積層接着された木材の内部応力に関する研究

椋 代 純 輔(1)

緒 言
I 既 往 の 研 究
Ⅱ 応力緩和および残留ひずみと弾性係数4
Ⅱ-1 研究の目的
Ⅱ-2 実 験 方 法
Ⅱ-3 実験結果および考察
Ⅲ 積層接着された木材中の残留応力
Ⅲ-1 研究の目的
Ⅲ-2 残留応力と接着剤の種類
Ⅲ-3 残留応力と接着時の熱圧温度
Ⅲ-3-1 単板積層板
Ⅲ-3-2 合 板
Ⅲ-3-3 実験結果および考察
Ⅲ-4 残留応力と被接着材の含水率
Ⅲ-4-1 応力解析方法
Ⅲ-4-2 実 験 方 法
Ⅲ-4-3 実験結果および考察
Ⅲ-5 考 察
Ⅳ 積層接着された木材の含水率変化によって発生する内部応力
Ⅳ-1 ひき板集成材
Ⅳ-1-1 研究の目的
Ⅳ-1-2 応力解析方法
Ⅳ-1-3 実 験 方 法
Ⅳ-1-4 実験結果および考察
Ⅳ-2 ひき板集成材のはく離と内部応力との関係
Ⅳ-2-1 はく離促進試験方法
Ⅳ-2-2 実験結果および考察50
Ⅳ-3 化粧集成柱
〒-3-1 研空の日的
IV-3-2 応力解析方法····································
IV-3-2 応力解析方法····································
IV-3-2 応力解析方法····································
IV-3-2 応力解析方法····································
IN 0 1 朝 元 0 日 朝 IN - 3-2 応力解析方法····································

目 次

(1) 元木材部材料科物理研究室・現京都府立大学農学部助教授,農学博士

緒 言

木材の接着に関しては、従来主として接着理論、接着剤について研究され、これらの研究結果は近年に おける合成樹脂化学工業の発展と相まって、合板、集成材、パーティクルボードなど、接着工程を必要と する工業をめざましく発展させた。

しかしながら,これらの接着された木質材料は,木材のもつ異方性の改良,節などの欠点の除去あるい は分散による強度的性質の改良,小径木の利用など幾多の長所をもつ反面,接着されたことによって.は く離,割れ,狂いなどの欠点を生じている。

接着された木材間の物理的性質,力学的性質の差異に基づく内部応力が大きく影響すると考えられてい るはく離,割れ,狂いなどの欠点に対しては、従来製品あるいは試片によってこれらの現象を観測して経 験的に適合条件を模索するという方向がとられてきた。

しかしながら,これらの問題はその起因と考えられる内部応力との関連において研究されなければ本質 的な解決は不可能であると考えられる。

このように接着された木材中の内部応力は,重要な意味をもつにもかかわらず実際の応力状態について は全く研究されていないといっても過言ではない。

本研究は積層接着された木材の内部応力について,理論的,実験的に解析し,内部応力の実態を明らか にして,集成材,合板などの積層接着された木質材料の欠点防止の方策を考察し,これら製品の製造法の 確立に寄与しようとしたものである。

本研究を行なうにあたり,種々ご配慮をいただいた林業試験場上村 武木材部長,加納 孟材料科長,蕪 木自輔物理研究室長,その他関係者の方々,また本論文の取りまとめにさいして多くの助言をいただいた 京都大学農学部中戸莞二教授ならびに木材研究所満久崇磨教授に対し深じんな謝意を表する次第である。

I 既往の研究

DE BRYNE ら¹⁾ および BIKERMANN²⁾ は,接着における内部応力の重要性を指摘しているが,これについての研究は少ない。

小畠ら¹⁴⁾¹⁵⁾は、金属接着において、接着層中に生ずる残留応力が接着強度の低下をもたらすとの考えを 持って、金属ープラスチックー金属積層材中のプラスチック板の熱応力について解を求め、これと光弾性 の結果とがよく一致するとしているが、この結果は Fig. Ⅳ-19 に示す。

一方,木材が乾燥して収縮する際の内部応力について、SCHNIEWIND は次のように分類している³⁰⁾。

第1次内部応力

細胞膜の層状構造によるもので、単一細胞に発生する応力。

第2次内部応力

顕微鏡的構造によるもので、収縮量を異にする組織または細胞集合体に発生するもの。

第3次内部応力

乾燥中の水分傾斜,成長域(アテと正常木部)での収縮量の差異にもとづく内部応力のように肉眼的構造におけるもの。

接着によって生ずる内部応力の発生段階についても、微視的ないし巨視的には同様なことがいいうるだ

ろう。このなかで主として第3次内部応力が主要な役割を演じるものと考えられる。この巨視的な第3次 内部応力については,従来 ELLWOOD³¹⁾, MCMILLEN³²⁾³³⁾, YOUNG³⁴⁾³⁶⁾, YOUNG and NORRIS²³⁾,小 倉³⁷⁾,福山³⁸⁾³⁹⁾などによって主として乾燥応力について研究された。

接着によって生ずる内部応力については、 DIETZ ら¹⁶⁰が集成材の接着層に生ずる 応力を数学的に解析 して、次のような結果を示し、上下面からの乾燥によって生ずる接着層に垂直な応力が、側面で高いこと を指摘している点が注目される。

2 plies のひき板集成材について

1) 一方のひき板が一様に含水率変化をうけた場合,両側面の付近の接着層に次式で示される最大せん 断応力 でomax を生ずる。

$$\tau_{0max} = 0.7 \varepsilon_0 \sqrt{E_x G_{xy}}$$

ただし、 $\varepsilon_0 = \alpha (M_2 - M_1)$
 α : 含水率 1 %の変化にともなう膨張または収縮率
 M_1 : 初期の含水率
 M_2 : 変化後の含水率
 E_x : x 方向の弾性係数
 G_{xy} : x - y 面のせん断弾性係数

2) ひき板の厚さ方向の含水率変化が上下面より放物線状に生じている場合,両側面の接着層に生じる 層に垂直な最大応力 σ_{0max} は

 $\sigma_{0_{max}} = 0.45 \varepsilon_0 \sqrt{E_x \sqrt{2E_y G_{xy}}}$ ただし、 $E_y : y$ 方向の弾性係数

井阪¹⁹は合板とプラスチック板を接着した積層板について、含水率変化によって生ずる内部応力をはり の曲げ理論によってそりと関連させ、そりは次式によって示されるとした。

$$y = \frac{3}{4} \cdot \frac{a c (1 + c^2) (\alpha_1 m_1 - \alpha_2 m_2)}{1 + 6a c^2 + 4a c + 4a c^3 + a^2 c^4} \cdot \frac{B^2}{H}$$

ここで, y:積層はりの中央における矢高

a:合板のはりの軸方向の弾性係数/プラスチック板のはりの軸方向の弾性係数

c: 合板の厚さ/プラスチック板の厚さ

H:はりの全高さ

B:はりの長さ

α1:プラスチック板の含水率1%の変化にともなうはりの軸方向の膨張または収縮率

*m*₁:プラスチック板の含水率変化

α2: 合板の含水率1%の変化にともなうはりの軸方向の膨張または収縮率

m2: 合板の含水率変化

しかしながら,上式は力学的観点からそりについての考え方を式によって表わしたに過ぎず,実験値と は大きな開きを示している⁵¹。

浅野ら¹⁷は、表面から薄片をスライスして生ずる曲率変化から川田の式¹⁰を用いて、集成材中の繊維方 向の内部応力を計算し、ユリア樹脂接着剤の硬化にともなう収縮応力がフェノール樹脂接着剤のそれより も大きいことを明らかにしたが、スライス片の厚さが 1~1.5mm 程度もあったため、接着層近辺の応力

— 3 —

状態を明確に求めたとはいい難い。

SCHNIEWIND¹⁸⁾ は木材の表面割れが放射組織とそれに接する 垂直組織との膨張または収縮の差による 応力集中によって生ずると考え、California black oak (*Quercus Kelllogii* NEWBERRY.)の2枚の板の 間に接着されたプラスチック板中の、Oak 材の乾燥にともなう応力状態を光弾性によって解析し、側面 付近の接着層にせん断応力が集中し、接着層に垂直な大きな応力が表われることを示している(Fig. IV-20 参照)。試片の幅方向の両側面で、接着層における接着層と平行方向の応力およびせん断応力は、理論 的に0とならなければならないにもかかわらず、大きい引張応力を示し、またせん断応力が両側で集中す るとしている点はおそらく誤っていると考えられる。

