

木材の応力—歪曲線（第1報）

横圧縮応力—歪曲線（1）

山 井 良 三 郎⁽¹⁾

ま え が き

木材の繊維方向に対し垂直な圧縮荷重を受ける強度部材の断面を合理的に設計する場合、木構造における接手部材の効率を上昇せしめる施工を考慮する場合、各種改良木材の圧縮加工を適切に処理する場合等には、横圧縮荷重による木材の応力と変形との関係を把握することが重要な基礎的課題となってくる。しかし、木材にはかかる外力による機械的変形のほかに、膨潤収縮による収着的変形や、加熱冷却による熱的変形が起り、これらの変形要因が相互に相関連する場合が多い。さらにまた、木材はその三軸方向における巨視的ならびに微視的構造組織がそれぞれ異なるために、いわゆる直交異方性体の特性を示し、その応力と変形の関係はきわめて複雑であり、その解析は幾多の困難な問題を含んでいる。したがって、かかる変形の特性を総合的に表現する応力—歪曲線を求めることは材料の性質を推論する上に重要な意義を有するものと思われる。

一般に木材の繊維方向に対し垂直の圧縮荷重が作用する基本形式としては、荷重が材面の全体にわたって一様に作用する場合と、材面の局部にのみ作用する場合とに類別されるが、両者の応力と変形の内容は本質的には異なるために、わが国およびドイツの木材試験法ではこれらを区別し、両者の場合をそれぞれ規格に規定している。したがって、今後前者の場合を横圧縮、後者の場合を部分圧縮と区別して取り扱うことにする。しかし、現実の木構造では部分圧縮の荷重条件が多いためか、米国、英国およびその他の諸国の規格では部分圧縮試験のみを規定している場合が多く、単に繊維に垂直の圧縮試験成績という和部分圧縮の場合を指すことが多いので注意を必要とする。

本報告では木材の繊維方向に対し垂直の圧縮特性を基本的に表現し、かつ、比較的単純応力状態と考えられる横圧縮試験による応力—歪曲線について述べるが、わが国では前述のごとく試験方法が規定されているにもかかわらず、それによる試験成績の発表は皆無にひとしい状態である。なお、木材の横圧縮の場合は縦圧縮あるいは引張りの場合と異なり、いわゆる極限強さの決定が困難であり、弾性領域を超えた後の材料特性を表現する適当な方法がない。また、同一断面でも荷重方向に対する年輪走向の差異によつて応力と歪の関係が異なるばかりでなく、破損の様相さえも著しい差異を示す。したがって、ここでは柾目、板目、追柾木取りの試験片をエゾマツ気乾材で製作し、横圧縮荷重による弾塑性域における応力と歪の関係を求め、この関係を規制する諸条件を実験的に検討するとともに、これら応力—歪曲線の類型分類を試み、部材設計に関する基礎的資料としたい。なお、圧縮異方性に関する予備実験として、繊維方向を異にする各種試片の応力—歪曲線を求め、あわせ検討することにする。

この実験を行うにあたって、たえず御指導と御便宜をたまわつた林業試験場木材部長斎藤美鶴氏、材料

(1) 木材部材料科強度研究室

科長小倉武夫氏、強度研究室長沢田稔氏、測定観測に協力された技官児玉芳郎氏、試料作成にあたられた大尾重夫氏に心よりここに感謝の意を表する。

1. 試 験 材 料

供試材は北海道野幌国有林産のエゾマツ (*Picea jezoensis* Carr.) で、採取後大割をなし、実験室内で満 3 カ年以上経過した気乾材である。各種試片は同一供試材の比較的近接した部位から木取つたものであるが、年輪構成、比重、含水率等の基本的材質は第 1 表に示すごとく若干の変動はまぬがれなかつた。エゾマツとしては年輪巾の広い方であり、比重もやや低い方に属すると思われる。

Table 1. 全試片の材質
Related properties of total specimens

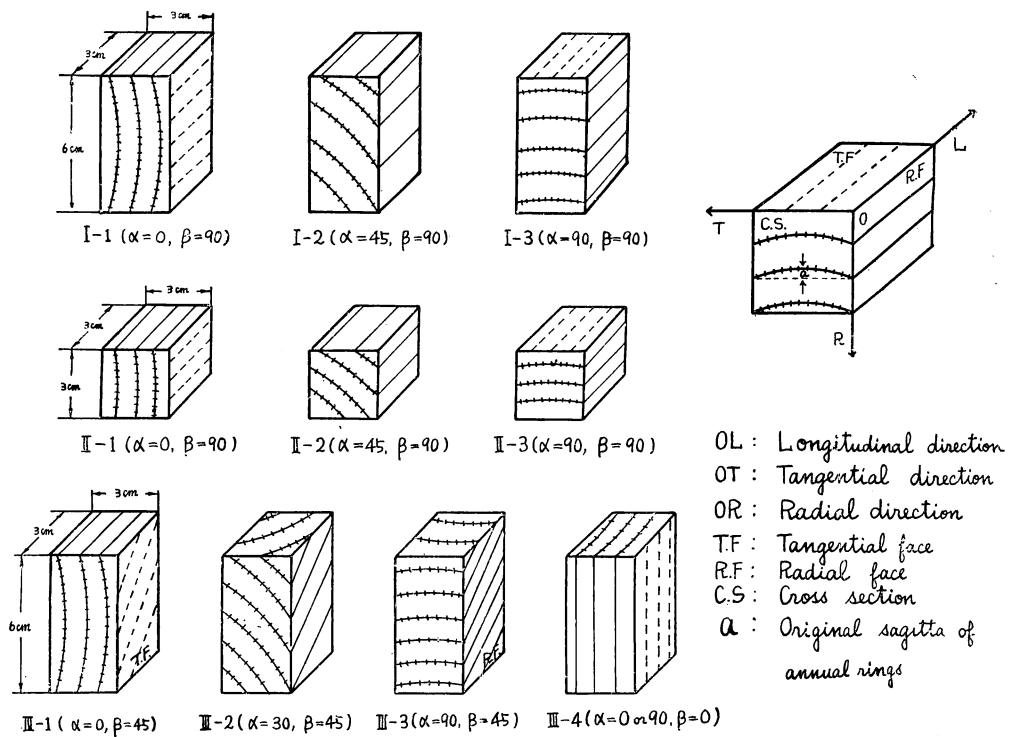
材 質	Properties	Mark	試片個数 Specimens tested N	観測値の範囲 Range $x_{max} - x_{min}$	算 術 平均値 Mean $\bar{x}$	標準偏差 Standard deviation $\pm S.D.$	変異係数 Coefficient of variation C.V. %
平均年輪巾	Width of annual rings	b mm	108	3.9—2.9	3.3	0.27	8.2
秋 材 率	Summer wood	S %	108	17—8	11.4	2.0	17.5
比 重	Specific gravity, at test	r_n g/cm ³	128	0.414—0.368	0.394	0.010	2.5
	" , oven dry	* R_0 g/cm ³	128	0.360—0.318	0.340	0.010	2.9
含 水 率	Moisture content	u %	128	17.1—14.5	15.9	0.69	4.3

* R_0 = 全乾重量/試験時容積 = Weight oven-dried/Volume at test.

平均年輪巾 (b mm)、秋材率 (S%)、年輪矢高 (a mm) 等の測定には 1/5 mm 精度の Zeiss の計測用ルーベを使用し、試片の大きさは 1/20 mm 精度の Vernier calipers を使用した。なお、秋材率の測定値は各試片の一木口面における全年輪について求めた結果であり、いわゆる断面秋材率に相当するものである。比重は試験時重量を試験時容積で除した気乾比重 r_n と、全乾重量を試験時容積で除した R_0 とを求めた。

2. 試験の種類および試片形状と寸法

試験の種類および試片の形状は Table 2 および Fig. 1 に示すとおりである。Group I の実験は $3 \times 3 \times 6$ cm³ の規格試片による横圧縮試験であり、基本的なものである。Group II の実験は高さのみを 1/2 に変えた $3 \times 3 \times 3$ cm³ の立方体試片による横圧縮試験である。いずれの場合も荷重方向は板目方向 ($\alpha = 0$ 度, $\beta = 90$ 度), 45 度方向 ($\alpha = 45$ 度, $\beta = 90$ 度), 柃目方向 ($\alpha = 90$ 度, $\beta = 90$ 度) の三方向である。Group III は圧縮異方性に関する予備考察を行うために、繊維傾角、年輪傾角を図表のごとく変えた試片による圧縮試験であり、その形状は $3 \times 3 \times 6$ cm³ である。なお、Group III—3 における全面目切と仮称している試片は、Group I—2 に属する試片の繊維傾角 β のみを 45 度に木取る予定であつたが、結果的には年輪傾角 α も変わり図表のごとく ($\alpha = 30$ 度, $\beta = 45$ 度) なつたものである。ここでいう年輪傾角 (α) および繊維傾角 (β) は年輪走向および繊維走向が荷重方向となす角度である。



α : Orientation of annual rings with loading direction at Plane TOR

β : Slope of grain with loading direction at Plane LOR or LOT

Fig. 1 Classification of specimens belonging to each group.

Table 2. 試験の種類
Classification of test

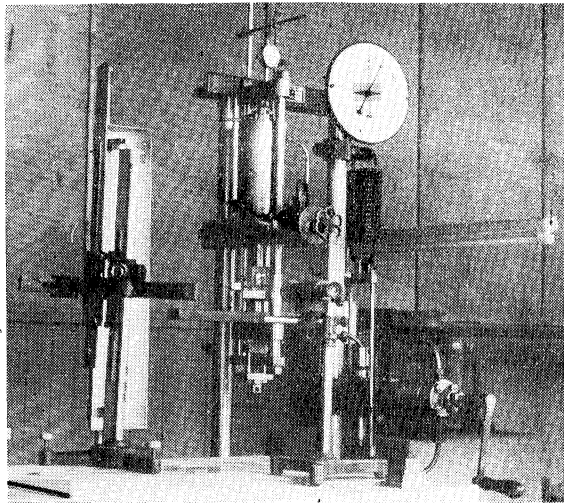
試験の種類 Classification of test		荷重方向 Loading direction		試片寸法 Dimension		変形測定法 Measurement of deformation				試片数 Specimens tested
Group	試験名称 (仮称)	年輪傾角 Orientation of annual rings α	繊維傾角 Slope of grain β	荷重面積 Loaded area	長さ Length	測定器具 Instrument used	標点距離 Gauge length	測定器具 Instrument used	標点距離 Gauge length	
		degrees	degrees	cm ²	cm		cm		cm	Number
I-1	板目方向横圧縮	0	90	3×3	6	Extensometer	3	Dial gauge	6	20
I-2	45度 " "	45	90	3×3	6	Extensometer	3	Dial gauge	6	18
I-3	柁目 " "	90	90	3×3	6	Extensometer	3	Dial gauge	6	20
II-1	板目方向横圧縮	0	90	3×3	3			Dial gauge	3	10
II-2	45度 " "	45	90	3×3	3			Dial gauge	3	10
II-3	柁目 " "	90	90	3×3	3			Dial gauge	3	10
III-1	板目面45度目切圧縮	0	45	3×3	6	Extensometer	3	Dial gauge	6	10
III-2	全面目切圧縮	30	45	3×3	6	Extensometer	3	Dial gauge	6	10
III-3	柁目面45度目切圧縮	90	45	3×3	6	Extensometer	3	Dial gauge	6	10
III-4	縦圧縮	0 or 90	0	3×3	6	Extensometer	3	Dial gauge	6	10

3. 試 験 方 法

使用せる試験機は Amsler 4,000 kg 油圧式手働材料試験機で、圧縮板は下面球座とした。各実験に対する試験機の使用容量、荷重刻みおよび平均荷重速度を Table 3 に示す。

Table 3. 荷 重 条 件
Loading conditions

Group	使用力量 Capacity at test	荷重刻み Load increment	試 片 数 Specimens	平 均 荷 重 速 度 Average speed of loading		
				$x_{max} - x_{min}$	$\bar{x}$	$\pm$ S. D.
I—1	kg 400	kg 20	Number 12	kg/cm ² /Min. 5.6—4.9	kg/cm ² /Min. 5.1	kg/cm ² /Min. 0.18
	"	10	8	3.7—2.4	3.2	0.36
I—2	400	10	2	} 2.6—1.8	2.3	0.24
	"	5	16			
I—3	400	20	20	5.8—4.0	4.8	0.48
II—1	400	20	9	4.5—4.2	4.4	0.08
	"	10	1	—	3.4	—
II—2	400	10	9	3.4—3.3	3.3	0.03
	"	5	1	—	1.7	—
II—3	400	20	10	4.5—4.4	4.4	0.05
III—1	4000	30	9	9.3—7.5	8.6	0.48
	"	20	1	—	5.5	—
III—2	4000	30	9	} 6.8—4.5	5.9	0.65
	"	20	1			
III—3	4000	30	10	7.6—6.2	7.1	0.52
III—4	4000	200	10	67—56	62	4.0

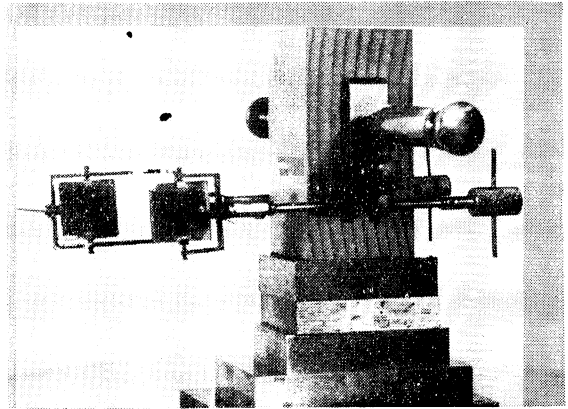


Phot 1. Testing apparatus

一般に弾性領域では応力と歪の関係は時間に無関係であるが、塑性変形の領域では時間に無関係な函数であらわされなため、塑性変形まで考慮した実験では荷重速度、あるいは変形速度の大小が非常に重要な因子となつてくる。この実験では変形量の測定が可能な限り比例限度を超えてからの荷重速度を一定にするよう Stop watch をみながら制御した。すなわち、同一荷重刻みを進めるに要する時間を等しくするよう油送把手を調節した。しかし、局部的に破損が生じ塑性変形が増大するとき、それに対応する荷重のもどりが起り、必ずしも一定にする

ことはできなかった。

荷重による変形量は Phot 1, Phot 2 に示すごとく、試片の中央領域に 3 cm の標点距離を定め、湯浅式 Mirror extensometer を使用し、第一種の方法により 1/500 mm 精度で測定した。その際、鏡支持棒のナイフを縦圧縮試片は端面に、その他の試片は木口面に取り付けた。また試験機の Ram head に 1/100 mm 精度の Dial gauge を取り付け、上下加圧板に挟まれた試片の全長に対する変形量を同時に測定し、両測定法による



Phot 2. Setting position of knives and mirrors.
(YUASA'S mirror extensometer)

る応力—歪曲線を比較し、端面影響の程度を検討することにした。なお、Table 2 に示すごとく立方体試片の場合は Dial gauge 測定のみである。また、荷重除去後の変形回復量は、荷重が零になる時を Dial gauge で測定し、直ちに試片を取外して Vernier calipers でふたたび測定し、それ以後は Vernier calipers のみで測定した。

本実験は 1954 年 4 月および 5 月に行つたものであり、各実験に対する実験室の温度 (°C) および湿度は Table 4 に示すとおりである。

Table 4. 試験時温度および湿度
Temperature and humidity at test.

Group	温 度 °C Temperature			湿 度 % Relative humidity		
	$x_{max} - x_{min}$	$\bar{x}$	± S. D.	$x_{max} - x_{min}$	$\bar{x}$	± S. D.
I—1	17.7—14.4	16.3	1.0	88—83	85	2
I—2	23.2—15.0	17.0	3.0	89—80	87	3
I—3	19.8—15.6	18.0	1.4	88—74	83	5
II—1	19.9—19.4	19.6	0.2	94—94	94	0
II—2	19.7—19.5	19.5	0.1	94—94	94	0
II—3	23.0—18.6	21.0	1.6	94—90	92	2
III—1	20.0—19.2	19.7	0.3	89—89	89	0
III—2	20.0—14.5	16.1	2.0	89—87	88	1
III—3	18.3—15.0	17.0	1.0	88—83	86	2
III—4	24.0—19.0	22.6	2.0	95—85	88	4

4. 測定値の決定方法

一般に材料の強度的性能を表わす場合には比例限応力、降伏点、極限強さ等を決定しているが、横圧縮の場合は比例限応力が小さく、かつ、降伏点、極限強さの確定がはなはだ困難な場合が多い。しかも木材はこの方向に非常に変形しやすいので、設計にあたっては強さと同時に変形量の大小が問題となつてく

る。わが国の規格では比例限度力と弾性係数のみを求めることを規定しているが、この実験で求めた諸量の決定方法について次に述べる。

4.1. 比例限度力 σ_p (kg/cm²)

弾性限度の確認は困難であるため比例限度力を採用したが、この値は応力—歪曲線において直線から曲線に移る境界点に相当する応力を決めれば求められるわけである。しかし、横圧縮の場合は比例部分が少ないので、試験機の力量、荷重刻み、変形量測定器具の精度等に影響され、正確にこの点を決定することはむずかしい。ここでは力量の小さい試験機を使用し、荷重刻みを狭くして測定の数を増加し、応力—歪曲線全体からみて直線部分の終点と思われる計測点の応力を比例限度力とした。

4.2. 比例限度歪 ε_p (%)

比例限度力に対応する歪を比例限度歪としたが、Extensometer 測定による歪はナイフを取り付けた両木口面の標点距離に対する歪であり、Dial gauge 測定の歪は試片の全長に対する歪である。なお、Dial gauge の場合は試片の上下両端面と加圧板との摩擦力、試片端面の仕上げ条件等に支配されるためか、応力—歪曲線の最初の部分が歪軸に対しやや凸曲線となる傾向があるが、かかる場合は上述の直線部分を延長して、歪軸と交わる点を歪が零の点として比例計算で求めた。

4.3. 弾性係数 E (kg/cm²)

弾性係数は σ_p/ε_p で計算した。

4.4. 比例限度仕事量 W_p (kg-cm/cm³)

比例限度仕事量は単位体積当りの比例限度エネルギーを表わし、 $1/2 \cdot \sigma_p \cdot \varepsilon_p$ で計算した。

4.5. 降伏点およびその歪 σ_y (kg/cm²), ε_y (%)

降伏点の定義にはいろいろあるが、横圧縮の場合は弾性域から塑性域へ転移する様相が荷重方向によって異なることが多いので一義的な決定方法は困難である。したがって今回は Fig. 4 のごとく曲線の水平方向への分岐移行が急激に行われる場合には材料試験で普通に行われている下限降伏点を取り、Fig. 2 のごとく水平方向への分岐移行が漸進的な場合には変形量が著しく増大する点を降伏点とした。45 度試片の場合はその点の確認が不明瞭であるため記載することを割愛した。また降伏点における歪 ε_y を求め、 σ_y/ε_y の値を E_y として計算した。

4.6. 5%, 10% 歪における応力 σ_5 (kg/cm²), σ_{10} (kg/cm²)

横圧縮の場合は前述のごとく一般に判然たる降伏点、あるいは極限強さの決定が困難であるため、塑性変形が著しく進んだ状態における応力—歪関係を表現する適当な方法がない。したがってここでは部分圧縮の試験方法に規定してある歪に対応せしめて、5% および 10% の歪における応力をそれぞれ σ_5 , σ_{10} として求めた。なおこの場合の歪は Dial gauge で求めたもののみである。

5. 実験結果

前述の方法により得た結果を整理し、各実験における代表的な応力—歪曲線を図示するとともに、応力と歪の関係を支配する年輪傾角の影響、繊維傾角の影響、歪測定方法の差異および試片形状の差異による影響等を検討し、それらの総括結果を表記することにする。なお、かかる実験における詳細な資料が皆無

に近い現況なので、個々の試片に対する結果を附表に記載し参考に供するとともに、統計学的研究の素材の一つにしたい。

5.1. 応力—歪曲線の一設型

5.1.1. 板目方向横圧縮応力—歪曲線

これは Group I—1 に属する場合であり、Fig. 2 に Extensometer と Dial gauge 測定による応力—歪曲線の一例を示す。直線部分もかなり長く、実用的には比例関係が存在するとみてよいと思う。弾性域から塑性域への転移は漸進的であるが、Extensometer 測定による曲線では、歪が 2% 附近に達すると急に塑性変形が著しく増大しはじめ、曲線は次第に歪軸に平行となつてゆく。Dial gauge 測定による曲線では歪が 2.5% 附近でこの現象が起る。この点をここでは降伏点としたが、両測定法による降伏点応力はほとんど同じである。なお、試片の全長に対する変形量を測定した Dial gauge 曲線が、試片の中央領域に対する変形量のみを測定した Extensometer 曲線より常に下位にあり、かつ、両曲線間にかなり大きな間隔が認められるということは、端面附近の変形が中央部分より比較的大であることを表わしている。

また、両測定法による観測値の範囲 ($x_{max} - x_{min}$)、平均値 ($\bar{x}$)、標準偏差 (S. D.) および変異係数 (C. V. %) 等を Table 5 に示す。表中の a (mm) は試片の全長に対する各年輪の矢高 (Original

Table 5. 板目方向横圧縮試験の結果
Results of Group I—1

Properties	Mark	Specimens N	Extensometer readings to 3 cm central gauge length				Dial gauge readings to 6 cm total gauge length			
			Range	Mean	Standard deviation ± S.D.	Coefficient of variation C.V. %	Range	Mean	Standard deviation ± S.D.	Coefficient of variation C.V. %
			$x_{max} - x_{min}$	$\bar{x}$			$x_{max} - x_{min}$	$\bar{x}$		
Width of annual rings	b mm	20	3.9—2.8	3.1	0.27	9	3.9—2.8	3.1	0.27	9
Summer wood	S %	20	16—9	13	2.0	15	16—9	13	2.0	15
Angle of annual rings	α degree	20	—	0	—	—	—	0	—	—
Slope of grain	β degree	20	—	90	—	—	—	90	—	—
Original sagitta	a mm	20	5.2—2.8	3.4	0.7	20	5.2—2.8	3.4	0.7	20
Specific gravity at test	r_u g/cm ³	20	0.414—0.380	0.399	0.011	3	0.414—0.380	0.399	0.011	3
" " , oven dry	R_0 g/cm ³	20	0.360—0.328	0.346	0.010	3	0.360—0.328	0.346	0.010	3
Moisture content	u %	20	16.1—14.5	15.2	0.5	3	16.1—14.5	15.2	0.5	3
Stress at proportional limit	σ_p kg/cm ²	20	14.5—9.0	11.9	1.6	13	15.6—7.9	12.3	2.3	19
Strain at P. L.	ϵ_p %	20	0.423—0.327	0.378	0.028	8	0.590—0.349	0.445	0.051	11
Modulus of elasticity	E kg/cm ²	20	3570—2490	3150	334	11	3190—2100	2750	329	12
Work to P. L.	W_p kg-cm/cm ²	20	0.0300—0.0181	0.0227	0.0041	18	0.0360—0.0147	0.0274	0.0078	28
Stress at yield point	σ_y kg/cm ²	15	36.7—28.9	34.5	2.8	8	36.8—28.9	34.3	2.8	8
Strain at Y. P.	ϵ_y kg/cm ²	15	2.08—1.68	1.92	0.12	6	2.88—2.02	2.52	0.24	9
σ_y/ϵ_y	E_y kg/cm ²	15	2180—1350	1810	200	11	1650—1150	1370	132	10
Stress at 5% strain	σ_5 kg/cm ²	15	—	—	—	—	38.4—30.3	35.4	2.5	7
Stress at 10% strain	σ_{10} kg/cm ²	15	—	—	—	—	39.0—30.5	35.9	2.6	7

