

合板のパネルせん断剛性試験におけるひずみの分布

佐々木 光*・満久 崇磨*

Hikaru SASAKI* and Takamaro MAKU*: Strain Distribution on Plywood Panel Shear Test Specimens.

はじめに

近頃、平面構造材料としての合板の力学的性質が非常に問題になっている。これはすでに第2次大戦中に木製航空機の設計にあたつて、若干とりあつかわれた問題であるが、材料と技術の進歩および木造建築様式の変遷にともなつて、建築方面で非常に重要視されるようになり、数多くの問題の解決がまたれている。今ここにとりあげる性質、すなわち合板の側面 (edge) にせん断応力を与えるとき合板表面に描いた直交軸間の角度変化に関する剛性率——パネルせん断剛性率——も合板を壁体などに用いる場合の最も重要な性質の1つである。この剛性率は表層繊維に 45° 傾いた方向や主軸に関する諸弾性定数からある仮定の下に理論的に導くことができるが、強度試験を兼ねて、実験的に直接測定できることが望ましい。

この試みとして最もよく知られているのは ASTM のパネルせん断強度試験法をそのまま剛性率の測定に用いようとする試みで、これまでに C. B. NORRIS & P. F. MCKINNON¹⁾, B. NORÉN & E. SAARMAN²⁾ および大熊, 継田, 平井³⁾ などの報告がある。これらの報告によると、この方法により測定された剛性率は理論値よりも常に大きな値となる。その主な原因は荷重点が試験片の端辺からある距離はなれた外側にあるため、回転モーメントが生ずることにあると考えられている。また最近、高見⁴⁾ によつて力の作用点を試片の端辺上にもつてくるように設計された新しい方法が提唱されている。

ここに資料として提示するのは ASTM の方法で、繊維方向がいろいろの傾きをもつ試験片について剛性率の測定を行ない、その際の試験片の表面におけるひずみの分布を観察し、この方法の適用性を検討しようとしたものであるが、ひずみの定量にさらに検討すべき点があり、また種々の都合で追加実験を直ちに行なえないので、研究資料として未完のまま公表し、参考に供することにしたものである。なお、この実験に材料を提供頂いた大建木材工業株式会社名古屋工場とデーターの整理、写真の撮影など協力頂いた当研究所林昭三氏をはじめ勝山三千代、南正院の諸氏に感謝の意を表する。

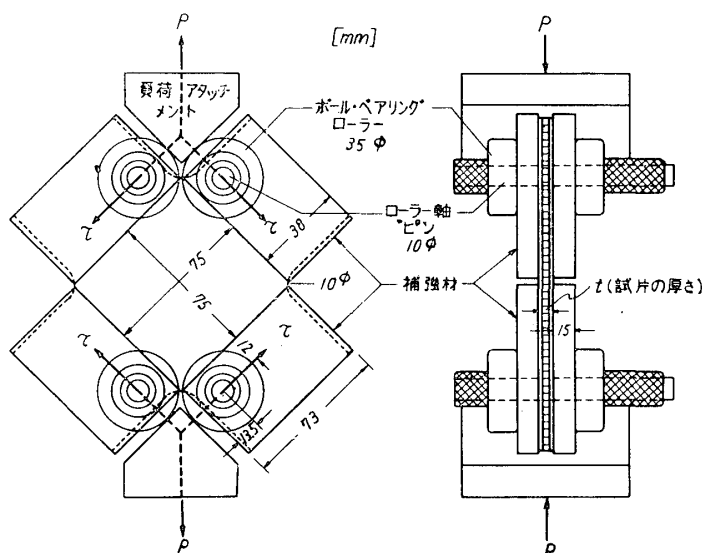
実験方法

材料は尿素・メラミン樹脂による厚さ 7mm のラワンの 3 プライ合板で、単板構成比は 1 : 1 : 1 および 1 : 2 : 1 の 2 種類である。これらの face および back veneer は無欠点で織

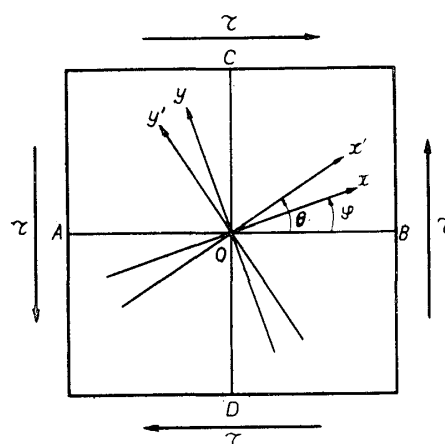
* 木質材料研究部門, Div. of Composite Wood

維方向が正確に平行しているものを選んで用いたが、core venner の材質は多少の欠点を含む普通のものである。

これらの材料からそれぞれ ASTM D 805—25 Panel Shear (For. Prod. Lab. Test) に準じて、第1図に示すような試験片を切り出し、図中の補強材としてカバ材をフェノール樹脂接着剤で接着した。試験片の種類と個数は第2図に示すように試片の側面 (edge) に矢印で示



