

回 転 曲 げ 疲 労 強 度 に つ い て

満 久 崇 磨*・佐 々 木 光*

Takamaro MAKU* and Hikaru SASAKI* : The Rotating Bending Fatigue Strength of Glued Laminated Wood.

木材を船舶, 車輛, 橋梁などに使用する場合は勿論, その他の構造物の部材として使用する場合でも風や土地の震動等によつてかなり頻繁に繰返し応力をうけている場合が少なくない。特に最近では構造用材としての集成材が新しく認識されはじめ, 強度的要求が従来と比較にならぬほど高まつてきている。しかるに集成材の疲労に関する研究は筆者らの知る範囲では皆無である。この一番主な理由は比較的大寸法の試験片と大きな疲労試験機を必要とするからである。そこで本研究ではまず素材および積層材の疲労試験を行い, その比較によつて集成材の特性を察知しようとしたもので, 素材と積層材のちがい, 積層材のジョイントの有無, その種類などが疲労性にどのように影響するかを調べたものである。

I 素材および集成材の疲労強度

1 実験方法

素材試験片は平均年輪巾 1.8 mm, 絶乾比重 0.38 のヒノキ無節気乾辺材部から Fig. 1 のように繊維方向が試片長軸に平行するように製作した。集成材試験片はまず素材試験片と同一の樹幹部から厚さ約 4 mm, 柃目の薄片を作り, それぞれ市販の石炭酸および尿素樹脂接着剤で 4 プライで, 各層の繊維が平行するように集成熱圧したもので, いわゆる積層材と称するも

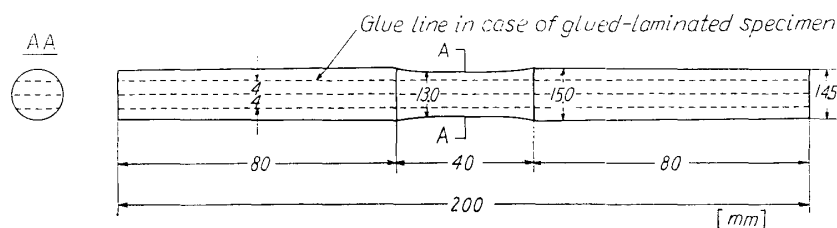


Fig. 1. Test specimen.

のである。これを数日間室内に静置した後, 素材試験片と同一寸法の試験片に仕上げた。熱圧条件は次の如くである。

接着剤塗布量 40 g/ft², 圧締圧 7~8 kg/cm²

圧 締 時 間 25 min

熱 圧 温 度 石炭酸樹脂 135°C, 尿素樹脂 115°C

試験片は製作後すべて調湿デシケーター中に 2 週間以上静置して一定含水率に調整した。それらの試験時における諸性質を Table 1 に示す。

* 木質材料研究部門, Div. of Composite Wood, Wood Res. Inst., Kyoto Univ.

Table 1. Physical and mechanical properties of solid wood and glued laminated wood used in rotating bending fatigue.

	Density (air dried) γ (g/cm ³)	Annual ring width b (mm)	Moisture content u (%)	Tensile strength σ_t (kg/cm ²) ^{**}	Compression strength σ_c (kg/cm ²) ^{**}	Bending strength σ_b (kg/cm ²) ^{**}
Solid wood	0.42	1.8	14.7	1250 ($u=15\%$)	386	701
Urea resin glued laminated wood	0.43	—	14.3	—	549	914*
Phenol resin glued laminated wood	0.49	—	10.1	—	572	950*

* Averages of the strength tested by loads parallel and perpendicular to the glue layer of specimens.

** Test pieces : solid wood—by Japan Industrial Standard, glued laminated wood—compression $1.5 \times 1.5 \times 6.0$ cm, bending $1.5 \times 1.5 \times 2.0$ cm

試験機には小野式繰返し回転曲げ疲労試験機を使用し、呼び応力 350 kg/cm^2 以上の場合は繰返し数 500 r/min , 300 kg/cm^2 以下の場合は 3000 r/min で運転した。木材における回転数の疲労強度におよぼす影響については報告されたものはないが、一般にこの程度では回転速度の影響はあまり無いものと考えられる。また試験片の含水率は調湿含水率をもつて示すことにした。

2 実験結果

Fig. 2 に素材および集成材の S-N 曲線を示した。木材あるいは木質材料の S-N 曲線については従来、半対数グラフ上に直線又はそれに近い形で示されるもの*、上に凹の曲線で示されるもの**、あるいは上に凸の曲線で示されるもの***などいろいろあつて、同じ種類の疲労