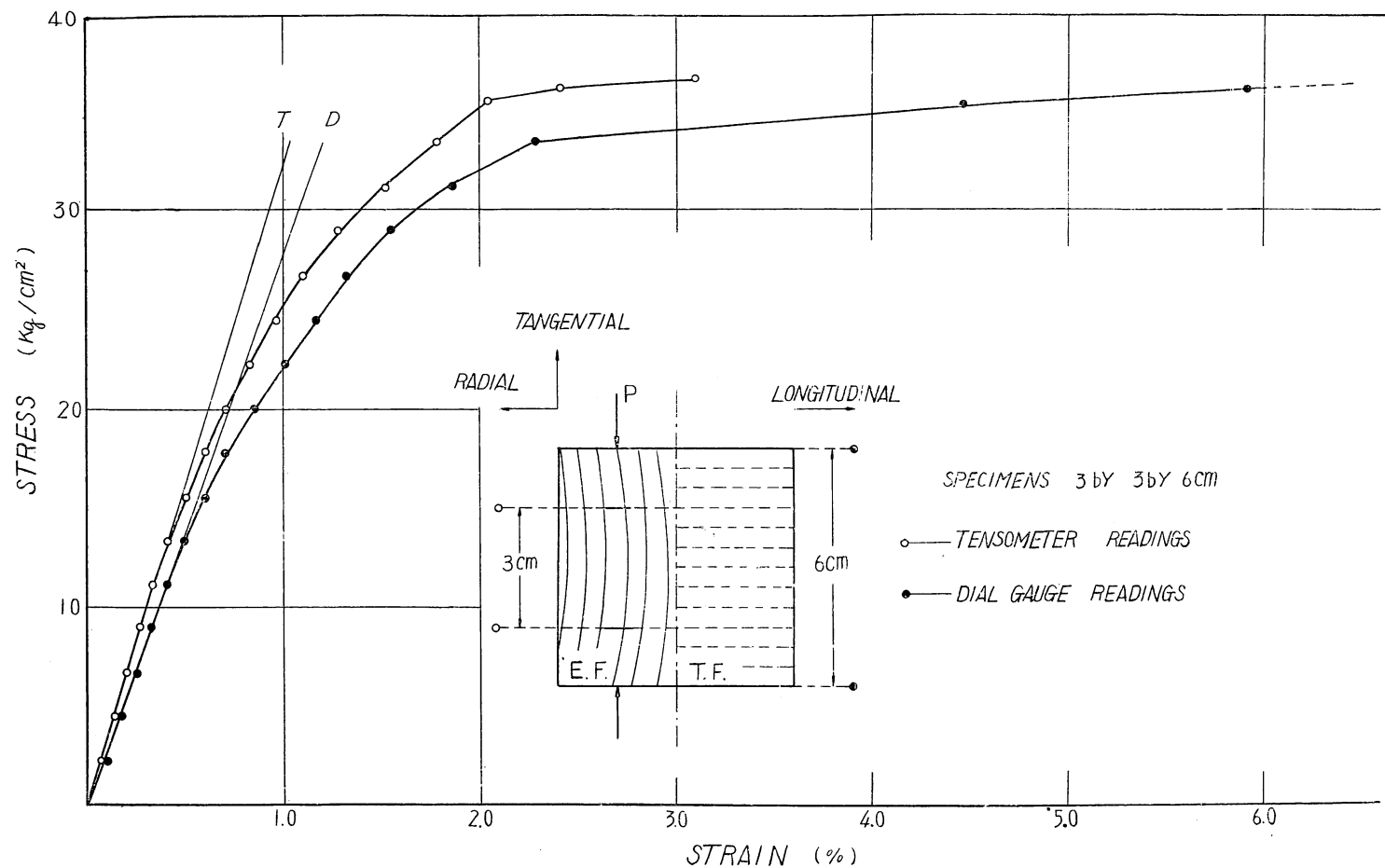


Fig. 2. Stress-strain curve of specimen belonging to Group I-1.
板目方向横圧縮試片の応力—歪曲線

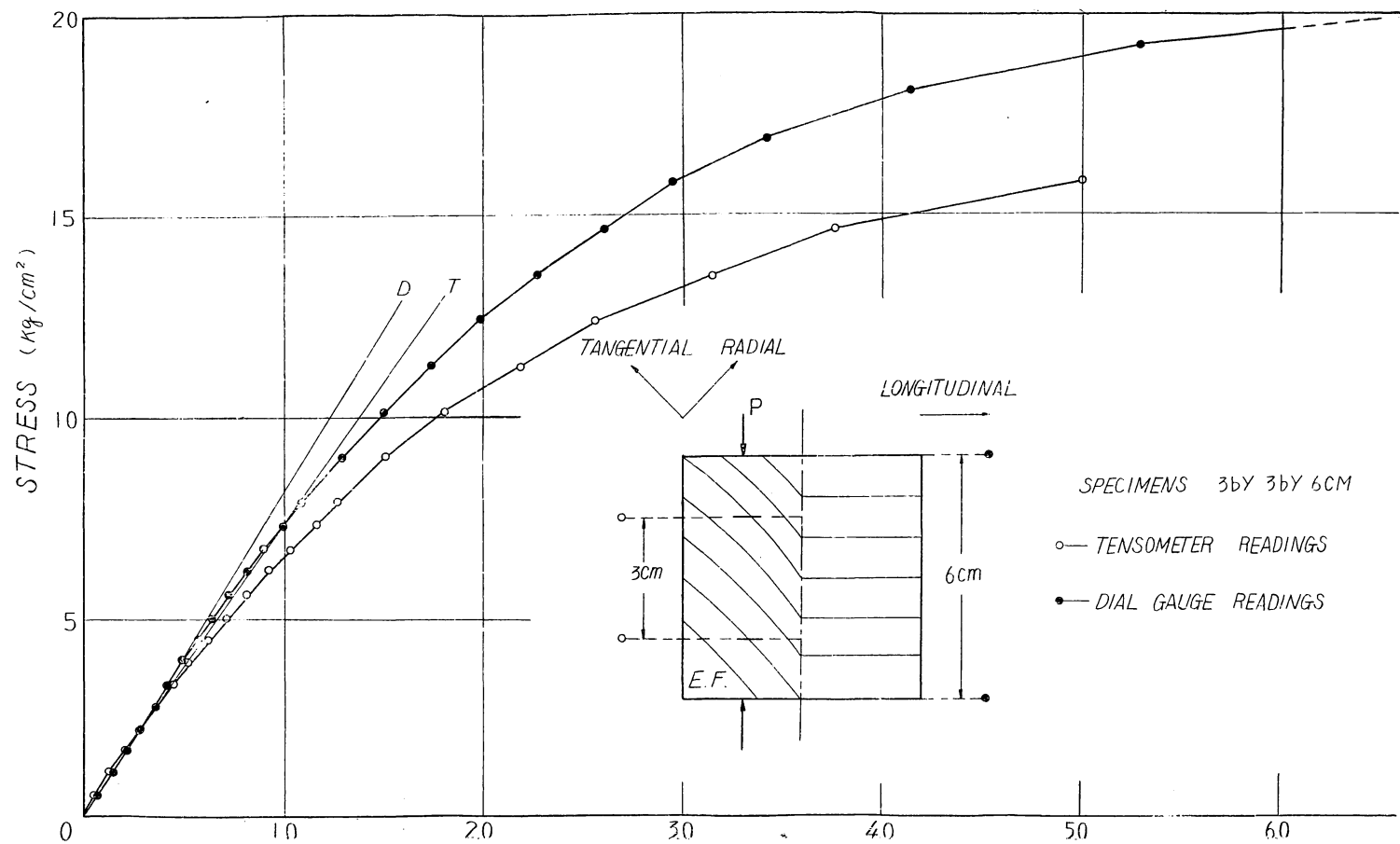


Fig. 3. Stress-strain curve of specimen belonging to Group I—2.
45 度方向横圧縮試片の応力—歪曲線

sagitta) の平均値である。この降伏点の応力は比例限度力の 3 倍近くであり、 E_y は E の約 6 割程度である。

5.1.2. 45度方向横圧縮応力—歪曲線

これは Group I—2 に属する場合であり、Fig. 3 に Extensometer と Dial gauge 測定による応力—歪曲線の一例を示す。この場合は直線部分がきわめて短かく、剪断弾性係数が小さいためか、低い荷重で変形が増大し、曲線の傾きが小さい。弾性領域から塑性領域への転移もきわめて緩慢で、いわゆる降伏点の決定は判然としていないので記載をしないことにする。曲線の概観は指数曲線あるいは拋物線に近い形をしている。なお、注目すべきことは Group I の他の場合と異なり、Dial gauge 曲線がほとんど最初から Extensometer 曲線の上位にあり、荷重が増大するにつれて次第に間隔を増してゆく傾向があることである。これは中央部分における年輪が通りやすい条件にあるため、この部分の変形が端面附近より大であることを示している。

両測定法による観測結果を Table 6 に示す。弾性係数が僅か 750 kg/cm^2 程度であることと、Dial gauge 測定による弾性係数が Extensometer による値よりやや大きいこと、 σ_{10} と σ_5 の差が比較的大きいこと等は Group I の他の場合に比し特徴的である。

Table 6. 45 度方向横圧縮試験の結果
Results of Group I—2

Properties	Mark	Specimens	Extensometer readings to 3 cm central gauge length				Dial gauge readings to 6 cm total gauge length			
			Range	Mean	Standard deviation $\pm$ S.D.	Coefficient of variation C.V. %	Range	Mean	Standard deviation $\pm$ S.D.	Coefficient of variation C.V. %
		N	$x_{max} - x_{min}$	$\bar{x}$			$x_{max} - x_{min}$	$\bar{x}$		
Width of annual rings	b mm	18	3.4—3.1	3.2	0.09	3	3.4—3.1	3.2	0.09	3
Summer wood	S %	18	14—8	11	1.5	9	14—8	11	1.5	9
Angle of annual rings	α degree	18	50—46	48	1	2	50—46	48	1	2
Slope of grain	β degree	18	—	90	—	—	—	90	—	—
Specific gravity at test	r_u g/cm ³	18	0.413—0.389	0.401	0.006	2	0.413—0.389	0.401	0.006	2
" " , oven dry	R_d g/cm ³	18	0.360—0.340	0.350	0.008	2	0.360—0.340	0.350	0.008	2
Moisture content	u %	18	15.5—14.6	15.0	0.2	1	15.5—14.6	15.0	0.2	1
Stress at proportional limit	σ_p kg/cm ²	18	5.09—3.37	4.17	0.50	12	6.23—5.58	5.98	0.29	5
Strain at P. L.	ϵ_p %	18	0.699—0.433	0.557	0.076	14	0.849—0.706	0.782	0.047	6
Modulus of elasticity	E kg/cm ²	18	792—702	750	24	3	808—727	767	20	3
Work to P. L.	W_p kg-cm/cm ³	18	0.0178—0.0073	0.0118	0.0030	25	0.0269—0.0199	0.0235	0.0025	11
Stress at 5% strain	σ_5 kg/cm ²	15	—	—	—	—	20.0—18.2	19.2	0.4	2
Stress at 10% strain	σ_{10} kg/cm ²	15	—	—	—	—	23.2—21.2	22.3	0.5	2

5.1.3. 径目方向横圧縮応力—歪曲線

これは Group I—3 に属する場合であり、Fig. 4 に Extensometer と Dial gauge 測定による応力—歪曲線の一例を示す。この場合は直線部分がかかなり長く、かつ明瞭な比例関係を示している。歪が 0.7 % 附近にいわゆる降伏点が認められ、弾性域から塑性域への転移はきわめて急激であり、この点をすぎ

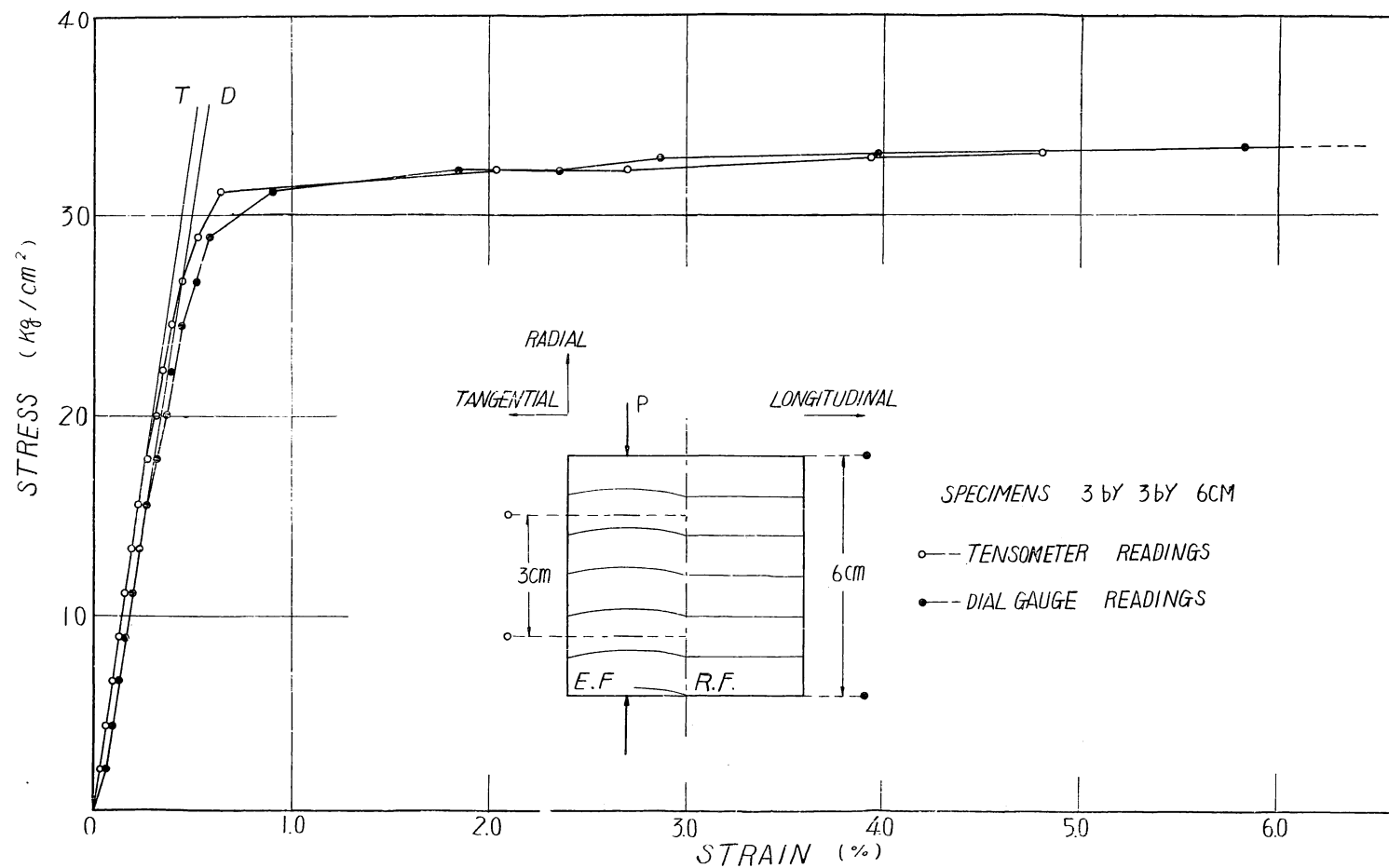


Fig. 4. Stress-strain curve of specimen belonging to Group 1-3.
 柱目方向横圧縮試片の応力—歪曲線

ると塑性変形が急に増大しはじめ、荷重は小刻みながら変動を繰り返すがほぼ一定の状態にある。したがって曲線は歪軸にはほとんど平行になつてゆく。なお、降伏点までは Dial gauge 曲線が Extensometer 曲線より僅かながら下位にあるが、この点附近を過ぎるとほとんど重なる図が多い。しかし、今回の歪測定方法では歪が 4% 附近に達すると、Extensometer による測定が不可能であつたため、これから以後は両曲線がどのような関係になるかは不明である。

両測定法による観測結果を Table 7 に示す。表中の a (mm) は試片の巾に対する各年輪の平均矢高であり、Group I—1 の場合とは弦長が異なることに注意して欲しい。降伏点の応力は比例限度力の約 2 倍であり、 E_y は E の約 7 割程度である。

Table 7. 柎目方向横圧縮試験の結果
Results of Group I—3

Properties	Mark	Specimens N	Extensometer readings to 3 cm central gauge length				Dial gauge readings to 6 cm total gauge length			
			Range $x_{max}-x_{min}$	Mean $\bar{x}$	Standard deviation $\pm S.D.$	Coefficient of variation C.V. %	Range $x_{max}-x_{min}$	Mean $\bar{x}$	Standard deviation $\pm S.D.$	Coefficient of variation C.V. %
Width of annual rings	b mm	20	3.7—3.4	3.5	0.10	3	3.7—3.4	3.5	0.10	3
Summer wood	S %	20	15—10	12	1.1	9	15—10	12	1.1	9
Angle of annual rings	α degree	20	—	90	—	—	—	90	—	—
Slope of grain	β degree	20	—	90	—	—	—	90	—	—
Original sagitta	a mm	20	1.4—0.9	1.2	0.1	8	1.4—0.9	1.2	0.1	8
Specific gravity at test	r_u g/cm ³	20	0.411—0.390	0.396	0.005	1	0.411—0.390	0.396	0.005	1
" " , oven dry	R_0 g/cm ³	20	0.354—0.336	0.342	0.001	1	0.354—0.336	0.342	0.001	1
Moisture content	u %	20	16.2—15.7	15.9	0.1	1	16.2—15.7	15.9	0.1	1
Stress at proportional limit	σ_p kg/cm ²	20	20.0—13.4	16.2	1.4	9	22.2—13.4	17.4	1.9	11
Strain at P. L.	ϵ_p %	20	0.253—0.184	0.221	0.021	9	0.303—0.218	0.266	0.023	9
Modulus of elasticity	E kg/cm ²	20	8250—6550	7340	435	6	7380—5500	6470	394	6
Work to P. L.	W_p kg-cm/cm ²	20	0.0252—0.0123	0.0180	0.0030	17	0.0334—0.0146	0.0233	0.0045	19
Stress at yield point	σ_y kg/cm ²	16	37.8—29.0	32.7	2.5	8	36.7—28.9	31.5	3.0	10
Strain at Y. P.	ϵ_y %	16	0.773—0.473	0.658	0.034	5	0.905—0.556	0.645	0.098	15
σ_y/ϵ_y	E_y kg/cm ²	16	6130—4470	5020	455	9	5620—3780	4970	407	8
Stress at 5% strain	σ_5 kg/cm ²	16	—	—	—	—	37.8—31.2	33.9	1.8	5
Stress at 10% strain	σ_{10} kg/cm ²	16	—	—	—	—	37.9—31.5	34.4	1.8	5

5.1.4. 板目 45 度目切圧縮応力—歪曲線

これは Group III—1 に属する場合であり、Fig. 5 に Extensometer と Dial gauge 測定による応力—歪曲線の一例を示す。板目方向横圧縮の応力—歪曲線に非常に類似しており、弾性域から塑性域への転移は漸進的で、歪 2% 附近から塑性変形が増大してゆくが、比例限度力、弾性係数、降伏点応力等はいずれも Fig. 2 より大である。なお、Fig. 2 の場合と異なり Extensometer 曲線と Dial gauge 曲線がほとんど重なり、歪が 0.5% 附近を超えるとむしろ Dial gauge 曲線の方が上位になつてゆく。これは織

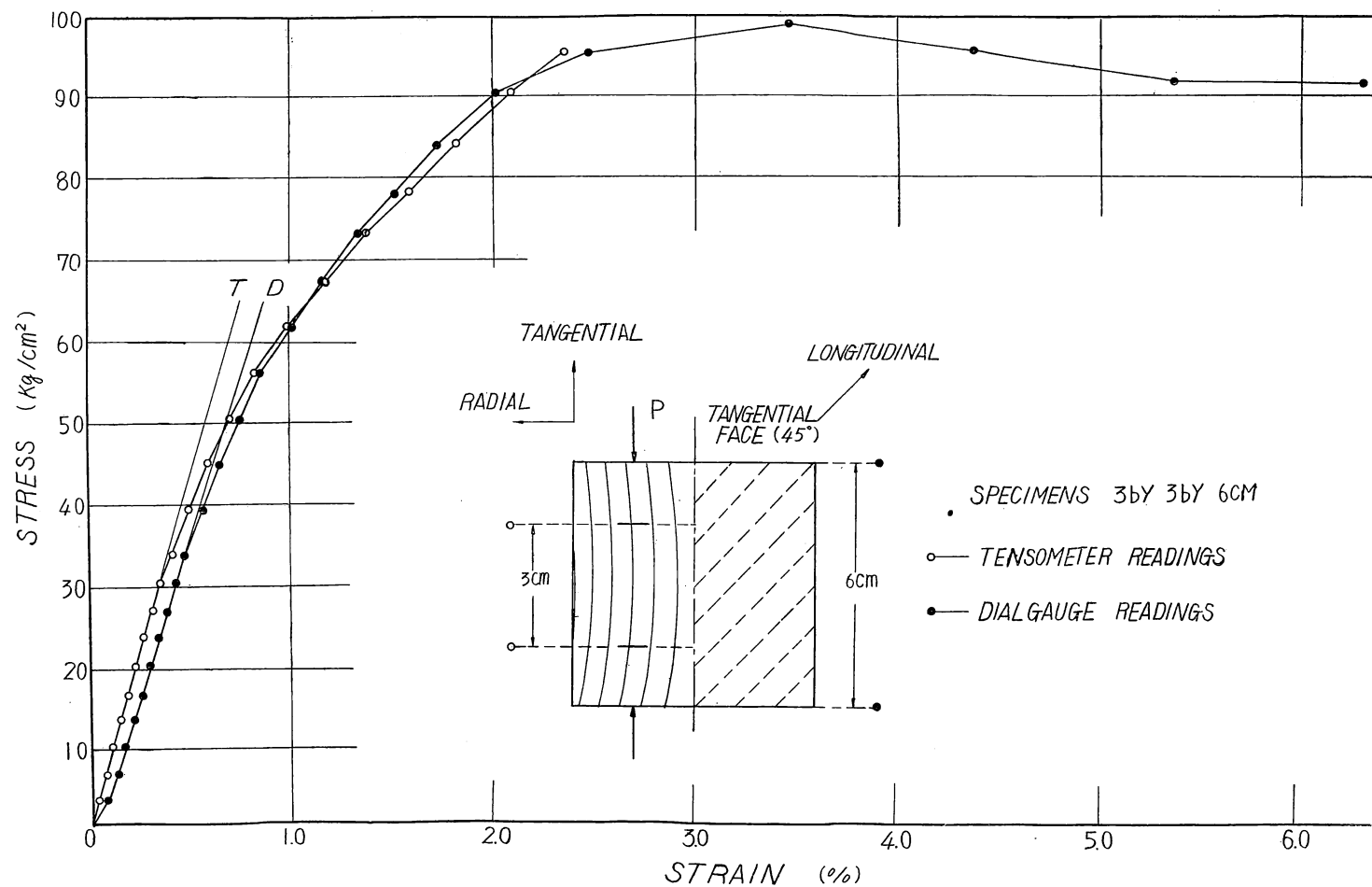


Fig. 5. Stress-strain curve of specimen belonging to Group III-1. ($\alpha=0$, $\beta=45$)

