

引裂きによる接着力の評価*

李 栄富**・佐々木 光***・満久 崇磨***

Zong-Fu LEE, Hikaru SASAKI and Takamaro MAKU: Effects of Geometry on the Glue Joint Strength of Cleavage Type Specimen

はじめに

集成材、木質パネルなどにおいて、被着木材の内部に水分応力が生じた場合、被着木材の変形により接着層に引裂き応力が発生する。引裂きによる接着試験は、このような状態での接着力を評価するのに、最も合理的なものと考えられる。従来引裂きによる接着力の評価は、cross-lap tension test^{1~4)}、notched cleavage test^{5,6)} などによつて行なわれてきたが、試験片の形状や寸法をかえることによつて得られる値が相違している。これは、試験片内の応力の分布状態が不均一で、かつ、応力の集中率が試験片の形状や寸法によつて異なるのに、得られた破壊荷重を単に接着面積や接着層の幅で割つて表現しているからである。接着層に切込みを入れて引裂く notched cleavage test の代りに、切込み部分を予め接着しないでおくことが考えられる。この場合、接着層に生ずる引裂き応力は他の方法に比べて、比較的単純で、解析の困難さが軽減される。大河平⁷⁾ は単純な境界条件の下でこのような応力分布を解いている。

この研究は上述の最も単純な引裂き接着試験について、試験片の形状・寸法の影響を調べ検討したものである。なお、実際の考慮から、流動性をもつ接着剤を試験する場合の問題点の一端を実験で示した。最後に実験に協力された研究室の諸氏に謝意を表する。

1 試験片の厚さの影響

1.1, 材料と試験方法

1.1.1, 材料

供試材は、ブナ (*Fagus crenata* Blume) 気乾材、平均含水率 10.6%, 平均気乾比重 0.57, 平均年輪幅 2.8 mm のものである。また、用いた接着剤は、市販の酢酸ビニルエマルジョン接着剤で固形分 56.7% のものである。

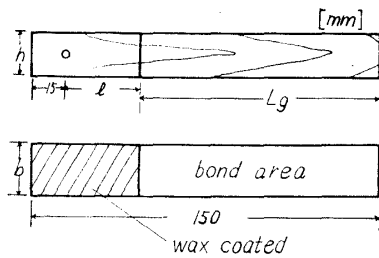
1.1.2, 試験片と試験方法

試験片は Fig. 1 に示す strips の同厚のもの 2 枚をペアにして接着作製する。この際、ペア

* 第18回日本木材学会大会 (1968) にて発表, Presented at the 18th Annual Meeting of the Japan Wood Research Society, Kyoto, April, 1968.

** 京都大学大学院農学研究科博士課程, Research Division of Agriculture, Postgraduate School of Kyoto University (Doctor's Course).

*** 木質材料研究部門, Division of Composite Wood.



standard specimen
 $\theta = 75^\circ$
 $b = 25 \text{ mm}$
 $l = 35 \text{ mm}$
 $Lg = 100 \text{ mm}$
 $h = 10, 13, 16$
 and 19 mm

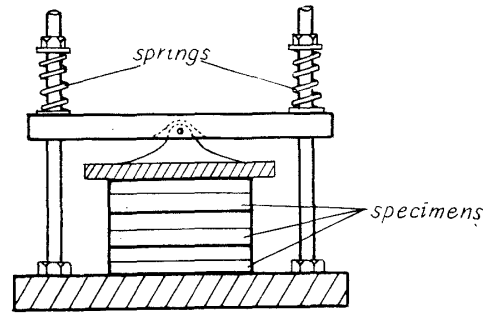


Fig. 2. Press apparatus.

の strips 中の 1 枚について、接着しない部分にワックスを塗っておく。接着剤の塗布量は 20 g/ft^2 で、圧縮は室温の下で、Fig. 2 に示すような装置を用いて行ない、圧縮力はトルクレンチによつて測定し、時々調整して 10 kg/cm^2 に保った。圧縮時間は24時間、除圧後6昼夜室温下で静置した後、試験に供した。試験機はレバータイプの 2 ton 万能材料試験機で、ヘッドスピード約 30 mm/min で試験した。負荷アタッチメントの概略は Fig. 3 に示す。

1.1.3. 実験結果と考察

厚さを変えて引裂き破壊荷重を測定した結果は、Supplemental table 1 にまとめて示した。厚さを横軸に、破壊荷重、単位幅当りの接着力、および単位面積当りの接着力を縦軸にとつて図示すると Fig. 4 の(○)点で示すようになる。すなわち、破壊荷重は試験片の厚さの増加にともない増加する傾向を示し、その傾向は exponential である。また、Supplemental table 1 にみるように、接着面全面における木破率は70~90%の高率を示しているが、破壊が出発する接着端（切込み底）の線上における木破率はきわめて低く、多くは0である。このことから、破壊の出発が、まず、接着層に生ずるのが一般的で、破壊の

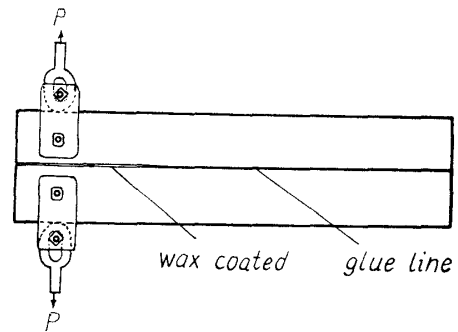


Fig. 3. Specimen under test.

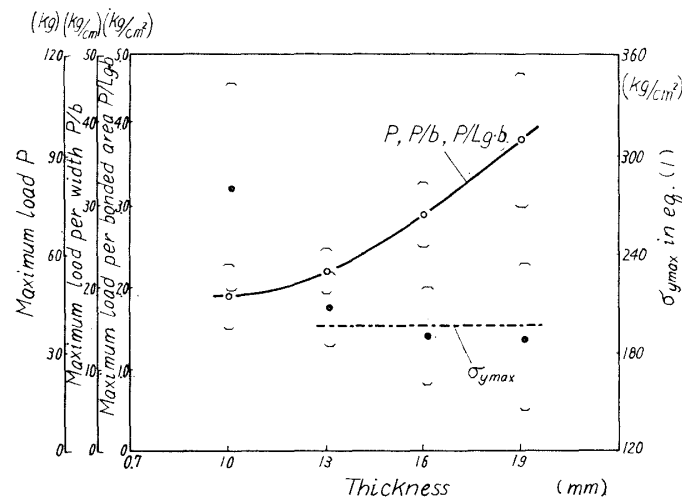


Fig. 4. The effects of thickness on glue joint strength.