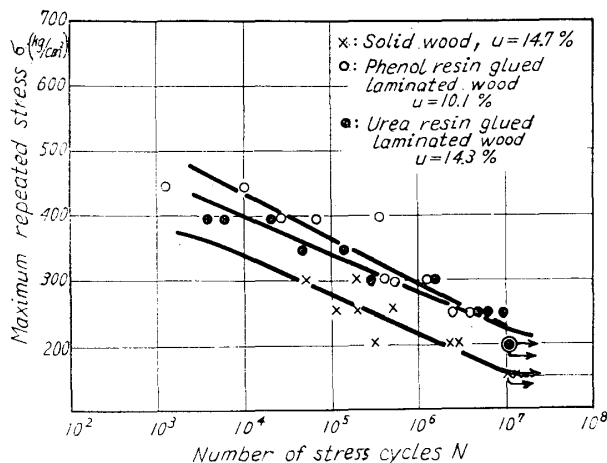


Fig. 2. S-N diagram for solid wood and glued laminated wood.

試験でもその形についてはまだはつきりした結論が出されていない。また疲労強度についてもそれが明瞭にあらわれるものとうでないものがあるが、一般に金属ほどはつきりあらわれないようである。

本実験の測定範囲でも耐久限度を確認することはできないが、繰返し数 $10^7 \sim 10^8$ 附近に存在するらしいこと、および S-N 曲線がほぼ直線をなすことが認められる。

Fig. 2 から 10^7 における時間強度について含水率のほぼ等しい素材と尿素樹

* 例えば KOLLMANN, KRAEMER の素材回転曲げ, 南の素材, 積層材の回転曲げ, 伊吹らの積層材平面曲げ

** 例えば SCHLYSTER の素材平面曲げ, KOMMERS の素材, 合板の平面または回転曲げ, SIEMINSKI の素材平面曲げ, 南の強化木回転曲げ, MOSLEMI の接着層 Torsion shear

*** 例えば LEWIS の素材, スカーフジョイント, glue shear の引張繰返し

脂集成材を比較すると、あきらかに集成材の疲労強度が大きく、また両曲線がほぼ平行していることから接着層の数が少なくなると、すなわち構成薄板の厚さがまずに従つてその S-N 曲線が素材側へ平行移動することが推定される。

平面曲げ疲労試験では一般に尿素集成材と石炭酸集成材の S-N 曲線は平行し、かつ前者の時間強度が僅かに高いが（文献 1 の Fig. 13 および文献 2 の Fig. 14 参照），回転曲げの場合も同じ関係が成立すると考えて差支えない。本実験の場合、尿素樹脂集成材と石炭酸樹脂集成材では含水率に差があるため直接比較することはできない。含水率の疲労強度に対する影響については試験中天候が変化することや最大応力断面附近が発熱して含水率が変化するため、まだはつきりした結論がなく、静的強度の場合と同様含水率の増加と共に S-N 曲線が低下するともいわれ³⁾⁴⁾、また影響がほとんど認められないともいわれている⁵⁾。Fig. 2 で石炭酸樹脂集成材の傾斜が大きいのは繰返し数の小さい所ではあきらかに含水率の差によるもので、繰返し数が大きくなるに従い試片の発熱によつて両者の含水率が接近し、石炭酸樹脂集成材の時間強度が相対的に低下するためであると考えることができる。

繰返し数 10^7 における時間強度 σ_w を素材で 150kg/cm^2 、集成材で 200kg/cm^2 として静的強度との割合を見ると Table 2 の如く従来報告されている範囲にはいり³⁾、かつ素材、集成

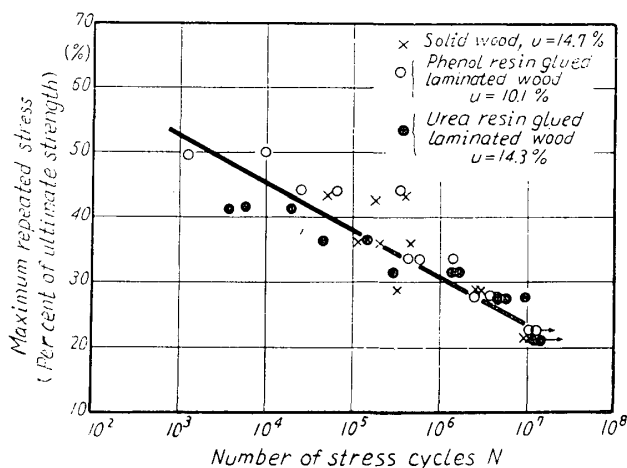


Fig. 3. S-N diagram for solid wood and glued laminated wood.