維が 45 度に目切れているため、中央部分が LOR 面に沿うて OL 方向に迂りやすいためであろう。変形が著しく進行すると端縁が不均等につぶれ、応力分布も複雑となつてくるので、塑性変形の進んだ様相は今後の検討にまたねばならない。

両測定法による観測結果を Table 8 に示す。表中の a (mm) は試片の全長に対する各年輪の平均矢高であるが、繊維走向が 45 度目切れている場合であるから、板目方向横圧縮試片よりは僅少な結果になるのが当然である。

Table 8. 板目面 45 度目切圧縮試験の結果
Results of Group III-1

Properties	Mark	Specimens	Extensometer readings to 3 cm central gauge length				Dial gauge readings to 6 cm total gauge length			
			Range	Mean	Standard deviation	Coefficient of variation	Range	Mean	Standard deviation	Coefficient of variation
			$x_{max}-x_{min}$	$\bar{x}$	$\pm S.D.$	C.V. %	$x_{max}-x_{min}$	$\bar{x}$	$\pm S.D.$	C.V. %
Width of annual rings	b mm	10	3.4—2.9	3.2	0.08	3	3.4—2.9	3.2	0.08	3
Summer wood	S %	10	17—8	11	2.3	21	17—8	11	2.3	21
Angle of annual rings	α degree	10	5—0	3	2	70	5—0	3	2	70
Slope of grain	β degree	10	—	45	—	—	—	45	—	—
Original sagitta	a mm	10	2.1—1.0	1.5	0.3	20	2.1—1.0	1.5	0.3	20
Specific gravity at test	r_u g/cm ³	10	0.393—0.383	0.387	0.003	1	0.393—0.383	0.387	0.003	1
" ", oven dry	R_u g/cm ³	10	0.341—0.331	0.336	0.004	1	0.341—0.331	0.336	0.004	1
Moisture content	u %	10	15.7—15.1	15.5	0.2	1	15.7—15.1	15.5	0.2	1
Stress at proportional limit	σ_p kg/cm ²	10	30.3—24.0	28.0	2.6	9	33.7—20.2	31.1	4.0	13
Strain at P. L.	ε_y %	10	0.430—0.301	0.353	0.031	9	0.456—0.353	0.418	0.031	7
Modulus of elasticity	E kg/cm ²	10	9030—5480	8090	952	12	8230—5730	7430	673	9
Work to P. L.	W_p kg-cm/cm ³	10	0.0554—0.0403	0.0493	0.0052	11	0.0764—0.0357	0.0656	0.0118	18

5.1.5. 全面目切圧縮応力—歪曲線

これは Group III-2 に属する場合であり、Fig. 6 に Extensometer と Dial gauge 測定による応力—歪曲線の一例を示す。この線図は最初のうちは Fig. 3 に類似し、直線部分は僅少であり、塑性域への転移もきわめて漸進的で、降伏点の確認も困難である。しかし、歪が 1% 附近を超えると歪の進行が減少し、曲線は歪軸に対し凸形となり、最初の直線部分にはほぼ平行な状態を僅かながら持続し、2% 附近からは次第に歪が増大し、ふたたび曲線は歪軸に対し凹形を呈しつつ進行してゆく。すなわち、上昇曲線の途中に階段状の部分があり、不明瞭ながら 2 つの降伏点があるような曲線型を示す。第一階段は年輪の切線方向の迂りが支配的であるが、各年輪が端面で圧縮板に接しているため、ある程度歪が進行するとその迂りが妨げられ、第二階段に移行しそこでは LOT 面に沿う OL 方向の迂りが支配的になるのかもしれない。異方性体であるため応力分布も複雑であり、今後の検討にまたなければならぬ。

両測定法による観測結果を Table 9 に示す。

5.1.6. 柁目 45 度目切圧縮応力—歪曲線

これは Group III-2 に属する場合であり、Fig. 7 に Extensometer と Dial gauge 測定による応力

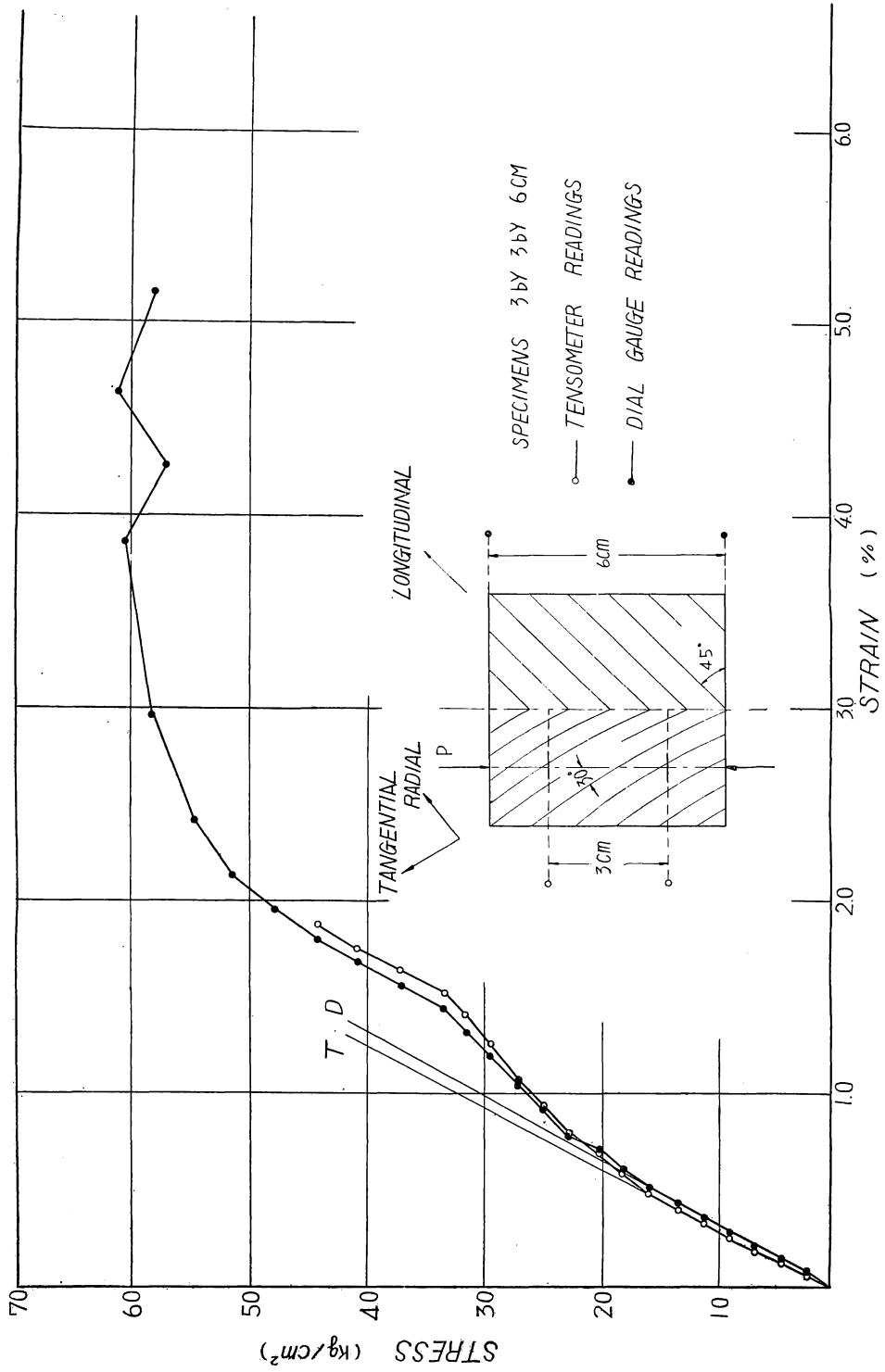


Fig. 6. Stress-strain curve of specimen belonging to Group III-2. ($\alpha = 30$, $\beta = 45$)

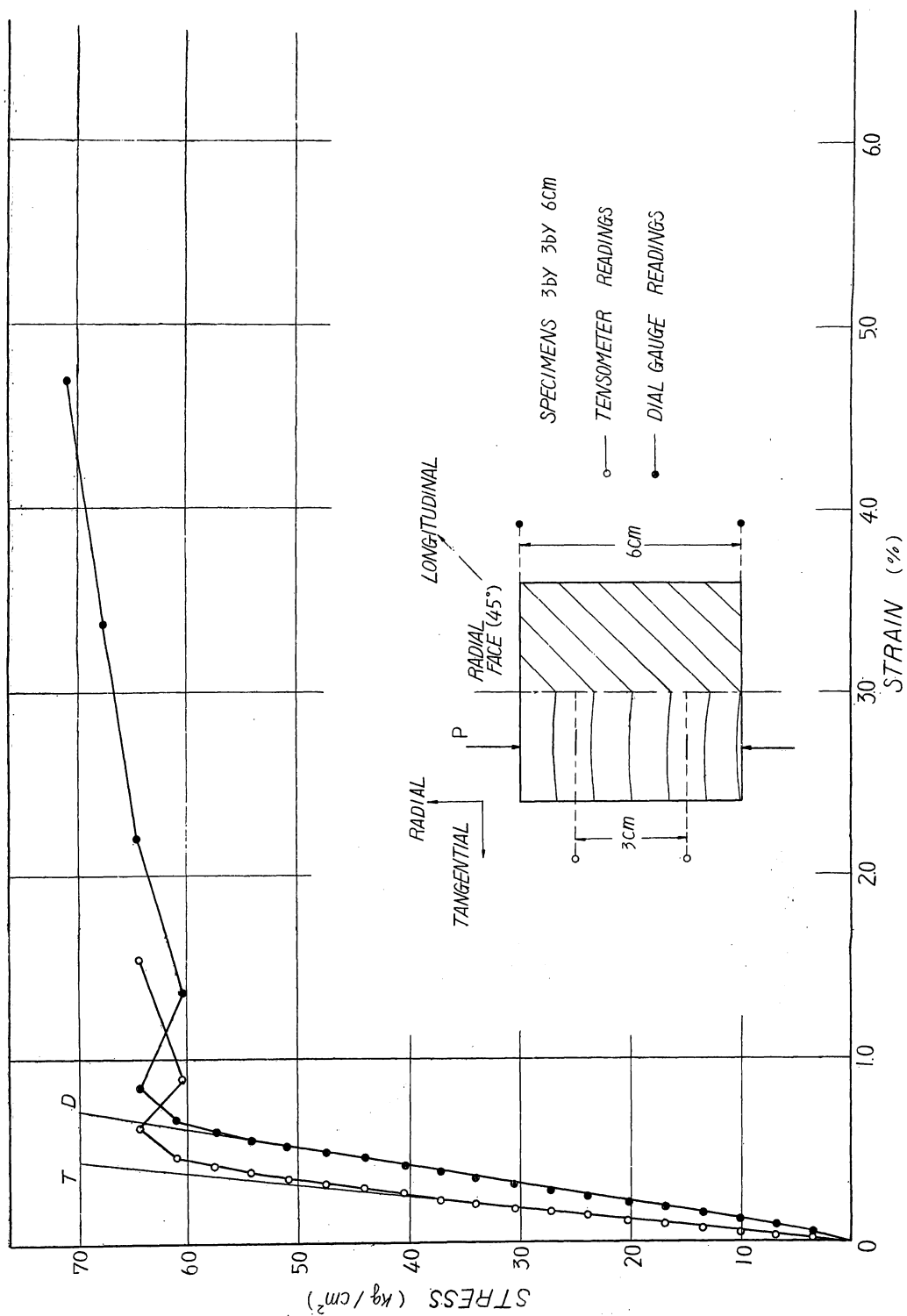


Fig. 7. Stress-strain curve of specimen belonging to Group III-3. ($\alpha = 90$, $\beta = 45$)

Table 9. 全面目切圧縮試験の結果
Results of Group III-2

Properties	Mark	Specimens	Extensometer readings to 3 cm central gauge length				Dial gauge readings to 3 cm total gauge length			
			Range	Mean	Standard deviation	Coefficient of variation	Range	Mean	Standard deviation	Coefficient of variation
			$x_{max}-x_{min}$	$\bar{x}$	$\pm S.D.$	C.V. %	$x_{max}-x_{min}$	$\bar{x}$	$\pm S.D.$	C.V. %
Width of annual rings	b mm	10	—	3.4	—	—	—	3.4	—	—
Summer wood	S %	10	—	9	—	—	—	9	—	—
Angle of annual rings	α degree	10	32—29	30	1	3	32—29	30	1	3
Slope of grain	β degree	10	44—40	42	1	2	44—40	42	1	2
Specific gravity at test	r_u g/cm ³	10	0.398—0.393	0.396	0.002	1	0.398—0.393	0.396	0.002	1
" " , oven dry	R_1 g/cm ³	10	0.344—0.341	0.342	0.001	1	0.344—0.341	0.342	0.001	1
Moisture content	u %	10	16.2—15.4	15.9	0.4	2	16.2—15.4	15.9	0.4	2
Stress at proportional limit	σ_p kg/cm ²	10	13.7—11.3	12.2	1.1	9	18.2—13.6	16.2	1.3	8
Strain at P. L.	ϵ_p %	10	0.450—0.307	0.391	0.042	11	0.670—0.451	0.550	0.061	11
Modulus of elasticity	E kg/cm ²	10	3530—2700	3150	301	10	3510—2700	2960	248	8
Work to P. L.	W_p kg-cm/cm ³	10	0.0306—0.0204	0.0240	0.0043	18	0.0607—0.0350	0.0447	0.0080	18

Table 10. 柁目面 45 度目切圧縮試験の結果
Results of Group III-3

Properties	Mark	Specimens	Extensometer readings to 3 cm central gauge length				Dial gauge readings to 5 cm total gauge length			
			Range	Mean	Standard deviation	Coefficient of variation	Range	Mean	Standard deviation	Coefficient of variation
			$x_{max}-x_{min}$	$\bar{x}$	$\pm S.D.$	V.C. %	$x_{max}-x_{min}$	$\bar{x}$	$\pm S.D.$	C.V. %
Width of annual rings	b mm	10	—	3.7	—	—	—	3.7	—	—
Summer wood	S %	10	—	10	—	—	—	10	—	—
Angle of annual rings	α degree	10	—	90	—	—	—	90	—	—
Slope of grain	β degree	10	47—43	44	1	2	47—43	44	1	2
Original sagitta	a mm	10	—	1.5	—	—	—	1.5	—	—
Specific gravity at test	r_u g/cm ³	10	0.386—0.368	0.375	0.006	2	0.386—0.368	0.375	0.006	2
" " , oven dry	R_1 g/cm ³	10	0.334—0.318	0.324	0.005	2	0.334—0.318	0.324	0.005	2
Moisture content	u %	10	16.3—15.5	15.9	0.2	1	16.3—15.5	15.9	0.2	1
Stress at proportional limit	σ_p kg/cm ²	10	43.9—30.5	36.2	3.7	10	54.2—37.1	46.7	6.4	14
Strain at P. L.	ϵ_p %	10	0.341—0.233	0.265	0.038	14	0.560—0.406	0.475	0.050	11
Modulus of elasticity	E kg/cm ²	10	16000—9900	13900	1940	14	11800—8300	9870	1040	11
Work to P. L.	W_p kg-cm/cm ³	10	0.0696—0.0398	0.0479	0.0090	19	0.152—0.082	0.112	0.028	25
Stress. at yield point	σ_y kg/cm ²	10	71.2—50.4	58.5	7.2	12	71.2—50.4	58.7	4.9	8
Strain at Y. P.	ϵ_y %	10	0.895—0.440	0.563	0.040	7	0.853—0.602	0.704	0.070	10
σ_y/ϵ_y	E_y kg/cm ²	10	13700—5700	10800	2140	20	10300—7230	8360	882	11

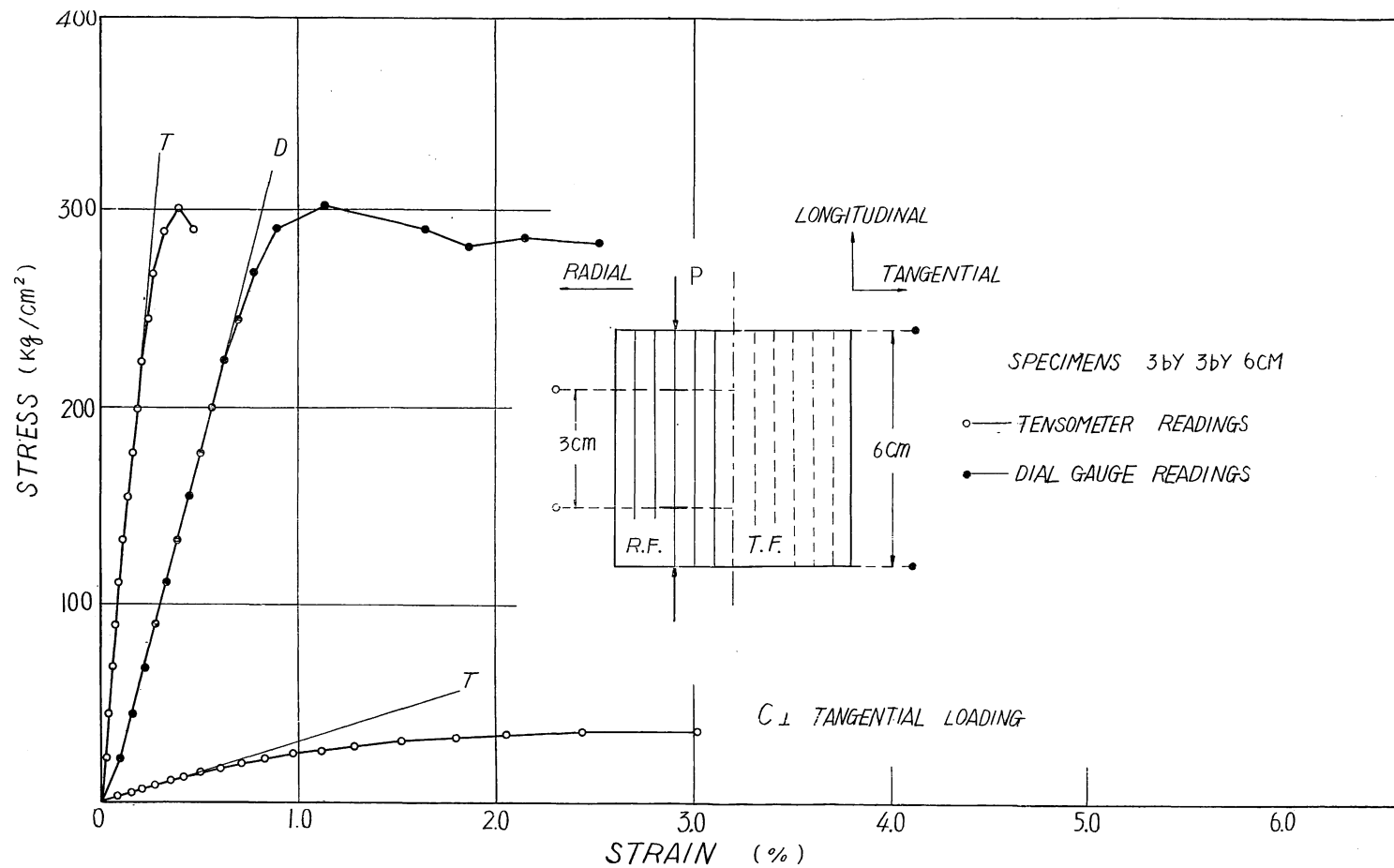


Fig. 8. Stress-strain curve of specimen belonging to Group III-4.
縦圧縮試片の応力-歪曲線 (比較のため Fig. 2 を再掲)

一歪曲線の一例を示す。この線図は Fig. 4 に非常によく類似し、直線部分も長く、比例関係もかなり明瞭で、降伏点も明確である。この降伏点において応力—歪曲線は急激に新しい水平方向の分岐に移行し、鋭いピークと荷重低減現象が認められる。かかる場合は下限降伏点をいわゆる降伏点とした。しかし、この点を過ぎてからは荷重の変動はあるが、曲線は柾目方向横圧縮の場合よりも上昇傾向を示しながら進んでゆく。比例限応力、弾性係数、降伏点応力等も柾目方向横圧縮の場合より大である。

両測定法による観測結果を Table 10 に示す。表中の a (mm) はまだ 45 度に木取らない状態の材片の木口面において、試片巾に対する各年輪の平均矢高である。降伏点応力は比例限応力の約 1.5 倍であり、 E_y は E の約 8 割程度である。

5.1.7. 縦圧縮応力—歪曲線

これは Group III—4 に属する場合であり、Fig. 8 に Extensometer と Dial gauge 測定による応力—歪曲線を示す。前述の横圧縮の場合に比し、直線部分がきわめて長く、歪軸に対する傾斜角はるかに大であることは、同図に示す板目方向横圧縮応力—歪曲線と比較すれば一目瞭然である。いわゆる降伏点も明確であり、この点において鋭いピークがあらわれる。しかし、この点をすぎると塑性変形は増大し、荷重は若干の変動は繰り返すがしだいに低減してゆく。すなわち、降伏点が極限応力となることが横圧縮応力—歪曲線と異なる特徴である。なお、この実験では荷重速度が比較的遅く、端面の近くに圧縮破損線があらわれ、いわゆる端面圧潰試片が大部分を占めていたため、直線域における Dial gauge 直線の傾斜がかなり小さくなっている。