進行面上で木材に小さな欠点があると、それが木破の発生の原因になるのではないかと考えられる。また、Fig. 4 の結果と MARRA¹⁾ が cross-lap 試験片について行なつた試験結果は似ているが、MARRA の場合、厚さを極端に厚くすると、接着力が安定するよう見えるが、この実験の範囲ではそのようなことは見られない。

大河平⁷⁾ は前述のように木材の引裂応力を数学的に解いている、それによると引裂応力の最大値 $\sigma_{y\max}$ は裂目の底にあつて、

$$\sigma_{y\max} = 12 \frac{M}{h^2} \cdot \frac{1}{e} + 6.50 \frac{P}{h} \sqrt{\frac{4+g}{4e}} \quad \dots\dots (1)$$

で示される。ここに M は裂目底垂直線上の曲げモーメント、 P は同様せん断力、 e, g は材料の弾性定数に関する定数である。この式を用いて算出した接着力 ($\sigma_{y\max}$) と厚さの関係を同図中(●)点で示した。これによると、厚さ 1.3, 1.6, 1.9cm の試験片の接着力の平均値間には有意の差を認めることができないが、厚さ 1.0 cm の試験片の接着力は他のいずれとの間にも有意の差が存在する。また、厚さ 1.0 cm の試験片の平均値は分散が比較的に大きい。図の(○)点と(●)点を比較すると、厚さ 1.0 cm のものを除けば、(○)点では厚さ 1.3, 1.6 および 1.9 cm の各試験片で得られた接着力の値の間には推計学上の有意の差が存在し、厚さが厚くなる程接着力は大いという結果になるが、(●)点では、平均値に多少の差はあつても、これら 3 者の間の有意差は認められない。したがつてこの範囲の厚さについては、厚さを変えても接着力は安定した評価ができることになる。(●)点については、厚さ 1.0 cm の値が極端に大きい、この原因として、次のようなことが考察される。

1) 式 (1) の解が、単純な境界条件の下に解かれていて実際と多少相違している。このことは後に光弾性実験の結果により考察する。

2) 裂目底垂直線上の曲げ応力が比例限度を越えている。すなわち (1) 式で明らかなように l/h を変えると、大河平が述べているように、 $\sigma_{y\max}$ に対する曲げモーメントの効き方とせん断力の効き方の比が変化する⁷⁾。すなわち、 $h \rightarrow$ 小の場合曲げモーメントが支配的となる。Supplemental table 1 の破壊荷重の平均を用いて、レバーの根元、すなわち裂目底垂直線上における曲げモーメントと単純な曲げの式 $6Pl/b \cdot h^2$ による表層応力を算出すると Table 1 のようになる。一方ここに用いたブナ材について、曲げ試験を行なつて求めた応力一ひずみ線図によると、曲げ比例限度 σ_p は約 340 kg/cm² であつた。したがつて Table 1 における $h=1.0$ cm の場合の表層応力の値 396kg/cm² は比例限度をこえている。実際には、この線上の曲

Table 1. Values of apparent skin stress on $x=0$ (see Fig. 9) at maximum load

h (cm)	b (cm)	l (cm)	P (kg)	Bending moment $M=P \cdot l$ (kg·cm)	Apparent bending skin stress σ_b (kg/cm ²)
1.90	2.53	3.50	94.3	331	217
1.60	2.53	3.50	71.8	251	230
1.30	2.52	3.50	55.3	194	274
1.00	2.52	3.50	47.2	165	396

げ応力が、裂目底に向つて集中していることを想定すると比例限度をはるかにこえていることが十分考えられ、これによつて(1)式の適用が困難になると思われる。

3) 無限長に対する近似の問題

この試験では接着層の長さ L_g を一定としているから、 h を小さくすると L_g/h の値は大きくなる。計算すると Table 2 の通りである。大河平⁷⁾の解によれば、試験片の長さが無限大の場合は、厚さの5.25倍の位置で、引裂応力はすでにほとんど0である。実際の状態もこれに近いと考えた場合、いま、無限長の試験片を、ある点で切り落すと、末端部の境界条件が変わることによつて、 $\sigma_{y\max}$ に影響があるが、その影響は L_g/h が大きい場合よりも小さい場合の方が著しいであろうと想像される。したがつて、このことは Fig. 4 (●)点の結果を説明するのには適当なものではない。むしろ厚さ 1.0 cm 以外の場合に接着力がほとんど変化しないことは、 $L_g/h > 5$ の場合が無限長の場合に近似な応力分布状態にあるという考えを導くものであろう。

Table 2. List of L_g/h

h (cm)	L_g (cm)	L_g/h
1.90	10.0	5.25
1.60	10.0	6.25
1.30	10.0	7.70
1.00	10.0	10.0

4) l の値の変化

h を変化させることによつて、接着破壊を生じた時のレバーの部分のたわみ量が変わる。したがつて l の値もわずかわる。荷重点のレバーのたわみ δ を

$$\delta = \frac{Pl^3}{3EI}$$

で計算すると、 $h=1.0\text{cm}$ の場合 δ は 0.32mm となる。しかし、実際には根元の条件が完全な片持梁の状態ではないので、これよりも大きなたわみになる。たとえ、このために δ が数倍の値になつたとしても、 l の変化は僅少で Fig. 4 (●)点における $h=1.0\text{cm}$ の結果を説明するに役立つものでないことは明らかである。以上のことから、試験片の厚さ変化に対して次のような結論が導かれる。

- (1) 接着力の評価には単位幅当りの荷重や、単位面積当りの荷重を用いるよりも(1)式によつて計算した $\sigma_{y\max}$ の値を用いる方が試験片の厚さの影響を受けることが少ない。
- (2) 厚さを薄くすると $\sigma_{y\max}$ の値は主としてレバーの部分の曲げモーメントに支配され、レバーの根元に大きな曲げ応力が生ずるから、(1)式の適用は無理になる。

2 試験片の長さの影響

2.1. 材料と試験方法

2.1.1. 材料

供試材はマカバ (*Betula maximowicziana* Regel) 気乾材、平均含水率 11.3%，気乾比重 0.78，平均年輪幅 1.4mm のものである。また、用いた接着剤は市販の尿素樹脂接着剤（住友 UA 104），固形分 65.2% のものである。

2.1.2. 試験片と試験方法

Strips の寸法・形状は Fig. 5 に示す 5 種類のもので、荷重レバーになる部分にワックスを塗っておき、ワックスを塗らないもう 1 個の strip に接着した。接着剤は上記尿素樹脂 100 に対し小麦粉 100, 水 150, 20% NH_4Cl 17.5 (固形重量にして全液の 1%) を混合, 前節と同じ方法で, 常温下 $10\text{kg}/\text{cm}^2$ の圧縮力で 24 時間圧縮後, 除圧し, 室内に 6 昼夜静置した後, 試験に供した。試験機と負荷方法は前節と同じである。

