

# 木材接着層の剛性に及ぼす温度の影響

佐 道 健・小 嶋 隆 一

Effect of temperature on the rigidity of lap-jointed glue-layer.

Takeshi SADOH and Ryuichi KOJIMA

## 要 旨

熱硬化性 (MF), 熱可塑性 (PVAc), およびゴム系 (NBR) の3種の接着剤を用いてラップジョイントした木材に外力が加わったときの接着層のずれが, ラップ長さおよび温度 (0, 30, 60 °C) によってどのように変化するかを引張りせん断振動を用いて検討した。MF では 0, 30, 60 °C で, PVAc では 0, 30°C, NBR では 0°C において, 接着層における被着材間のずれは, 接着端における応力集中によって, 被着面の平均せん断応力ではなく単位幅当りの外力に比例する。しかし, 温度の上昇とともに, 接着層におけるせん断応力の分布が均一化する方向に変化する。

## 1. 緒 言

接着層をもつ木質複合体に外力が加わるとき, 木材と接着層の剛性が等しい場合はこれを連続体とみなすことができるが, 木材と接着層の剛性が異なる場合は複体内での応力の分布が接着層で不連続になり, 複合体の変形に及ぼす接着層の影響は無視できなくなる。また接着層の剛性は接着層における応力集中に関して重要な因子であり, したがってこの応力集中の破壊強度に及ぼす影響はもとより, 変形に及ぼす影響も少くない。

木材接着層の剛性の測定は, Keylwerth<sup>3)</sup> による接着層に垂直方向の伸びの測定<sup>3)</sup>, Clad<sup>4)</sup> による接着層のせん断変形の測定があり, いずれも常温でポリ酢酸ビニル樹脂接着剤が熱硬化性樹脂接着剤に比較して弾性率の低いことを報告している。接着層の変形には, このように伸縮変形とせん断変形とが考えられるが, とくに接着層の厚さが被着材のそれと比較して極めて小さいことを考えると, 複合体の外力による変形についてみれば, せん断変形すなわち被着材間のずれの寄与が最も大きいと推定される。

本研究は木質複合体の変形に及ぼす接着層の影響をみるため, 温度特性の明らかに異なる熱硬化性, 熱可塑性, およびゴム系接着剤を用いてラップジョイントした木材に外力が加わったときの接着層のずれが, ラップ長さおよび温度によってどのように変化するかを検討したものである。本研究を行なうにあたって多くの助言を賜った中戸莞二教授に感謝の意を表します。

## 2. 実 験

### 2.1 材料

被着材として 1 mm 厚さのブナ・ロータリ単板を用いた。その気乾比重は 0.57~0.63, 平均

0.60 であった。

接着剤としては、温度特性の明らかに異なる3種類の接着剤、すなわち熱硬化性、熱可塑性、およびゴム系接着剤からそれぞれメラミン樹脂接着剤 (MF: キゲタライム MA-204)、ポリ酢酸ビニル樹脂接着剤 (PVAc: エマルジョン型 ボンド CH-18)、およびニトリルゴム接着剤 (NBR: ハイカーラテックス Hycar 1571) を選び、使用した。MF には MA-204 の100部に対して4部の20%塩化アンモニア水溶液を硬化剤として、NBR には Hycar 1571の10部に対して4部の2% CMC 水溶液を増粘剤として添加した。

## 2.2 試験体

ブナ単板から幅4mmの繊維方向に長い小片を裁断し、上記接着剤を用いて Fig.1 に示すようなラップジョイント試験体を作製した。ここでラップ長さを20, 10, 5, および3mmの4段階とした。接着条件は Table 1 に示す通りである。

接着終了後、試験体は塩化カルシウムの入ったデシケータ中に保存し、2日間以上経過したものを測定に

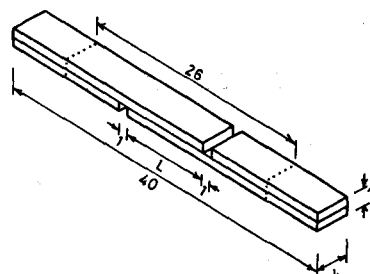


Fig. 1. Specimen. (Unit: mm)

Table 1 Gluing condition of specimens

Glue	Glue spread* (g/m <sup>2</sup> )	Pressure (kg/cm <sup>2</sup> )	Temperature	Pressing time
MF	50	5	120°C	2 min.
PVAc	22	5	room temp.	2.5hr.
NBR	47	5	room temp.	2.5hr.