Table 11. 縦圧縮試験の結果
Results of Group III—4

Properties	Mark	Specimens	Extensometer readings to 3 cm central gauge length				Dial gauge readings to 6 cm total gauge length			
			Range	Mean	Standard deviation $\pm$ S.D.	Coefficient of variation $\pm$ C.V. %	Range	Mean	Standard deviation $\pm$ S.D.	Coefficient of variation $\pm$ C.V. %
			$x_{max} - x_{min}$	$\bar{x}$			$x_{max} - x_{min}$	$\bar{x}$		
Width of annual rings	b mm	10	3.9—3.1	3.6	0.23	6	3.9—3.1	3.6	0.23	6
Summer wood	S %	10	10—8	9	0.8	9	10—8	9	0.8	9
Angle of annual rings	α degree	10	—	0 or 90	—	—	—	0 or 90	—	—
Slope of grain	β degree	10	—	0	—	—	—	0	—	—
Specific gravity at test	r_u g/cm ³	10	0.403—0.381	0.388	0.008	2	0.403—0.381	0.388	0.008	2
" " , oven dry	R_1 g/cm ³	10	0.346—0.325	0.333	0.007	2	0.346—0.325	0.333	0.007	2
Moisture content	u %	10	17.1—16.0	16.5	0.4	2	17.1—16.0	16.5	0.4	2
Stress at proportional limit	σ_p kg/cm ²	10	223—200	220	7	3	223—175	200	20	10
Strain at P. L.	ε_p %	10	0.217—0.194	0.207	0.008	4	0.602—0.421	0.497	0.072	15
Modulus of elasticity	E kg/cm ²	10	115000—102000	107000	4100	4	44000—36900	40500	2180	5
Work to P. L.	W_p kg-cm/cm ³	10	0.248—0.195	0.228	0.014	6	0.671—0.369	0.504	0.123	24
Stress at yield point	σ_y kg/cm ²	10	300—284	291	6	2	300—284	291	6	2
Strain at Y. P.	ε_y %	10	0.394—0.313	0.339	0.027	8	1.55—0.95	1.19	0.15	13
σ_y/ε_y	E_y kg/cm ²	10	96500—76200	86200	5890	7	30400—19300	24800	2800	11

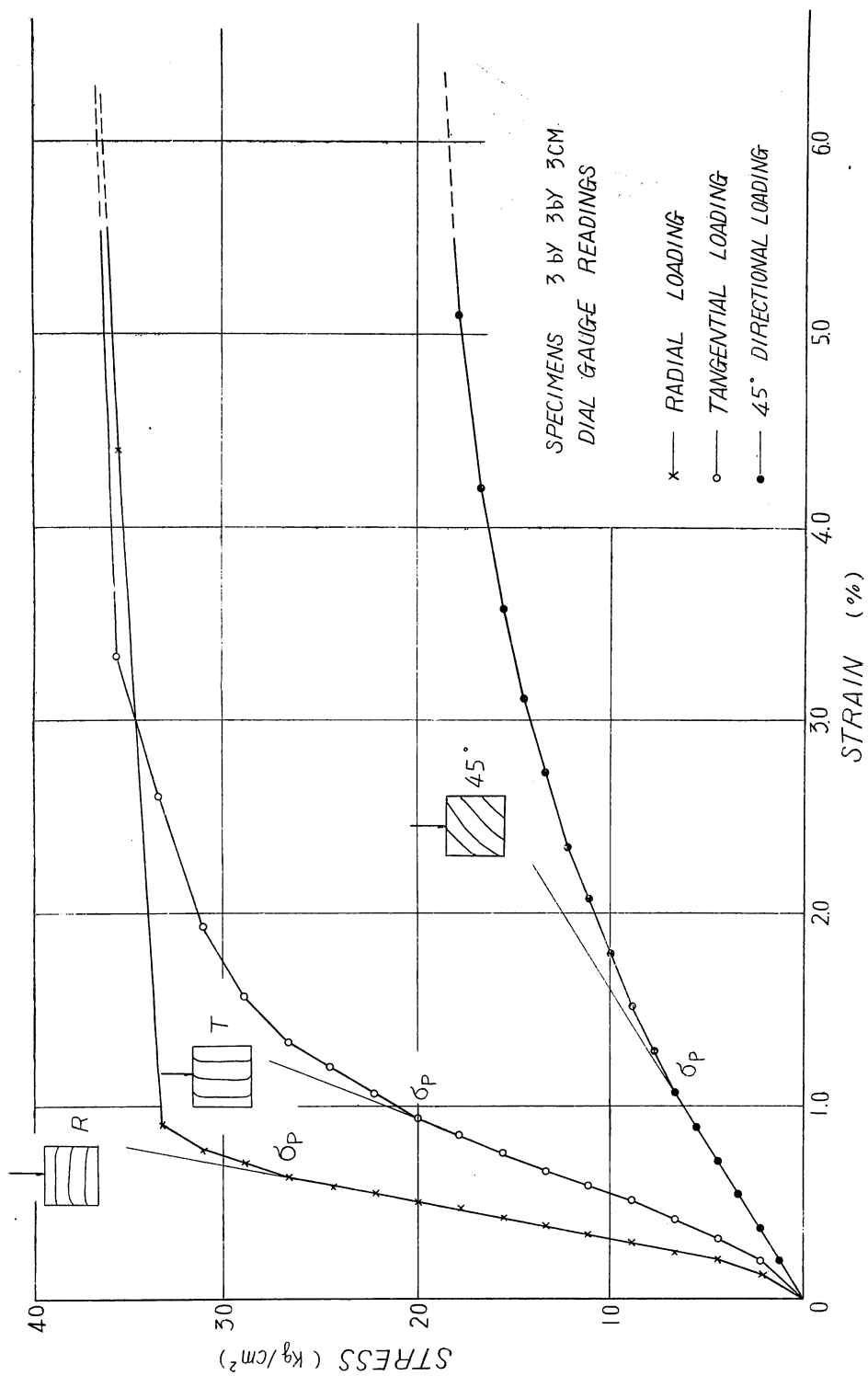


Fig. 9. Stress-strain curves of specimens belonging to Group II.
T—Group II—1, 45—Group II—2, R—Group II—3.

Table 12. $3 \times 3 \times 3 \text{ cm}^3$ 立方体試片の横圧縮試験の結果
Results of Group II—1, 2, 3

Properties	Mark	Tangential loading					45° directional loading					Radial loading				
		Speci- mens	Range	Mean	Stan- dard devia- tion $\pm$ S.D.	Coeffi- cient of varia- tion C.V. %	Speci- mens	Range	Mean	Stan- dard devia- tion $\pm$ S.D.	Coeffi- cient of varia- tion C.V. %	Speci- mens	Range	Mean	Stan- dard devia- tion $\pm$ S.D.	Coeffi- cient of varia- tion C.V. %
		N	x_{max} — x_{min}	$\bar{x}$			N	x_{max} — x_{min}	$\bar{x}$			N	x_{max} — x_{min}	$\bar{x}$		
Width of annual rings	b mm	10	3.5—3.0	3.4	0.17	5	10	3.8—2.9	3.4	0.28	8	10	3.5—3.0	3.3	0.17	5
Summer wood	S %	10	13—8	10	1.6	16	10	14—10	12	1.3	11	10	14—9	11	1.3	12
Angle of annual rings	α degree	10	—	0	—	—	10	51—36	42	4	10	10	—	90	—	—
Slope of grain	β degree	10	—	90	—	—	10	—	90	—	—	10	—	90	—	—
Original sagitta	a mm	10	1.7—0.5	1.0	0.4	40	—	—	—	—	—	10	1.8—0.6	1.1	0.4	40
Specific gravity at test	r_n g/cm ³	10	0.400— 0.374	0.392	0.008	2	10	0.406— 0.383	0.391	0.008	2	10	0.408— 0.391	0.398	0.005	1
" " , oven dry	R_0 g/cm ³	10	0.342— 0.321	0.336	0.007	2	10	0.349— 0.330	0.338	0.007	2	10	0.349— 0.334	0.341	0.005	1
Moisture content	u %	10	17.0—16.8	16.9	0.1	1	10	16.3—15.6	16.0	0.3	2	10	17.0—16.7	16.9	0.1	1
Stress at proportional limit	σ_p kg/cm ²	10	22.3—17.8	20.0	1.4	7	10	7.81—5.55	7.00	0.72	10	10	28.9—24.4	26.5	1.8	7
Strain at P. L.	ϵ_p %	10	0.955— 0.793	0.877	0.049	6	10	1.18—0.84	1.05	0.10	10	10	0.567— 0.465	0.510	0.003	6
Modulus of elasticity	E kg/cm ²	10	2440—2060	2280	124	5	10	721—629	666	24	4	10	5560—4910	5190	183	4
Work to P. L.	W_p kg-cm/cm ²	10	0.1180— 0.0766	0.0910	0.0137	15	10	0.0458— 0.0233	0.0370	0.0070	19	10	0.0820— 0.0568	0.0678	0.0091	13
Stress at yield point	σ_y kg/cm ²	10	35.7—31.1	33.8	1.9	6	—	—	—	—	—	10	33.5—31.0	32.4	1.1	3
Strain at Y. P.	ϵ_y %	10	3.22—2.59	2.78	0.18	7	—	—	—	—	—	10	0.949— 0.695	0.789	0.077	10
σ_y/ϵ_y	E_y kg/cm ²	10	1350—1090	1220	89	7	—	—	—	—	—	10	4650—3510	4140	340	8
Stress at 5 % strain	σ_5 kg/cm ²	10	37.3—31.7	34.6	1.9	5	10	19.8—16.2	18.0	0.9	5	10	36.2—33.0	34.8	1.0	3
Stress at 10 % strain	σ_{10} kg/cm ²	10	37.3—33.2	35.3	1.5	4	10	22.4—20.1	21.2	1.2	6	10	36.5—34.1	35.0	0.7	2

横圧縮応力—歪曲線 (1) (山井)

両測定法による観測結果を Table 11 に示す。降伏点応力は比例限度力の約 1.3 倍であり、 E_y は E の約 8 割である。Dial gauge の場合は弾性係数がやや過小であるが、 σ_y は σ_p の約 1.5 倍であり、 E_y は E の約 6 割程度である。

5.2. 試片の高さによる影響

簡単に圧縮試験を行うときには試片の高さ全体を標点距離とすることが多く、また現場ではこのような条件の応力-歪曲線を必要とする場合がかなりあると思う。しかし、このような場合には端面影響が避けられないので試片形状によつて強度性能が変つてくるかもしれない。したがつて、ここではドイツ試験法に準じ、 $3 \times 3 \times 3 \text{ cm}^3$ の立方体試片による応力-歪曲線を求めた。すなわち、Group II に属する場合であり、歪測定は Dial gauge のみで行つた。板目、45 度および柃目の三方向横圧縮の場合を Fig. 9 に示す。いずれの場合も前述の場合にそれぞれ全く類似した応力-歪曲線を示している。

三方向についてそれぞれ求めた観測結果を Table 12 に示すが、表中の矢高 a (mm) は板目、柃目いずれの場合も同一辺長に対する値である。降伏点応力は板目方向の場合は比例限度力の約 1.5 倍であり、柃目方向の場合は約 1.2 倍である。 E_y は板目方向の場合は E の約 6 割であり、柃目方向の場合は約 8 割である。

なお、前述の Group I の Dial gauge による観測値と比較すれば Table 13 のごとくなる。値は $3 \times 3 \times 3 \text{ cm}^3$ の平均値を $3 \times 3 \times 6 \text{ cm}^3$ の平均値で除したものである。 σ_y , σ_5 , σ_{10} 等の塑性域における応力の値はほとんど変わらないが、 σ_p および W_p はかなり増大し、 E および E_y は低減していることがわかる。とくに、板目および柃目方向横圧縮の場合の比例限度が立方体試片の場合に約 2 倍となっていることは興味がある。これは比例限度における変形の絶対量はほぼ等しいが、標点距離が半分になっているためである。45 度試片の場合に比例限度が前二者の場合ほど増加していないのは、 $3 \times 3 \times 6 \text{ cm}^3$ 試片の中央部分の年輪が圧縮板に接しないため変形しやすいことに起因する。

Table 13. 試片の高さによる影響 Group II/Group I
Comparison of results as influenced by height of specimens

Properties	Loading direction	Tangential	45° directional	Radial
Stress at proportional limit	σ_p	1.6	1.2	1.5
Strain at P. L.	ϵ_p	2.0	1.3	1.9
Modulus of elasticity	E	0.8	0.9	0.8
Work to P. L.	W_p	3.3	1.6	2.9
Stress at yield point	σ_y	1.0	—	1.0
Strain at Y. P.	ϵ_y	1.1	—	1.2
σ_y/ϵ_y	E_y	0.9	—	0.8
Stress at 5 % strain	σ_5	1.0	0.9	1.1
Stress at 10 % strain	σ_{10}	1.0	1.0	1.0

5.3. 年輪傾角と繊維傾角による影響

木材には樹木の固有条件、あるいは木取条件により種々の目切れ材が生ずるが、木材が異方性体であるため、その強度的性能は年輪傾角と繊維傾角に影響される。したがつて、その程度の概略を予見するため、前述の諸結果を整理してみることにする。Table 14 に Extensometer 測定による総括的結果を示

す。弾性常数の一つである弾性係数についてみれば、OL 方向が最大で 107,000 kg/cm²、ついで OR 方向が 7,340 kg/cm²、OT 方向が 3,150 kg/cm² である。なお 45 度試片の場合の弾性係数は柾目 45 度目切試片 (Group III—3) が大きく 13,900 kg/cm²、ついで板目 45 度目切試片 (Group III—1) が 8,090 kg/cm²、45 度方向横圧縮試片 (Group I—2) が最も小さく僅か 750 kg/cm² である。

Table 14. 年輪傾角と繊維傾角による影響
Results as influenced by Angle of annual rings and Slope of grain.

Properties	Mark	Extensometer readings to 3 cm central gauge length								
		Plane LOT			Plane LOR			Plane TOR		
		III-4	III-1	I-1	III-4	III-3	I-3	I-1	I-2	I-3
Angle of annual rings	α degree	0	0	0	90	90	90	0	45	90
Slope of grain	β degree	0	45	90	0	45	90	90	90	90
Stress at proportional limit	σ_p kg/cm ²	220	28.0	11.9	220	36.2	16.2	11.9	4.17	16.2
Strain at P. L.	ϵ_p %	0.207	0.353	0.378	0.207	0.265	0.221	0.378	0.557	0.221
Modulus of elasticity	E kg/cm ²	107000	8090	3150	107000	13900	7340	3150	750	7340
Work to P. L.	W_p kg-cm/cm ²	0.228	0.0493	0.0227	0.228	0.0479	0.0180	0.0227	0.0118	0.0180
Stress at yield point	σ_y kg/cm ²	291	—	34.5	291	58.5	32.7	34.5	—	32.7
Strain at Y. P.	ϵ_y %	0.339	—	1.92	0.339	0.563	0.658	1.92	—	0.658
σ_y/ϵ_y	E_y kg/cm ²	86200	—	1810	86200	10800	5020	1810	—	5020

これらの関係をさらに類別して整理すると次のごとくなる。

5.3.1. 年輪傾角による影響

繊維走向が荷重方向と垂直の場合、すなわち横圧縮の場合に年輪傾角 α が変ると強度的性能、などのよ

Table 15. ROT 面における年輪傾角の影響
Comparison of results as influenced by orientation of
annual rings at Plane ROT.

	Group I						Group II		
	Extensometer reading to 3 cm central gauge length			Dial gauge readings to 6 cm total gauge length			Dial gauge readings to 3 cm total gauge length		
Loading direction	T	45	R	T	45	R	T	45	R
Angle of annual rings	0°	45°	90°	0°	45°	90°	0°	45°	90°
Stress at proportional limit	100	35	136	100	49	141	100	35	133
Strain at P. L.	100	147	58	100	176	60	100	120	58
Modulus of elasticity	100	24	233	100	18	235	100	29	228
Work to P. L.	100	52	79	100	86	85	100	41	75
Stress at yield point	(100)	—	95	(100)	—	92	(100)	—	96
Strain at Y. P.	(100)	—	34	(100)	—	26	(100)	—	28
σ_y/ϵ_y	(100)	—	277	(100)	—	362	(100)	—	339
σ_5	—	—	—	100	54	96	100	52	100
σ_{10}	—	—	—	100	62	96	100	60	99

100=results when $\alpha=0$, $\beta=90$

うに変化するかを検討しよう。Table 15 に Group I および Group II の場合につき、板目方向の値を 100 とし、これに対する 45 度方向、柃目方向の比率を示す。また、Fig. 10 に Group I の試片について Extensometer で測定した σ_p , および E の変化を示し、Fig. 11, Fig. 12 に Dial gauge 測定による Group I および Group II の諸量の変化を示す。

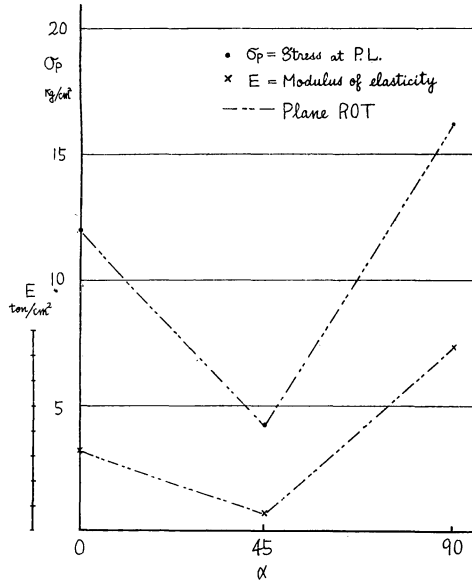


Fig. 10. Variation of σ_p , E with respect to α (Group I, extensometer readings)

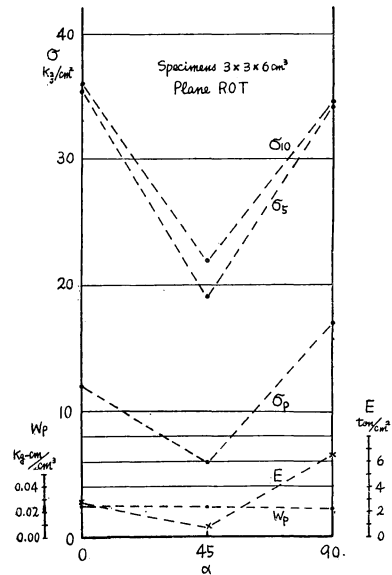


Fig. 11. Variation of σ_p , E, W_p , σ_5 , σ_{10} with respect to α (Group I, dial gauge readings)

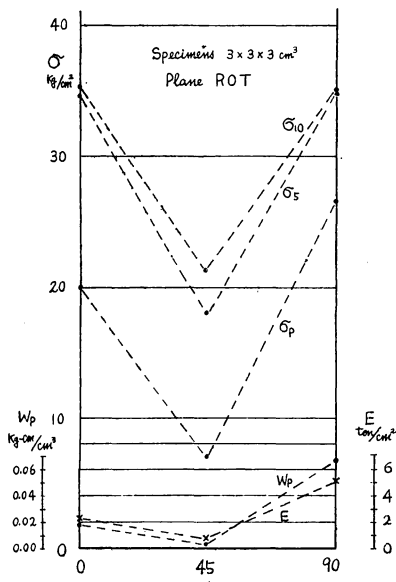


Fig. 12. Variation of σ_p , E, W_p , σ_5 , σ_{10} with respect to α (Group II, dial gauge readings)

いずれの場合も比例限度力および弾性係数は柃目方向の場合が最大で、板目方向、45 度の順に低減する。比例限度は 45 度方向が最も大きく、板目方向、柃目方向の順に低減する。 σ_5 および σ_{10} はいずれの場合も 45 度方向が最小で、板目方向および柃目方向の差はほとんど認められない。なお、表中板目方向の降伏点における応力 σ_y , 歪 ϵ_y , および E_y に括弧がしてあるのは、降伏点の決め方が柃目方向の決め方と異っているからである。

5.3.2. 繊維傾角による影響

年輪傾角 α が一定で、繊維傾角 β が変わると強度的性能はどのように変化するかを検討してみよう。

まず、 α が 0 度、すなわち年輪走向が荷重方向と一致しており、繊維傾角 β のみが変わる場合について述べる。縦圧縮の場合を 100 として、これに対する他の場合の比率を示すと Table 16 のごとくなる。

つぎに、 α が 90 度、すなわち年輪走向が荷重方向と

Table 16. LOT 面における繊維傾角の影響
Comparison of results as influenced by slope of grain at Plane LOT

Group	Extensometer readings to 3 cm central gauge length			Dial gauge readings to 6 cm total gauge length		
	III—4	III—1	I—1	III—4	III—1	I—1
Angle of annual rings	0	0	0	0	0	0
Slope of grain	0	45	90	0	45	90
Stress at proportional limit	100	13	5	100	16	6
Strain at P. L.	100	171	183	100	84	90
Modulus of elasticity	100	8	3	100	18	7
Work to P. L.	100	22	10	100	13	5
Stress at yield point	100	—	(12)	100	—	(12)
Strain at Y. P.	100	—	(566)	100	—	(212)
σ_y/ϵ_y	100	—	(2)	100	—	(6)

100=Results when $\alpha=0$, $\beta=0$

垂直で、繊維傾角 β のみが変わる場合について述べる。縦圧縮の場合を 100 として、これに対する他の場合の比率を示すと Table 17 のごとくなる。

Table 17. LOR 面における繊維傾角の影響
Comparison of results as influenced by slope of grain at Plane LOR

Group	Extensometer readings to 3 cm central gauge length			Dial gauge readings to 6 cm total gauge length		
	III—4	III—3	I—3	III—4	III—3	I—3
Angle of annual rings	90	90	90	90	90	90
Slope of grain	0	45	90	0	45	90
Stress at proportional limit	100	16	7	100	23	9
Strain at P. L.	100	128	107	100	96	54
Modulus of elasticity	100	12	7	100	24	16
Work to P. L.	100	21	8	100	22	5
Stress at yield point	100	20	11	100	20	11
Strain at Y. P.	100	166	194	100	59	54
σ_y/ϵ_y	100	13	6	100	34	20

100=Results when $\alpha=90$, $\beta=0$

なお、Fig. 13 に Extensometer 測定による σ_p の変化および E の変化をそれぞれ示す。いずれの場合も縦圧縮から 45 度目切れの間の変化が激しく、45 度目切れから横圧縮の間の変化は比較的緩やかである。しかし、この三点をどのような曲線で連結するかは、実験的にも理論的にもきわめて興味ある課題であるとともに、実用面でも非常に価値のある問題である。

5.4. ヒステシスおよび変形回復

横圧縮の場合の弾性的性質を詳細に検討するため、Group I に属する三種の試片につき、比例限度附近の低荷重で繰り返し負荷および除去し hysteresis curve を画いた。Fig. 14 が板目方向、Fig. 15 が

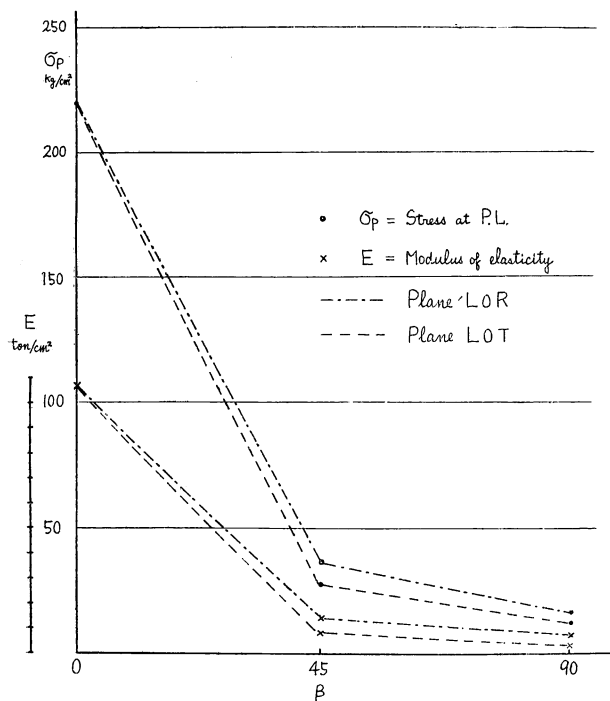


Fig. 13. Variation of σ_p , E with respect to β
(at Plane LOT, LOR. extensometer readings)

10% 程度圧縮し (C/H), 荷重を除去し零になつた時の歪 (B/H) を Dial gauge で測定し, 直ちに試片を取り外し Vernier calipers で測つた時の歪 (B'/H), および約 2 週間室内に放置したときの残留歪 (P.S./H) を求め, その結果を Table 18 に示す。なお B/H と B'/H とは大差がないので表には B/H のみを記載した。今, C/H-P.S./H を歪の回復量とすれば, 柾目方向が最小であり, 板目方向, 45 度方向の順に大きくなつた。最初の圧縮率および圧縮に要した時間が必ずしも同一でないのではつきりしたことはいわれないが, 弾性回復量の大小に関係すると思う。

Table 18. 歪回復と年輪傾角との関係

Relation between Strain-recovery and Angle of annual rings at Plane ROT.

