.42	2350	353	L3.25	0.86	0.86	1610	245	1168		2.05			3.31		
	4	0.42	875	357			0.48	786	323		24.7	1.14	0.91				
	5	0.42	872	357			0.44	730	300		14.2	1.05	0.84				
	6	0.42	818 6637	356			0.44	667 4978	291		10.1	1.05	0.82				
F 39-2	1	0.41	907	371			0.42	879	358		16.6	1.02	0.97				
	2	0.40	850	350			0.45	685	286		30.0	1.13	0.82				
	3	0.41	2344	369	L3.60	0.33	0.83	1655	259	3120		2.02			8.45		
	4	0.43	917	375			0.50	785	324		30.0	1.16	0.86				
	5	0.50	1009 6027	409			0.53	986 4990	401		16.6	1.06	0.98				
F 15-1	1	0.45	905	367			0.48	920	375		6.7	1.07	1.02				
	2	0.46	929	379			0.52	910	372		9.9	1.13	0.98				
	3	0.46	940	386			0.53	756	317		17.7	1.15	0.85				
	4	0.53	2270	377	K2.85	0.93	0.62	485	81	328		1.44			0.87		
	5	0.42	900	368			0.47	778	321		17.7	1.12	0.87				
	6	0.44	965 6909	388			0.46	895 4744	363		9.9	1.05	0.94				
F 37-1	1	0.43	871	359			0.48	680	284		21.7	1.12	0.79				
	2	0.43	2278	362	K3.28	0.62	0.62	360	57	358		1.42			0.99		
	3	0.46	960	394			0.49	850	354		21.7	1.07	0.90				

Table 8. (つづき) (Continued)

樹 種 Species	No.	対 照 試 験 体 Control specimen			節 周 辺 の 解 析 試 験 体 Analytical compression test specimen							$\frac{r}{r_0}$	$\frac{\sigma_c}{\sigma_{c0}}$	$\frac{\sigma_{cw}}{\sigma_{c0}}$
		比 重 Spe- cific gravi- ty at test r_0	最 荷 Max. load P_{m0} (kgf)	大 重 Crush- ing strength σ_{c0} (kgf/ cm ²)	節の品 質、節 径 Kont quali- ty & Knot diam- eter ϕ (cm)	材幅、 節 径 Width of Speci- men — Knot diam- eter b' (cm)	比 重 Spe- cific gravi- ty at test r	最 荷 Max. load P_m (kgf)	圧 縮 強 度 Crushing strength		中央繊維傾斜 angle at the mid- dle of speci- men θ (deg)			
									σ_c (kgf/ cm ²)	σ_{cw} (kgf/ cm ²)				
F 37-1	4 5	0.45 0.44	900 906 5915	368 369			0.47 0.46	893 887 3670	363 362		11.8 8.1	1.04 1.05	0.99 0.98	
(ス ギ Sugi)														
C16-2-3	2 3 4 5 6	0.44 0.39 0.38 0.38 0.37	1695 1462 1427 1450 1430 7464	423 352 344 360 355	L 1.15	0.91	0.45 0.40 0.50 0.39 0.37	1725 1367 1172 1425 1460 7149	431 340 285 354 365	644	2.3 6.4 1.32 6.4 2.3	1.02 1.03 1.32 1.03 1.00	1.02 0.97 0.98 0.98 1.03	1.87
C15-4-1	2 3 4 5 6	0.42 0.37 0.38 0.38 0.41	1608 1360 1645 1367 1547 7527	396 336 338 339 383	L 1.28	1.14	0.41 0.38 0.54 0.38 0.40	1605 1374 1328 1365 1528 7200	398 339 273 337 377	580	2.6 6.6 1.42 6.6 2.6	0.97 1.03 1.42 1.00 0.97	1.01 1.01 0.99 0.99 0.98	1.72
C16-2-1	2 3 4 5 6	0.44 0.41 0.37 0.38 0.38	1695 1561 1600 1491 1474 7821	423 391 334 371 370	L 1.28	1.12	0.43 0.42 0.51 0.39 0.38	1652 1560 1100 1465 1482 7259	411 388 228 362 375	487	2.6 6.6 1.38 6.6 2.6	0.98 1.02 1.38 1.03 1.00	0.97 0.99 0.98 0.98 0.99	1.46
C11-3-1	2 3 4 5 6	0.36 0.36 0.36 0.36 0.37	1190 1200 1355 1192 1237 6174	294 296 272 295 305	L 1.30	1.17	0.36 0.39 0.53 0.37 0.36	1210 1223 1175 1197 1200 6005	299 302 236 296 296	498	2.6 6.7 1.47 6.7 2.6	1.00 1.08 1.47 1.03 0.97	1.02 1.02 0.99 1.00 0.97	1.83
C15-3-3	1 2 3 4 5 6 7	0.37 0.38 0.42 0.42 0.42 0.40 0.39	1350 1397 1505 2070 1628 1532 1399 10881	333 346 372 387 402 378 345	L 1.43	1.22	0.38 0.37 0.41 0.57 0.43 0.41 0.36	1358 1371 1524 1585 1616 1564 1403 10421	338 339 376 297 399 387 345	643	1.2 2.9 7.2 1.36 7.2 2.9 1.2	1.03 0.97 0.97 1.36 1.03 1.03 0.92	1.02 0.98 1.01 0.99 1.02 1.02 1.00	1.66
C16-1-3	2 3 4 5 6	0.35 0.38 0.43 0.44 0.40	1375 1480 2202 1685 1500 8242	342 366 395 417 371	L 1.58	1.22	0.36 0.42 0.60 0.45 0.38	1390 1500 1495 1670 1465 7520	343 371 266 411 362	610	3.3 7.7 1.40 7.7 3.3	1.03 1.11 1.40 1.02 0.95	1.00 1.01 0.99 0.99 0.98	1.54
C11-1-1	1 2 3 4 5 6	0.37 0.38 0.39 0.35 0.35 0.37	1177 1219 1250 1782 1095 1187	288 276 309 264 270 294	L 1.98	1.37	0.41 0.42 0.43 0.62 0.39 0.38	1205 1167 1175 1575 1097 1241	297 289 292 234 270 306	571	2.0 3.9 8.6 1.77 8.6 3.9	1.11 1.11 1.10 1.77 1.11 1.03	1.03 1.05 0.95 1.00 1.00 1.04	2.16

Table 8. (つづき) (Continued)

樹種 Species	No.	対照試験体 Control specimen			節周辺の解析試験体 Analytical compression test specimen								$\frac{r}{r_0}$	$\frac{\sigma_c}{\sigma_{c0}}$	$\frac{\sigma_{cw}}{\sigma_{c0}}$
		比重 Specific gravity at test r_0	最荷 Max. load P_{m0} (kgf)	大重 Crush- ing strength σ_{c0} (kgf/cm ²)	節の品質、 節径 Kont quality & Knot diam- eter ϕ (cm)	材幅、 節径 Width of Specimen — Knot diam- eter b' (cm)	比重 Specific gravity at test r	最荷 Max. load P_m (kgf)	圧縮強度 Crushing strength		中央繊維傾斜 Grain angle at the mid- del of specimen θ (deg)				
									σ_c	σ_{cw}^*					
C11-1-1	7	0.38	1262 8972	312			0.38	1267 8729	313		2.0	1.00	1.00		
C11-2-1	3	0.38	1290	318	L 2.05	1.28	0.41	1257	310	532	9.2	1.08	0.98	2.22	
	4	0.36	1600	240			0.61	1367	204		1.69				
	5	0.36	1125	278			0.39	1080	266		9.2	1.08	0.96		
	6	0.39	1262 5277	312			0.38	1242 4946	307		4.2	0.97	0.98		
C15-3-1	1	0.38	1354	335	L 2.30	1.22	0.37	1350	315	774	2.5	0.97	0.94	2.49	
	2	0.39	1497	369			0.38	1458	360		4.6	0.97	0.98		
	3	0.40	1490	368			0.42	1532	379		9.8	1.05	1.03		
	4	0.41	2204	311			0.68	1890	268		1.66				
	5	0.40	1554	383			0.41	1505	371		9.8	1.03	0.97		
	6	0.39	1445	357			0.40	1478	365		4.6	1.03	1.02		
	7	0.40	1380 10924	340			0.40	1477 10690	363		2.5	1.00	1.07		
C12-3-1	1	0.37	1239	320	L 2.35	1.22	0.37	1312	325	637	2.5	1.00	1.01	1.66	
	2	0.36	1185	293			0.40	1260	310		4.6	1.11	1.06		
	3	0.37	1249	303			0.43	1268	312		10.0	1.16	1.03		
	4	0.40	1993	385			0.67	1565	218		1.34				
	5	0.38	1216	299			0.50	1293	319		10.0	1.32	1.07		
	6	0.37	1170	288			0.40	1162	287		4.6	1.08	1.00		
	7	0.39	1147 9253	282			0.41	1190 9050	294		2.5	1.05	1.04		
C13-1-1	1	0.37	1228	302	L 2.93	1.10	0.38	1126	279	780	3.1	1.03	0.92	2.71	
	2	0.39	1350	333			0.40	1197	299		5.4	1.03	0.90		
	3	0.38	1216	301			0.47	1258	311		11.3	1.24	1.03		
	4	0.38	2327	288			0.70	1725	213		1.84				
	5	0.38	1725	316			0.42	1240	307		11.3	1.11	0.97		
	6	0.39	1335	330			0.39	1317	324		5.4	1.00	0.98		
	7	0.39	1288 10019	318			0.38	1300 9163	320		3.1	0.97	1.01		
C13-3-1	2	0.37	1270	314	M1.35	1.15	0.38	1234	307	395	2.7	1.03	0.98	1.51	
	3	0.37	1230	304			0.42	1270	315		6.9	1.14	1.04		
	4	0.35	1315	261			0.52	915	182		1.49				
	5	0.35	1110	274			0.36	1100	271		6.9	1.03	0.99		
	6	0.38	1210 6135	301			0.38	1185 5704	292		2.7	1.00	0.97		
C13-2-1	1	0.38	1126	297	M3.15	0.95	0.37	1171	315	599	3.4	0.97	1.06	1.95	
	2	0.41	1350	332			0.40	1390	342		5.9	0.98	1.07		
	3	0.42	1388	342			0.45	1400	344		12.3	1.07	1.01		
	4	0.39	2540	307			0.64	1150	139		1.64				
	5	0.39	1315	324			0.49	1138	279		12.3	1.26	0.86		
	6	0.37	1275	313			0.38	1264	311		5.9	1.03	0.99		
	7	0.39	1335 10329	328			0.38	1318 8831	324		3.4	0.97	0.99		
C16-1-1	1	0.36	1330	330	M1.98	1.18	0.37	1365	339	654	4.0	1.03	1.03	1.89	
	2	0.38	1455	363			0.41	1370	336		8.9	1.08	0.93		
	3	0.40	2210	347			0.62	1580	244		1.55				
	4	0.38	1525	378			0.44	1480	367		8.9	1.16	0.97		
	5	0.36	1395	346			0.35	1356	335		4.0	0.97	0.97		

Table 8. (つづき) (Continued)

樹種 Species	No.	対照試験体 Control specimen			節周辺の解析試験体 Analytical compression test specimen										$\frac{r}{r_0}$	$\frac{\sigma_c}{\sigma_{co}}$	$\frac{\sigma_{cw}}{\sigma_{co}}$
		比重 Specific gravity at test r_0	最荷 Max. load P_{m0} (kgf)	大重 Crush- ing strength σ_{co} (kgf/cm ²)	節の品質 節径 Kont quality & Knot diameter ϕ (cm)	材幅 材節径 Width of Specimen — Knot diameter b' (cm)	比重 Specific gravity at test r	最荷 Max. load P_m (kgf)	圧縮強度 Crushing strength		中央繊維傾斜角 Grain angle at the middle of specimen θ (deg)						
									σ_c (kgf/cm ²)	σ_{cw}^* (kgf/cm ²)							
C16-1-1	6	0.34	1278 9193	316			0.36	1295 8446	322		2.1	1.06	1.02				
C14-2-1	2	0.38	1490	367			0.38	1350	334		0.9	1.00	0.91				
	3	0.39	1552	382			0.40	1505	371		4.0	1.03	0.97				
	4	0.40	1410	361	D0.73	1.22	0.45	1197	305	486	1.13					1.35	
	5	0.39	1597	393			0.39	1555	383		4.0	1.00	0.98				
	6	0.37	1400 7449	347			0.36	1380 6987	339		0.9	0.97	0.98				
C10-3-1	1	0.39	1435	353			0.40	1472	362		0.9	1.03	1.03				
	2	0.37	1347	330			0.39	1397	344		2.6	1.05	1.04				
	3	0.37	1306	322			0.38	1325	326		6.6	1.03	1.01				
	4	0.37	1560	316	D1.28	1.17	0.51	980	198	415	1.38					1.31	
	5	0.38	1330	328			0.39	1389	344		6.6	1.03	1.05				
	6	0.37	1325	329			0.38	1378	340		2.6	1.03	1.03				
	7	0.37	1310 9613	323			0.38	1326 9267	327		0.9	1.00	1.01				
C10-2-1	1	0.39	1402	344			0.39	1405	344		1.8	1.00	1.00				
	2	0.40	1475	363			0.40	1430	351		3.7	1.00	0.97				
	3	0.40	1447	356			0.43	1450	358		8.3	1.08	1.01				
	4	0.37	1995	338	D1.78	1.16	0.52	1034	175	444	1.41					1.31	
	5	0.36	1257	310			0.39	1260	310		8.3	1.08	1.00				
	6	0.38	1332	328			0.40	1335	328		3.7	1.05	1.00				
	7	0.38	1382 10290	341			0.38	1385 9299	339		1.8	1.00	0.99				
(アカマツ Akamatsu)																	
P 1-1-1	1	0.45	827	337			0.49	764	311		23.0	1.09	0.92				
	2	0.45	830	338			0.52	619	251		40.3	1.16	0.74				
	3	0.45	2460 4117	349	L4.00	0.41	0.86	1327 2710	185	1983	1.91					5.68	
P 1-3-1	1	0.45	876	357			0.47	860	350		26.0	1.04	0.98				
	2	0.46	860	356			0.51	745	309		45.1	1.11	0.87				
	3	0.46	2900 4636	374	L4.40	0.39	0.77	1417 3022	182	2241	1.67					5.99	
P 2-3-1	1	0.49	751	444			0.54	422	248		1.10	0.56					
	2	0.48	2204	426	M2.60	0.75	0.85	1064	196	880	1.77					2.07	
	3	0.49	1070	438			0.52	780	320		1.06	0.73					
	4	0.47	995	406			0.49	870	355		1.04	0.87					
	5	0.47	766 5786	415			0.48	640 3776	355		1.02	0.86					
P 2-4-1	1	0.47	2332	380	M3.15	0.65	0.90	626	102	596	1.91					1.57	
	2	0.48	916	373			0.53	682	281		1.10	0.75					
	3	0.48	935	380			0.47	835	339		0.98	0.89					
	4	0.50	995 5178	401			0.47	924 3067	372		0.94	0.93					
P 2-1-1	1	0.47	835	393			0.48	712	334		3.8	1.02	0.85				
	2	0.46	924	376			0.48	832	340		8.2	1.04	0.90				
	3	0.46	1255	383	D1.10	0.94	0.57	680	207	450	1.24					1.18	

Table 8. (つづき) (Continued)

樹 種 Species	No.	対 照 試 験 体 Control specimen		節 周 辺 の 解 析 試 験 体 Analytical compression test specimen								$\frac{r}{r_0}$	$\frac{\sigma_c}{\sigma_{c0}}$	$\frac{\sigma_{cw}}{\sigma_{c0}}$
		比 重 Spec- ific gravi- ty at test r_0	最 荷 Max. load P_{m0} (kgf)	大 重 Crush- ing strength σ_{c0} (kgf/cm ²)	節の 質、 節 径 Kont quali- ty & Knot diam- eter ϕ (cm)	材幅、 節 径 Width of Speci- men — Knot diam- eter b' (cm)	比 重 Spec- ific gravi- ty at test r	最 荷 Max. load P_m (kgf)	大 重 圧 縮 強 度 Crushing strength		中央繊維傾斜 角 Grain angle at the mid- dle of speci- men θ (deg)			
									σ_c	σ_{cw}^*				
P 2-1-1	4	0.47	976	399			0.46	927	379		8.2	0.98	0.95	
	5	0.45	969 4959	395			0.45	932 4083	379		3.8	1.00	0.96	
P 2-2-1	1	0.46	792	405			0.47	781	400		2.4	1.02	0.99	
	2	0.47	938	381			0.46	930	380		4.4	0.98	1.00	
	3	0.47	966	396			0.48	852	352		9.4	1.02	0.89	
	4	0.46	1220	387	D 1.20	0.74	0.61	555	176	460	1.33			
	5	0.47	972 4888	397			0.49	785 3903	323		9.4	1.04	0.81	
P 2-5-1	1	0.48	1370	382	D 1.43	0.78	0.77	612	172	487	1.60			
	2	0.48	940	382			0.49	812	332		10.8	1.02	0.87	
	3	0.49	905	369			0.48	885	361		5.3	0.98	0.91	
	4	0.51	945 4160	385			0.52	957 3266	391		3.1	1.02	1.02	
P 1-2-1	1	0.44	800	328			0.47	874	355		5.7	1.07	1.08	
	2	0.46	843	344			0.49	826	338		11.9	1.07	0.98	
	3	0.45	1225	346	D 1.50	0.68	0.88	739	210	673	1.96			
	4	0.44	840 3708	382			0.49	819 3258	333		11.9	1.11	0.97	

2) 圧縮試験方法

各試験体は、あらかじめ室温 20°C、関係湿度 75% の恒温恒湿室中で含水率約 15% に調整してから試験に供した。試験体の寸法をそれぞれ試験の直前に、曲率半径の大きい測定子を取りつけたデジタル式ダイヤルゲージを用いて 0.01 mm まで測定した。

圧縮加力には、最大容量 5 tonf のオルセン型材料試験機を用い Photo. 8 に示したような ASTM 式の短柱圧縮試験治具を用いた。

圧縮試験に際し、標点距離 2.5 cm に対する縮み変形量を引張試験と同様のひずみ計（最大変位量 ± 1 mm、精度 0.001 mm の差動トランスを使用）を用いて測定した。

荷重の測定には、容量 5 tonf のロードセル（共和製、出力 $6,000 \times 10^{-4}$ ）と動ひずみ計（共和製、最大出力 10 V）を用い、その出力を縮み量とともに XY 記録計に入力して、荷重—縮み線図を描かせた。

III.1.2. 実 験 結 果

得られた荷重—縮み線図の例を Fig. 30 に示した。この図は、ベイモミ (F15-1) の抜節 $\phi = 2.85$ cm のもので、末尾が No. 11~16 の計 6 個の試験体が 1 組になっている例である。No. 14 が節を含んでいる試験体で、それより左側に No. 13, 12, 11 の 3 個、右側に No. 15, 16 の 2 個の試験体が連続してならんでいたものである。抜節を含む試験体が最も弱く、No. 13 と 15 および No. 12 と 16 がほぼ同じ線を描いており、左右ほぼ対称の圧縮強度を有することがわかる。

ベイツガ 16 組, ベイモミ 6 組, スギ 17 組, アカマツ 8 組について, 実験結果を節の品質別に, 節の大きさの順に整理して示せば Table 8 のとおりである。

表中の b' は節を含む試験体について試験体の全幅から節径を差引いた値で, 0.5 cm を目安に節の両側に残した材についての実質の幅の値である。

圧縮強度 σ_c は最大荷重を試験体の横断面積で除して得られた値であるが, σ_{cw} は節を含んでいる試験体について, 試験体の幅 (材幅) を b' とした横断面積から求めた値である。

また, 表中の中央繊維傾斜は, 節周辺における繊維走向の傾斜 $\theta = \frac{15\sqrt{N\phi\phi}}{\sqrt{x}} - \frac{\phi}{2} - 5$ の式 (1) を使い, x の値を試験体の幅の中央にとって計算した値である。

III.1.3. 考 察

実験結果から, 節を含む試験体を中心としてその両隣りの試験体の圧縮強度が弱く, さらにそれより外側に向かって圧縮強度が増大していることがわかった。また, 節を含んでいる解析試験体の圧縮強度はかなりバラツキが認められた。そこで, この値の内容を, 節そのものの圧縮強度と節に隣接している比較的密度の大きい材部の圧縮強度とに分離して考えると, まず密度の大きい材部の圧縮強度は節が脱落している抜節の σ_{cw}/σ_{c0} をみれば, 約 1.3~1.6 となっており, 平均 $\sigma_{cw} = 1.5\sigma_{c0}$ とみてよいことがわかる。

つぎに, 生節を含む解析試験体の圧縮強度から $\sigma_{cw} = 1.5\sigma_{c0}$ として密度の大きい材部の負担している分を差引けば, 生節が負担している抵抗分を求めることができる。Table 8 の結果について生節だけの圧縮強度を計算してみると, 平均約 $0.5\sigma_{c0}$ と推定される。

つぎに, 対照試験体と解析試験体の比重の比 r/r_0 をみると, 節を含む解析試験体が最も大きく, それより両側に遠ざかるにしたがって減少し, 安定していくことがわかる。ただし, ここで抜節を含んでいる試験体の比重は, 抜節の面積をデジタイザで測定して欠落している体積を求め, その値を差引いた実質の体積で計算している。節の近くの繊維走向の傾斜は II で測定したようにならかなり大きくなっているはずであるが, r/r_0 からわかるように, このようなところは圧縮あて材のような密度の比較的大きな材になっていて圧縮強度は低下していない。前にも述べたように節に隣接している部分はむしろ正常材よりも大きくなっている。

ここで 4 樹種をまとめて節周辺における繊維走向の傾斜 θ と圧縮強度 σ_{c0} との関係を示せば, Fig. 31 のようになる。多少バラツキが大きいが HANKINSON の式を適用してみると, $m = 2.7$, $\sigma_{\perp} = 0.2\sigma_{\parallel}$ がほぼ適合するようにみえる。

すなわち, ベイツガ, ベイモミ, スギ, アカマ

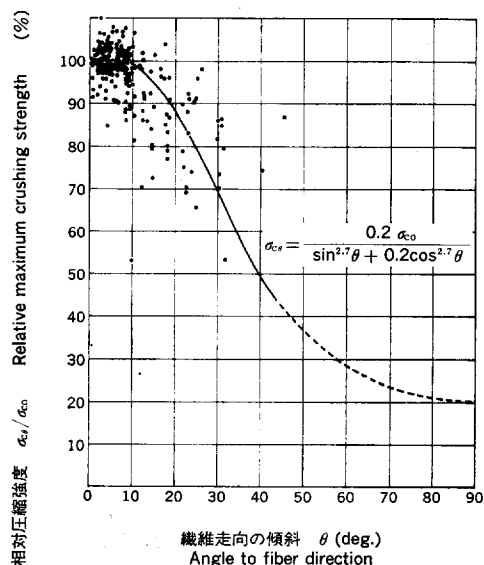


Fig. 31. 節周辺における繊維走向の傾斜と圧縮強度との関係
Effect of grain angle on maximum crushing strength.

