

接着層の疲労強度について

石原茂久*・佐々木光*・満久崇麿*

Shigehisa ISHIHARA*, Hikaru SASAKI* and Takamaro MAKU* : Fatigue Test of Some Glue Joints.

はじめに

集成材に関して数多くの利点が認識され、益々その使用面が広がって来ているが、ここで十分検討しておかなければならないのは、その信頼性である。実際問題として集成材に対する信頼性は、その素材の部分に対する信頼性よりも接着層のそれに帰するといつてよい。使用中にその接着層が剝離することなく十二分の接着状態を保持しているという保証がない限り、集成材を安心して使用することはできない。

接着層の耐久性の研究は、この意味で非常に重要な意義をもっているが、従来これに関してなされた研究の多くは乾湿の繰返しや長年月の暴露などによる、いわゆる、耐候的な性質に関する研究¹⁾が多く、外力による、いわゆる疲労性についての研究は非常に少なく、繰返し応力による疲労強度に関しては、数種の接着剤についてクランプの部分に接着層をもたせた片持梁の片振り疲労を行なった OLSON ら²⁾ および DIETZ ら³⁾ の報告、ドーナツ型の接着層に繰返し両振り応力を与え、カゼインのせん断疲労強度を試験した MOSLEMI⁴⁾ の報告、引張り試験片の一端に衝撃を繰返しした場合の FALK⁵⁾ の報告および中立面に接着層を有する普通梁の繰返し曲げを行なった E.M.P.A.⁶⁾ の報告などをみるに過ぎず、繰返し応力によつて接着層がどのような疲労を示すかは未だ十分に明らかとはいえない。この原因の一つは、適当な試験法が確立されていないことであろうと思われる。実際ので且つ測定値が接着層の疲労性を適確に示し、簡易で運転速度が速く、運転中に繰返される応力が安定しているものとなかなか満足なものがない。しかしながら最近では、接着された材料が車輛材、船舶材などで常に繰返し応力を受ける部分に用いられるようになり、また普通家屋の場合の風雪の繰返し、橋梁に用いた場合の往来する車輛の荷重を考えれば接着層の疲労強度は益々重要なものといわねばならない。この報告は一般に用いられている金属用板曲げ疲れ試験機を用い、独自の接着試験体を考案し、その応力状態に検討を加えた後、2, 3の代表的な接着剤について、特に、接着層の厚さとの関連において、接着層の繰返し曲げ疲労試験を行なった結果をとりまとめたものである。

材料および試験方法

疲労試験の場合に限らず一般に接着性能の試験は、その使用目的によつて方法を異にすべきであるが、接着の破壊の大部分のものでは多かれ少なかれ接着端に集中的な割裂応力が存在し、そのすぐ内側にせん断応力の最大値が存在するのが常であることを考え、ここでは、このような一般的な繰返し応力の下での試験を行なった。

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

1. 材 料

材料として、ブナ辺材（平均年輪幅 0.50 mm）を用い、木取り方向に十分注意を払って半径 50 mm、繊維方向 90 mm、切線方向 6 mm の柾目材を 180枚作り、気乾状態となるまで放置した後、Fig. 1 に示すように一定厚さのポリエチレン shim sheet（斜線部分）をのせ、中央部に気泡を含まないように接着剤を塗布し、その上に他の 1 枚の板を重ね合わせ接着した。（shim を用いない場合、即ち **close-contact** の場合は斜線部にうすくパラフィンを塗布した。）接着温度は室温（20～25°C）、圧縮力は 10kg/cm²（板目全体の平均圧力）、圧縮時間は24時間、接着後クランプから取り出して約10日間、室内に放置した後、接着材料の中央から Fig. 2 に示すようなクランク型試験片を切り出した。

用いた shim sheet は、厚さ0.5 および 1 mm のもので、接着剤は市販の次の 3 種である。

- 1 尿素樹脂接着剤
- 2 変性尿素樹脂接着剤
- 3 常温硬化型の石炭酸樹脂接着剤

硬化剤として、尿素樹脂および変性尿素樹脂接着剤には10%濃度の塩化アンモニウム溶液を樹脂液に対し 5 % 添加し、石炭酸樹脂接着剤には専用硬化剤（液状）を10%添加した。

試験片の数は夫々の接着剤について、shim を用いないもの（**close-contact**）、0.5 mm 厚さの shim を用いたもの、および 1.0 mm 厚さの shim を用いたもの、夫々約10箇で、すべて 2 カ月以上調湿し、大体一定の含水率の下で試験に供した。また、接着層の厚さを70倍の顕微鏡で測定したが、**close-contact** 接着では、その厚さは判読できなかつた。試験時の平均含水率と接着層の平均厚さはまとめて Table 1 に示した。

2. 試 験 の 方 法

用いた試験機は、西原式板曲げ疲れ試験機で、元来、金属を対象にして作られているので試

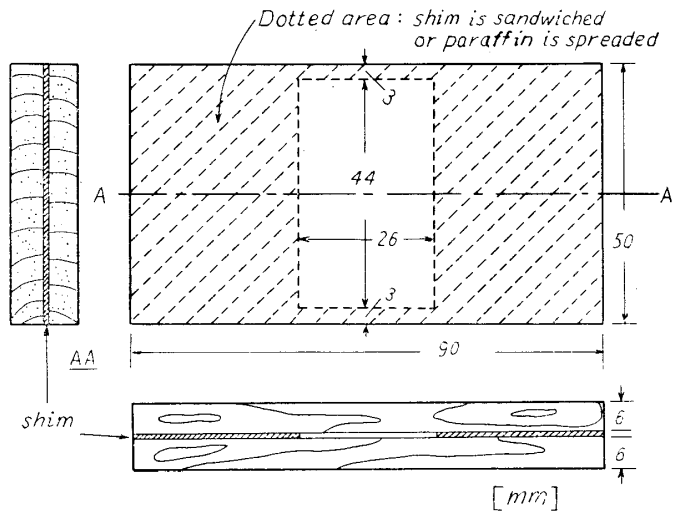


Fig. 1. Adhesion of beech plates.

