

内部応力について

浅野猪久夫*・都築一雄*・鷺見博*

Ikuo ASANO*, Kazuo TSUZUKI* and Hiroshi SUMI* : Internal Stress in the Glued Laminated Wood.

1. ま え が き

集成材は製造工程において接着剤の塗布, 加圧(加熱), 乾燥などの操作を経るため, 一般の木材と違った状態で内部に残留応力(内部応力)が存在することが予想される。外力により繰返し応力が生じる場合などには内部応力の存在が材の破壊や耐久性に影響するのでその状態を知っておく必要がある。

木材の内部ひずみおよび内部応力の測定に関しては J. M. McMILLEN や R. L. YOUNGS and C. B. NORRIS らによつて, 乾燥に伴ない発生する乾燥ひずみおよび応力を求める問題として slice method による研究が行なわれた¹⁾²⁾³⁾。これは材料を表面に平行な薄片に切り離し, 各薄片のひずみの回復による長さの変化量を測定して内部応力を計算するもので, R. L. YOUNGS and C. B. NORRIS³⁾ はこの方法を理論的にまとめ, 中心線に対して対称な高次多項式の応力関数⁴⁾を適用して2次元弾性理論から木材の繊維に直角な面内の垂直応力と剪断応力を求める近似的計算式を求めた。この方法は後述する方法に比べ解析がやや厳密であるが, 集成材の如く比較的長大材でしかも繊維方向の応力を求める場合は, 異方性の問題と共に技術的にも多層の薄片に分離しその長さを測るに困難があり, にわかに応用し難い点がある。

他方平板あるいは, はりの内部応力の測定に関する研究は金属材料の残留応力測定に関して S. TIMOSHENKO の著書⁵⁾に紹介されている如く DAVIDENKOV 以降 D. G. RICHARDS⁶⁾らの多くの研究があり, その後 R. G. TREUTIG and W. T. READ⁷⁾ および川田⁸⁾らにより矩形断面の平板やはりについての新しい計算式が求められた。この方法は removing method とも云い得る方法で, 応力の存在する一定厚みの薄層を除去したときの残りの材の曲率変化を測定して残留応力を計算するもので, 切削平面に垂直な方向の応力は無いものとし, 断面に垂直な応力のみを仮定しているため剪断応力を求めることはできないが, 測定方法としては集成材の内部応力の測定に適している。ここではこの方法により, 2, 3の集成材について実験した結果を報告する。

2. 内部応力計算式

内部応力の存在する矩形断面はりの表面を面に平行に削ると残つた材に曲率の変化を生ずる。材には断面に垂直方向の応力のみが存在しかつ幅方向の応力分布は一様であると仮定し, また切削に伴なう材の弾性係数の変化はなく, 表層を除去した際に生ずる応力は弾性限度を越

* 名古屋大学農学部, Faculty of Agriculture, Nagoya University, Anjō, Aichi.

えず，曲率は全長にわたり一様（単純曲げ）であることおよび切削加工による附加応力も無いものと仮定すれば，はりの曲率変化から川田の式⁸⁾⁹⁾により内部応力が計算される（TREUTIG and READ の式⁷⁾も等方体のはりについては全く同じである）。即ち，

$$\sigma = \frac{E(h-a)^2}{6} \frac{d(1/\rho)}{da} - \frac{2E(h-a)}{3} \frac{1}{\rho} + \frac{E}{3} \int_0^a \frac{1}{\rho} da \dots\dots\dots(1)$$

ここに h ：はりの最初の高さ， a ：削りしろ， $1/\rho$ ：曲率， E ：ヤング係数， σ ：深さ a における内部応力とする。

3. 試験方法

試験体の接着層に平行な表面を回転鉋で一様な厚さだけ削り取つて Fig. 1 のようにスパン 150 cm の中央矢高をダイヤルゲージで測定し，彎曲が正円であると仮定して曲率を算出する。最初の曲率との差を切削厚み a に対して図上にプロットし，(1) 式の微分値および積分値を図式的に求め σ を計算する。なお表層の応力を比較的正確に求めるため，表層の切削厚みは約 0.5 mm とし以後約 1 mm 間隔に削つて測定した。計算に用いたヤング係数は Table 2 および 3 の曲げヤング係数である。また内部応力の細部は必ずしも中心線に対して完全な対称ではなく全深さに対して測定すべきであるが，試験体が薄くなると外力による変形が生じ易く曲率測定の見誤差が大きくなるので切削ははりの中心線を越えるまでに止めた。