ツの 4 樹種に共通のものとして、節周辺における繊維走向の傾斜 θ と圧縮強度 $\sigma_{c\theta}$ との間には、次式で与えられるような関係が成立つとみてよいだろう。

$$\sigma_{c\theta} = \frac{0.2 \sigma_{c0}}{\sin^{2.7} \theta + 0.2 \cos^{2.7} \theta} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに $\sigma_{c\theta}$: 節周辺において繊維走向の傾斜 θ° のときの圧縮強度 (kgf/cm²)

σ_{c0} : 繊維走向の傾斜 0° のときの基準圧縮強度 (kgf/cm²)

θ : 繊維走向の傾斜 (deg.)

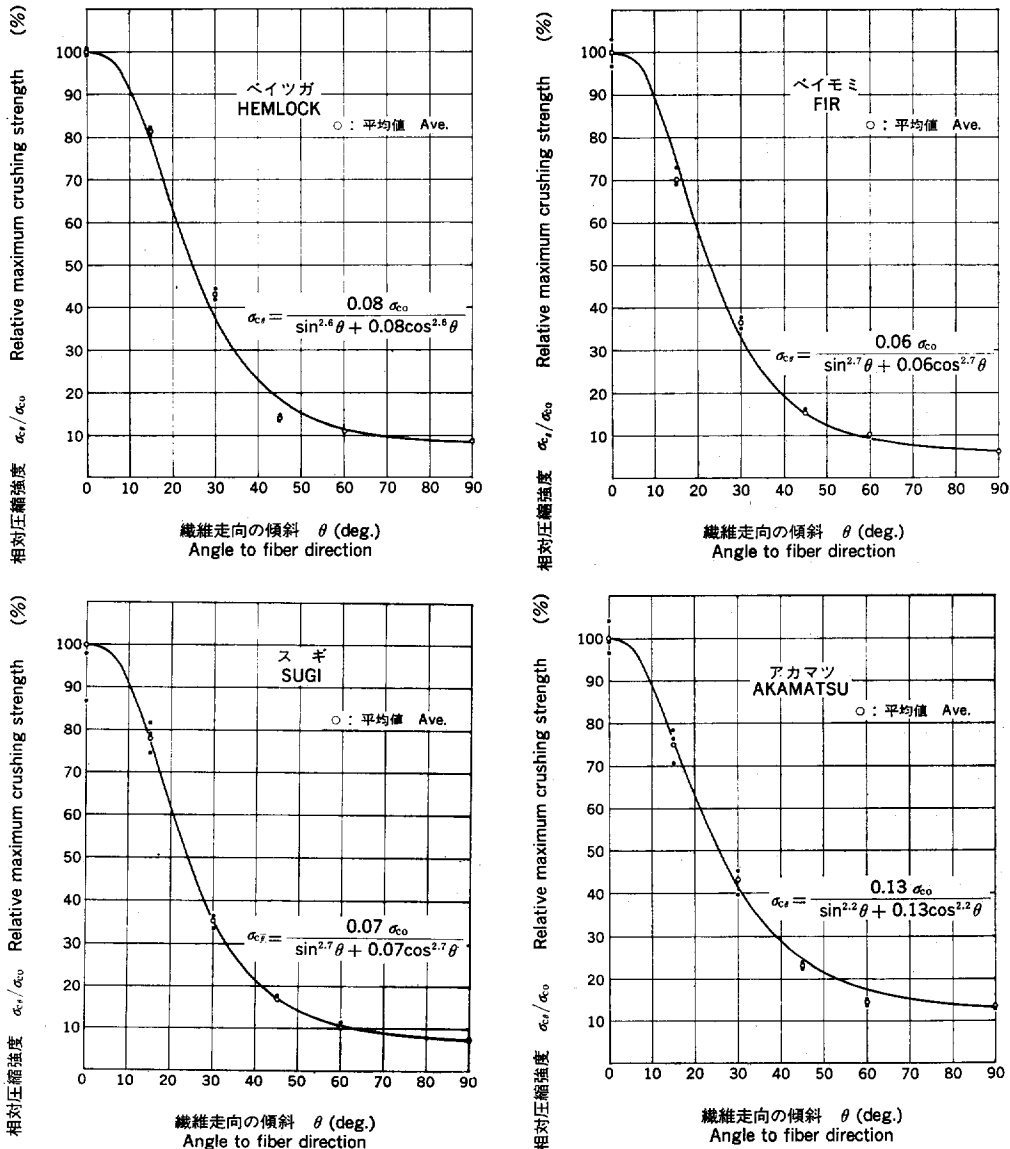


Fig. 32. 繊維走向の傾斜と圧縮強度との関係
Effect of grain angle on maximum crushing strength.
(節と無関係の場合 in the unrelated case to knot)

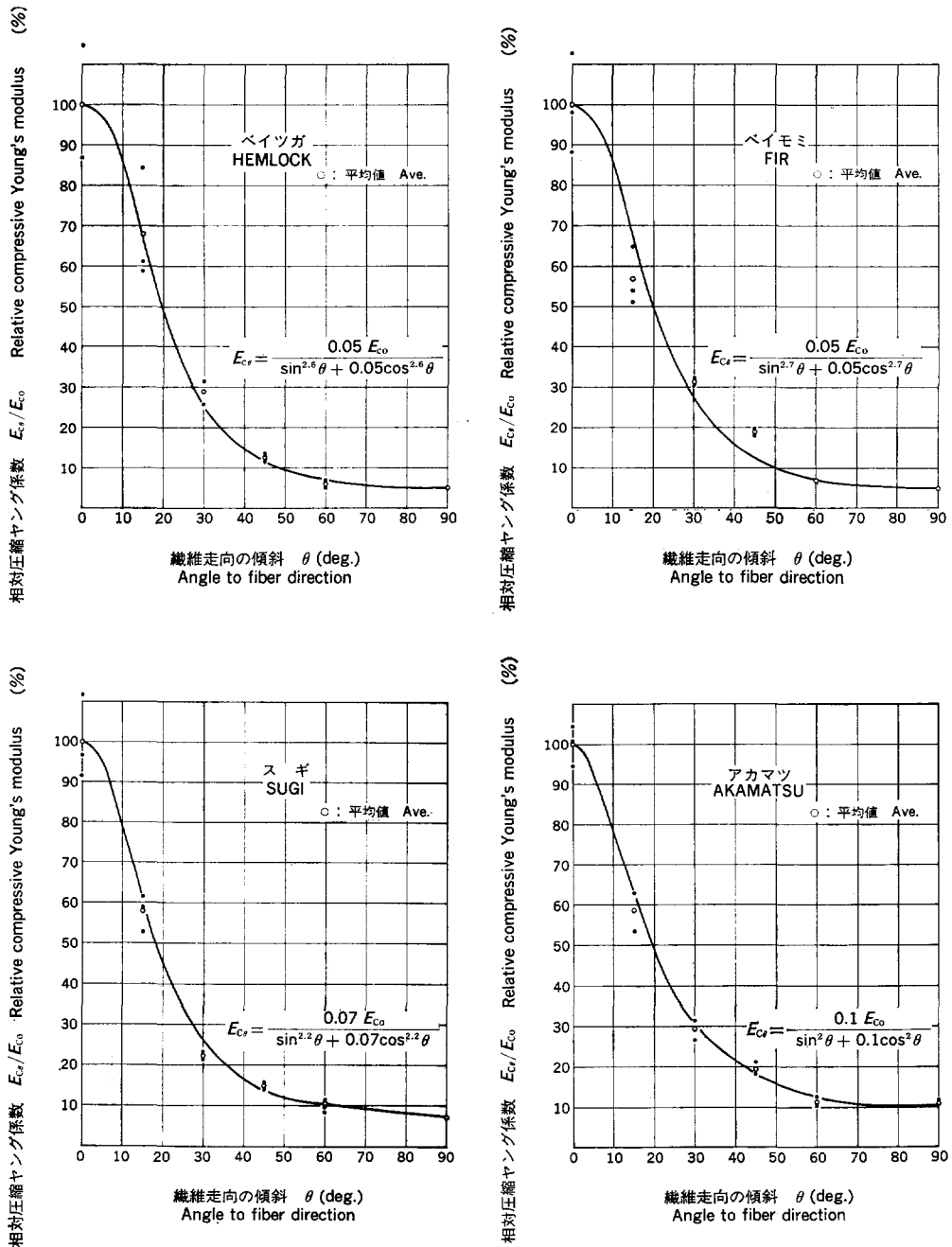


Fig. 33. 繊維走向の傾斜と圧縮ヤング係数との関係
 Effect of grain angle on compressive Young's modulus.
 (節と無関係の場合 in the case of unrelated knot)

別の実験より求めたベイツガ、ベイモミ、スギ、アカマツの節と無関係な場合の繊維走向の傾斜（目切れ）と圧縮強度および圧縮ヤング係数との関係を Fig. 32, 33 に示した。圧縮強度では、HANKINSON の式で $m = 2.2 \sim 2.7$, $\sigma_{\perp} = 0.06 \sim 0.13 \sigma_{\parallel}$ となり、圧縮ヤング係数では同じく $m = 2.0 \sim 2.7$, $E_{\perp} = 0.05 \sim 0.1 E_{\parallel}$ となり、従来の結果¹⁾とはほぼ一致している。

目切れ材の場合の θ が 15 度以上の圧縮試験では、年輪界で剪断破壊を生じて急激に破壊する性状を示すものが多い。一方、節の周りからとった繊維走向の傾斜している試験体の圧縮破壊では、ほとんど剪断破壊の性状は認められず、Fig. 30 にみられるように最大荷重を超えてなお縮みがかかなり進んでも、それほど荷重は低下せず抵抗を持続するものが多い。節周辺のような材では繊維走向の傾斜が連続的に、しかも曲面で変化しているために、組織が齊一に配列している目切れ材とは圧縮の破壊性状が異なり、 θ が大きくなっても目切れ材ほどには σ_{θ} が低下しないものと思われる。しかも最大荷重を超えて変形が進んでもなお最大荷重に近い抵抗をつづけることが特に注目される。このような材の圧縮力に対する抵抗は剪断破壊や割裂をともしないかぎり、組織の一部がつぶれるのみで急激には減少しないと考えてよい。

III. 2. 有節材の実大圧縮試験

III. 2. 1. 実験材料および実験方法

1) 実験材料

実験に供した材は、ベイツガ、ベイモミ、スギ、アカマツの 4 樹種で、供試材についてはすでに III. 1. に述べたとおりである。

試験体の寸法は、Fig. 34 に示したとおりで、節をできるだけ材長の中央に位置するように木取った。

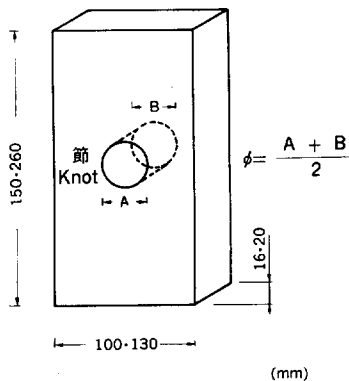


Fig. 34. 実大圧縮試験体
Diagram of compression test specimen for full size knotted lumber.

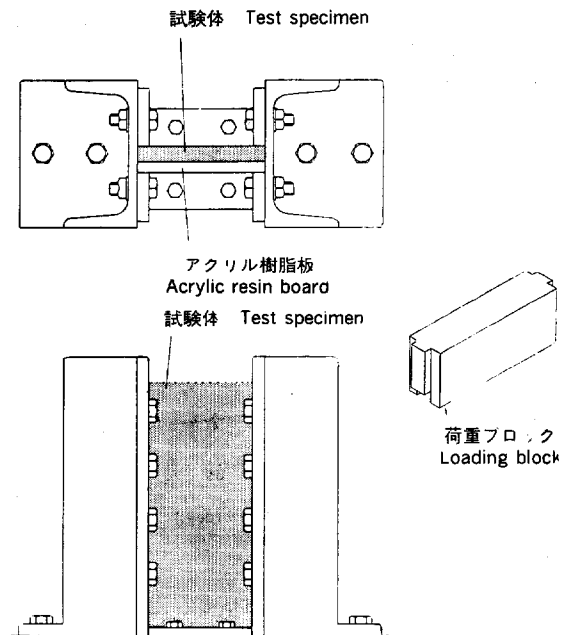


Fig. 35. 圧縮試験治具
Jig for compression test.



Photo. 9 実大圧縮試験治具
Lateral support compression
of wood structural element.

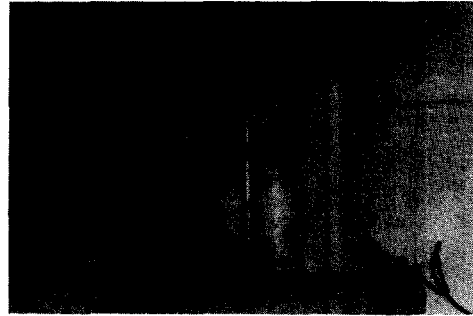


Photo. 10 デジタル式ダイヤルゲージ
による縮み量の測定
Electronic dial assembly mounted.

また、この材と材軸方向に隣接する部分から基準圧縮強度値 σ_{c0} を求めるために有節試験体と同寸法の無節の対照試験体をそれぞれ一個ずつとった。

2) 実大圧縮試験方法

横座屈を防止するために試験体の厚さ方向を抑えてむように工夫した Fig. 35 に示すような治具を用いた。特に材幅面の片側は全面にわたって厚さ 1 cm の透明アクリル樹脂板で抑えた。

試験体の両側に精度 0.001 mm のデジタル式ダイヤルゲージを取り付け、試験体全長に対する縮み量を加圧盤間距離の減少量として測定した。

圧縮試験は、最大容量 20 tonf の油圧式アムスラー型材料試験機を用い、荷重の計測は、試験機の油圧回路に挿入した金属抵抗線ひずみ計式の圧力計の出力を動ひずみ計で受け、前述の変位計の出力をデジタル-アナログ変換器 (1 mV/dig.) を通した出力とともに XY 記録計で測定記録した。荷重速度は、破壊が 5～7 分で生じるように油圧の給油弁を調整し一定とした。

なお、最大荷重が確認された後はできるだけ速やかに油圧を減少させて圧縮破損線が初期の段階でとまるように試験機の操作を行った。これは節周辺における初期の圧縮破損線を確認し、これを III. 1. の実験に適用しようと考えたためである。

III. 2. 2. 実験結果

有節材の圧縮破損はすべて節に関連して現れた。試験の結果を樹種ごとに生節と死節に分け、節径の大きさの順に整理したのが Table 9 である。

有節材の縦圧縮強度 σ_c とその材の無節試験体から求められた基準縦圧縮強度 σ_{c0} との比 σ_c/σ_{c0} を圧縮強度比とし、圧縮強度比と節を材の断面欠損とみなしたときの有効断面積比 $1-K_{ar}$ との比 $(\sigma_c/\sigma_{c0})/(1-K_{ar})$ は、筆者らが前に行った試験⁽¹¹⁾⁽¹²⁾ とほぼ同様の結果を得た。

この実験における $(\sigma_c/\sigma_{c0})/(1-K_{ar})$ の値を要約すれば Table 10 のようになる。表からもわかるよ



Photo. 11 実大圧縮試験
(油圧式材料試験機, 20 tonf)
General view of 20 tonf
testing machine for
compression.

Table 9. 有節材の実大圧縮試験結果
Results of compression test for knotted lumber.

No.	比 重 Specific gravity at test r	節の品質, 節径 Knot quality & Knot diameter ϕ (cm)	圧 縮 強 度 Crush- ing strength σ_c (kgf/cm ²)	基準圧縮強度 Basic crush- ing strength σ_{c0} (kgf/cm ²)	比 Ratio $\frac{\sigma_c}{\sigma_{c0}}$ (A)	有効断面面積比 Effective sec- tional area ratio $1-K_{ar}$ (B)	(A) (B)	圧縮ヤング係数 Com- pressive Young's modulus E_c (10 ⁸ kgf/cm ²)	基準圧縮ヤング係数 Basic com- pressive Young's modulus E_{c0} (10 ⁸ kgf/cm ²)	$\frac{E_c}{E_{c0}}$ (C)	(C) (B)
(ベ イ ツ ガ Hemlock)											
30-1	0.45	L 1.60	373	391	0.954	0.877	1.09	89.8	86.1	1.023	1.17
19-1	0.62	L 1.70	396	418	0.947	0.869	1.09	97.2	114.4	0.850	0.98
17-2	0.53	L 1.80	369	447	0.826	0.862	0.86	107.7	116.2	0.972	1.08
19-2	0.62	L 2.05	401	450	0.891	0.842	1.06	95.7	108.3	0.884	1.05
54-1	0.51	L 2.35	343	443	0.774	0.819	0.95	89.3	109.6	0.815	1.00
47-1	0.41	L 2.40	297	378	0.786	0.815	0.96	70.8	84.1	0.842	1.03
14-3	0.53	L 2.45	391	441	0.887	0.812	1.09	96.9	113.4	0.854	1.05
27-1	0.54	L 2.50	428	460	0.930	0.808	1.15	110.2	127.2	0.866	1.07
47-2	0.40	L 2.50	238	341	0.698	0.808	0.86	61.3	77.8	0.788	0.98
26-1	0.46	L 2.65	327	369	0.886	0.796	1.11	85.8	101.0	0.850	1.07
47-3	0.40	L 2.70	277	341	0.812	0.792	1.03	69.3	77.8	0.891	1.13
60-2	0.50	L 2.80	286	355	0.806	0.785	1.03	64.1	86.3	0.743	0.95
49-1	0.50	L 2.80	291	385	0.756	0.785	0.96	64.1	92.6	0.692	0.88
60-1	0.50	L 3.00	265	355	0.746	0.769	0.97	68.3	86.3	0.791	1.03
36-2	0.53	L 3.60	335	388	0.863	0.723	1.19	79.9	97.0	0.824	1.14
2-1	0.56	L 3.65	300	492	0.610	0.719	0.85	89.7	139.2	0.644	0.90
36-1	0.53	L 4.10	284	388	0.732	0.685	1.07	62.6	97.0	0.645	0.94
10-4	0.43	L 5.00	238	324	0.735	0.615	1.20	39.4	81.8	0.482	0.78
42-1	0.40	L 5.20	197	316	0.623	0.600	1.04	39.1	64.3	0.608	1.01
8-3	0.53	M 1.75	391	473	0.827	0.865	0.96	113.0	133.7	0.845	0.98
62-1	0.55	M 1.90	418	476	0.878	0.854	1.03	106.6	119.1	0.895	1.05
12-1	0.59	M 1.90	455	520	0.875	0.854	1.02	122.0	133.8	0.912	1.07
8-2	0.53	M 2.00	407	500	0.814	0.846	0.96	117.6	135.4	0.869	1.03
36-4	0.55	M 2.95	320	387	0.827	0.773	1.07	68.2	86.8	0.786	1.02
36-3	0.53	M 3.05	346	388	0.892	0.765	1.17	79.7	97.0	0.822	1.07
8-1	0.55	M 3.10	388	522	0.743	0.762	0.98	102.0	131.9	0.773	1.01
10-1	0.44	M 3.50	276	392	0.704	0.731	0.96	66.3	107.2	0.618	0.85
14-1	0.53	M 3.60	361	423	0.853	0.723	1.18	81.6	104.7	0.779	1.08
12-3	0.59	D 0.40	507	521	0.973	0.969	1.00	137.3	147.1	0.933	0.96
12-2	0.59	D 0.70	520	521	0.998	0.946	1.05	139.4	147.1	0.948	1.00
4-1	0.49	D 0.80	399	403	0.990	0.938	1.06	96.0	101.7	0.944	1.01
16-1	0.51	D 1.00	425	428	0.993	0.923	1.08	90.5	95.0	0.953	1.03
51-2	0.42	D 1.05	307	334	0.919	0.919	1.00	75.9	73.5	1.033	1.12
3-2	0.57	D 1.20	473	467	1.013	0.908	1.12	129.5	131.9	0.982	1.08
3-3	0.56	D 1.25	445	435	1.023	0.904	1.13	128.6	122.9	1.046	1.16

L : 生 節 Intergrown knot
M : 半死節 Partially intergrown knot

D : 死 節 Dead knot
K : 抜 節 Knot hole

Table 9. (つづき) (Continued)