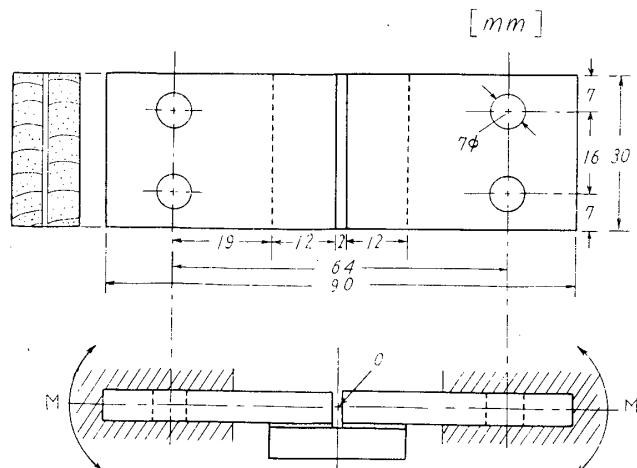


Fig. 2. Specimen.

Table 1. Moisture content of specimens and thickness of the glue-line.

Resin type	Thickness of shim	Symbol	Average moisture content		Average thickness of glue-line
Urea-formaldehyde resin	—	U-0	12.3%	group average	close-contact
	0.5 mm	U-0.5	11.3		0.42 mm
	1.0	U-1.0	10.0		1.27
Modified urea-formaldehyde resin	—	M·U-0	12.7	13.3	close-contact
	0.5	M·U-0.5	12.6		0.29
	1.0	M·U-1.0	14.5		0.86
Phenol-formaldehyde resin	—	P-0	12.5	12.2	close-contact
	0.5	P-0.5	11.0		0.25
	1.0	P-1.0	12.5		0.92

験片とりつけ部分が小さい。そこで、この接着層の試験に都合のよいようにクランプ間の距離（試片のスパンに相当する）を 20 mm から 42 mm に作り換え、慣性率を改めて求め直した。

試験片のとりつけは、Fig. 2 の 0 点が試験機の反復振動の回転軸に一致するようにクランプし、応力繰返し速度は毎分1,000回で運転した。（2000 rpm にすると試片の共振点を越えるので試験できない。）Fig. 3 は試験片をとりつけた状態を示す。

この試験機は試片の一端と前記の 0 点を中心とする一定の大きさの両振り回転角変位を反復繰返しすることにより、他端に接続されたはずみ車を試片を通じて反復振動させ、その慣性モーメントによつて試片に両振り曲げモーメントを作用させるタイプのもので、いわゆる準共振型であるため、運転中にクランプのゆるみ、或は試片の亀裂発生、弾性低下などによつて試片を

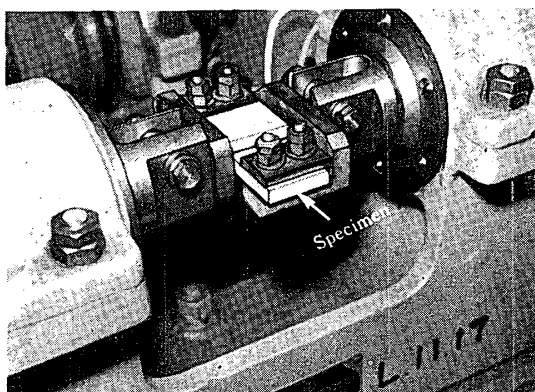


Fig. 3. Specimen clamped in the NISHIHARA's plate bending fatigue testing machine.

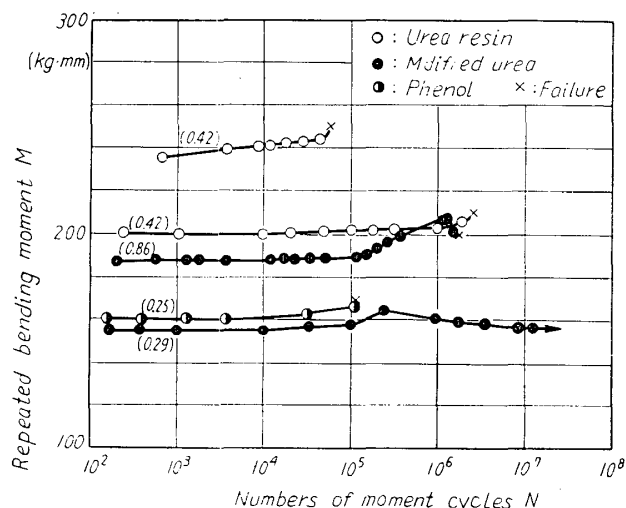


Fig. 4. Some examples of variation of bending moment during testing.