\* Dry material weight

供した。剛性測定に先立ち、寸法を1/100mmまで正確に測定した。試験体のラップ長さは所定の長さ $\pm 0.3$ mmであった。

## 2.3 実験方法および測定条件

接着層の剛性測定には岩本製作所製ジュニアタイプ粘弾性スペクトロメータを使用した。本装置のブロックダイアグラムは Fig.2 に示す通りである。

励振器(2)によって試験体(3)に正弦波縦振動が加えられる。このとき試験体の一端の変位 $\Delta L_0$ は差動トランス(4)によって検出され、一方、試験体に加わる力 $F$ はロードセル(5)によって検出される。いずれも正弦波の振幅が指示計(6, 7)によって指示される。測定周波数は10および100Hz、測定温度は0, 30, 60°Cの3段階で、測定にあたっては試料室(8)内につねに乾燥空気を送り、試験体を乾燥状態に保った。試験体に

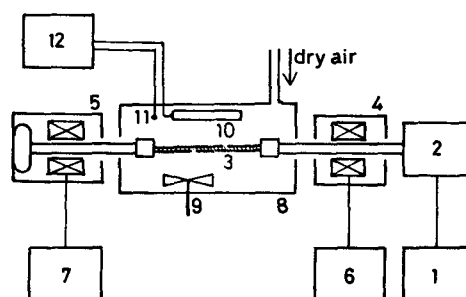


Fig. 2. Schematic diagram of apparatus.

1. generator, 2. driver, 3. specimen,
4. differential transformer, 5. load cell,
6. displacement meter, 7. force meter,
8. container, 9. fan, 10. heater,
11. thermistor, 12. thermostat

加えられた振動力  $F$  は接着剤とラップ長さによって 0.5~2.2 kg の範囲に定めた。

測定は各条件あたり 6 個の試験体について行なった。

#### 2.4 測定値の評価

本装置では試験体に振幅  $F$  の正弦的な力が加わると、振幅  $\Delta L_0$  のみかけの変位が指示される。この場合、変位  $\Delta L_0$  には接着層における被着材のずれの他につかみ部分における試験体とつかみ具間のすべり  $\Delta L_1$  および試験体の伸縮  $\Delta L_2$  が含まれる。したがって接着層におけるずれ  $\Delta L$  は指示計の読取り値を  $\Delta L_0$  としたとき

$$\Delta L = \Delta L_0 - (\Delta L_1 + \Delta L_2) \quad (1)$$

となる。

ここで、つかみ部におけるすべり  $\Delta L_1$  は予備実験の結果、測定温度および周波数が一定のとき駆動力  $F$  に比例する値であることがわかったので、各温度、周波数について比例定数を求め、 $\Delta L_1$  の算出に用いた。また  $\Delta L_2$  は木材部分が均一に伸縮すれば、木材の縦ヤング係数を  $E$  としたとき

$$\Delta L_2 = \left( \frac{L_0 - L_s}{2sb} + \frac{L_s}{sb} \right) \frac{F}{E} = \frac{L_0 + L_s}{2sb} \cdot \frac{F}{E} \quad (2)$$

で示される。ここで  $L_0$  は試験体の有効長 (26mm)、 $L_s$  はラップ端の切り込み部の幅 (1mm)、 $s$  は被着材 1 枚の厚さ (1mm)、 $b$  は試験体の幅 (4mm) である。 $E$  の値は未接着の木材片について各温度および両周波数で測定したが、10Hz と 100Hz の間に有意差が認められなかったので各温度について平均値を求め、 $\Delta L_2$  の算出に用いた。この  $E$  の値は 0°C:  $11.5 \times 10^4$  kg/cm<sup>2</sup>, 30°C:  $10.4 \times 10^4$  kg/cm<sup>2</sup>, 60°C:  $10.1 \times 10^4$  kg/cm<sup>2</sup> であった。