No.	比 重 Specific gravity at test	節の品質, 節径 Knot quality & Knot diameter ϕ (cm)	圧 縮 強 度 Crush- ing strength σ_c (kgf/cm ²)	基準圧縮強度 Basic Crush- ing strength σ_{c0} (kgf/cm ²)	比 Ratio $\frac{\sigma_c}{\sigma_{c0}}$ (A)	有効断面面積比 Effective sec- tional area ratio $1-K_{ar}$ (B)	(A) (B)	圧縮ヤング係数 Com- pressive Young's modulus E_c (10^8 kgf/cm ²)	基準圧縮ヤング係数 Basic com- pressive Young's modulus E_{c0} (10^8 kgf/cm ²)	$\frac{E_c}{E_{c0}}$ (C)	(C) (B)
57-1	0.41	D1.30	348	378	0.921	0.900	1.02	88.8	84.1	1.056	1.17
53-1	0.52	D1.30	418	465	0.899	0.900	1.00	114.4	116.3	0.985	1.09
22-1	0.52	D1.40	366	396	0.924	0.892	1.04	89.9	97.2	0.925	1.04
17-1	0.52	D1.40	380	421	0.903	0.892	1.01	107.5	119.0	0.903	1.01
20-1	0.44	D1.40	292	334	0.874	0.892	0.98	87.4	87.6	0.998	1.12
3-1	0.57	D1.50	417	457	0.912	0.885	1.03	124.5	138.3	0.900	1.02
3-3-3	0.56	D1.65	405	479	0.846	0.873	0.97	124.0	131.1	0.946	1.08
5-1	0.49	D1.70	317	372	0.852	0.869	0.98	82.4	93.9	0.878	1.01
10-2	0.43	D1.75	279	334	0.835	0.865	0.97	68.4	79.0	0.866	1.00
9-1	0.44	D1.85	298	307	0.971	0.858	1.13	76.1	80.7	0.943	1.10
44-1	0.49	D1.85	395	485	0.814	0.858	0.95	94.3	105.0	0.898	1.05
14-2	0.53	D2.15	405	423	0.957	0.835	1.15	101.3	104.7	0.968	1.16
9-2	0.44	D2.45	269	307	0.876	0.812	1.08	64.6	80.7	0.800	0.99
10-3	0.43	D2.55	281	345	0.814	0.804	1.01	69.6	80.1	0.869	1.08
51-1	0.42	D3.75	214	334	0.641	0.712	0.90	52.4	73.5	0.713	1.00
59-1	0.48	K3.15	233	317	0.735	0.758	0.97	53.2	69.8	0.762	1.01
59-2	0.48	K4.60	191	317	0.603	0.646	0.93	41.1	69.8	0.589	0.91

(ベ イ モ ミ Fir)

61-2	0.45	L1.70	347	363	0.956	0.869	1.10	95.9	87.9	1.091	1.26
61-4	0.42	L1.80	312	344	0.907	0.862	1.05	76.5	82.8	0.924	1.07
21-2	0.45	L1.95	370	389	0.951	0.850	1.12	83.6	97.1	0.861	1.01
18-1	0.46	L1.95	355	388	0.915	0.850	1.08	90.4	92.5	0.977	1.15
61-3	0.42	L1.95	317	344	0.922	0.850	1.08	77.7	82.8	0.938	1.10
21-3	0.43	L2.05	322	357	0.902	0.842	1.07	79.8	80.8	0.988	1.17
11-2	0.38	L2.05	280	323	0.867	0.842	1.03	63.8	67.7	0.942	1.12
55-1	0.44	L2.20	326	371	0.879	0.831	1.06	71.3	88.6	0.805	0.97
50-3	0.43	L2.20	300	361	0.831	0.831	1.00	74.5	84.6	0.881	1.06
11-1	0.41	L2.30	281	350	0.803	0.823	0.98	70.4	76.6	0.919	1.12
50-1	0.43	L2.40	302	361	0.837	0.815	1.03	73.3	84.6	0.866	1.06
21-1	0.47	L2.45	347	386	0.899	0.812	1.11	92.0	101.5	0.906	1.12
25-1	0.48	L2.55	376	421	0.893	0.804	1.11	103.9	115.2	0.902	1.12
50-2	0.43	L2.55	295	361	0.817	0.804	1.02	75.1	84.6	0.888	1.10
25-2	0.45	L2.65	364	409	0.890	0.796	1.12	100.6	99.5	1.011	1.27
32-2	0.44	L2.65	315	386	0.816	0.796	1.03	82.7	97.4	0.849	1.07
48-2	0.42	L2.65	289	352	0.821	0.796	1.03	73.0	84.0	0.869	1.09
61-1	0.45	L2.70	310	363	0.854	0.792	1.08	89.6	87.9	1.019	1.29
46-2	0.52	L3.20	293	393	0.746	0.754	0.99	71.3	87.3	0.817	1.08
29-1	0.43	L3.50	248	373	0.665	0.731	0.91	65.2	89.0	0.733	1.00

Table 9. (つづき) (Continued)

No.	比 重 Specific gravity at test r	節の品質, 節径 Knot quality & Knot diameter ϕ (cm)	圧 縮 強 度 Crush- ing strength σ_c (kgf/cm ²)	基準圧縮強度 Basic crush- ing strength σ_{c0} (kgf/cm ²)	比 Ratio $\frac{\sigma_c}{\sigma_{c0}}$ (A)	有効断面積比 Effec- tive sec- tional area ratio $1-K_{ar}$ (B)	(A) (B)	圧縮ヤング係数 Com- pressive Young's modulus E_c (10 ⁸ kgf/cm ²)	基準圧縮ヤング係数 Basic com- pressive Young's modulus E_{c0} (10 ⁸ kgf/cm ²)	$\frac{E_c}{E_{c0}}$ (C)	(C) (B)
28-2	0.43	L3.70	268	333	0.805	0.715	1.13	59.1	80.9	0.731	1.02
39-2	0.43	L3.90	285	366	0.779	0.700	1.11	74.1	78.5	0.944	1.35
46-1	0.44	L4.00	245	363	0.675	0.692	0.98	62.4	94.3	0.662	0.96
56-1	0.45	M1.45	403	419	0.962	0.888	1.08	102.8	100.0	1.028	1.16
1-2	0.51	M1.60	351	445	0.789	0.878	0.90	107.5	113.5	0.947	1.08
56-3	0.47	M1.80	373	426	0.876	0.862	1.02	105.3	108.5	0.971	1.13
48-1	0.42	M2.55	275	352	0.781	0.804	0.97	74.4	84.0	0.886	1.10
37-1	0.43	M3.45	266	384	0.693	0.735	0.94	74.4	97.8	0.761	1.04
1-1	0.51	D0.55	421	445	0.946	0.958	0.99	94.4	113.5	0.832	0.87
52-3	0.38	D0.90	313	316	0.991	0.931	1.06	69.1	69.5	0.994	1.07
52-1	0.38	D1.10	312	310	1.006	0.915	1.10	67.1	69.6	0.964	1.05
52-2	0.38	D1.50	299	310	0.965	0.885	1.09	66.9	69.6	0.961	1.09
40-1	0.44	D1.55	318	343	0.927	0.881	1.05	76.5	79.7	0.960	1.09
32-1	0.46	D3.00	321	382	0.840	0.769	1.09	87.8	98.4	0.892	1.16
56-2	0.47	K1.45	413	426	0.969	0.888	1.09	110.6	108.5	1.019	1.15
15-1	0.44	K3.10	276	381	0.724	0.762	0.95	73.4	95.3	0.770	1.01
13-1	0.53	K3.15	294	352	0.835	0.758	1.10	60.7	73.8	0.822	1.08
39-1	0.43	K3.15	287	366	0.784	0.758	1.03	76.9	78.5	0.980	1.29

(ス ギ Sugi)

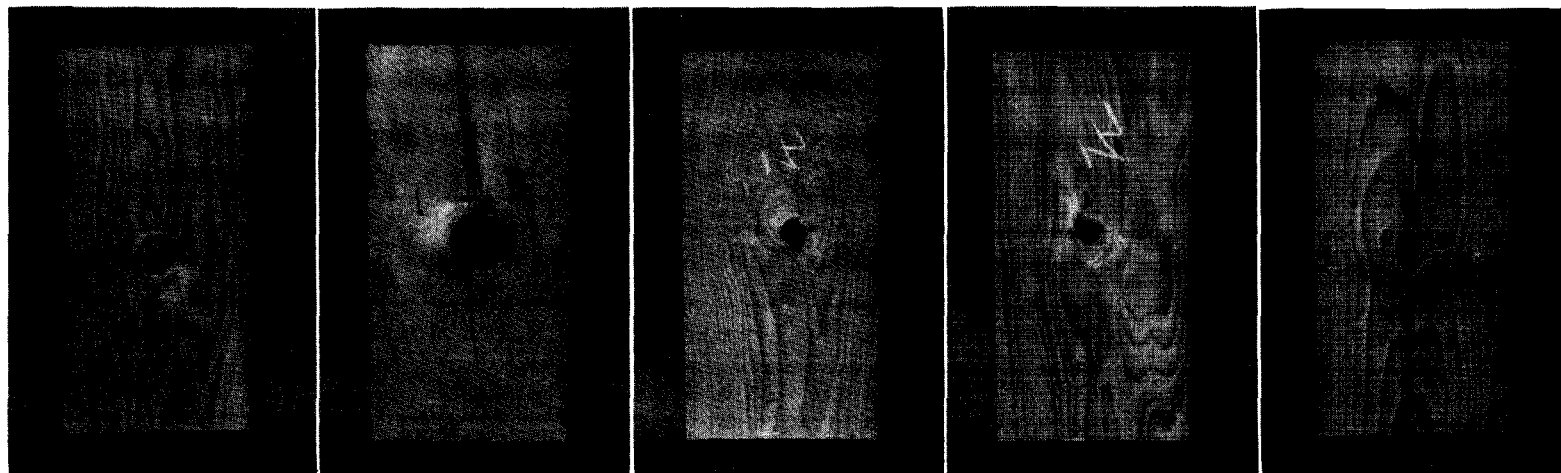
15-1-1	0.38	L1.15	284	289	0.983	0.877	1.12	35.3	35.6	0.922	1.13
15-2-1	0.38	L1.30	273	287	0.951	0.858	1.10	33.4	35.1	0.952	1.11
17-1-2	0.35	L1.50	250	270	0.926	0.842	1.10	31.3	33.7	0.929	1.10
2-2-1	0.34	L1.65	299	300	0.997	0.827	1.21	33.5	33.6	0.997	1.21
4-1-2	0.36	L1.75	270	284	0.951	0.821	1.16	30.9	33.9	0.912	1.11
18-1-1	0.33	L1.85	270	273	0.989	0.808	1.22	42.2	35.1	1.202	1.49
4-1-1	0.35	L2.00	268	286	0.937	0.797	0.87	28.6	36.9	0.775	0.97
6-1-1	0.30	L2.00	229	216	1.101	0.794	1.39	21.6	19.2	1.125	1.42
12-1-1	0.30	L2.10	232	236	0.983	0.783	1.26	23.8	21.3	1.117	1.43
16-2-1	0.34	L2.10	260	287	0.906	0.789	1.15	36.5	38.4	0.951	1.20
19-1-1	0.35	L2.20	259	277	0.935	0.767	1.22	32.6	37.4	0.872	1.14
8-1-1	0.37	L2.25	272	284	0.958	0.764	1.25	30.0	34.1	0.880	1.15
13-1-1	0.40	L2.35	297	353	0.841	0.752	1.12	39.1	50.9	0.768	1.02
7-1-6	0.35	L2.50	249	261	0.954	0.736	1.30	31.1	35.0	0.889	1.21
16-1-1	0.34	L2.55	274	292	0.938	0.740	1.27	37.4	43.4	0.862	1.16
7-1-1	0.34	L2.95	240	255	0.941	0.698	1.37	26.7	31.4	0.850	1.22
10-1-1	0.37	L3.10	273	293	0.932	0.685	1.36	33.0	35.8	0.922	1.35
7-1-3	0.35	L3.15	246	261	0.943	0.668	1.41	30.5	35.0	0.871	1.30
11-1-1	0.31	L3.30	244	245	0.996	0.665	1.50	27.4	25.9	1.058	1.59

Table 9. (つづき) (Continued)

No.	比 重 Specific gravity at test γ	節の品質, 節径 Knot quality & Knot diameter ϕ (cm)	圧 縮 強 度 Crush- ing strength σ_c (kgf/cm ²)	基準圧 縮強度 Basic crush- ing strength σ_{to} (kgf/cm ²)	比 Ratio $\frac{\sigma_c}{\sigma_{co}}$ (A)	有効断 面積比 Effec- tive sec- tional area ratio $1 - K_{ar}$ (B)	(A) (B)	圧縮ヤング係数 Com- pressive Young's modulus E_c (10^8 kgf/cm ²)	基準圧縮 ヤング係数 Basic com- pressive Young's modulus E_{co} (10^8 kgf/cm ²)	$\frac{E_c}{E_{co}}$ (C)	(C) (B)
16-1-2	0.34	M1.30	281	292	0.962	0.867	1.11	38.0	43.4	0.876	1.01
7-1-2	0.35	M1.70	254	261	0.973	0.821	1.19	32.2	35.0	0.920	1.12
17-2-1	0.35	M1.70	277	277	1.000	0.823	1.22	34.6	33.4	1.036	1.26
3-2-1	0.37	M1.75	299	306	0.977	0.824	1.19	37.1	40.9	0.907	1.10
3-1-1	0.39	M2.20	258	337	0.766	0.775	0.99	48.5	44.0	1.102	1.42
16-2-2	0.34	M2.30	265	284	0.933	0.769	1.21	35.8	38.8	0.923	1.20
17-1-1	0.34	M2.30	255	269	0.948	0.764	1.24	33.0	35.1	0.940	1.23
7-1-5	0.35	D0.85	253	261	0.969	0.910	1.07	30.9	35.0	0.883	0.97
7-1-4	0.35	D1.65	257	261	0.985	0.826	1.19	32.1	35.0	0.917	1.11
3-3-1	0.38	K2.00	282	320	0.881	0.793	1.11	38.1	53.3	0.715	0.90

(ア カ マ ツ Akamatsu)

8-8	0.51	L1.10	328	357	0.919	0.915	1.00	77.6	91.8	0.845	0.92
10-2	0.41	L1.95	311	286	1.087	0.850	1.28	71.5	59.5	1.202	1.41
5-3	0.54	L2.00	327	420	0.779	0.846	0.92	84.2	—	—	—
8-1	0.51	L2.85	309	357	0.876	0.628	1.11	77.3	91.8	0.842	1.34
8-6	0.51	L3.85	217	357	0.608	0.704	0.86	56.4	91.8	0.614	0.87
8-5	0.51	L4.45	211	357	0.591	0.658	0.90	52.2	91.8	0.569	0.86
7-3	0.49	L4.85	194	325	0.597	0.628	0.95	42.4	59.0	0.719	1.14
8-7	0.51	M1.10	312	357	0.874	0.915	0.96	73.7	91.8	0.803	0.88
8-4	0.51	M1.35	365	357	1.022	0.896	1.14	90.4	91.8	0.985	1.10
8-3	0.51	D1.27	342	357	0.958	0.873	1.10	89.3	91.8	0.973	1.11
8-2	0.51	D2.85	308	357	0.863	0.781	1.10	79.4	91.8	0.869	1.11
5-2	0.54	D4.00	264	420	0.629	0.692	0.91	68.5	—	—	—
6-1	0.50	D4.65	228	395	0.577	0.642	0.90	46.7	100.8	0.463	0.72
6-4	0.51	D4.70	243	393	0.618	0.638	0.97	51.8	100.2	0.517	0.81
5-1	0.54	D5.30	219	420	0.521	0.592	0.88	50.0	—	—	—
9-1	0.50	K2.95	313	393	0.796	0.773	1.03	90.4	100.2	0.902	1.17
6-3	0.50	K4.65	232	394	0.588	0.642	0.92	54.5	92.3	0.590	0.92
6-2	0.49	K4.90	221	385	0.574	0.623	0.92	49.9	96.1	0.519	0.83
3-1-1	0.47	L0.85	361	355	1.017	0.908	1.12	66.0	58.5	1.128	1.24
4-1-3	0.51	L2.75	301	426	0.707	0.702	1.01	68.4	84.1	0.813	1.16
4-1-1	0.51	L2.80	282	426	0.662	0.697	0.95	47.0	84.1	0.559	0.80
3-2-1	0.46	L3.40	253	349	0.725	0.631	1.15	36.9	49.9	0.739	1.17
3-1-2	0.46	L3.55	229	366	0.626	0.620	1.01	45.1	67.7	0.666	1.07
1-1-1	0.46	L3.60	251	314	0.799	0.614	1.30	39.6	53.5	0.740	1.21
3-2-2	0.44	M2.30	308	341	0.903	0.750	1.20	58.6	58.9	0.995	1.33
3-2-3	0.44	M2.65	257	341	0.754	0.716	1.05	41.0	58.9	0.696	0.97
3-1-3	0.45	M2.80	257	348	0.739	0.702	1.05	48.8	64.5	0.757	1.08
4-1-2	0.51	D2.30	312	426	0.733	0.751	0.98	57.8	84.1	0.687	0.92



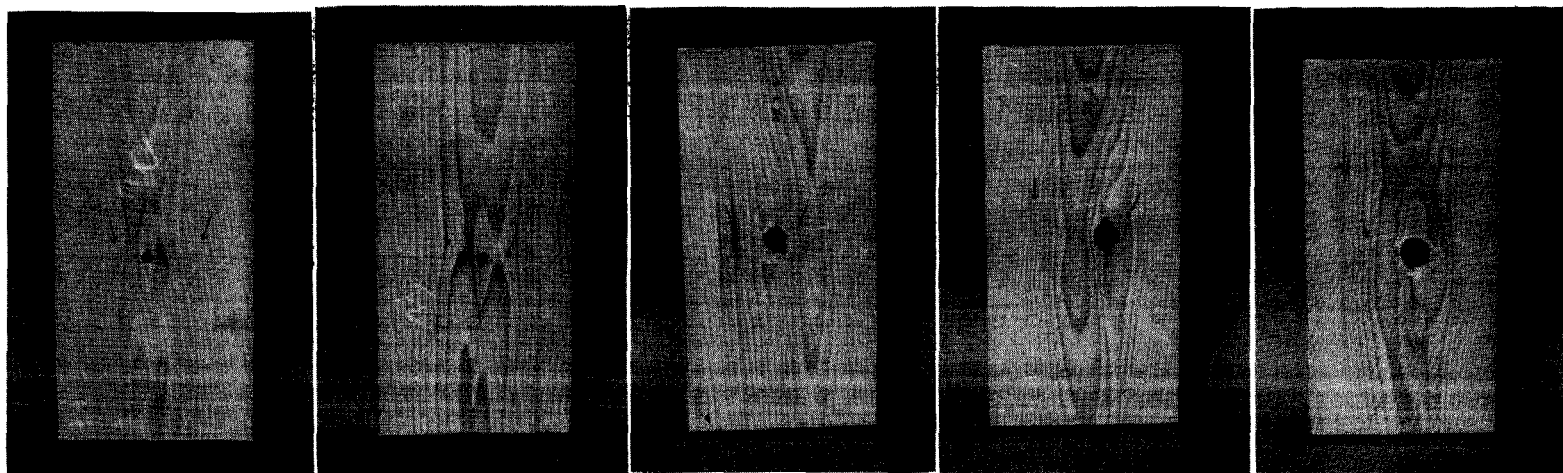
ベイツガ Hemlock

ベイツガ Hemlock

ベイツガ Hemlock

ベイツガ Hemlock

ベイモミ Fir



ベイモミ Fir

ベイモミ Fir

ベイモミ Fir

ベイモミ Fir

ベイモミ Fir

Photo. 12 有節材の圧縮破損線 Examples of compression failure caused by knot.

Table 10. $(\sigma_c/\sigma_{c0})/(1-K_{ar})$ の平均値
Mean values of $(\sigma_c/\sigma_{c0})/(1-K_{ar})$.