KEYLWERTH^{25)~20)} は膨張が制約されている場合の接線、半径、繊維方向の膨潤応力およびひずみを測定し、またコンクリートと接着されたパーケット・フローリングの内部応力について、はりの曲げ理論より検討を加え、これと裏打ちコンクリートの破壊との関連について論じている。

則元ら²⁰⁾²¹⁾は,各種合成樹脂およびラッカーを材面に塗付した場合の内部応力を,応力緩和測定装置と 類似の装置を用いて測定し,硬化過程における応力の発生状態について検討を加えた。

また,接着によって生ずる内部応力に関連した研究として,藤田ら²²⁾²³⁾の研究があり,引張応力下にお ける乾燥ひずみの測定を行ない,乾燥割れは,水分が移動しつつある過程での木材実質部分のすべりやす さに強く影響されることを指摘している。

以上のように,接着によって生ずる内部応力に関する研究は,現在まではほとんど行なわれていない。 また,これらの少ない既往の研究は,はなはだ断片的であるといわざるを得ない現状である。

Ⅱ 応力緩和および残留ひずみと弾性係数

Ⅱ-1.研究の目的

接着によって生ずる内部応力の時間的経過は、木材のクリープならびに応力緩和の性質に関連し、非常 に複雑なものと考えられる。これについての知見をうること、および直接には本研究の内部応力解析に必 要な木材の瞬間弾性回復の変位量および弾性係数を求めることに、本章の研究目的がある。

Ⅱ-2. 実 験 方 法

前記の2つの目的のために、本研究においては応力緩和試験を行なって、緩和特性を知るとともに、一 定時間後に除荷したときの瞬間弾性回復ひずみ、クリープ回復ひずみおよび瞬間回復時における弾性係数 を測定した。

A. 応力緩和測定装置

荷重測定ゲージ:測定ゲージとして下記仕様の非接着ストレイン・ゲージ(東洋測器株式会社製 TI 型) を用いた。

最大荷重容量,500gおよび1000g

精度,最大荷重容量の±0.25%以内

最大変位置, ±0.04mm

荷重指示計:電子管自動平衡式指示計(東洋測器株式会社製 SS-8D 型)を用いた。仕様は下記のとおりである。

精度,指示計フルスケールの ±0.5%

- 4 -

電源変動 ±10%以内において安

定

荷重形式:両端単純支持支点,中央 集中荷重の曲げ方式でスパン 7.5cm (Photo, II-1, II-2 参照)。

調湿槽:透明塩化ビニール槽に曲げ 試験装置および飽和塩溶液を入れて密 閉し,槽内での操作は槽に装着のゴム 手袋を通して槽の外部より行なえるよ うにした。

負荷および除荷方法:曲げ試験装置 の下部にある 微動 ネジに より 行なっ た。 負荷および 除荷速度はほぼ 40g/ sec 程度であった。

B. 試片の形状,大きさ

比重 0.45. 年輪密度 7.5 のエゾマ ツ (*Picea jezoensis* CARR.) 同一部材 より 採取 した 厚さ 0.35cm, 幅 1.5 cm, 長さ 9cm の試片を用いた。な お, 負荷面 (1.5×9cm) は 板目およ び柾目である。

C. たわみ測定方法

たわみは試片の中央で,読み取り顕 微鏡により 1/100mm まで読み取っ

Photo. II-1 応力緩和測定装置 The apparatus for stress relaxation.



Photo. Ⅱ-2 負 荷 装 置 Details of the apparatus for the loading.

た。負荷または除荷後読み取るまでに約10秒程度の時間を要した。

実験は次の項目について行なった。

1) 温度 20°C で、Ca(NO₃)₂·4H₂O の飽和溶液上で調湿された試片(平衡含水率 11.7%), NaCl の 飽和溶液上で調湿された試片(16.0%), Na₂CO₃·10H₂O の飽和溶液上で調湿された試片(21.4%)を、 おのおのの飽和溶液上の同一温湿度条件下において応力緩和試験を 48 時間行なった。その後含水率 16.0 %, 21.4% の板目試片では除荷後の瞬間弾性およびクリープ回復たわみを測定した。瞬間回復弾性係数 は、除荷直前の荷重および瞬間弾性回復たわみより算出し、これらと緩和試験前にあらかじめ同一温湿度 条件下で、含水率 16.0% では 110g, 21.4% では 60g の重錘を負荷して比例限度内で約 10秒後にたわ みを測定して算出した弾性係数と比較した。

2) 含水率16.0% に調湿した試片を,温度20°C,関係湿度92%の条件下で4日間(最終平均含水率20.1%),含水率21.4% に調湿した試片を温度20°C,関係湿度76.5%の条件下で4日間(最終平均含水率17.6%)緩和試験を行なった。

3) 含水率 16.0% に調湿した板目試片に一定たわみを与えた後, 短時間内に 湿度変化の サイクルを与







Fig. Ⅱ-3 水分平衡状態における応力緩和曲線
 ーエゾマツ,板目試片,平衡含水率 21.4% P:緩和時の荷重, P₀:初期荷重
 The stress relaxation curves of flat grained Ezomatsu

specimens in 21.4% moisture content.

えて応力緩和状態を調べた。

なお、おのおのの含水率での破壊荷重は、ほぼ次のとおりであった。

板目試片(おのおの4試片についての平均値)

11.7%	920 g	
16.0%	855 g	
21.4%	650 g	
柾目試験(おの:	おの4試片についての平均(直)
16.0%	1220 g	
21.4%	1060 g	

Ⅱ-3.実験結果および考察

実験結果は, Fig. Ⅱ-1~7, Table Ⅱ-1 に示すとおりである。

Fig. Ⅱ-1~5 の緩和曲線は初期荷重に対する測定時の荷重の比率で示した。 これらの応力緩和試験結果から次のことがいえよう。



1) 含水率 11.7~21.4% の範囲内の水分平衡状態の場合.含水率 11.7, 16.0% では必ずしもそういえ ないが、与えたたわみ量が大きいほど応力緩和は大で、等しいたわみの場合含水率が低いほど応力緩和は 小である (Fig. Ⅱ-1~3)。

2) 水分平衡状態における応力緩和よりも非平衡状態のそれが初期において大きく,等しい含水率変化 範囲の水分非平衡状態について見れば,乾燥過程よりも吸湿過程の応力緩和は大で,応力緩和のひずみ依 存性は明らかでない(Fig. II-4~5)。



The stress relaxation curves of 16.0% moisture content specimens and adsorbing, desorbing specimens.

Specimen : edge grained Ezomatsu.

Adsorption : 16.0→20.4%, Desorption : 21.4→17.7%.

水分非平衡状態において著しい応力緩和が見られるのは,細胞膜中のミクロな組織内に発生する内部応 力と,細胞膜実質の可塑化によるものと考えられる。

また,板目,柾目試片で認められるように吸湿過程よりも乾燥過程において 応力緩和が小であることは,次のような理由によると考えられる。

すなわち、吸湿過程において水分子は細胞膜の表面から非結晶域に吸着され、表面より間隔を広げつつ 内部まで比較的均等に吸着される。乾燥過程においては、水分子は逆に表面により脱着されるために表面 の間隔は狭くなり、内部よりの脱着は行なわれ難く、したがって水分子の分布状態は不均等となる。同一 含水率時には、この現象のために乾燥過程における表面は吸湿過程よりも乾燥されている。このための弾 性係数の増加に起因しているのであろう。

3) 緩和時において周期的に含水率変化を急激に与えた場合,その変化が乾燥,吸湿いずれの場合にも 一時的な弾性の回復が認められる(Fig. Ⅱ-6)。



Specimen : flat grained Ezomatsu

これは乾燥の場合,緩和速度よりも乾燥による弾性係数の増加速度が大であることによるものであり, 吸湿時の場合,乾燥によるセットが吸湿により解放され,その弾性回復速度が,緩和速度よりも大である ことによるものであろう。