本実験で用いた試験体の場合、接着層の厚さが  $d$  で、接着層が均一にせん断変形しているとするれば、接着面積が  $A$  のとき接着層のせん断弾性率  $G$  は

$$G = \frac{F}{A} \cdot \frac{d}{\Delta L} \quad (3)$$

である。しかし木材接着層は被着材 (木材) 表面の凹凸によって一定の厚さを示すものではなく、実際上厚さ  $d$  を測定することは不可能である。そこで本報告中では、接着層における被着材間のずれ易さを示す指標として、次式で定義されるコンプライアンス  $J$

$$J = \frac{A \Delta L}{F} \quad (4)$$

を求め、この値で接着層の剛性を評価した。なお本実験に用いた測定器では、荷重-変形の位相差から力学的損失が指示されるが、つかみ部分のすべりに基づく補正ができないので、測定していない。

### 3. 結 果

測定結果をラップ長さとコンプライアンス  $J$  の関係で、両対数グラフ上に示したのが Fig. 3 である。この図には  $J$  の平均値と、その 95% 水準での信頼限界 (全条件についての平均値) を示

してある。この結果は、 $J$  が接着剤の種類や温度によって異なるのはもちろんであるが、ラップ長さ  $L$  によっても著しく異なることを示している。また、この図は、両者の関係が周波数 10Hz と 100Hz の間で大きい差のないことを示しているが、この図に示された結果で興味あることは、MF の場合に 0, 30, 60°C で、PVAc の場合に 0, 30°C また NBR では 0°C で測定値がほぼ勾配 1 の直線上にのり、その他の場合にはラップ長さの変化によるコンプライアンスの変化がやや少いことである。

平均値の 95%信頼限界を考慮すれば、Fig. 3 に示した結果から、本実験の範囲内で  $\log L$  と  $\log J$  の間に直線関係が認められる。すなわち

$$\log J = \log a + n \log L \tag{5}$$

または

$$J = aL^n \tag{6}$$

の式で表わすことができるので、測定結果から  $a$  および  $n$  を求めた (Table 2)。実験結果の考察はこれらの値を用いて行なう。

Table 2 Parameters of Eq. 6 ( $a$  and  $n$ )

Glue		10 Hz			100 Hz		
		0°C	30°C	60°C	0°C	30°C	60°C
MF	$a$	0.128	0.141	0.166	0.140	0.231	0.267
	$n$	0.97	0.97	0.91	1.03	0.97	0.94
PVAc	$a$	0.172	0.256	0.965	0.200	0.306	0.789
	$n$	0.98	0.87	0.61	1.06	0.96	0.78
NBR	$a$	0.153	3.28	5.25	0.151	2.20	3.03
	$n$	1.10	0.21	0.11	1.13	0.39	0.35

#### 4. 考 察

さきに述べたように、接着層が均一にせん断変形するならば、接着層の厚さが一定のとき同一接着剤では  $J$  はラップ長さにかかわらず一定で、式(5)で  $n=0$  となるはずである。しかし実験値から得られた  $n$  の値は MF の場合に 0, 30, 60°C で、PVAc の場合に 0, 30°C で、NBR の場合に 0°C で  $n$  はほぼ 1 になり

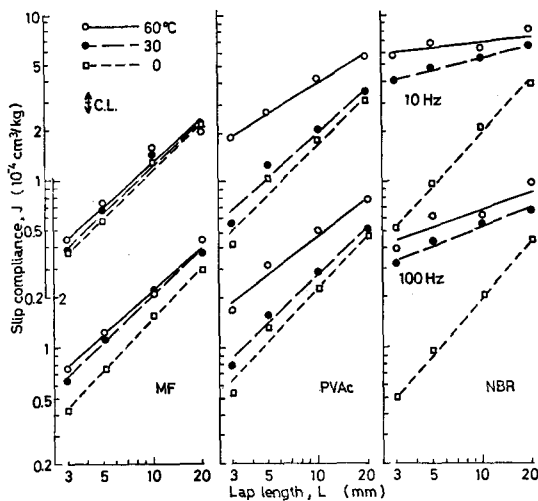


Fig. 3. Changes in slip compliance with changing glue, length of overlap, temperature, and frequency. (C.L.: average 95% confidence limit)