樹 種 Species	生 節 Intergrown knot			死 節・抜 節 Dead knot & Knot hole			総 括 (半死節を含む) Whole (Included partially intergrowm knot)		
	試験体数 Number of speci- men n	節径の範囲 Range of knot diameter ϕ (cm)	(σ_c/σ_{c0}) $(1-K_{ar})$	試験体数 Number of speci- men n	節径の範囲 Range of knot diameter ϕ (cm)	(σ_c/σ_{c0}) $(1-K_{ar})$	試験体数 Number of speci- men n	節径の範囲 Range of knot diameter ϕ (cm)	(σ_c/σ_{c0}) $(1-K_{ar})$
ベイツガ Hemlock	19	1.6~5.2	1.03	24	0.4~4.6	1.02	52	0.4~5.2	1.03
ベイモミ Fir	23	1.7~4.0	1.05	10	0.5~3.2	1.06	38	1.5~4.0	1.04
スギ Sugi	19	1.2~3.3	1.23	3	0.9~2.0	1.12	29	1.2~3.3	1.20
アカマツ Akamatsu	13	0.9~4.8	1.04	10	1.3~5.3	0.97	28	0.9~5.3	1.02

うに、ベイツガの生節の平均が1.03、死節が1.02、総平均で1.03となり、ベイモミの生節の平均が1.05、死節では1.06、総平均で1.04となり、スギの生節の平均が1.23でやや節径が大きくなるにしたがって大きくなる傾向を示し、死節は1.12、総平均で1.20となり、アカマツの生節の平均が1.04、死節で0.97、総平均が1.02となっている。

なお、参考のために圧縮ヤング係数も求めたが、材長全体に対する縮みを測定していることもあり、端面の影響などでバラツキが大きく、よい結果は得られていない。

また、肉眼的観察にとどまったが、圧縮破損線は節の近傍に現れ、破損の初期段階では節に接していないものが多く、節径が数 mm 程度のごく小さい節でも他に欠点がなければ確実に節に関連した形態で現れることが確認された。現れた圧縮破損線の例を Photo. 12 に示した。

III. 2. 3. 考 察

前述したように有節材の縦圧縮強度は、節を材の断面減少とみなして求めた強度値にかなり近い値を示し、II. で検討した有節材の縦引張強度の場合とは違っている。節周辺の繊維走向が乱れているにもかかわらず総体での圧縮強度の減少の少ないことは、節周辺の圧縮あて材による補強が大きく関与しているものと推察される。また、破壊性状は、節の周りの繊維走向の傾斜が連続的に変化するために剪断破壊をとるもののはほとんどみられなかった。

III. 3. 節周辺における繊維走向傾斜の分布式による有節材の圧縮強度の推定

節周辺における圧縮強度の分布を検討した結果、Fig. 30 にみられるように、荷重-縮み線図は、かなり縮み変形が進行しても荷重がそれほど低下しないことを考えれば、有節材の圧縮強度は圧縮ヤング係数よりも、むしろそれぞれの部分の圧縮最大強度（破壊荷重）に依存するものと考えられる。

そこで有節材の圧縮強度は、節の破壊荷重、節に隣接している比較的比重の大きい部分の破壊荷重、およびそれより外側の部分で繊維走向の傾斜に依存して圧縮強度の低減する部分の破壊荷重の総和と考えてよい。

節の圧縮強度は、すでに III. 1. で検討したように、生節の場合は、樹種に関係なく正常材の縦圧縮強度の0.5倍、すなわち $0.5\sigma_{c0}$ とする。一方、抜節は勿論であるが、死節もほとんどが緩んでいるか腐れを

ともなうので、この場合の抵抗は 0 と考えてよい。

つぎに、節に隣接している比重の大きい部分の圧縮強度は、Ⅲ.1. で検討したように樹種、節の品質に関係なく、正常材の圧縮強度の 1.5 倍、すなわち $1.5\sigma_{c0}$ とする。ただし、このように比重が大きく、圧縮強度の大きくなる範囲を Table 8 の結果から推定して、節径 ϕ が 4.5 cm 以下のものは節端から 3 mm まで、節径 ϕ が 4.6 cm 以上のものは節端から 4 mm までの範囲であると仮定する。

節径 ϕ が 4.5 cm 以下のものの節端から 3 mm 以上はなれた部分および節径 ϕ が 4.6 cm 以上のものの節端から 4 mm 以上はなれた部分の圧縮強度は、式 (1), (4) によって算定することにする。

以上のような仮定に基づいて Ⅲ.2. で行った有節材の実大圧縮試験体について、それぞれの最大荷重を算出してみることにする。

いま、計算例を示せば、つぎのようになる。

樹 種 ベイツガ No. 30-1

節 生 節 $\phi=1.60$ cm

試験体断面 厚 さ 1.62 cm, 幅 12.98 cm

基準圧縮強度 $\sigma_{c0}=391$ kgf/cm² (対照試験体の圧縮強度)

ここでは簡単のために 1 mm ごとに分割して計算することにする。また、節は材幅の中心にあるものとする、各部分の最大荷重は

$$\begin{array}{ll} \sigma_{c0} \text{ 係数} & \text{幅} \quad \text{厚} \\ \text{① 節} & 391 \times 0.5 \times 1.6 \times 1.62 = 507 \text{ (kgf)} \\ & \text{(両側)} \end{array}$$

$$\text{② 節端から 0.3 cm までの材} \quad 391 \times 1.5 \times 0.3 \times 1.62 \times 2 = 570 \text{ (kgf)}$$

③ 節端から 0.4 cm の材

$$\text{式 (1) および Table 1 から} \quad \theta = \frac{15\sqrt{(1.25)^{1.6} \times 1.6}}{\sqrt{0.4}} - \frac{1.6}{2} - 5 = 30.1 \text{ (deg)}$$

$$\text{式 (4) から} \quad \sigma_{c30.1} = \frac{0.2 \times 391}{\sin^{2.7} 30.1 + 0.2 \cos^{2.7} 30.1} = 269 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

$$269 \times 1 \times 0.1 \times 1.62 \times 2 = 87 \text{ (kgf)}$$

④ 以下同様にして計算し、0.4 cm から材縁までの材の全負担荷重を求めると 6666 kgf となる。

したがって、推定最大荷重 P_{mest} は

$$P_{mest} = 507 + 570 + 6666 = 7743 \text{ (kgf)}$$

となり、実験によって求めた最大荷重 P_{mexp} 7840 kgf との比は

$$P_{mest}/P_{mexp} = 7743/7840 = 0.99$$

となって、推定値と実験値はほとんど一致する。

このような手順にしたがって Ⅲ.2. で実験した試験体について求めた P_{mest} および P_{mest}/P_{mexp} を示せば Table 11 のようになる。ただし、ベイツガ、ベイモミ、アカマツの半死節は試験体個々の生節と死節との割合が不明で式 (1) の N 値がきめがたいので除外してある。

Table 11 の P_{mest}/P_{mexp} と Table 9 の $(\sigma_c/\sigma_{c0})/(1-K_{ar})$ の値とを比較してみると、前者の方がやや小さい値をとる傾向がみられる。ここで P_{mest}/P_{mexp} を総括して示せば Table 12 のようになる。

表にみられるように、4 樹種全体での最小が 0.82 で、最大が 1.25 となっているが、平均で 0.99 とな

Table 11. 有節材の圧縮強度 一実験値と推定値との比較一

Results of compression test.

Comparison of the experimental results with estimated results.

No.	節の品質 節 Knot quality & Knot diameter ϕ (cm)	試験体 厚さ Thickness t (cm)	試験体 幅 Width b (cm)	実験 最大荷重 Experimental max. load P_{mexp} (kgf)	推定 最大荷重 Estimated max. load P_{mest} (kgf)	比 Ratio $\frac{P_{mest}}{P_{mexp}}$
(ベイツガ Hemlock)						
30-1	L 1.60	1.620	12.980	7840	7743	0.99
19-1	L 1.70	1.610	12.995	8290	8171	0.99
17-2	L 1.80	1.590	12.970	7600	8544	1.12
19-2	L 2.05	1.590	12.995	8290	8438	1.02
54-1	L 2.35	1.630	12.975	7260	8261	1.14
47-1	L 2.40	1.635	12.980	6300	7039	1.12
14-3	L 2.45	1.595	12.980	8100	7970	0.98
27-1	L 2.50	1.600	12.970	8880	8289	0.93
47-2	L 2.50	1.600	12.970	4940	6114	1.24
26-1	L 2.65	1.625	12.990	6900	6656	0.96
47-3	L 2.70	1.635	12.960	5870	6137	1.05
60-2	L 2.80	1.625	12.995	6040	6297	1.04
49-1	L 2.80	1.635	13.000	6180	6874	1.10
60-1	L 3.00	1.625	12.980	5600	6138	1.10
36-2	L 3.60	1.605	12.980	6980	6109	0.88
2-1	L 3.65	1.615	12.980	6290	7738	1.23
36-1	L 4.10	1.620	12.975	5970	5711	0.96
10-4	L 5.00	1.595	12.910	4900	4146	0.85
42-1	L 5.20	1.620	12.955	4130	3994	0.97
12-3	D 0.40	1.600	12.980	10530	10736	1.02
12-2	D 0.70	1.600	12.975	10800	10466	0.97
4-1	D 0.80	1.595	12.985	8260	8006	0.97
16-1	D 1.00	1.620	13.000	8940	8485	0.95
51-2	D 1.05	1.610	12.965	6400	6529	1.02
3-2	D 1.20	1.570	12.965	9630	8767	0.91
3-3	D 1.25	1.590	13.000	9200	8274	0.90
57-1	D 1.30	1.630	13.030	6300	7331	1.16
53-1	D 1.30	1.620	12.940	8770	8895	1.01
22-1	D 1.40	1.600	12.965	7600	7517	0.99
17-1	D 1.40	1.590	12.985	7850	7847	1.00
20-1	D 1.40	1.580	12.990	6000	6216	1.04
3-1	D 1.50	1.580	12.975	8540	8362	0.98
3-3-3	D 1.65	1.595	12.950	8370	8676	1.04
5-1	D 1.70	1.600	12.990	6590	6741	1.02
10-2	D 1.75	1.600	12.970	5790	6005	1.04
9-1	D 1.85	1.600	12.985	6200	5457	0.88

L : 生節 Intergrown knot

D : 死節 Dead knot

K : 抜節 Knot hole

Table 11. (つづき) (Continued)

No.	節の品質 節 Knot quality & Knot diameter ϕ (cm)	試験体 厚 Thickness t (cm)	試験体 幅 Width b (cm)	実験 最大荷重 Experimental max. load P_{mexp} (kgf)	推定 最大荷重 Estimated max. load P_{mest} (kgf)	比 Ratio $\frac{P_{mest}}{P_{mexp}}$
44-1	D 1.85	1.600	12.985	8210	8622	1.05
14-1	D 2.15	1.585	12.965	8330	7143	0.86
9-2	D 2.45	1.600	12.965	5570	5009	0.90
10-3	D 2.55	1.600	12.970	5830	5545	0.95
51-1	D 3.75	1.625	12.960	4500	4344	0.97
59-1	K 3.15	1.625	12.925	4900	4644	0.95
59-2	K 4.60	1.620	12.915	4000	3439	0.86
(ベ イ モ ミ Fir)						
61-2	L 1.70	1.600	12.940	7180	7044	0.98
61-4	L 1.80	1.605	12.985	6500	6670	1.03
21-2	L 1.95	1.590	12.875	7570	7255	0.96
18-1	L 1.95	1.600	12.975	7360	7408	1.01
61-3	L 1.95	1.600	12.975	6580	6568	1.00
21-3	L 2.05	1.600	13.000	6700	6776	1.01
11-2	L 2.05	1.590	12.975	5770	6079	1.05
56-1	L 2.20	1.620	12.960	6850	7017	1.02
50-3	L 2.20	1.630	12.995	6370	6862	1.08
11-1	L 2.30	1.590	12.960	5800	6440	1.11
50-1	L 2.40	1.616	13.030	6350	6732	1.06
21-1	L 2.45	1.580	12.955	7100	6961	0.98
25-1	L 2.55	1.615	12.955	7860	7687	0.98
50-2	L 2.55	1.620	12.030	6220	6656	1.07
25-2	L 2.65	1.625	12.965	7660	7449	0.97
32-2	L 2.65	1.590	12.915	6470	6847	1.06
48-2	L 2.65	1.630	13.020	6140	6461	1.05
61-1	L 2.70	1.630	12.950	6550	6591	1.01
46-2	L 3.20	1.600	13.000	6100	6668	1.09
29-1	L 3.50	1.600	13.000	5160	6108	1.18
28-2	L 3.70	1.620	12.975	5640	5416	0.96
39-2	L 3.90	1.620	12.990	6000	5763	0.96
46-1	L 4.00	1.610	12.950	5100	5583	1.09
1-1	D 0.55	1.600	12.950	8730	9038	1.04
52-3	D 0.90	1.620	13.000	6600	6329	0.96
52-1	D 1.10	1.625	13.010	6600	6118	0.93
52-2	D 1.50	1.640	13.030	6380	5941	0.93
40-1	D 1.55	1.590	12.940	6540	6289	0.96
32-1	D 3.00	1.600	12.990	6670	5899	0.88
56-2	K 1.45	1.630	12.960	8720	8107	0.93
15-1	K 3.10	1.600	12.975	5740	5789	1.01
13-1	K 3.15	1.610	12.975	6150	5341	0.87
39-1	K 3.15	1.620	12.990	6040	5597	0.93

Table 11. (つづき) (Continued)

No.	節の品質 Knot quality & Knot diameter ϕ (cm)	試験体 厚さ Thickness t (cm)	試験体 幅 Width b (cm)	実験 最大荷重 Experimental max. load P_{mexp} (kgf)	推定 最大荷重 Estimated max. load P_{mest} (kgf)	比 Ratio $\frac{P_{mest}}{P_{mexp}}$
(スギ Sugi)						
15-1-1	L1.15	1.613	9.329	4280	4199	0.98
15-2-1	L1.30	1.610	9.175	4040	4049	1.00
17-1-2	L1.50	2.008	9.698	4870	4968	1.02
2-2-1	L1.65	1.616	9.529	4610	4314	0.94
4-1-2	L1.75	2.017	9.758	5380	5193	0.97
18-1-1	L1.85	2.025	9.659	5280	4922	0.93
4-1-1	L2.00	2.036	9.934	5360	5288	0.99
6-1-1	L2.00	1.614	9.705	3580	3087	0.86
12-1-1	L2.10	1.616	9.659	3620	3334	0.92
16-2-1	L2.10	2.017	9.902	5200	5201	1.00
19-1-1	L2.20	1.621	9.446	3960	3801	0.96
8-1-1	L2.25	1.642	9.523	4250	3970	0.93
13-1-1	L2.35	1.613	9.462	4530	4774	1.05
7-1-6	L2.50	2.017	9.485	4760	4376	0.92
16-1-1	L2.55	2.020	9.798	5430	5069	0.93
7-1-1	L2.95	1.618	9.774	3800	3427	0.90
10-1-1	L3.10	1.615	9.636	4250	3822	0.90
7-1-3	L3.15	2.017	9.481	4710	4155	0.88
11-1-1	L3.30	1.615	9.854	3890	3233	0.83
7-1-5	D0.85	2.011	9.497	4840	4685	0.97
7-1-4	D1.65	2.022	9.481	4930	4236	0.86
3-3-1	K2.00	1.612	9.672	4400	4034	0.92
(アカマツ Akamatsu)						
8-8	L1.10	1.610	13.020	6880	7280	1.06
10-2	L1.95	1.610	13.000	6500	5451	0.84
5-3	L2.00	1.620	13.020	6900	8030	1.16
8-1	L2.85	1.615	13.015	6500	6168	0.95
8-6	L3.85	1.620	13.015	4570	5289	1.16
8-5	L4.45	1.625	13.020	4460	4752	1.07
7-3	L4.85	1.615	13.020	4080	4121	1.01
8-3	D1.27	1.625	12.985	7210	7237	1.00
8-2	D2.85	1.620	13.015	6500	5718	0.88
5-2	D4.00	1.620	13.020	5560	5604	1.01
6-1	D4.65	1.610	13.000	4770	4767	1.00
6-4	D4.70	1.610	13.000	5090	4696	0.92
5-1	D5.30	1.625	13.000	4630	4471	0.97
9-1	K2.95	1.610	13.000	6550	6157	0.94
6-3	K4.65	1.620	13.010	4900	4791	0.98
6-2	K4.90	1.620	13.000	4650	4447	0.96

Table 11. (つづき) (Continued)

No.	節の品質 Knot quality & Knot diameter ϕ (cm)	試験体さ Thickness t (cm)	試験体幅 Width b (cm)	実験最大荷重 Experimental max. load P_{mexp} (kgf)	推定最大荷重 Estimated max. load P_{mest} (kgf)	比 Ratio $\frac{P_{mest}}{P_{mexp}}$
3-1-1	L 0.85	2.010	9.282	6730	6501	0.97
4-1-3	L 2.75	2.011	9.215	5580	6062	1.09
4-1-1	L 2.80	2.014	9.225	5240	6023	1.15
3-2-1	L 3.40	2.039	9.223	4760	4439	0.93
3-1-2	L 3.55	2.007	9.353	4290	4530	1.06
1-1-1	L 3.60	2.020	9.338	4730	3863	0.82
4-1-2	D 2.30	2.002	9.215	5770	5832	1.01

Table 12. 有節材の圧縮強度 — P_{mest}/P_{mexp} の総括—
Results of compression test for knotted lumber.
Summary of P_{mest}/P_{mexp} .

樹種 Species	試験体数 Number of specimen n	節径の範囲 Range of knot diameter ϕ (cm)	最小 Min.	平均 Mean	最大 Max.	標準偏差 S. D.	変動係数 C. V. (%)
ベイツガ Hemlock	43	0.40~5.20	0.85	1.00	1.25	0.09	9.2
ベイモミ Fir	33	0.55~3.90	0.87	1.00	1.18	0.07	6.8
スギ Sugi	22	0.85~3.30	0.83	0.94	1.05	0.06	5.9
アカマツ Akamatsu	23	0.85~5.30	0.82	1.00	1.16	0.09	9.3
全体 Total	121		0.82	0.99	1.24	0.08	8.4

り、推定値と実験値はかなりよく一致していることから、このような手順による有節材圧縮強度の計算はほぼ妥当なものといえる。

IV 節による曲げ強度の低減

木構造では木材を曲げ部材として用いることが多い。はりの曲げ性状を解析するためには、引張および圧縮の性状を把握しておく必要があり、前の II 章、III 章においてまずそれら二者の性状を検討したが、とくに引張において節周辺の繊維走向の乱れを一般式で表現することを試み、これから計算したベイツガ、ベイモミ、スギ、アカマツの有節実大材の引張強度は、静的引張試験で求めた実際の引張強度とかなりよく一致することを確認した。

この章では、はじめに有節実大材の曲げ試験について述べ、つづいて引張強度や圧縮強度の場合と同様に、節周辺の繊維走向の傾斜の分布から有節材の曲げ強度を推定する方法について検討する。

なお、この実験は、筆者らが数年前に枠組壁工法のための建築用木材の強度等級区分法の確立を目的に

行った実験の一部であり、各試験体とも節の品質による区分は行っていない。

IV.1. 有節材の実大曲げ試験

IV.1.1. 実験材料および実験方法

1) 実験材料

ベイツガ、ベイモミ、スギ、アカマツの4樹種で、産地等は前述の引張試験および圧縮試験に用いた材と同じである。ただし、ベイツガ、ベイモミは未乾燥材として購入したものを、スギ、アカマツと同様に、含水率約15%に天然乾燥したものである。

断面寸法は、すべて枠組壁工法用材の規格を基準にし、寸法型式204材は 38×89 mm, 206材は 38×140 mm, 208材は 38×184 mm, 210材は 38×235 mmにプレーナー仕上げしてある。なお、各試験体はできるだけ丸味、腐れ、割れなど節以外の欠点のないものを選んだ。

2) 実大曲げ試験方法

曲げ破壊試験は、すべて節がはりの引張側になるようにして edge wise 加力で行った。204材の曲げ破壊試験の概要を Fig. 36 (a) に示した。たわみの測定は次のように行った。(1) ④ 240 cm の全スパンに対する中央のたわみを 0.01 mm 精度のデジタル式ダイヤルゲージで測定した。(2) 全スパンに対する中央のたわみを中立軸中央に物指を釘打ちし、望遠鏡によって測定した。(2) 曲げモーメントが一樣な荷重点間の中央部で標点間隔 50 cm に対するたわみを 0.01 mm 精度のデジタル式ダイヤルゲージで測定した。

つぎに、206, 208, 210材の曲げ試験の概要を Fig. 36 (b) に示す。たわみの測定は204材の曲げ試験方法と同様であるが(2)の標点間隔を120 cmとした。なお、この試験では試験体の横座屈を防止するために鋼製(試験体に接する面にはテフロンシートを貼りつけてある)のラテラルサポートを荷重点の両側と両支点に近い個所の合計6個所に配置した。

節径の測定は、前述の引張試験、圧縮試験に準じて行った。

なお、実大曲げ試験を行ったのち、各試験体の非破壊部分から $2.5 \times 2.5 \times 40$ cmの無欠点曲げ小試験体を各々5本ずつ木取り、JIS Z 2113に準じて中央集中荷重方式で曲げ試験を行い、各試験体ごとの基準曲げ強度、基準曲げヤング係数を求めた。

IV.1.2. 実験結果および考察

実験の結果を断面形状、樹種別に節の大きさ順に整理して示せば、Table 13~14のとおりである。従来、節を断面欠損とし材の断面係数の減少と見なして有節材の曲げ強度を評価しよう

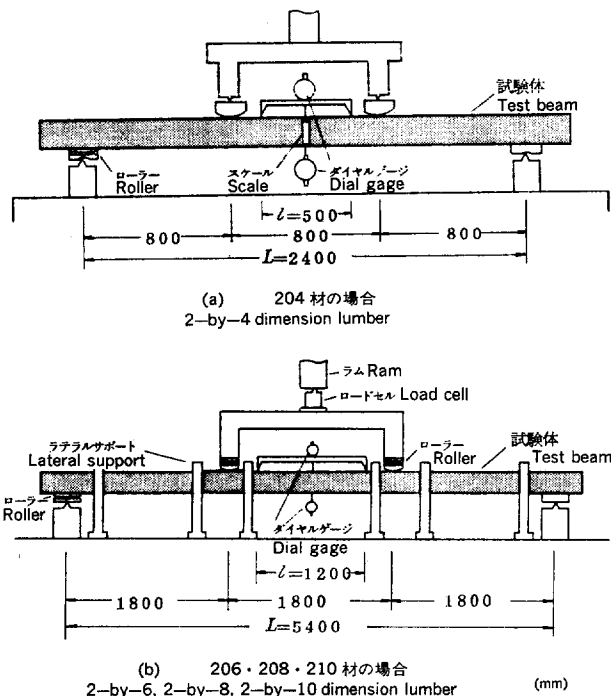


Fig. 36. 実大曲げ試験条件
Diagram of testing method for full size beam.

Table 13. 有節材の曲げ試験結果
Results of bending test for knotted lumber.