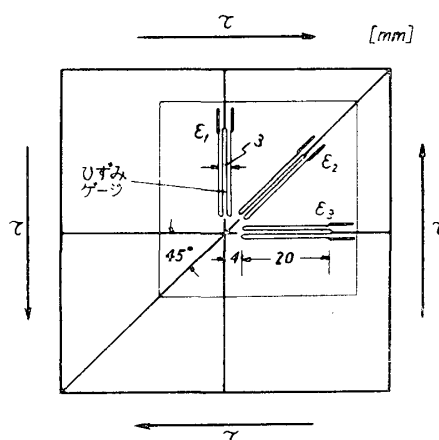
第1図—パネルせん断試験片 (ASTM)



第2図—試験片上の軸のとり方
x : face veneer の繊維方向
y : core veneer の繊維方向

す方向のせん断応力を与えるとき、試片の上 (下) 辺に平行な AB 軸を基準にして、表層繊維の方向を反時計廻りに測った角度 ϕ で表せば、上記の2種類の構成の合板それぞれについて $\phi = 0^\circ \sim 45^\circ$ の間のいろいろの角度のもの20個、 $0^\circ \sim -45^\circ$ の間のいろいろの角度のもの20個、計40個である。

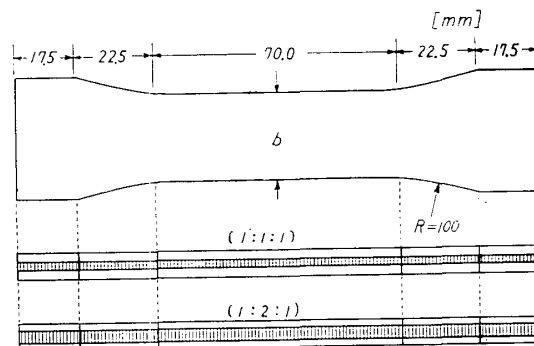
これらの試験片は補強材を接着した後、約1カ月間室内に静置し、含水率が大体平衡 (10~13%) に達した後、ローラー軸を通す孔をあけ、試片の表層に第3図に示すような直交および 45° 方向のひずみ測定用の抵抗線ひずみ計ペーパーゲージをニトロセルロース系の接着剤で接着し、第1図に示すような荷重方法で、破壊荷重の1/2以内の荷重を与え応力とひずみの関係を求めた。この試験を終えた後、試片の表面をアセトンで拭い、抵抗線ひずみ計ゲージを除き、応力塗料による試験を行なった。その方法の概略は次のようである。すなわち、最初に油性の目止め剤を数度繰返し塗布、乾燥し、その上に下地用黒エナメルを吹きつけ、 50°C で10時間乾燥し、サンディング仕上げを行なった後、熱乾燥用応力塗料 (ダイラー B) を厚さ約 0.1mm になるように吹きつけ、2週間室内に静置した後、荷重装置にとりつけた。負荷に先立つて試片表面の塗膜に熱風を吹きつけ約 50°C にあたため、次いで冷風を吹きつけ約



第3図—抵抗線ひずみ計ゲージの寸法と形と貼付位置

20分程かかつて再び室温にもどした。このような操作を行なつても試片の水分状態はあまり影響を受けないと思われ、しかも試片表面の塗膜は均一な引張内部応力を生じ、0.05%程度のひずみによつても容易に亀裂を生ずるようになる。このような準備の完了した試片に破壊荷重の約1/2程度の荷重を与え、生じた亀裂模様(direct pattern)を染色した後、試片を50°Cにあたため、約20分かかつて温室に戻し、急激に荷重を除き、そのとき生ずる亀裂模様(relaxation pattern)を再び染色し、1つの試片の表面にこれら引張ひずみおよび圧縮ひずみに相当する2つの亀裂模様を同時に得た。

また、これらの実験結果を考察するのに必要な合板の基礎的な弾性定数の測定は、第4図に示す形状と寸法をもつ繊維方向0°、45°および90°の試片を、それぞれの構成の合板について5本ずつ作製し、それらの試片について抵抗線ひずみ計および鏡式ひずみ計を用いて行われた。



第4図—弾性定数測定用試片

試片の幅 b —E の測定では 25mm

μ の測定では 40mm

材料の厚さ—1 : 1 : 1 の場合は face, core, back は共に 2.5mm

1 : 2 : 1 の場合は face, back は共に 1.9mm core は 3.8mm

実験結果と考察

まず、ここに用いられた2種類の構成のラワン合板の基礎的な弾性定数の測定結果を第1表に示す。

第1表—用いた合板の弾性定数

定 数	合板構成 1 : 1 : 1	合板構成 1 : 2 : 1
表層繊維に平行な方向の縦弾性率 $E_x (\times 10^4 \text{kg/cm}^2)$	10.5	5.8
表層繊維に直角な方向の縦弾性率 $E_y (\times 10^4 \text{kg/cm}^2)$	5.0	6.2
繊維に 45° 傾いた方向の縦弾性率 $E_{45} (\times 10^4 \text{kg/cm}^2)$	1.6	1.5
表層繊維の方向の引張応力とそれに直角な方向の縮みに関係するポアソン比 μ_{xy}	0.039	0.070
表層繊維の方向と中層繊維の方向の間の剛性率 (計算値) $G_{xy} (\times 10^4 \text{kg/cm}^2)^*$	0.46	0.43
弾性定数		
$a_{11} = 1/E_x$	0.095	0.17
$a_{22} = 1/E_y$	0.20	0.16
$a_{33} = 1/G_{xy}$	2.2	2.3
$a_{12} = -\mu_{xy}/E_x$	-0.0038	-0.012

$$* \frac{1}{G_{xy}} = \frac{4}{E_{45}} - \left(\frac{1}{E_x} + \frac{1}{E_y} - \frac{2\mu_{xy}}{E_x} \right)$$

