

材質改良に関する研究 (第4報)

接着層の形成について

堀 岡 邦典⁽¹⁾

I 緒 言

被接着材面上に接着剤が塗付され、他の被接着材を重ね圧力を加え、被接着材に接着剤が2または $3 \times 10^{-7} \text{ cm}$ 程度の距離に近づけ両者間に分子間引力を作用させるとともに¹⁾、凹凸のある材面と接着剤間にある気泡をできるだけ排除してなるべく均一に、薄い接着層を欠陥部を生じない程度に形成し、その際に接着面に開口した導管、木繊維および仮導管の一部には接着剤が滲透し、しかる後に未硬化接着剤中の溶剤を拡散せしめると同時に、硬化剤の化学作用により接着剤を硬化せしめ固化した接着層を得て、はじめて接着作業が完了するわけである。

かかる過程を単純化して理論化^{2) 3)}することより経験により従来もつばら行われている接着作業に基礎を与えることとなり、かつ接着作業の改良に示唆を与えることになると考え、次のごとく解析を行つたしだいである。

なお本研究を実施するに当り、ご指導を賜わつた齋藤美鷲場長、種々示唆を与えられた堀池清・雨宮昭二技官、さらに実験の一部、特に接着層の厚さの測定および顕微鏡写真の調製を行つていただいた嵯峨塗利技官、実験に協力を願つた森屋和美・峰尾林太郎・榎本光次郎技官の各位に対し深く謝意を表するしだいである。

II 未硬化接着層の圧縮による変形

圧縮による変形をなるべく単純化して解析するために、接着剤の滲透がほとんどない硝子板を木材の代りに供試材料とした。

解析するために

- (1) 一次元のみ接着剤が流れる場合、すなわち、x方向にのみ流れが許されるとき接着層の変形。
- (2) 二次元のみ接着剤が流れる場合、すなわち、xおよびz方向への流れが許される時の接着層の変形。

に分けて研究したが、実際にはx、yおよびz方向に流れる場合が多いから、それについてはIVにおいて論ずることとする。

なお、本報告中に用いる記号は次のようである。

- u; 接着剤の流れの速度 (Velocity of flow of adhesives) [L/T] t; 時間 (Time) [T]
P; 未硬化接着層の圧力 (Pressure of uncured glue-line) [F/L²]
 τ ; 接着剤の剪断応力 (Shear stress of adhesives) [F/L²]

(1) 木材部材質改良科長・農学博士

- η; 接着剤の粘度 (Viscosity of adhesives) [FT/L²]
- i; 接着層の圧力勾配 (Pressure gradient of glue-line) [F/L³]
- H; 接着層の初期厚さ (Initial thickness of glue-line) [L]
- h; 接着層の最終厚さ (Final thickness of glue-line) [L]
- B; 接着層の巾 (Width of glue-line) [L] l; 接着層の長さ (Length of glue-line) [L]
- Q; 圧縮することにより流れ出る量 (Volume of flow out by pressing) [L³]
- W; 接着層に加えられた荷重 (Weight adding to glue-line) [F/L²]
- R; 円板の直径 (Radius of round plate) [L] r; 円板の半径 (Diameter of round plate) [L]
- ρ; 密度 (Density) [FL⁻¹T²] or [ML⁻³] θ; 角度 (Angle) [non]

1. x 方向にのみ流れが許されたる時の接着層の変形

2枚の板の間に置かれた接着剤が、x方向にのみ流れが許されるときに、第1図の接着剤中の微小4面体(6面体と考えてもz方向を1とすれば4面体を対象としてよいと考え)、dx, dyの有する運動エ

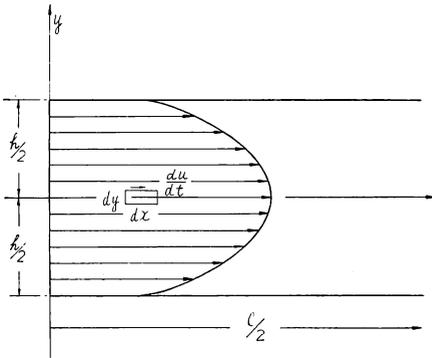


Fig. 1 接着層の流れ
The flow of adhesives

エネルギーは、ニュートンの法則により

$$m \frac{du}{dt} = \Sigma F \dots \dots \dots (1)$$

であるから、m は $\rho \, dx \cdot dy \cdot dz$, dz を1とすれば m は $\rho \cdot dx \cdot dy$ となる。

(1)の左辺は微小体の左辺の面にかかる圧力 P (dy · 1), 右辺の面にかかる圧力は $(P + \frac{\partial P}{\partial x} dx) dy \cdot 1$, しかもこれは方向が左辺にかかる圧力と逆であるから、-符号をつける。

つぎに下辺に働く剪断応力 (dx · 1) であつて、上辺に働く剪断応力は $-(\tau + \frac{\partial \tau}{\partial y} dy) dx \cdot 1$ であるから、

(1) 式は

$$\rho \, dx \, dy \, \frac{du}{dt} = - \frac{\partial P}{\partial x} \, dx \, dy - \frac{\partial \tau}{\partial y} \, dx \, dy \quad \text{となり} \quad dx \cdot dy \neq 0 \quad \text{であるから}$$

$$\rho \, \frac{du}{dt} = - \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\partial \tau}{\partial y} \dots \dots \dots (2)^*$$

なお、剪断力 $\tau = \eta \frac{\partial u}{\partial y}$ であるから

$$\therefore \rho \, \frac{du}{dt} = - \frac{\partial P}{\partial x} - \eta \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \dots \dots \dots (3)$$

この運動で慣性項を無視するならば

左辺=0 となり

$$\frac{\partial P}{\partial x} = - \eta \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad \text{となり}$$

$\frac{\partial P}{\partial x} = i$ とおけば

$$\therefore \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{-i}{\eta}$$

* これは Lamb, Hydrodynamics, 5ed., (1930) p. 547 に記載の Navier-Stokes' eq. と全く同一である。

これを積分すると

$$\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{i}{\eta}y + c_1$$

しかるに

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{y=0} = 0 \text{ であるから,}$$

$c_1 = 0$ となる。

すなわち,

$$\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{i}{\eta}y$$

さらにこれを積分すると

$$u = -\frac{i}{2\eta}y^2 + c_2$$

$(u)_{y=\pm h/2} = 0$ であるから

$$-\frac{i}{2\eta}\left(\frac{h}{2}\right)^2 + c_2 = 0$$

$$\therefore c_2 = +\frac{ih^2}{8\eta}$$

それゆえに

$$u = -\frac{i}{2\eta}y^2 + \frac{ih^2}{8\eta} \dots\dots\dots(4)$$

圧縮することにより流れ出る量 Q は

$$Q = 4 \int_0^{h/2} B u dy \dots\dots\dots(5)$$

(4) および (5) より

$$\begin{aligned} Q &= 4 \left[-\frac{iy^3}{6\eta} + \frac{ih^2}{2\eta}y \right]_0^{h/2} B \\ &= \frac{ih^3}{6\eta} B \dots\dots\dots(5') \end{aligned}$$

つぎに第2図において、 x 軸方向の接着層および型の長さを l とすれば

$$Q_f = -\frac{dh}{dt} B \cdot l \dots\dots\dots(6)$$

$$Q_f = Q \dots\dots\dots(7)$$

(5') および (6) より

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{ih^3}{6\eta l}$$

(5') において $i = \left| \frac{dP}{dx} \right|$ であるから、 $x \geq 0$ においては

$$\frac{dP}{dx} = \frac{6\eta Q}{Bh^3}$$

$$P = \frac{-6\eta Q}{Bh^3} x + C_3 \dots\dots(8) \text{ ただし, } x \geq 0$$

$P_x = \frac{h}{2} = 0$ であるから

$$-\frac{6\eta Q}{Bh^3} \cdot \frac{l}{2} + C_3 = 0 \dots\dots\dots(8')$$

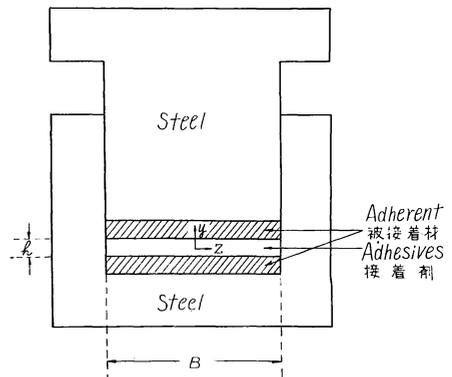


Fig. 2 x 方向にのみ接着剤の流れが許される場合 (y 方向には滲透しない場合)

When the flow of adhesives is permitted only to x direction (moreover the adhesives is not permeated to y direction)

$$\therefore C_3 = \frac{3\eta Q}{Bh^3} l \dots\dots\dots(9)$$

(8) および (9) より

$$P = -\frac{6\eta Q}{Bh^3} \left(x - \frac{l}{2}\right)$$

$$P = -\frac{6\eta \frac{dh}{dt} l}{h^3} \left(x - \frac{l}{2}\right)$$

$$\therefore Q_f = -\frac{dh}{dt} B \cdot l$$

つぎに、

$$2 \int_0^{l/2} B \cdot P \cdot dx = W \dots\dots\dots(10)$$

W は凸型の重量と荷重との合計である。

$$2 \int_0^{l/2} \frac{6\eta \frac{dh}{dt} l \left(x - \frac{l}{2}\right)}{h^3} B \cdot dx = W \dots\dots\dots(11)$$

$$-\frac{dh}{dt} = \frac{2W}{3\eta B l^3} h^3$$

$$dt = \frac{-3\eta B l^3}{2W} \cdot \frac{dh}{h^3} \dots\dots\dots(12)$$

(12) を積分すると

$$t = \frac{3\eta B l^3}{4W h^2} + C_4$$

t=0, h=H ならば

$$0 = \frac{3\eta B l^3}{4W H^2} + C_4$$

$$\therefore C_4 = -\frac{3\eta B l^3}{4W H^2}$$

$$\therefore t = \frac{-3\eta B l^3}{4W} \left(\frac{1}{H^2} - \frac{1}{h^2}\right)$$

$$\therefore \frac{-4W}{3\eta B l^3} t = \frac{1}{H^2} - \frac{1}{h^2}$$

$$\frac{1}{h^2} = \frac{1}{H^2} + \frac{4W}{3\eta B l^3} t$$

$$\therefore h = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{H^2} + \frac{4W}{3\eta B l^3} t}}$$

$$= H \cdot \sqrt{\frac{3\eta \cdot B \cdot l^3}{3\eta B l^3 + 4H^2 W t}} \dots\dots\dots(13)$$