2.1.3, 実験結果と考察

切断試験片の引裂き破壊荷重の測定結果およびこれより計算された接着力の値は木破率と共に Supplemental table 2 にまとめて示す。また, Fig. 6 ($\triangle$)印は破壊荷重および単位幅当りの接着力と接着層の長さの関係を示す。すなわち, 破壊荷重と単位幅当りの接着力は, 試験片の長さ, すなわち接着面積の増加に伴って, 急激に増加する。また, 同図($\circ$)印は単位面積当りの接着力 ($P/L_g \cdot b$) と接着長さの関係を示すもので平均値の変化は ($\triangle$)印よりも小さい。さらに($\bullet$)印は大河平の導いた有限長さの引裂きに関する解⁷⁾を用いて算出した値の変化である。図で明らかなように, 前 2 者に比べて, 試験片の長さが長くなると, その値は安定してくるが十分ではない。一方, Supplemental table 2 に示す木破率の結果について考察すると, まず全接着面積当りの木破率が接着長さの減少と共に低下しているのは, 前節と同様, 木破の発生が木材表面の欠点の存在確率に関係するもので, ある点に木破が生じれば, それによつて, その点より後の

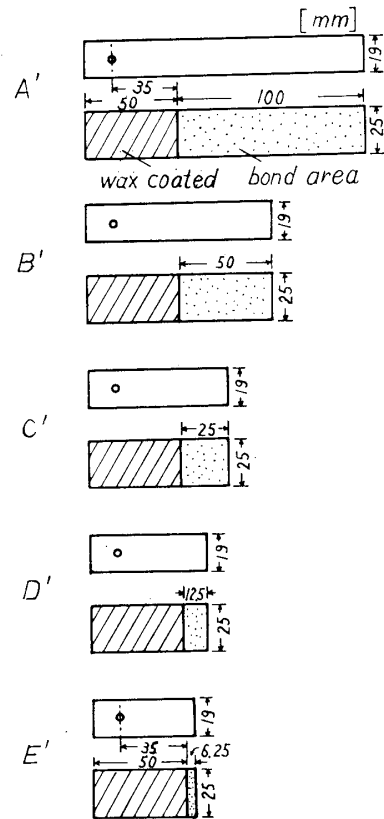


Fig. 5. Dimension of specimen used in length variation test.

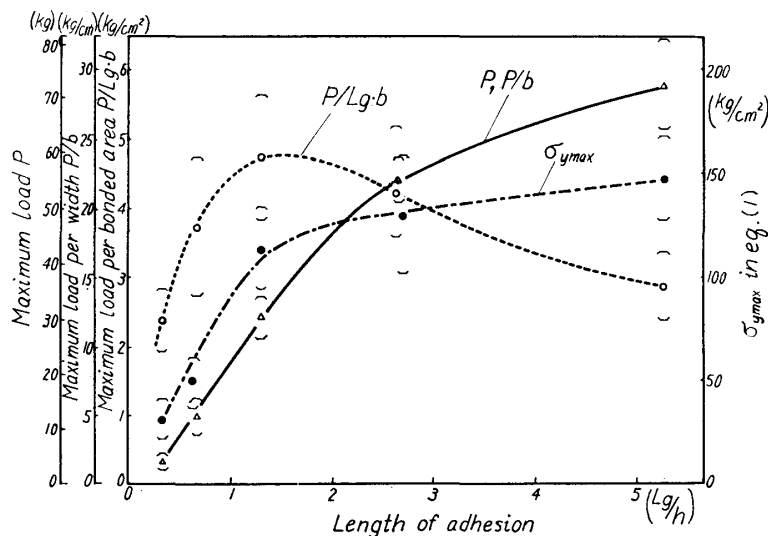


Fig. 6. The effects of (L_g) on glue joint strength.

破壊が、しばしば木材内部で伝達されるからであると考えられる。しかし、それだけの理由では、裂目底線上の木破率が、接着長さの短い場合に、何故、極端に小さな値をとるのかを説明することはできない。

これを説明するためには、この部分の被着材表面の応力状態を考える必要がある。接着長さの長いものは、大きな P によつて破壊するから、そのときの裂目底近くの木材表面は、繊維方向に高い引張応力状態にある。今、木材の接着表面の曲げ表層応力の大きさが木破発生に影響するものと考えれば、上に述べた全接着面積当りの木破率についても、説明がつく。すなわち、破壊が進むにつれて、レバーの長さ l が大きくなるから、(2) 式から明らかなように、曲げモーメントが支配的になり、木材の接着表面における曲げ表層応力が上る、したがつて破壊が進行するにしたがつて木破の生ずる可能性が高くなってくるから、接着長さの大きいもの程、木破率が大きくなると、説明づけることができる。事実、長い接着層の引裂きにおける木破は、主として、破壊の後半でおこることがしばしば観察される。

しかし、この結論は前節 Supplemental table 1 の木破率に対しては合理的ではない。この理由については、今後検討を要する点である。

Fig. 6 の結果をもう少し詳しく考察すると、(Δ)印については、接着長さと共に破壊荷重が上昇するが、曲線の示すように、破壊荷重の上昇率はだんだん小さくなつて、接着長さが厚さ h の 5 倍程になると、接着長さが大きくなつても、もはや破壊荷重は上昇せず、安定した値におさまるもののように思われる。その漸近値は、無限長試験片の破壊荷重に等しくなる、 $L_g = 5.25h$ の結果はこの値にかなり近似であると推定される。つぎに($\circ$)印については、曲線に極大値が現れているが、これは L_g/h の小さい所では、接着面積の増加に比べて、破壊荷重 P の増加が著しいので、単位面積当りの接着力 ($P/L_g \cdot h$) は上昇するが、面積が増加すると P の増加率が低下してくるので $P/L_g \cdot b$ は低下しはじめる。 P 自体が一定値に漸近するならば、終局的に、 $P/L_g \cdot b$ の値は L_g/h の増加と共に低下して、遂には限りなく 0 に近づくことになる。このように、試験片の長さを変える場合、単位幅や単位面積当りの荷重で接着力を表現することは不適當である。($\bullet$)印についていえば、大河平の有限解⁷⁾で算出された値も、やはり試験片の長さに影響されることがわかる。

なお、 $L_g/h = 5.2$ の値は、(1) 式を用いて算出した値である。有限解によるこの点の値は、これとは一致せず、かなり大きなものとなつている。以上のことから次の結論が導かれる。すなわち

- (1) 厚さ一定の試片では破壊荷重または単位幅当りの接着力は、試験片の長さと共に増加し、やがてある値に漸近する。
- (2) 接着面積当りの破壊荷重を接着力の評価に用いることはできない。
- (3) 大河平の有限解によつて計算した値も、試験片の長さに影響される。
- (4) 木破の生じやすい応力状態として、木材の接着表面の曲げ表層応力の影響が考えられる。しかし、この考え方は、前節の結果にはあてはまらないので、今後の検討が必要である。

3 流動性のある接着層の引裂試験

第 1, 2 節では、引裂接着試験における試験片の形状について検討を行なつたが、このよう

な応力集中の極端に大きい試験法で、流動性のある接着剤を試験する場合は、得られる接着力が接着層のレオロジー的挙動に大きく影響を受けると考えられる。ここでは極端な2つの負荷速度の下での試験結果を示す。