したがって、このような現象は、含水率の変化速度によって影響されるものであろうと推察される。

ARMSTRONG ら⁴⁵⁾は、初期含水率5% および 140% の $36 \times 3/4 \times 3/4$ inch の Hoop pine (*Araucaria cunninghamii* AIT.)を用いた繊維方向の曲げクリープ試験において、吸湿一乾燥または乾燥一吸湿のサイクルによるクリープ状態を測定しているが、この試験においては吸湿の場合にたわみの減少が大きく表われ乾燥の場合にはほとんど認められない程度である。これは吸湿速度が速いため(含水率 3% から 40% までの吸湿が約1日,40% から 10% までの乾燥が約4~5日と推定される)と考えられる。

本実験では、ARMSTRONG らの実験に比して、乾燥および吸湿速度がきわめて大きいために、Fig. Ⅱ

積層接着された木材の内部応力に関する研究(椋代)

Table Ⅱ-1. 含水率別のクリープ回復たわみ量

The deflection recovered by unloading after stress relaxation

	瞬間回復	クリープ回復たわみ/瞬間回復たわみ×100 Creep recovered deflection/Instantaneous recovered deflection×1					tion×100
初期荷重 Initial load	たわみ Instantaneous recovered		経 Period fro	過 m unloading	時 to measuri	間 ng (min)	
	deflection	5 分	10 分	15 分	20 分	25 分	30 分
含水率 21.4%, M.C. 21.4%							
g 450	mm 1.24	% 18.55	% 22.58	% 25.00	27.42	% 27.82	% 28.22
350	1.23	14.63	19.51	22.76	24.39	24.80	25.20
195	0.90	7.78	11.11	12.22	13.33	14.44	15.56
50	0.26	3.85	5.77	7.69	9.62	10.77	11.54
含水率 16.0%, M.C. 16.0%							
500	2.03	5.91	8.37	9.85	10.84	11.58	11.82
350	1.46	8.22	10.96	13.70	14.73	15.41	15.75
250	0.98	13.27	16.33	18.37	19.39	19.90	20.41
150	0.54	6.48	9.26	11.11	12.04	12.41	12.96
100	0.39	5.13	6.92	7.69	7.69	7.69	7.69

試片:エゾマツ,板目

Specimen : flat grained Ezomatsu.

-6 のような結果を示したものと思われる。

4) 除荷後 30 分におけるクリープ回復たわみは,高含水率時ほど,また大きいたわみを与えたときほど大きい。なお,瞬間弾性回復ひずみ測定上の時間的な遅れにつれて,含まれる誤差も大きくなることを示している (Table II-1)。





- 11 -

-12 -

5) 瞬間回復弾性係数(Fig. II-7) について,次のようなことがいえよう。すなわち,与えられたた わみが大きいほど瞬間回復弾性係数は低下する。しかし,この実験においては,瞬間回復たわみの測定に 時間を要しているためクリープ回復たわみが多少含まれているので,図示の値よりも低下は少ないと考え られる。

また、小さなたわみの場合にはほとんど低下が認められないものと考えられるが、それがどの程度のた わみ範囲かについては、さらに精密な実験が必要であろう。

Ⅲ 積層接着された木材中の残留応力

Ⅲ-1.研究の目的

金属加工の場合には、焼き入れ、圧延、成型加工などによって残留応力を生じ、それが製品の品質に影響するために従来より種々研究されてきた。

木材の接着においても,主要接着条件である接着剤の種類,熱圧温度および時間,被着材相互間の含水 率差などによって,発生内部応力に差異を生じることが当然予想される。

木質材料においては、含水率変化によって内部応力は変化し、どの時点までが残留応力であるかが問題 であるが、本章においては接着後に気乾含水率(12~15%程度)になったときの内部応力を残留応力とい うこととした。

残留応力は,接着性能,狂い,表面割れなど,接着後の製品の品質に影響を及ぼすので,接着条件の指 針をうる目的で,まずその実態を明らかにした。

Ⅲ-2. 残留応力と接着剤の種類

Ⅲ-2-1. 応力計算方法

本研究に用いた方法は、平板の直交する2方向の残留応力を解析する方法で、R.G. TREUTING と W.T. READ⁹⁾が発表したものを、川田⁶⁾¹⁰⁾が改良した方法である。

残留応力の存在する平板の表面から、面と平行に薄く切削するとき、残った部分には曲率の変化を生ずる。板にはその横および縦の断面に垂直な応力のみが存在し、これらが板の幅および長さ方向に均等に分布し、かつ曲率変化は弾性限界以内の応力によるもので全長にわたって一様であるとすれば、Fig. II-1における X-, Y-軸方向の応力は川田の式⁰により、

$$\sigma_{X} = \frac{E_{X}(h-a)^{2}}{6(1-\mu_{XY}\mu_{YX})} \cdot \left\{ \frac{d(1/\rho_{X})}{da} + \mu_{YX} \frac{d(1/\rho_{Y})}{da} \right\}$$
$$-\frac{2E_{X}(h-a)}{3(1-\mu_{XY}\mu_{YX})} \cdot \left(\frac{1}{\rho_{X}} + \mu_{YX} \frac{1}{\rho_{Y}} \right) + \frac{E_{X}}{3(1-\mu_{XY}\mu_{YX})} \int_{0}^{a} \left(\frac{1}{\rho_{X}} + \mu_{YX} \frac{1}{\rho_{Y}} \right) da$$

······(Ⅲ-1-A)

$$\sigma_{Y} = \frac{E_{Y}(h-a)^{2}}{6(1-\mu_{XY}\mu_{YX})} \cdot \left\{ \frac{d(1/\rho_{Y})}{da} + \mu_{XY} \frac{d(1/\rho_{X})}{da} \right\}$$
$$-\frac{2E_{Y}(h-a)}{3(1-\mu_{XY}\mu_{YX})} \cdot \left(\frac{1}{\rho_{Y}} + \mu_{XY} \frac{1}{\rho_{X}} \right) + \frac{E_{Y}}{3(1-\mu_{XY}\mu_{YX})} \int_{0}^{a} \left(\frac{1}{\rho_{Y}} + \mu_{XY} \frac{1}{\rho_{X}} \right) da$$

······(Ⅲ-1-B)

ここで、 σ_x :表面からの深さaにおけるX一軸方向の応力 σ_y :表面からの深さaにおけるY一軸方向の応力 *Ey*: *Y* 一軸方向の弾性係数

μxy:ポアソン比 (Y方向のひずみ/X方向のひずみ)

μyx:ポアソン比(X方向のひずみ/Y方向のひずみ)

h:板の初期の厚さ

a:切削した深さ

 $\frac{1}{\rho_{x}}$, $\frac{1}{\rho_{x}}$: X一軸, Y一軸方向の主曲率変化

この式から σ_x を求めるには、Fig. II-1 のように表面から薄層を除去しながら、X-、Y-軸方向の 主曲率変化 $1/\rho_x$ 、 $1/\rho_r$ を測定し、表面から切削した深さ a を横軸にとって図示し、(II-1-A) 式右辺 の第1項および第3項を図式的に求めて σ_x を計算すればよい。 σ_r も同様にして求められる。



Fig. Ⅲ-1 残留応力の決定法(スライス法) The measuring method of residual stress in *a* plate.



Ⅲ-2-2. 実 験 方 法

板材より鋸断後鉋削した 0.2cm 厚さ, 16×16cm のブナ (Fagus crenata BL.) 柾目辺材の単板を温 度 20°C, R.H. 65% の条件下で含水率 11.8~12.4% に調湿後, 後記の 接着剤を 330 g/m² 塗付し, Fig. Ⅲ-2 のように繊維を平行に 3 枚積層して,約 20 分間 closed assemble し, 圧締圧力 15kg/cm² で 前記と同一温湿度条件下で 3 日間圧締して接着した。

解圧後10日間前記含水率とほぼ等しい程度に調湿した。

その後前記の方法にしたがって同一温湿度条件下で表面より均等に鉋削し, Fig. Ⅲ-2 に示すように板の中央で繊維方向および直角方向の矢高(スパン 13cm)をダイヤルゲージ(1/100mm)で測定した。 また同時に板の厚さを9か所で測定した。1回の鉋削厚さは0.10~0.40mm 程度で平均0.25mm であった。

試験に用いた接着剤の種類および性状は次のとおりである。

1) ユリア系樹脂接着剤

濃縮型ユリア・フォルムアルデヒド縮合樹脂(東洋高圧工業株式会社製ユーロイド No. 120)

樹脂分:70±2%

比 重:30°C で 1.31±0.05

硬化剤:20% NH4Cl 水溶液を5%添加

2) レゾルシノール系樹脂接着剤

林業試験場研究報告 第211号

レゾルシノール・フォルムアルデヒド 縮合樹脂 (大日本インキ 化学工業 株式会社製 プライオーヘン No. 6000)