2. x および z 方向への流れが許されたる時の接着層の変形

2 枚の円板の間に置かれた接着剤が、x 方向および z 方向に流れが許されるときに、第 3 図に示すような微小体のもつ運動エネルギーは、(1) 式の左辺は、 $\rho \cdot r d\theta \cdot dr dy \frac{du}{dt}$ となり、右辺の ΣF の項のうち、圧力は

$$P \cdot r \cdot d\theta \cdot dy - \left(P + \frac{\partial P}{\partial r} dr\right) (r + dr) d\theta \cdot dy$$

さらに剪断応力は

$$\tau \cdot r \cdot d\theta \cdot dr - \left(\tau + \frac{\partial \tau}{\partial y} dy\right) r \cdot d\theta \cdot dr \quad \text{となり}$$

(1) 式は

$$\begin{aligned} \rho \cdot dr \cdot r \cdot d\theta \cdot dy \frac{du}{dt} &= P \cdot r \cdot d\theta \cdot dy - (P + \frac{\partial P}{\partial r} dr)(r+dr)d\theta \cdot dy - \frac{\partial \tau}{\partial y} \cdot r \cdot d\theta \cdot dr \cdot dy \\ &= -\frac{dP}{dr} \cdot dr \cdot r \cdot d\theta \cdot dy - P \cdot dr \cdot d\theta \cdot dy - \frac{\partial P}{\partial r} dr^2 \cdot d\theta \cdot dy - \frac{d\tau}{dy} \cdot r \cdot d\theta \cdot dr \cdot dy \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

両辺を $dr \cdot r \cdot d\theta \cdot dy$ にて除し、かつ二次の微小項を除くと

$$\therefore \rho \frac{du}{dt} = -\frac{dP}{dr} - \frac{P}{r} + \eta \frac{d^2u}{dy^2} \dots\dots\dots (15)$$

この運動で慣性項を無視するならば

$$-\frac{dP}{dr} - \frac{P}{r} + \eta \frac{d^2u}{dy^2} = 0 \dots\dots\dots (16)$$

流れ出る量 Q は

$$Q = 4\pi r \int_0^{h/2} u dy \dots\dots\dots (17)$$

(16) を積分すると

$$\frac{du}{dy} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{dP}{dr} + \frac{P}{r} \right) y + C_1 \dots\dots\dots (18)$$

$$\left(\frac{du}{dy} \right)_{y=0} = 0$$

$$\therefore C_1 = 0$$

(18) を積分すると

$$\therefore u = \frac{1}{2\eta} \left(\frac{dP}{dr} + \frac{P}{r} \right) y^2 + C_2$$

$$(u)_{y=\pm h/2} = 0 \text{ であるから}$$

$$\therefore 0 = \left(\frac{h}{2} \right)^2 \left(\frac{dP}{dr} + \frac{P}{r} \right) + C_2$$

$$\therefore C_2 = -\frac{h^2}{8\eta} \left(\frac{dP}{dr} + \frac{P}{r} \right)$$

$$\begin{aligned} \therefore u &= \frac{1}{2\eta} \left(\frac{dP}{dr} + \frac{P}{r} \right) y^2 - \frac{h^2}{8\eta} \left(\frac{dP}{dr} + \frac{P}{r} \right) \\ &= \frac{-1}{2\eta} \left(\frac{dP}{dr} + \frac{P}{r} \right) \left\{ \left(\frac{h}{2} \right)^2 - y^2 \right\} \end{aligned}$$

$$\therefore \left\{ \left(\frac{h}{2} \right)^2 - y^2 \right\} \left\{ \frac{dP}{dr} + \frac{P}{r} \right\} = -2\eta u$$

両辺を y で 0 から $\frac{h}{2}$ まで積分すると

$$\left(\frac{dP}{dr} + \frac{P}{r} \right) \left[\left(\frac{h}{2} \right)^2 y - \frac{y^3}{3} \right]_0^{h/2} = -2\eta \int_0^{h/2} u dy$$

(17) により

$$\left(\frac{dP}{dr} + \frac{P}{r} \right) \frac{h^3}{12} = \frac{-\eta Q}{2\pi r}$$

$$\frac{dP}{dr} + \frac{P}{r} = -\frac{6\eta Q}{\pi r h^3}$$

$$\frac{dP}{dr} + \frac{P}{r} = 0$$

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{P}{r}$$

$$\frac{dP}{P} = -\frac{dr}{r} \dots\dots\dots (19)$$

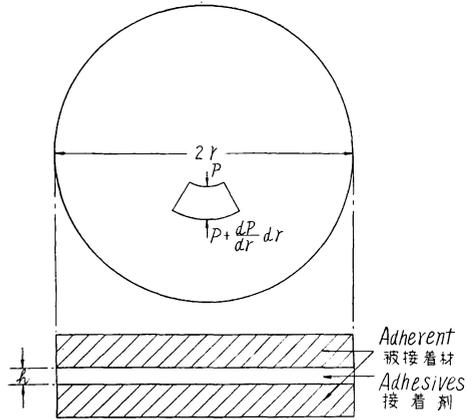


Fig. 3 2枚の円板の間に接着剤が置かれ
xおよびz方向に流れが許される場合
When the flow of adhesives spreading
between two round plates is permitted
only to x and z direction

(19) を積分すると

$$\log P = -\log r + C_3$$

$$\log (Pr) = C_3$$

$$\therefore Pr = C_4$$

$$\therefore P = \frac{C_4}{r} \quad (\text{Complementary Solution})$$

また,

$$P = -\frac{6\eta Q}{\pi h^3} \quad (\text{Particular Solution})$$

$$\therefore \frac{C_4}{r} - \frac{6\eta Q}{\pi h^3} = 0$$

(P)_{r=R}=0 なる境界条件により

$$0 = \frac{C_4}{R} - \frac{6\eta Q}{\pi h^3}$$

$$\therefore C_4 = \frac{6\eta Q}{\pi h^3} \cdot R$$

$$\therefore P = \frac{6\eta QR}{\pi h^3 r} - \frac{6\eta Q}{\pi h^3} = \frac{6\eta Q}{\pi h^3} \left(\frac{R}{r} - 1 \right) \dots\dots\dots (20)$$

接着層が変形して容積が減少する量 Q は,

$$Q = -\frac{dh}{dt} \pi R^2 \dots\dots\dots (21)$$

(21) を (20) に代入すると,

$$\therefore P = -\frac{6\eta}{\pi h^3} \left(\frac{R}{r} - 1 \right) \frac{dh}{dt} \pi R^2 = -\frac{6\eta R^2}{h^3} \left(\frac{R}{r} - 1 \right) \frac{dh}{dt}$$

$$\therefore \frac{dh}{dt} = -\frac{Ph^3}{6\eta R^2} \cdot \frac{1}{\frac{R}{r} - 1}$$

被接着材に加えられる荷重 W は,

$$\int_0^R 2\pi r P dr = W \dots\dots\dots (22)$$

$$-\int_0^R \frac{dh}{dt} \frac{6\eta R^2}{h^3} \left(\frac{R}{r} - 1 \right) \frac{1}{h^3} \cdot 2\pi r dr = \int_0^R P \cdot 2\pi r dr$$

$$-\frac{dh}{dt} \frac{6\eta R^2}{h^3} \frac{2\pi}{h^3} \int_0^R \left(\frac{R}{r} - 1 \right) r \cdot dr = W$$

$$-\frac{dh}{dt} \frac{6\eta R^2}{h^3} \frac{2\pi}{h^3} \left[Rr - \frac{r^2}{2} \right]_0^R = W$$

$$-\frac{dh}{dt} \frac{3\eta R^4}{h^3} \frac{2\pi}{h^3} = W$$

$$-\frac{dh}{dt} = \frac{W}{6\eta \pi R^4} \cdot h^3$$

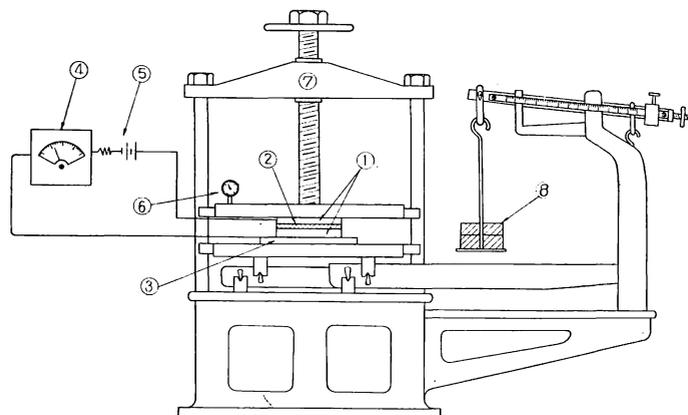
$$-dt = \frac{6\eta \pi R^4}{W} \cdot \frac{dh}{h^3}$$