つぎに、第2図において辺に平行な直交軸 OB および OC を反時計廻りに任意角 θ だけ回転してできる新しい直交軸を ox' , oy' とする。また、合板の主軸 ox , oy (ox は表層繊維の方向である) は直交軸 OB , OC から反時計廻りに測つて角度 φ だけ傾いていると仮定すると、この試片の周辺に図のようなせん断応力 τ が働いた場合、 ox' 方向の縦ひずみ ϵ , oy' 方向の縦ひずみ ϵ' および直交軸 ox' , oy' 間の角ひずみ γ はそれぞれ

$$\epsilon = \{ (a_{11} - a_{12}) \cos^2(\theta - \varphi) + (a_{12} - a_{22}) \sin^2(\theta - \varphi) \} \sin 2\varphi + a_{33} \sin(\theta - \varphi) \cos(\theta - \varphi) \cos 2\varphi \tau \quad (1)$$

$$\epsilon' = \{ (a_{11} - a_{12}) \sin^2(\theta - \varphi) + (a_{12} - a_{22}) \cos^2(\theta - \varphi) \} \sin 2\varphi - a_{33} \sin(\theta - \varphi) \cos(\theta - \varphi) \cos 2\varphi \tau \quad (2)$$

$$\gamma = \{ -(a_{11} - 2a_{12} + a_{22}) \sin 2(\theta - \varphi) \sin 2\varphi + a_{33} \cos 2(\theta - \varphi) \cos 2\varphi \} \tau \quad (3)$$

で表わすことができる。(1)および(2)式で $\theta = 45^\circ$ とすると、それらは試験片の対角線方向の縦ひずみであり、それらの差は

$$\epsilon_{\theta=45^\circ} - \epsilon'_{\theta=45^\circ} = \{ (a_{11} - 2a_{12} + a_{22}) \sin^2 2\varphi + a_{33} \cos^2 2\varphi \} \tau \quad (4)$$

であり、また、(3)式で $\theta = 0$ とすると、それは試片の辺の間の角変化であつて、

$$\gamma_{\theta=0} = \gamma_\varphi = \{ (a_{11} - 2a_{12} + a_{22}) \sin^2 2\varphi + a_{33} \cos^2 2\varphi \} \tau \quad (5)$$

となるから、これら両者は等しく

$$\gamma = \epsilon_{\theta=45^\circ} - \epsilon'_{\theta=45^\circ} \quad (6)$$

すなわち、試験片の辺に関するせん断ひずみは常に試片の2つの対角線上の縦ひずみの差で表わすことができる。

しかしながら、この実験では繊維方向をいろいろ変化させた場合のひずみ状態を完全に明らかにしたいから、第3図に示したように OC 軸方向の縦ひずみ ϵ_1 , OB 軸方向の縦ひずみ ϵ_3 および対角線方向の縦ひずみ ϵ_2 の3軸方向のひずみをそれぞれ測定した。これらを用いると

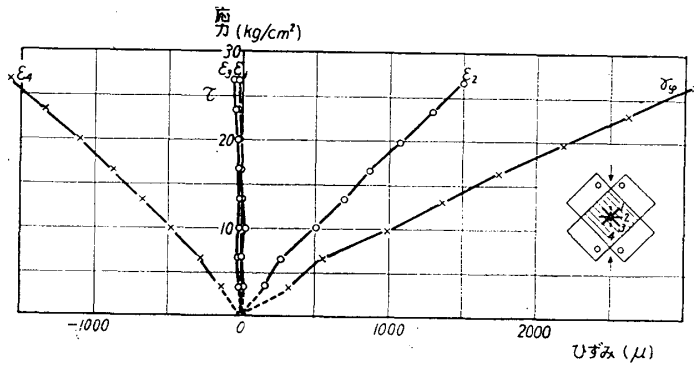
$$2\epsilon_2 - \epsilon_1 - \epsilon_3 = \{ (a_{11} - 2a_{12} + a_{22}) \sin^2 2\varphi + a_{33} \cos^2 2\varphi \} \tau = \gamma_\varphi \quad (7)$$

によつて γ_φ が算出される。また第1図のように試験片を上下に P なる力で圧縮すれば、試験片の側面 (edge) に働くせん断応力 τ_φ は、

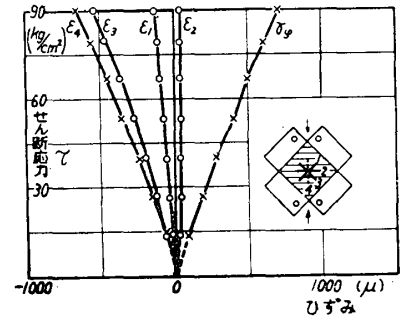
$$\tau_\varphi = P / \sqrt{2} \cdot L \cdot t \quad (8)$$