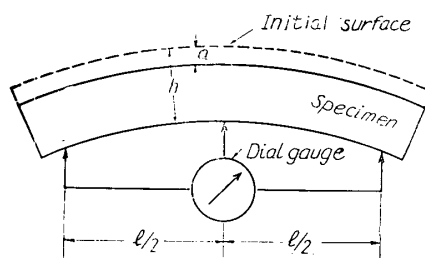


Fig. 1. Measurement of curvature of beam.

4. 試験体の種類と製造条件

種類A：5 Ply 集成材*

樹種：タイワンヒノキ（厚み約 12 mm 気乾材），接着剤：無変性尿素樹脂（キゲタライム），硬化剤：NH₄Cl（10%溶液，樹脂に対し 5%混合），圧縮圧力・温度・時間：8 kg/cm²，25~27°C，20時間，製造約 1 年後供試。

種類B：2 Ply 集成材

樹種：ヒノキ（厚み約 30mm 気乾材），接着剤：尿素樹脂，硬化剤：NH₄Cl（10%溶液，樹脂に対し10%混合），圧縮圧力・温度・時間：15 kg/cm²，50°C，2時間，製造約 2 カ月後供試。

種類C：2 Ply 集成材

接着剤：常温硬化石炭酸樹脂（アイチボンドS），硬化剤：樹脂に対し10%混合，圧縮圧力・温度・時間：15 kg/cm²，20°C，30時間，その他Bと同じ。

5. 試験体についての各種性質

5 Ply 集成材については予め各試験体の端部より各ラミナにつき 3 コずつの繊維方向圧縮試

* この試料は満久・佐々木がクリープおよび疲労試験用に製造した長さ 200 cm，幅 18 cm の集成材の側面より幅約 2 cm の部分を取つたものである。

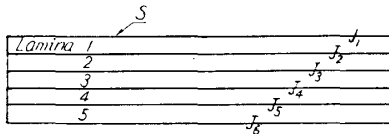


Fig. 2. Notations on the 5-ply glued laminated beam.
 J : Glued layer and surface.
 S : Surface to be removed.

験体 (1×1×2.5 cm) を取り, 気乾比重, 含水率, 圧縮強度, 圧縮ヤング係数を測定した。また参考のためこの結果を用いて集成材の応力およびたわみ計算方法 (浅野¹⁰⁾) により見掛けの曲げヤング係数, 曲げ比例限度および曲げ破壊係数の計算値を求めた。これらの結果をまとめて Table 1 および 2 に示した。また Table 3 には 2 Ply 集成材のヤング係数を示した。なお 5 Ply 集成材の各ラミナの記号などを Fig. 2 に示した。

6. 試 験 結 果

前記の各試験体につき, 表面からの深さ a に対する曲率測定値および内部応力の計算値を

Table 1. Summary of average compressive properties on 5 ply laminated beam of TAIWANHINOKI (*Chamaecyparis formosensis* M.) bonded with resin of urea type.

Number of L. beam	Number of Lamina	Thickness (cm)	Specific gravity (Air dry)	Moisture content (%)	Strength (kg/cm ²)	Young's modulus (kg/cm ²)
A1	1	1.21	0.45	12.5	482	110×10 ³
	2	1.21	0.41	13.5	435	150
	3	1.21	0.44	13.0	476	190
	4	1.22	0.45	13.0	441	130
	5	1.18	0.43	14.0	504	80
	Av.	(T=6.03)	0.44	13.0	468	130
A2	1	1.18	0.45	13.5	423	150×10 ³
	2	1.22	0.44	14.0	426	110
	3	1.22	0.47	14.0	452	120
	4	1.23	0.40	15.0	445	80
	5	1.17	0.46	12.5	512	140
	Av.	(T=6.02)	0.44	14.0	452	120
A3	1	1.21	0.44	12.0	449	140×10 ³
	2	1.23	0.47	13.0	458	70
	3	1.21	0.42	13.5	452	130
	4	1.22	0.45	13.5	453	90
	5	1.19	0.47	13.5	482	100
	Av.	(T=6.06)	0.45	13.0	459	110
A4	1	1.20	0.39	14.0	433	80×10 ³
	2	1.23	0.46	13.0	494	120
	3	1.21	0.45	13.0	451	110
	4	1.22	0.44	13.5	474	110
	5	1.20	0.43	13.5	448	110
	Av.	(T=6.06)	0.43	13.5	460	110