樹脂分:58±2%

比 重:25°C で 1.12~1.14

硬化剤:TD 473 を 15% 添加

3) エポキシ系樹脂接着剤

エポキシ樹脂とポリアミド樹脂の混合型樹脂(セメダイン株式会社製 セメダイン No.1500) 樹脂分:エポキシ樹脂 100%,ポリアミド樹脂 100%

比 重:20°C でエポキシ樹脂 1.24, 20°C でポリアミド樹脂 0.98

混合比:1:1

4) 酢酸ビニール系接着剤

酢酸ビニールエマルジョン接着剤(鐘紡化学工業株式会社製 ヨドゾール EQ-04)

樹脂分:45±1%

比 重:20°C で 1.2~1.3

前記計算式(Ⅲ-1-AおよびB)式を適用するにあたって,供試材から単板を採取した位置に接続して 採取した引張試片(鋸断後鉋削仕上げ)について,20°C,R.H.65%下で調湿後弾性常数を測定し,次 のような数値をえた(試片数3個の平均値)。

E_R(半径方向の弾性係数):11.0×10³kg/cm²

 E_L (繊維方向の弾性係数):94.0×10³kg/cm²

μ_{LR}(ポアソン比:半径方向のひずみ/繊維方向のひずみ):0.35

μ_{RL}(ポアソン比:繊維方向のひずみ/半径方向のひずみ):0.041

ただし、 μ_{RL} は次式より求めた。

$\frac{\mu_{RL}}{E_R} = \frac{\mu_{LR}}{E_L}$

Ⅲ-2-3. 実験結果および考察

4 種類の接着剤に対する残留応力の解析結果は Fig. Ⅲ-3 に示すとおりであった。

ただし,前記計算式を適用するにあたって,接着剤浸透層および接着層は材の性質と等しいとして取り 扱った。

この結果より見れば,

1) エポキシ樹脂の場合を除き,単板の表面における圧縮応力は内方に向かうにしたがって減少して引 張応力に転じ,これが接着層近辺で急激に増大する。また,これら応力の大きさはほぼ次の順序になって いる。

ユリア樹脂>レゾルシノール樹脂>酢酸ビニール樹脂>エポキシ樹脂

この結果は、則元²⁰⁾らの実験結果とよく一致している。接着層でのこのような大きい引張応力は、コア ー材の中心に向かうにしたがって対称的に減少し、中心付近では圧縮応力に転じている。

エポキシ樹脂の場合には、他樹脂で見られるような接着層へ向かっての引張応力の増大はなく、内部応 力値はきわめて小さい。

2) 繊維方向の応力値は、繊維に直角方向のそれに比し、大きなばらつきを示す。これは局部的なすべ



EPOXY RESIN GLUE

Fig. Ⅲ-3 単板積層板の残留応力

Residual stresses in plates glued with various glues.

Specimen : Buna sapwood, 3 plies sawed veneer laminated plate.

- +: tensile stress, -: compressive stress
- o_R : the normal stress \perp to the fiber
- σ_L : the normal stress // to the fiber

C.L : the center line of the thickness of the plate



Fig. Ⅲ-3 (つづき)

りを生じようとしていることを示すと考えられる。

Fig. Ⅲ-3 に示すように,エポキシ樹脂を除く各接着剤において,接着層付近で引張応力の増大する原因について考察しよう。

ユリア樹脂, レゾルシノール樹脂, 酢酸ビニール樹脂は, 接着剤液中に溶媒として水を含有するため, 塗付後単板の含水率分布は, Fig. II-4-A-a の曲線のように示されると考えられる。したがって, 接着 層に接する側(塗付側)は膨潤によってAはEまで伸長し(Fig. II-4-A-c), 表単板は塗付側を凸面に してそろうとするが, これを平たんに保つとき, 応力状態は塗付側に最大圧縮応力 σ_{fc} , 非塗付側に最大 引張応力 σ_{fr} を生じてつりあう (Fig. II-4-A-b)。またこのとき表単板, コアー単板はそれぞれAB 面はCD面まで, A'B'面はC'D'面まで伸張する (Fig. II-4-A-c)。

 $\varepsilon_f = u \cdot \alpha_f + \varepsilon_{fT}$

 $\varepsilon_c = u' \cdot \alpha_c + \varepsilon_{cT}$

ここで、*εf*:表単板の単位長さあたりの伸び

ε_c: コアー単板の単位長さあたりの伸び

u:表単板の非塗付側の含水率増加

αf:表単板の含水率1%増加にともなう膨張率

u':コアー単板の中心における含水率増加

αc:コアー単板の含水率1%の増加にともなう膨張率

ε_{fr}:表単板の最大引張ひずみ

ε_{cT}:コアー単板の最大引張ひずみ

接着完了後もとの含水率まで乾燥し、C、D'はAまたはB'に、また、D、P'はそれぞれB、O'に収縮しようとするために、つりあう内部応力に相当するひずみ ϵ_{fa} 、 ϵ_{ca} が ϵ_{f} 、 ϵ_{c} にそれぞれ加減される。

そしてこのひずみに相当する内部応力は次章に示すように厚さ方向に傾斜するが,接着剤浸透層の接着 剤硬化にともなう収縮を考慮するとき,酢ビ接着剤の場合における接着層近辺へ向かっての引張応力の急 激な増加は説明できない。

塗付後の含水率増加によって、塗付側が塑性変形を生じやすいことは第Ⅱ章の応力緩和試験結果におい て記したことから推察できる(Fig. Ⅲ-4-B-b)。このために、Fig. Ⅲ-4-B-c のように塗付側におい

-16 -



Diagrams illustrating the process of development of the residual stress set up by gluing.

ては、実際の圧縮ひずみは CEまたは D'E' よりも小さく Ce または D'e' となる。したがって、断面 AB または A'B' は膨潤側でこのひずみの差に相当するひずみだけ多く伸張して, KFD または K'F'G'L' のような曲線をなし、接着されたのち乾燥によって接着層に接する K, K' は A または B' まで収縮し ようとして接着層近辺は高い引張応力となり、接着剤の浸透層は接着剤硬化にともなう収縮によってさら に高くなると考えられる。 --- 18 ---

このように考えれば,前記の引張応力の高さによる序列は,接着剤の性状をよく表わしているといえよう。

すなわち、ユリア樹脂、レゾルシノール樹脂、酢酸ビニール樹脂は、 その塗付量の ほぼ 30~50% は水 分を含む。このため塗付後の材の膨潤は大きい。また硬化にともなう接着層の収縮は大きく、酢酸ビニー ル樹脂のみは可塑性があるために収縮応力は小さい。

エポキシ樹脂の樹脂分はほぼ100%で、したがって材の膨潤はなく、また収縮もほとんどないため硬化 にともなう収縮応力はほとんどないと考えられる。

ユリア樹脂,レゾルシノール樹脂,酢酸ビニール樹脂による接着においてとくに前2者において接着層 付近での急激な引張応力の増加は,その付近での高いせん断応力の存在を示していると思われる。

Ⅲ-3. 残留応力と接着時の熱圧温度

Ⅲ-3-1. 単板積層板

Ⅲ-3-1-1. 応力解析方法

Ⅲ-2 と同一方法によった。

Ⅲ-3-1-2. 実験方法

Ⅲ-2 における試片と隣接した部位より採取して、 鋸断後鉋削によって 仕上げた 0.2cm 厚さ、16×16 cm 角のブナ柾目辺材試片を、20°C, R.H. 65% の条件下で含水率 11.5~12.5% に調湿後、 前項に用 いたと 同一のユリア 樹脂接着剤を 330g/m² 塗付、 3 枚を 平行積層し、約 30 分間 closed assemble し て、圧締圧力 15kg/cm² で次の条件下で圧締した。

圧締時間	圧締温度
3日	20°C
25分	60°C
5分	120°C

その後、ふたたび前記温湿度条件下で10日間調湿した。そして前項と同様にして 曲率変化 および切削 後の試片の厚さを測定した。

1回の切削厚さは 0.10~0.25mm で、切削時の試片の平衡含水率は下記のとおりである。

20°C冷圧試片	12.8%
60°C熱圧試片	12.1%
120°C熱圧試片	9.7%

なお,弾性常数は,前記単板を採取した位置に接続して採取した 0.35cm 厚さの引張試片を,それぞ れ 15kg/cm² の圧締圧力で 60°C で 25 分間, 120°C で 5 分間圧締し, 20°C, R.H. 65% で 10 日間調湿 後弾性常数を測定した。なお冷圧温度 20°C 試片については,Ⅲ-2 と同一値を用いた。