Group	α	β	Direction	H		C/H (%)		B/H (%)		P.S./H (%)		C/H-P.S./H
				Gauge	Speci-	Mean	Stand- ard deviation $\pm$ S.D.	Mean	Stand- ard deviation $\pm$ S.D.	Mean	Stand- ard deviation $\pm$ S.D.	Recovery
				length	mens							
I-1	0	90	Tangential	6	15	12.3	1.0	5.3	0.7	3.2	0.4	9.1
I-2	45	90	45°	6	12	11.7	1.2	5.6	0.8	2.6	0.4	9.1
I-3	90	90	Radial	6	15	10.8	0.6	3.1	0.6	4.5	0.8	6.3
II-1	0	90	Tangential	3	8	10.6	0.3	5.1	0.9	3.0	0.2	7.6
II-2	45	90	45°	3	9	10.5	0.3	6.2	0.7	2.2	0.2	8.3
II-3	90	90	Radial	3	10	10.5	0.4	3.2	0.3	4.6	0.5	5.9

C: Compressive strain at the last load.

B: Recovery of strain when unloaded.

P. S.: Permanent set after two weeks.

45 度方向, Fig. 16 が柾目方向横圧縮の場合である。試片の中央領域の 3 cm を標点距離として Extensometer で測定した場合を左側に, 試片の全長 6 cm を標点距離とした場合を右側に示す。しかし, 資料がまだ少ない上に, 繰り返しの回数も少なく, また 45 度方向の場合は比例限をかなり超えていること等のために, hysteresis curve あるいは loop の特性等を比較判断するにいたつていない。

歪測定法の差異がかなり明瞭であり, 第 1 回目と第 2 回目の直線部分はほぼ平行している。また, 荷重方向を異にした場合の弾性域における応力と歪の関係, とくに比例関係の程度が確認される。

つぎに Group I および Group II に属する試片を Fig. 17 のごとく約

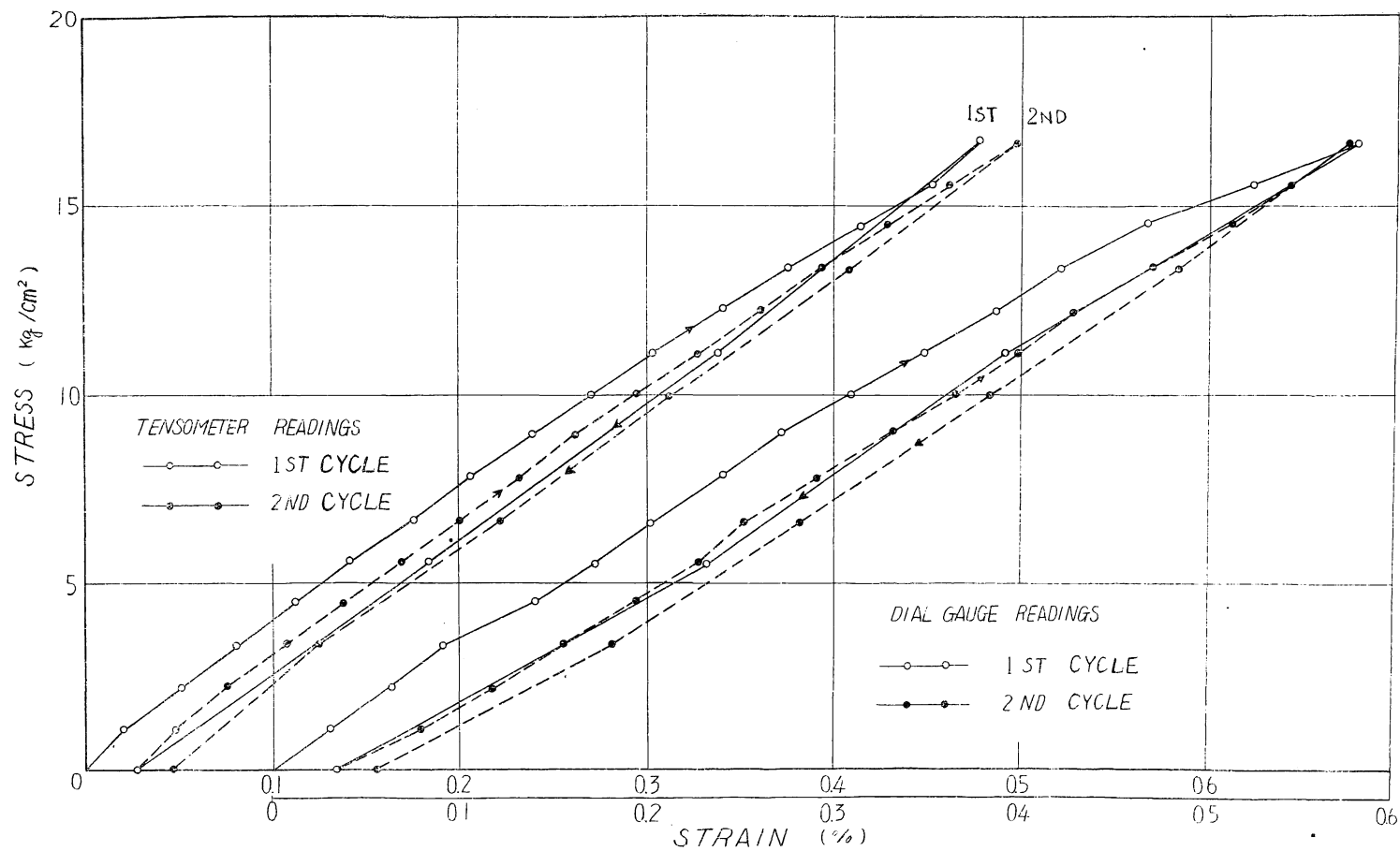


Fig. 14. Hysteresis curve of specimen belonging to Group 1—1.
板目方向横圧縮試片のヒステレシス

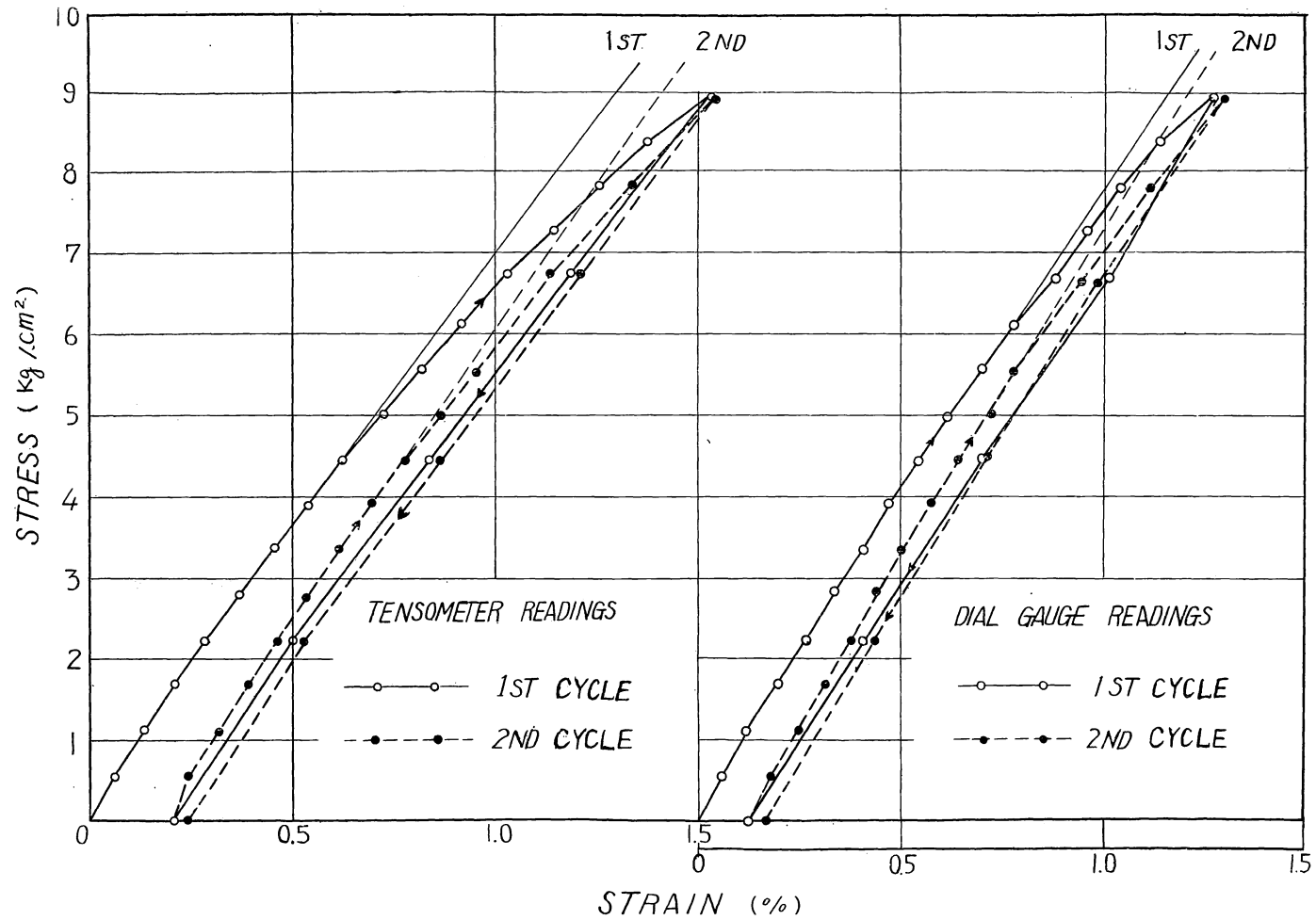


Fig. 15. Hysteresis curve of specimen belonging to Group I-2. 45 度方向横圧縮試片のヒステレシス

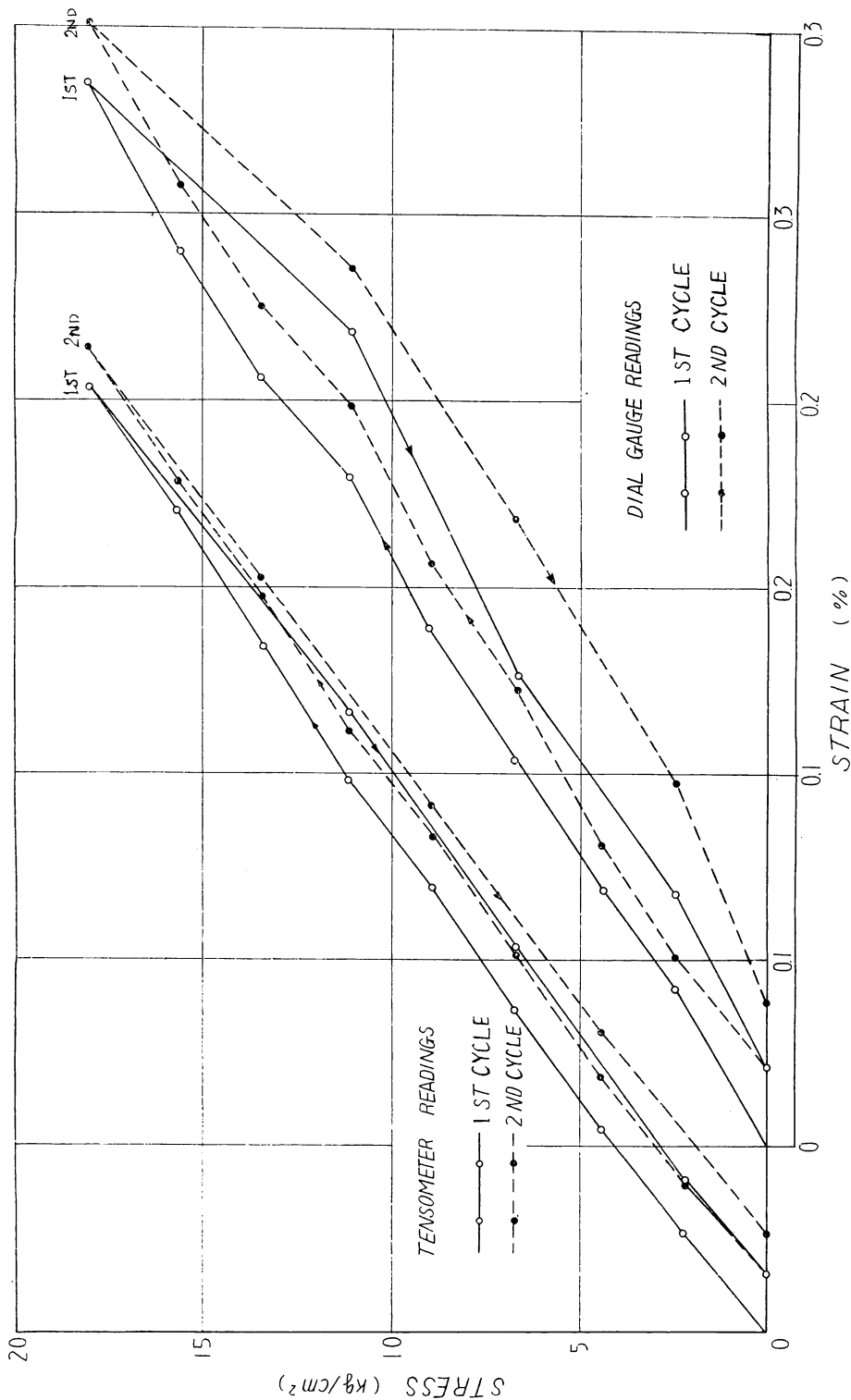


Fig. 16. Hysteresis curve of specimen belonging to Group I-3.
縦目方向横圧縮試片のヒステリシス

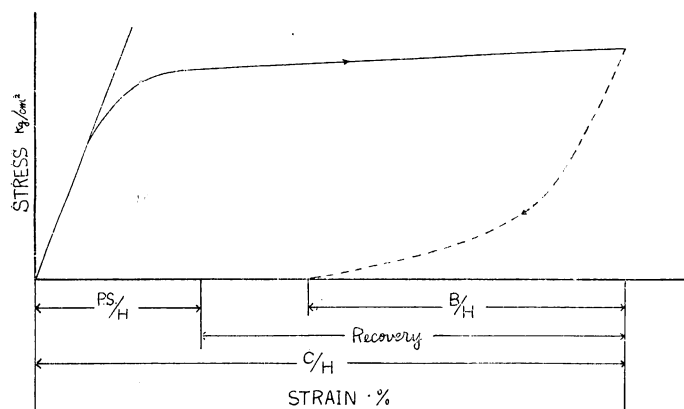


Fig. 17. Recovery. 変形回復

6. 結果の考察

6.1. 特性値について

木材の横圧縮試験の場合は他の試験の場合と異なり、いわゆる極限強さ、あるいは破壊強さの確認が困難であり、いかなる応力を材料の使用応力算定の基礎として採用すべきか問題である。また、木材はこの方向の荷重により非常に変形しやすいので、単に応力のみでなく変形量

のいかなが重要な問題となつてくると思われる。そこで従来横圧縮の特性をどのように表現してきたか、その概要を述べてみよう。

比例限応力： 応力と歪が比例する直線部分の終点に相当する応力であることはいうまでもないが直線部分がきわめて短かく、若干曲線の傾向を示すためか、わが国の規格解説りでは、始原接線を引き、これより 5% 小さい Tangent をもつ直線が応力—歪曲線と交わる点の応力を実用的比例限度としている。しかし、始原接線をどのように引くかが決定的な問題であり、また応力—歪曲線の形式、作図縮尺のいかんによつては交点の決定にもかなり主観的判断の介入を免れない。したがつて、横圧縮試験が木構造の理論的解析ならびに木材の本質把握上の必要から規定されているならば、精度の高い歪測定器具と適合せる力量の試験機を使用して、目的に合致する精度の数値をえるべきだと考える。この実験では比較的荷重刻みを小さくして測定したが、かなり明瞭な直線域が認められたので、直線域の終点に相当する測定点の応力を比例限度とした。したがつて、規格試験の場合よりその値がやや小さいかもしれないがその差はきわめて僅かである。なお、前述の諸表からもわかるように測定方法の精粗いかにによりこの値は変りうるものであるから、使用目的によつてその精度を決めるべきである。また、比例限歪、弾性係数、比例限比仕事量等はこの値に従属的に決まるものであるから同様のことがいわれる。

降伏点： Gaber, E.²⁾氏は荷重の突然に下落する点、あるいは縮みが急激に増大する点に相当する応力を Quetschgrenze とし、多くの樹種につき各方向の観測値をえている。しかし、上述のエゾマツ材では 45 度方向の場合に、そのいずれの場合も認定が困難であつた。また、平井信二氏³⁾はアサダ材の実験では、荷重の方向と年輪とが垂直な場合には Gaber 氏の示したような降伏点は全く見られなかつたと述べている。このように荷重方向と年輪走向のなす角度、あるいは樹種の差により降伏の様相が変化するため、極限強さや破壊強さのごとく一義的には決定できない。なお最近塑性学やレオロジーの進展に伴い、降伏点の定義^{4) 5)}がいろいろの人によつてなされているが、ここでは Gaber 氏のごとく、材料力学で最も普通にいわれている定義⁷⁾に従つた。しかし、縮みが急激に増大する点というのは測定方法によつてかなり不安定で主観的判断の介入を免れない。なお、これまでの資料では降伏点における歪を明記したものが皆無であるが、この点における変形量が圧縮あるいは接手部材の設計に重要な意義を有すると思うので記載することにした。

その他の値：ドイツの DIN, DVM 2184³⁾ では辺長 3 cm 以上の立方体試片を柁目および板目方向に圧縮し、辺長の *Zusammendrückung* (全縮量) が 1% に当る応力を測ることを規定しているが、これは実用的な規定にすぎない。Group II に属する実験結果および Fig. 9 をみればその概略の様相が推定できると思う。

また、Winter, E. と Daskaloff, I. の両氏はブナ材の $2 \times 2 \times 6 \text{ cm}^3$ 試片により、板目方向の応力—歪曲線を描き、歪 1% の点から比例部分の直線に平行線を引き、これと応力—歪曲線が交わる点の応力を *Querdrukfestigkeit* (横圧縮強さ) としている。単なる比較値ならば別に問題はないが、この交点が横圧縮の特性点としていかなる意義を有するかは疑問である。おそらく残留歪 1% に相当する応力としているものと思われるが詳細な説明が記載されていない。なお、梶田茂氏、畔柳鎮氏等もこれらについて述べられているようであるが、詳細な資料がないので不明である。

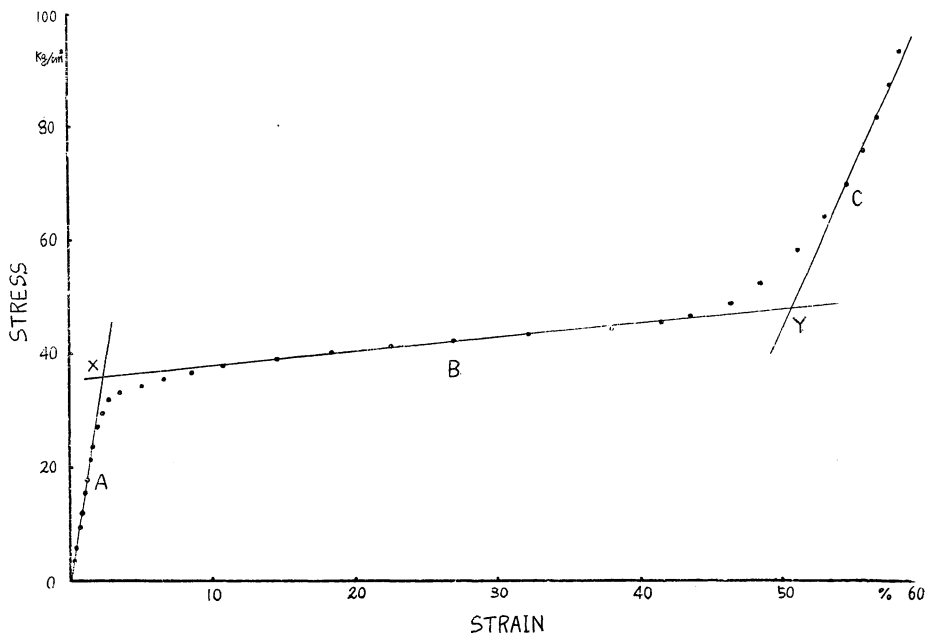


Fig. 18. Stress-strain curve for perpendicular-to-grain compression.
(tangential loading, $3 \times 3 \times 3 \text{ cm}^3$, "Todomatsu")

したがって現在の段階ではどのような値によって木材の横圧縮特性を表現すればよいのか判断し難い状態である。わが国の規格では単に弾性的性質、すなわち比例限度と弾性係数を求めることのみを規定しているが、塑性的性質も考慮した方法が必要であると思う。その試みの一つとして Fig. 18 のとき応力—歪曲線を求め、応力と歪が比例している第一階段を表わす A 直線と、破損を生じて新しい安定の状態に移った第二階段を表わす B 直線とが交わる点 X、さらに材料が緻密化され双曲線的に上昇してゆく状態にある第三階段を表わす C 直線と B 直線とが交わる点 Y を求め、この X および Y の点で応力—歪関係の Phase が概観的に非常に変化するとみて、この二点を巨視的な指標値としたらと考え、トドマツ、ニセアカシヤ、アピトン材で予備実験を行った。Fig. 18 はトドマツ気乾材の板目方向横圧縮の場合である。詳細は別の機会に発表するが概略的に Y 点はトドマツの場合は歪が 40% から 50% 附近であり、アピトン、ニセアカシヤは 30% から 40% 附近であつた。しかし第二、第三階段を安定した形式で