で示すことができる。ここに L は試片の辺の長さ、 t は試片の厚さである。

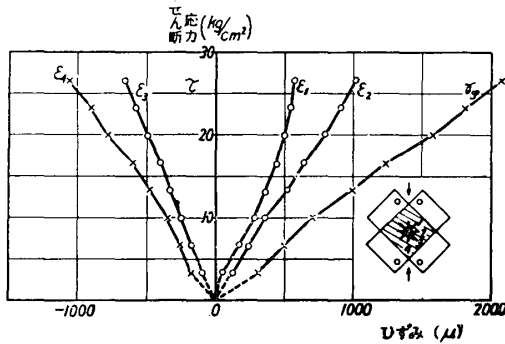
各試片について P を増加させながら測定した ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 およびそれらから求められた γ_φ と ϵ_2 に直交する対角線方向の縦ひずみ ϵ_4 を τ_φ について描けば、試片表面のひずみの挙動が大体把握できる。第5・1~5・4図は構成比1:1:1の合板について順せん断 ($\varphi > 0^\circ$) の結果の中の代表的なものであり、第6・1~6・4図は構成比1:2:1の合板について順せん断の結果の中の代表的なものである。逆せん断 ($\varphi < 0^\circ$) の結果を省略したのは、順せん断の場合



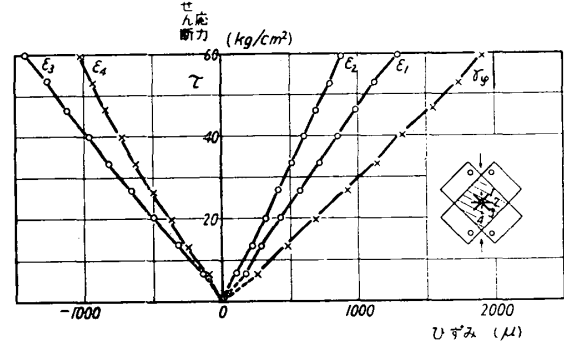
第5・1図—応力・ひずみ線図 (1 : 1 : 1, $\varphi=0^\circ$)



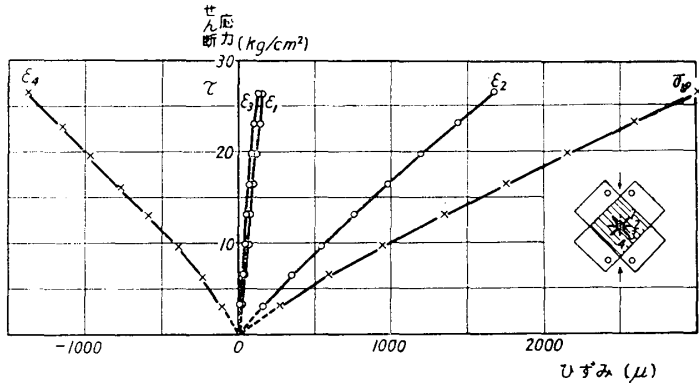
第5・2図—応力・ひずみ線図 (1 : 1 : 1, $\varphi=45^\circ$)



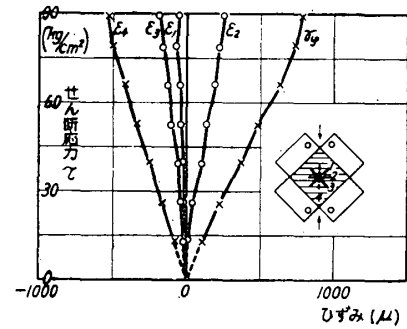
第5・3図—応力・ひずみ線図 (1 : 1 : 1, $\varphi=16^\circ$)



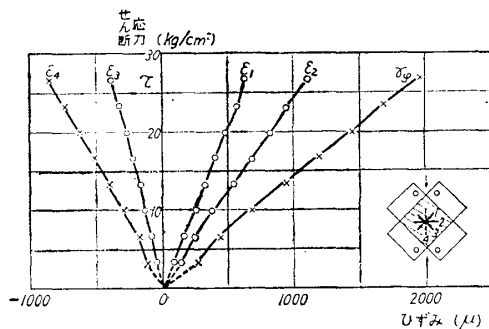
第5・4図—応力・ひずみ線図 (1 : 1 : 1, $\varphi=34^\circ$)



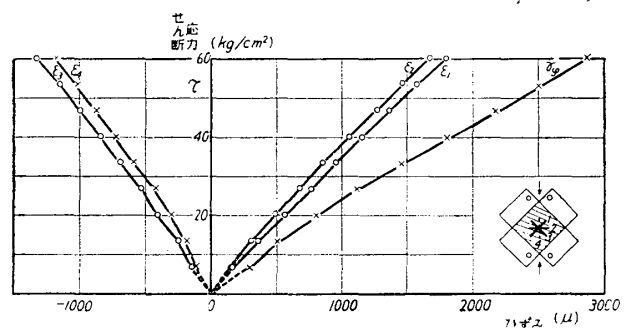
第6・1図—応力・ひずみ線図 (1 : 2 : 1, $\varphi=0^\circ$)