その数値は次のとおりである(試片数3個の平均値)。記号は Ⅲ-2 と同一である。

 20° C $E_R: 11.0 \times 10^3$ kg/cm²

 $E_L: 94.0 \times 10^3 \text{kg/cm}^2$

 $\mu_{RL}: 0.041$

 $\mu_{LR}: 0.35$

60°C E_R : 11.0×10³kg/cm²

 $E_L: 97.0 \times 10^3 \text{kg/cm}^2$

 $\mu_{RL}: 0.041$

 $\mu_{LR}: 0.36$

$$E_R: 11.0 \times 10^3 \text{kg/cm}^2$$

 $E_L: 109.0 \times 10^3 \text{kg/cm}^2$

 $\mu_{RL}: 0.037$

 $\mu_{LR}: 0.37$

ただし、µRL は次式の関係より求めた。

$$\frac{\mu_{RL}}{E_R} = \frac{\mu_{LR}}{E_L}$$

Ⅲ-3-2. 合 板11)

Ⅲ-3-2-1. 応力解析方法

合板に対して前記のようなスライス法を適用した場合,計算式は川田の式のように簡単に表わすことは できない。そこで著者は次のような計算式を導いた。

いま Fig. III-5 において表単板 (FV), 裏単板 (BV), コアー単板 (CV) が接着されて, FV, BV 中には引張力 P_1 , P_2 , CV 中には P_3 なる圧縮力が存在するとすれば, 応力の平衡状態において次の式 が成立しなければならない。

$$P_1 + P_2 = P_3$$

この場合, FV, BV が同一条件であれば次式となる。

 $P_1 = P_2$ $2P_1 = P_3$

いま FV の表面より引張応力 σ の存在する厚さ Δ の薄い層を削ることによって, この幅 b の試片の 残部には Fig. II-5 に示すように $\sigma\Delta b$ なる力を作用させたときに起こると 同じ変形を 起こすことは明 らかである。

いま Table III-1 に示 すように FV または BV の Δ_{Fi} 層を削ったとき、 この 層中に存在した 応力 $\bar{\sigma}_{Fi}$ は次式によって示される (Table III-1 参照)。

$$\overline{\sigma}_{Fi} = \sigma_{Fi} - \sum_{m=1}^{m} E_F \cdot \frac{\sigma_{Fm} \Delta_{Fm}}{E_F h_{Fm} + E_B H_B + E_C H_C} - \sum_{m=1}^{m} E_F \cdot \frac{(h_{Fi} + H_B + H_C - \eta_{Fm})}{\gamma_{Fm}} \quad \cdots (\mathbb{II} - 2 - A)$$

ここで OFi は次式で示される。

$$\sigma_{Fi} = \frac{\sum EI}{\gamma_{Fi} \cdot \Delta_{Fi} \cdot b(h_{Fi} + H_B + H_C - \eta_{Fi})}$$

ただし,

$$\Sigma El = E_F l_{(h_F i)} + E_B l_{(H_B)} + E_C l_{(H_C)}$$



Fig. Ⅲ-5 合板におけるスライス法の説明図 Slicing method used for measuring of the residual stress in the plywood.

林業試験場研究報告 第211号

Table Ⅲ-1.	単板厚さ切削層中の	応力,曲率変化,	中立軸の関係
The relation bet	ween the thickness of	of veneer and t	he stress in the
slice	ed layer, the variation	on of curvature	etc.

4 層を切削された ときのFVの厚さ The thickness of FV after slicing of the laver 4	切削される層の厚さと その中に存在する応力 The thickness of the sliced layer and the stress in the sliced layer	4 層を削りとられた ときの曲率変化値 The variation of curvature after slicing of the layer 4	▲層をとられた残 部の中立軸の位置 The distance from back side to neutral axis
HF hF1 hF2 HF hFm-1 hFm-1 hFm hFn Hc hC1 hc2 Hc Hc HB HB	ΔF1, σ F1 ΔF2, σ F2 ΔF3, σ F3 ΔFm, σ Fm ΔFi, σ Fi ΔFi, σ Fi ΔFn, σ Fn ΔC1, σ C1 ΔC2, σ C2 ΔCP, σ CP ΔCL, σ Ci	/YF1 /YF2 : : !/YFm-1 !/YFm !/YF1 !/YFn !/YFn !/YC1 !/YC2 : !/YC2 ! !/YCP-1 !/YCP	η F1 η F2 η F3 η F3 η Fm-1 η Fm η Fn η Fn η C1 η C2 η C2

注) H_F:表単板の厚さ The thickness of face veneer. H_C:コアー単板の厚さ The thickness of core veneer. H_B:裏単板の厚さ The thickness of back veneer.

ここで, *E_F*:表単板の弾性係数

E_B:裏単板の弾性係数

Ec:コアー単板の弾性係数

 $I_{(h_{Fi})}$:表単板を厚さ h_{Fi} まで削ったときの中立軸 η_{Fi} に対する表単板の断面二次モーメント

 $I(H_B)$:中立軸 η_{Fi} に対する裏単板の断面二次モーメント

1(H_c):中立軸 ηFi に対するコアー単板の断面二次モーメント

CV 中における応力も同様にして,

ここで,

$$\sigma_{Ci} = \frac{\sum El}{\gamma_{Ci} \cdot \Delta_{Ci} \cdot b(h_{Ci} + H_B - \eta_{Ci})}$$

ただし、 $\Sigma EI = E_{cl}(h_{Ci}) + E_{Bl}(H_B)$

ここで、 $I_{(h_{Ci})}$: コアー単板を厚さ h_{Ci} まで削ったときの中立軸 η_{Ci} に対するコアー単板の断面二次 モーメント

 $I(H_R)$:中立軸 ηc_i に対する裏単板の断面二次モーメント

Ⅲ-3-2-2. 実 験 方 法

前記計算式によって、合板中の残留応力を明らかにするために、次のような実験を行なった。

表裏単板として幅(繊維に直交方向)16.5cm,長さ(繊維に平行方向)2.5cm,厚さ2mmおよび3 mmの柾目プナ辺材単板を,また,コアー単板として同一材より長さ(繊維に平行方向)16.5cm,幅(繊 維に直交方向)2.5cm,厚さ2mmおよび3mmの柾目ブナ辺材試片を鋸断後鉋削して製作した。

この試片を乾球 20°C,湿球 17°C で調湿し、含水率を 14.2~15.3% にした。これら調湿した単板につ いて、軸方向の中央に重錘をかけそれぞれの曲げ弾性係数を求めた。表、裏単板はほぼ同一弾性係数のも のを組み合わせた。

この試片に,前項と同じユリア樹脂接着剤 を 330g/m² 塗付し, Fig. Ⅲ-6 のように積 層して,圧綿圧力 15kg/cm² で前記大気条件 で冷圧を1時間,その後 60°C で 25 分,90°C で 17 分,120°Cで7 分間熱圧した。熱圧時の 圧綿圧力は 15kg/cm² であった。その後,



単位:mm

Fig. Ⅲ-6 残留応力の決定に用いた合板試片 The plywood specimen used for the test.

ふたたび前記大気条件下で14日間調湿した。そのときの平衡含水率は,60℃熱圧のものは14.5%,90℃のものは12.1%,120℃のものは10.6%であった。

この後スライス法によって,スパン 15cm で中央の矢高量を測定した。1回の鉋削量は,この実験を 通じてほぼ 0.20~0.45mm であった。前記計算式を適用するにあたって接着層の弾性係数は木材の繊維 方向のそれと同一とした。

このような実験方法による合板中の内部応力解析結果と照合するために次のような実験をあわせて行なった。

前記と同様な表裏単板およびコアー単板を乾球 20°C, 湿球 16°C で含水率 11.1~12.3% に調湿し,表 (裏)単板およびコアー単板の片面に前記のユリア樹脂接着剤を同様にして塗付し,ワックスペーパーを はさんで 45 分間前記大気条件下で closed assemble した後,熱圧温度 60°C, 120°C でおのおの 20 分お よび4 分間接着しないで熱圧して,表面に塗付した接着剤を硬化させた。その後ふたたび前記条件下で重 量が恒量となるまで調湿して,塗付側を凹面にして湾曲した矢高量を測定し,塗付前の矢高量との差を求 めた。

Ⅲ-3-3. 実験結果および考察

単板積層板の結果は、Fig. Ⅲ-7 に、また合板の結果は、Fig. Ⅲ-8~9 に示す。

単板積層板の場合について見れば、応力分布に対する熱圧温度の影響は次の点で現われている。

1) 表単板の最外層には熱圧温度の上昇にともなつて、圧縮応力の増大が表われている。これは加熱温



Fig. Ⅲ-7 熱圧温度と残留応力(a)

ーブナ辺材、2mm等厚ソードベニヤ、3枚積層-ユリア樹脂接着剤

Residual stresses in plates glued under various hot press temperature.