樹種 材種 Species	No.	無欠点小試験体 Small clear specimen			実大有節材 Full size knotted lumber				比 Ratio $\frac{\sigma_b}{\sigma_{b0}}$	ASTM 強度比 strength ratio S	(A) (B)
		比重 Specific gravity at test γ	曲げヤング係数 Bending Young's modulus E_{b0} (10^8 kgf/cm ²)	曲げ強度 Bending strength σ_{b0} (kgf/cm ²)	節径 Knot diameter ϕ (mm)	端距 Distance from the edge of the lumber to the edge of the knot f (mm)	曲げヤング係数 Bending Young's modulus E_b (10^8 kgf/cm ²)	曲げ強度 Bending strength σ_b (kgf/cm ²)			
H204	89	0.49	95.1	798	17	53	112.4	345	0.432	0.61	0.71
	439	0.52	123.3	865	21	51	138.2	402	0.464	0.57	0.81
	119	0.48	95.2	748	21	38	109.3	470	0.628	0.55	1.14
	514	0.49	111.2	859	31	50	116.5	260	0.302	0.47	0.64
F204	8	0.44	115.6	740	14	76	113.5	383	0.302	0.66	0.46
	56	0.42	93.0	674	16	78	101.1	381	0.565	0.63	0.90
	185	0.46	90.5	701	32	70	78.2	184	0.262	0.37	0.71
C204	41-1	0.37	87.2	613	8	81	90.2	366	0.597	0.75	0.80
	32-1	0.49	117.3	829	15	74	118.0	454	0.547	0.57	0.96
	20-3	0.36	62.7	514	20	69	65.5	267	0.272	0.57	0.48
	6-6	0.38	56.5	543	22	67	52.5	222	0.265	0.54	0.49
	24-4	0.40	87.4	672	23	66	88.0	268	0.377	0.52	0.73
	23-5	0.39	70.2	574	31	50	72.9	339	0.222	0.52	0.43
P204	49-4	0.50	92.7	858	10	80	106.8	437	0.509	0.70	0.73
	29-4	0.55	96.8	769	18	48	111.0	496	0.644	0.67	0.96
H206	621	0.48	112.5	825	39	109	99.6	176	0.213	0.47	0.45
F206	609	0.43	97.5	708	29	112	108.1	289	0.408	0.55	0.74
	605	0.49	105.6	771	35	105	93.2	252	0.327	0.50	0.65
H208	81	0.54	122.7	972	11	173	134.2	607	0.624	0.68	0.92
	83	0.49	118.0	875	15	159	119.0	438	0.501	0.68	0.74
	44	0.51	122.3	906	19	160	132.1	448	0.494	0.66	0.75
	52	0.53	92.8	813	20	165	103.4	467	0.574	0.65	0.88
	17	0.55	136.5	1004	23	158	125.7	337	0.336	0.63	0.53
	26	0.51	95.8	545	24	168	99.7	348	0.833	0.67	1.24
	111	0.52	131.3	906	24	153	137.5	381	0.420	0.63	0.67
	24	0.52	105.8	873	25	141	115.9	340	0.389	0.62	0.63
	60	0.48	97.5	832	26	118	94.0	470	0.565	0.61	0.93
	142	0.53	123.0	962	26	150	142.7	304	0.316	0.61	0.52
	144	0.49	124.6	930	28	142	128.5	303	0.325	0.60	0.54
	148	0.52	109.7	911	29	118	105.0	477	0.523	0.59	0.89
	30	0.48	123.4	917	32	163	114.7	263	0.287	0.55	0.52
	126	0.52	110.0	833	32	146	107.9	252	0.302	0.59	0.51

樹種 H: ベイツガ Hemlock
Species F: ベイモミ Fir
C: スギ Sugi
P: アカマツ Akamatsu

Table 13. (つづき) (Continued)

樹 種 材 種 Species Di- men- sional code	No.	無 欠 点 小 試 験 体 Small clear specimen			実 大 有 節 材 Full size knotted lumber				比 Ratio $\frac{\sigma_b}{\sigma_{b0}}$ (A)	ASTM 強度比	(A) (B)
		比 重 Specific gravity at test r	曲げヤン グ 係 数	曲げ強度	節 径 Knot diameter ϕ (mm)	端 距 Distance from the edge of the lumber to the edge of the knot f (mm)	曲げヤン グ 係 数	曲げ強度		ASTM strength ratio	
			Bending Young's modulus	Bending strength			Bending Young's modulus	Bending strength		S	
			E_{b0} (10^8) (kgf/ cm ²)	σ_{b0} (kgf/ cm ²)			E_b (10^8) (kg/ cm ²)	σ_b (kgf/ cm ²)		(B)	
H 208	56	0.51	117.3	846	34	135	130.3	274	0.324	0.55	0.59
	108	0.48	91.9	704	34	159	81.1	193	0.274	0.55	0.50
	47	0.55	111.4	901	35	108	114.9	388	0.431	0.55	0.78
	128	0.53	84.3	747	45	153	84.2	228	0.305	0.55	0.55
	117	0.53	108.5	869	47	100	105.1	233	0.268	0.47	0.57
F 208	133	0.50	92.3	779	60	124	77.1	69	0.079	0.39	0.20
	27	0.44	85.7	480	22	159	106.9	202	0.421	0.64	0.66
	127	0.47	95.8	676	23	167	96.9	314	0.464	0.63	0.74
	20	0.48	91.1	737	29	161	87.8	249	0.338	0.61	0.55
	74	0.48	103.6	837	30	154	87.6	213	0.254	0.57	0.45
	112	0.48	101.0	768	32	152	83.5	193	0.251	0.57	0.44
	11	0.45	115.2	797	33	159	130.4	339	0.425	0.56	0.76
	104	0.47	95.6	753	39	145	77.3	238	0.316	0.55	0.57
	120	0.49	103.9	759	45	139	80.1	176	0.231	0.48	0.48
	P 208	2-4	0.47	84.3	686	25	159	89.8	229	0.333	0.61
H210	746	0.52	103.0	944	24	207	107.5	516	0.547	0.67	0.82
	712	0.50	119.9	868	25	198	135.0	428	0.493	0.64	0.77
	745	0.53	119.7	964	35	209	121.9	330	0.342	0.56	0.61
	729	0.52	126.4	987	35	203	144.3	408	0.413	0.61	0.68
	717	0.52	107.2	500	39	204	110.3	222	0.254	0.56	0.45
	747	0.53	144.1	1074	41	172	130.4	367	0.342	0.61	0.56
	701	0.53	128.2	972	42	214	103.2	292	0.300	0.53	0.57
	F 210	736	0.45	101.3	758	22	203	111.0	506	0.655	0.67
F 210	720	0.50	110.7	474	44	194	104.1	216	0.289	0.54	0.54
	P 210	20-3	0.52	96.7	845	32	157	99.7	0.367	0.55	0.67

Table 14. 有節材の曲げ試験の総括 — $(\sigma_b/\sigma_{b0})/(\text{ASTM 強度比})$ —

Summary of bending test for knotted lumber.

 $(\sigma_b/\sigma_{b0})/(\text{ASTM strength ratio})$.

材 種 Dimensional code	試 験 体 数 Number of specimen n	最 小 Min.	平 均 Mean	最 大 Max.	標 準 偏 差 S. D.
204	15	0.43	0.73	1.14	0.21
206	3	0.45	0.61	0.74	0.15
208	29	0.20	0.64	1.24	0.20
210	10	0.45	0.67	0.98	0.16
全 体 Total	57	0.20	0.67	1.24	0.19

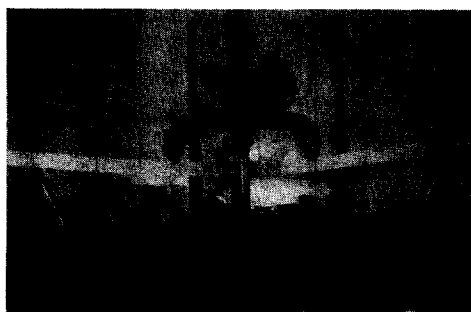


Photo. 13 実大曲げ試験 (204 材)
A 2-by-4 inch beam in position for test.



Photo. 14 実大曲げ試験 (206 材)
A 2-by-6 inch beam in position for test.

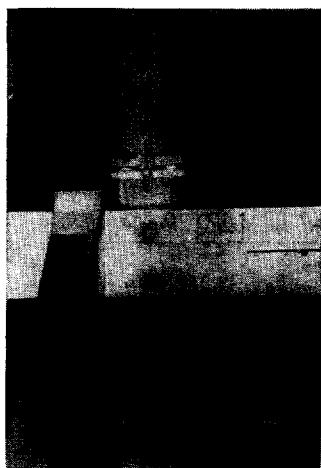


Photo. 15 荷重ブロックと
ラテラルサポート
Curved loading block
and lateral support.

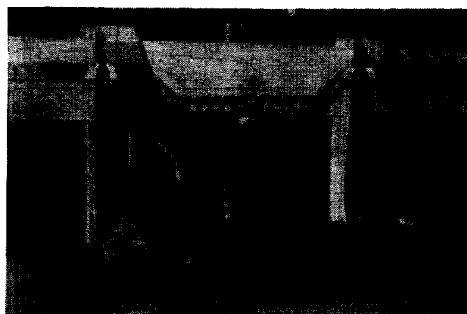


Photo. 16 曲げモーメント一様区間に取付
けたヨーク形たわみ測定装置
Yoke deflectometer assembly mounted
between uniform bending moment.

とする試みがなされており¹⁰⁾¹⁵⁾¹⁶⁾⁸⁷⁾, このような考え方が許容応力度の誘導方法としてもとり入れられてきている。しかし, 筆者らが数年前に桝組壁工法のための建築用木材の強度等級区分法の確立を目途に実験を行い, 前述のような考え方に基づいて計算した値と実験で求められた曲げ強度値を比較した結果, 必ずしも満足しうる適合度は示さなかった¹¹⁾。

ここで ASTM-D 245 による実大有節材の曲げ強度の算定方法を示せば, つぎのようになる。

節による曲げ強度の低減は, 樹種, 節の品質に無関係で, 節の大きさと節の位置のみが関係する

とし, 節の大きさは, 筆者の実験と同じく接線径で測定する。節の位置は, はりせいにあたる方向の位置によって edge knot (材縁節) と centerline knot (中央部) の二種類に区分している。ここで, edge knot とは, 節の中心が材の稜線から節径の 2/3 以内にあるものをいい, centerline knot とは, edge knot よりもさらにはりせいの中央に近づいて存在する節のことである。はりでは断面内の応力分布が均一ではなく, 外縁繊維に近いほど応力が増大するので, 節の影響についても外縁に近いものと中央部にあるものと区別しているわけである。ここで節によって低減されてもお残存している強度の無節材の強度に対する割合を強度比 S (strength ratio) と表現し, 節がないものの基準強度は無欠点小試験体から求めるようになっている。

強度比の算定式を示せば, つぎのとおりである。

$h = 6$ inch 以上で, 強度比 45% 以上の場合

$$S = 100 \left[1 - \frac{\phi - (1/24)}{h + (1/2)} \right]^2 (\%)$$

$h = 6$ inch 未満で, 強度比 45% 以上の場合

$$S = 100 \left[1 - \frac{\phi - (1/24)}{h + (3/8)} \right]^2 (\%)$$

全 h について, 強度比 45% 未満の場合

$$S = 100 \left[1 - \frac{\phi - (1/24)}{h} \right]^2 (\%)$$

ただし, ϕ , h は節径およびはりせいであって, inch で与えられる。

この式で計算すると, 節径 1/24 inch 以下では 100% の強度比があることになり, それより節径が増大するにともなって連続的に強度比も減少していくが, 強度比 45% のところで不連続な形となっている。これらの式は

$$SR = \frac{Z'}{Z} = \frac{\frac{b(h-\phi)^2}{6}}{\frac{bh^3}{6}} = \frac{(h-\phi)^2}{h^3} = \left(1 - \frac{\phi}{h} \right)^2$$

ここに, Z : 無節材の断面係数, Z' : 有節材の断面係数



Photo. 17 全スパンに対するたわみ測定装置
Deflectometer for measurement of deflection of the neutral axis of the beam at the center assembly mounted in the position on beam.

が原形¹⁵⁾であって、 ϕ の値および ϕ が小さい場合の h に若干調整を加えたものである。SR の式からわかるように節を単に断面の欠損とみなし、その欠除した断面の断面係数の減少率を求めているにすぎない。

一方、ASTM-D 245 では曲げ強度に形状係数 F (form factor) を乗ずることになっている。いいかえれば前述のように実大材の曲げ強度は無欠点小試験体から求められた基準曲げ強度に節径に対応する強度比を乗じ、その値にさらにはりせいに応じた form factor を乗じて低減させている。form factor の考え方は、1939 年スウェーデンの物理学者 W. WEIBULL によってとりあつかわれた "weakest link theory" に基づく材料の破壊の確率論³⁸⁾を、1966 年にが ASTM に導入したものである³⁹⁾。米国では無欠点曲げ小試験体の断面を 2×2 inch にとっているので form factor はつぎのように与えられている。

$$F = \left(\frac{2}{h} \right)^{\frac{1}{4}}$$

ここに、 h : はりせい (inch)

この式の他に depth effect factor (Cp) としてはりの曲げ強度をはりせいの大きさに応じて調整しているものもあり、つぎに示すようにいろいろの値が提案されている。

米国 Timber construction manual⁴⁰⁾

$$Cp = 0.81 \left(\frac{h^2 + 143}{h^2 + 88} \right) \quad (a)$$

NEWLIN & TRAYER⁴¹⁾, MARKWARDT⁴²⁾

$$Cp = 1.07 - 0.07 \sqrt{\frac{h}{2}} \quad (b)$$

R. G. PEARSON, N. H. KLOOT & J. D. BOYD⁴³⁾ および A. D. FREAS & M. L. SELLO⁴⁴⁾

$$Cp = \frac{5}{8} \left(\frac{h^2 + 143}{h^2 + 88} \right) \quad (c)$$

depth effect factor は、木材はりの曲げ弾性限界は引張よりも弱い圧縮側の圧縮弾性限界によってきまるとするところに根拠がおかれており、上の 3 式では (c) 式がもっとも厳しい値となっている。なお、前述の form factor はこれら 3 式の間間位の値となっている。このように木材強度の寸法効果についてはいろいろ論議のあるところであるが、筆者らが行った実験に ASTM-D 245 の form factor をメートルに換算するとともに基準となる無欠点小試験体のはりせいを 2.5 cm として適用すれば、つぎようになる。

204 材 $F = 0.870$

206 材 $F = 0.827$

208 材 $F = 0.802$

210 材 $F = 0.781$

また、この実験で求めた平均基準曲げ強度は、ベイツガ、ベイモミを一緒にして 838 kgf/cm^2 ($n = 2447$ 本)、スギでは 613 kgf/cm^2 ($n = 664$ 本)、アカマツでは 761 kgf/cm^2 ($n = 711$ 本) であった。これらの平均基準曲げ強度に ASTM-D 245 による節の大きさに応じた曲げ強度比と form factor を乗じて求めたのが Fig. 37 中の曲線である。はりせいの大きいものほど曲げ強度の実験値が ASTM の線よりかなり低いものが多くなっていることがわかる。この結果からも節を単に断面欠損とみなし、断面係数の減少比

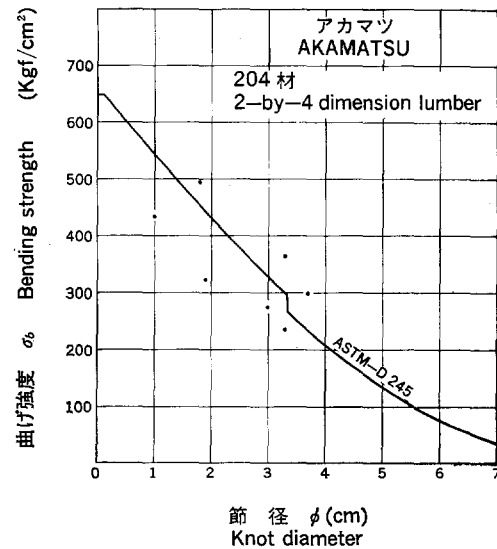
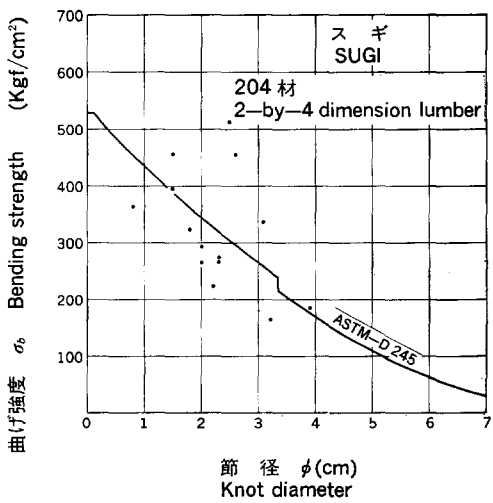
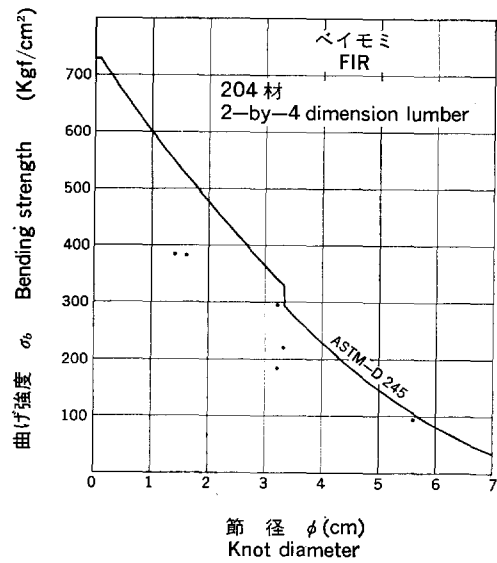
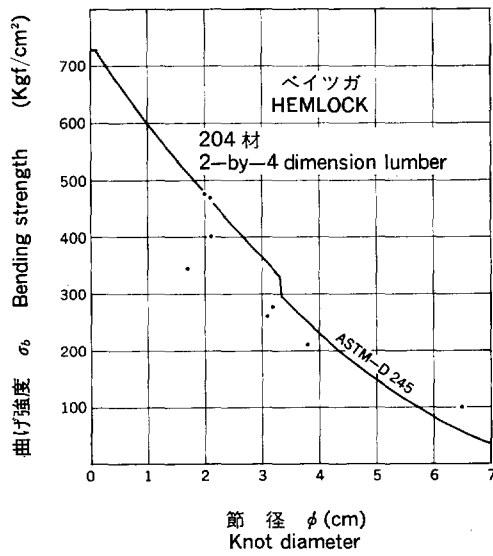


Fig. 37. 節径と曲げ強度との関係
Relation between bending strength and knot diameter.

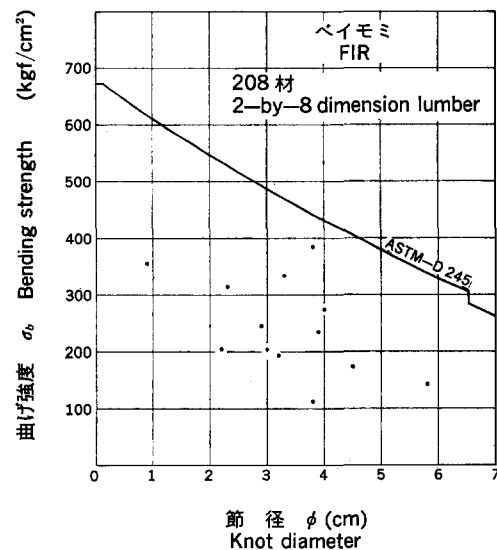
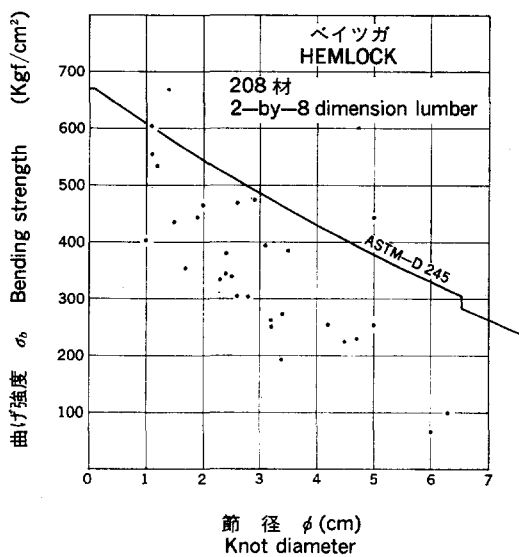
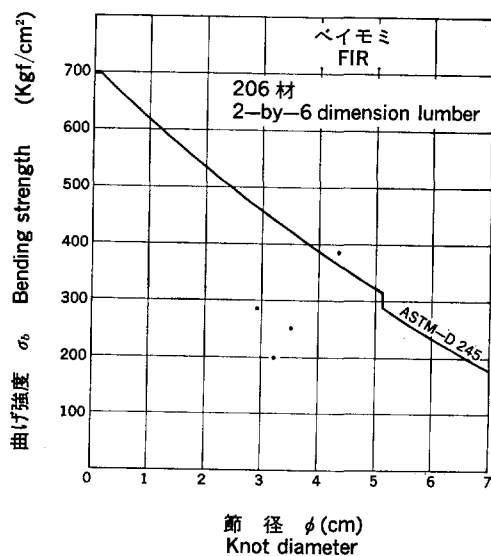
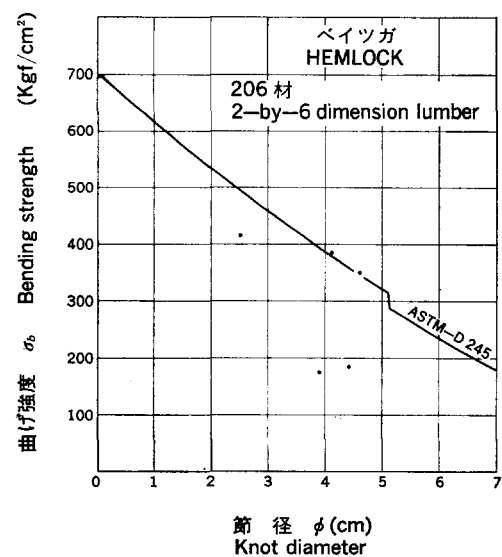


Fig. 37. (つづき) (Continued)

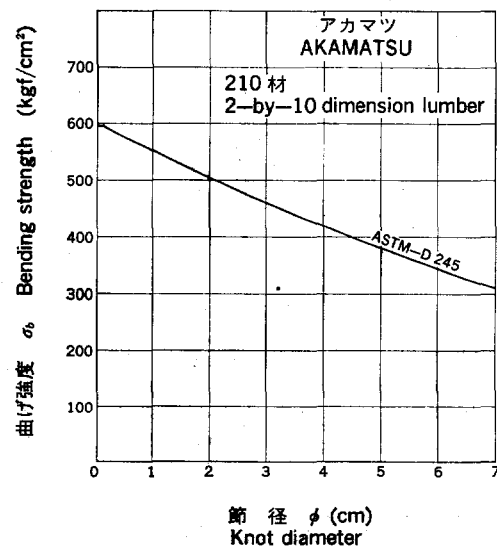
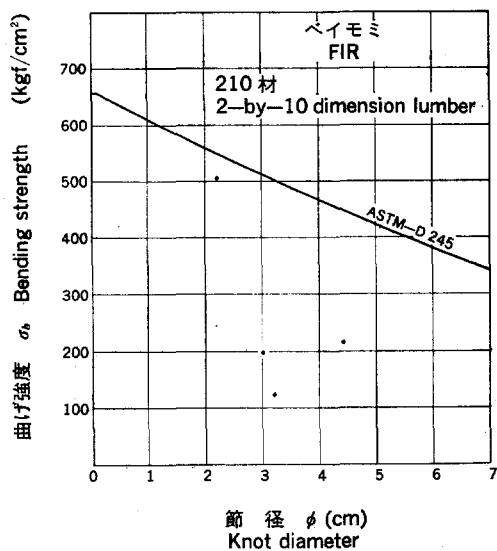
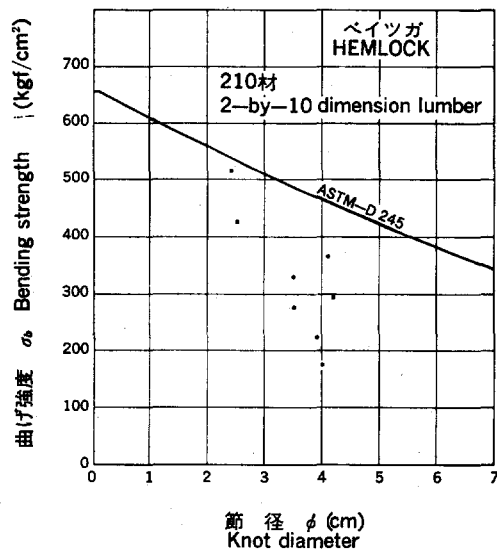
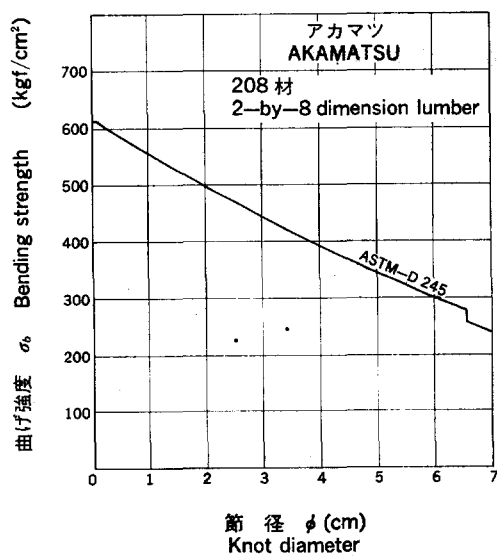