両辺を積分すれば,

$$t = \frac{3\eta \pi R^4}{Wh^2} + C_5$$

t=0 において h=H であるから

$$0 = \frac{3\eta \pi R^4}{W \cdot H^2} + C_5$$



- ① 銀メッキをほどこした光学用ガラス円板
(Round glass plate electroplating by silver)
- ② 接着層 (Glue-line)
- ③ 絶縁板 (Insulate plate)
- ④ アンペア・メーター (Ampere meter)
- ⑤ 蓄電池 (Battery)
- ⑥ ダイヤル・ゲージ (Dial gauge)
- ⑦ 衡杆式プレス of 定盤 (Settled head plate of the balance type press)
- ⑧ 衡杆式プレス of ウェイト (Weight of the balance type press)

Fig. 4 衡杆式プレスによる接着層変形測定装置
Deformation measuring apparatus of balance type of adhesive layer

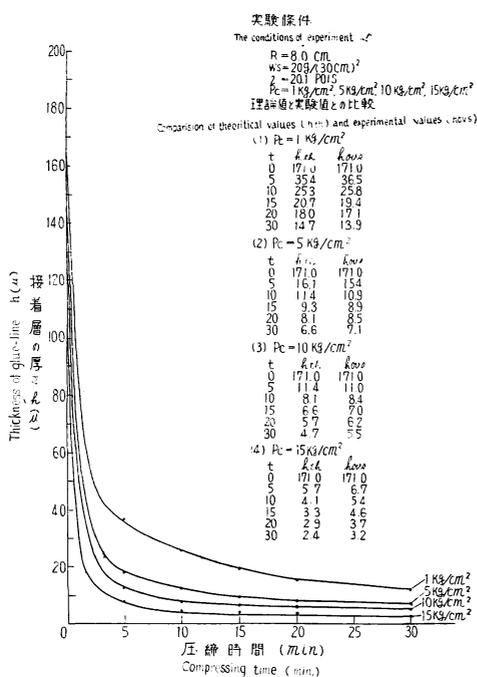


Fig. 5 接着層の変形 (1)
The deformation of adhesive layer (1)

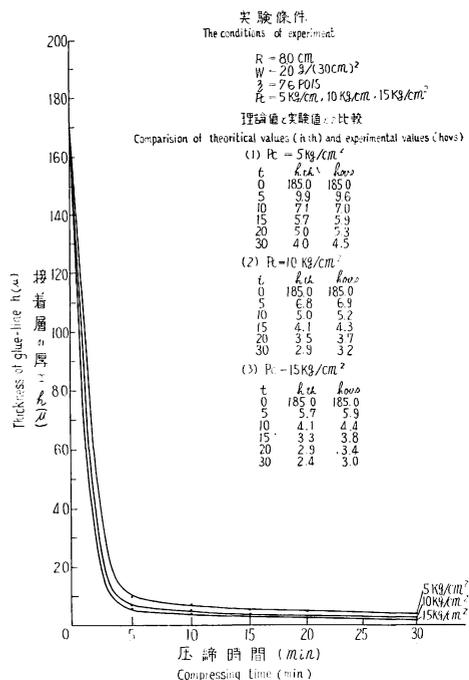


Fig. 6 接着層の変形 (2)
The deformation of adhesive layer (2)

$$\therefore C_s = -\frac{3\eta\pi R^4}{W \cdot H^2}$$

$$\therefore t = -\frac{3\eta\pi R^4}{W} \left(\frac{1}{h^2} - \frac{1}{H^2} \right) \dots\dots\dots(23)$$

$$\therefore \frac{1}{h^2} = \frac{1}{H^2} + \frac{W}{3\eta\pi R^4} t$$

$$\therefore h = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{H^2} + \frac{Wt}{3\eta\pi R^4}}}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{\frac{3\eta\pi R^4 + H^2 Wt}{H^2 \cdot 3\eta\pi R^4}}}$$

$$h = H \cdot \sqrt{\frac{3\eta\pi R^4}{3\eta\pi R^4 + H^2 Wt}} \dots\dots\dots(24)$$

3. 変形の理論式に対する考察

以上の誘導により得られた (24) の理論式を考察すると (接着作業との関連度により (13) は省く),

(24) 式中の $\frac{3\eta\pi R^4}{H^2 Wt} \ll 1$ なる関係から, 2 項定理によると

$$h = H \cdot \sqrt{\frac{3\eta\pi R^4}{H^2 Wt} \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \frac{3\eta\pi R^4}{H^2 Wt} + \dots \right]}$$

となり,

$$h \propto \sqrt{\eta}, \quad h \propto \frac{1}{\sqrt{t}} \quad \text{なることがいえ, 換言すれば塗付したときの初期厚さ } H \text{ は粘度 } \eta \text{ の}$$

1/2 乗に比例して変化し, η が大であれば他の条件が一定のとき, 接着層の厚さ h は大となる。また,

接着層の厚さは圧縮後の時間 t の $-1/2$ 乗に比例して少となる。ことがいえる。

4. 接着層の変形に関する実験

Fig. 4 に示すとき衝杆式プレスを用いて, しかも接着層に荷重が加わるとき, ランプが指示されるように改良した。硝子板は直径 8.0 および 8.25 cm, 厚さ 5 mm の銀メツキをほどこした光学用ガラスを使用し, 接着剤は住友化工材製の尿素樹脂キゲタライム No. 104, 試作した低粘度接着剤および高粘度接着剤を用い圧縮力を変えて実験を行った結果

$$h = H \cdot \sqrt{\frac{3\eta\pi R^4}{3\eta\pi R^4 + H^2 Wt}}$$

の H, η, R, W を実験に用いた値を入れて計算した h_{th} と実験値 h_{exp} とは Fig. 5, Fig. 6 および Fig. 7 に示すように非常に良く一致するが, 圧縮時間約 10 分経過ごろより段階的に h が変化するように観測された。

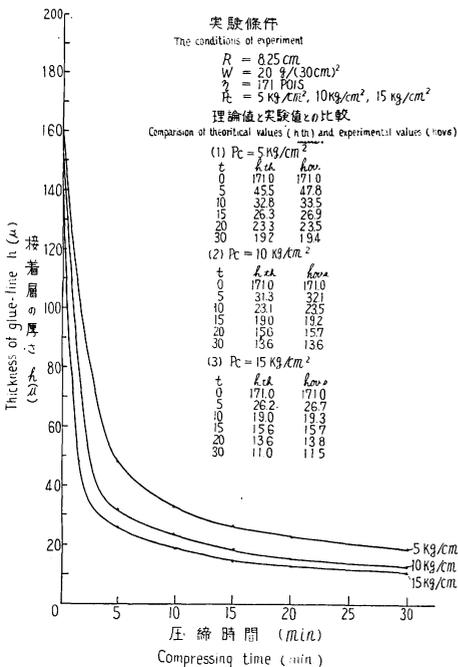


Fig. 7 接着層の変形 (3)

The deformation of adhesive layer (3)

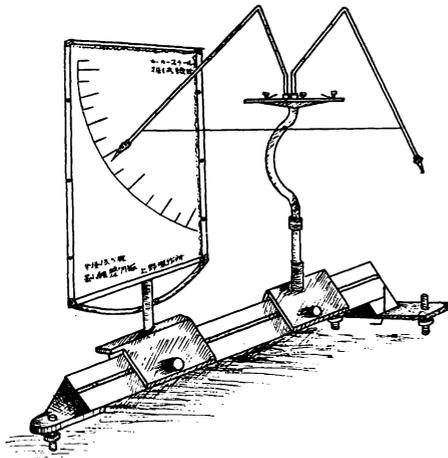


Fig. 8 振棒式皮膜硬度計
Hardness meter of sheet of swing
balance type

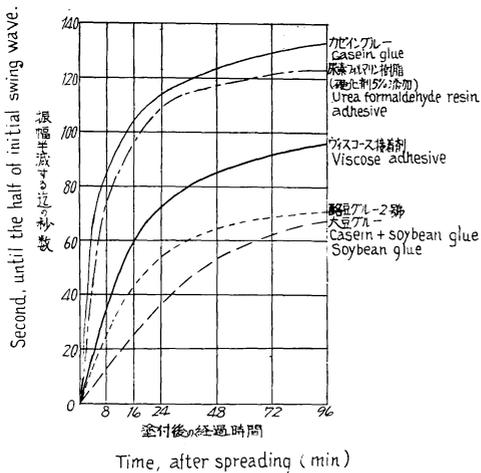


Fig. 9 振棒式皮膜硬度計による
皮膜の硬度
The hardness of adhesive layer by
the hardness meter of sheet of
swing balance type

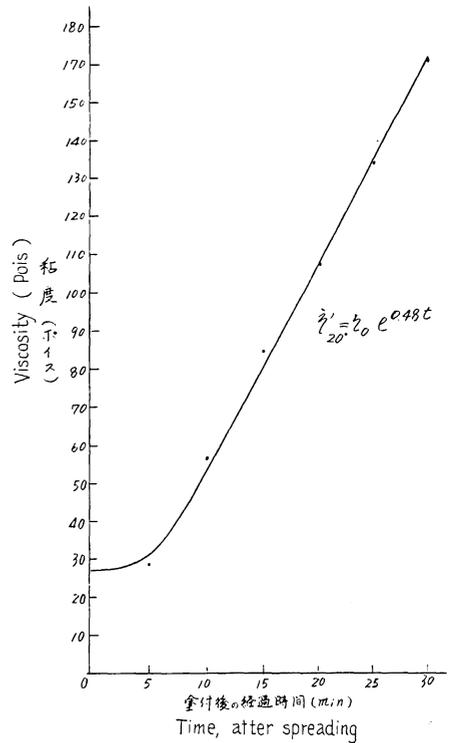


Fig. 10 硬化剤を添加した Urea
formaldehyde resin adhesive
の堆積時における粘度変化
Viscosity change on the open assembly
time by urea formaldehyde resin
adhesive mixed hardner