Specimen : Buna sapwood, 3 plies sawed veneer laminated plates glued with urea resin.

度の上昇とともに木材の弾性係数が減少するため、熱圧によって単板の最外層が表面方向に伸張を生じよ うとしたためと考えられる。

2) 表単板は温度の上昇とともに全体的に圧縮応力を増し、コアー単板はこの応力とつりあうため引張 応力を増す。これはプレスそう入時および加熱圧締中の表裏単板の収縮がコアー単板のそれよりも大きい ことに起因すると考えられる⁴⁹⁾。

この場合、表単板における接着層へ向かっての引張応力の増加勾配は、加熱温度の上昇にともなって多



+:引張応力 -:圧縮応力 C.L: 試氏の厚さ方向の中に線

Fig. Ⅲ-8 熱圧温度と残留応力(b)

ーブナ辺材, 2mm等厚ソードベニヤ, 3プライスーユリア樹脂接着剤 Residual stresses in 3 plies plywood glued under various hot press temperature. Specimen: 3 plies plywood composed of Buna sapwood 2mm thick sawed veneer. Glue: Urea resin

少減少が認められるが、コアー材中における接着層から厚さの中央へ向かっての応力勾配は、加熱温度が 高いほど明らかに減少する。これは加熱温度の上昇につれてせん断応力の減少を示すと考えられる。

3) 繊維に直角方向では,接着層における硬化にともなう 収縮引張応力が,温度の上昇とともに減少 し、120°C の場合はとくに低い。ユリア樹脂接着剤はその縮合硬化に脱水をともない収縮する。したがっ て低温度で硬化した場合ほど接着後の脱水量が多く、このために接着剤の収縮も大きいので、このような



Fig. Ⅲ-9 熱圧温度と残留応力(c)

ーブナ辺材, 3 mm等厚ソードベニヤ, 3 プライスーユリア樹脂接着剤 Residual stresses in 3 plies plywood glued under various hot press temperature. Specimen: 3 plies plywood composed of Buna sapwood 3 mm thick sawed veneer. Glue: Urea resin

結果が得られたと考えられる。

4) 加熱圧締によって、繊維方向の応力値は、直角方向よりも大きくばらつき、組織間に過酷なすべり を生じようとしており、温度の上昇にともなってその傾向は顕著になる。

積層接着された木材の内部応力に関する研究(椋代)

Table Ⅲ-2. 熱圧温度と接着剤塗付単板の矢高量

The depth of curvature resulted from hardening of glue spread on the one side surface of veneer under various hot press temperature

	熱 圧 温 度 (℃) Hot press temperature	矢 高 量(mm) Depth of curvature
FV	60	4.30
	. 120	1.05
C V	60	0.50
	120	0.15

注) 矢高量はスパン 15cm の中央で測定

FV:表(裏)板 Face veneer

CV:コアー単板 Core veneer

合板の場合(Fig. Ⅲ-8, Ⅲ-9),前記単板積層板と異なり,熱圧温度60℃では表(裏)単板に引張応 力が存在し,接着層に向かうにしたがって増大している。加熱温度の上昇とともに,これらは減少し, 120℃では逆転して表(裏)単板に圧縮応力を生じ,60℃で見られるような接着層に向かっての引張応力 の急激な増大(圧縮応力の減少)はなく,コアー単板中で引張応力が発生し,接着層付近における材中の せん断応力も小である。

これらの応力状態は Table Ⅲ-2 の結果からも立証されうる。 すなわち, 熱圧温度 60°C では矢高量も 大きく, 塗付側に大きな引張応力の存在を示し, 120°C では引張応力はきん少であることを示している。

このように、合板中の応力状態は単板積層板の場合よりも温度の影響を受けやすいと考えられる。これ は繊維を直交して接着しているために、表単板の収縮量とコアー単板のそれとの差が大きいことによるも のと思われる。単板厚さが2mmと3mmでは応力分布状態の差は、ほとんど認められない。

Ⅲ-4. 残留応力と被接着材の含水率

Ⅲ-4-1. 応力解析方法

Ⅲ-2 の場合と同様の方法によって行なった。

Ⅲ-4-2. 実験方法

Ⅲ-2 におけると同様な試片を隣接した位置より採取した。1組の表裏単板は含水率 13.7%, コアー単板は 5.4% に調湿, 他の組では表裏単板は 5.5%, コアー単板は 13.5% に調湿した。

Ⅲ-2 と同一のユリア樹脂接着剤を 330g/m² 塗付後, 繊維を平行にして 13.7-5.4-13.7% 含水率の 組合せと、5.5-13.5-5.5% 含水率の組合せの2組の積層板を、20°C, R.H. 70% で1日間 15kg/cm² の圧締圧力で接着した。なお、圧締に先きだち、20°C, R.H. 70% 下で20分間 closed assemble を行 なった。接着後そのまま 20°C, R.H. 70% 下で10日間調湿して含水率14.1% にした後、前項と同様に スライス法によって曲率変化を測定した。スライスの厚さは、0.15~0.30mm であった。計算に用いた 弾性常数は Ⅲ-2 におけると同一の値を用いた。

Ⅲ-4-3.実験結果および考察

実験結果を Fig. Ⅲ-10 に示す。 14-5-14% の組合せの場合,表面より 2 ~ 3 切削層を除いて当然予 想されるように,表単板は引張応力を,コアー単板は圧縮応力を示す。 5-14-5% の組合せの 場合には

-25 -







+: 引張施力 -: 圧縮 応刀 G_R: 繊維 に直角方向の応力 G_L: 繊維に平行方向の応刀 C.L: 試たの厚 こ方向の中川線、

Fig. Ⅲ-10 単板含水率と残留応力

ーブナ辺材, 2mm等厚ソードベニヤ, 3枚積層-ユリア樹脂接着剤 Residual stresses in 3 plies laminated plates composed of sawed veneers conditioned in different moisture content.

Specimen : Buna sapwood 3 plies sawed veneer laminated plates glued with urea resin.

反対の傾向を示している。注目すべき点は、14-5-14%の組合せの場合は、前項の Fig. II-7 における 熱圧温度の低い場合(20°C)の応力状態に類似し、また5-14-5%の組合せの場合は、熱圧温度の高い 場合(120°C)のそれに類似していることである。すなわち、14-5-14%の組合せの場合、表単板中の 接着層へ向かっての応力勾配は、5-14-5%の場合より急で、また、コアー単板中において、接着層か ら厚さの中心に向かっての応力勾配は、非常に急激である。これに対して、5-14-5%の場合にはきわ めてゆるやかである。これは14-5-14%の組合せの場合、せん断応力が高いことを示すと考えられる。

Ⅲ-5.考察

以上積層板および合板中の残留応力を解析して、主要接着条件である

(1) 接着剤の種類

(2) 熱圧温度

(3) 単板相互の含水率差

によって生ずる残留応力の相違について検討を加え、さらに残留応力の成因について、接着剤の特性、熱 圧時の単板の挙動、接着前単板含水率と接着後平衡含水率の相違による膨張収縮の観点より考察を加えて 理論的実証的によく説明できるので、これらの応力解析結果は妥当であることを確認した。

これらの解析結果を総合的に考察すれば次のようなことがいえよう。

1) 残留応力分布の傾向は、主として用いられた接着剤の性質によって特徴づけられ、これには

(i) 接着剤中の水分

(ii) 接着剤自身の硬化にともなう収縮

(iii) 硬化した接着剤の弾性,主として弾性係数

が大きな影響を及ぼし,水分が存在し,収縮が大きくかつ硬化後弾性係数の高い接着剤の使用は,接着層 近辺の材中に高い引張応力およびせん断応力を生じさせ,接着性能および狂い,薄単板接着の場合におけ る表面割れなどに著しく影響を及ぼすと考えられる。