A5	1	1.20	0.40	14.0	453	100×10 ³
	2	1.21	0.43	12.5	465	110
	3	1.21	0.43	13.0	442	180
	4	1.22	0.43	13.5	412	130
	5	1.20	0.48	13.0	448	100
	Av.	(T=6.04)	0.43	13.0	444	120
A6	1	1.19	0.46	13.5	457	90×10 ³
	2	1.21	0.44	13.0	457	190
	3	1.21	0.45	13.0	420	100
	4	1.22	0.47	13.0	523	160
	5	1.21	0.44	12.5	504	140
	Av.	(T=6.04)	0.45	13.0	472	140
A7	1	1.21	0.41	13.5	357	60×10 ³
	2	1.21	0.42	13.5	435	160
	3	1.22	0.43	15.5	438	160
	4	1.22	0.44	13.5	464	140
	5	1.21	0.39	14.0	415	80
	Av.	(T=6.07)	0.43	14.0	422	120

Table 2. Properties of 5-ply laminated beam of TAIWANHINOKI obtained by the ASANO's calculating method¹⁰⁾ of stress and deflexion of the laminated beam.

Number of beam	Examined value	Computed value		
	Young's modulus (kg/cm ²)	Young's modulus (kg/cm ²)	Proportional limit (kg/cm ²)	Modulus of rupture (kg/cm ²)
A1	100×10 ³	105×10 ³	552	975
A2	110	133	431	897
A3	120	111	443	915
A4	100	99	487	827
A5	120	105	473	907
A6	130	127	450	967
A7	110	87	479	839

Table 3. Average strength of 2 ply laminated beam of HINOKI (*Chamaecyparis obtusa* ENDL.).

B : bonded with resin of urea type C : bonded with resin of phenol type

Number of L. Beam	Moisture content %	Specific gravity (Air dry)	Young's Modulus in bending kg/cm ²
B1	10.4	0.35	100×10 ³
B2	9.8	0.35	90
C1	11.9	0.42	80
C2	11.2	0.37	90

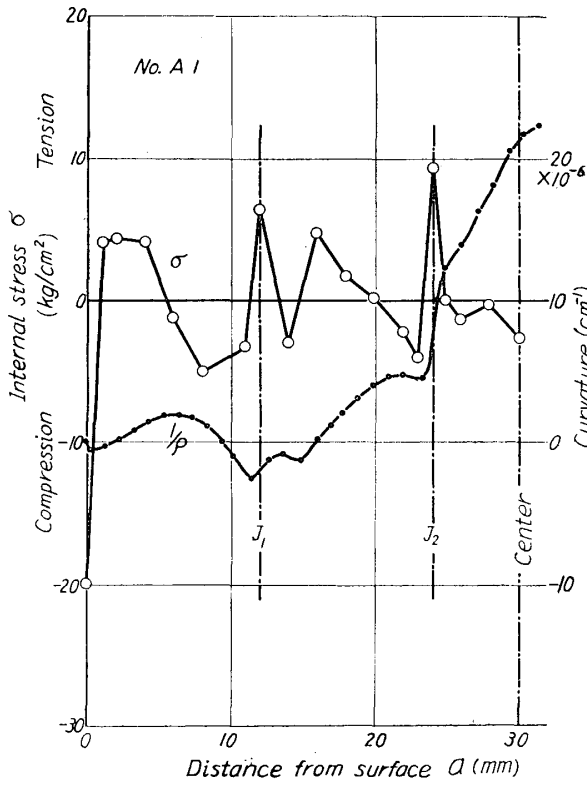


Fig. 3 (1). Plots of measured curvature and calculated stress in the glued laminated wood (No. A 1).