第6・2図—応力・ひずみ線図 (1 : 2 : 1, $\varphi=45^\circ$)



第6・3図—応力・ひずみ線図 (1 : 2 : 1, $\varphi=12^\circ$)



第6・4図—応力・ひずみ線図 (1 : 2 : 1, $\varphi=26^\circ$)

と較べて特徴ある挙動が認められなかつたからである。

これらの図から次のようなことがいえる。すなわち、構成比 1 : 1 : 1 の場合と 1 : 2 : 1 の場合では特に著しい相違が認められない。そして一般に応力—ひずみの関係は、この範囲の応力の下では、よい直線性を示し、大態他⁹⁾ が指摘したような水平対角線の廻りの挫屈およびハードボードにおけるような応力—ひずみ線図の屈曲は共に認められない。これは補強材の接着が完全で、かつボルト孔が正確に板面に垂直にあげられていたことが、よい荷重条件を与えたものと思われる。また、 $\varphi=0^\circ$ の場合は ϵ_1 と ϵ_3 の絶対値は ϵ_2 (あるいは ϵ_4) の値の10%以下であるが、 φ が増すにしたがつて増加し、 ϵ_2 を越す場合さえもある。このことは試片が負荷によつて辺の長さを変化していることにほかならない、したがつてそのような場合には補強辺が接着してあると、この変形が拘束され、そこに異常な応力成分を生ずると考えられる。 $\varphi=45^\circ$ ではひずみの絶対値が小さく、個々の試験片で挙動が著しくばらつき、ここに示されたものが必ずしも代表的とはいえず、中には当然引張ひずみの生ずべき方向に圧縮ひずみが現れたり、初期に圧縮ひずみを示しながら応力の増加と共にだんだん引張ひずみを示すようになっていたりするものもあつて非常に不安定である。

また、 θ の如何にかかわらず、直交 2 方向のひずみの和は

$$\epsilon + \epsilon' = (a_{11} - a_{22}) \sin 2\varphi \cdot \tau \dots\dots\dots (9)$$

であるから、表板繊維に平行な方向の縦弾性係数 E_x と直角方向の縦弾性係数 E_y とがほぼ等しい 1 : 2 : 1 の構成の合板では常に

$$\epsilon_1 = -\epsilon_3, \quad \epsilon_2 = -\epsilon_4 \dots\dots\dots (10)$$

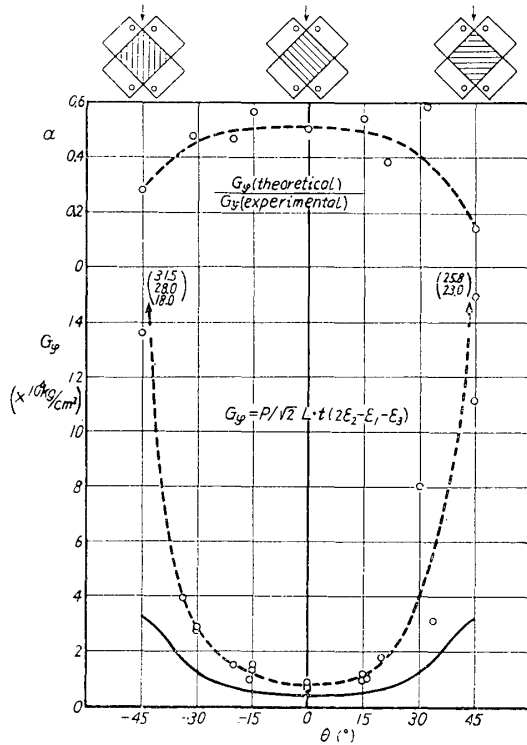
が成り立たねばならぬ。この点で第 6 図の結果は理論によく一致しているとは云えない。一方 1 : 1 : 1 の構成の合板では $a_{11} < a_{22}$ であるから $\epsilon + \epsilon'$ は常に負の値をもつべきである。この点で第 5 図は理論に合つた性質を示しているといえる。しかし構成の如何にかかわらず、 $\varphi=0^\circ$ および $\varphi=45^\circ$ では(10)式が常に成り立つべきで、この点第 5・1 図以外では一致がみられない。

このように試片の表面におけるひずみの挙動が理論的な値を示さない原因として、理論の仮定が十分に満足でないこと、測定誤差などの他に、第 3 図に示すようにひずみゲージの位置が試片の中央ではないから、試片表面におけるひずみが均一でない場合は ϵ_1 と ϵ_2 を直接対応させることに無理があることなどが考えられる。試片表面における不均一なひずみの分布が生ずる原因として、

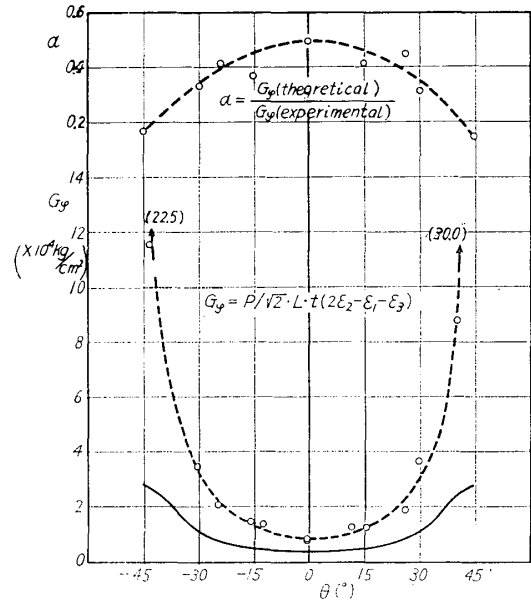
(1) NORRIS らおよび NORÉN らの指摘している荷重の作用点（ローラー軸の中心）が試片の端辺から外側に離れた位置にあるために生ずる回転モーメント。