$$J \neq aL \quad (7)$$

で表わされる。このことは  $A=bL$  と式(4)とから

$$\Delta L = aF/b$$

の関係が成立することを意味する。すなわち、接着層における被着材間のずれは接着層の平均せん断応力ではなく、単位幅当りの外力に比例する。

これらの温度よりも高い温度域、PVAc では  $60^\circ\text{C}$ 、NBR では  $30$  および  $60^\circ\text{C}$  で Fig. 3 の直線の勾配  $n$  の値は PVAc について  $0.6\sim 0.8$ 、NBR について  $0.1\sim 0.4$  であり、温度が高い程、また周波数が低い程  $n$  の値は小さくなる。

いま、せん断力を受ける厚さの等しい平板の単純重ね接着について接着層付近の応力分布を考えてみる。

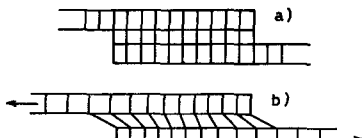


Fig. 4. Schematic show of deformation of glue layer under shear tensile force.

多くの研究者によって報告されているように、ラップジョイントでは両接着端において著しい応力集中が生ずる。この原因として、被着体が重ね合わせ部分で Fig. 4 に示すような不均一な伸び（偏差ひずみ）を生ずること、荷重の作用線の位置が板の厚さの  $1/2$  だけずれること<sup>5)</sup>によって生ずる曲げモーメントが考えられている。

荷重の作用線を板の軸線と一致させ、曲げモーメントの発生を防いだときの応力集中について Volkersen は、<sup>6)</sup>接着層の応力集中係数 ( $\tau_{max}/\tau_{av}$ ) が  $GL^2/Es d$  の増大とともに増大するとしている。ここで  $\tau_{max}$ 、 $\tau_{av}$  はそれぞれ接着層における最大および平均せん断応力、 $G$  は接着剤のせん断弾性率、 $L$  はラップ長さ、 $E$  は被着材のヤング係数、 $s$  は板厚さ、 $d$  は接着層厚さである。また堀場は引張力を受けるラップジョイントの接着層の応力分布を応力解析法に基づいて計算している。これによると、接着層のせん断弾性率  $G$  と被着材のヤング係数  $E$  の比 ( $G/E$ ) によって接着層両端に生ずるせん断力荷重負担が変化し、 $G/E$  が  $0$  のときせん断力は接着層全体にわたって等分布するのに対して、 $G/E$  が  $1.0$  を越えると接着層端部で外力の約  $38\%$ （両端で約  $75\%$ ）以上を負担する。

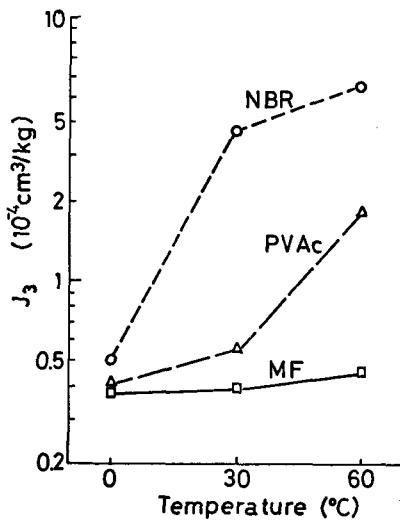


Fig. 5. Changes in slip compliance for 3mm overlap length specimen ( $J_3$ ) with changing glue and temperature.