2) ユリア樹脂接着剤のように,熱硬化性で硬化過程で接着剤からの脱水をともなう接着剤では,冷圧 よりも加熱圧締によって,接着層およびその付近の材中の引張応力ならびにせん断応力が減少する。

3) 高い熱圧温度および圧締圧力は、単板表面が可塑的に伸張しようとすることによって、表面に高い 圧縮応力を残留させる。また繊維に平行方向の組織間に過酷なすべりを生じさせようとして、材質的な劣 化を招く。これは単板の表面割れなどに影響する⁵⁰と考えられる。

4) コアー単板の含水率が表単板のそれよりも低い場合は、逆の場合に比し、単板中の接着層付近の応 力勾配は急であって、せん断応力は高いと考えられる。このため前者の組合せよりも後者の組合せの方 が、接着性能および表単板の表面割れに対して有利であると考えられる。

つぎに、本実験に用いたスライス法について考察すれば、

1) 板の表面から一様に薄くスライスするためには、ある程度の時間を要する。したがって、瞬間弾性 たわみのみを測定することは困難で、クリープたわみが含まれるために、応力値は一般に実際よりも高く 出ていると考えられる。このため切削方法について考慮の必要があろう。

2) 硬化後高い弾性係数を示す接着剤を用いた場合,接着層および接着剤浸透層の弾性常数を考慮する 必要がある。とくに試片の厚さが薄く,材の弾性係数が小さい場合にその影響は大きいと考えられる。 などの欠点があるが,主軸方向の残留応力の傾向を知るには適切な方法であると考えられる。

Ⅳ 積層接着された木材の含水率変化によって発生する内部応力

IV-1. ひき板集成材¹³⁾

Ⅳ-1-1. 研究の目的

積層接着された木材は,第Ⅲ章において明らかにしたように,製造条件によって異なる残留応力を内蔵 するとともに,使用時の含水率変化による材間の膨張収縮差のために,比較的大きな内部応力を生じ,こ れらがはく離,割れなどの欠点を生ずる原因となっている。

本研究においては、ミズナラーエゾマツーミズナラの異樹種接着された材が、含水率変化を受けた場合

-28 -

に生ずるエゾマツ・コアー材中の内部応力を解析して、その基本的な分布状態の傾向を明らかにし、さら にその結果とはく離促進試験結果との関連を求めようとした。

Ⅳ-1-2. 応力解析方法

後記 IV-3 化粧集成柱におけるように、スライス法によって側面および接着線上の瞬間弾性回復変位量 を*X*-, *Y*-軸方向について求めればよいのであるが、スライス法は薄片にスライスするため、技術的に ある程度のスライス片幅を必要とし、変位が局部的に大きく変化する場合などは十分に傾向をはあくする ことは困難である。またある程度大きい試片でないと変位量の測定はむずかしい。

本研究においては、コアー材中の応力の分布状態の傾向を知ることを目的としたので,次のような解析 方法を用いた。

Ⅳ-1-2-1. 含水率傾斜のない場合の応力解析方法

Fig. IV-1 において, 試片の中央O点よりX-軸, Y-軸をとり, この2軸がコアー材の接線, 半径方



向にそれぞれ一致したとき,

v: *X*--軸方向の変位量

u: Y 一軸方向の変位量
 α_{xm}: *m*%の含水率変化によって生ずるX-軸方向の膨張,収
 縮率

α_{Ym}: m%の含水率変化によって生ずる Y-軸方向の膨張,収
 縮率

 ε_x :内部応力によるX一軸方向のひずみ量

εy:内部応力によるY一軸方向のひずみ量

Fig. IV-1 座標のとり方と標点の位置 The coordinate and marks for measuring of deformation.



接線,半径方向がそれぞれ*X*一, *Y*一軸に一致した時,膨張,収縮によってすべりは生じないとする。 $\gamma_{XY} = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial x}$(IV-1-2)

ここで、 γ_{XY} : X - Y 面におけるせん断ひずみ

そこで

ここで、 $\sigma_x: X$ 一軸に平行方向の垂直応力 $\sigma_Y: Y$ 一軸に平行方向の垂直応力 $\tau_{xY}: X - Y$ 面におけるせん断応力 $E_x: X$ 一軸に平行方向の弾性係数 $E_Y: Y$ 一軸に平行方向の弾性係数 $G_{XY}: X - Y$ 面におけるせん断弾性係数

μxy:ポアソン比(Y-軸方向のひずみ/X-軸方向のひずみ)

μyx:ポアソン比(X-軸方向のひずみ/Y-軸方向のひずみ)

一方,応力の平衡方程式は,

$$\frac{\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{YX}}{\partial y} = 0}{\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{XY}}{\partial x} = 0} \right\}$$
(IV-1-4)

(Ⅳ-1-4) 式へ (Ⅳ-1-3) 式を代入すれば,

$$\frac{E_{X}}{(1-\mu_{XY}\mu_{YX})} \frac{\partial^{2}v}{\partial x^{2}} + G_{YX}\frac{\partial^{2}v}{\partial y^{2}} + \left\{G_{YX} + \frac{\mu_{YX}E_{X}}{(1-\mu_{XY}\mu_{YX})}\right\}\frac{\partial^{2}u}{\partial x\partial y} = 0$$

$$\frac{E_{Y}}{(1-\mu_{XY}\mu_{YX})} \frac{\partial^{2}u}{\partial y^{2}} + G_{XY}\frac{\partial^{2}u}{\partial x^{2}} + \left\{G_{XY} + \frac{\mu_{XY}E_{Y}}{(1-\mu_{XY}\mu_{YX})}\right\}\frac{\partial^{2}v}{\partial x\partial y} = 0$$

$$\cdots (\mathbb{W} - 1 - 5)$$

ただし、 $G_{XY}=G_{YX}$

そこで,接着線上,および側面上における変位量 u, v を境界条件として (Π -1-5) 式を解き,その u. v 値から (Π -1-3) 式によって, σ_x , σ_y , τ_{xy} は求められる。

ただし、側面上では $\sigma_x=0$, $\tau_{xy}=0$ なる境界条件を 考慮しなければ ならない。 本研究では 実測値の *u. v* を用い、応力計算後側面で $\sigma_x=0$, $\tau_{xy}=0$ なるように外そうした。

(I∇-1-5) 式の解を求めるためには、 数値解析法にしたがって, Mesh point を決定した。 まず同式を 差分方程式で表わし、*u*、*v* に関してその point 数だけできる多元連立一次方程式を, Gauss-Seidel 法³ によってプログラミングして, NEAC 1210 小型電子計算機を用いて解いた。

Ⅳ-1-2-2. 含水率傾斜がある場合の応力解析方法

本研究では,X−軸方向にのみ含水率傾斜がある場合について行なった。 前記(IV-1-3)式を(IV-1-4)式へ代入すれば,

$$\phi_{1} \frac{\partial^{2} v}{\partial x} + \frac{\partial \phi_{1}}{\partial x} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + G_{xy} \frac{\partial^{2} v}{\partial^{2} y} + (\theta_{1} + G_{xy}) \frac{\partial^{2} u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial \theta_{1}}{\partial x} \cdot \frac{\partial u}{\partial y}$$

$$- \left(\frac{\partial \phi_{1}}{\partial x} \alpha_{xm} + \phi_{1} \frac{\partial \alpha_{xm}}{\partial x} \right) - \left(\frac{\partial \theta_{1}}{\partial x} \alpha_{ym} + \theta_{1} \frac{\partial \alpha_{ym}}{\partial x} \right) = 0$$

$$\phi_{2} \frac{\partial^{2} u}{\partial y^{2}} + G_{xy} \frac{\partial^{2} u}{\partial x^{2}} + \frac{\partial G_{xy}}{\partial y} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + (\theta_{2} + G_{xy}) \frac{\partial^{2} v}{\partial x \partial y} + \frac{\partial G_{xy}}{\partial x} \cdot \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$\cdots \cdots (IV-1-6)$$