(2) 前述のように試片端辺に平行（又は垂直）な試片の伸縮が補強材によつて受ける拘束。などがあげられる。(1)の影響は φ の値の如何にかかわらず等しいと考えられるが、(2)の影響は φ の変化に伴なつて試片の端辺に平行（または垂直）な伸縮の量が増加する（ $\varphi=0^\circ$ と $\varphi=45^\circ$ では伸縮は理論的には 0 である）から拘束の度合いも異なつてくるはずである。

試片の端辺に沿つたせん断剛性率は、第 5 図および第 6 図の r_φ に関する応力—ひずみ線の傾きから求めることができる。構成 1 : 1 : 1 の場合の結果は第 7 図に、1 : 2 : 1 の場合の



第7図—剛性率の測定結果と理論的な値
(合板構成比1：1：1)



第8図—剛性率の測定結果と理論的な値
(合板構成比1：2：1)

結果は第8図に示した。図中の理論的な値は斜方晶系の理論から

$$\frac{1}{G_\varphi} = \frac{\gamma_\varphi}{\tau_\varphi} = (a_{11} - 2a_{12} + a_{22}) \sin^2 2\varphi + a_{33} \cos^2 2\varphi \dots\dots\dots (11)$$

で算出された値で、第1表を用いてそれぞれ

$$\frac{1}{G_\varphi} = 0.303 \sin^2 2\varphi + 2.17 \cos^2 2\varphi \dots\dots\dots (12)$$

(合板構成1：1：1の場合)

$$\frac{1}{G_\varphi} = 0.354 \sin^2 2\varphi + 2.32 \cos^2 2\varphi \dots\dots\dots (13)$$

(合板構成1：2：1の場合)

を描いたものである。

これらの図において明らかなように、実験値は常に理論値よりも大で、その比

$$\frac{G_\varphi(\text{理論値})}{G_\varphi(\text{実験値})} \equiv \alpha$$

で表現すると、図の上部に示したように、 $\varphi = 0^\circ$ でほぼ $\alpha = 0.5$ となり、 φ の絶対値が大きくなると α の値はもつと小さくなる。 $\varphi = 0^\circ$ と $\varphi = \pm 45^\circ$ が異つた α の値をもつことは理屈に合わないが、今のところ適当な説明がみあたらない。先にも述べたように $\pm 45^\circ$ の場合のひずみ状態が正常でないとすれば、 $\varphi = 0^\circ$ の場合の α の値 0.5 は荷重の作用点のずれにより生

ずる回転モーメントの効果を示す数値と考えることができる。すなわち回転モーメントの発生により試片の端辺近くに純粋せん断以外の応力成分が生じ、中央ではその分だけせん断応力の大きさが減少している、そしてその減少割合は 1/2 であるといえる。

次に、観点を主ひずみの方向という点に移して考えてみよう。もし端辺の拘束や回転モーメントの発生があれば、試片の表面の応力状態は一般に純粋せん断応力状態でなくなり、したがってその部分の主ひずみの方向は変化を受けるであろう。試片の或る点の、端辺に沿った純粋せん断応力が存在する場合の主ひずみの方向は(1)式を θ で微分して 0 と置くことによつて解かれる。すなわち

$$\frac{d\varepsilon}{d\theta} = -(a_{11} - 2a_{12} + a_{22}) \sin 2\varphi \sin 2(\theta - \varphi) + a_{33} \cos \varphi \cos (\theta - \varphi) = 0$$

$$\therefore \frac{a_{33}}{a_{11} - 2a_{12} + a_{22}} \cos 2\varphi \cos 2(\theta - \varphi) = \sin 2\varphi \sin 2(\theta - \varphi) \dots\dots\dots (14)$$

この式で φ を定めたときの θ の値を 1 つ選べば、主ひずみの方向 θ_n は

$$\theta_n = \theta + n \frac{\pi}{2} (n=0, 1, 2, 3, \dots\dots\dots)$$

となる。(14)式では明らかに

$\varphi = 0^\circ$ のとき

$$\cos 2(\theta - \varphi) = 0 \quad \therefore \theta = 45^\circ$$

$\varphi = \pm 45^\circ$ のとき

$$\sin 2(\theta - \varphi) = 0 \quad \therefore \theta = \varphi = \pm 45^\circ$$

である。これ以外の φ に対しては Table 1 の値を用いると

$$\tan 2(\theta - \varphi) = 7.3 \cot 2\varphi \dots\dots\dots (15)$$

(合板構成 1 : 1 : 1 の場合)

$$\tan 2(\theta - \varphi) = 6.8 \cot 2\varphi \dots\dots\dots (16)$$

(合板構成 1 : 2 : 1 の場合)