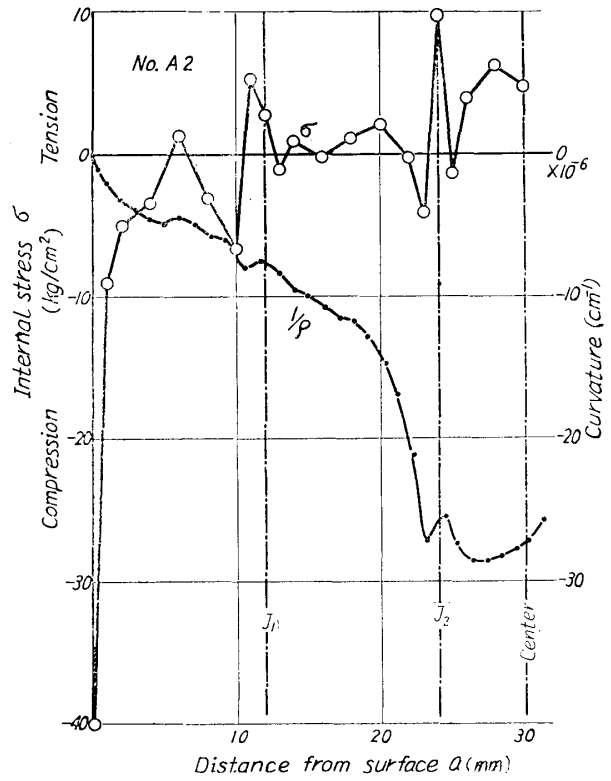


Fig. 3 (2). Plots of measured curvature and calculated stress in the glued laminated wood (No. A 2).

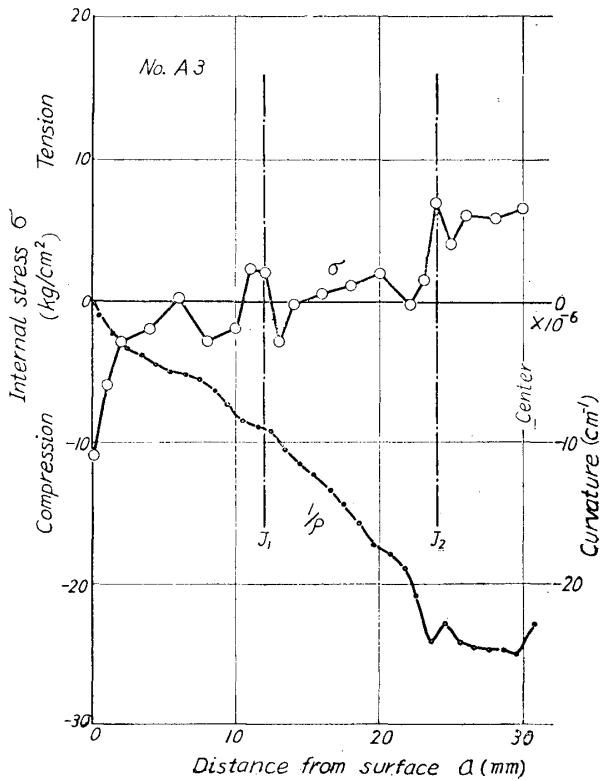


Fig. 3 (3). Plots of measured curvature and calculated stress in the glued laminated wood (No. A 3).



Fig. 3 (4). Plots of measured curvature and calculated stress in the glued laminated wood (No. A 4).