Table 2. Values of σ_w/σ_b , σ_w/σ_c in solid wood and glued laminated wood.

	σ_w/σ_b	σ_w/σ_c
Solid wood	0.21	0.39
Urea resin glued laminated wood	0.22	0.36
Phenol resin glued laminated wood	0.21	0.35

σ_b : Statical bending strength

σ_c : Statical compressive strength

σ_w : Fatigue strength

材の如何にかかわらずこの値がほぼ一定であることが判る。Fig. 3 は素材と集成材の S-N 曲線を繰返し応力の破壊応力に対する比であらわしたもので、あきらかにある幅をもつた 1 つの直線状の帯の中におちることが認められ、KOMMERS⁶⁾ が素材、合板について行なつた場合と比較的によく類似している。

回転曲げ疲労試験における破壊断面の形についての観察は非常に少ないが、KRAEMER⁷⁾ によると針葉樹の場合は全断面が割合に平滑で、例外として中心部に凹凸のはげし

い破壊形を示すことがあると報告されているが、本実験の結果では

Fig. 4 に示すように繰返し応力が小さい場合破壊断面は平坦であるが応力が大きくなると中心部の凹凸がはげしくなるようである。一般に木材がその破壊応力の 30% 以上の圧縮応力をうけた場合、細胞膜に必ず microscopic compression failure（いわゆる slip line）の発生するのが顕微鏡的に

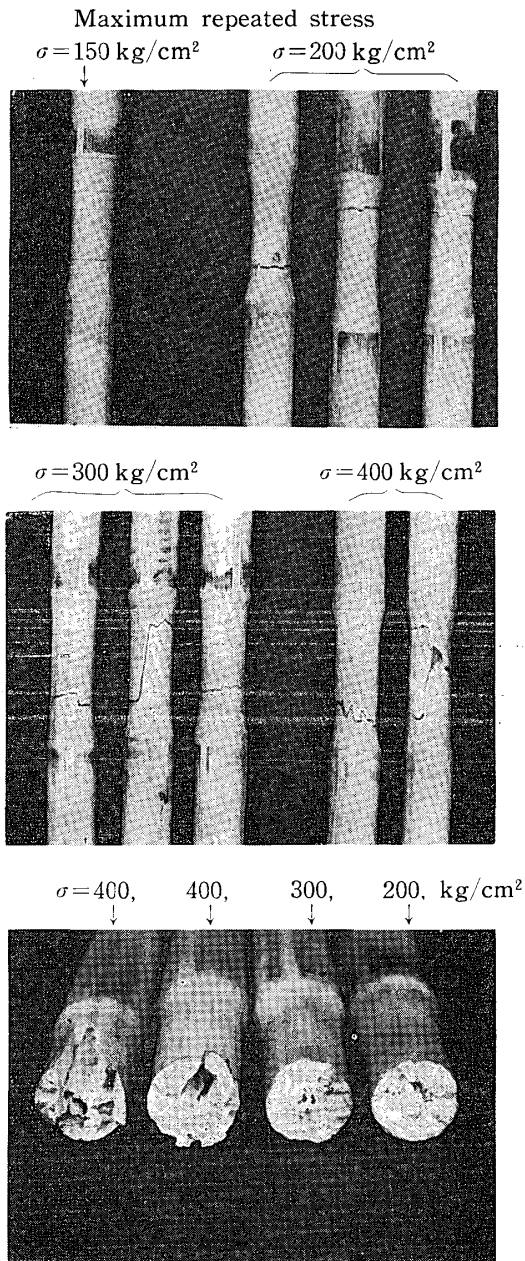


Fig. 4. Failures in rotating bending fatigue test specimens of solid wood.