含む系の共振点に変動が生ずると、試片にかかる曲げモーメントが変化する。運転中の曲げモーメントの2, 3の例を示すと Fig. 4 の如く試片の疲労(クランプのゆるみも含む)の経過に伴なつて、むしろ極く僅か曲げモーメントの増加が見られるのが特徴であるが、 10^7 回の繰返しに耐える試片では曲げモーメントは、一度増した後低下し、運転開始時の値に近づいて安定するようで、これは試片内部のひずみ硬化ではないかと考えられる。また曲げモーメントが極大値を過ぎた後でも破壊の発生する例もあるが、一般に 10^7 回以下の繰返しによつて破壊の生ずる試片では、曲げモーメントは漸次増加し、最終的には5~10%程度まで増加して破壊に至る。このような経過は他の接着層に関する疲労試験²⁾³⁾⁴⁾の場合と著しく相違し、試験中に著しい曲げモーメントの低下が現われないことは、試験の結果が安全側にあることを意味するもので合理的と考えられる。

試験片の応力状態

試験片の応力状態の大体の様子が判れば、データの解釈に大きな助けとなるであろう。木材を近似的に直交異方弾性体と考えれば、かなり複雑な過程の後に試片の応力状態の理論解が導かれるかも知れないが、実際には接着操作中の水分変化、接着剤の収縮などにより、接着層には、かなりの残留応力が存在するので⁷⁾ その適用性はうたがわしい。

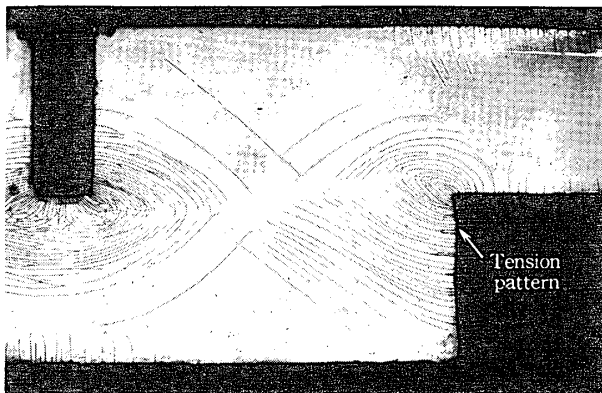


Fig. 5. Crack pattern of brittle lacquer coating in a crank type specimen of beech under uniform bending moment (by direct and relaxation technique).

実験的に試片の応力分布を求めるために3倍のディメンジョンを有するブナの相似試片を作り、市販の熱乾燥用応力塗料を用いて両端に曲げモーメントを与えた場合のひずみ分布を求めた。このテクニックは既報⁸⁾の通りで、得られた亀裂模様は Fig. 5 に示す如くである。

写真中の引張り亀裂は direct method によつて、圧縮亀裂は relaxation method によつて得たものである。この写真から、接着層はその両端部(A及びC)を除けばせん断ひずみ面に近いことがわかる。またこれより必要な2, 3の線上のひずみ分布を求めてみると Fig. 6 に

示すような結果が得られた。唯1本の試験片の結果から結論するのは危険であるが大体、次のようなことがいえる。

i) 試片の両腕の部分はクランク部分から十分に離れると大体、均一曲げ変形を生じており、その表層ひずみは切欠きかど(A)に向つて増大し、その最大値は、かどから十分離れた点の値 ϵ_0 の大体2.5倍ぐらいと考えられる。

ii) 接着層端のせん断ひずみ γ_{xy} は零で、内側に向つて急激に増加し、次で漸次低くなり、接着層中央で零となり、他端に向つて符号の異なるせん断ひずみが前者と同じ経過をたどる。またその最大値は ϵ_0 の4倍程度である。

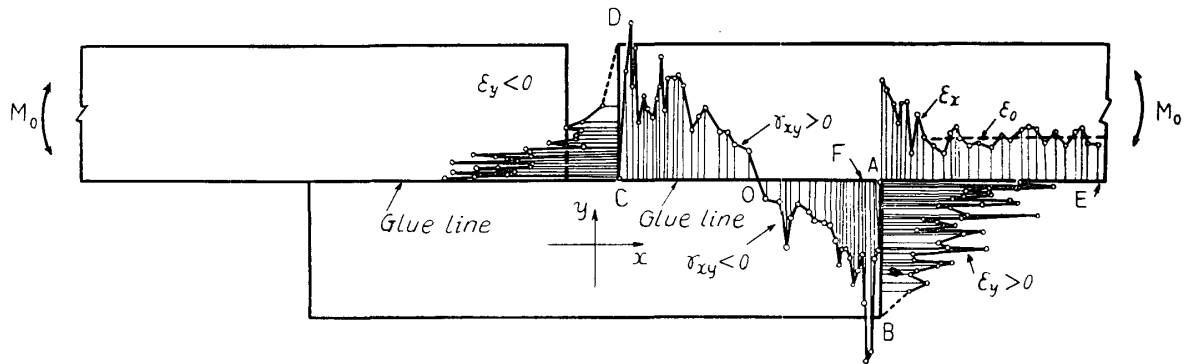


Fig. 6. Strain distribution in a crank type specimen of beech under uniform bending moment (by brittle lacquer technique).

iii) クランクのたもとの部分 $\overline{AB}$ 線上のひずみはB点で零でA点に向つて増大し、A点で最大となる。その大きさは ϵ_0 の大体4倍程度と考えられる。この傾向はクランクのふところの部分 $\overline{DC}$ 線上でも大体同じであると考えてよい。

さて、ブナ材の弾性常数は大ざつばにみて繊維方向のヤング率を1とすると切線方向のそれは1/12、繊維軸と切線軸に関する剛性率は六体1/13とみられるから⁹⁾、上の結果から接着端の割裂応力 σ_t はクランクから十分離れた部分の表層応力 σ_0 の約33%程度、また接着層の最大