Ⅲ 未硬化接着層の粘度変化⁴⁾

木材に塗付された接着層の粘度が圧縮までいかに変化するかは重要な問題であるが、粘度が上昇する理由として次の項目によるものと思われる。

- (1) 接着剤中の溶媒が被接着材中に滲透する。
- (2) 接着剤中の溶媒が空气中に拡散する。
- (3) 硬化剤が添加されているときはその化学反応により粘度が上昇する。

これらのうち最も影響あるものは (3) であつて、(2) は低沸点の溶媒を用いた接着剤は別として、尿素

系および石炭酸系にあつては、それによる影響よりも (3) の方がはるかに大である。

その粘度変化を測定する目的をもつて、カバ単板 (含水率 12.6%) に各種の接着剤を塗付して Fig. 8 の振棒式皮膜硬度計により粘度変化を明らかにせんとしたが、Fig. 9 のごとく長時間の変化は測られるも、短時間の変化は測定できない。

また、振り粘度計を試作したが粘度によるトルクの変化が小さく測定することはできなかつた。そのため、さらに塩化アンモン 20% 溶液を 5% 添加した尿素樹脂接着剤をカバ材 (含水率 11.8%) 板目面に 10 g/(30 cm)² 塗付して、5, 10, 15, 20, 30 分ごとにべつべつのカバ材の上から接着剤を削り取つて、小型落球粘度計に入れて粘度を測定した結果は Fig. 10 のとおりである。

その実験結果などから硬化剤の添加されしかも材面に塗付された接着剤の粘度は $\eta' = \eta_0 e^{\alpha t}$ により増大することが判明し、Fig. 10 に示す実験値から実験式を求めると次のごとくなる。

$$\eta' = \eta_0 e^{\alpha t} \dots \dots \dots (25)$$

IV 接着剤の滲透

木材の接着剤の吸収は毛細管現象にもとづくものと考え、接着剤が被接着材面に塗付された後、圧縮により木材を構成する毛細管中に滲透していく機構を研究し、さらに実際にはいかなる過程を経るかを特殊の注入装置を用いて、しかも無機の螢光体を添加した尿素樹脂をスギおよびカバ材の木口、柾目、板目面に注入して理論値との対比を行つた。

1. 透 過 量

滲透に際しある断面を通る流量は断面積を (A)、圧力勾配を i とすれば

$$Q = KiA \dots \dots \dots (26)$$

なる関係がある。ただし、Kは滲透係数と称される Constant であつてこの関係は Darcy's law といわれている。

しかし Poiseuille の法則によると、

$$Q = \frac{\gamma_w r^2 \cos \theta}{8\eta} iA \dots \dots (27)$$

となり、

$$K = \frac{\gamma_w r^2 \cos \theta}{8\eta} \dots \dots \dots (28)$$

なる関係がある。

2. 滲 潤 長

木材への接着剤の滲透機構を明らかにするため次のような模型的な考察を行う。

1本の毛細管を水平に接着剤中に置く。Fig. 11

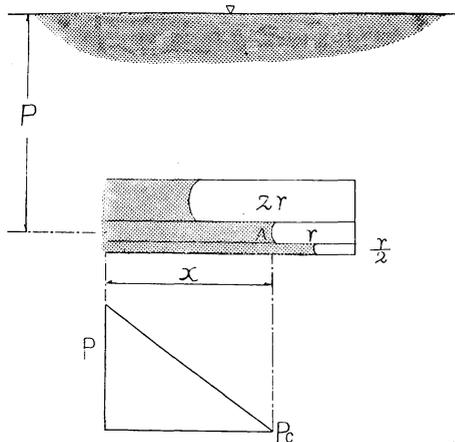


Fig. 11 毛細管への接着剤滲透模型
The model of permeation of adhesives to the capillary (closed one side, but air through out)

の管の右端からは接着剤ははいらないが空気は出るようにする。単位時間の流量 q 、接着剤の粘度を毛細管の一端からのみ接着剤が滲透する機構 (他端の空気圧 $P_a = 0$ の時) η 、圧力勾配を i 、管の断面積を A とすると Poiseuille の法則によると

$$Q = \frac{\gamma_w r^2 \cos \theta}{8\eta} iA = KiA \dots \dots \dots (27)$$

A 点の圧力を P_c とすば, $P_c = -2r/\gamma$ であるが

$$i = (P_0 + P_c)/x \dots\dots\dots(29)$$

$$Q = \frac{dx}{dt} A$$

(27) 式および (29) 式から

$$\frac{dx}{dt} = K \frac{P + P_c}{x} \dots\dots\dots(30)$$

$$x dx = K(P + P_c) dt$$

$$\frac{x^2}{2} = K(P + P_c)t + C$$

$$(x)_{t=0} = 0 \quad \therefore C = 0$$

$$\frac{x^2}{2} = K(P + P_c)t \dots\dots\dots(30')$$

$$\therefore x = \pm \sqrt{2K(P + P_c)t} \dots\dots\dots(31)$$

つぎに, $x = f(r \cdot P)$ とすると $x_{mean} = f(r_{mean} \cdot P)$

$$\frac{1}{A} \int f(r \cdot P) dr = x_{mean} \dots\dots\dots(32)$$

$P_c/P \ll 1$ であるから

$$\begin{aligned} x &= \sqrt{2Kt(P + P_c)} = \sqrt{2KtP \left(1 + \frac{P_c}{P}\right)} \\ &= \sqrt{2KtP} \sqrt{1 + \frac{P_c}{P}} = \sqrt{2KtP} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{P_c}{P} + \dots\right) \\ &\approx \sqrt{2KtP} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{P_c}{P}\right) \dots\dots\dots(33) \end{aligned}$$

(33) 式が求める浸潤長である。

以上の場合は $P_a = 0$, すなわち大気圧であつて, それ以上の圧力は加わらない場合である。しかし実際には毛細管の両端から接着剤が滲透していくと内圧は漸次高まつていくものであるから, その際の解を求めた。

ただし, 空気は毛細管から全然洩れないという

仮定が置いてある。

$$\frac{dx}{dt} = K \frac{P_0 + P_c - P_a}{x} \dots\dots(34)$$

$$P_r = \text{Const.}$$

$$P_a(L - x) = C \dots\dots\dots(35)$$

$$P_a = \frac{C}{L - x}$$

$$\frac{dx}{dt} = K \frac{P_0 + P_c - \frac{C}{L - x}}{x} \dots\dots(36)$$

$$= K \frac{(P_0 + P_c)(L - x) - C}{x(L - x)}$$

$K(P_0 + P_c) = \bar{K}$ と置けば

$$dt = \frac{(L - x)x}{\bar{K}(L - x) - C} dx \dots\dots(37)$$

$K(L - x) - C = \xi$ と置けば,

$$K(L - x) = \xi + C \dots\dots\dots(38)$$

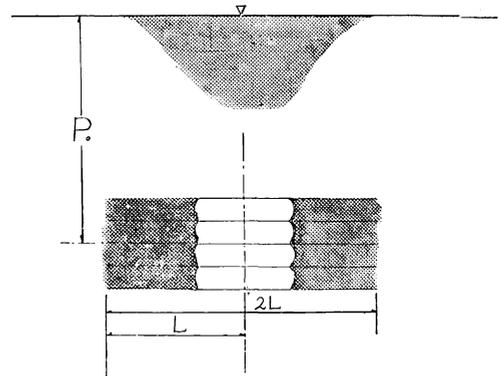


Fig. 12 毛細管の両端から接着剤が滲透する模型

The model of permeation of adhesives to the capillary (both side open)