Fig. 37. (つづき) (Continued)

として有節材の曲げ強度を評価することはきわめて危険であるといえよう。

IV. 2. 節周辺の繊維走向傾斜の分布式による有節材の実大曲げ強度の推定

さきに節周辺の繊維走向の傾斜による引張強度の低減率を求め、これより有節材の引張強度を推定する方法を提案し、推定強度値と実験強度値がよく一致することを確めた。ここでは、同じ手法を用いて有節材の曲げ強度が推定できるかどうかを検討する。

まず、最初に解析にあたって前提となる条件をつぎのように決めることにする。

① はりの横断面は、はりが曲がった後も平面を保ち、かつ、はり軸に直交する。

一般に材料力学では、はりの曲げ応力を解く場合、はりの軸に直角な断面は、はりが弓なりに曲げられたのちも一平面であるとする BERNUILLI-EULLER の仮定が成立つということで行われているが⁴⁸⁾、有節材の横断面でもこの仮定が成立つものとする。

② $E_b = E_t = E_c$ とする。

木材の引張ヤング係数 E_t と圧縮ヤング係数 E_c は同じとみてよいとしている研究報告は数多くある⁴⁶⁾~⁴⁸⁾。さらに、この値は曲げヤング係数 E_b とも同一であるとする松本の報告がある⁴⁹⁾。ただし、この研究の無欠点小試験体の曲げ試験は、スパン-はりせい比 $L/h = 14$ の中央集中荷重方式で行っているので剪断付加たわみ分を補正する必要がある、真の曲げヤング係数を次式によって求めた。

$$E_T = E_{14} \left[1 + \frac{6}{5} \cdot \frac{E_{14}}{G} \cdot \left(\frac{L}{h} \right)^2 \right]$$

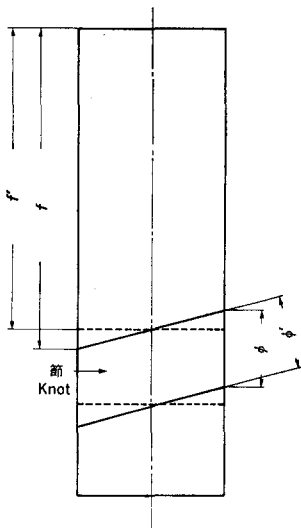


Fig. 38. 節径および端距の補正
Correction of knot diameter and the distance between the edge of the beam and the edge of the knot.

ϕ : Measured knot diameter
 ϕ' : Corrected knot diameter
 f : Measured distance between the edge of the beam and the edge of the knot
 f' : Corrected distance between the edge of the beam and the edge of the knot

ここに、 E_T : 真の曲げヤング係数、 E_{14} : スパン-はりせい比 $L/h = 14$ とし、中央集中荷重方式で求めた曲げヤング係数、 G : 剪断弾性係数で $E_{14}/G = 16$ とした⁵⁰⁾⁵¹⁾。

③ $\sigma_t = 1.5 \sigma_b$, $\sigma_b = 2 \sigma_c$ とする。

沢田⁴⁸⁾⁵²⁾は、多くの実験から、引張強度 σ_t と圧縮強度 σ_c との比を $\sigma_t/\sigma_c = r$ (r を関係特性値と称する) とすれば、 $\sigma_b = \sigma_c (3r - 1)/(r + 1)$ の関係のあることを提案し、さらに、針葉樹の場合、平均的にみて指標的な r の値は約 3.2 で分散域は 2.5~4.0 となり、総じて針葉樹の r の値として 3.0 を提案している。これにしたがい上式に $r = 3.0$ を代入すれば $\sigma_t = 1.5 \sigma_b$, $\sigma_b = 2 \sigma_c$ が得られる。

④ はりの圧縮側の σ_c は圧縮破壊荷重を超えても低下しないものとする。これは Fig. 30 からわかるようにそれほど大きな誤差にはならない。

⑤ 節の位置は常にはりせいの中央か、もしくは危険側(引張側)にあるものとする。

有節材の曲げ試験を行う場合、節を危険側におくのが一般で、前項の試験も同様の方法で加力している。

⑥ 節の引張強度は 0 とする。

III 章で検討したように、節の引張強度は材部の引張強度に

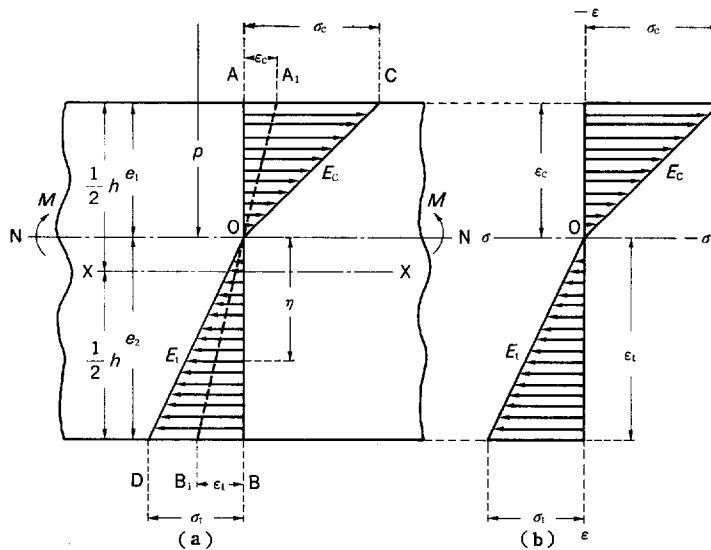


Fig. 39. 引張ヤング係数と圧縮ヤング係数が異なるはりの応力分布
Stress distribution in a bent beam having th different Young's modulus value in tention and in compression.

比べて無視できるほど小さい。

⑦ 節径の表現は、節軸がはりせいの材面に直交していないものは、直交した場合の節径に補正する。

Ⅲ章に述べた式 (1), (2), (3) の誘導は、節軸が材軸に直交している場合の節を扱ったもので、直交していない節の材表面にあらわれた節の接線径そのままの値では、節径の値が過大となり、 θ , E_t , σ_t の分布を決定する際の誤差となるので、Fig. 38 のようにして節径を補正するとともに端距も補正した値で計算する。

以上のことを前提として、有節材の曲げ応力の計算方法を、つぎのようにきめた。

最初にまず簡単モデルとして Fig. 39 のように均質であるが E_t と E_c が異なる材で幅が b 、はりせいが h の矩形断面はりに単純曲げモーメント M を作用するとき生ずる曲げ応力分布について検討してみる。

いま、外縁ひずみを ϵ_c および ϵ_t 、外縁応力を σ_c および σ_t 、縦中立軸の曲率半径を ρ とおき、はりの横断面は、はりが曲がったのちも平面を保ち、かつはり軸に直交するという①の仮定が成立するものとするれば、繊維ひずみ ϵ は中立軸からの距離 η に比例し、その分布の有様は直線 A_1B_1 で表わされる。

引張側と圧縮側を別々に考えると $\epsilon_c = \sigma_c/E_c = e_1/\rho$ 、 $\epsilon_t = \sigma_t/E_t = e_2/\rho$ であり、普通のはりにおけると同様につぎの式

$$\sigma_c = \frac{E_c e_1}{\rho}, \quad \sigma_t = \frac{E_t e_2}{\rho} \quad \dots\dots\dots(a)$$

が成立つ。

また、はりの平衡の第一条件として、矩形はりの場合、Fig. 39 の (a) に示した三角形 AOC と BOD の面積が等しくなければならない。すなわち

$$\sum_{i=1}^n \sigma_{ci} = \sum_{j=1}^m \sigma_{tj} \quad \dots\dots\dots(b)$$

が成り立つ。

なおまた、はりの第二平衡式により曲げ応力 σ_0 が断面の中立軸 N-N の周りに働くモーメントの代数和と外部からはりに作用する曲げモーメント M とは釣り合うから

$$M = \int_A \sigma \eta dA \quad \dots\dots\dots(c)$$

ただし、 $\int_A$ 面積 A についての積分となる。

つぎに有節材の断面内の応力分布を検討してみよう。まず式 (1) および式 (2) よりはりの節を含む断面内の E の分布を求め、②の仮定、 $E_c = E_t$ が成り立つものとして η をここでは 1mm ずつの層に分割してはりが曲げられたときのそれぞれの σ を求め、式 (b) の成立するような e_1 または e_2 ($e_2 = h - e_1$) を求めればはりの中立軸 N-N を決めることができる。

つぎに曲げモーメント M が次第に増大し、それにともない各層の ε も増大していくとき、引張側の最外側またはその近くの層で、その層のもっている最大引張強度を超えところで材全体の曲げ破壊が生じると考えれば、そのときの ε から①の仮定により断面内の各層の ε を求めることによって各層の σ が求まり、式 (c) によって、はりの破壊する曲げモーメント M が計算できる。各層における最大引張強度 σ_t は式 (3) より求めることができる。式 (1) および式 (2) の性格から最初に最外層で引張破壊を生ずるものが多いが、節径と端距の大小によっては必ずしも最外層ではなく数層内側になる場合もある。有節材の節周辺のヤング係数の分布および曲げ応力の分布をモデルで示せば Fig. 40 および Fig. 41 のようになる。

ただし、材部の引張側の最外層が最大引張強度に達するまえに圧縮側の外層附近が最大圧縮強度を超える場合があるが、このようなときは $\sigma_c = \sigma_0/2$ を限度として計算することとした。

IV. 1. で扱った実大有節材曲げ試験の実測最大曲げモーメントとここに述べた手順によって求めた推定

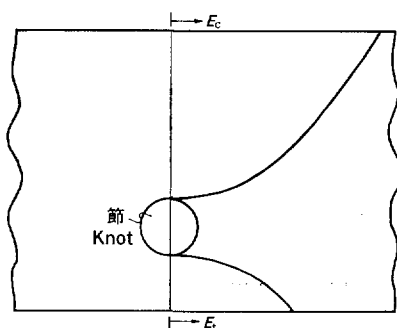


Fig. 40. 有節材のヤング係数の分布
Young's modulus distribution in the cross-section of a knotted lumber.

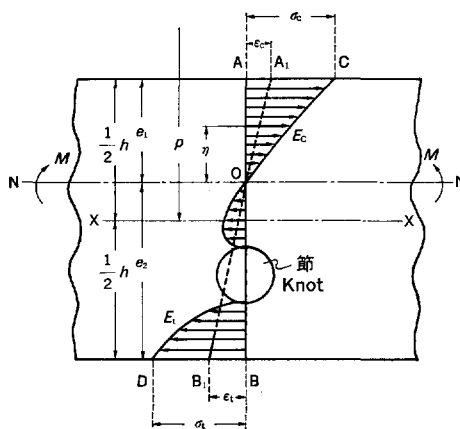


Fig. 41. 曲げられた有節木材はりの応力分布
Stress distribution in a bent knotted wooden beam.

Table 15. 有節材の曲げ強度 —最大曲げモーメントの実験値と推定値との比較—

Results of bending test for knotted lumber.

Comparison of the experimental bending moment with estimated bending moment.

樹 種 材 種 Species Di- men- sional code	No.	無欠点小試験体 Small clear specimen		実 大 有 節 材 の 実 験 値 Experimental values of full size knotted lumber							推定最大 曲げモー メント	比 Ratio	推定中 立軸の 位 置 Cor- rected posi- tion of neu- tral axis e_2 (cm)
		曲げヤン グ係数	曲げ強度	最 大 荷 重	補 正 節 径	補正端距 Cor- rected distance from the edge of the beam to the edge of the knot f'	はりせい	幅	最大曲げ モーメント	Esti- mated max. bending moment			
		Young's modulus	strength	Max. load	Cor- rected knot diam- eter	of the beam to the edge of the knot f'	Depth of beam	Width of beam	Max. bending moment	max. bending moment			
		E_{b0}	σ_{b0}	P_m	ϕ'	(mm)	h	b	M_{exp}	M_{est}			
		$\left(10^8\right)$ (kgf/ cm ²)	(kgf/ cm ²)	(kgf)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(kgf/ cm)	(kgf/ cm)			
H204	89	95.1	798	455	17	53	88.5	40.5	18200	19838	1.09	5.30	
	439	123.3	865	500	20	51	87.0	39.5	20000	16200	0.81	5.89	
	119	95.2	748	690	21	38	88.5	40.5	27600	23460	0.85	4.48	
	514	111.2	859	335	27	50	88.5	39.5	13400	8576	0.64	6.02	
F204	8	115.6	740	506	14	76	88.5	40.5	20240	15787	0.78	4.19	
	56	93.0	674	510	16	81	89.5	40.5	20400	15912	0.78	4.49	
	185	90.5	701	240	32	64	88.5	40.0	9600	7008	0.73	3.68	
C204	41-1	87.2	613	460	8	79	89.0	38.0	18400	15640	0.85	4.92	
	32-1	117.3	829	570	20	72	89.0	38.0	22800	15048	0.66	3.87	
	20-3	62.7	514	335	20	72	89.0	38.0	13400	9246	0.69	3.87	
	6-6	56.5	543	275	22	67	88.5	38.0	11000	8250	0.75	3.61	
	24-4	87.4	672	335	23	66	88.5	38.0	13400	9648	0.72	3.66	
	23-5	70.2	574	425	23	50	89.0	38.0	17000	13090	0.77	5.67	
P204	49-4	92.7	858	555	11	80	89.5	38.0	22200	20424	0.92	4.26	
	29-4	96.8	769	634	13	48	89.5	38.5	25360	28403	1.12	4.49	
H206	621	112.5	825	243	39	109	138.0	39.0	21870	23838	1.09	6.34	
F206	609	97.5	708	402	29	112	138.5	39.0	36180	26773	0.74	6.39	
	605	105.5	771	349	35	105	138.5	39.0	31410	22929	0.73	6.06	
H208	81	122.7	972	1500	16	173	185.5	39.0	135000	118800	0.88	9.00	
	83	118.0	875	1087	17	159	184.0	39.5	97830	90982	0.93	10.72	
	44	122.3	906	1105	19	160	184.5	39.0	99450	84533	0.85	11.03	
	52	92.8	813	1148	20	165	184.5	39.0	103320	84722	0.82	8.83	
	17	136.5	1004	860	23	158	187.5	39.0	77400	83592	1.08	11.52	
	26	95.8	545	882	18	168	185.5	39.0	79380	61123	0.77	8.82	
	111	131.3	906	913	24	153	183.0	38.5	82170	66558	0.81	11.47	
	24	105.8	873	845	25	141	186.0	39.0	76050	77571	1.02	11.63	
	60	97.5	832	1170	26	118	186.5	38.5	105300	104247	0.99	10.90	
	142	123.0	962	740	26	150	185.0	38.5	66600	69264	1.04	11.76	
	144	124.6	930	746	28	142	185.0	39.0	67140	67140	1.00	11.90	

樹種 H: ベイツガ Hemlock
Species F: ベイモミ Fir
C: スギ Sugi
P: アカマツ Akamatsu

Table 15. (つづき) (Continued)

樹種 材種 Species	No.	無欠点小試験体 Small clear specimen		実大有節材の実験値 Experimental values of full size knotted lumber						推定最大 曲げモーメント	比 Ratio	推定中立軸の位置 Corrected position of neutral axis	
		曲げヤング係数	曲げ強度	最荷大重	補正節径	補正端距	はりせい	幅	最大曲げモーメント	Estimated max. bending moment			
		Young's modulus	Bending strength	Max. load	Corrected knot diameter	distance from the edge of the beam to the edge of the knot	Depth of beam	Width of beam	Max. bending moment	max. bending moment			
		E_{b0} $\left(10^8 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\right)$	σ_{b0} $\left(\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\right)$	P_m (kgf)	ϕ' (mm)	f' (mm)	h (mm)	b (mm)	M_{exp} $\left(\frac{\text{kgf}}{\text{cm}}\right)$	M_{est} $\left(\frac{\text{kgf}}{\text{cm}}\right)$			
H208	148	109.7	911	1224	29	118	187.5	39.5	110160	104652	0.95	11.37	
	30	123.4	917	640	35	163	184.5	38.5	57600	72000	1.25	9.38	
	126	110.0	833	612	29	146	185.0	38.5	55080	53428	0.97	11.96	
	56	117.4	846	667	34	135	183.5	39.0	60030	45623	0.76	12.13	
	108	91.1	704	481	36	148	184.5	39.5	43290	32035	0.74	12.17	
	47	111.4	901	1013	35	108	184.5	38.5	91170	84788	0.93	11.41	
	128	84.3	747	577	34	151	186.5	39.5	51930	38428	0.74	12.17	
	117	108.5	869	710	47	100	187.0	39.5	63900	60705	0.95	11.89	
	133	92.3	779	178	60	124	187.5	39.6	16020	13617	0.85	13.47	
	F208	27	85.7	480	484	22	159	183.0	38.5	43560	38768	0.89	11.20
		127	95.8	676	782	23	167	184.0	39.5	70380	71084	1.01	8.98
		20	91.1	737	628	26	155	187.0	39.0	56520	55955	0.99	11.78
		74	103.6	837	560	32	154	188.0	39.0	50400	49896	0.99	12.14
		112	101.0	768	484	32	152	186.0	39.0	43560	44431	1.02	12.03
11		115.2	797	813	33	159	185.0	38.0	73170	62926	0.86	8.97	
P208	104	95.6	753	603	35	151	185.5	39.5	54270	53185	0.98	8.56	
	120	103.9	759	468	45	139	183.5	38.5	42120	37487	0.89	8.10	
	2-4	84.3	686	550	26	159	184.0	38.0	49500	56430	1.14	8.81	
	H210	746	103.0	944	2000	19	207	234.5	38.0	180000	160200	0.89	13.43
		712	119.1	868	1646	25	198	234.0	38.0	148140	122956	0.83	14.30
		745	119.7	964	1298	39	208	234.0	38.5	116820	126166	1.08	11.88
		729	126.4	987	1094	30	189	234.5	38.5	98460	123075	1.25	14.71
		717	107.2	500	864	39	204	234.5	38.0	77760	61430	0.79	11.65
		747	144.1	1074	1415	30	172	233.5	38.0	127350	156641	1.23	14.54
		701	128.2	972	1133	45	214	234.0	38.5	101970	124403	1.22	12.44
F210	736	101.3	758	1487	19	196	234.5	39.0	133830	145875	1.09	13.37	
	720	110.7	474	857	43	194	235.0	38.5	77130	52448	0.68	11.20	
P210	20-3	96.7	845	1256	41	150	235.0	38.5	113040	102866	0.91	15.04	

Table 16. 有節材の曲げ強度の推定総括
最大曲げモーメントの実験値と推定値と比 M_{est}/M_{exp} .
Summary of M_{est}/M_{exp} .