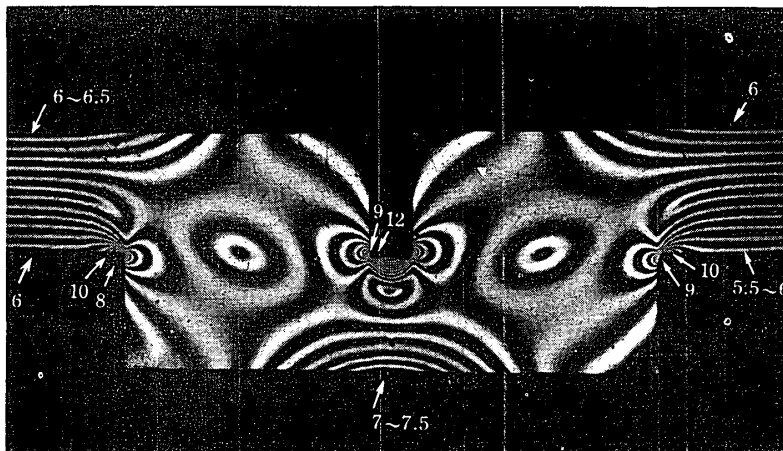


Fig. 7. Stress distribution in a crank type specimen of epoxy resin under uniform bending moment (by photoelastic technique).

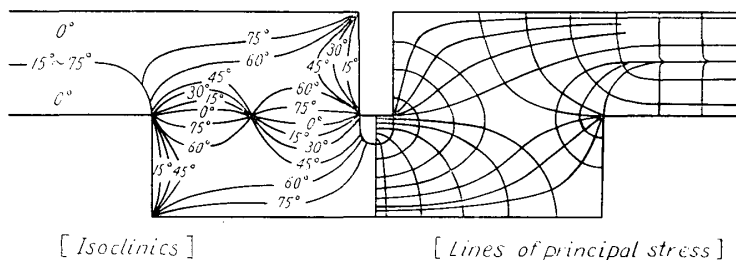


Fig. 8. Directions of principal stress in a crank type specimen of epoxy resin under uniform bending moment (by photoelastic technique).

せん断応力は31%程度と考えられる。接着層がこのいずれによつて破壊するかは接着剤及び木部の疲労特性によるが、木材に関して静的な強度で考えると、切線方向の引張強度と柁目面のせん断強度は、ブナでは前者90 kg/cm² に対し後者は80 kg/cm²¹⁰⁾ 程度であるから、どちらが支配的であるということは断言できない。尚、この試験法の応用として、金属、プラスチックなど種々の等方体に対する接着性能試験を行なう場合のために、等方体における試験片の応力分布を平面光弾性法によつて求めた。Fig. 7 はエポキシ樹脂のクランク型試片の両端に単純曲げモーメントを与

えた場合の等色線模様で、ひずみの集中率は繰回数からわかるように木材の場合より幾分低いが弾性係数が異方性をもたないため接着端の割裂応力は大きく、クランクから十分離れた腕の部分の表層応力の大体2倍程度である。また Fig. 8 は、この場合の等傾線図と、それより求めた主応力線図である。木材の場合、接着層は大体、主せん断ひずみ方向に一致していたが、等方体の場合は接着層に相当する線上の主応力の方向は大体 0° (又は 90°) に近く、この層にはせん断はあまりおこらないと考えてよい。したがって等方体の場合は近似的に接着層の繰返し割裂試験を行なっていると考えてよい。

試験結果および考察

一般に疲労試験の結果を表わすのに、繰返した応力と繰返し数の関係、即ち **WOHLER 曲線 (S-N 曲線)** を用いるが、この実験の場合のように接着層の受ける応力が割裂とせん断の組合わさった複雑な **type** のものであると、応力の表示が簡単でない。しかしながら、実験の目的が疲労強度の絶対値ではなくて、接着層の厚さ、或は接着剤の種類を変化させた場合の接着性能の比較だと考えるならば、両端に与える曲げモーメントの値をもつて比較すれば十分である。したがって本報告では、一般に用いられる **S-N 曲線** の代りに曲げモーメントと繰返し数の関係 (以下 **M-N 曲線** と書く) をもつて試験結果を表現した。

それぞれの接着剤について得られた **M-N 曲線** は Fig. 9~11 に示す如くである。図中の曲 (直) 線は推察される疲労曲線で、直線の部分は **data** のばらつき及び測定数の不足などの理由から不確実なことを意味している。

全般的にみて、これらの疲労曲線は繰返し数 5×10^6 あたりまでは直線的に低下するようで、その傾きは全ての場合に対してほぼ同一と考えてよさそうである。更に繰返し数が 10^7 に近づくとき、2~3 のものでは曲線の傾きが漸次 **N 軸** に対して平行に移行し、このあたりに疲労限度が存在するものようであるが、他のものでは明らかでない。

これらの材料に疲労限度が存在するかどうかは興味ある問題であるが、ここではさておいて、以下簡単のために **N=10⁷** における疲労強度をこの材料の疲労限度ということにする。それぞ

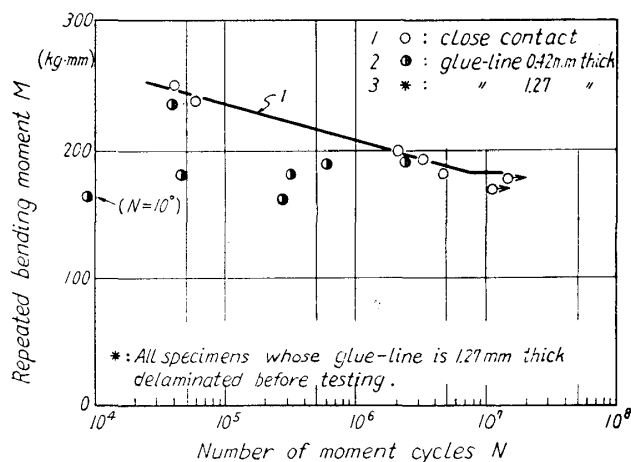


Fig. 9. M-N diagram for specimens bonded with urea resin adhesive.