$$(L-x) = \frac{\xi+C}{\bar{K}}$$

$$x = L - \frac{\xi+C}{\bar{K}}, \quad dx = -\frac{d\xi}{\bar{K}}$$

$$\begin{aligned} \therefore dt &= \frac{\frac{\xi+C}{\bar{K}} \left(L - \frac{\xi+C}{\bar{K}} \right)}{\xi} \left(-\frac{d\xi}{\bar{K}} \right) \\ &= -\frac{1}{\bar{K}^2} \frac{(\xi+C)(L-C/\bar{K}-\xi/\bar{K})}{\xi} d\xi \\ &= -\frac{1}{\bar{K}^2} \left\{ \left(L - \frac{C}{\bar{K}} - \frac{\xi}{\bar{K}} \right) + \frac{C}{\xi} \left(L - \frac{C}{\bar{K}} - \frac{\xi}{\bar{K}} \right) \right\} d\xi \\ &= -\frac{1}{\bar{K}^2} \left\{ \left(L - 2\frac{C}{\bar{K}} \right) - \frac{\xi}{\bar{K}} + \left(L - \frac{C}{\bar{K}} \right) \frac{C}{\xi} \right\} d\xi \dots\dots\dots(39) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t &= -\frac{1}{\bar{K}^2} \left\{ \left(L - \frac{2C}{\bar{K}} \right) \xi - \frac{\xi^2}{2\bar{K}} + C \left(L - \frac{C}{\bar{K}} \right) \log \xi \right\} + C' \\ &= -\frac{1}{\bar{K}^2} \left\{ \left(L - \frac{2C}{\bar{K}} \right) \left[\bar{K}(L-x) - C \right] - \frac{1}{2\bar{K}} \left[\bar{K}(L-x) - C \right]^2 \right. \\ &\quad \left. + C \left(L - \frac{C}{\bar{K}} \right) \log \left[\bar{K}(L-x) - C \right] \right\} + C' \dots\dots\dots(40) \\ &= -\frac{1}{\bar{K}^2} \left\{ \left(L - \frac{2C}{\bar{K}} \right) \left[-\bar{K}x + \bar{K}L - C \right] - \frac{1}{2\bar{K}} \left\{ (\bar{K}L - C)^2 - 2x(\bar{K} - C)\bar{K} + \bar{K}^2 x^2 \right\} \right. \\ &\quad \left. + C \left(L - \frac{C}{\bar{K}} \right) \log \left[\bar{K}(L-x) - C \right] \right\} + C' \\ &= -\frac{1}{\bar{K}^2} \left[-\frac{\bar{K}}{2} x^2 + Cx + (\bar{K}L - C) \left\{ L - \frac{2C}{\bar{K}} - \frac{1}{2\bar{K}} (\bar{K}L - C) \right\} \right. \\ &\quad \left. + C \left(L - \frac{C}{\bar{K}} \right) \log \left[\bar{K}(L-x) - C \right] \right] + C' \\ &= -\frac{1}{\bar{K}^2} \left[-\frac{\bar{K}}{2} x^2 + Cx + (\bar{K}L - C) \left(\frac{L}{2} - \frac{3C}{4\bar{K}} \right) + C \left(L - \frac{C}{\bar{K}} \right) \log \left[\bar{K}(L-x) - C \right] \right] + C' \\ &= \frac{x^2}{2\bar{K}} - \frac{C}{\bar{K}^2} x - \frac{1}{4\bar{K}^3} (\bar{K}L - C)(2\bar{K}L - 3C) - \frac{C}{\bar{K}^2} \left(L - \frac{C}{\bar{K}} \right) \log \left[\bar{K}(L-x) - C \right] \\ &\quad + C' \dots\dots\dots(41) \end{aligned}$$

Initial condition; $t=0 \rightarrow x=0$

$$0 = -\frac{1}{4\bar{K}^3} (\bar{K}L - C)(2\bar{K}L - 3C) - \frac{C}{\bar{K}^3} (\bar{K}L - C) \log \{ \bar{K}L - C \} + C' \dots\dots\dots(42)$$

$$\therefore C' = \frac{1}{4\bar{K}^3} (\bar{K}L - C)(2\bar{K}L - 3C) + \frac{C}{\bar{K}^3} (\bar{K}L - C) \log \{ \bar{K}L - C \}$$

$$\begin{aligned} \therefore t &= \frac{x^2}{2\bar{K}} - \frac{C}{\bar{K}^2} x - \frac{C}{\bar{K}^3} (\bar{K}L - C) \log \{ (\bar{K}L - x) - C \} + \frac{C}{\bar{K}^3} (\bar{K}L - C) \log \{ \bar{K}L - C \} \\ &= \frac{x^2}{2\bar{K}} - \frac{C}{\bar{K}^2} x - \frac{C}{\bar{K}^3} (\bar{K}L - C) \log \frac{\bar{K}(L-x) - C}{\bar{K}L - C} \dots\dots\dots(43) \end{aligned}$$

$\bar{K} = K(P_0 + P_C)$ であるから

$$\begin{aligned} t &= \frac{x^2}{2K(P_0 + P_C)} - \frac{C}{K^2(P_0 + P_C)^2} x - \frac{C}{K^3(P_0 + P_C)^3} \left\{ LK(P_0 + P_C) - C \right\} \\ &\quad \log \frac{K(P_0 + P_C)(L-x) - C}{K(P_0 + P_C)L - C} \dots\dots\dots(44) \end{aligned}$$

(44) 式と (30') 式との関係を見ると、(44) 式の第1項までであれば両式は一致している。第2項および第3項が修正項であるわけである。

3. 接着層からの木材中への接着剤の滲透（y方向にのみ流れが許されたときの変形）

前各項は透過量および滲潤長であるが、接着層変形の機作からいえばむしろ滲透量および滲潤速度が問題である。それを解決するために、未硬化接着層の変形の項において述べたごとく単純なる模型を考え、y方向にのみ流れが許されたときの変形として解析した。

被接着面に r なる径の毛細管が単位面積当りに n 個、θ なる角度をもつて傾斜しているときに孔隙面積率 C_A は

$$C_A = \frac{An\pi r^2 \sin \theta}{\pi R^2} = n\pi r^2 \sin \theta \dots \dots \dots (45)$$

となる。

滲潤速度

$$\frac{dx}{dt} = \beta e^{-\lambda t} \frac{P}{x} \dots \dots \dots (46)$$

なる関係が (4) 透過量に関する実験から明らかであるため、接着層の厚さの縮小は、被接着面より滲透することのみよるものとすれば、

$$-\frac{dh}{dt} \pi R^2 = 2C_A \int_0^R 2\pi r \frac{dx}{dt} dr = 2C_A \pi R^2 \frac{dx}{dt} \dots \dots \dots (47)$$

$$\therefore -\frac{dh}{dt} = 2C_A \frac{dx}{dt} \dots \dots \dots (48)$$

これを積分する $-h = 2C_A x + C_1$

しかるに、x=0, h=H において C₁=-H であるから

$$\therefore h = H - 2C_A x \dots \dots \dots (49)$$

(46) 式より

$$\frac{dx}{dt} \pi R^2 = \beta e^{-\lambda t} \frac{P \pi R^2}{x} = \beta e^{-\lambda t} \frac{W}{x}$$

$$\pi R^2 x dx = \beta e^{-\lambda t} W dt$$

これを積分すると

$$\pi R^2 \frac{x^2}{2} = -\beta W \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t} + C_2$$

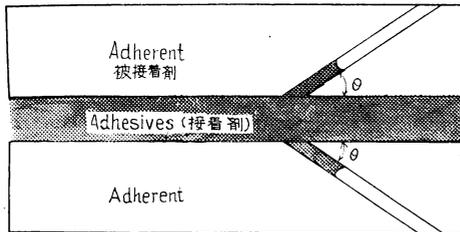


Fig. 13 y方向にのみ流れが許される
ときの接着層変形模型

The model of deformation caused by
compression treatment of viscous
glue-line, when the flow is
permitted only to y
direction

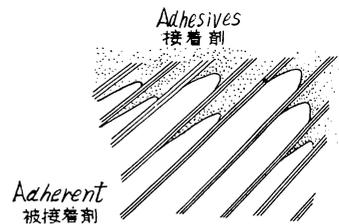


Fig. 14 縦断面における接着
剤侵入の形状

The states of permeation of
adhesives from the cross
section

しかるに $t=0$ において $x=0$ であるから

$$C_2 - \beta W \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t} = 0 \quad \therefore C_2 = \beta W \frac{1}{\lambda}$$

$$\therefore \frac{\pi R^2}{2} x^2 = \beta W \frac{1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

$$\therefore x = \sqrt{\frac{2\beta W}{\pi R^2 \lambda}} \sqrt{1 - e^{-\lambda t}}$$

$$\therefore h = H - C_A \sqrt{\frac{2\beta W}{\pi R^2 \lambda}} \sqrt{1 - e^{-\lambda t}}$$

$$\therefore h_{t=\infty} = H - C_A \sqrt{\frac{2\beta W}{\pi R^2 \lambda}} \dots \dots \dots (50)$$

以上の関係は柾目面および板目面を接着するときには普通見受けられるが、完全な柾目、板目面においてはほとんど無視してさしつかえないと思われるが(6)において実験を行つた。なお、木口面の接着の際には重要な関係があることはいうまでもない。

4. 透過量に関する実験^{1) 3) 7)}

Fig. 15 に示すような木材への溶液透過量測定装置を試作し、エアーコンプレッサーの圧搾空気をタンクに入れ圧力調節用の K 型調節器により所定圧力を溶液タンクに加え、⑧ に挿入してあるスギ、カ材材を透過した溶液を ⑨ の受器に取り透過量を測定した。

(i) 供試材 第1報に掲げたとおりの産地の心材を使用し試料は直径 1.5 cm の円柱形であつて、上下両面を木口面とし、繊維は通直になるように採材した。なお、透過する面積は 1.0 cm となるようにパッキングを ⑧ に挿入した。

(ii) 供試溶液 水および尿素樹脂接着剤キゲタライム (20°C における粘度 17.1 *pois*) を用いた。

(iii) 圧力 $1 \pm 0.1 \text{ kg/cm}^2$, $2 \pm 0.1 \text{ kg/cm}^2$ および $4 \pm 0.1 \text{ kg/cm}^2$ とし、測定個数はいずれも各箇とした。