3.1. 材料と試験方法

3.1.1. 材料

供試材および接着剤は第1節に用いたものと同様のブナ (*Fagus crenata* Blume) 気乾材、および市販の酢酸ビニルエマルジョン接着剤である。

3.1.2. 試験片

形状と寸法は第1節 Fig. 1 における厚さ 1.9 cm のものと同様である。接着条件は圧縮力 10kg/cm^2 、塗布量 20g/ft^2 、圧縮温度 20°C 、関係湿度60%で、圧縮時間は30分～168時間の範囲で変化させた。

3.1.3. 試験機と cross head の speed

試験機はインストロントタイプの材料試験機 TOM 200J, cross head の speed は 1mm/min と 100mm/min の2段階で試験を行なった。

3.2. 実験結果と考察

Supplemental table 3 は cross head の speed 1mm/min の場合の試験結果, Supplemental table 4 は cross head の speed 100mm/min の場合の試験結果である, 全般的にみて, cross head の speed の小さい場合に比べて cross head の speed の大きい場合は破壊荷重も, 木破率も共に大きなばらつきをもっている。

Fig. 7 は, これらの表の値から, 大まかな傾向を示す曲線を求め, 比較の便宜を考えて, まとめて示したものである。同図から, 破壊荷重および木破率が明らかに荷重速度依存性をもつ

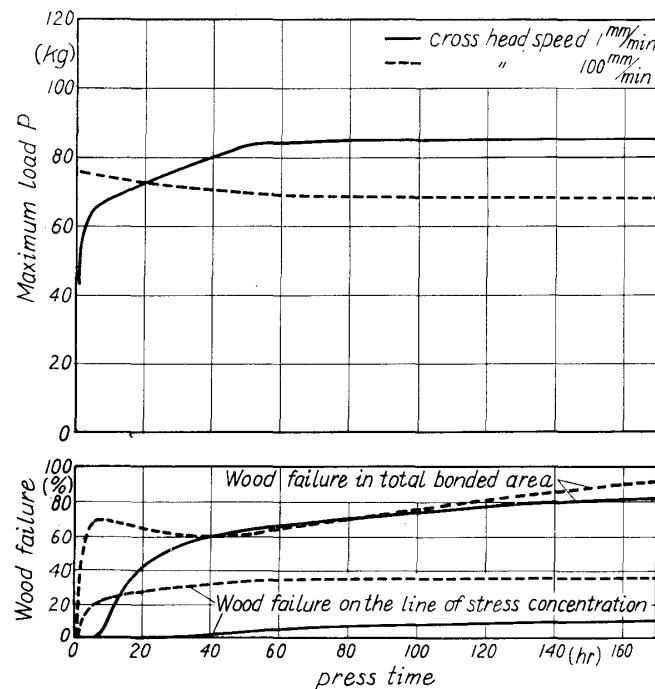


Fig. 7. The effects of cross-head speed on relation between press time and glue joint strength (PVAc adhesive).

ていることがわかる。すなわち、cross head の speed 1 mm/min の場合は、硬化時間と共に破壊荷重が増加する。この値は、裂目底において木破が現れはじめると安定した値をもつようになる。

硬化時間の短いところで破壊荷重が低いのは当然のように見えるが、この場合、主として次の2つの因子の影響の結果であつて、単純なものではないように思われる。その第1の因子は、接着層自体が低い応力で破壊することである。すなわち、接着層の破壊はその貯蔵エネルギーがある値に達した時に生ずる⁸⁾と考えると、接着剤の粘性の低下が破壊荷重を低下させるのは当然である。第2の因子としては Fig. 8 に示すように、接着剤の伸びによつておこる切込底における引裂き応力の集中率の低下である。接着剤が伸びることによつて、最初切込底に集中していた引裂き応力が接着層の内側に向つて（図の右の方に向つて）分散されるため、接着端における引裂き応力は接着剤が十分に硬化している場合よりも低い値となる。この2つの因子は破壊荷重に対して負と正の影響をおよぼす。したがつて、Fig. 7 のように硬化時間が短くなるにしたがい破壊荷重が低下するのは、第1の因子の方が第2の因子により大きくきいているからだと考えられる。

Cross head の speed 100 mm/min の場合の結果は 1 mm/min の場合の結果と著しく相違する。はじめの20時間の範囲では、接着剤の粘性流動が cross head の speed についていけないために、cross head の speed の低い場合より大きな破壊荷重を必要とするのではないかと考えられる。20時間以上では逆に cross head の speed の低い場合の方が高い破壊荷重を示している。これは荷重速度と強度の問題としては普通考えられないことである。しかし、Fig. 8 で説明したように、酢酸ビニルエマルジョンのクリープによる応力分散を考えるならば、この現象は想像されることである。また、cross head の speed 100 mm/min の場合、破壊荷重が硬化時間と共に幾分低下しているように見えるのも、この応力分散で説明できる。

さらに、cross head の speed 100 mm/min の場合、硬化時間の短いところでは接着剤は十分な流動性をもっているのに、接着剤の流動が負荷速度についていけず、被着材が破壊（木破）をおこす程に大きな応力を生じている。以上のように流動性のある接着剤の試験は時間的な因子が大きく影響するから、接着力の評価はむづかしい。このような場合、荷重速度を高めて、接着剤の変形を少なくし接着面の応力分散を無視できる程度のものにすれば、前節のような弾性理論による集中応力で論じることができよう。

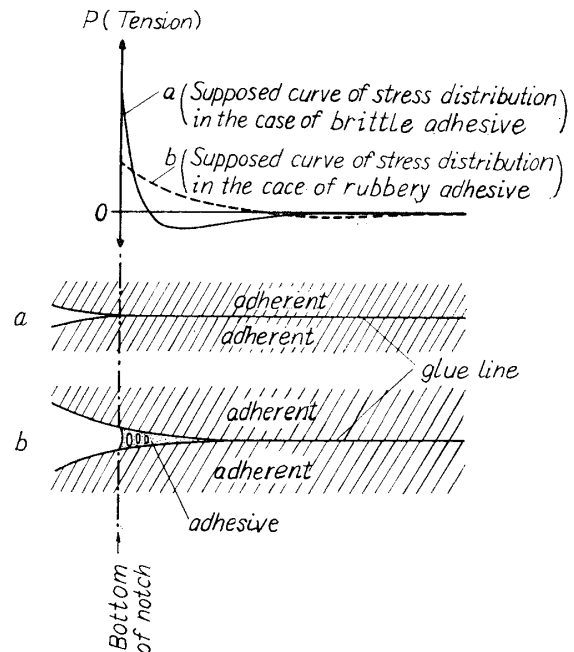
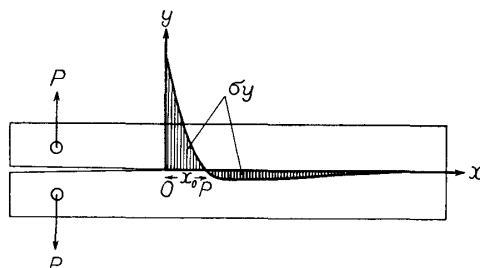


Fig. 8. Supposed diagram of stress dispersion in rubbery adhesive or adhesive of fluidity.