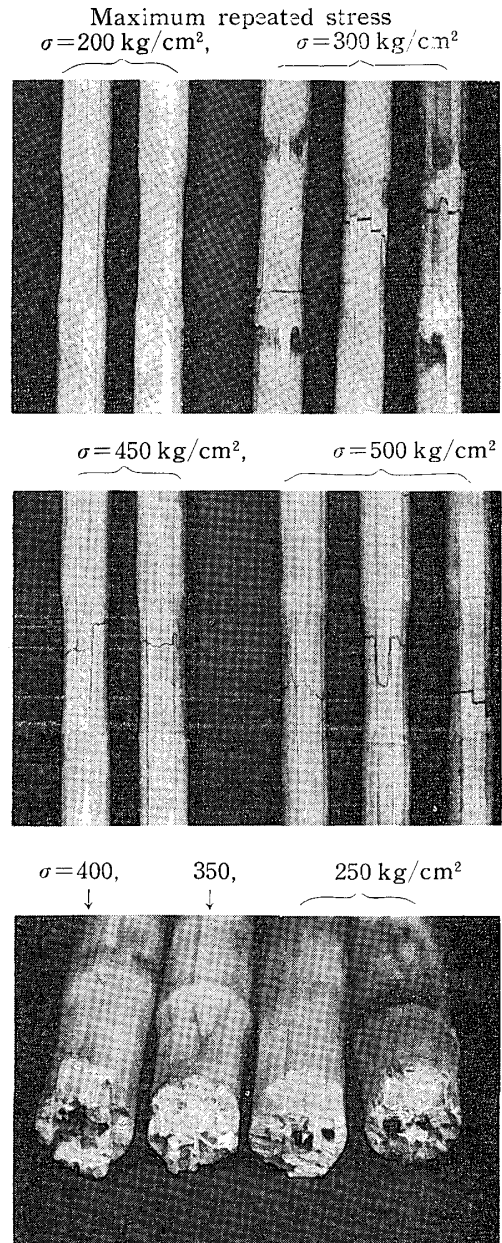


Fig. 5. Failures in rotating bending fatigue test specimens of phenol resin glued laminated wood.

みとめられるが、繰返し回転曲げでは極めて初期にまず最大応力断面の外周にそつて slip line が発生し、繰返し数がますます従いますます発達する。slip line は microfibril の挫屈であると 考えられるから繰返し引張力によつてこれが次第にひきはがされ亀裂となり断面の縮小をもた らすが、繰返し応力が小さい場合は断面縮小に伴う応力の集中も比較的小さいため亀裂は徐 々に内部に向つて進行し、いわゆる疲労による比較的平坦な破壊面を示すことになる。繰返し 応力が大きい場合、木材のような比較的塑性流動の小さい材料では外層部細胞膜の挫屈が急速 に亀裂に発展し、有効断面の急激な縮小と大きな応力集中によつて剪断あるいは割裂を伴う

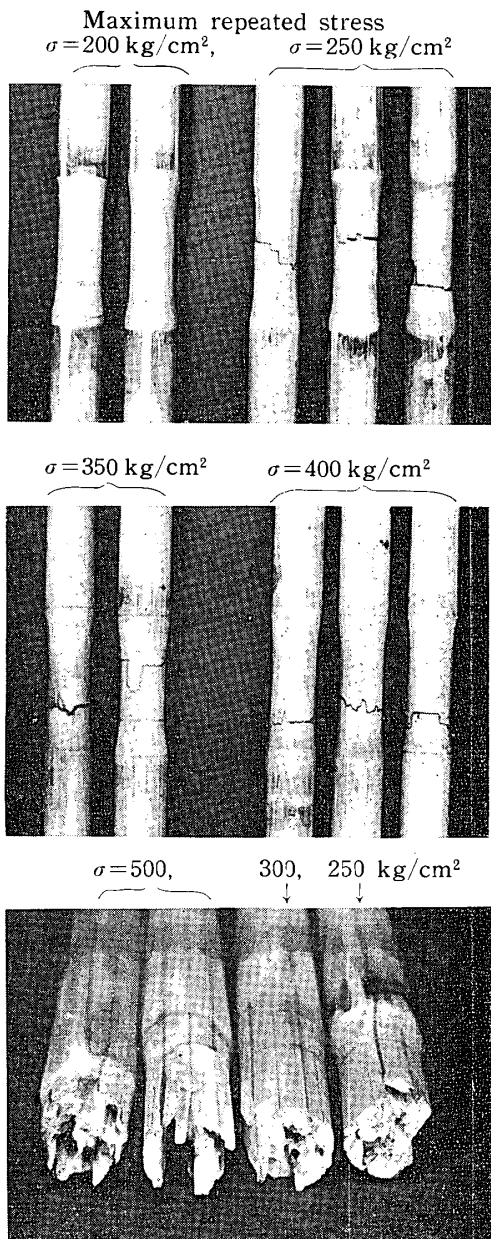


Fig. 6. Failures in rotating bending fatigue test specimens of urea resin glued laminated wood.