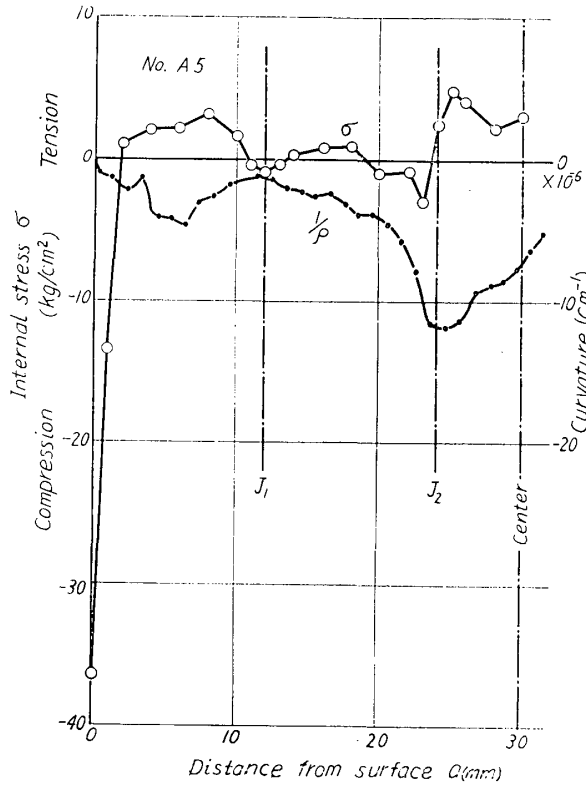


Fig. 3 (5). Plots of measured curvature and calculated stress in the glued laminated wood (No. A 5).

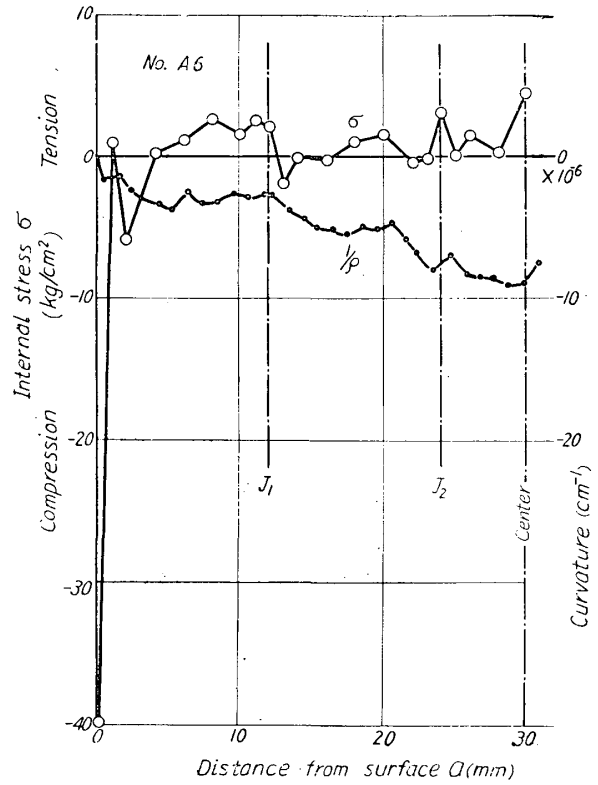


Fig. 3 (6). Plots of measured curvature and calculated stress in the glued laminated wood (No. A 6).

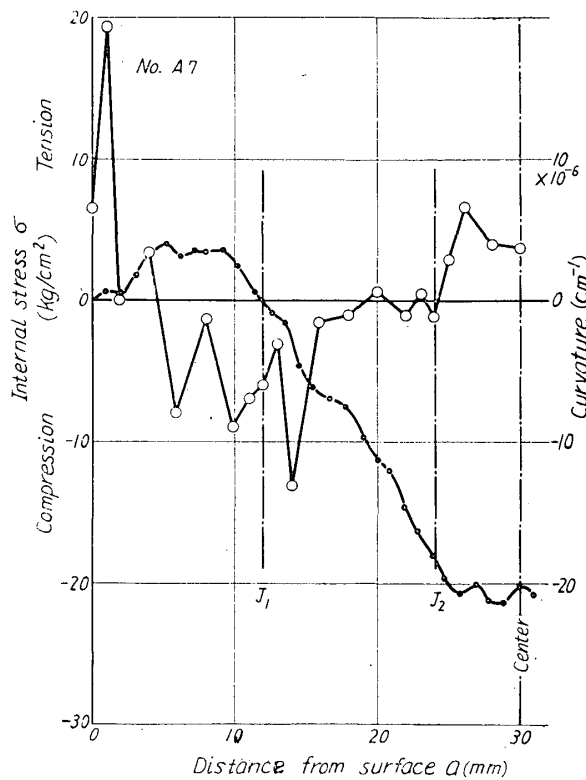


Fig. 3 (7). Plots of measured curvature and calculated stress in the glued laminated wood (No. A 7).