4 試験片内の応力分布の検討

4.1, 接着層における引裂応力の概略の分布

Fig. 9 に示すように、試験片の形は、接着層をはさんで上下対称であり、しかも、荷重は上下方向に対称にかけられるから、接着層における層に平行（または直交）方向のせん断応力 τ_{xy} は存在せず、この層の主応力軸は x 軸, y 軸である。引裂応力 σ_y はその 1 つの主応力で、想定される分布は、図に示すように、 $x=0$ において集中し、 $x=P$ においてゼロ、 $x>P$ において圧縮、 $x=\infty$ においてゼロとなる。

Fig. 9. Distribution of σ_y in specimen.

接着層には τ_{xy} は存在しないから、 $x \geq P$ の範囲は接着されていないとしても、試験結果には影響しないと考えてよい。しかし、 $0 < x < P$ の範囲とくに 0 に近いところの接着状態は鋭敏に結果に影響する。

ここでは、接着層に種々の範囲の欠膠部を作つて、引裂試験を行ない P 点がおよそどのあたりにあるかを実験的に検討した結果を示す。

4.1.1, 材料と試験方法

供試材と接着剤は第 2 節に用いたものと同様のマカバ気乾材、および市販の尿素樹脂接着剤（住友 UA 104）である。Fig. 10 に示すように、接着面の 1 部にワックスを塗り、欠膠部を作り、第 2 節同様の条件で接着した後、引裂接着試験を行なつた。

4.1.2, 試験結果と考察

Supplemental table 5 に試験結果の詳細を示す。また、Fig. 11 (○) 印は単位接着面積当りの接着力を、 $L_g'/h=5.2$ の値を 100 として示した値、(●) 印は破壊荷重、単位幅当りの接着力および (1) 式により求めた接着力を、同じく、 $L_g'/h=5.2$ の値を 100 として示したものである。同図の下に示した曲線は、前述の大河平による無限長試片における σ_y の解⁷⁾ に、用いたマカバ材の弾性定数を入れて算出した試験片内部の σ_y の分布である。これらの図から次のことがわかる。

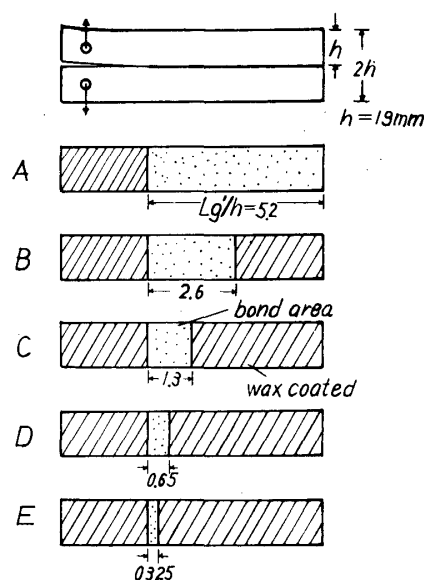


Fig. 10. Dimension of specimen in bonded length variation test.

- (1) 切込底から $L_g'/h > 1.3$ の範囲を接着したものでは、 L_g'/h の値によつて、接着力に有意の差異は認められない。
- (2) 切込底から $L_g'/h < 0.65$ の範囲を接着したものの接着力は $L_g'/h > 1.3$ の範囲を接着したものの接着力よりも有意差をもつて低い。
- (3) 以上のことから Fig. 9 の P 点の値 $x=x_0$ は $0.65 < x_0/h < 1.3$ であると考えられる。

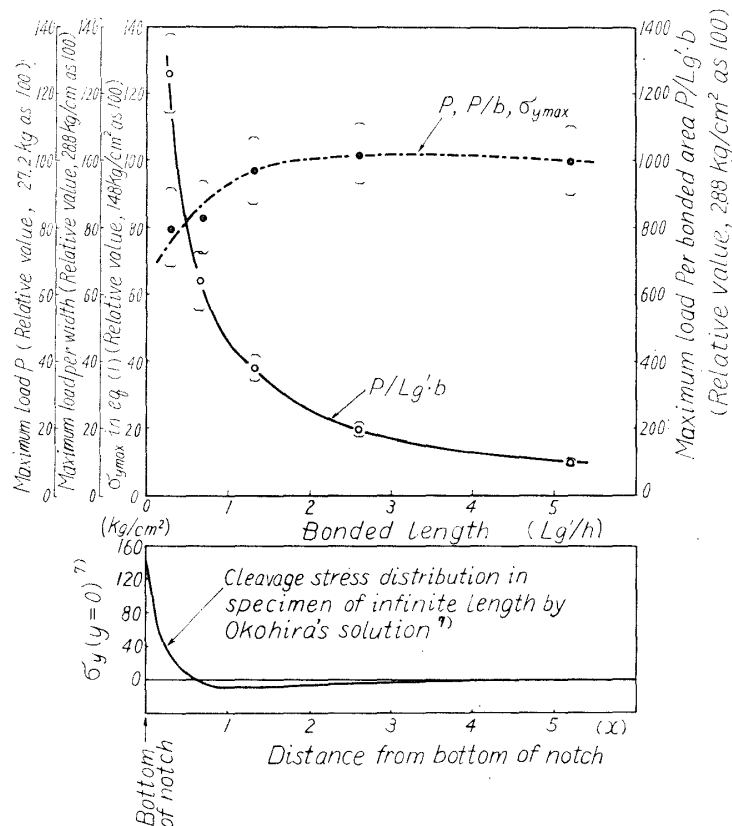


Fig. 11. The effects of bonded length (Lg') on glue joint strength.

(4) 実験結果と大河平の解を比較すると、傾向は大体一致している。

4.2. 裂目底垂直線 ($x=0$) 上の応力状態

すでに述べたように、大河平の解をこの試験結果の評価に応用することによつて、従来の方法に比較して、試験片の形状・寸法を変えても、ある程度安定した結果を得た。このことは、かなりの進歩であると考えられるが、厚さなどを極端に変化させた場合に、その適用は必ずしも十分ではない。これは解を導く過程で用いられた $x=0$ 線上の境界条件（応力分布）の仮定に問題があると考えられる。われわれは、光弾性「凍結サンドイッチ法」^{9,10)} によつて、実験的にこの問題を明らかにすることを試みたが、 $x=0, y=0$ 点の応力集中率が高すぎるため、解析に十分な繰り数を取得する前に、引裂破壊が生じてしまうので、この試みは失敗に終わった。

ここでは、参考のために、等方性モデルを用いて応力分布を調べ、検討の手がかりとした。

4.2.1. 試験片と試験方法

市販エポキシ板から Fig. 12 に示すような光弾性用モデルを切り出した。切り

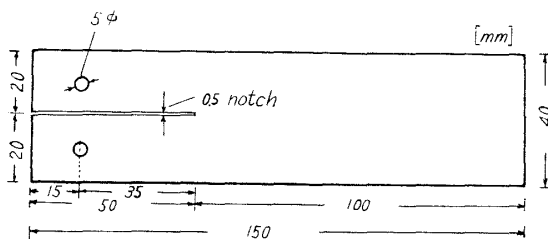


Fig. 12. Dimension of photoelastic test model (Epoxy plate, thickness 0.6cm).