弾性係数などには何らかの形で影響するであろうことが予想される。

Ⅱ ジョイントをもつ集成材の疲労強度

1 実験方法

集成材においてはジョイント接着は実際上さけることのできない工法の1つである。本実験ではジョイントの種類、数およびその断面における位置が疲労強度にどのように影響するかを調べるためⅠと同様厚さ4mmの薄片に傾斜1:8のスカーフジョイントおよびバットジョ

破壊が瞬間的に発生する傾向が強くなると考えられる。

積層材の場合でも同じ傾向が認められるが素材ほど疲労破壊と瞬間破壊の境界が明瞭でないのは、素材より更に塑性流動が少ないため、小応力でも亀裂の発生が比較的早いことに起因すると考えられる (Fig. 5, 6)。強化木も積層材と同じ破壊形を示すようである。

集成材または積層材の片持梁では最大断面にしばしば接着層にそう剪断破壊を伴うこと⁸⁾が報告されているが、本実験の場合には接着層にそう剪断破壊はほとんど認められない。これは主として接着剤の強さが木材より強いことや応力集中が必ずしも接着層に集中しないことなどが原因になつていと思われる。

Fig. 7は繰返し応力400 kg/cm² (繰返し数6×10²で破壊)を与えた場合の破壊部外周附近の仮導管膜に見られる microscopic compression failureで破壊面附近ではこの種の compression failureが仮導管膜の挫屈、亀裂へと発達してゆく。Fig. 8は応力150 kg/cm² (10⁷で不破壊)を与えた場合の外周附近の compression failureである。Microscopic compression failureは破壊応力の約30%で必ず発生するからこの種の slip lineは疲労試験の初期ですでに発生しているが、繰返し応力が小さい場合10⁷の繰返しによつてもそれ以上発達しないことが推察される。またこの程度の compression failureは明らかに強度には影響しないが、



Fig. 7. Microscopic compression failures of urea resin glued laminated wood specimen. Max. repeated stress : 400 kg/cm², Numbers of stress cycles : 6×10^2

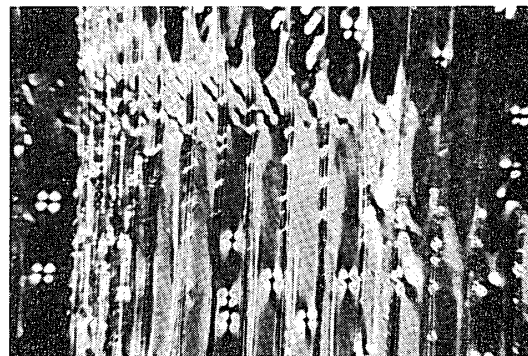


Fig. 8. Microscopic compression failure of solid wood.

Max. repeated stress : 150 kg/cm²,
Numbers of stress cycles : 10^7

イントを作り，これを試片中央断面に次の如く組合せ，尿素樹脂接着剤により冷圧集成した。(Fig. 9).

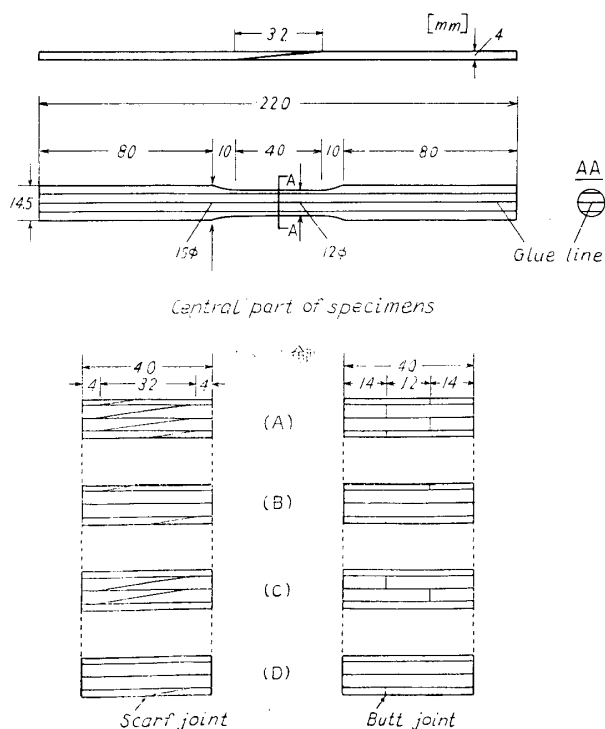


Fig. 9. Test specimens of urea resin glued laminated wood with scarf or butt joint.

- A : 全層にジョイント
- B : 外層2層にジョイント
- C : 中央2層にジョイント
- D : 外層1層にジョイント
- E : ジョイントなし

この集成材を数日間室内においた後，所定の試験片に仕上げ調湿デシケーター中に少なくとも2週間以上静置して調湿した。Table 3 にこの集成材の諸性質を示す。スカーフジョイントの曲げ強度は若干のバラツキはあるが，大体ジョイントの有無，その位置，数にはほとんど影響されないが，バットジョイントの場合はあきらかにジョイントの数や位置の影響がみとめられ，引張部にジョイントが存在しかつその占める断面積が大きいものほど曲げ強度が低下する傾向がみられる。すなわち表中接着層に平行，垂直のどちらか低い値を標準にとれば，EについてC，Dがほぼ同等の強さを持ち，Bがこれに続きAが最も低い値をもつとみなされる。