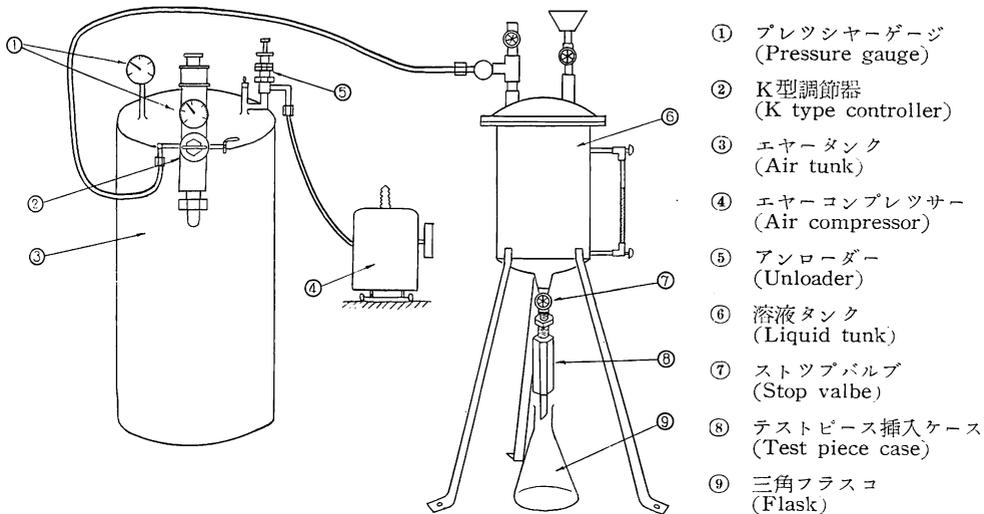


Fig. 15 木材への溶液透過量測定装置

The permeation volume measuring apparatus of liquid to wood

その実験結果は水については Fig. 16 および Fig. 17 に示すとおりにして、(27)式がほぼ当てはまるように思われる。

試料の長さ 15 mm, 圧力 $2 \pm 0.1 \text{ kg/cm}^2$ の場合には, スギにおいて $K = 0.000946$, $r = 0.00274 \text{ cm}$, カバにおいて $K = 0.000753$, $r = 0.00776 \text{ cm}$ となった。ちなみに (27) 式の A は, $C = 1 - \frac{r}{1.50}$ を用いて, 孔隙部分の面積を求め, r はスギ 0.39 g/cm^3 , カバ 0.70 g/cm^3 であるから C は前者で 0.74, 後者で 0.53 を用いた。

その際の透過量は Fig. 16 および Fig. 17 の値を透過面積 1 cm^2 に換算したことはいうまでもない。

尿素樹脂接着剤を透過せしめる時, 接触角は第3報の実験値 $30 \sim 35^\circ$, 平均 33° として, 理論値と実験とを求めると次のごとくなり, ほぼ妥当であることが判明した。

実験条件

$$P = 2 \pm 0.1 \text{ kg/cm}^2,$$

$$T = 20^\circ\text{C},$$

$$l = 15 \text{ mm},$$

$$t = 20 \text{ min}, \quad r_w = 1.15 \text{ g/cm}^3, \quad \theta = 33^\circ, \quad \eta = 17.1 \text{ pois}$$

透過量 理論値 ($Q_{20, th}$) 実験値 ($Q_{20, obs}$)

スギ 0.0956 g/cm^2 —

カバ 0.540 g/cm^2 0.485 g/cm^2

5. 滲潤長に関する実験

3 ply 以上の合板および多層集成材の表および裏板は (31), または (33) 式があてはまり, 心板は (44) 式があてはまるはずであるが, 実験装置の関係から (31) 式についての実験を Fig. 15 に示す装置を用い

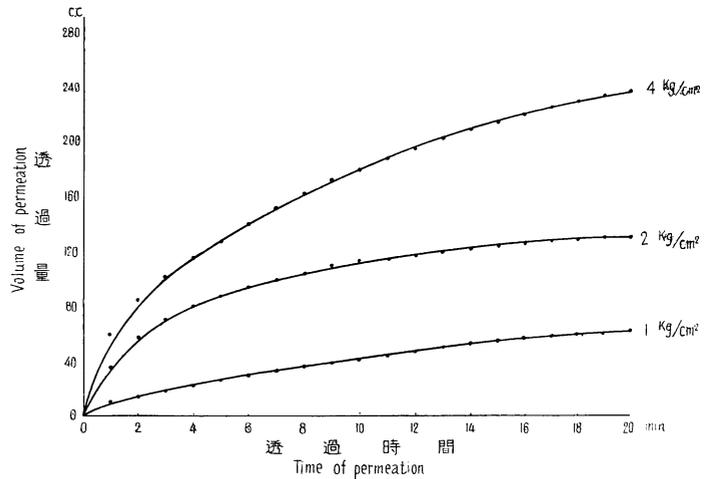


Fig. 16 圧力別透過量 (スギ)

Volume of permeation of various compressure (Sugi)

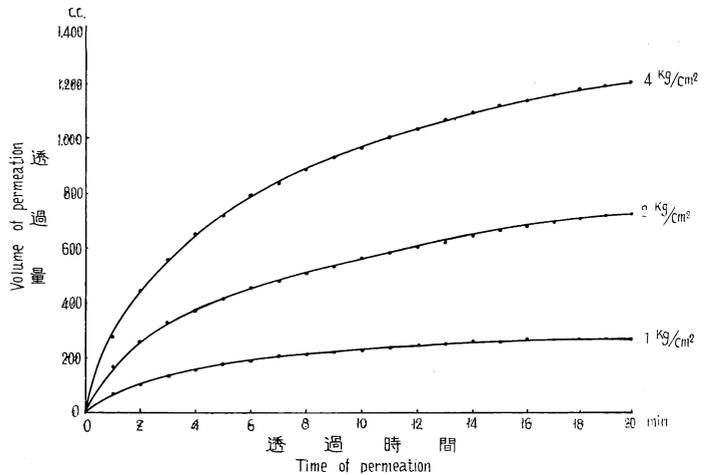


Fig. 17 圧力別透過量 (カバ)

Volume of permeation of various compressure (Kaba)

て実験を行つた。

(i) 供試材 第 1 報に掲げたとおりの産地の心材を使用し、試料は直径 1.5 cm の円柱形であつて上下両面を木口とし、繊維は通直になるように採材した。なお、透過する面積は 1.0 cm となるようにパツキングを ⑥ に挿入した。

試料の長さは 35 mm である。

(ii) 供試溶液 尿素樹脂接着剤キゲタライム (20°C における粘度 17.1 *pois*) を用いた。

(iii) 圧力 $1 \pm 0.1 \text{ kg/cm}^2$, $2 \pm 0.1 \text{ kg/cm}^2$ および $4 \pm 0.1 \text{ kg/cm}^2$

実験条件 $T = 20^\circ\text{C}$, $l = 35 \text{ mm}$, $t = 20 \text{ min}$, $r_w = 1.15 \text{ g/cm}^3$, $\theta = 33^\circ$,
 $\eta = 17.1 \text{ pois}$, $P_C = 0$

滲潤長	圧 力	理論値 ($x_{20 \cdot t h}$)	実験値 ($x_{20 \cdot o b s}$)
ス ギ	$1 \pm 0.1 \text{ kg/cm}^2$	0.101 cm	0.118 cm
〃	2 ± 0.1 "	0.143 "	0.150 "
〃	4 ± 0.1 "	0.202 "	0.194 "
カ バ	1 ± 0.1 "	0.997 "	1.103 "
〃	2 ± 0.1 "	1.410 "	1.385 "
〃	4 ± 0.1 "	1.994 "	1.756 "

実験値の測定法については詳細を第 7 報に述べるが、新たに考案した染色法により行つた。

6. 柁目および板目面からの滲透

Fig. 15 に示す木材への溶液滲透量測定器によりスギおよびカバの正確な柁目および板目材を用いて、しかも螢光による鏡査を行わんがために IV に記載した螢光体 $P_7 R_1$ を 0.5 μ 程度の微粉として、尿素樹脂接着剤に 0.5% 添加し、圧力 4 kg/cm^2 にて滲透せしめたが両者ともにほとんど滲透が見受けられなかつた。水分は秋材においてはほとんど滲透しないが、春材では 1 時間当り $0.01 \sim 0.02 \text{ g/cm}^2$ の滲透がみられるも、秋材層にて完全に遮断され次の春材には全然滲透していない事実が判明した。

V 接着層の厚さ

面が平滑でしかも接着剤の粘度が変化しない場合には、

(i) 接着剤の流れが Z 方向にのみ許される場合

$$h = H \cdot \sqrt{\frac{3\eta \cdot B \cdot l^3}{3\eta B l^3 + 4H^2 W t}} \dots\dots\dots (13)$$

(ii) 接着剤の流れが x, z 方向にのみ許される場合

$$h = H \cdot \sqrt{\frac{3\eta \pi R^4}{3\eta \pi R^4 + H^2 W t}} \dots\dots\dots (24)$$

(iii) 接着剤の流れが y 方向にのみ許される場合

$$h_{t=\infty} = H - C_A \sqrt{\frac{2\beta W}{\pi R^2 \lambda}} \dots\dots\dots (50)$$

しかし、尿素および石炭酸樹脂接着剤を用いるときには、硬化剤が添加されるため、2 において実験的に求めたごとく、塗付後 t 分経過した接着剤の粘度 η' は

$$\eta' = \eta_0 e^{\alpha t} \dots\dots\dots (51)$$

なる変化を示すことから、推積時間 t 分経過後には、

(i) 接着剤の流れが z 方向にのみ許される場合

$$h = H \sqrt{\frac{3\eta' B l^3}{3\eta' B l^3 + 4H^2 W t}} \dots\dots\dots (52)$$

(ii) 接着剤の流れが x, z 方向にのみ許される場合

$$h = H \sqrt{\frac{3\eta' \pi R^4}{3\eta' \pi R^4 + H^2 W t}} \dots\dots\dots (53)$$

(iii) 接着剤の流れが y 方向にのみ許される場合

$$h_{t=\infty} = H - 2C_A \sqrt{\frac{2\beta' W}{\pi R^2 \lambda'}} \dots\dots\dots (54)$$

ちなみに β' および λ' は η の函数である。

この h にて接着層の厚さが決定される場合は面が平滑であるという仮定がはいつているが、第 6 報の VII の実験結果からも当然面の粗さの影響があるわけであつて、材面が凹凸であつたり接着剤が一部に浸入するがその平均厚さを H_r とすれば、接着層の厚さは次式により決定される。

(i) 接着剤の流れが z 方向にのみ許される場合

$$h = (H - H_r) \sqrt{\frac{3\eta' B l^3}{3\eta' B l^3 + 4H^2 W t}} \dots\dots\dots (55)$$