込み部分は理想をいえば無限小の幅でなければならないが、現実にはむつかしいので、極めて薄いベニヤ用手鋸で切り込んだ。周縁応力を除くために、電気炉中で 125°C に10時間静置した後、 6°C/hr の速度で 80°C までで温度を降下し、その後、室温まで放置した¹¹⁾。このように調整された試験片に理研式大口径 ($150\text{mm}\phi$) 光弾性実験装置の光学系の中で引裂き力を与え、等傾線縞模様と等色線縞模様を得た。

4.2.2, 実験結果と考察

Fig. 13 は得られた等傾線図である。これから求められた主応力線図は Fig. 14 の通りであ

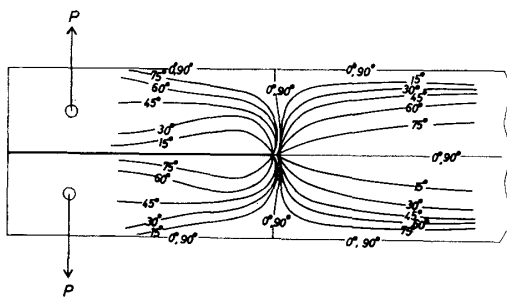


Fig. 13. Isoclinic lines in the isotropic specimen (Epoxy model).

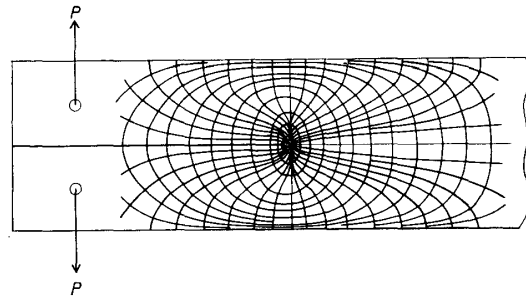


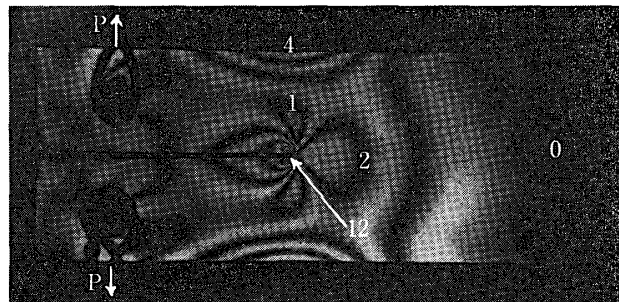
Fig. 14. Stress trajectories in the isotropic specimen (Epoxy model).

る。また、Photo. 1 は得られた等色線縞模様の写真である。これらから $x=0$ 線上の曲げ応力 σ_x とせん断応力 τ_{xy} の値を算出した結果は、Fig. 15 に示す通りである。図中の点線は大河平の仮定した単純な曲げ理論における σ_x, τ_{xy} の分布である。

これらの結果から次のことがいえる：

- (1) σ_x の分布は直線にはならず、非常に高いはり（壁はり、桁はり）の曲げに見られるような複雑な分布¹²⁾をなし、とくに $(x=0, y=0)$ の点に高い応力集中が現れている。
- (2) τ_{xy} の分布も、単純な曲げ理論におけるそれと著しく異なり、 $x=0, y=h/32$ あたりを頂点とする非対称な曲線となつている。
- (3) 木材の場合の分布は明らかではないが、 $(x=0, y=0)$ の点に向つて σ_x, τ_{xy} が多少とも集中していることは想像に難くない。

以上のように、この断面における応力の分布状態は、きわめて複雑なことがわかつた。今後は、差分法による数値解などを試みて、種々の条件下の σ_x, τ_{xy} の分布を求め、関数で表現し、それを境界条件とした解を求めることが必要である。



Numbers indicate the fringe order

Photo. 1. Isochromatic fringe photograph of the isotropic specimen (Epoxy model).

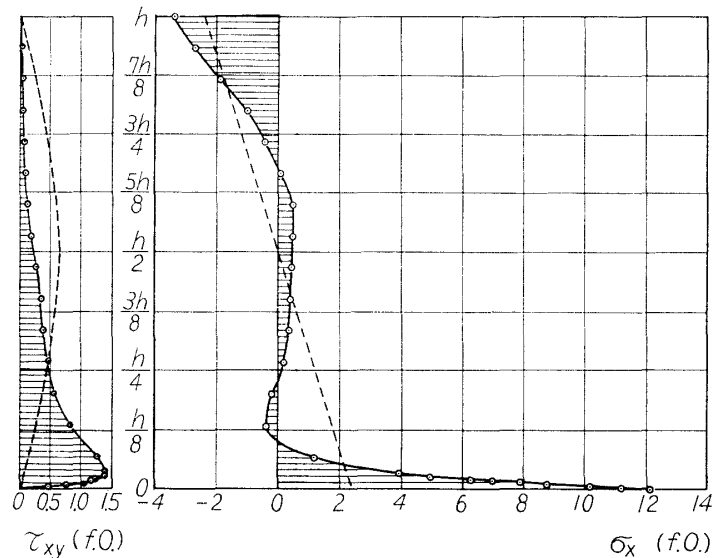


Fig. 15. Stress distribution on the line ($x=0$) obtained from photoelastic test on Epoxy model.

Summary

In almost of glue joint of wooden materials tensile stress perpendicular to the glue joint is often observed in hygroscopic range. For the purpose of evaluating the joint strength in materials subjected to such stress, a new type of glue joint test specimen as shown in Fig. 1 and 3 was devised and influences of the shape and size of the specimen and stress distribution in the specimen were discussed with some experimental results.

The results obtained are summarized as follows :

(1) The glue joint strength of specimen increases with increasing of the thickness of the specimen as shown in Fig. 4. The maximum tensile stress in the specimen can be expressed as an equation (1),⁷⁾ and the calculated values of glue joint strength from the equation are not influenced by the thickness of specimen with the exception of too thin specimen. The occurrence of the exception is considered as a result of using inadequate boundary conditions in the solution, which is confirmed by the result of photoelastic test (Photo. 1 and Fig. 15).

(2) The glue joint strength of specimen increases also with increasing of the length of the specimen, and it seems to reach a constant value at the specimen over $Lg/h=5$ (Fig. 2). In this case, Okohira's solution for limited length of specimen is difficult to be applied.