2 実験結果

A スカーフジョイントの場合

Fig. 10 に示すようにジョイントをもつ

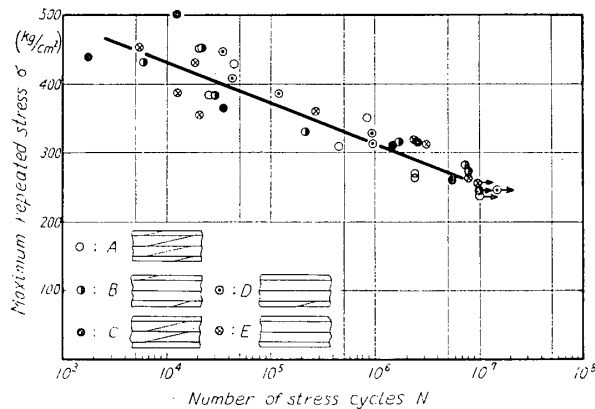


Fig. 10. S-N diagram for urea resin glued laminated wood with scarf joint.

Table 3. Physical and Mechanical properties of urea resin glued laminated wood with scarf or butt joints.

Type of Specimen	Density (air dried) (g/cm³)	Moisture content (%)	Bending strength ¹⁾ (kg/cm²)			
			Scarf joint		Butt joint	
			// ²⁾	⊥ ³⁾	//	⊥
A	0.49	14.4	894	895	412	420
B	0.48	14.5	795	783	712	565
C	"	14.4	898	873	602	758
D	"	14.4	819	780	724	610
E (without joint)	0.49	14.3	822	807	—	—

1) Specimen 1.2×1.2×20cm, 4-ply 1 : 2 : 2 : 1.

2) Load applied is parallel to the glue line of specimen.

3) Load applied is perpendicular to the glue line of specimen.

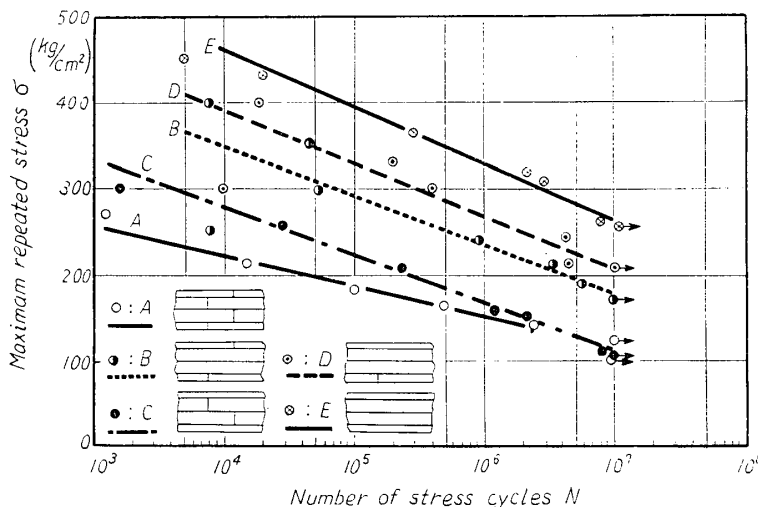


Fig. 11. S-N diagram for urea resin glued laminated wood with butt joint.

集成材の S-N 曲線およびその疲労強度はジョイントの位置，数の如何にかかわらずジョイントの無い場合とほとんど変わらない。このことは Table 3 の静的曲げ強度からもほぼ推察できることである。なお LEWIS⁹⁾ によるスカーフジョイント（樹種 Douglas fir, *Pseudotsuga taxifolia* BRITT., White oak, *Quercus alba* L., 接着剤 Resorcinol resin, 木部破断率 100%）の繰返し引張疲労試験においてもジョイントをもつた場合その静的引張強度が約 20% 減少する

にもかかわらず，S-N 曲線はジョイントのないものとほとんど変わらないことが報告されている。しかし MOSLEMI¹⁰⁾ も指摘している如くこの種の実験では接着剤と木材の強度の相対的な関係がかなり大きく影響することを常に考慮しなければならない。