把握することは困難のようである。

なお、この実験では 5%、10% の歪に対応する応力 σ_5 および σ_{10} をもつて塑性変形の進んだ状態の性質を表わした。前述の諸表および Fig. 11, 12 からわかるように、柎目方向と板目方向の場合は σ_5 と σ_{10} はほとんど同じであるが、45 度方向のときは σ_{10} の方がやや大きかった。 σ_5 はかなり変形形式が安定した状態における数値のように思われ、その標準偏差も小さいので、この値と弾性係数の比をとり、弾性的性質と塑性的性質との関係を示す手がかりとした。すなわち、Table 19 にその結果を示す。これについては検討の余地があるが、部分圧縮の場合との比較を行うためである。

Table 19. σ_5/E の値 (dial gauge readings)
Value of σ_5/E (dial gauge readings)

Loading direction	Group I (3×3×6 cm ³)					Group II (3×3×3 cm ³)				
	Specimens	Range	Mean	Standard deviation	Coefficient of variation	Specimens	Range	Mean	Standard deviation	Coefficient of variation
	N	$x_{max} - x_{min}$	$\bar{x}$	± S.D.	C.V. %	N	$x_{max} - x_{min}$	$\bar{x}$	± S.D.	C.V. %
Tangential	15	0.0139— 0.0112	0.0127	0.0007	5	10	0.0163— 0.0142	0.0152	0.0005	3
45° directional	15	0.0268— 0.0232	0.0252	0.0010	4	10	0.0301— 0.0244	0.0270	0.0016	6
Radial	15	0.0055— 0.0047	0.0052	0.0002	2	10	0.0072— 0.0063	0.0067	0.0003	4

6.2. 実験条件について

材料の変形が弾性領域を超え、塑性変形がかなり進むとクリープ現象をとめない、時間影響が大きく変形を支配するため、かかる実験方法では精度を必要とする塑性変形の内容を検討することは困難である。前述のごとく比例限を超えてからの荷重速度を一定にするように努力したが、このことは材料特有の感時性を無視することにもなり、また変形速度が大きいため技術的にも一定にすることは困難であつた。この場合の平均荷重速度は Table 3 に示すごとく、板目および柎目方向の場合は毎分約 5 kg/cm² 程度であるが、45 度方向の場合は変形速度が大きいため約 2.5 kg/cm² とした。ドイツの DIN, DVM 2184 では板目および柎目方向の圧縮試験の場合毎分約 10 kg/cm² とするよう規定してある。わが国の規格のごとく単に弾性的性質のみを求める場合は歪測定が可能である時間的余裕さえあれば、さほど荷重速度の影響は考慮しないでもよいかもしれない。なお、米国では試験機の cross-head の移動速度、すなわち近似的には歪速度を一定にする方法がとられているが、オーストラリアの Kloot, N. H. 氏は Sitka-spruce の縦圧縮試験の際、荷重速度を一定にした場合の強さが、試験機の移動速度を一定にした場合より約 10% 大きくなつたと報じている。このいずれがよいかは別問題として、木材の塑性的性質を研究するためには一定死荷重によるクリープ試験⁴⁾を併わせ行う必要がある。

変形量の測定方法にはいろいろあり、わが国では Okhuizen 歪計、Dial gauge、試験機に附属せる自記歪計等による方法が報告¹⁰⁾¹¹⁾されているが、弾性域および塑性域への転移様相等をかなりの精度で把握するためには Mirror apparatus がよいと思う。

なお、試片の形状については、Table 13 に示すごとく、試片の全長を標点距離にする場合は、高さが異なると歪が変り、弾性係数がかなり違ってくる。しかし、中央領域に標点距離を設定するときはほとんど変らないと思うが、試片の大小により年輪矢高が変化するのでこの影響がどの程度かまだ判然としな

い。すなわち、相似の法則がどの程度に成立するのか疑問である。試片の木取条件、歪測定器具の取付け等から考えると、 $2.5 \times 2.5 \times 5.0 \text{ cm}^3$ 程度の試片がよいのかもしれない。なお、柱体試片は歪が 20% 程度を超えるとやや彎曲してくる危険があるので、これ以上圧縮するときは立方体試片、あるいは試片の断面辺長が高さより長い形状の試片がよいと思う。

また、いわゆる目切れ試片で実験値を求める場合は試片形状、とくに細長比をどの程度にするかが大きな問題となつてくると思う。

さらに、横圧縮部材の場合は追征木取材が現実にはかなり多いが、年輪個有の曲率があるため、この方向の試験値は局部的弱小部となる年輪の迂り変形に支配されると考えられるので、よほど好条件の木取りでないと、平均年輪傾角の表わす効果が疑わしくなるおそれがある。したがって、ここで求めた 45 度方向横圧縮の場合の σ_p , E の値については、なお検討を要する。またこの方向の E は剪断弾性係数にかなり支配されているかもしれない。

6.3. 応力—歪曲線型について

応力—歪曲線は材料の変形特性を総合的に表現したものであり、これにより弾性変形域および塑性変形域における応力と歪の関係が具体的に把握できる。すなわち、これにより

1. 材料内にある原因によつて応力が生じるときいかなる条件のもとに弾性限界に達するか。
2. 弾性域から塑性域への転移はどのような破損形式にしたがつて起るのか。
3. 塑性変形が進むと材料の性質はどのように変化するのか。
4. 材料の処理条件によつてこれらの関係はどのように変化するのか。
5. 繰り返し応力によつて材料の性質はどのように変化するのか。

等の材料の変形内容が推定できるため、強度部材の設計、接手あるいは圧縮治具の緊定力の算定等にきわめて有効であるばかりでなく、材料自体の性質を調べる上に欠くことのできないものである。

したがって、前述のごとき数種の圧縮応力—歪曲線を示したが、材質条件、荷重条件等によりかなり変化にとみ、特に塑性域にはいつてからの線図は複雑である。資料も少なく、あらゆる場合を取り扱うことは困難であるが、弾性域から塑性域へ転移する附近の応力—歪曲線は概略的には 3 つの形式に分類できると思う。

すなわち、Bach, C⁷⁾ 氏が発見したいわゆる降伏点が明確であり、弾性域から塑性域への転移がきわめて急激に起る場合、降伏点があまり明確でなく、弾性域から塑性域への転移が漸進的である場合、迂りを伴うためか非常に低応力で歪が増大し、弾性域から塑性域への転移がきわめて緩慢で降伏点の確認が困難である場合の 3 つである。

応力—歪曲線がこのような種々の形式をとるのは、木材の構造組織あるいはその配列に起因する破損形式が異なるためである。今後、種々の樹種について応力—歪曲線を求め、その分類を行うとともに、定式化を考え種々の変形過程における応力—歪関係を定量的に展望してゆきたい。

6.4. 異方性に関する予備考察

木材は材料の構造組織の異方性に起因するいわゆる直交異方性体であり、各種の目切材あるいは積層材の応力—変形関係を取り扱う場合には避け難い問題となつてくる。したがって、従来多くの研究者¹²⁾¹³⁾により、主として弾性域における弾性常数の決定、弾性常数相互の関係、あるいは破損法則にもとづく理論解

析等が試みられつつあるが、木材のポアソン比、剪断弾性係数の測定が困難であるため、わが国の木材についての実験資料は非常に少ない¹⁴⁾。この実験でも僅かに弾性係数の測定を行つたのみであるが、Table 14 に示すごとく LOT, LOR, ROT 面の 45 度目切試片について実験値を求めてあるので、各主要面において荷重方向と任意の繊維走向あるいは年輪走向をもつ試片の弾性係数は次式によりほぼ推定できると思う。すなわち、

$$E_{\theta} = \frac{1}{\frac{\cos^2\theta}{E_{\theta=0^\circ}} - \frac{\sin^2\theta}{E_{\theta=90^\circ}} (\cos^2\theta - \sin^2\theta) + 4 \frac{\cos^2\theta \sin^2\theta}{E_{\theta=45^\circ}}}$$

また、今後三氏¹⁴⁾は 45 度試片により弾性係数とポアソン比を求め、主軸方向の剪断弾性係数を理論的に計算している。

なお、圧縮強さ、比例限度力の変化を Hankinson 公式¹⁶⁾ で表わす場合が多いが、Jenkin, C. F.¹⁷⁾ 氏および Norris, C. B.¹⁸⁾ 氏の研究は興味深い。

いずれにしても目切れ影響の一番大きい領域は繊維傾角が 0 度から 45 度の間であり、これから 90 度の間は横圧縮の特性がかなり支配的である。また横圧縮異方性の場合には破損の形態が後述のごとくそれぞれ異つているので、この破損法則をどのように取り扱うか問題であると思う。

さらに、Keylwerth, R.¹⁹⁾ 氏は外力による機械的変形と水分による収着的変形との関係を述べ、板目方向および柃目方向の収縮膨脹率 β_T , β_R と弾性係数の間に近似的に次式

$$\frac{E_R}{E_T} = \frac{\beta_T}{\beta_R}$$

が成り立つとしている。

6.5. 変形回復について

変形回復量の大小は、圧縮加工、ボルト締め、楔締め、木ごろし等の施工の際に特に重要な性質であるが、かかる資料はほとんど見当たらないので¹¹⁾、その予備考察として、低応力による繰返し試験、あるいは 10% 圧縮試片の変形回復測定を行つた。前者の試験は資料が不十分であり、実験条件にも検討の余地があるが、板目方向では約 16 kg/cm²、柃目方向では約 17 kg/cm²、45 度方向では約 9 kg/cm² で繰返しを行つた。後者の測定でも実験条件は必ずしも同一でないが、Table 18 に示すごとく柃目方向が最も小さく、45 度方向が最も大きかつた。これは柃目方向の場合は 0.7% 附近ですでに春材部分の迂り挫屈による降伏があり、 σ_5 と σ_{10} はほとんど変化しないのに対し、45 度試片は春材の迂りにより塑性変形はかなり進んでいるが σ_5 と σ_{10} の間にはかなり差があり、応力—歪曲線が上昇の過程にあつたためである。したがつて、かかる結果がいかなる圧縮率の場合にも期待されるかは疑問である。一般に一定荷重で塑性変形域まで圧縮し、ある時間後荷重を除去すると、歪は瞬間的に回復する弾性回復部分と、時間とともに徐々に回復する弾性余効的回復部分があり、最後に残留する永久変形部分とがあるが、変形回復量は応力と時間の函数であるため厳密な区分測定は困難である。今後、種々の圧縮率に対する回復過程、とくに弾性的回復部分の測定を行うとともに水分による処理条件の影響等を検討したい。なお現実の問題としては一定長期荷重、あるいは衝撃荷重を加えた場合の変形回復等が問題になることが多いと思われるので、これらについても検討したい。

6.6. 破損形態の肉眼的観察

材料の変形特性を明らかにし、変形機構を解析するためには、破損および破壊の状態を詳細に検討する

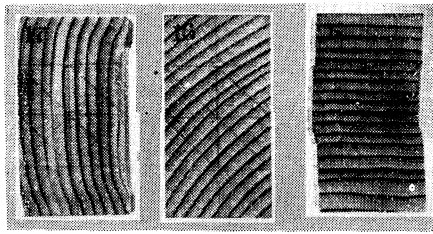


Plate 3. Manner of failure of specimens belonging to Group I.

$$\begin{pmatrix} \alpha = 0^\circ & \alpha = 45^\circ & \alpha = 90^\circ \\ \beta = 90^\circ & \beta = 90^\circ & \beta = 90^\circ \end{pmatrix}$$

必要がある。木材の場合は強度性能に異方性があるばかりでなく、破損および破壊の状態も方向により異なる。すなわち、横圧縮の場合は縦圧縮の場合のごとき繊維挫屈による圧縮破損線が認められないことはもちろんであるが、同一横断面でも荷重方向の差異によりそれぞれ異つた破損形態を示し、応力一歪曲線もそれに応じて変つてくる。したがつて異方性に関する理論解析を行う場合の境界条件に関与する重要な問題である。

板目方向横圧縮試片

Plate 3 および 4 に破損の状態を示すが、端面から約 1 cm 程度離れた附近に試片の挫屈が起きている。これは最初には真直ぐに圧縮されているが、比例限を超えて圧縮されると、材の年輪に固有の初期変曲率があるため、試片の断面内に新しい応力分布が起り、木裏側では圧縮応力が増加し、木表側では圧縮応力は減じ、あたかも比例限度を超えた圧縮を受ける角柱の曲げ挫屈の状態におかれるからである。このような挫屈が端面の近傍に起るのは、中央部附近の曲率が増大しようとしているにもかかわらず、試片が短い上に、試片の端面部が圧縮板との摩擦により固定されているためにこのような部分に挫屈が起きたものと思われる。なお、圧縮がかなり進むと木表側に割裂破壊を生ずることがある。

45 度方向横圧縮試片

Plate 5 に破損の状態を示すが、木口面では春材層が年輪の切線方向に迂り破損を起し、側

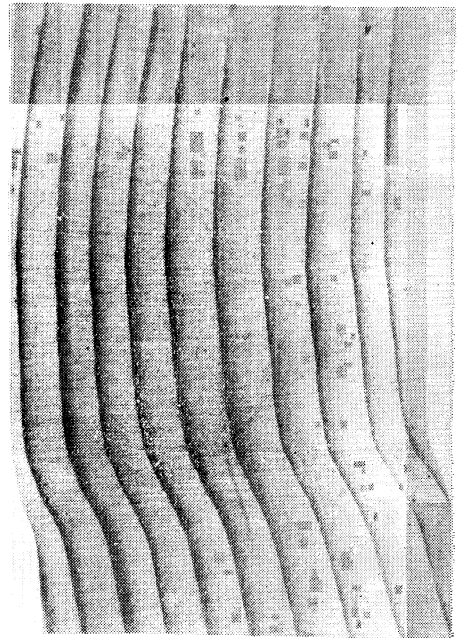


Plate 4. "Bending buckling" at end part of specimen belonging to Group I—1.

$$(\alpha = 0^\circ, \beta = 90^\circ)$$

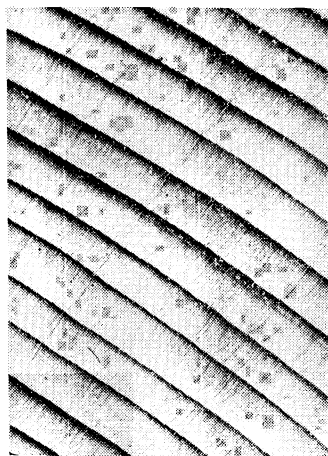


Plate 5. "Sliding of spring wood" appearing on cross-section of specimen belonging to Group I—2.
($\alpha = 45^\circ, \beta = 90^\circ$)

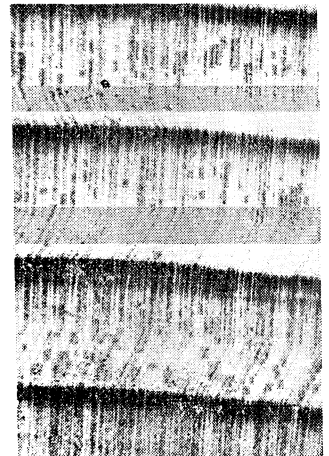


Plate 6. "Buckling caused by sliding of spring wood" appearing on cross-section of specimen belonging to Group I—3.
($\alpha = 90^\circ, \beta = 90^\circ$)

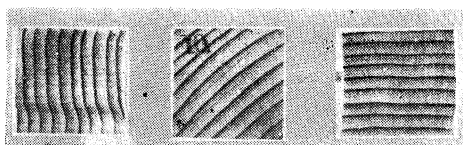


Plate 7. Manner of failure of specimens
belonging to Group II.

($\alpha=0^\circ$, $\alpha=45^\circ$, $\alpha=90^\circ$)
($\beta=90^\circ$, $\beta=90^\circ$, $\beta=90^\circ$)

方に秋材をはさんだ部分が突出したような状態をしているのが認められる。これは春材部のこの方向の剪断弾性係数が非常に小さいためである。なお、後述の柁目方向横圧縮試片と異なり、すべての春材部が同一方向にわり、特に上下圧縮板に接しない中央部分の年輪のわりが大きいのが認められる。

柁目方向横圧縮試片

Plate 6 に木口面の破損状態を示すが、年輪の春材部分で髄線が「く」の字形になつていようにみえるが、これは春材部が剪断挫屈（わり挫屈）とでもいふべき現象を起しているものであり、はなはだ興味があると思う。この現象は秋材部分には認められなかつた。これは秋材細胞は膜壁が厚く、その断面形が矩形形状で、髄線方向の配列が秩序正しく、緻密になつており、この方向の荷重に対しかなり安定であるのに対し、春材細胞は膜壁が薄く、その断面形も不規則で、この方向の配列秩序も乱れているため圧潰しやすいことと、年輪固有の曲率があるため、この部分の切線方向の剪断弾性係数が弱くわりやすいこと等に起因するものと思われる。

以上は主として $3 \times 3 \times 6 \text{ cm}^3$ の試片についての観察であるが、 $3 \times 3 \times 3 \text{ cm}^3$ の試片の場合も全く同様の破損形態を示す。その概観を Plate 7 に示す。

板目 45 度目切試片

Plate 8 にその破損の状態を示す。板目方向横圧縮試片の板目面における繊維が 45 度目切れた試片であるので、上下圧縮板に接しない繊維走向部分の破損形態はそれに類似し、写真のごとく木表側が突出している。

全面目切試片

Plate 9 にその破損の状態を示すが、45 度方向横圧縮試片に類似し、各年輪の春材部がわり破損を起している。

柁目 45 度目切試片

Plate 10 にその破損状態を示す。柁目方向横圧縮試片の柁目面におけ

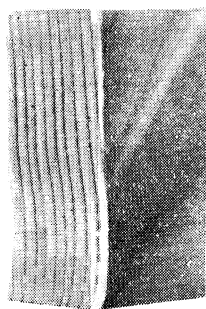


Plate 8. Manner of failure of specimen
belonging to
Group III—1.
($\alpha=0^\circ$, $\beta=45^\circ$)



Plate 9. Manner of failure of specimen
belonging to
Group III—2.
($\alpha=30^\circ$, $\beta=45^\circ$)

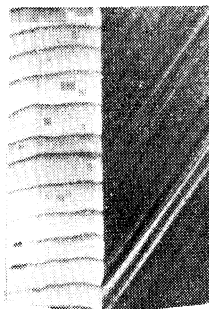


Plate 10. Manner of failure of specimen
belonging to
Group III—3.
($\alpha=90^\circ$, $\beta=45^\circ$)

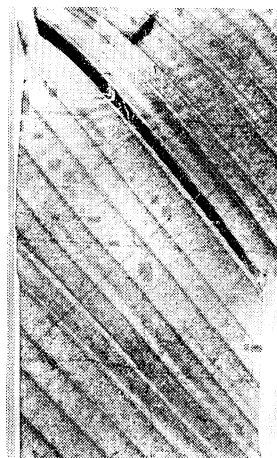


Plate 11. “Sliding rupture” appearing on
radial face of specimen
belonging to Group III—3.
($\alpha=90^\circ$, $\beta=45^\circ$)

る繊維が 45 度目切れた場合であるので、上下圧縮板に接しない年輪部分の破損形態はそれに類似し、写真のごとく柾目面に凸凹状をなしているが、さらに圧縮すると年輪が LOT 面で L 方向に迂り破壊を起すのが Plate 11 にみられる。

縦圧縮試片

上述のいずれの場合とも異なり、繊維挫屈による圧縮破損線が端面近くにみられたものが多いが、これについては Bienfait, J. L.²⁰⁾ 氏および沢田稔²¹⁾氏の研究がある。

以上は単なる肉眼的観察にすぎないが、かかる破損の特性と応力—歪曲線の関係を詳細に検討するためには、種々の圧縮過程における構造組織の形態変化を顕微鏡的に観察すること²²⁾が必要であり、今後に残された課題であろう。

むすび (摘要)

木材の繊維方向に垂直な圧縮荷重を受ける強度部材の断面設計、接手部材の効率上昇、改良木材の圧縮加工等の処理施工に必要な横圧縮応力—歪曲線を求めることが目的であり、この報告では北海道野幌産のエゾマツ気乾材について行つた。なお、目切れ材に対する取扱いを考慮して繊維傾角、年輪傾角がそれぞれ異なる試片についても応力—歪曲線を求め、線図の特性および破損の形態を検討した。また、前述の処理施工を適切に行うためには変形の回復量のいかに重要な問題と思われるのでそれについて予備測定を行つた。さらに、横圧縮試験が木材試験法に規定されておりながら、その方法による資料が皆無に近い現状なため、試験方法および横圧縮特性の表現方法についてかなり詳細に検討した。以上の結果を摘録すれば次のごとくである。

1. 試験機は Amsler 4,000 kg 油圧式手動材料試験機で、比例限を超えてからの荷重速度を一定にするよう調節した。歪測定は試片全長を標点距離とする場合は Dial gauge, 中央領域の 3 cm を標点距離とする場合は湯浅式 Mirror extensometer を使用した。
2. 試片の種類は Table 1 に示すごとく 10 種類であり、試片形状は横圧縮の場合に 3.3.6 cm³ の規格試片と 3.3.3 cm³ の立方体試片を用い、他は 3.3.6 cm³ 試片である。
3. 得られた観測値 σ_p , ϵ_p , E, W_p, σ_y , ϵ_y , E_y, σ_5 , σ_{10} 等は Table 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 に示すごとくであるが、縦圧縮以外は極限強さの確認が困難である。
4. 同じ横圧縮でも降伏点の性格が方向により異なり、極限強さのごとく一義的に決定できないことは理論解析の場合注意を要する。
5. 各試片の応力—歪曲線を Fig. 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 に示すが、いずれも直線部分が認められる。弾性域から塑性域への転移様相は概略的に次の 3 つに分類される。柾目方向横圧縮の場合のごとく、降伏点がきわめて明確で、この点において急激に水平方向へ分岐移行するものと、板目方向横圧縮の場合のごとく、降伏点があり明確でなく漸進的に移行してゆくもの、および 45 度方向横圧縮の場合のごとく、迂り変形を伴うためか、非常に低応力で歪が増大し曲線の傾きが小さくなり、その転移がきわめて緩慢で、前述のごとき降伏点の確認が困難であるものの 3 つの型式がある。
6. これを試片の破損形態についてみると、Plate 6 のごとく柾目方向横圧縮の場合は年輪の春材部に剪断挫屈 (迂り挫屈) 現象が認められ、板目方向の場合は Plate 4 のごとく端面からすこし離れた部分に、試片の曲げ挫屈現象が起り、45 度試片の場合は Plate 5 のごとく年輪の春材部がいずれも切線方