われわれの行なった実験の結果は、接着層の剛性が使用した接着剤の温度特性に依存することを明らかに示している。

上に述べたように接着層の応力集中係数が  $GL^2/Es d$  の増大とともに増大するならば、他の条件が等しいときはラップ長さの減少とともに応力集中度が減少する。そこで、接着層のせん断弾性率  $G$  の温度依存性を知るために、本実験の範囲内で応力集中の最も少ないと考えられるラップ長さ  $3 \text{ mm}$  の試験体のコンプライアンス  $J_3$  の温度による変化をみた。この値は Fig. 5 に示されるように、 $0^\circ\text{C}$  では3種の接着剤とも  $J_3$  が  $0.4\sim 0.5 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{kg}$  であり、 $30^\circ\text{C}$  では MF, PVAc

が  $0^{\circ}\text{C}$  の場合とほとんど変化なく、NBR だけが  $4.0 \times 10^{-4} \text{cm}^3/\text{kg}$  と大きい。 $60^{\circ}\text{C}$  ではさらに PVAc についての  $J_3$  が大きくなる。

この図に示されている接着剤の特性から、Fig. 3 および 5 に示された接着層のコンプライアンスの温度による変化が説明できる。木材の縦ヤング係数が本実験の温度範囲で大きく変化しないことから、 $J_3$  の小さい接着層では、 $J_3$  の大きい接着層に比較して接着端部における応力集中が著しくなる。したがって  $J_3$  の小さい接着層では偏差ひずみが大きく、実際に測定される被着材間のずれ  $\Delta L$  のほとんどが両接着端に生ずる変形に基づくものと考えられ、重ね合わせ部分の変形は被着材の伸縮変形が大部分を占め、 $\Delta L$  は接着層における平均応力に依存せず、外力の大きさだけに支配される。すなわち式(6)の定数  $n$  がほぼ 1.0 の値となる。

一方  $J_3$  が大きい温度では、 $G$  の低下によって接着層におけるせん断応力の分布が均一化するから、コンプライアンス  $J$  におよぼすラップ長さの影響が小さくなるものと考えられる。

周波数の影響についてみれば、Table 2 に示したように  $100\text{Hz}$  での測定に比較して  $10\text{Hz}$  での  $n$  の値が小さく、しかも PVAc と NBR の  $30$  および  $60^{\circ}\text{C}$  でその差が大きい。これは接着層の軟化により応力緩和現象が著るしくなり、集中応力が周波数の低下にともなって緩和することを示している。

## 文 献

- 1) 佐々木光：接着力に關与する力学的因子，接着，**13**，699 (1969)
- 2) 佐々木光：エポキシ樹脂による木材接着と破壊力学，接着，**18**，172 (1974)
- 3) Keylwerth, R. u. W. Höfer: Rheologische Untersuchungen an Leimfugen bei Quersugbelastung, Holz Roh-Werkst., **20**, 91 (1962)
- 4) Clad, W.: Über die Fugenelastizität ausgehärteter Leimfugen bei Holzverleimungen, Holz Roh-Werkst., **23**, 58 (1965)
- 5) 井上幸彦：接着技術便覧編集委員会編「接着技術便覧」37~56 (1962)
- 6) 小島陽之助：高分子学会接着科学委員会編「接着 理論と応用」, 254~268 (1965)
- 7) 堀場義平：木材接着層の応力解析 (第1報) 部分接着の重ね継ぎ接合について，木材学会誌，**18**，115 (1972)

## Résumé

Interlayer slip of lap-jointed wood specimens glued with melamine formaldehyde (MF), polyvinyl acetate (PVAc) and nitril butadien rubber (NBR) was measured at  $0$ ,  $30$  and  $60^{\circ}\text{C}$  under vibrational shear tensile forces. In order to evaluate the interlayer slip under shearing forces the slip compliance  $J$  was defined by Eq. 4 in the text, where  $\Delta L$  is the interlayer slip,  $A$  the area of overlap, and  $F$  the force applied.

Results shown in Fig. 3 indicate that the interlayer slip increases in proportion to the force per unit width of glue-layer at the temperatures of  $0$ ,  $30$  and  $60^{\circ}\text{C}$  for MF,  $0$  and  $30^{\circ}\text{C}$  for PVAc, and  $0^{\circ}\text{C}$  for NBR. The relation is supposed to be caused by the stress concentration at the ends of overlap. Distribution of the shearing stress within the glue-layer tends to be uniform with the increase in temperature.