B バットジョイントの場合

Fig. 11 に S-N 曲線を示す。この場合静的曲げ強度を参考

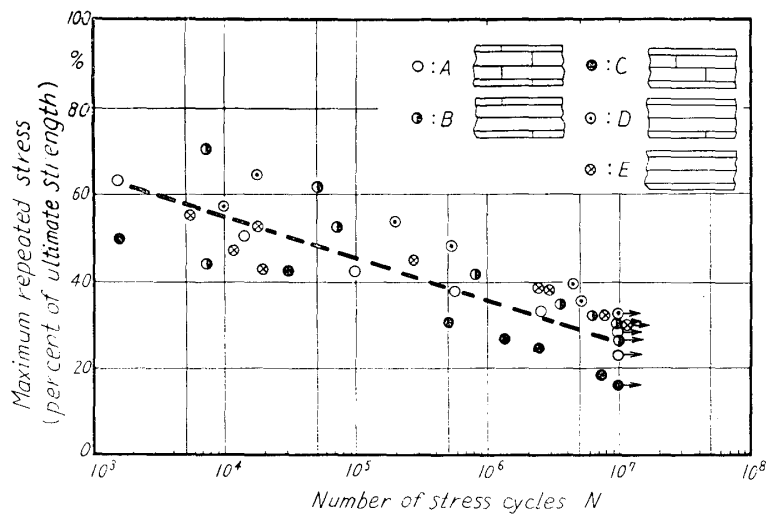
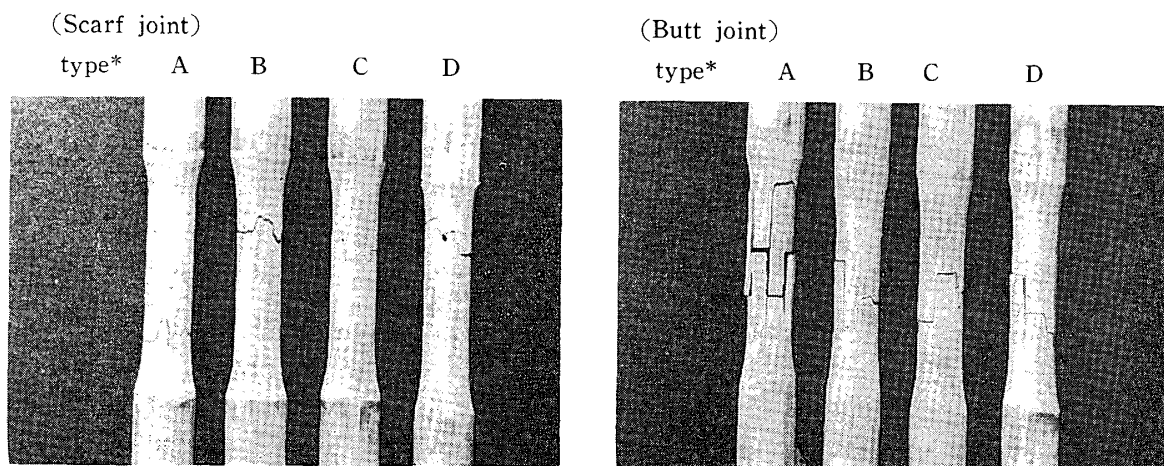


Fig. 12. S-N diagram for urea resin glued laminated wood with butt joints.

にすればCのS-N曲線がDの附近に並ぶべきである。このようにCグループの値が特に低いのは試験片が円形であることと、これに回転による効果加わるためなどであろうと考えられる。また、比較的低い繰返し応力の場合、静的な場合とちがつて内部の欠点がかかり影響するから、その材質に対しより考慮を払う必要がある。さてこれらの時間強度をTable 3のそれぞれの最小破壊応力に対する%で示

すと Fig. 12 の如くなり相当バラツキはあるが1つのS-N曲線の帯の中におちるようである。

Fig. 13 に破壊断面の一部を示した。スカーフジョイントの破壊面に接着層にそう破壊がみとめられないことは前述の説明によつて明らかである。バットジョイントで接着層の破壊が多いのは、ジョイント端面の接着が非常に弱いためまずこの部分が破壊し応力集中が接着層に集中する可能性が多いためと考えることが出来る。



* Refer to Fig. 9.

Fig. 13. Failures in rotating bending fatigue test specimens with joints.

摘 要

ヒノキ素材および厚さ 4 mm の薄板 4 プライの尿素および石炭酸樹脂集成材から Fig. 1 のような回転曲げ疲労試験片を作り、また試片中央部に Fig. 9 のようなスカーフジョイントまたはバットジョイントを組合わせた集成材試験片について、それぞれ回転曲げのS-N曲線を求め、素材と集成材のちがいあるいはジョイントの種類、数、または断面における位置などが

どのように影響するかを調べ、あわせて破壊断面の状態を観察した。

(1) 素材，集成材の S-N 曲線はともに $10^4 \sim 10^7$ の範囲では半対数グラフ上に直線で示される。その耐久限度は明瞭ではないが，ほぼ $10^7 \sim 10^8$ 附近にある。