向（同一方向）に迂り現象を起しているのがわかる。この破損の様相が応力—歪曲線を特性づけるものであり、今後顕微鏡的に検討を加える必要がある。

7. 横圧縮試片の年輪傾角の差による観測値の変化は Table 15 および Fig. 10, 11, 12 に示すごとく、比例限度力、弾性係数はともに柾目方向が最大で板目方向がそれにつき、45 度方向が最小である。このため、いわゆる柾目、板目、追柾等の木取材を組合わせ同一レベルにして荷重を加える場合には、追柾木取材が著しく変形して危険を招来するおそれがあるから、木取条件の異なる組合わせ材を強く締め付ける際には注意を必要とする。

8. 繊維傾角の差による影響について概言すれば、応力—歪曲線は縦圧縮の場合は明瞭な比例部分と降伏点を示すが、この点をすぎると曲線はしだいに下落してゆき横圧縮にみられない特性を示す。全面目切圧縮の場合は 45 度横圧縮に最初は似ているが途中で階段状を示すようである。柾目面および板目面の繊維が 45 度目切れた場合の曲線は横圧縮の柾目方向および板目方向にほぼ類似している。破損の形態は縦圧縮試片の場合は繊維の挫屈に起因する圧縮破損線がみられ、全面目切試片、柾目面 45 度目切試片、板目面 45 度目切試片は Plate 8, 9, 10 に示すごとく、それぞれ対応する横圧縮試片の破損形態に類似しているが、同時に繊維方向の迂り破損も附加されている。

9. 繊維傾角の差による観測値の変化は Table 16, 17 および Fig. 13 に示す。比例限度力および弾性係数は縦圧縮の場合が著しく大きく、横圧縮が最小であるが、繊維傾角が 0 度から 45 度に移る間、すなわち縦圧縮から 45 度繊維目切れの間の変化が特に大きいことは注目すべきことである。また同じ 45 度目切れでも柾目面目切れの場合が板目面目切れの場合より比例限度力および弾性係数がやや大である。これらの諸点をどのような線形で結ぶかが目切材取り扱いに対する今後の重要な課題である。なお、目切れ材の試験を行う場合には試片形、特に細長比をどの程度にするかが大きな問題となつてくると思う。

10. 試片の高さの差が横圧縮試験結果におよぼす影響を、試片の全長を標点距離にした場合についてみると、応力—歪曲線および破損の形態は Fig. 2, 3, 4, 8, Plate 3, 7 に示されるごとく全く類似しているが、観測値は Table 13 に示すごとくかなり変化している。すなわち弾性領域では $3 \times 3 \times 3 \text{ cm}^3$ 立方体の場合は $3 \times 3 \times 6 \text{ cm}^3$ の試験体より弾性係数以外の数値が大きくなっているが、このときの比例限度における変形の絶対量は 45 度方向以外はほとんど同じであつた。しかし、塑性域の性質はほとんど大差がなかった。

11. 10% 横圧縮後の試片の変形回復は Table 18 に示すごとく、柾目方向が最小で、45 度方向が最大であつたが、常にかかる関係が成立するかどうかは疑問であり、種々の圧縮率に対する変形回復については今後の検討にまたねばならない。また荷重を加える方法にも検討の余地があり、一定長期荷重および衝撃荷重を加えた後の変形回復等も併わせ考える必要がある。

以上で結果の要約を終るが、横圧縮の場合は応力のみならず変形量が現場設計に重要であると考えられる。したがつて、かかる応力と歪を媒介として木材の変形特性を具体的に、かつ総合的に表現する応力—歪曲線の意義は重大であると思われるので、今後、他の主要樹種についても求めるとともに、この応力—歪曲線を規制する諸条件、変形回復性能および匍匐性能等を併わせ検討したい。

参 考 文 献

- 1) 森 徹: JES 建築 3107 木材試験方法解説, 木材工業, Vol. 8 No. 80 昭. 28 (1953)
- 2) Gaber, E.: Druckversuche quer zur Faser an Nadel-und Laubhölzern. Holz als Roh-u. Werkst. Heft 3. (1937)
- 3) 平井信二: 秩父演習林産アサダの材質研究, 東大演習林報告, No. 35. 昭. 22 (1947)
- 4) Higgins, H. G.: Factors influencing the plastic deformation of timber and plywood in compression. Australian Journal of Applied Science. Vol. 4 No. 1. (1953)
- 5) 山内弘: 塑性変形と加工 (1951)
- 6) 中原益治郎: 金属塑性学 (1935)
- 7) Nádai: Plasticity. (1931)
- 8) DIN DVM 2184. Roh-u. Werkst. Heft 3. (1937)
- 9) Winter, E. & Daskaloff, I.: Festigkeitseigenschaften und elastisches Verhalten von Buche. Holz als Roh-u. Werkst. Heft 1. (1952)
- 10) 平井信二: 富士演習林植栽カラマツの材質, 東大演習林報告, No. 44. 昭. 28 (1953)
- 11) 東 巽: スギ材の圧縮強度に就きての一考察, 日本林学会誌, Vol. 22. No. 12. 昭. 15 (1940)
- 12) 池田健: 直交異方性板の平面応力に就いて, 東大航空研究所報告, 259 号. 昭. 18 (1943)
- 13) 樋口正一: 異方弾性体としての強化積層材, 九大応用力学研究所所報, 第 2 号. 昭. 27 (1952)
- 14) 森 徹: 木材の機械的性質に関する二三の研究, 建築雑誌, No. 546. Vol. 45. 昭. 6 (1931)
- 15) 今俊三: 圧縮及び捻り実験による木材の剪断弾性係数の比較に就て, 北大工学部彙報, 第 1 報. 昭. 23 (1948)
- 16) Kollmann, F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. (1951)
- 17) Jenkin, C. F.: Report on materials of construction used in aircraft and aircraft engines. Great Britain Aeronautical Research Committee. (1920)
- 18) Norris, C. B.: Strength of orthotropic materials subjected to combined stresses. F. P. L. of U. S. A. No. R 1816. (1950)
- 19) Keylwerth, R.: Formänderungen in Holzquerschnitten. Holz als Roh-u. Werkst. Heft 7. (1951)
- 20) Bienfait, J. L.: Relation of the manner of failure to structure of wood under compression parallel to the grain. Jour. Agr. Res. 33. (1926)
- 21) 沢田稔: エゾマツ材の圧縮変形に関する研究 (第 1 報), 北海道林業試験集報, 第 66 号. (1949)
- 22) Küch, W.: Über die Vergütung des Holzes durch Verdichtung seines Gefüges. Holz als Roh-u. Werkst. Heft 8. (1951)

Ryōzaburō YAMAI: Stress-Strain Curves of Wood. (Report 1)
Stress-Strain Curves for Compression Perpendicular
to Grain. (1)

Résumé

Since timber is not a homogeneous material but a complex cellular structure, its mechanical properties and manner of failure may be affected by the orientation of annual rings and the slope of grain with respect to the loading axis. This paper presents mainly the characteristics of stress-strain curves and manner of failure of wood in the compression perpendicular to grain test at which the load is applied not partially but uniformly on the end surface of specimens. An appreciation of these results is of use in the calculation of bearing capacities of timber fasteners, the design of stress-member subjected to compression perpendicular to grain and manufacture of composite wood products.

The species of test material was “Yezomatsu” (*Picea jezoensis* Carr.) grown in Hokkaido, Japan. The dimensions, the orientation of annual rings (α), the slope of grain (β) and the related properties of specimens belonging to each group are illustrated in Fig. 1 and Table 1, 2. The testing machine employed in this experiment was the Amsler 4,000 kg hydraulic hand-power universal testing machine, the speed of loading beyond the proportional limit was controlled at a uniform rate of stressing. The capacity at test, the load increment and the average speed of loading were shown in Table 3.

The compressive deformation to total gauge length of specimen was measured by means of a dial gauge (1/100 mm unit) set up to the head of testing machine, and the deformation to 3 cm central gauge length at two side surfaces was measured by the Yuasa's mirror extensometer (1/500 mm unit, the 1st method) as shown Plate 1 & 2. The results obtained are summarized as follows:

(1) The results and curves of Group I-test are shown in Table 5, 6, 7 and Fig. 2, 3, 4, respectively. These curves represent the typical type of stress-strain curves of specimens tested in compression perpendicular to grain. It is noted that in the test the ultimate stress is difficult to determine in general.

In the tangential loading curve (Fig. 2), the strain was practically proportional to the stress below a certain limiting stress ($\sigma_p \doteq 12 \text{ kg/cm}^2$, $\epsilon_p \doteq 0.38\%$ in extensometer readings). The transition from the domain of elastic deformation into that of the plastic state was gradual, and consequently the definite yield point, which C. Bach first observed, could not be recognized. But, after a certain point ($\sigma_y \doteq 35 \text{ kg/cm}^2$, $\epsilon_p \doteq 2\%$ in extensometer readings), the horizontal branch of curve approached gradually parallel to the strain axis with an increasing permanent deformation.

In the 45° directional loading curve (Fig. 3), the proportional limit was very small ($\sigma_p \doteq 4.2 \text{ kg/cm}^2$, $\epsilon_p \doteq 0.56\%$), the deformation accompanied by sliding began gradually to develop at a very small load and the transition from elastic stage to plastic stage was very gradual, in consequence a definite yield point could not be recognized. Moreover, because the annual rings of middle part which did not touch the metal bearing plates were easily deformed, the strain to total gauge length of specimen was smaller than that to 3 cm central gauge length as shown in Fig. 3.

In the radial loading curve (Fig. 4), the stress first increased in fairly

exact proportion to the strain ($\sigma_p \doteq 16 \text{ kg/cm}^2$, $\epsilon_p \doteq 0.22 \%$), and a very definite yield point was recognized ($\sigma_y \doteq 33 \text{ kg/cm}^2$, $\epsilon_y \doteq 0.66 \%$). At this point the great permanent deformations suddenly began to appear, the load decreased a little, and consequently the transition to horizontal branch of curve was very sharp. Such a small drop in load was repeated again and again with an increasing of strain.

Next, the manner of failure was examined with the naked eye at cross-section of specimens after about 10% compression.

In tangential loading specimens (Plate 3 & 4), the buckling was recognized in the neighborhood of end of specimen. It was probably caused by an additional bending stress produced by an unavoidable eccentricity of loading depended on the initial curvature of annual rings and the friction existing in the compressed surfaces of specimen. The marked increase in strain at plastic stage of Fig. 2 may be caused by the buckling.

In 45° directional loading specimens (Plate 3 & 5), the sliding failure of weakness zones in spring wood was recognized along the annual rings. This phenomenon was due to the smallest value of modulus of rigidity G_{RT} of the spring wood at which the arrangement of thin-walled cells was in disorder.

In radial loading specimens (Plate 3 & 6), the buckling caused by sliding of spring wood was recognized, but such a phenomenon was not observed in summer wood at which the arrangement of thick-walled cells was in order radially. It may be perhaps caused by the smallest value of G_{RT} of spring wood. Owing to the phenomenon, the above-mentioned curve (Fig. 4) showed the well-defined yield point, the sharp transition and the consequent decrease in stress.

(Ⅱ) In the case of cubic specimens belonging to Group Ⅱ, both the characteristics of curves and the manner of failure were similar to that of Group I mentioned above, respectively (Fig. 9 & Plate 7). But their strength figures varied as shown in Table 12 & 13.

(Ⅲ) The results and curves of specimens belonging to Group Ⅲ were shown in Table 8, 9, 10, 11 and Fig. 5, 6, 7, 8 respectively. Specimens when $\alpha=0^\circ$, $\beta=45^\circ$ (Fig. 5) and specimens when $\alpha=90^\circ$, $\beta=45^\circ$ (Fig. 7) showed the type of curve and the manner of failure similar to that when $\alpha=0^\circ$, $\beta=90^\circ$ and that when $\alpha=90^\circ$, $\beta=90^\circ$ described above, respectively (Plate 8, 10). But Specimens when $\alpha=90^\circ$, $\beta=45^\circ$ exhibited the sliding rupture under further loading (Plate 11).

Specimens when $\alpha=30^\circ$, $\beta=45^\circ$ showed a stepped curve as illustrated in Fig. 6 and the manner of failure was similar to that when $\alpha=45^\circ$, $\beta=90^\circ$ (Plate 9).

Specimens compressed parallel to grain ($\alpha=0^\circ$ or 90° , $\beta=0^\circ$) showed a high proportional limit ($\sigma_p \doteq 220 \text{ kg/cm}^2$, $\epsilon_p \doteq 0.20 \%$) and the well-defined yield point (=ultimate stress). Failure caused by buckling of fiber was recognized.

(Ⅳ) The variation in mechanical properties as affected by the orientation of annual rings (α) and the slope of grain (β) to loading axis are shown in Table 14, 15, 16, 17 and Fig. 10, 11, 12, 13, respectively.

(Ⅴ) Hysteresis curves at low stresses of specimens belonging to Group I are shown in Fig. 14, 15, 16. Moreover, after the load had been removed, the change of total length of specimens belonging to Group I and Ⅱ was measured by a vernier calipers (1/20 mm unit). The results are shown in Table 18 and Fig. 17. The least recovery was recorded in specimens when $\alpha=90^\circ$, $\beta=90^\circ$.

附 表

Table 1. 板目方向横圧縮試驗結果 (3×3×6 cm³)

No.	Related properties						Extensometer readings to 3 cm central gauge length						
	b mm	S %	a mm	r _n g/cm ³	R ₀ g/cm ³	u %	σ_p kg/cm ²	ϵ_p %	E kg/cm ²	W _p kg-cm/cm ³	σ_y kg/cm ²	ϵ_y %	E _y kg/cm ²
1	2.9	16	3.1	0.411	0.357	15.0	12.2	0.378	3240	0.0231	36.7	2.03	1760
2	3.0	14	3.0	0.414	0.360	15.2	13.3	0.392	3400	0.0261	35.6	1.87	1910
3	3.0	16	2.8	0.403	0.355	14.9	13.3	0.408	3270	0.0271	35.6	1.86	1920
4	3.0	13	2.8	0.402	0.352	14.6	13.4	0.398	3360	0.0267	35.7	1.92	1860
5	3.0	13	3.9	0.406	0.352	15.2	13.3	0.399	3330	0.0270	35.5	1.83	1940
6	2.9	15	3.8	0.409	0.355	15.3	11.1	0.353	3140	0.0196	35.5	2.01	1770
7	2.8	16	3.1	0.404	0.350	15.3	11.1	0.330	3360	0.0183	35.5	1.85	1920
8	3.1	16	3.1	0.402	0.351	14.8	11.1	0.327	3400	0.0181	35.5	1.94	1830
9	2.9	15	3.0	0.409	0.355	15.3	13.3	0.415	3240	0.0276	35.6	2.05	1740
10	3.0	14	3.1	0.403	0.351	14.7	13.3	0.393	3400	0.0261	36.7	1.93	1900
11	3.1	13	3.0	0.408	0.352	16.1	13.3	0.375	3560	0.0250	—	—	—
12	2.9	13	3.2	0.403	0.351	14.7	14.5	0.414	3510	0.0300	—	—	—
13	3.8	11	3.0	0.387	0.337	14.8	11.1	0.346	3220	0.0192	35.6	1.87	1910
14	3.9	12	4.1	0.386	0.337	14.5	13.3	0.373	3570	0.0248	36.7	1.68	2180
15	3.1	12	2.9	0.391	0.338	15.5	11.1	0.424	2640	0.0235	28.9	2.04	1420
16	3.1	12	3.0	0.380	0.328	16.0	10.0	0.355	2820	0.0178	—	—	—
17	3.1	12	2.9	0.382	0.331	15.2	10.1	0.367	2760	0.0185	29.2	1.75	1670
18	3.1	14	3.1	0.385	0.333	15.6	10.1	0.407	2490	0.0206	29.1	2.16	1350
19	2.9	9	5.1	0.391	0.337	16.0	9.0	0.340	2640	0.0153	—	—	—
20	2.9	10	5.2	0.390	0.336	16.0	10.1	0.373	2710	0.0188	—	—	—

Table 2. 45 度方向横圧縮試驗結果 (3×3×6 cm³)

No.	Related properties					Extensometer readings to 3 cm central gauge length				
	b mm	S %	α degree	r_n g/cm ³	R_1 g/cm ³	u %	σ_p kg/cm ²	ϵ_p %	E kg/cm ²	W_p kg-cm/ cm ³
1	3.3	9	47	0.389	0.352	15.0	4.51	0.600	751	0.0155
2	3.3	8	46	0.401	0.348	15.0	44.8	0.593	756	0.0133
3	3.2	9	47	0.405	0.352	15.0	4.50	0.614	732	0.0138
4	3.2	11	46	0.405	0.352	15.1	5.09	0.683	734	0.0174
5	3.4	10	49	0.400	0.348	15.2	5.09	0.699	729	0.0178
6	3.2	9	47	0.407	0.355	14.7	3.40	0.427	797	0.0073
7	3.2	10	47	0.395	0.345	14.8	3.95	0.527	750	0.0104
8	3.4	12	48	0.402	0.351	14.6	4.52	0.605	747	0.0137
9	3.1	12	49	0.398	0.345	15.5	3.91	0.495	790	0.0097
10	3.3	11	47	0.401	0.349	15.0	3.95	0.541	730	0.0107
11	3.2	12	48	0.397	0.346	14.9	3.94	0.561	702	0.0111
12	3.2	12	49	0.400	0.349	14.7	3.96	0.530	747	0.0105
13	3.2	12	50	0.397	0.346	14.7	3.96	0.527	752	0.0104
14	3.1	14	49	0.399	0.347	14.9	3.37	0.437	772	0.0074
15	3.2	11	49	0.381	0.340	15.0	3.96	0.537	737	0.0106
16	3.2	13	48	0.413	0.360	14.8	4.51	0.625	721	0.0141
17	3.1	12	48	0.405	0.350	15.5	3.39	0.433	784	0.0073
18	3.2	12	47	0.413	0.359	15.0	4.51	0.593	760	0.0134

Results of Group I—1 ($\alpha=0^\circ$, $\beta=90^\circ$)

Dial gauge readings to 6 cm total gauge length									Conditions			
σ_p kg/cm ²	ε_p %	E kg/cm ²	W_p kg-cm/ cm ³	σ_y kg/cm ²	ε_y %	E_y kg/cm ²	σ_5 kg/cm ²	σ_{19} kg/cm ²	L_s kg/cm ² / min	L_f kg	T °C	H %
13.3	0.456	2930	0.0303	35.6	2.59	1370	36.9	37.8	2.4	10	14.8	88
13.3	0.425	3140	0.0283	33.3	2.02	1650	35.0	36.9	5.2	20	14.8	88
15.6	0.502	3100	0.0392	36.7	2.58	1420	38.0	38.5	5.6	20	16.0	83
13.4	0.447	3000	0.0300	36.8	2.50	1470	38.4	39.0	5.1	20	16.0	83
13.3	0.448	2970	0.0298	36.6	2.78	1320	36.8	37.3	5.0	20	16.2	83
13.3	0.479	2780	0.0319	35.4	2.87	1240	36.1	36.6	5.0	20	16.5	88
13.3	0.436	3060	0.0290	36.6	2.50	1470	36.7	36.9	4.9	20	16.7	88
13.3	0.449	2970	0.0299	35.5	2.73	1300	35.7	36.6	5.1	20	16.8	83
13.3	0.475	2810	0.0316	33.3	2.26	1480	35.8	36.0	4.9	20	17.0	83
13.3	0.461	2900	0.0307	35.6	2.33	1530	36.8	37.1	5.2	20	17.2	83
13.4	0.419	3190	0.0281	—	—	—	—	—	2.8	10	14.4	87
14.5	0.490	2950	0.0255	—	—	—	—	—	2.9	10	15.0	88
13.3	0.492	2710	0.0327	35.6	2.88	1240	36.4	36.9	5.1	20	17.5	83
15.6	0.590	2640	0.0460	35.6	2.59	1370	36.6	36.7	5.1	20	17.6	83
8.9	0.382	2340	0.0170	28.9	2.44	1190	31.2	31.2	5.1	20	17.7	88
8.9	0.349	2550	0.0155	—	—	—	—	—	3.7	10	15.4	88
9.0	0.388	2310	0.0175	29.2	2.19	1330	30.5	30.9	3.5	10	17.7	88
10.1	0.439	2300	0.0222	29.1	2.53	1150	30.3	30.5	3.5	10	17.5	83
7.9	0.373	2100	0.0147	—	—	—	—	—	3.1	10	16.1	83
9.0	0.404	2200	0.0182	—	—	—	—	—	3.5	10	15.6	88

Results of Group I—2 ($\alpha=45^\circ$, $\beta=90^\circ$)

Dial gauge readings to 6 cm total gauge length						Conditions			
σ_p kg/cm ²	ε_p %	E kg/cm ²	W_p kg-cm/ cm ³	σ_5 kg/cm ²	σ_{19} kg/cm ²	L_s kg/cm ² / min.	L_f kg	T °C	H %
5.63	0.706	798	0.0199	19.4	22.6	2.5	10	16.0	88
5.60	0.771	727	0.0216	19.5	23.1	2.6	10	16.8	88
6.19	0.808	773	0.0250	19.4	22.5	2.3	5	17.2	88
6.23	0.819	761	0.0255	19.6	22.4	2.0	5	17.6	88
6.22	0.812	767	0.0253	20.0	22.1	1.8	5	18.0	83
6.23	0.831	750	0.0259	19.8	23.1	2.2	5	18.1	78
5.65	0.721	783	0.0204	19.0	22.1	2.2	5	18.5	83
5.65	0.720	785	0.0203	18.2	22.0	2.1	5	19.0	74
5.58	0.736	759	0.0205	19.4	22.4	2.1	5	19.5	79
6.22	0.825	754	0.0257	19.2	22.3	2.4	5	19.6	79
5.61	0.728	770	0.0205	18.9	21.2	2.3	5	19.6	79
6.22	0.839	742	0.0269	19.2	22.1	2.4	5	19.8	79
6.23	0.825	754	0.0257	18.8	21.5	2.4	5	19.6	78
6.18	0.849	728	0.0262	19.2	23.2	2.5	5	19.5	79
6.22	0.794	783	0.0247	19.1	21.9	2.5	5	15.6	88
6.20	0.799	776	0.0248	—	—	2.3	5	16.2	88
5.65	0.716	789	0.0202	—	—	1.8	5	16.5	88
6.20	0.770	804	0.0239	—	—	2.6	5	17.0	88

Table 3. 柁目方向横圧縮試驗結果 (3×3×6 cm³)