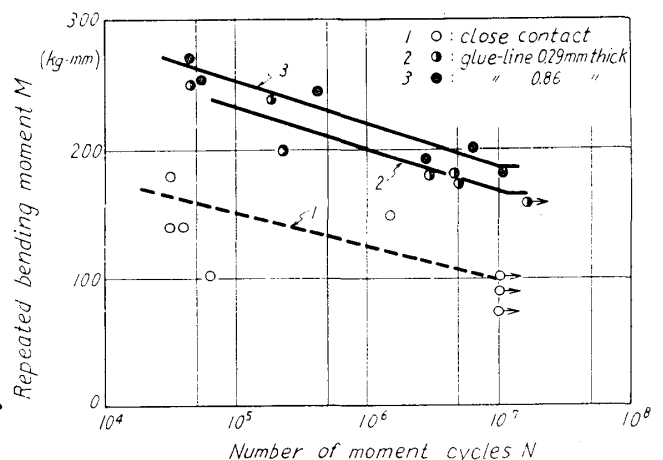


Fig. 10. M-N diagram for specimens bonded with modified urea resin adhesive.

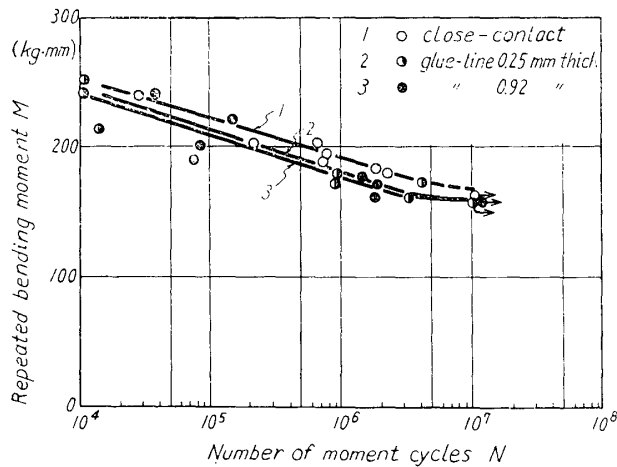


Fig. 11. M-N diagram for specimens bonded with phenol resin adhesive.

れの接着剤についての疲労限度を静的な強度及び、それらにおける木部破断率と共に、Table 2 にまとめて示した。更にこの疲労限度が接着層の厚さによつて、どのように変化するかを Fig. 12 に示した。

これらの結果から次のことがわかる。

先ず、尿素樹脂接着剤についてみると close-contact 接着の場合、疲労強度はかなり強く、その疲労限度は大体、静強度の29%である。しかも、木部破断率は静的な試験の場合と同様、100%を示し、接着層の耐久力は木部の耐久力より優れ

Table 2. Statical strength and fatigue limit of specimens.

Adhesives	Glue-line thickness (mm)	Statical strength		Fatigue limit ³⁾		M_f/M_0
		Moment ¹⁾ M_0 (kg·mm)	Wood failure (%)	Moment ¹⁾ M_f (kg·mm)	Wood failure ²⁾ (%)	
Urea resin	Close-contact	620	100	180	100	0.29
	0.42	245	0	— ⁵⁾	—	—
	1.27	— ⁴⁾	—	—	—	—
Modified urea resin	Close-contact	400	50	100	40	0.25
	0.29	595	95	170	87	0.29
	0.86	590	75	185	75	0.31
Phenol resin	Close-contact	555	100	165	98	0.30
	0.25	555	95	160	73	0.29
	0.92	570	100	160	78	0.28

1) Moment given at the edges of the specimen in figure 2.

2) Percentage of wood failure observed in specimens broken at $10^6 < N < 10^7$.

3) Fatigue strength at $N=10^7$. 4) Delaminated before testing.

5) Was not determined.

ている。この疲労限度は試片の腕の部分の表層応力 σ_0 に換算すると約 100 kg/cm^2 であり、前節の応力集中を考えると、破壊が割裂による場合は 33 kg/cm^2 、せん断による場合は 31 kg/cm^2 に相当し、これは夫々の静的な強度の 37及び39% 程度である。これに反して接着層の厚さが、平均 0.42 mm になると Fig. 9 にみる如く、疲労強度は非常に不安定となり、あるものでは close-contact の場合に近い強度をもっているが、他のものでは非常に弱く、著しい場合には自然剥離を起しそうなものがある（これらは Fig. 9 には表示していない）。そして、その木部破断率も 100% に近いものから全く接着層で剥離しているものまで種々のものがあり、この厚さにおける疲労限度は定め難く、実用的な意味からは 0 と考えるべきであろう。(Fig. 12) (この厚さの接着層には、かなり気泡が含まれており、亀裂もあらわれていてこれら

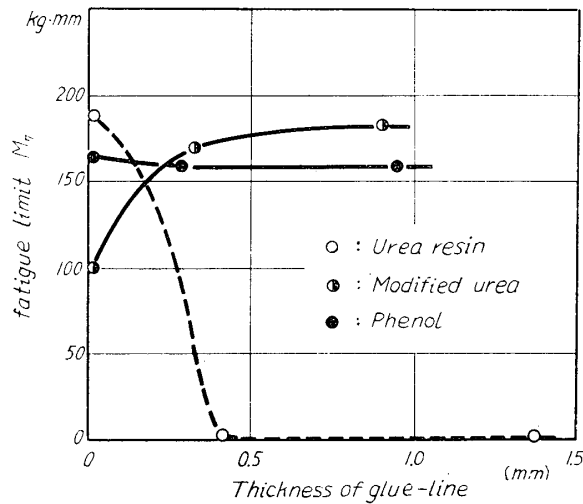


Fig. 12. Fatigue limit as functions of thickness of glue-line.