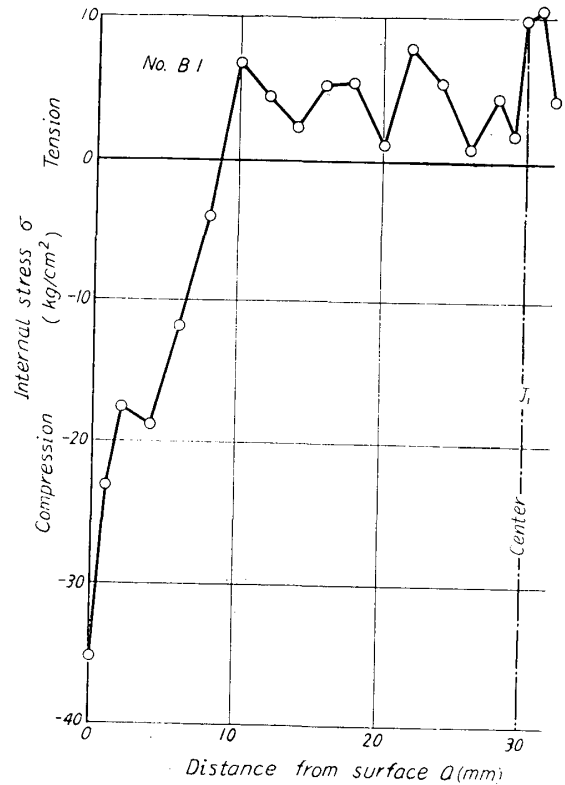


Fig. 3 (8). Plots of measured curvature and calculated stress in the glued laminated wood (No. B 1).

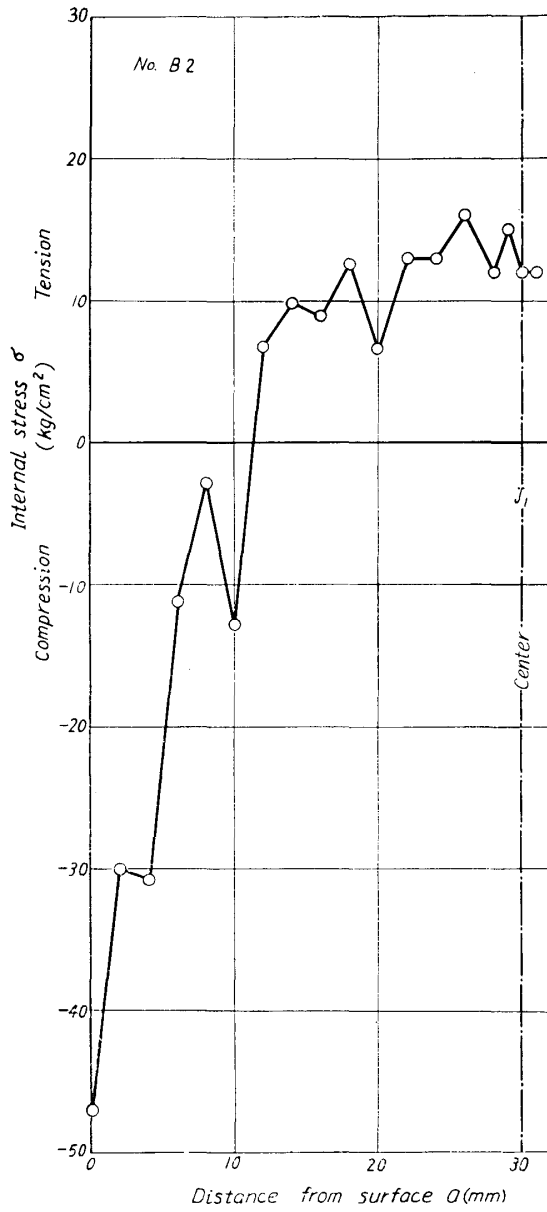


Fig. 3 (9). Plots of measured curvature and calculated stress in the glued laminated wood (No. B 2).