材 種 Dimensional code	試 験 体 数 Number of specimen n	最 小 Min.	平 均 Mean	最 大 Max.	標 準 偏 差 S D.	変 動 係 数 C. V. (%)
204	15	0.64	0.81	1.12	0.14	17.4
206	3	0.73	0.85	1.09	0.20	24.0
208	29	0.74	0.93	1.25	0.12	12.8
210	10	0.68	1.00	1.25	0.20	20.4
全 体 Total	57	0.64	0.91	1.25	0.16	17.2

最大曲げモーメントを比較してみれば Table 15 のようになる。

表からわかるようにかなりよく一致している。この結果を整理してまとめたものが Table 16 である。全体の平均が 0.94 であるが最小で 0.63, 最大で 1.25 を示している。また 0.6 台は 204 材の 1 本だけで他は 0.7 台以上になっている。

節軸がはりせいの材面に直交していないものの節径と端距を補正したことや生節と死節を区別していないことを考慮すれば実際は、もう少し適合度が向上することも期待できる。はりせいの大きいものの方が適合度がよく、枠組壁工法では 206 以上、特に 208, 210 材が曲げ部材として多く使用されることを考えればきわめてよく一致しているといえる。

なお、各試験体について、はり断面内の応力分布の計算結果を XY プロッターを用いて描かせたが、そのいくつかの例を示せば Fig. 42 のようになる。参考のために応力分布図のとともにその試験体の破壊の状況を写真で示したので参照されたい。

以上の結果を考察するとつぎのようにになろう。

① 有節材の曲げ強度も節周辺の繊維走向の傾斜の分布から十分な精度で推定が可能であることが確認された。

② 節を単に材の断面欠損とし、断面係数の減少として推定することはきわめて危険である。また、ASTM-D 245 では edge knot を節の中心が材の稜線から節径の 2/3 以内にあるものとして区分しているが、式 (1) からわかるように節によって繊維走向の傾斜している範囲はこのような小さな範囲にとどまるものではなく、2/3 以上はなれているものを centerline knot として曲げ強度の低減を緩和しているのは危険である。

③ ここに試みた推定の計算には form factor はいれていない。それにもかかわらず推定値と実験値がよく一致していることはつぎのように考えられる。WEIBULL があつかった “weakest link theory” はかなり小さな欠点が分散しているガラスの引張試験から導びかれた理論であって、木材の節ならびにそれにとまなう繊維走向の乱れのような巨大な欠点を対象とするものではないと思われる。すなわち、節のような決定的な欠点は破壊の確率論的な取扱いの範囲外にあるものと思われる。

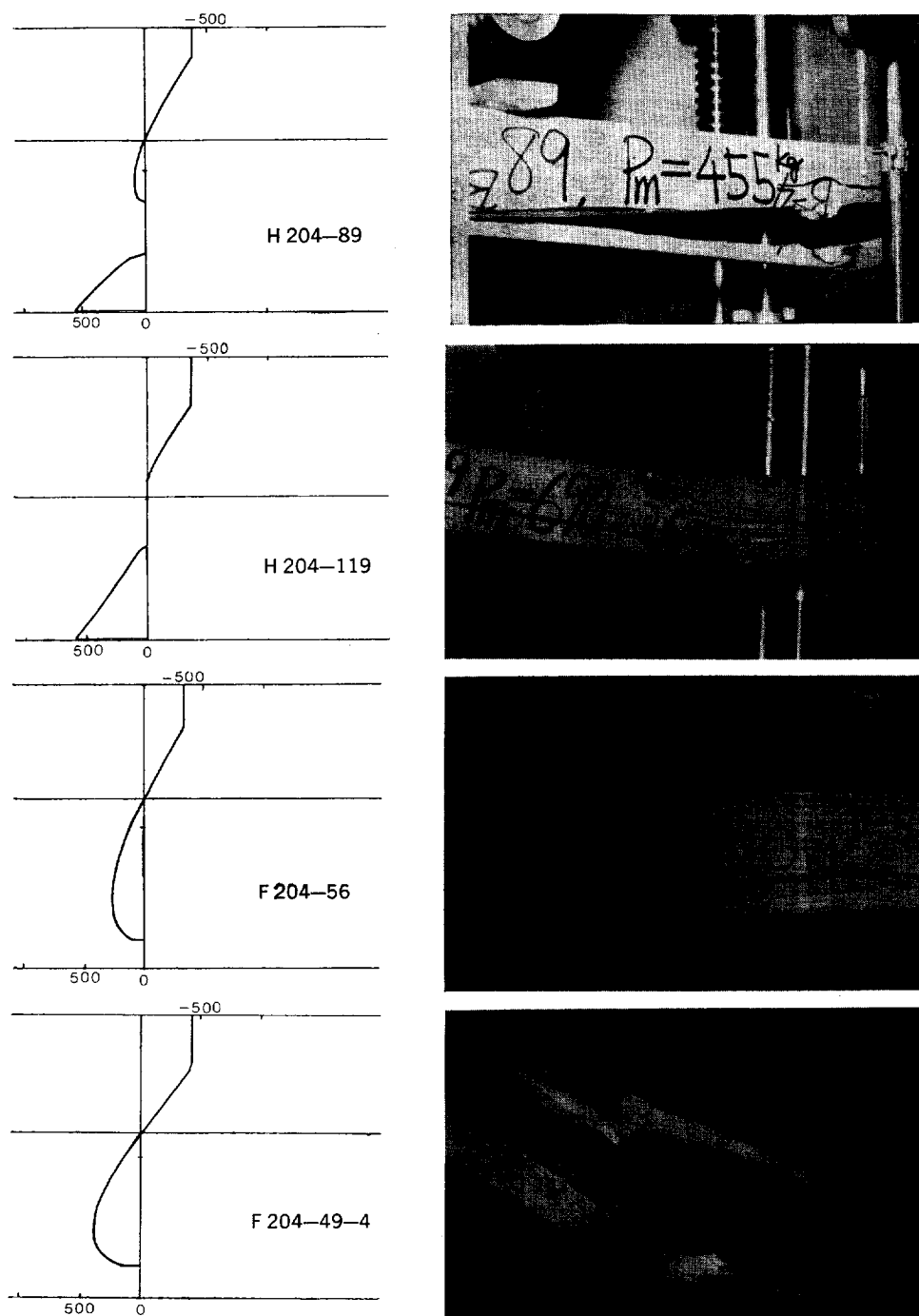


Fig. 42. 有節材の曲げにおける応力分布および破壊状況の例
Examples of stress distribution in a bent wooden beam and results from bending tests.

中間の横線は中立軸，応力 0 のところが節の位置
正数値：引張応力 (kgf/cm²)，負数値：圧縮応力 (kgf/cm²)
Intermediate horizontal line is neutral axis, Knot position where the stress is zero
Positive value : Tensile stress kgf/cm², Negative value : Compressive stress kgf/cm²

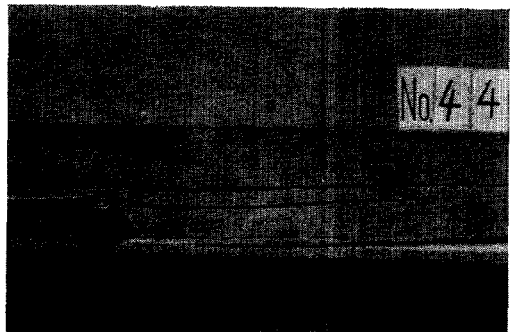
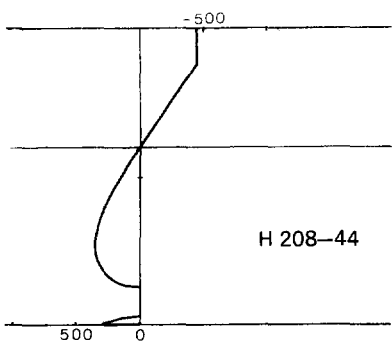
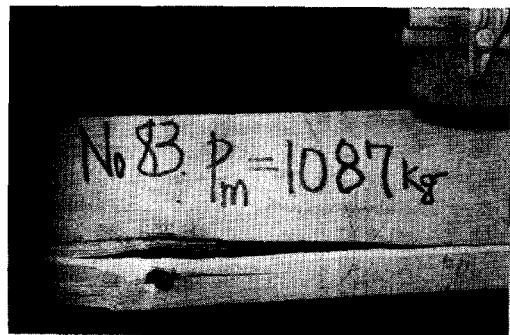
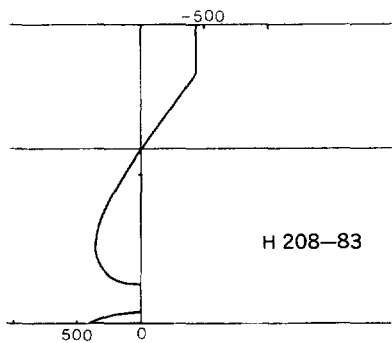
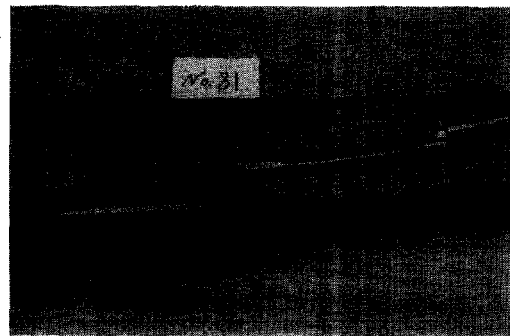
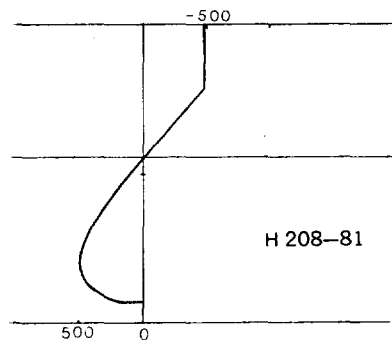
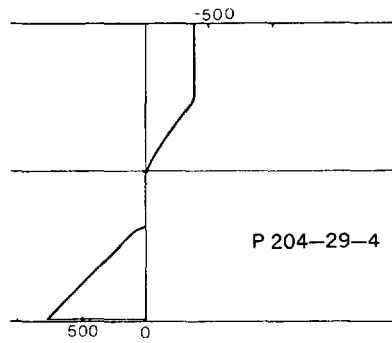


Fig. 42. (つづき) (Continued)

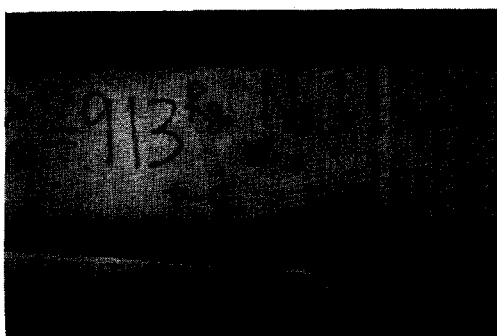
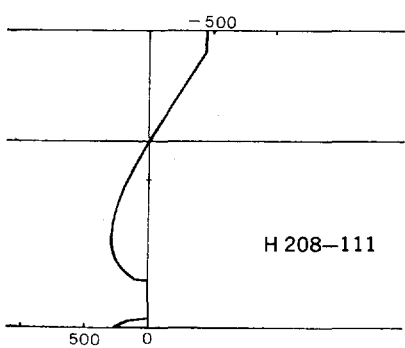
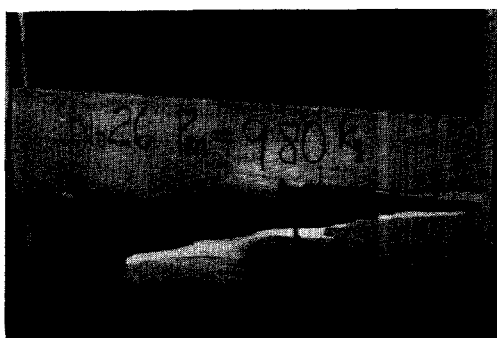
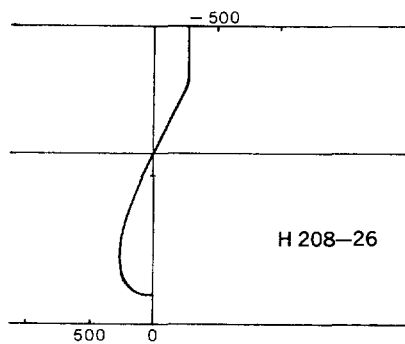
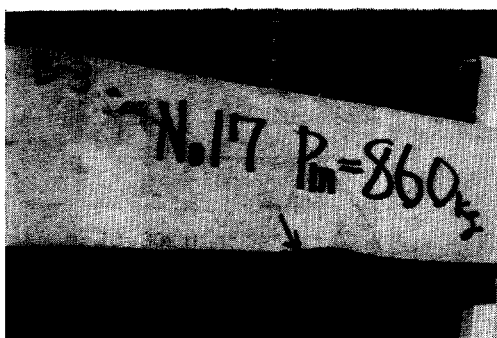
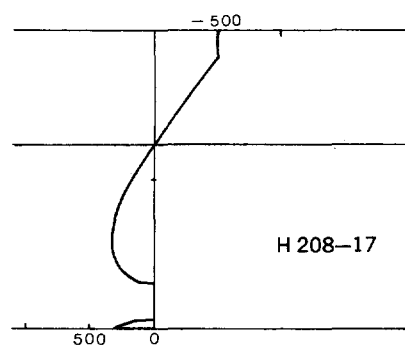
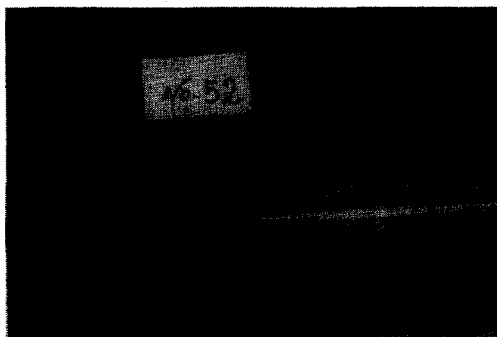
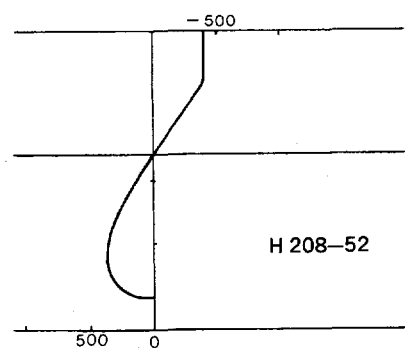


Fig. 42. (つづき) (Continued)

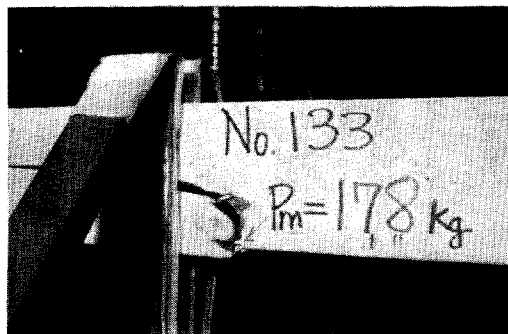
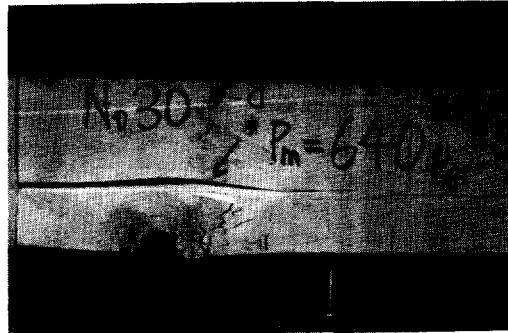
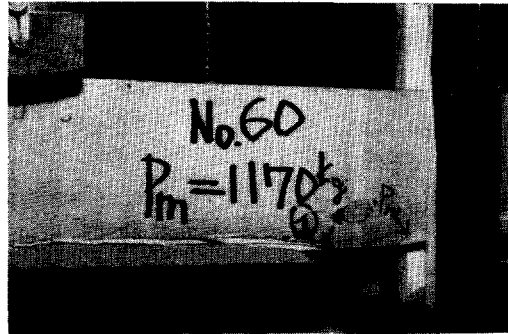
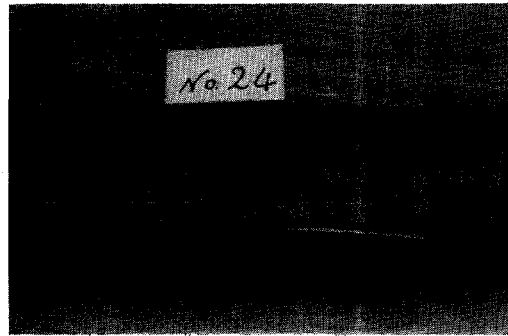
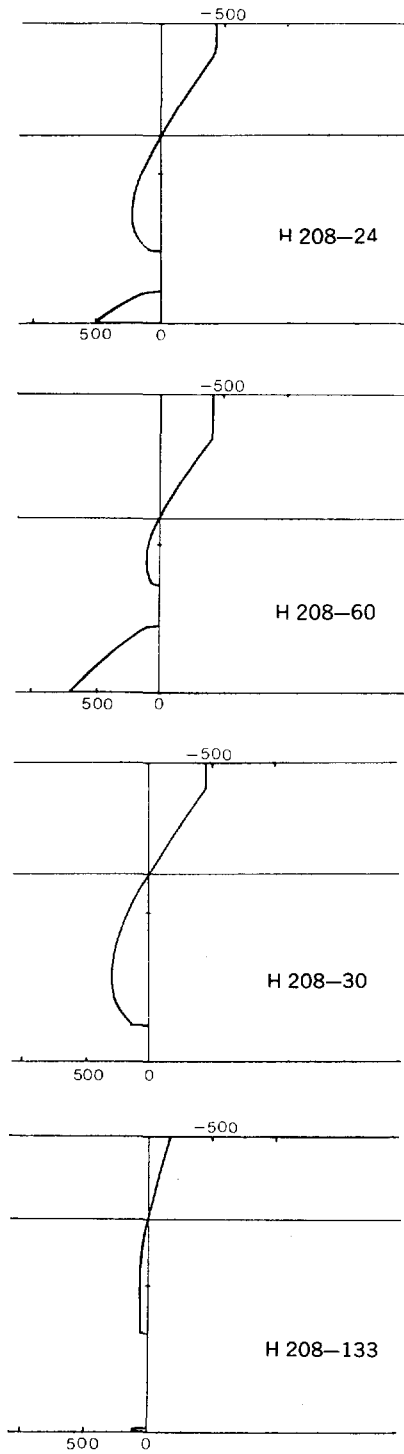


Fig. 42. (つづき) (Continued)

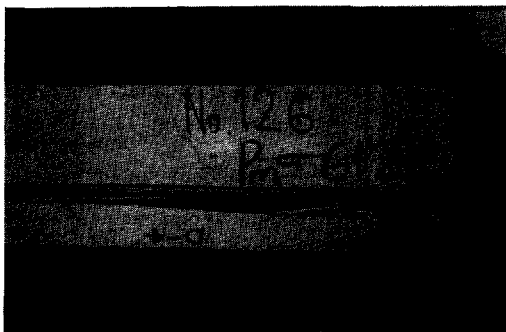
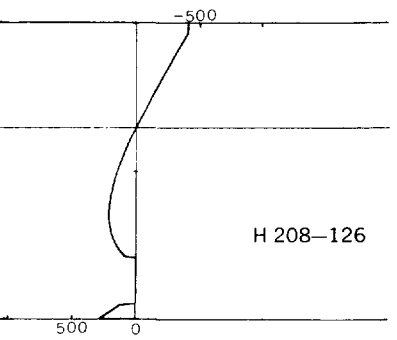
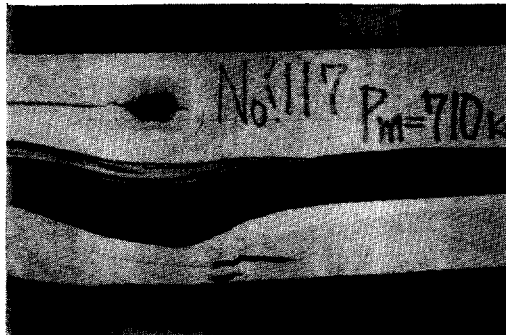
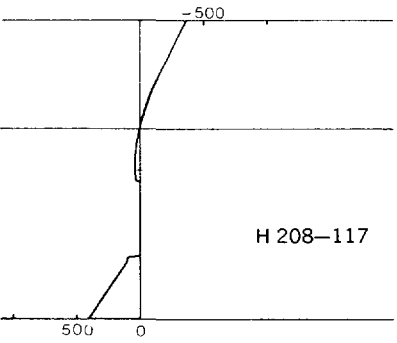
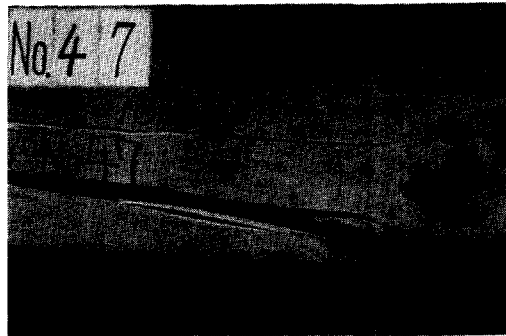
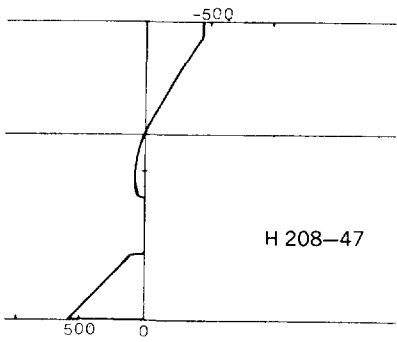
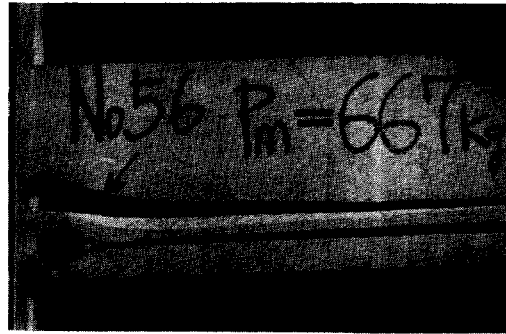
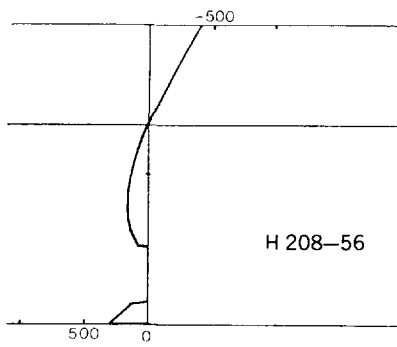


Fig. 42. (つづき) (Continued)