(ii) 接着剤の流れが x, z 方向にのみ許される場合

$$h = (H - H_r) \sqrt{\frac{3\eta' \pi R^4}{3\eta' \pi R^4 + H^2 W t}} \dots\dots\dots (56)$$

(iii) 接着剤の流れが y 方向にのみ許される場合

$$h_{t=\infty} = (H - H_r) - 2C_A \sqrt{\frac{2\beta' W}{\pi R^2 \lambda'}} \dots\dots\dots (57)$$

かかる接着層の厚さも硬化の過程において減少するように思われるが、 5 kg/cm^2 以上の圧縮力を加えた場合はほとんど減少しない。

さて、かかる理論式による接着層の厚さと実験値とを対比すれば次のごとくなり、若干の差は見受けられるが、それは低圧の場合は接着層の縮小であり、高圧では材の捩屈の影響に主としてよるものと思われる。

実験条件

供試材 カバ板目 (目切のないように特に注意した)

$d = 2.5 \text{ cm}$

$R = 8.25 \text{ cm}$

$u = 11.3\%$

$W_s = 20 \text{ g}/(30 \text{ cm})^2$

接着剤の種類は、尿素樹脂、硬化剤 20% 溶液 5% 添加、 $\eta'_0 = 20.5 \text{ pois}$ 、推積時間 30 分後の $\eta_{30} = 170 \text{ pois}$

実験結果

算出条件 The conditions of calculation
 $R = 8.25 \text{ cm}$
 $W_s = 20 \text{ g}/(30 \text{ cm})^2$
 $\eta'_0 = 170 \text{ pois}$
 $\eta_{30} = 20.5 \text{ g}/(30 \text{ cm})^2$
 $u = 11.3\%$
 $H_r = 5.0 \text{ mm}$

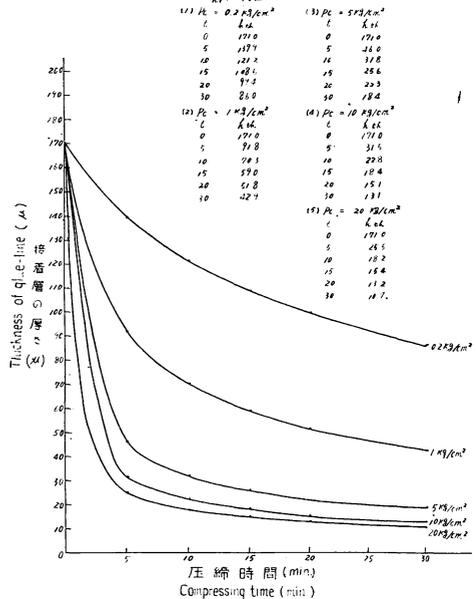


Fig. 18 (48)式による $h_{t,h}$ の時間的变化
 The elapse of the change of theoretical adhesive layer thickness $h_{t,h}$ by (48) formula

P	$h_{th} (\mu)^*$	hors (μ)
0.2 kg/cm^2	86.0	55.0
1 kg/cm^2	42.9	45.0
5 kg/cm^2	18.4	19.0
10 kg/cm^2	13.1	9.5
20 kg/cm^2	10.7	4.0

なお、接着層の厚さ hors は接着層の 7mm の長さを 450~500 箇所測定してその平均を示し、その顕微鏡写真は Fig. 19 および Fig. 20 のとおりである。

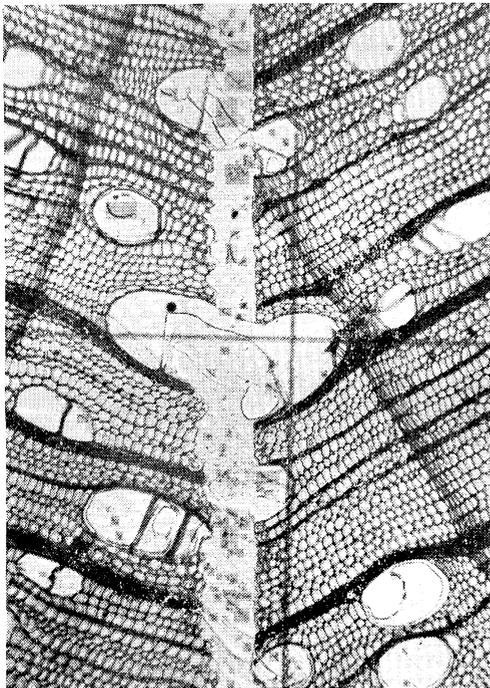


Fig. 19. 圧縮力 1 kg/cm^2 の場合におけるカバ試験片の接着層
Adhesives layer (glue-line) of Birch adherent were compressed 1 kg/cm^2

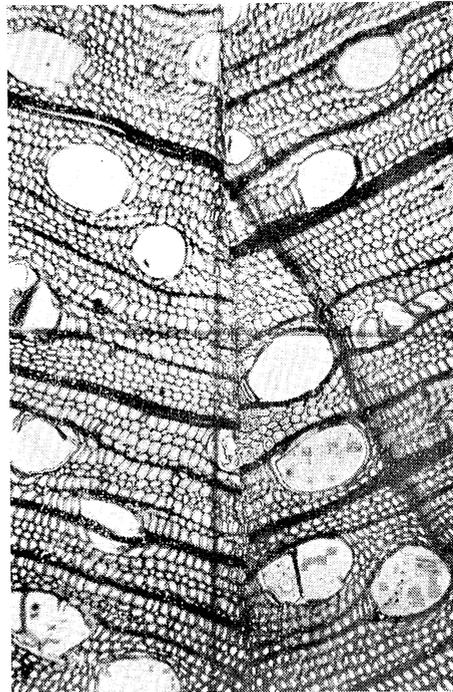


Fig. 20. 圧縮力 20 kg/cm^2 の場合におけるカバ試験片の接着層
Adhesives layer (glue-line) of Birch adherent were compressed 20 kg/cm^2

Table 1. 接着層の厚さと接着性能

The relation between the thickness of adhesives layer and adhesion quality

圧縮力 kg/cm^2 Pressure	接着層の厚さ μ Thickness of adhesives layer	常態強度 kg/in^2 Normal adhesion strength	木部破断率 % Wood failure
0.2	55.0	191.0	19.5
1.0	45.0	201.1	45.6
500	19.0	223.5	47.0
10.0	9.5	251.0	70.0
20.0	4.0	268.6	71.0

* h_{th} の時間的变化は Fig. 18 に示す。

つぎに、それと同一条件にて接着した試験法の接着性能は Table 1 のとおりであつて、欠膠をもたらさない範囲においてはたしかに接着力および木部破断率は向上している。接着層の厚さと接着力の関係を研究した MAXWELL, J. W.⁹⁾ の結果とほぼ同一傾向を示している。

以上の結果から接着層の適当な厚さにもたらすための圧縮力が粘度および塗付量が変数であつても理論的に解析可能となつたことは新知見であると思われる。

VI 摘 要

被接着材間に薄い接着層を欠膠部を生じない程度に形成し、その際に接着面に開口した導管、木繊維および仮導管の一部には接着剤が滲透し、しかる後に未硬化接着剤中の溶剤を拡散せしめると同時に硬化剤の化学作用により接着剤を硬化せしめ固化した接着層を得て、はじめて接着作業が完了する。

かかる過程を単純化して理論化することより、経験により従来もつばら行われている接着作業に基礎を与えることになり、かつ接着作業の改良に示唆を与えることになると考え、次のごとく解析を行つた。

1. 未硬化接着層の圧縮による変形

圧縮による変形をなるべく単純化して解析するために、硝子板を木材の代りに供試材料とし解析すると、

- (1) 一次元のみ接着剤が流れる場合、すなわち、x 方向のみ流れが許されるとき接着層の変形、

$$h = H \cdot \sqrt{\frac{3\eta \cdot B \cdot l^3}{3\eta B l^3 + 4H^2 W t}} \dots\dots\dots (13)$$

- (2) 二次元のみ接着剤が流れる場合、すなわち、x および z 方向への流れが許されるとき接着層の変形、

$$h = H \cdot \sqrt{\frac{3\eta \pi R^4}{3\eta \pi R^4 + H^2 W t}} \dots\dots\dots (24)$$

なる結果を得て、 $h \propto \sqrt{\eta}$ 、 $h \propto \frac{1}{\sqrt{t}}$ なることがいえ、換言すれば塗付した時の初期厚さ H は粘度 η の 1/2 乗に比例して変化し、 η が大であれば他の条件が一定のとき、接着層の厚さ h は大となる。また、接着層の厚さは圧縮後の時間 t の -1/2 乗に比例して小となることがいえる。

上記の式を証明するために、Fig. 4 に示すごとく平衡式プレスを用いて実験を行つた結果 H, η , R, W を実験に用いた値を入れて計算した h_{th} と実験値 h_{obs} とは Fig. 5, Fig. 6 および Fig. 7 に示すように非常によく一致した。

2. 未硬化接着層の粘度変化

木材に塗付された接着層の粘度が圧縮までいかに変化するかは重要な問題であるため種々の方法を行つたが、目的を果し得ないので小型落球粘度計に入れて粘度を測定した。

Fig. 10 に示す実験値から実験式を求めると次のごとくなる。

$$\eta' = \eta_0 e^{0.48t} \dots\dots\dots (25)$$

3. 接着剤の滲透

木材の接着剤の吸収は毛細管現象に基くものと考え、接着剤が被接着材面に塗付された後、圧縮により木材を構成する毛細管中に滲透していく機構を研究し、さらに注入装置を用いて理論値との対比を行つた。