No.	Related properties						Extensometer readings to 3 cm central gauge length						
	b mm	S %	a mm	r_u g/cm ³	R_0 g/cm ³	u %	σ_p kg/cm ²	ϵ_p %	E kg/cm ²	W_p kg·cm/cm ³	σ_y kg/cm ²	ϵ_y %	E_y kg/cm ²
1	3.5	15	1.2	0.397	0.342	16.1	17.9	0.220	8120	0.0197	35.7	0.733	4870
2	3.5	12	1.3	0.399	0.344	16.0	15.6	0.204	7670	0.0159	33.5	0.728	4600
3	3.4	13	1.3	0.393	0.339	16.0	15.6	0.209	7460	0.0163	33.3	0.633	5260
4	3.4	13	1.3	0.393	0.339	15.9	15.6	0.196	7940	0.0153	36.7	0.763	4810
5	3.5	12	0.9	0.403	0.348	15.8	20.0	0.252	7940	0.0252	37.8	0.773	4890
6	3.4	12	1.0	0.400	0.344	16.2	15.6	0.189	8250	0.0147	35.7	0.733	4870
7	3.4	11	1.2	0.394	0.340	16.1	15.6	0.237	6550	0.0185	31.3	0.687	4560
8	3.5	12	1.2	0.397	0.342	15.7	15.7	0.221	7120	0.0173	31.4	0.608	5170
9	3.4	12	1.3	0.411	0.354	15.9	17.8	0.247	7210	0.0220	33.3	0.690	4830
10	3.4	13	1.3	0.394	0.340	15.9	17.8	0.253	7060	0.0225	31.2	0.583	5350
11	3.5	11	1.4	0.398	0.343	16.0	15.6	0.197	7930	0.0154	29.0	0.473	6130
12	3.7	10	1.1	0.390	0.336	16.0	15.6	0.220	7090	0.0172	31.2	0.660	4730
13	3.5	13	1.1	0.393	0.338	16.0	15.6	0.225	6900	0.0175	31.3	0.640	4890
14	3.5	11	1.3	0.395	0.341	15.9	15.6	0.220	7070	0.0172	31.3	0.635	4930
15	3.4	12	1.3	0.398	0.344	15.8	15.6	0.207	7560	0.0161	29.0	0.483	6000
16	3.6	12	1.4	0.390	0.337	16.0	15.7	0.233	6720	0.0183	31.3	0.700	4470
17	3.5	10	1.1	0.390	0.337	15.9	17.9	0.253	7060	0.0227	—	—	—
18	3.5	11	1.2	0.398	0.342	15.8	15.6	0.233	6700	0.0182	—	—	—
19	3.5	12	1.2	0.398	0.344	15.7	13.4	0.184	7280	0.0123	—	—	—
20	3.5	11	1.4	0.397	0.343	15.7	15.6	0.218	7170	0.0170	—	—	—

Table 4. 板目方向横圧縮試驗結果 (3×3×3 cm³)

No.	Related properties						Dial gauge		
	b mm	S %	a mm	r_u g/cm ³	R_0 g/cm ³	u %	σ_p kg/cm ²	ϵ_p %	E kg/cm ²
1	3.5	10	1.3	0.396	0.339	16.9	17.8	0.861	2060
2	3.2	13	0.4	0.380	0.325	16.9	22.2	0.931	2390
3	3.5	9	1.4	0.395	0.338	16.8	20.1	0.955	2110
4	3.0	10	0.9	0.400	0.342	17.0	20.0	0.821	2440
5	3.5	9	1.7	0.399	0.341	17.0	17.8	0.793	2240
6	3.5	11	1.0	0.398	0.340	17.0	20.0	0.874	2290
7	3.2	12	0.5	0.393	0.336	16.8	20.0	0.833	2400
8	3.3	8	0.8	0.374	0.321	16.9	20.0	0.885	2260
9	3.4	8	1.2	0.389	0.333	17.0	20.0	0.897	2230
10	3.4	10	0.8	0.399	0.341	17.0	22.3	0.921	2420

Results of Group I—3 ($\alpha=90^\circ$, $\beta=90^\circ$)

Dial gauge readings to 6 cm total gauge length									Conditions			
σ_p kg/cm ²	ε_p %	E kg/cm ²	W_p kg-cm/cm ³	σ_y kg/cm ²	ε_y %	E_y kg/cm ²	σ_5 kg/cm ²	σ_{10} kg/cm ²	L_s kg/cm ² /min	L_f kg	T °C	H %
20.1	0.296	6780	0.0298	33.4	0.669	5000	36.6	37.9	4.1	20	15.0	88
20.1	0.303	6650	0.0305	34.2	0.905	3780	35.0	35.8	4.1	20	15.2	88
17.8	0.258	6390	0.0230	33.3	0.644	5170	34.7	35.0	4.5	20	15.5	88
17.8	0.257	6910	0.0229	36.7	0.799	4600	32.2	34.0	4.0	20	15.3	88
22.2	0.301	7380	0.0334	35.5	0.632	5620	37.8	37.8	4.2	20	15.7	88
17.9	0.255	6980	0.0228	35.7	0.742	4830	36.8	36.8	4.6	20	15.8	88
17.8	0.272	6550	0.0242	28.9	0.523	5530	33.4	33.9	4.4	20	19.5	89
17.9	0.278	6440	0.0249	31.4	0.661	4750	33.9	34.2	4.9	20	20.0	89
17.8	0.270	6580	0.0240	33.3	0.691	4820	33.3	33.3	4.9	20	20.0	89
17.8	0.267	6690	0.0238	31.2	0.614	5080	33.5	33.8	5.1	20	20.5	89
17.9	0.272	6560	0.0244	29.0	0.556	5220	31.8	32.1	5.2	20	20.7	89
15.6	0.235	6640	0.0183	29.0	0.575	5040	33.4	33.4	5.0	20	21.1	89
15.6	0.251	6210	0.0196	26.0	0.573	5050	33.2	33.9	4.6	20	21.4	89
15.6	0.251	6210	0.0196	28.9	0.556	5200	31.8	32.7	5.1	20	21.6	89
15.6	0.253	6180	0.0197	29.0	0.564	5140	31.2	31.5	4.5	20	22.5	85
17.9	0.296	6040	0.0265	29.2	0.619	4720	33.3	33.8	4.5	20	22.6	85
15.6	0.240	6510	0.0187	—	—	—	—	—	5.8	20	23.2	85
15.6	0.251	6230	0.0196	—	—	—	—	—	5.8	20	23.2	80
13.4	0.218	5500	0.0146	—	—	—	—	—	5.0	20	22.6	80
17.9	0.296	6040	0.0265	—	—	—	—	—	5.0	20	22.6	80

Results of Group II—1 ($\alpha=0^\circ$, $\beta=90^\circ$)

readings to 3 cm total gauge length						Conditions			
W_p kg-cm/ cm ³	σ_y kg/cm ²	ε_y %	E_y kg/cm ²	σ_5 kg/cm ²	σ_{10} kg/cm ²	L_s kg/cm ² / min	L_f kg	T °C	H %
0.0766	31.1	2.85	1090	32.5	34.1	3.4	10	19.5	94
0.1182	35.5	2.69	1320	35.9	36.6	4.4	20	19.5	94
0.1053	31.2	2.59	1210	32.4	34.0	4.4	20	19.6	94
0.0821	35.5	2.64	1350	36.0	37.0	4.5	20	19.6	94
0.0706	31.1	2.66	1170	31.7	33.2	4.4	20	19.7	94
0.0874	35.6	2.82	1260	37.3	37.3	4.4	20	19.7	94
0.0833	35.5	3.22	1100	36.1	37.2	4.4	20	19.9	94
0.0855	33.3	2.64	1260	34.0	34.0	4.2	20	19.5	94
0.0897	33.3	2.94	1130	33.7	34.1	4.5	20	19.4	94
0.1027	35.7	2.75	1300	36.2	35.7	4.4	20	19.5	94

Table 5. 45 度方向横圧縮試驗結果 (3×3×3 cm³)

No.	Related properties					
	b mm	S %	α degree	r_n g/cm ³	R_0 g/cm ³	u %
1	3.0	14	51	0.406	0.349	16.3
2	3.8	14	36	0.406	0.349	16.2
3	3.4	11	37	0.390	0.337	16.0
4	3.6	11	51	0.383	0.331	15.6
5	3.2	12	38	0.387	0.335	15.6
6	3.6	11	51	0.387	0.334	15.9
7	3.5	11	50	0.385	0.332	16.1
8	2.9	13	46	0.399	0.344	15.8
9	3.5	11	38	0.387	0.334	15.9
10	3.7	10	49	0.384	0.330	16.3

Table 6. 柁目方向横圧縮試驗結果 (3×3×3 cm³)

No.	Related properties						Dial gauge		
	b mm	S %	a mm	r_n g/cm ³	R_0 g/cm ³	u %	σ_p kg/cm ²	ε_p %	E kg/cm ²
1	3.5	9	1.5	0.391	0.334	17.0	26.7	0.508	5240
2	3.4	10	1.8	0.395	0.338	16.9	24.5	0.500	4910
3	3.5	10	1.5	0.397	0.340	16.8	24.5	0.477	5130
4	3.2	11	1.0	0.402	0.344	16.8	24.4	0.465	5250
5	3.4	10	0.9	0.397	0.339	17.0	26.7	0.499	5350
6	3.0	11	1.0	0.396	0.339	16.8	26.7	0.480	5560
7	3.4	11	0.6	0.405	0.346	17.0	28.9	0.559	5170
8	3.1	12	1.0	0.399	0.341	16.9	28.9	0.551	5240
9	3.2	14	0.9	0.391	0.335	16.7	28.9	0.567	5100
10	3.5	11	0.8	0.408	0.349	17.0	24.5	0.497	4920

Table 7. 板目面 45 度目切圧縮試驗結果 (3×3×6 cm³)

No.	Related properties							Extensometer 3 cm central	
	b mm	S %	α degree	a mm	r_n g/cm ³	R_0 g/cm ³	u %	σ_p kg/cm ²	ε_p %
1	3.0	11	5	1.1	0.384	0.332	15.6	24.0	0.347
2	3.3	13	0	1.1	0.390	0.341	15.6	30.3	0.350
3	3.0	11	1	2.1	0.386	0.334	15.6	30.2	0.363
4	3.3	9	4	1.7	0.383	0.331	15.6	30.2	0.367
5	3.0	11	5	1.6	0.384	0.332	15.7	26.8	0.340
6	3.2	8	3	1.0	0.388	0.336	15.6	26.8	0.301
7	2.9	11	0	1.6	0.385	0.333	15.3	27.2	0.340
8	3.1	11	4	1.2	0.391	0.340	15.1	30.3	0.355
9	3.4	17	2	1.5	0.387	0.336	15.5	30.3	0.337
10	3.3	10	5	1.8	0.393	0.340	15.5	23.5	0.430

Results of Group II—2 ($\alpha=45^\circ$, $\beta=90^\circ$)

Dial gauge readings to 3 cm total gauge length						Conditions			
σ_p kg/cm ²	ε_p %	E kg/cm ²	W_p kg-cm/ cm ³	σ_5 kg/cm ²	σ_{10} kg/cm ²	L_s kg/cm ² / min	L_I kg	T °C	H %
6.60	1.05	629	0.0347	17.8	22.1	1.7	5	21.9	90
7.77	1.08	721	0.0420	18.2	21.1	3.3	10	22.0	90
6.66	1.01	661	0.0337	17.2	20.1	3.3	10	22.0	90
7.77	1.18	658	0.0458	19.8	23.5	3.3	10	22.0	90
5.55	0.84	663	0.0233	16.2	19.2	3.4	10	22.7	90
6.66	1.02	657	0.0341	18.5	22.4	3.3	10	23.0	90
7.77	1.17	666	0.0455	18.1	21.8	3.3	10	18.6	94
6.66	0.97	688	0.0322	18.6	20.4	3.3	10	19.2	94
7.81	1.17	670	0.0438	17.5	20.2	3.3	10	19.3	94
6.68	1.04	643	0.0348	17.7	20.7	3.3	10	19.4	94

Results of Group II—3 ($\alpha=90^\circ$, $\beta=90^\circ$)

readings to 3 cm total gauge length						Conditions			
W_p kg-cm/ cm ³	σ_y kg/cm ²	ε_y %	E_y kg/cm ²	σ_5 kg/cm ²	σ_{10} kg/cm ²	L_s kg/cm ² / min	L_I kg	T °C	H %
0.0678	33.4	0.821	4070	35.7	36.5	4.5	20	19.5	94
0.0613	33.5	0.894	3740	34.9	34.6	4.5	20	19.5	94
0.0584	31.1	0.730	4270	33.5	35.0	4.5	20	19.5	94
0.0568	31.0	0.764	4050	34.5	35.0	4.4	20	19.5	94
0.0666	33.3	0.949	3510	35.6	35.8	4.5	20	19.5	94
0.0641	33.3	0.734	4540	35.0	35.0	4.4	20	19.5	94
0.0808	33.3	0.803	4150	36.2	34.5	4.4	20	19.6	94
0.0796	31.1	0.695	4480	33.0	34.1	4.4	20	19.5	94
0.0820	33.3	0.717	4650	34.0	34.1	4.4	20	19.6	94
0.0608	31.1	0.787	3950	35.2	35.6	4.4	20	19.7	94

Results of Group III—1 ($\alpha=0^\circ$, $\beta=45^\circ$)

readings to gauge length		Dial gauge readings to 6 cm total gauge length				Conditions			
E kg/cm ²	W_p kg-cm/ cm ³	σ_p kg/cm ²	ε_p %	E kg/cm ²	W_p kg-cm/ cm ³	L_s kg/cm ² / min	L_I kg	T °C	H %
7800	0.0417	29.2	0.417	7000	0.0609	5.5	20	19.5	89
8670	0.0531	30.3	0.368	8230	0.0558	7.5	30	19.2	89
8310	0.0548	33.5	0.422	7950	0.0707	8.7	30	19.5	89
8240	0.0554	33.6	0.447	7510	0.0751	8.7	30	19.5	89
7880	0.0462	33.5	0.456	7340	0.0764	8.5	30	19.7	89
8920	0.0403	33.5	0.424	7900	0.0710	8.5	30	19.7	89
8000	0.0462	30.2	0.424	7130	0.0641	8.6	30	19.7	89
8550	0.0538	33.7	0.439	7670	0.0740	9.3	30	20.0	89
9000	0.0511	33.7	0.430	7840	0.0725	9.2	30	20.0	89
5480	0.0506	20.2	0.353	5730	0.0357	8.6	30	20.0	89

Table 8. 全面目切圧縮試驗結果 (3×3×6 cm³)

No.	Related properties							Extensometer 3 cm central	
	b mm	S %	α degree	β degree	r_u g/cm ³	R_0 g/cm ³	u %	σ_p kg/cm ²	ε_p %
1	(3.4)	(9)	42	30	0.394	0.341	15.4	13.6	0.450
2			42	29	0.393	0.341	15.4	11.3	0.361
3			40	32	0.397	0.344	15.4	11.3	0.361
4			41	29	0.398	0.343	16.2	11.3	0.307
5			40	29	0.397	0.342	16.0	13.5	0.384
6			44	30	0.397	0.342	16.2	11.3	0.413
7			44	30	0.397	0.342	16.1	11.3	0.420
8			43	31	0.398	0.343	16.2	11.3	0.368
9			40	30	0.397	0.341	16.2	13.7	0.401
10			42	31	0.396	0.341	16.2	13.6	0.445

Table 9. 柁目面 45 度目切圧縮試驗結果 (3×3×6 cm³)

No.	Related properties							Extensometer readings to 3 cm central				
	b mm	S %	α degree	a mm	r_u g/cm ³	R_0 g/cm ³	u %	σ_p kg/cm ²	ε_p %	E kg/cm ²	W_p kg-cm/cm ³	σ_y kg/cm ²
1	(3.7)	(10)	44	(1.5)	0.368	0.319	15.5	37.2	0.241	15400	0.0441	64.2
2			44		0.369	0.318	15.9	33.6	0.237	14200	0.0398	50.4
3			44		0.370	0.319	16.1	40.5	0.262	15500	0.0531	60.7
4			44		0.379	0.327	16.1	33.7	0.276	12200	0.0465	50.6
5			43		0.372	0.321	16.3	37.3	0.234	16000	0.0437	71.2
6			43		0.374	0.322	16.1	33.9	0.245	13800	0.0415	57.6
7			44		0.371	0.320	15.9	33.7	0.341	9900	0.0574	50.6
8			47		0.380	0.328	15.9	37.2	0.233	16000	0.0434	64.3
9			46		0.386	0.334	15.6	43.9	0.317	13800	0.0696	64.2
10			45		0.382	0.330	15.8	30.5	0.261	11700	0.0398	50.8

Table 10. 縦圧縮試驗結果 (3×3×6 cm³)

No.	Related properties					Extensometer readings to 3 cm central gauge length						
	b mm	S %	r_u g/cm ³	R_0 g/cm ³	u %	σ_p kg/cm	ε_p %	E kg/cm ²	W_p kg-cm/cm ³	σ_y kg/cm ²	ε_y %	E_y kg/cm ²
1	3.6	10	0.394	0.339	16.2	200	0.195	103000	0.195	289	0.360	80300
2	3.6	10	0.386	0.332	16.2	222	0.217	102000	0.248	289	0.342	84500
3	3.1	10	0.386	0.332	16.0	221	0.213	104000	0.235	287	0.313	91600
4	3.9	10	0.381	0.325	16.9	223	0.210	106000	0.234	288	0.320	90000
5	3.8	10	0.385	0.330	16.7	223	0.200	112000	0.223	299	0.310	96500
6	3.5	8	0.400	0.345	16.1	222	0.194	115000	0.215	298	0.374	79700
7	3.8	9	0.383	0.327	16.9	223	0.211	105000	0.205	285	0.320	89000
8	3.8	9	0.383	0.328	16.9	222	0.213	104000	0.206	284	0.319	89000
9	3.4	9	0.403	0.346	16.4	222	0.200	111000	0.222	300	0.394	76200
10	3.6	9	0.381	0.325	17.1	223	0.213	105000	0.238	290	0.340	85300

Results of Group III—2 ($\alpha=30^\circ$, $\beta=45^\circ$)

readings to gauge length		Dial gauge readings to 6 cm total gauge length				Conditions			
E	W_p	σ_p	ε_p	E	W_p	L_s	L_r	T	H
kg/cm ²	kg-cm/cm ³	kg/cm ²	%	kg/cm ²	kg-cm/cm ³	kg/cm ² /min	kg	°C	%
3010	0.0306	17.0	0.601	2820	0.0511	6.8	30	18.0	83
3130	0.0204	15.8	0.500	3160	0.0395	4.5	20	18.3	83
3130	0.0204	15.8	0.511	3090	0.0404	6.2	20	18.2	83
3690	0.0173	15.9	0.516	3080	0.0410	6.6	20	15.0	88
3530	0.0259	15.8	0.451	3510	0.0357	5.3	20	16.0	88
2740	0.0233	15.8	0.576	2750	0.0455	5.7	20	16.2	88
2700	0.0237	13.6	0.515	2640	0.0350	5.4	20	16.6	83
3070	0.0208	18.1	0.670	2700	0.0607	6.4	20	16.8	88
3410	0.0275	18.2	0.605	3010	0.0550	5.8	20	17.4	88
3050	0.0303	15.8	0.550	2870	0.0426	5.8	20	17.6	88

Results of Group III—3 ($\alpha=90^\circ$, $\beta=45^\circ$)

gauge length		Dial gauge readings to 6 cm total gauge length							Conditions			
ε_y	E_y	σ_y	ε_y	E	W_p	σ_y	ε_y	E_y	L_s	L_r	T	H
%	kg/cm ²	kg/cm ²	%	kg/cm ²	kg-cm/cm ³	kg/cm ²	%	kg/cm ²	kg/cm ² /min	kg	°C	%
0.523	12.3	47.3	0.435	10900	0.103	66.4	0.769	8640	7.3	30	20.0	89
0.440	11.5	40.3	0.406	9900	0.082	50.4	0.635	7940	7.6	30	20.0	89
0.440	13.7	50.6	0.473	10700	0.120	60.7	0.651	9330	7.5	30	15.2	88
0.462	11.0	45.0	0.457	9900	0.103	50.6	0.602	8410	7.4	30	15.2	88
0.587	12.1	54.2	0.461	11800	0.125	71.2	0.693	10300	6.4	30	15.2	88
0.492	11.7	47.5	0.545	8700	0.129	57.6	0.686	8400	7.5	30	15.3	88
0.895	5.6	37.1	0.429	8700	0.080	50.6	0.682	7430	6.4	30	15.3	88
0.627	10.2	54.1	0.560	9700	0.152	64.3	0.853	7540	6.2	30	15.2	88
0.560	11.5	54.0	0.533	10100	0.144	64.2	0.769	8340	7.1	30	15.1	88
0.600	8.5	37.3	0.452	8300	0.084	50.8	0.703	7230	7.4	30	14.5	87

Results of Group III—4 ($\alpha=0^\circ$, or 90° , $\beta=0^\circ$)

Dial gauge readings to 6 cm total gauge length							Conditions			
σ_p	ε_p	E	W_p	σ_y	ε_y	E_y	L_s	L_r	T	H
kg/cm ²	%	kg/cm ²	kg-cm/cm ³	kg/cm ²	%	kg/cm ²	kg/cm ² /min	kg	°C	%
178	0.442	40200	0.393	289	0.95	30400	67	200	19.0	94
200	0.467	42800	0.467	289	1.27	22800	67	200	20.0	95
199	0.452	44000	0.450	287	1.15	24500	67	200	19.5	94
223	0.602	36900	0.671	288	1.17	24700	57	200	23.3	85
179	0.421	42400	0.377	299	1.55	19300	60	200	24.0	85
175	0.422	41500	0.369	298	1.18	25200	62	200	24.0	85
223	0.599	37300	0.668	285	1.05	27100	65	200	24.0	85
178	0.436	40800	0.388	284	1.14	24900	58	200	24.0	85
222	0.566	39200	0.629	300	1.14	26400	56	200	24.0	85
223	0.564	39600	0.629	290	1.28	22600	63	200	24.0	85

Appendix Table 1 to 10

Mark	性 質	Properties
b mm	平 均 年 輪 巾	Width of annual rings
S %	秋 材 率	Summer wood
α degree	年 輪 傾 角	Angle of annual rings to loading axis
β degree	纖 維 傾 角	Slope of grain to loading axis
a mm	平 均 年 輪 矢 高	Original sagitta of annual rings
r_n g/cm ³	試 験 時 比 重	Specific gravity, at test
R_0 g/cm ³ *	全 乾 比 重*	Specific gravity, when oven dry*
u %	含 水 率	Moisture content
σ_p kg/cm ²	比 例 限 応 力	Stress at proportional limit
ε_p %	比 例 限 歪	Strain at proportional limit
E kg/cm ²	弾 性 係 数	Modulus of elasticity
W_p kg-cm/cm ³	比 例 限 比 仕 事 量	Work to proportional limit
σ_y kg/cm ²	降 伏 点 応 力	Stress at yield point
ε_y %	降 伏 点 歪	Strain at yield point
E_y kg/cm ²	σ_y/ε_y	σ_y/ε_y
σ_5 kg/cm ²	5% 歪における応力	Stress at 5% strain
σ_{10} kg/cm ²	10% 歪における応力	Stress at 10% strain
L_s kg/cm ² /min.	平 均 荷 重 速 度	Average loading speed
L_I kg	荷 重 の 刻 み	Load increment
T °C	試 験 時 温 度	Temperature at test
H %	試 験 時 湿 度	Relative humidity at test

* : R_0 = 全乾時重量/試験時容積 = Weight weight oven-dried/Volume at test.