素材の時間強度は常に集成材よりも低く，S-N 曲線は六体平行する。石炭酸樹脂集成材と尿素樹脂集成材の S-N 曲線の間にはあまり差がない。

(2) 繰返し応力を破壊応力に対する比であらわした場合，素材，集成材の S-N 曲線はほとんど一致する。

(3) 疲労強度 (10^7) の静的曲げ強度 および 圧縮強度に対する比は第 2 表に示す如くで前者で 0.21~0.22，後者で 0.35~0.39 となる。

(4) スカーフジョイントをもつ集成材の S-N 曲線は Fig. 10 に示す如くジョイントの数や位置の如何にかかわらずジョイントの無いものとほとんど変らない。しかしバットジョイントをもつ集成材のそれは Fig. 11 に示すように A が最も低く D が最も高い。縦軸に応力比をとった場合，Fig. 12 に示すようにこれらの S-N 曲線はかなり接近してくる。

(5) 素材の破壊断面は，繰返し応力が小さい場合は特有の平坦な形を示すが応力が大きくなると中央部の凹凸がはげしくなる。集成材の場合もやや，その傾向が見られるが，素材ほど明らかではなく大体において凹凸がはげしい。ジョイントのないもの，スカーフジョイントの集成材では接着層の剪断剥離は見られないがバットジョイントではほとんどが接着層での剥離をとまなっている。

Summary

Solid wood and 4-ply urea resin or phenol resin glued laminated wood (thickness of the laminae 4 mm) of HINOKI (*Chamaecyparis obtusa* ENDL.) were shaped into specimens shown in Fig. 1, and their fatigue strengths by rotating bending fatigue test were obtained and their failures were observed. And specimens of urea resin glued laminated wood with scarf joints or butt joints in the central part as shown in Fig. 9 were also tested and the effect of the joints on the fatigue strength and the failure were observed.

The results are summarized as follows:

(1) S-N curves (in semi-logarithmic graphs) of solid and glued laminated wood are linear and their slopes are nearly equal in the cycle range of $10^4 \sim 10^7$, and though there is no definite endurance limit, it seems that they exist in cycle range of $10^7 \sim 10^8$. The fatigue strength of the glued laminated wood is larger than that of the solid wood, and there exist little differences between the S-N curves of the urea resin and the phenol resin glued laminated wood.

(2) Using a ratio of the fatigue strength to the statical bending strength the S-N curves of solid wood and glued laminated wood coincide well.

(3) Table 2 shows ratios of the fatigue strength at $N=10^7$ to the statical bending strength and compressive strength, and they give 0.21~0.22 and 0.35~0.39, re-

spectively.

(4) The S-N curves of the glued laminated wood with scarf joints are shown in Fig. 10, which informs that they are independent of the composition of the joints in specimens and are equal to that of the glued laminated wood without joints. But those of the glued laminated wood with butt joints depend remarkably upon the composition of the joints as shown in Fig. 11. The differences in these S-N curves, however, become faintly when the stress ratios to the statical bending strength are used (Fig. 12).

(5) In case of comparatively low repeated stress the surface of failure of the solid wood has its inherent flatness, but in case of high stress, it appears as jagged in the central part. This tendency also exists a little in the glued laminated wood, but, in this case, jagged surfaces are generally dominant.

Shear (or tear) failures of the glue lines do not take place in the glued laminated wood without joints and with scarf joints, but they take place in that with butt joints.

引 用 文 献

- 1) 石原茂久, 佐々木光, 満久崇磨: 木材研究 No. 31 : 75 (1963)
- 2) 伊吹幸彦, 佐々木光, 河本実, 満久崇磨: 木材研究 No. 31 : 11 (1963)
- 3) KOLLMANN, F. : Technologie d. Holzes u. Holzwerkstoffe 1 (1951)
- 4) 南義夫: 日本航空学会誌 7 (1940)
- 5) 例えば SIEMINSKI, R. : Holz als Roh- u. Werkst. 18, 10 (1960)
- 6) KOMMERS, W. J. : U. S. Dept. F. P. L. No. 1327 (1943)
- 7) KRAEMER, O. : VDL-Jb. (1930)—KOLLMANN, F. : Technologie d. Holzes u. Holzwerkstoffe, 1 (1951)
- 8) 南義夫: 日航誌 9 (1942), 木材工業 5 : 4 (1950)
- 9) LEWIS, W. C. : 5th Annual National Meeting of For. Prod. Res. Soc. 1951 Preprint (1951)
- 10) MOSLEMI, A. A : For. Prod. J. 11: 3 (1961)