mm のものと 0.8 mm のものでは後者が幾分大きい。この疲労限度の値は試片の腕の部分の表層応力 σ_0 に換算すると close-contact のもの 55 kg/cm², 0.29 mm 厚さのもの 94 kg/cm², 0.86 mm 厚さのもの 103 kg/cm² で前節の応力集中を考えると割裂破壊をする場合は、それぞれ 18 kg/cm², 31 kg/cm², 及び 34 kg/cm² に相当し、せん断破壊の場合は、17 kg/cm², 29 kg/cm², 及び 32 kg/cm² に相当する。

木部破断率をみると、接着層が 0.29 mm 厚さのものと 0.86 mm 厚さのものは比較的高率で夫々 87% 及び 75% を示しているが、接着層厚さ 0.86 mm の疲労強度が 0.29 mm 厚のものより大きいのは接着層における残留応力によるものではないかと考えられる。また、close-contact の場合は前 2 者に比して著しく低い木部破断率 (40%) を示し、かつ疲労強度のばらつきも大きい。このことは接着層の疲労強度のばらつきが木部のそれよりも大きいことを示すものと考えられ、静的な試験の結果¹²⁾にもみられる傾向である。Fig. 12 のように疲労限度が close-contact の場合、著しく劣る原因については推論を出ないが、接着剤の流動性、硬化速度

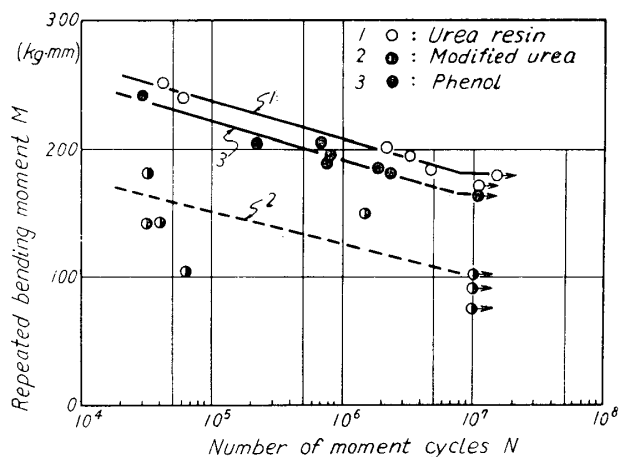


Fig. 13. M-N diagram for close-contact specimens.

も多少影響しているかも知れない)。また、更に接着層の厚さを厚くすると (1.0 mm shim を用いた場合)、もはや接着状態を保持できず自然剥離してしまう。

以上の傾向は、静的な常態せん断接着力試験の結果¹¹⁾で既にみられることで、構造用接着剤として、このような普通の尿素樹脂を用いることは非常に危険である。次に、変性尿素樹脂接着剤については Fig. 10 に示したように、すべての繰返し数において疲労強度は接着層の厚さの厚いものほど大きい。これらの疲労限度は Fig. 12 に示すように、close-contact の場合は著しく劣り、接着層の厚さ 0.29

mm のものと 0.86 mm 厚さのものは比較的高率で夫々 87% 及び 75% を示しているが、接着層厚さ 0.86 mm の疲労強度が 0.29 mm 厚のものより大きいのは接着層における残留応力によるものではないかと考えられる。また、close-contact の場合は前 2 者に比して著しく低い木部破断率 (40%) を示し、かつ疲労強度のばらつきも大きい。このことは接着層の疲労強度のばらつきが木部のそれよりも大きいことを示すものと考えられ、静的な試験の結果¹²⁾にもみられる傾向である。Fig. 12 のように疲労限度が close-contact の場合、著しく劣る原因については推論を出ないが、接着剤の流動性、硬化速度などに関連して、本実験に用いた圧縮力 (10 kg/cm²) が、この実験に対して適当でないからと考えられる。このような傾向は常態せん断接着力試験の結果¹¹⁾にも見られ構造用接着剤として良好な空隙充填性は示すが close-contact 接着に関する接着条件を更によく検討しなければならない問題である。

最後に、石炭酸樹脂接着剤については Fig. 11 に示したように前の 2 者と異なり、すべての繰返し数に対して

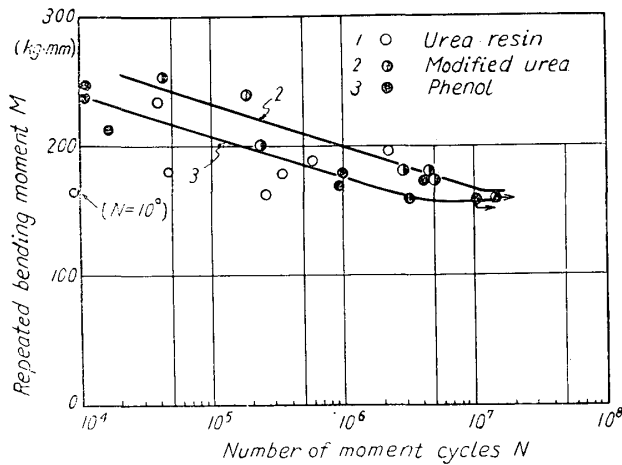


Fig. 14. M-N diagram for specimens. (Glue-lines are about 0.25~0.42 mm thick)