(1) 透 過 量

Darcy's law および Poiseulle の法則より誘導すると

$$Q = \frac{\gamma_w r^2 \cos \theta}{8\eta} \dots\dots\dots(27)$$

$$K = \frac{\gamma_w r^2 \cos \theta}{8\eta} \dots\dots\dots(28)$$

なる関係がある。

(2) 滲 潤 長

木材への接着剤の滲透機構を明らかにするため、Fig. 11 に示すような模型を用いて POISEULLE の法則より誘導すると

$$\begin{aligned} \text{滲潤長 } x &= \sqrt{2Kt(P + P_C)} \\ &\doteq \sqrt{2KtP} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{P_C}{P} \right) \dots\dots\dots(33) \end{aligned}$$

となる。

以上の場合には $P_a = 0$ すなわち大気圧であつて、それ以上の圧力は加わらない場合である。しかし、実際には毛細管の両端から接着剤が滲透していくと内圧は漸次高まつていくものであるから、その際の解を求めた。

$$\begin{aligned} t = \frac{x^2}{2K(P_0 + P_C)} - \frac{C}{K^2(P_0 + P_C)^2} x - \frac{C}{K^3(P_0 + P_C)} \left\{ LK(P_0 + P_C) - C \right\} \\ \log \frac{K(P_0 + P_C)(L - x) - C}{K(P_0 + P_C)L - C} \dots\dots\dots(44) \end{aligned}$$

(44) 式と (30') 式との関係を見ると (44) 式の第 1 項までであれば両式は一致している。第 2 項および第 3 項が修正項である訳である。

(3) 接着層からの木材中への接着剤の滲透 (y 方向にのみ流れが許されたときの变形)

前各項は透過量および滲潤長であるが、接着層变形の機作からいえばむしろ滲透量および滲潤速度が問題である。それを解決するために、未硬化接着層の变形の項において述べたごとく単純なる模型を考え、y 方向にのみ流れが許されたときの变形として解析した。

$$\begin{aligned} h &= H - C_A \sqrt{\frac{2\beta W}{\pi R^2 \lambda}} \cdot \sqrt{1 - e^{-\lambda t}} \\ h_{t=\infty} &= H - C_A \sqrt{\frac{2\beta W}{\pi R^2 \lambda}} \dots\dots\dots(50) \end{aligned}$$

(4) 透過量に関する実験

Fig. 15 に示すような木材への溶液滲透量測定装置を試作し、透過量を測定した。その実験結果は、水については Fig. 16 のとおりにして (27) 式がほぼあてはまることが判つた。つぎに接触角は第 3 報の接触角の実験データから $30^\circ \sim 35^\circ$ 、平均 33° として理論値と実験値を求めると次のごとくなり、ほぼ妥当であることが判明した。

透過量	$Q_{20th.}$	$Q_{200rs.}$
カバ	0.0136 g/cm ²	0.015 g/cm ²
スギ	0.0006 g/cm ²	—

(5) 滲潤長に関する実験

Fig. 15 に示す装置を用いて実験を行つた。その結果から (31) 式はほぼ妥当なることが判明した。

滲潤長	P (kg/cm ²)	x _{20th.} (mm)	x _{200th.} (mm)
スギ	1±0.1	0.025	0.02
〃	2±0.1	0.033	0.03
〃	3±0.1	0.045	0.05
カバ	1±0.1	5.20	5.50
〃	2±0.1	7.40	7.75
〃	3±0.1	9.00	9.45

4. 接着層の厚さ

面が平滑でしかも接着剤の粘度が変化しない場合には

(i) 接着剤の流れが z 方向にのみ許される場合

$$h = H \cdot \sqrt{\frac{3\eta B I^3}{3\eta B I^3 + 4H^2 Wt}} \dots\dots\dots(13)$$

(ii) 接着剤の流れが x, z 方向にのみ許される場合

$$h = H \cdot \sqrt{\frac{3\eta \pi R^4}{3\eta \pi R^4 + H^2 Wt}} \dots\dots\dots(24)$$

(iii) 接着剤の流れが y 方向にのみ許される場合

$$h_{t=\infty} = H - C_A \sqrt{\frac{2BW}{\pi R^2 \lambda}} \dots\dots\dots(50)$$

塗付後 t 分経過した接着剤の粘度 η' は

$$\eta' = \eta_0 e^{\mu t} \dots\dots\dots(51)$$

なる変化を示すことから、堆積時間 t 分経過後には

(i) 接着剤の流れが z 方向にのみ許される場合

$$h = H \sqrt{\frac{3\eta' B I^3}{3\eta' B I^3 + 4H^2 Wt}} \dots\dots\dots(52)$$

(ii) 接着剤の流れが x, z 方向にのみ許される場合

$$h = H \sqrt{\frac{3\eta' \pi R^4}{3\eta' \pi R^4 + H^2 Wt}} \dots\dots\dots(53)$$

(iii) 接着剤の流れが y 方向にのみ許される場合

$$h_{t=\infty} = H - 2C_A \sqrt{\frac{2\beta' W}{\pi R^2 \lambda'}} \dots\dots\dots(54)$$

ちなみに β' および λ' は η の函数である。

材面の凹凸および接着剤が浸入する平均の厚さを H_r とすれば、接着層の厚さは次式により決定される。

(i) 接着剤の流れが z 方向にのみ許される場合

$$h = (H - H_r) \sqrt{\frac{3\eta' B I^3}{3\eta' B I^3 + 4H^2 Wt}} \dots\dots\dots(55)$$

(ii) 接着剤の流れが x, z 方向にのみ許される場合

$$h = (H - H_r) \sqrt{\frac{3\eta' \pi R^4}{3\eta' \pi R^4 + H^2 Wt}} \dots\dots\dots(56)$$

(iii) 接着剤の流れが y 方向にのみ許される場合

$$h_{t=\infty} = (H - H_r) - 2C_A \sqrt{\frac{2\beta' W}{\pi R^2 \lambda'}} \dots\dots\dots(57)$$

かかる理論式による接着層の厚さと実験値とを対比すれば、次のごとくなる。

P (kg/cm^2)	$h_{th.}$ (μ)*	$h_{ovs.}$ (μ)
0.2	86.0	55.0
1	42.9	45.0
5	18.4	19.0
10	13.1	9.5
20	10.7	4.0

接着層の厚さと接着性能との関係は Table 1, 顕微鏡写真は Fig. 19, Fig. 20 に示す。

以上の結果から接着層の適当な厚さにもたらしするための圧縮力が粘度および塗付量が変数であつても理論的にはほぼ解析可能となつたことは新発見であると思われる。

文 献

- 1) KNIGHT, R. A. G.: Adhesives for wood (1952)
- 2) De BRUYNE, N. A.: Structural adhesives (1951)
- 3) 河田幸三・辻 三郎: 理化学研究所彙報 24, 83, 141 (1948)
- 4) HIGGINS H. G. and PLOMLEY: Rheological changes during gel formation in adhesive systems, Australian Journal of Applied Science, Vol. 1, Num. 1 (1950)p.1~36
- 5) KÖLJO, Boris: Sornka Träforskningsinstitutet, Trätetenika Andelungen 25B (1951)
- 6) MAXWELL, J. W.: Shear strength of glue joints as affected by wood surfaces and pressures, Technical publication 64. Bulletin of the New York state college of forestry at Syracuse university.
- 7) STAMM, A. J.: Passage of liquids, vapors and dissolved materials through wood, U. S. Dept. Agr. Techn. Bull. 929 (1946)

* $h_{th.}$ の時間的变化は Fig. 18 に示す。

Research for the Improvement of Wood (Rep. No. 4)
Study on the forming of adhesive-layer (glue-line)

Kunisuke HORTOKA

(Résumé)

I Introduction

MAXWELL and POLTIKA have reported that to the extent that starved joint is not brought, the thinner the glue-line thickness is, the better result it gets. We investigated the relation among the three—rate of spreading, viscosity of adhesives, and compressive pressure—furthermore, we investigated deeper into the change of viscosity and impregnation and deliberated on how we could get the desirable glue-line thickness. As a result we were able to get much additional knowledge such as follows:

II The deformation of uncured glue-line on the condition of non-permeation

Through the study concerned with deformation caused by compression treatment of viscous glue-line, the glue-line thickness h is conducted theoretically—

when the flow is permitted only in X direction

$$h = H \sqrt{\frac{3\eta B l^3}{3\eta B l^3 + 4H^2 Wt}}$$

when the flow is permitted only in X and Z directions

$$h = H \sqrt{\frac{3\eta \pi R^4}{3\eta \pi R^4 + H^2 Wt}}$$

and about the latter formula, it was made clear by experimentation that the theoretical value is right (reber to Fig. 1~7).

III The change of viscosity of uncured glue-line

By experimentation, the relation $\eta' = \eta_0 e^{-0.43t}$ between the change of viscosity of glue-line and urea resin adhesives could be obtained (reber to Fig. 10).

IV The impregnation of adhesives

The volume of its impregnation of the glue-line applies to Poiseule's formula $Q = \frac{r_w r^2 \cos \theta}{8} iA$, and about the length of penetration, the relation $X = \pm \sqrt{2K(P - P_0)t}$ was found (reber to Fig. 11~12, 15~18).

V The thickness of adhesives layer (glue-line)

In the case of the impregnation of adhesives from the glue-line into wood, in other words, in the case of deformation when the flow is permitted only in Y direction, the formula $h_{t \rightarrow \infty} = H - C_A \sqrt{\frac{2\beta W}{\pi R^2 \lambda}}$ was found (reber to Fig. 13~14).

If the viscosity after assembling is η' and the mean depth of penetration of adhesives H_r , might be got by $h = (H - H_r) \sqrt{\frac{3\eta' \pi R^4}{3\eta' \pi R^4 + H^2 Wt}}$, it was made clear that the thickness of glue-line could be concluded (reber to Fig. 19~20, Table 1).