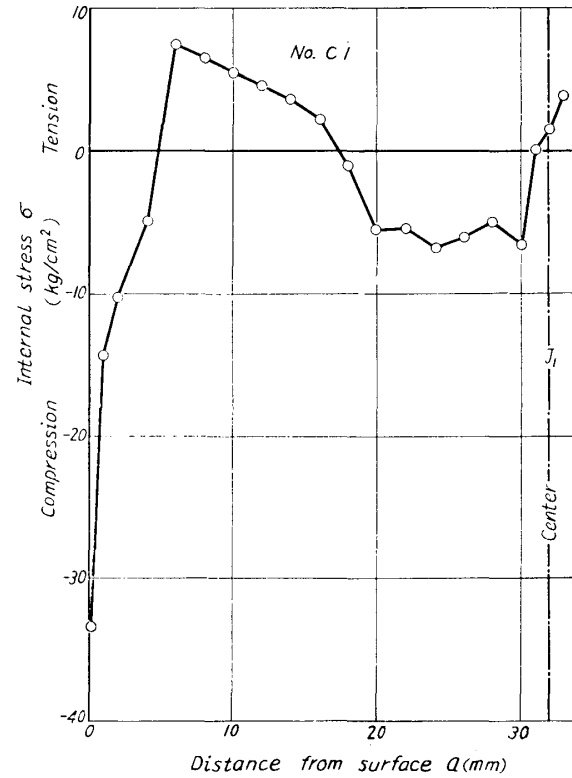


Fig. 3 (10). Plots of measured curvature and calculated stress in the glued laminated wood (No. C 1).

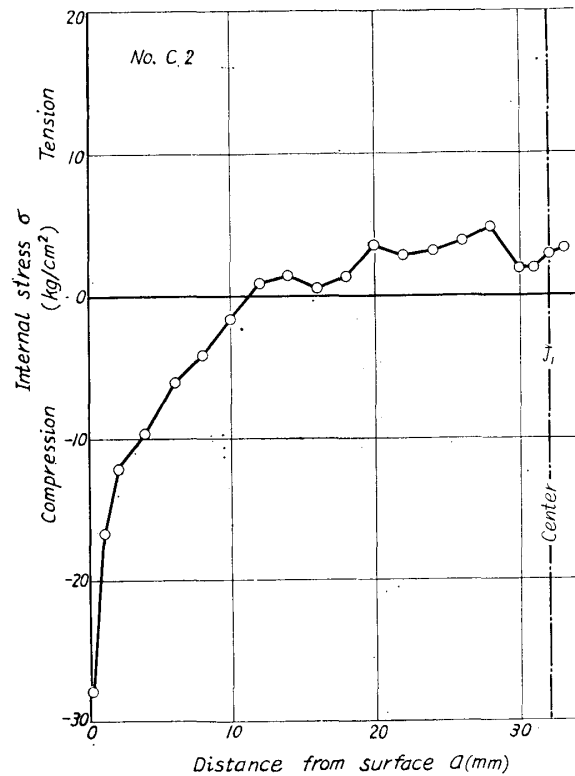


Fig. 3 (11). Plots of measured curvature and calculated stress in the glued laminated wood (No. C 2).