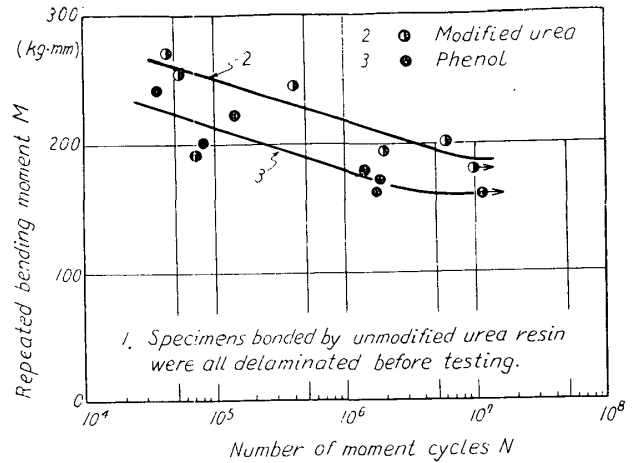


Fig. 15. M-N diagram for specimens. (Glue-lines are about 0.86~1.27 mm thick)

疲労強度は、接着層の厚さにあまり影響されず、それらの疲労限度は、ほとんど等しく、試片腕の表層応力 σ_0 に換算すると大体 90 kg/cm^2 であり、前と同様、応力集中を考えると、割裂破壊をした場合は約 30 kg/cm^2 、せん断破壊をした場合は約 28 kg/cm^2 である。

木部破断率を調べてみると、close-contact 接着をしたものでは、ほとんど100%に近い率を示すが、接着層が厚くなると幾分低くなっている (Table 2)。また疲労限度のばらつきをみると close-contact 接着に較べて接着層の厚いものでは幾分大きい。これらを併せ考えると石炭酸樹脂の場合でも接着層の疲労限度のばらつきの方が、木部のそれよりも大きいといえる。

Fig. 12 に示すように、この実験範囲では、すべての接着層厚さに対して常に安定した疲労限度をもっているということは、構造用接着剤として優れた空隙充填性をもち、しかも、その信頼性が非常に大きいことを示すものである。このことは、やはり、常態せん断接着力試験の結果¹¹⁾とよく一致している。

以上、接着層の厚さの影響を、各接着剤別に調べたが、同じような接着層厚さにおいて、これら3種類の接着剤間にどのような相違があるかを調べるために、接着層の厚さによつて 1) close-contact 接着を行つたもの、2) 中間的な厚さのもの (0.25~0.42 mm)、および3) 厚い接着層を有するもの (0.86~1.27 mm) の3つのグループに分けて図示してみると Fig. 13~15 の如くなる。

先ず、close-contact 接着の場合では Fig. 13 に示すように、すべての繰返し数において疲労強度は、尿素樹脂接着剤>石炭酸樹脂接着剤>変性尿素樹脂接着剤の順で、その疲労限度は、石炭酸を100とすれば、尿素は109、変性尿素は61の割合である。この中、前2者の木部破断率が、ほとんど100%であるのに、その疲労限度が常に僅か、尿素>石炭酸となつている。尿素樹脂の硬化過程における収縮を考えると石炭酸樹脂の接着層よりも大きな残留応力が存在するであろうし、その方向は、この場合、疲労強度に対し有利に働くとは考えられないから、そこには何らかの因子、例えば尿素樹脂に含まれる水分による残留応力の低下、尿素樹脂接着層の見かけの剛性が石炭酸樹脂のそれよりも大きいこと、木材中への樹脂の浸透ならびに両接着剤における濡れの差異などを考えねばならない。

また、変性尿素樹脂の場合に著しく低い疲労強度を示すことについては既に述べたので略す。次に、中間厚さの場合は Fig. 14 に示すような結果となり、前述の如く尿素樹脂は、ばらつきが大きいので除外すると、すべての繰返し数において変性尿素樹脂接着剤の方が石炭酸樹脂接着剤より疲労強度が僅かに大きく、後者の疲労限度を100とすると、前者のそれは大体106となる。またこれらの木部破断率は、いくらか前者の方が大きい、共にかなり高い率を示している (Table 2)。したがって、変性尿素樹脂の接着層近辺の木部は、尿素樹脂の close-contact の場合と同様、何らかの原因で石炭酸のそれよりも好い状態に思われる。

最後に、最も厚い層のグループでは前述の如く、尿素樹脂は自然剝離しているが他の2者を比較すると Fig. 15 に示すように、すべての繰返し数に対して変性尿素樹脂接着剤の方が石炭酸樹脂接着剤より疲労強度が大であり、後者の疲労限度を100とすると前者のそれは大体116となる。

また、これら両者の木部破断率は大体等しく、かつ、かなり高い (Table 2)。

以上、夫々の接着層の厚さについて、これら3種の接着剤の間の差異を調べたが、最後に、これらの疲労試験による疲労限度は、夫々の静的な強さとどのような関係があるかを調べておこう。このことは実際の設計に際して迅速にその接着層の疲労限度を必要とするときに役立つであろう。

静的試験における試験片の箇数が少ないので Table 2 の値は、多少、不正確であるが疲労限度 M_f と静強度 M_0 の比 M_f/M_0 は、表に示したように 0.25~0.31 となつた。即ち、この場合の疲労限度は、すべての接着層について大体、静強度の 1/4~1/3 と考えてよさそうである。

これらの値は、カゼインについての、せん断繰返し疲労の $N=10^7$ の疲労強度の比 0.25⁴⁾ より幾分高い。

また、静的な試験における木部破断率と疲労試験における木部破断率が、かなりよく合っているのは興味ある事実である。

摘 要

ポリエチレンの shim を用いて、中央に種々の厚さの接着層を有するブナの貼り合せ材 (Fig. 1) から Fig. 2 に示すようなクランク型試験片を切り出し、西原式板曲げ疲れ試験機で曲げ疲労試験を行なつた。