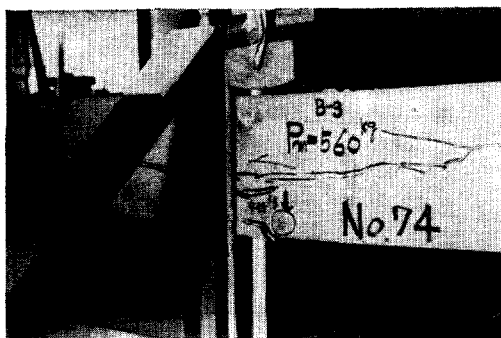
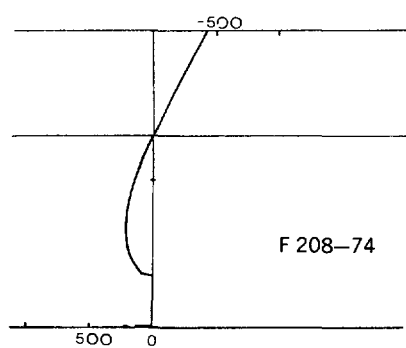
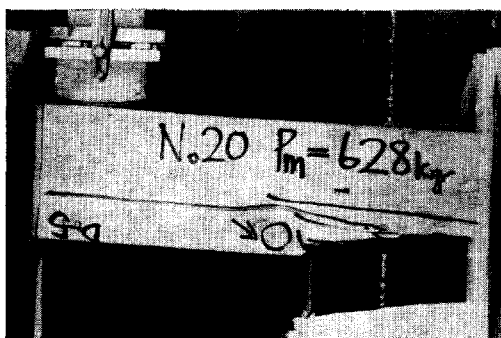
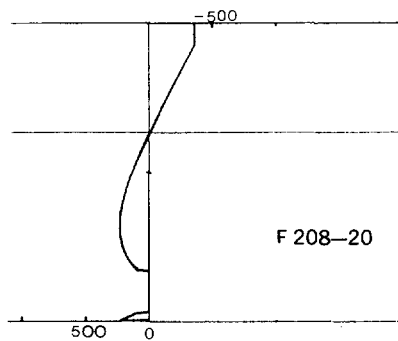
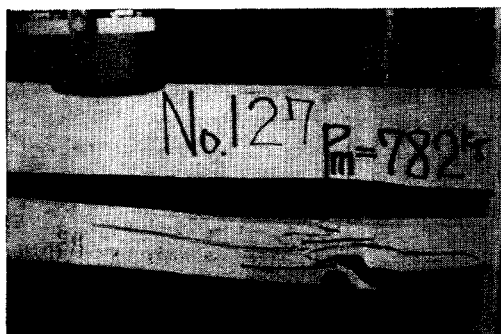
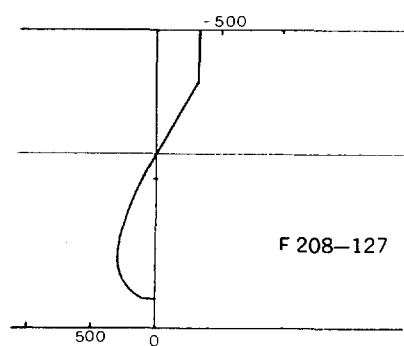
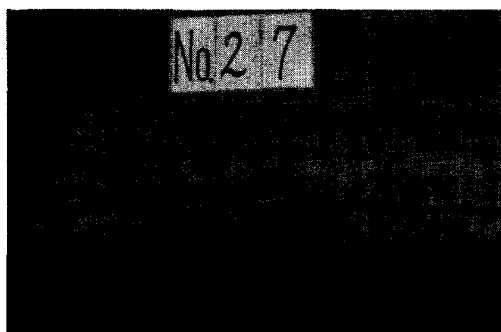
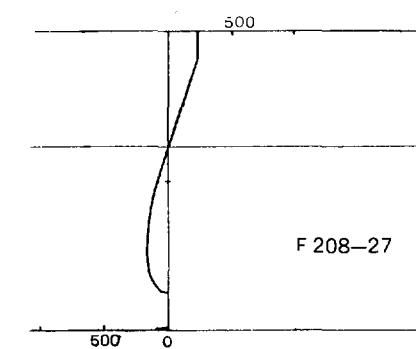


Fig. 42. (つづき) (Continued)

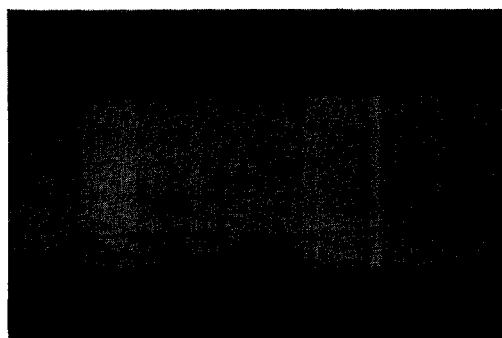
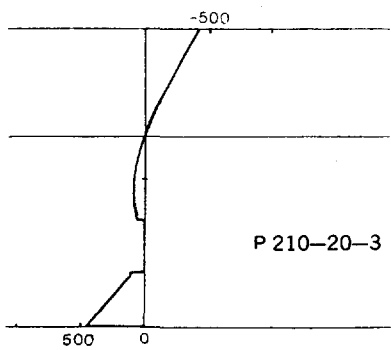
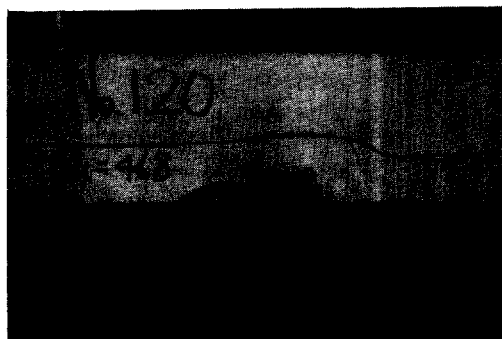
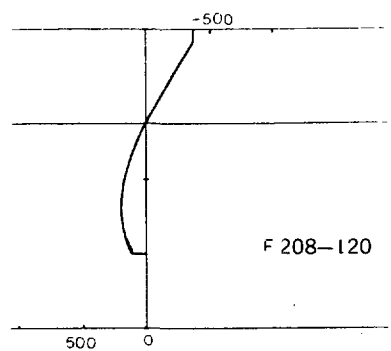
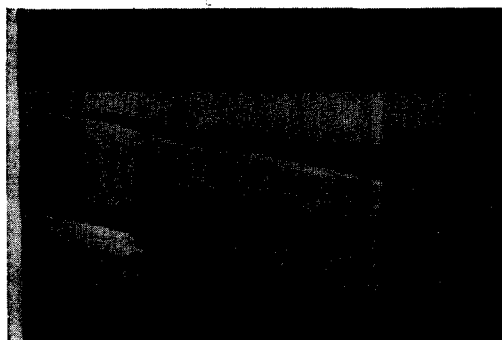
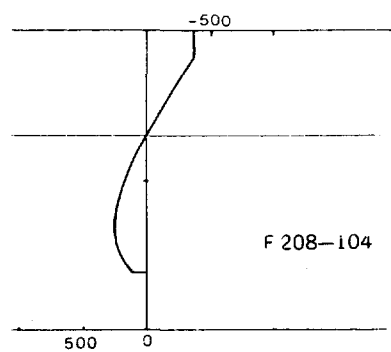
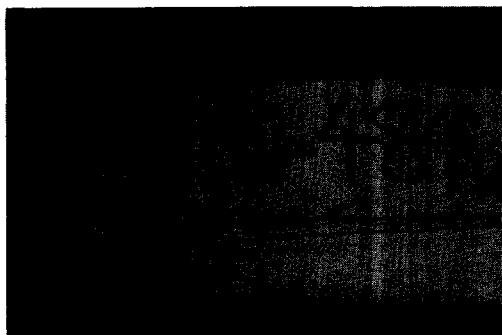
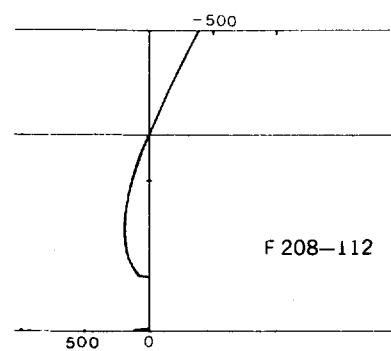


Fig. 42. (つづき) (Continued)

V 総 括

実大の木材の強度に最も大きな影響を与えるのは節の存在である。従来、有節材の諸強度の推定、あるいは木材の応力等級区分法では、節を材の断面欠損として扱っているものが多い。しかし、節を単に断面欠損としてのみ扱ったのでは、実際の有節材の強度とあわないことが、多くの研究者によって指摘されてきた。有節材の強度低減は、節そのものの強度のほかに、節の周辺における繊維走向の傾斜が大きく関与していることは明らかであるが、現在まで、この分野に関する研究は皆無であるといつてよい。この研究は、特に節周辺における繊維走向の傾斜の大きさ、および範囲を引張試験によって解析し、その結果を基礎にして有節材の引張、圧縮、曲げ強度を推定することを試み、実際の実験値と推定値がかなりよく一致することを確かめた。

節周辺における繊維走向の傾斜の程度は、有節材の実大強度試験の結果から、樹種や生節、死節のような節の品質によって異なることが予想され、繊維走向の傾斜の程度の大きいものとしてアカマツ、小さいものとしてスギ、中間のものとしてベイツガ、ベイモミの4樹種をとりあげ、それぞれ生節、死節別に節の大きさとの関連で、つぎのような節周辺における繊維走向の傾斜の分布の一般式を導いた。

$$\theta = \frac{15\sqrt{N\phi}}{\sqrt{x}} - \frac{\phi}{2} - 5 \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 θ ：節周辺における繊維走向の傾斜 (deg.)

N ：樹種および節の品質によってきまる定数、 $0.90 \leq N \leq 1.30$

ϕ ：節の平均接線径 (cm)

x ：径節の端からの水平距離 (cm)

また、 θ と引張強度 $\sigma_{t\theta}$ 、および引張ヤング係数 $E_{t\theta}$ との関係を実験により確め、HANKINSONの式を適用して、つぎのような一般式を導いた。

$$\sigma_{t\theta} = \frac{0.1 \sigma_{t0}}{\sin^{1.4} \theta + 0.1 \cos^{1.4} \theta} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 σ_{t0} ：繊維走向傾斜 0° のときの基準引張強度 (kgf/cm²)

$$E_{t\theta} = \frac{0.15 E_{t0}}{\sin^{1.4} \theta + 0.15 \cos^{1.4} \theta} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 E_{t0} ：繊維走向傾斜 0° のときの基準引張ヤング係数 (kgf/cm²)

これらの式(1)、(2)、(3)から求めた有節材の引張強度の推定値と実験値との比は、平均0.94となり、かなりよく一致することが確かめられた。ここで推定値の計算には節周辺の応力集中に関する係数を加えていないが、計算の結果からみて応力集中の絶対値はそれほど大きくはないものと推察される。また、節そのものの引張強度は生節でもほとんどのものが割れが入っていることなどから耐力はないものとして差し支えないことが確かめられた。

有節材の圧縮強度についても同様の解析を行い、 θ と圧縮強度 $\sigma_{c\theta}$ との関係を実験によって確め、つぎのような一般式を導いた。

$$\sigma_{c\theta} = \frac{0.2 \sigma_{c0}}{\sin^{2.7} \theta + 0.2 \cos^{2.7} \theta} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 σ_{c0} ：繊維走向の傾斜 0° のときの基準圧縮強度 (kgf/cm²)

この式(4)と前述の式(1)とから求めた有節材の圧縮強度の推定値と実験値との比は、平均0.99

となり、かなりよく一致することが確かめられた。ただし、この推定計算を行う場合には、生節の圧縮強度を $0.5\sigma_{co}$ 、節をとりまいて 3~4 mm ($\phi \leq 4.5$ cm の場合 3 mm, $\phi \geq 4.6$ cm の場合 4 mm) の範囲の材は密度の大きい材となっているので、この部分の圧縮強度を $1.5\sigma_{co}$ に調整する必要がある。

なお、有節材の圧縮強度は、従来からいわれているとおり、節を単に材の断面欠損とみなして推定しても大差はない。

有節材の曲げ強度についても、式 (1), (2), (3) を使って節を含むはりの横断面の応力分布を求め、最大曲げモーメントを推定して実験によって求められた最大曲げモーメントと比較したところ平均 0.91 となり、かなりよく一致することが確かめられた。曲げ試験には梓組壁工法用材の 204, 206, 208, 210 材について解析を行ったが、同工法で主に曲げ材として使われる、はりせいの大きい 208, 210 材の方が 204, 206 材よりも実験値との適合がよかった。また、ここで行った曲げ強度の推定計算には、米国 ASTM で採用している Form factor は入れていない。この Form factor は BOHANNAN が WEIBULL の weakest link theory を木材はりに導入したものであるが、節のような大きい欠点のある材料にこの理論を適用するのは適当でないと考えられる。

以上の結果から、有節材の諸強度は節そのものの強度のほかには節周辺の繊維走向の傾斜が強く関係し、むしろそれが本質的なものであることが数値的に確認された。このことから、必ずしも多大の経費と労力を要する実大実験を行わなくても、かなりの精度で有節材の強度が推定できることが確かめられた。ここに提案した推定法を広く応用されることを期待したい。

謝 辞

この研究をまとめるに際してご指導を賜った、九州大学名誉教授 松本 島博士に対し、衷心より感謝の意を表します。

また、研究を行うにあたり、数多くのご示唆ご援助をいただいた林業試験場木材利用部 平嶋義彦主任研究官、神谷文夫技官、曲げ試験にご協力いただいた金谷紀行主任研究官、中井 孝材料性能研究室長、試験体製作にお世話になった椎橋宗末技官に対し心からの感謝の意を表します。

引 用 文 献

- 1) 渡辺治人：木材理学総論，農林出版，608 pp., (1978)
- 2) 森 徹：建築学会論文集，5，1~10，(1937)
- 3) 森 徹：建築学会論文集，8，1~10，(1938)
- 4) 北原覚一：木材工業，2(11)，36~42，(1947)
- 5) 佐々木 光・満久崇鷹：Wood Research，28，1~23，(1962)
- 6) YLINEN, Y.: Holz als Roh-und Werkstoff 5(10)，337~338，(1942)
- 7) DAWE, P. S.: Wood, 29(11)，49~51，(1964)
- 8) KUNESH, R. H. and J. W. JOHNSON: For. Prod. J., 22, 32~36, (1972)
- 9) ASTM D-198, Standard Methods of Static Tests of Timbers in Structural Sizes, (1967)
- 10) ASTM D-245, Standard Methods for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber, (1974)
- 11) 畑山熾男：農林水産技術会議研究成果，111，1~73，(1978)
- 12) 中井 孝・畑山熾男：木材学会誌，27，723~730，(1981)

- 13) 平嶋義彦・神谷文夫：32回木材学会大会要旨，111，(1982)
- 14) 渡辺治人：日林誌，20，120～125，(1938)
- 15) U. S. Dep. of Agr. For. Prod. Lab. : Wood Handbook, p. 6—4, (1974)
- 16) 中村徳孫：宮崎大農演習林報，6，1～82，(1972)
- 17) MADSEN, B. : XVII IUFRO 大会論文集，621～625，(1981)
- 18) National Lumber Grades Authority : Standad Grading Rules for Canadian Lumber, (1975)
- 19) Canadian Standard Association : Determination of Allowable Unit Stresses for Canadian Lumber in Canada, (1972)
- 20) DOYLE, D. V. and L. J. MARKWARDT : U. S. For. Serv. Res. Paper FPL 84, (1967)
- 21) MULLER, P. H. : Wood Sci. and Tech., 2, 43～72, (1968)
- 22) SENFT, J. F., S. K. SUDDARTH and H. D. ANGLETON : For. Prod. J., 12, 183～186, (1962)
- 23) SUNLEY, L. G. and W. T. CURRY : Timber Trade J., 242, 73～75, (1962)
- 24) Wood, L. W. : For. Prod. J., 14, 41～43, (1964)
- 25) SUNLEY, L. G. and W. H. HUDSON : For. Prod. J., 14, 155～158, (1964)
- 26) 酒井経雄：アカマツの節周辺における組織構造に関する研究 (東大学位論文)，(1973)
- 27) ————：19回木材学会要旨，60，(1969)
- 28) ————：20回木材学会要旨，74，(1970)
- 29) EAMES, A. J. : An Introduction to Plant Anatomy, McGraw-Hill, New York, p. 157, (1972)
- 30) 梶田 茂：木材工学，養賢堂，220 pp., (1967)
- 31) KUNESH, R. H. : For. Prod. J., 16, 6, 60, (1966)
- 32) 建築基準法施行令，第89条，(1982)
- 33) 西田正孝：応力集中，第2版，森北出版，272 pp., (1967)
- 34) PETERSON, R. E. : Stress Concentration Factors, John Wiley & Sons, New York, 25 pp., (1974)
- 35) 畑山熾男：岩大農学部報，4，380～387，(1960)
- 36) ————：岩大農演習林報，1，66～82，(1961)
- 37) DOYLE, D. V. and L. J. MARKWARDT : U. S. For. Serv. Res. Paper FPL 64, (1966)
- 38) 横堀武夫：材料強度学，第2版，岩波書店，190 pp., (1976)
- 39) BOHANNAN, B. : U. S. For. Serv. Res. Paper FPL 56, (1966)
- 40) American Institute of Timber Construction : Timber Construction Manual, John Weley & Sons, New York, 2～40, (1966)
- 41) NEWLIN, J. A. : U. S. For. Serv. FPL Bull. 364, (1934)
- 42) MARKWARDT, L. J. : U. S. For. Serv., R 1184, (1938)
- 43) PEARSON, R. G., N. H. KLOOT and J. D. BOYD : Timber Engineering Design Handbook, 3rd Ed., Jacaranda Press, Brisbane, (1962)
- 44) FRESS, A. D. and M. L. SELBO : U. S. Dep. Agr. Tech. Bull., 1069, (1953)
- 45) 湯浅亀一：改訂材料力学，上巻，コロナ社，112 pp., (1972)
- 46) 畑山熾男：21回木材学会要旨，114，(1971)
- 47) 北原寛一：木材物理学，森北出版，84 pp., (1967)
- 48) 沢田 稔：林試研報，108，141，(1958)
- 49) 松本 昂：九大農演習林報，36，45，(1962)
- 50) Western Wood Products Association : Determination of Recommended Design Values for Western Softwood Lumber, (1974)
- 51) 沢田 稔：材料，32，843，(1983)
- 52) ————：林試研報，71，47，(1954)

A New Estimation of Structural Lumber Considering the Slope of the Grain Around Knots

Yoshio HATAYAMA

Summary

The objective of this paper is to present a more rational estimation of lumber with knots.

Knots are largely responsible for lowering strength properties of structural lumber. In lumber stress-grading rules, it has commonly been assumed that the knot is a hole reducing the cross section. It is often pointed out that this way of simple thinking is not satisfied by the actual strength of lumber with knots. Considering the warp of the fiber direction around the knots, it is clear that the decrease of the strength of lumber with knots is caused not only by the knot itself but also by the sloping grain surrounding it.

We have already known that there is a fixed relation between the strength properties of wood and its grain angle. Therefore, if we find the distribution of the grain angle around the knot, we might predict the partial strength around it, then the whole strength of lumber which has such knots.

The species of specimen used in this paper are Western hemlock (*Thuga heterophylla* SARG.), Amabilis fir (*Abies amabilis* (DOUGL.) FARBER), Sugi (*Cryptomeria japonica* D. DON) and Akamatsu (*Pinus densiflora* SIEB. & ZUCC.).

First of all, the distribution of the sloping grain around the knot was investigated.

It was found that a fixed relationship exists among distribution of the sloping grain of wood, knot diameter, type of knot (intergrown or dead knot) and species.

The relation is given by the experimental formula;

$$\theta = \frac{15\sqrt{N^2\phi}}{\sqrt{x}} - \frac{\phi}{2} - 5 \quad \dots\dots\dots(1)$$

where θ is slope of grain of wood in passing around knot (deg.), ϕ is the knot diameter (cm), x is a horizontal distance from the knot (cm), N is a constant which differs depending on the species and type of knot ($0.9 \leq N \leq 1.3$). Table 1 gives values of N .

The wood with a typical knot was longitudinally cut, and thin strips of wood were obtained. The tensile test of such strips was carried out.

Tensile strength at an inclination θ with the direction of the grain could be expressed by using HANKINSON's formula;

$$\sigma_{t\theta} = \frac{0.1 \sigma_{t0}}{\sin^{1.4} \theta + 0.1 \cos^{1.4} \theta} \quad \dots\dots\dots(2)$$

in which $\sigma_{t\theta}$ represents the tensile strength at an inclination θ with the direction of the grain, σ_{t0} is the tensile strength parallel to the grain, 0.1 is the ratio of the tensile strength across the grain to that parallel to the grain, and 0.1 and the power 1.4 are experimentally determined constants.

Tensile Young's modulus at an inclination of θ with the direction of the grain could be also expressed by using the same formula;

Received October 11, 1983

(1) Wood Utilization Division

$$E_{t\theta} = \frac{0.15 E_{t0}}{\sin^{1.4} \theta + 0.15 \cos^{1.4} \theta} \dots\dots\dots (3)$$

in which $E_{t\theta}$ represents the tensile Young's modulus at an inclination θ with the direction of the grain, E_{t0} is the tensile Young's modulus parallel to the grain, 0.15 is the ratio of the tensile Young's modulus across the grain to that parallel to the grain, and 0.15 and the power of 1.4 are the experimentally determined constants.

Similarly, the partial crushing strength of wood around knots was investigated and the next relation was given;

$$\sigma_{c\theta} = \frac{0.2 \sigma_{c0}}{\sin^{2.7} \theta + 0.2 \cos^{2.7} \theta} \dots\dots\dots (4)$$

in which $\sigma_{c\theta}$ represents the crushing strength at an inclination θ with the direction of the grain, σ_{c0} is the crushing strength parallel to the grain, 0.2 is the ratio of the crushing strength across the grain to that parallel to the grain, and 0.2 and the power of 2.7 are the experimentally determined constants.

The tensile, crushing and bending tests of full-size lumber with knots were carried out. At the same time, the strength of the lumber was analytically estimated on the basis of the formulas (1), (2), (3) and (4).

The comparisons of the test results and calculated results are as follows;

The ratio of the estimated maximum tensile load to the experimental one is shown in Tables 6 and 7.

Estimated values agree well with the experimental values, and the average ratio is about 0.94.

In the prediction of the crushing strength, it is necessary to make a few corrections; crushing strength of intergrown knot is $0.5 \sigma_{c0}$, and crushing strength of wood in passing around knot in the region of 3~4 mm (3 mm in case of $\phi \leq 4.5$ cm, 4 mm in case of $\phi \geq 4.6$ cm) is $1.5 \sigma_{c0}$.

The ratio of the estimated maximum compressive load to the experimental one is shown in Tables 11 and 12.

Estimated values agree well with the experimental values, and the average ratio is about 0.99.

In the prediction of the bending strength, a few assumptions were set; $E_b = E_t = E_c$, $\sigma_{t\parallel} = 1.5 \sigma_{b\parallel}$, $\sigma_{b\parallel} = 2 \sigma_{c\parallel}$. These assumptions were drawn from previous experimental data.

The ratio of the estimated maximum bending moment to the experimental one is shown in Tables 15 and 16.

Estimated values agree well with the experimental values, and the average ratio is about 0.91.

From these comparisons, it was found that a new estimation presented here has a much better validity than the current method.

It is hoped that this new method find a great acceptance among the grading rules for structural lumber.