(3) In the case of flexible adhesive the glue joint strength is higher at high speed test (100 mm/min) than at low speed test (1 mm/min), but, on the contrary, for the somewhat less flexible adhesive the joint strength is higher at low speed test. These

facts may be illustrated by the stress dispersion in the glue layer (Fig. 8).

文 献

- 1) MARRA, A. A., Forest Prod. J., 12, 81 (1962).
- 2) MARRA, A. A., Forest Prod. J., 5, 301 (1955).
- 3) MARRA, A. A., Forest Prod. J., 5, 385 (1955).
- 4) MARRA, A. A., Forest Prod. J., 6, 142 (1956).
- 5) YAVORSKY, J. M. and J. H. BROWN, Forest Prod. J., 9, 35 (1959).
- 6) STANGER, A. G. and R. F. BLOMQUIST, Forest Prod. J., 15 468 (1965).
- 7) 大河平行雄, 三重大学農学部学術報告, No. 28, 177 (1963).
- 8) 高分子学会編, 「接着」理論と応用, 丸善, 17 (1965).
- 9) 佐々木 光, 満久崇麿, 木材研究, No. 36, 33 (1965).
- 10) 佐々木 光, 満久崇麿, 木材研究, No. 41, 90 (1967).
- 11) 辻, 西田, 河田, 光弾性実験法, 日刊工業, 57 (1965).
- 12) ベズーホッフ, 弾性・塑性論 (佐藤常三 訳), 日刊工業, 170 (1953).

Supplemental table 1. The effects of thickness variation on glue joint strength

Specimen No.	Dimension of joint section			Distance from loading point to bottom of notch l (cm)	Maximum load P (kg)	Maximum load per width P/b (kg/cm)	Maximum load per bonded area $P/L_g \cdot b$ (kg/cm ²)	Wood failure		$\sigma_{y\max}$ in eq. (1) (kg/cm ²)
	Width b (cm)	Length L_g (cm)	Thickness h (cm)					in total bonded area (%)	on the line of stress concentration (%)	
A-1	2.52	10.0	1.90	3.50	102.8	40.8	4.08	100	90	206.5
2	2.55	"	1.91	"	102.2	40.2	4.02	50	5	201.9
3	2.53	"	1.90	"	110.5	43.7	4.37	95	5	221.5
4	2.53	"	1.88	"	90.5	35.7	3.57	80	0	183.7
5	2.53	"	1.91	"	65.5	25.9	2.59	70	0	130.0
av.	2.53	"	1.90	"	94.3	37.3	3.73	79	20	188.7
B-1	2.52	10.0	1.60	3.50	71.2	28.2	2.82	80	0	186.3
2	2.53	"	1.59	"	72.8	28.7	2.87	95	20	195.0
3	2.53	"	1.60	"	59.4	23.5	2.35	90	0	158.0
4	2.54	"	1.60	"	85.5	33.7	3.37	80	0	226.5
5	2.53	"	1.60	"	70.0	27.6	2.76	90	0	185.2
av.	2.53	"	1.60	"	71.8	28.3	2.83	87	4	190.2
C-1	2.53	10.0	1.30	3.50	56.0	22.1	2.21	70	0	211.1
2	2.53	"	1.30	"	50.2	19.1	1.91	20	0	190.1
3	2.51	"	1.31	"	53.8	21.4	2.14	90	0	204.2
4	2.51	"	1.30	"	52.5	20.9	2.09	85	0	199.4
5	2.53	"	1.30	"	64.2	25.4	2.54	70	0	242.1
av.	2.52	"	1.30	"	55.3	21.9	2.19	67	0	209.4
D-1	2.53	10.0	0.99	3.50	34.8	13.8	1.38	85	0	211.8
2	2.51	"	1.01	"	44.6	17.8	1.78	80	0	264.4
3	2.51	"	1.01	"	49.0	19.5	1.95	90	0	289.3
4	2.51	"	1.00	"	52.8	21.0	2.10	95	10	317.3
5	2.53	"	1.00	"	55.0	21.7	2.17	85	0	327.9
av.	2.52	"	1.00	"	47.2	18.8	1.88	87	0	282.1

Supplemental table 2. The effects of length (L_g) variation on glue joint strength

Specimen No.	Dimension of joint section			Distance from loading point to bottom of notch l (cm)	Maximum load P (kg)	Maximum load per width P/b (kg/cm)	Maximum load per bonded area $P/L_g \cdot b$ (kg/cm ²)	Wood failure		σ_{pmax} in eq. (1) (kg/cm ²)
	Width b (cm)	Length L_g (cm)	Thickness h (cm)					in total bonded area (%)	on the line of stress concentration (%)	
A'-1	2.50	10.25	1.92	3.50	74.0	29.5	2.90	95	40	151.0
2	2.50	10.24	1.91	3.50	81.5	32.5	3.40	95	80	168.0
3	2.50	10.21	1.92	3.50	63.0	25.2	2.50	95	30	129.0
4	2.51	10.21	1.92	3.40	76.0	30.3	3.00	95	60	153.0
5	2.51	10.20	1.91	3.50	66.5	26.5	2.60	95	50	137.0
av.	2.50	10.22	1.92	3.48	72.2	28.8	2.88	95	52	148.0
B'-1	2.50	5.18	1.92	3.50	55.5	22.5	4.30	60	10	136.0
2	2.49	5.18	1.94	3.40	57.0	22.8	4.45	45	0	134.0
3	2.51	5.20	1.92	3.40	67.0	26.7	5.13	60	5	160.0
4	2.52	5.20	1.92	3.40	46.0	18.3	3.50	25	0	109.0
5	2.51	5.20	1.95	3.40	49.0	19.5	3.80	20	0	113.0
av.	2.51	5.19	1.93	3.42	54.9	22.0	4.24	42	3	130.0
C'-1	2.53	2.58	1.89	3.40	24.0	9.49	3.70	0	0	89.0
2	2.52	2.60	1.90	3.50	29.5	11.7	4.45	5	0	110.0
3	2.53	2.60	1.93	3.40	32.0	12.6	4.85	5	0	118.0
4	2.51	2.60	1.94	3.40	35.5	14.1	5.45	50	5	126.0
5	2.50	2.58	1.92	3.40	34.0	13.8	5.30	55	0	126.0
av.	2.52	2.59	1.92	3.42	31.0	12.3	4.75	23	1	114.0
D'-1	2.51	1.31	1.93	3.40	11.5	4.58	3.35	5	0	46.3
2	2.52	1.31	1.92	3.40	12.0	4.76	3.65	5	5	48.6
3	2.52	1.30	1.93	3.40	9.0	3.57	2.75	0	0	35.8
4	2.52	1.30	1.92	3.40	12.5	5.00	3.80	5	0	50.8
5	2.51	1.31	1.92	3.40	17.5	6.99	5.20	0	0	71.5
av.	2.52	1.31	1.92	3.40	12.5	4.98	3.75	3	1	50.6
E'-1	2.53	0.65	1.93	3.40	3.1	1.22	1.90	5	5	25.6
2	2.52	0.65	1.93	3.40	3.1	1.23	1.90	0	5	25.8
3	2.52	0.69	1.92	3.40	3.9	1.55	2.35	5	0	32.8
4	2.51	0.66	1.88	3.40	3.9	1.55	2.50	0	5	33.9
5	2.52	0.65	1.91	3.40	5.1	2.02	3.15	10	10	43.2
6	2.53	0.65	1.93	3.40	3.9	1.54	2.50	5	5	32.3
av.	2.52	0.66	1.92	3.40	3.83	1.52	2.38	4	4	32.3