となる。

主ひずみの方向は応力塗料の亀裂の方向から実験的に正確に求められる。この方法では試片の表面の主ひずみ方向の変化の全ぼうがはつきりと亀裂模様として示される。direct method による亀裂と relaxation method による亀裂は直交し、前者はその点の最大主ひずみの方向を、後者は最小主ひずみの方向を示す。

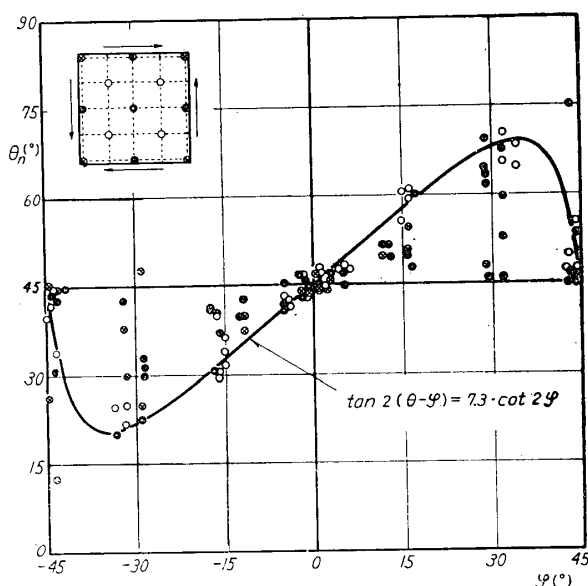
写真 1 ~ 4 は得られた亀裂模様の中の主なものを示した。写真は構成比 1 : 2 : 1 の場合であるが構成比 1 : 1 : 1 でもほとんど傾向は同じであり、またここには $\varphi < 0^\circ$ のみを示したが $\varphi > 0^\circ$ の場合は丁度 $\varphi < 0^\circ$ を裏から見た場合と同じであるから、これらは省略した。これらの写真において補強部分に描いた斜線の方法は試片表面の繊維の方向を示している。

これらの写真から明らかなように、 $\varphi = 0^\circ$ の場合の亀裂は端辺に対して大体 45° 傾いた直

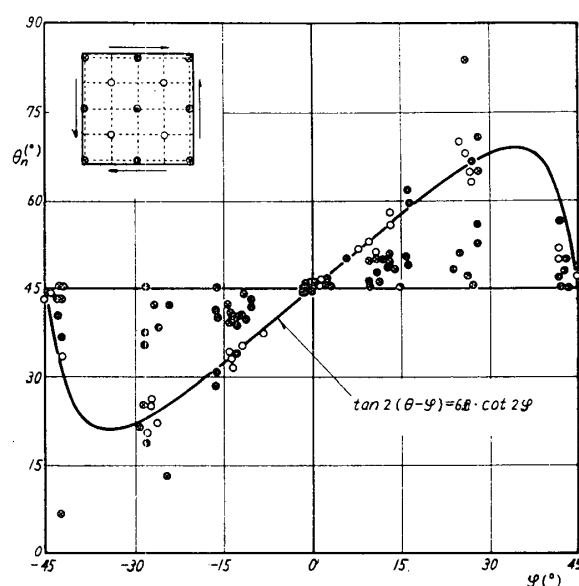
線群からなる碁盤目をなすが、 $\varphi=45^\circ$ の場合は（写真 4）試片の周辺に近い所では亀裂は大まかにみて 45° 方向に近づこうとする傾向がみられるが、中央部では亀裂は非常に不安定で、あらゆる方向に等価な引張（または圧縮）を受けるいわゆる特異領域の様相を示す。この他の φ に対しては写真 2, 3 に示すように、中央部の亀裂の碁盤目は 45° よりも時計廻りに少し廻転した方向を取り、端辺に近づくにしたがつて 45° に近くなる。したがってそれぞれの亀裂は S 字型をなし、かつ直交している。

第 9 図と第 10 図は試片表面の代表的な点における亀裂の傾き θ_n （即ち主ひずみの方向）を繊維方向 φ についてプロットしたものである。図中の曲線は理論式(17)および(18)である。これらの図から明らかなように、主ひずみの方向は、中央では勿論のこと試片の端辺から試片の辺の長さの 1/4 入ったところでも純粹せん断応力状態として理論的に求めた主ひずみの方向と非常によく一致しているが、周辺部では理論値から非常にかけはなれた値を示す。

また亀裂の密度はその点の主ひずみの大きさを表すものである⁹⁾。写真 1～4 で明らかなように、 φ の如何にかかわらず、試片の端辺近くでは亀裂の密度は中央の部分に較べてかなり高くなっている。残念なことに、合板表面の目止め方法その他に多くの問題が残っており、実験の成功率が少なく、十分な数の資料が得られなかつたので、今回はひずみ分布の定量は行なわなかつた。しかし、前述の主ひずみの方向と併せ考えて、試片の端辺に近い部分では補強材を通じて理論に合わない応力が生じており、与えられたせん断力の一部がこの応力に換えられ、試片の中央の部分には残りのせん断力しか与えられない、そして予定された値のせん断応力より小さいが、しかし純粹せん断応力の状態になつている。そしてこの低下の割合が第 7 図、第 8 図に示される α であると考えられよう。