求めた結果を Fig. 3 に示した。曲率は実測深さに対し、また応力は(1)式の微積分値を求めた点(曲率-深さ曲線の表面から 1 mm 間隔の点)につきプロットしたものである。

なお切削中各層毎に含水率を測定したが、その平均値に対する含水率偏差は、試験体Aの場合 $\pm 0.3 \sim \pm 0.7\%$ でほぼ平均していた。また試験体B, Cの場合はいずれも $\pm 0.5 \sim \pm 1.2\%$ で表層部がやや高含水率であつた。

7. 考 察

YOUNGS らの slicing による方法に比べ川田らの removing による方法は測定間隔が小さく出来るので比較的局所の応力状態を知るには好都合であるが、一様な削除が可能な厚みには限度があるから集中応力はいくまで近似的にしか求められない。従つて集成材のように局所的な応力変動の大きい場合はこの実験よりも更に小さい間隔で曲率変化を測定して精度を高める必要がある。またこのような複雑に変動する曲線を微積分するには図上では不正確になり易いので、連続する3~4点を連結する簡単な曲線、例えば2次、3次の放物線に当てはめて数値計算的に微積分を行なうよう考慮する必要がある。このような点から見て今回の測定結果は十分な測定精度を得ているとは云い難いが、集成材についての概括的な内部応力分布状態の特徴につき検討して見る。

1) 尿素樹脂を用いたものでは接着層附近に集中的な引張り応力が存在する。但しこの傾向の見られなかつたものが9本中A5, A7, B2の3本あつた。また石炭酸樹脂の場合は試料が少なく不明瞭であるがこの傾向が無かつた。前記のように尿素樹脂の接着層附近に引張り応力が生じ易いとすれば、その原因は水分の影響と考えられる。この場合接着剤が硬化しその附近の材が乾燥する過程においてどこかにひずみが set されなければならない。この実験ではこの間の現象を説明することは困難であるが、接着剤の層にひずみが set される場合と隣接部材間に収縮率の差がある場合とが考えられる。

2) 表層に圧縮応力が存在することは内部の水分移動にともなう引張り力に釣合うことおよび試験時の外気条件が時期的に高湿度状態になつたことが原因として考えられる。

3) 材の比例限度応力を破壊強度の2/3と仮定すれば Table 1 よりタイワンヒノキの圧縮比例限度は約 300 kg/cm^2 でまた引張比例限度は少なくとも 700 kg/cm^2 以上と推定される。これに対し内部応力は、圧縮の場合は最大約 40 kg/cm^2 で比例限度の約13%以下、引張りの場合は最大約 10 kg/cm^2 で比例限度の約1.4%以下で垂直応力に関する限り、集成材の強度および耐久性にとくに悪影響を及ぼすとは考えられない。ただし接着層附近の急激な応力の変動はかなりの剪断応力の存在を示すもので、この点に関しては更に研究が進められなければならない。

8. む す び

はりの表層を削除したときの残りの材の曲率変化から内部に残留する断面に垂直な応力を測定する方法で、尿素樹脂および石炭酸樹脂で接着した集成材の内部応力を測定した。測定方法上検討すべき点が多く、これらに関する注意点を列記した。

Summary

The internal stress in the laminated beam of wood is calculated by the method of TREUTIG⁷⁾ and KAWATA⁸⁾. The stress is determined by removing successive uniform layers from the surface of a test specimen and by measuring the resultant curvature. In most of the laminated wood bonded with urea resin, the normal stress of tension is imposed on the glue line, but its magnitude is not so large as diminishing the strength of laminated wood.

引 用 文 献

- 1) MCMILLEN, J. M.: For. Prod. J., 5 : 71 (1955)
- 2) MCMILLEN, J. M. : For. Prod. J., 5 : 230 (1955)
- 3) YOUNGS, R. L. and C. B. NORRIS : For. Prod. J., 9 : 367 (1959)
- 4) TIMOSHENKO, S. : Theory of Elasticity, 2nd edition, New York : 169 (1951)
- 5) TIMOSHENKO, S. : Strength of Material (PART II) 3rd edition, New York : 381 (1956)
- 6) RICHARDS, D. G. : Proc. Soc. Exptl. Stress Analysis, 3 : 40 (1945)
- 7) TREUTIG, R. G. and W. T. READ : J. Appl. phys., 22 : 130 (1951)
- 8) 川田雄一 : 日本機械学会誌, 55 : 16 (1952)
- 9) 応力測定技術研究会 : 応力測定法, 朝倉, 東京 : 372 (1955)
- 10) 浅野猪久夫 : 材料試験, 11 : 38 (1962)