この試験片に生ずる繰返し応力の分布を応力塗料を用いて測定した結果は、Fig. 5 および Fig. 6 の如くである。また、光弾性法により等方体試片の場合の応力分布を参考に示すと Fig. 7 および Fig. 8 の如くである。

この結果、ブナ試片では接着端に生ずる割裂応力 σ_0 は、試片の腕の部分の表層応力の約33%で接着端から少し内側に生ずる接着層の最大せん断応力 σ_0 はの31%である。等方体では、接着層のせん断応力は、ほとんど無視できる程度であるが、接着層端に σ_0 の2倍近い割裂応力が生ずる。これ等を参考にして尿素樹脂接着剤、変性尿素樹脂接着剤および石炭酸樹脂接着剤の接着層の疲労試験を行なつた結果を要約すると以下の如くである (Fig. 9~15 および Table 2)。

与えた曲げモーメントと繰返し数の関係 (M-N 曲線) は、いずれも大体、平行で、 $5 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7$ あたりで疲労限度のあらわれるものもある。 1×10^7 の疲労強度を疲労限度と称すると、Fig. 12 に示すように尿素樹脂では接着層厚さが 0.4 mm となると、疲労限度は 0 となるのに比し、この実験範囲では、変性尿素は接着層が厚くなるほど大きな疲労限度を示し、空隙充填性がよい。一方、石炭酸樹脂では、疲労限度と接着層厚さの関係はほとんど変化せず、常に空隙充填性を示した。

これらの疲労限度は静的強度の大体 $1/3 \sim 1/4$ 程度である。

最後にこれら一連の研究の試験片の作製、データの整理その他に力になつて頂いた吉田技官、勝山夫人、木本研究员、南君、小川君、三野君たちに感謝の意を表する。

Summary

A new fatigue testing method for glue line of bonded wood was presented, in which urea resin, modified urea resin and phenol resin adhesives were tested.

Two-ply BUNA (*Fagus crenata* BLUME) plates which had three steps of thickness of glue line (close contact, 0.25~0.42 mm, 0.86~1.27 mm) were prepared by using shims of polyethylene (Fig. 1) and shaped into the crank type specimens shown in Fig. 2.

Bending moments were given to the specimens repeatedly by NISHIHARA's Plate Bending Fatigue Testing Machine (Fig. 3).

Strain distribution in the specimen obtained by strain sensitive lacquer coating technique is shown in Figs. 5 and 6. The concentrated strain of cleavage $m\varepsilon_y$ at the edge of the glue line (*A* in Fig. 6) reaches about four times as great as the normal strain ε_0 on the skin of an arm of the specimen far enough from the crank part (*E* in Fig. 6), namely, the cleavage stress $m\sigma_y$ in the former will be about 33 per cent of the normal stress σ_0 in the latter. The maximum shear strain $m\gamma_{xy}$ along the glue line takes place at a point a little inner from the edge (*F* in Fig. 6) and reaches also about four times as great as ε_0 , namely, the maximum shear stress $m\tau_{xy}$ along the glue line will be about 31 per cent of σ_0 .

By the way, stress distribution in an isotropic specimen was obtained by photoelastic technique, and is shown in Figs. 7 and 8. In the figures cleavage stress $m\sigma_y$ at the edge of the glue line will be about twice as great as that of σ_0 and the shear stress along the glue line will not be worth mentioning

The results of the fatigue tests are shown in Figs. 9~15 and Table 2. Bending moment as a function of number of moment cycles (M-N curve) seems to have a nearly same slope in these three types of adhesives or in these three steps of glue thickness, and some of them seem to have the endurance limit at moment cycles of $5 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7$.

If the fatigue strength at 10^7 cycles is taken for the endurance limit, that of

modified urea resin bonded specimen increases with the glue line thickness and that of phenol resin bonded specimen is invariable with it, but that of urea resin bonded specimen is almost equal to zero in the range thicker than 0.42 mm (Fig. 12).

It can be said that phenol and modified urea resin has an excellent gap filling effect for fatigue stressing, and their endurance limit is about $1/4 \sim 1/3$ of the statical strength (Tab. 2).

文 献

1) 例えば

- WANGAARD, F. F. : For. Prod. Rept. No. 1530 (1946),
OLSON, W. Z and R. F. BLOMQUIST : For. Prod. J. 5 : 50,219, (1955),
BLOMQUIST, R. F and W. Z. OLSON : For. Prod. J. 7 : 266(1957) など数多くの報告がある.
- 2) OLSON, W., D. W. BENSEND and H. D. BRUCE : U. S. For. Prod. Lab. Rept. No. 1539 (1946)
3) DIETZ, A. G. H and H. GRINSFELDER : Trans. ASME 65 : 187 (1943)
4) MOSLEMI, A. A : For. Prod. J. 11 : 115 (1961)
5) FALK, A. H. : ASTM Bull. 42 (1946)
6) E. M. P. A. Bericht 152 : 98 (1945)
7) 浅野, 都築, 鷺見 : 木材研究 No.31 : 50 (1963)
8) MAKU, T. and H. SASAKI : Holz als Roh- u.W. 20 : 303 (1962)
9) HEARMON, R. F. S. : (Brit.) For. Prod. Res. Special Rept. No. 7 : 7 (1948), No. 31 : 7 (1963)
10) 林業試験場 : 木材工業ハンドブック, 丸善 : 134 (1958)
11) 後藤, 川村, 作野 : 木材研究 No. 31 : 59 (1963)
12) YAVORSKY, J. M. and J. M. BROWN : For. Prod. J. 9 : 135 (1959)