第 9 図—試片の繊維方向 φ と主ひずみの方向 θ の関係（合板構成比 1 : 1 : 1）



第 10 図—試片の繊維方向 φ と主ひずみの方向 θ の関係（合板構成比 1 : 2 : 1）

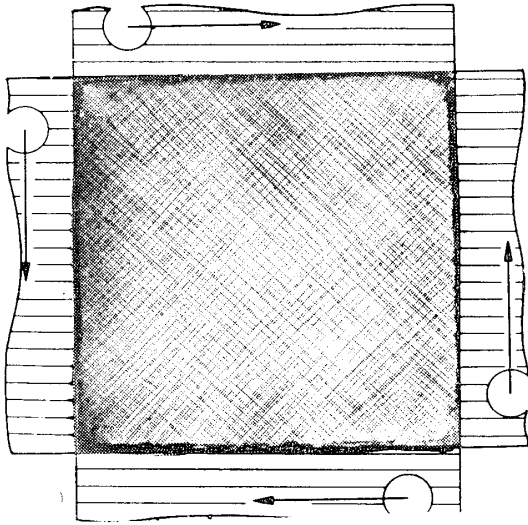


写真1—試験片表面における応力塗膜の亀裂模様。
合板構成比 1 : 2 : 1
繊維方向 $\varphi = -1^\circ$

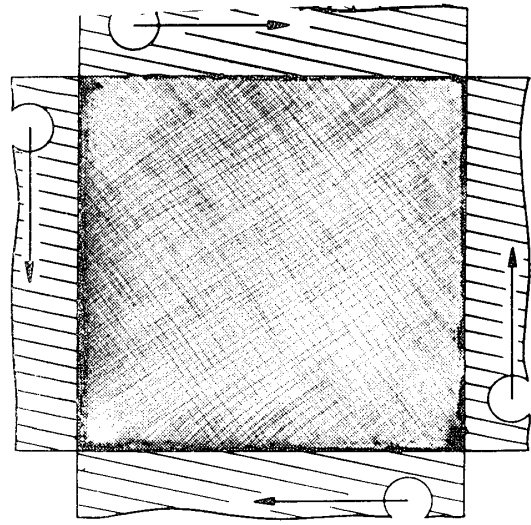


写真2—試験片表面における応力塗膜の亀裂模様。
合板構成比 1 : 2 : 1
繊維方向 $\varphi = -12^\circ$

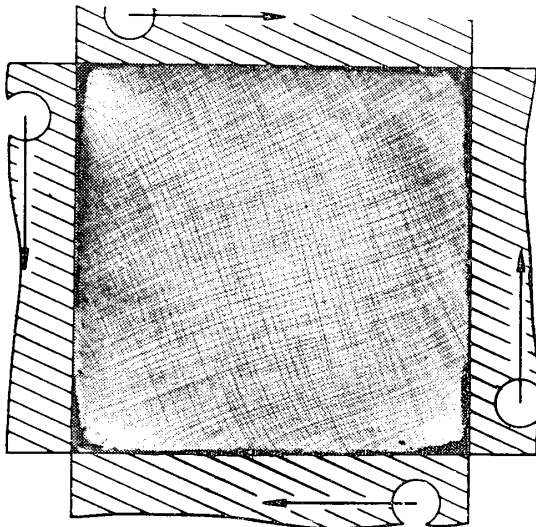


写真3—試験片表面における応力塗膜の亀裂模様。
合板構成比 1 : 2 : 1
繊維方向 $\varphi = -25^\circ$

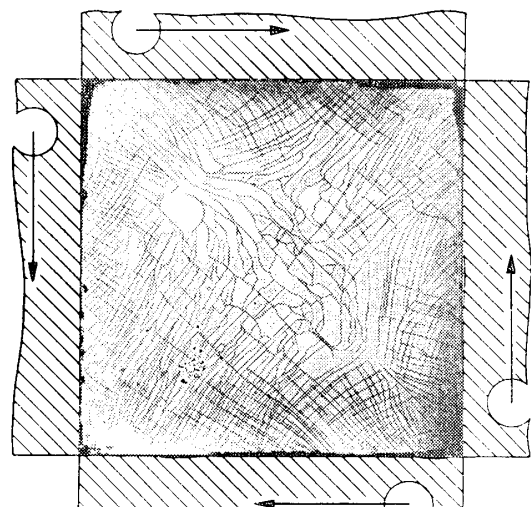


写真4—試験片表面における応力塗膜の亀裂模様。
合板構成比 1 : 2 : 1
繊維方向 $\varphi = -45^\circ$

文 献

- 1) NORRIS, C. B. and P. F. MCKINNON : Forest Prods. Lab. Rept. No. 1328-C (1945).
- 2) NORÉN, B. and E. SAARMAN : Holz als Roh- u. Werkst. **16** : 18~22 (1958).
- 3) 大熊, 継田, 平井: 木材誌 **7** : 242~246 (1961), **8** : 54~58 (1962).
- 4) 高見: 木材誌 **10** : 1 (1964).
- 5) 満久, 佐々木: Holz als Roh- u. Werkst. **20** : 303~314 (1962), 木材誌 **6** : 67~70 (1960).