Supplemental table 3. The joint strengths of Polyvinyl acetate adhesive in various press time (Cross head speed 1 mm/min)

Specimen ^{*1} No.	Press time hr : min	Maximum load ^{*2} P (kg)	Wood failure	
			in total bonded area (%)	on the line of stress concentration (%)
PVAc 22	0 : 30	43.0	0	0
24	1 : 00	42.9	0	0
8	1 : 30	54.0	0	0
2	4 : 00	63.4	0	0
3	8 : 00	65.9	0	0
28	10 : 00	66.2	10	0
17	12 : 00	68.3	70	0
5	14 : 00	74.0	30	0
7	16 : 00	77.1	55	0
26	" "	58.3	10	av. 0
27	" "	68.0	40	0
11	24 : 00	67.4	30	av. 0
34	" "	78.8	85	57.5
13	36 : 00	72.0	10	5
20	46 : 00	81.4	95	av. 3.3
38	" "	84.0	20	av. 70.0
40	" "	87.4	95	0
30	168 : 00	82.3	90	0
32	" "	94.3	95	av. 10
35	" "	83.8	95	0

*1 Dimension of joint section : width 2.5cm, length 10.0cm, thickness 1.9cm

*2 Distance from loading point to bottom of notch is 3.5cm

Supplemental table 4. The joint strengths of Polyvinyl acetate adhesive in various press time (Cross head speed 100 mm/min)

Specimen ^{*1} No.	Press time hr : min	Maximum load ^{*2} P (kg)	Wood failure	
			in total bonded area (%)	on the line of stress concentration (%)
PVAc 21	0 : 30	57.2	0	0
56	" "	79.7	av. 65.7	0
57	" "	60.3	0	0
23	1 : 00	79.6	10	0
54	" "	72.1	av. 75.3	15
55	" "	74.1	10	11.7
9	1 : 30	75.0	65	5
10	" "	84.3	av. 79.4	15
48	" "	79.0	0	av. 8.3
4	3 : 30	63.8	60	41.7
1	4 : 00	64.3	95	10
51	" "	72.5	av. 73.2	15
52	" "	82.9	90	av. 18.3
41	6 : 00	78.5	90	91.7
42	" "	80.0	av. 75.2	30
49	" "	76.5	100	78.7
50	" "	65.7	95	40
18	6 : 30	82.6	45	5
15	8 : 00	76.8	70	5
43	" "	55.7	av. 66.3	av. 13.3
46	" "	66.3	15	60.0
16	12 : 00	60.0	80	5
25	" "	63.0	av. 65.3	av. 30.0
47	" "	72.8	60	53.3
6	16 : 00	76.1	90	30
12	24 : 00	80.0	av. 79.0	40
33	" "	78.0	70	av. 20.0
14	36 : 00	67.3	70	10
44	" "	60.6	av. 71.8	15
45	" "	87.4	100	av. 41.7
19	45	59.0	0	90
37	" "	69.1	av. 68.4	0
39	" "	77.2	95	av. 30.0
29	168	66.4	95	50
31	" "	64.5	av. 68.0	40
36	" "	73.0	90	av. 31.7

*1 Dimension of joint section : width 2.5cm, length 10.0cm, thickness 1.9cm

*2 Distance from loading point to bottom of noth is 3.5cm

Supplemental table 5. The effects of bonded length (L_g') on glue joint strength

Specimen No.	Dimension of joint section			Distance from loading point to bottom of notch l (cm)	Maximum load P (kg)	Maximum load per width P/b (kg/cm)	Maximum load per bonded area $P/L_g' \cdot b$ (kg/cm ²)	Wood failure		σ_{max} in eq. (1) (kg/cm ²)
	Width b (cm)	Bonded length L_g' (cm)	Thickness h (cm)					in total bonded area (%)	on the line of stress concentration (%)	
A-1	2.50	10.25	1.92	3.50	74.0	29.5	2.90	95	40	151
	2.50	10.24	1.91	3.50	81.5	32.5	3.40	95	80	168
	2.50	10.21	1.92	3.50	63.0	25.2	2.50	95	30	129
	2.51	10.21	1.92	3.40	76.0	30.3	3.00	95	60	153
	2.51	10.20	1.91	3.50	66.5	26.5	2.60	95	50	137
	2.50	10.22	1.92	3.48	72.2	28.8	2.88	95	52	148
B-1	2.50	5.08	1.92	3.50	79.0	31.5	6.20	95	50	162
	2.51	5.11	1.92	3.50	80.5	32.0	6.30	80	20	165
	2.50	5.10	1.93	3.50	62.0	24.8	4.90	90	40	127
	2.50	5.10	1.93	3.50	79.5	31.7	6.20	95	80	162
	2.50	5.10	1.93	3.50	72.5	29.0	5.70	80	45	148
	2.50	5.10	1.93	3.50	74.7	29.8	5.86	88	47	153
C-1	2.51	2.54	1.92	3.50	72.0	28.7	11.2	95	20	148
	2.51	2.56	1.92	3.50	77.5	30.9	12.5	90	50	159
	2.51	2.56	1.93	3.50	54.0	21.6	8.4	80	10	110
	2.50	2.55	1.93	3.50	76.5	30.6	12.0	30	10	156
	2.50	2.55	1.92	3.50	69.5	27.8	10.8	50	20	142
	2.51	2.55	1.92	3.50	69.9	27.9	11.0	69	22	143
D-1	2.50	1.25	1.91	3.50	64.0	25.6	20.6	85	40	133
	2.51	1.26	1.92	3.50	54.0	21.5	16.9	80	70	110
	2.51	1.30	1.91	3.40	71.0	28.3	21.5	50	40	144
	2.50	1.31	1.92	3.50	61.5	24.6	18.6	70	35	126
	2.51	1.30	1.91	3.40	49.5	19.8	15.0	20	0	101
	2.51	1.28	1.91	3.46	60.0	24.0	18.5	61	37	123
E-1	2.50	0.64	1.93	3.50	57.0	22.8	35.7	80	20	116
	2.50	0.65	1.90	3.40	61.5	24.4	38.5	70	10	125
	2.52	0.66	1.94	3.50	43.0	17.1	25.3	60	10	86
	2.50	0.66	1.94	3.50	63.5	25.4	39.7	50	5	128
	2.50	0.66	1.94	3.40	68.0	27.2	42.5	70	10	135
	2.50	0.65	1.93	3.46	58.6	23.4	36.3	66	11	118