ここで,

$$\phi_{1} = \frac{E_{X}}{(1 - \mu_{XY} \mu_{YX})}, \quad \theta_{1} = \frac{\mu_{YX} E_{X}}{(1 - \mu_{XY} \mu_{YX})}$$
$$\phi_{2} = \frac{E_{Y}}{(1 - \mu_{XY} \mu_{YX})}, \quad \theta_{2} = \frac{\mu_{XY} E_{Y}}{(1 - \mu_{XY} \mu_{YX})}$$

したがって、Mesh point の各点における弾性常数および膨張、収縮率ならびにそれらのX一軸方向の 勾配値を求めて、u、v に関する差分方程式で表わし、前記と同様にして求めた。

Ⅳ-1-3. 実 験 方 法

本研究では次の2つの組合せの集成材を用いた。

1) ミズナラ板目-エゾマツ板目-ミズナラ板目の 3 plies 集成材

ミズナラ (Quercus crispla BLUME.) 板目

気乾比重 (M.C. 12%):0.65

- 29 -

気乾時(M.C. 12%)より飽水時までの膨張率:板目方向 8.8%, 柾目方向 3.4%
エゾマツ(Picea jezoensis CARR.)板目
気乾比重(M.C. 12%):0.36
年輪密度:7
気乾時(M.C. 12%)より飽水時までの膨張率:板目方向 4.3%, 柾目方向 1.5%
2) ミズナラ柾目-エゾマツ板目-ミズナラ柾目の 3 plies 集成材

ミズナラ 柾目

気乾比重 (M.C. 12%): 0.56

気乾時(M.C. 12%)より飽水時までの膨張率:板目方向 5.1%, 柾目方向 2.1%

エゾマツ 板目

気乾比重 (M.C. 12%): 0.37

年輪密度:7

気乾時(M.C. 12%)より飽水時までの膨張率:板目方向 4.9%, 柾目方向 1.6%



Fig. IV-2 ひき板集成材試片 The specimen used for the test.

このような材質のミズナラひき板と エゾマツひき板をレゾルシノール樹脂 接着剤(日本ライヒホールド株式会社 製 プライオーヘン 6000)で接着し, Fig. IV-2 のような試片を製作した。 試片は含水率12%に調湿し,接着 線上では約3mm間隔に標点をつけ, 接着線上の両側付近ではさらにその半

分の位置にもつけた。

コアー材の両側辺では約2.3mm間隔に標点をつけた(Fig. IV-1 参照)。

そして各標点の X-, Y-軸座標を 1/100mm ダイヤルゲージ,および 5/1000mm マイクロメーター 付き拡大投影機で決定した。

その後注入装置によって飽水状態とし、2日後ふたたびその位置を測定して飽水までの変位量 *u*, *v* を 求めた。

さらにこれら飽水状態の試片の標点上には、透明度の高いビニールテープをはり付け、木口面の他部分 には粘度を高くしたアルミ微紛入りワニスを塗付した。

このような試片を次のように乾燥した。

ミズナラ板目-エゾマツ板目-ミズナラ板目のA試片を、20°C、R.H. 65% に 6 日間放置して乾燥し、 その後、

- A1試片:7日目にミズナラ木口面上の塗料を試片の上下面より 幅約0.6cm 表裏両面で取り除き,前 記条件で4時間放置後, u, v 値を測定した。
- A2試片:6日目にミズナラ木口面上の塗料を試片の上下面より幅0.5cm あて表裏両面で取り除き, 7日目にさらに0.5mm 取り除いて5時間後に *u*, *v* 値を測定した。

B 試 片:ミズナラ柾目-エゾマツ板目-ミズナラ柾目の試片を 20℃, R.H. 85% にて5日間乾燥し

-30 -

ミズナラ木口面の塗料の取り除きを行な わなかった (Fig. Ⅳ-3 参照)。

このようにして *u*, *v* 値を測定した後 ただちに 電気抵抗式 含水率計(KETT 社製)によって, 含水率分布を 測定し た。なお, 電極は針の 直径 0.1cm の真 ちゅう製で, 針の間隔 0.35cm としたも のであり, あらかじめ含水率目盛につい て絶乾法による含水率との照査試験を行 なった。

膨張率の測定は,試片とほぼ隣接した 位置より採取したエゾマツ試片につい て,気乾状態より飽水状態までの膨張率 を測定し,その後乾燥して気乾(M.C. 12%)より測定時の含水率までの膨張率 を求めた。

弾性常数は既往の研究47)48)にもとづい

て, Fig. Ⅳ-10, Ⅳ-11 に示した。 Ⅳ-1-4. 実験結果および考察

以上のようにして求められたX-, Y-軸方向の変位量 v, u, を Fig. IV-4~IV-9 に示す。

またエゾマツ材中の含水率傾斜の状態およびそれにともなう弾性常数, 膨張率の変化状態を Fig. Ⅳ-10. Ⅳ-11 に示す。

これらに基づいて求められた σx, σy, τxy の分布状態を Fig. Ⅳ-12~Ⅳ-17 に示した。

また試片乾燥後の u, v 測定時におけるミズナラ材の乾燥状態を Fig. Ⅳ-18 に示す。

Fig. Π -4~ Π -18 中における*X*は、中心点0に対するその点の*X*—軸座標 *xi* の試片幅の半分 L/2 に 対する比であり、同様に*Y*は中心点に対する*Y*—軸座標 *yi* とエゾマツ材の厚さの半分 H/2 との比であ る。

 σ_x , τ_{xr} は X = 1.000 においてともに $\sigma_x = 0$, $\tau_{xr} = 0$, なる境界条件を満足せしめる必要があるので 曲線の延長が 0 となるように外そうした。また接着線上の各応力は、応力の勾配が (IV-1-4) 式を満足す るように外そうした。

IV-1-2 に記したことから明らかなように,これらの応力は,塑性変形が除かれていない変位置から求められたものであるため,定量的に求められたものではない。

しかしながら,第Ⅱ章における応力緩和試験結果と,これらの応力状態とを照らし合わせれば概略の傾向をはあくすることができるだろう。

含水率変化の過程では、全般的に塑性変形は大きく、とくに高い応力を示す部分は塑性変形が大きいので、測定された時点における応力は Fig. Ⅳ-12~Ⅳ-14 に示されているより多分に低いと考えられる。 しかし、Fig. Ⅳ-12~Ⅳ-14 に示された応力状態は、気乾状態より飽水状態への含水率変化によって、応



Fig. IV-3 A1, A2, B試片の被覆状況 The covering on the specimen A1, A2, B.





積層接着された木材の内部応力に関する研究(椋代)



- lamination after water-impregnation.
 - Specimen 3 B

The displacement on the boundary of spruce lamination after drying.

Specimen : B



à.









一板目ひき板集成材A1試片-

Stress distributions in the spruce lamination after water-impregnating.

Specimen : A1





Stress distributions in the spruce lamination after water-impregnating.

Specimen : A2





0.182

0.091 0

Y-%

5%

24

-13

 $Y = \tilde{o}$ 单位: Kg/cm2

-: 圧縮施力

Gx, Gy で + ; 引張 座力

X-軸方向の垂直応力: Gx

Q545

Y-軸方向の垂直応力: бү

х

Specimen : A1

0.454

XーY 面内のせん町応刀:てxy

0364

Q273

0.636

х



林業試験場研究報告 第 211 号

積層接着された木材の内部応力に関する研究(椋代)





力が発生増大している段階の応力状態を定性的に示していると考えられる。

Fig. Ⅳ-12, Ⅳ-13, Ⅳ-14 の飽水における応力状態について考察すれば,

1) σ_x が引張応力の場合には、側面で σ_y は圧縮応力となり (Fig. IV-12, IV-13)、 σ_x が圧縮応力 の場合には、側面で σ_y は引張応力となる (Fig. IV-14)。

 σ_Y の大きさは (X=0, Y=1) における σ_X とほぼ同程度の高さに達すると推測される。

2) τ_{XY} は側面 (X=1, Y=1) の近くでほぼ最高を示すと思われる。その値は (X=0, Y=1) にお ける σ_X の絶対値が高いほど高いと推測される。

 τ_{XY} は σ_x が引張応力の場合(A1,A2試片)の方が、圧縮応力の場合(B試片)より高い値を示しているが、これは前記のように、A1,A2試片の(X=0,Y=1)における $|\sigma_x|$ がB試片の場合のそれよりも高いことによると考えられる。

第Ⅱ章における応力緩和試験の結果にも見られるように、高い応力を示す部分は 塑性変形も大きいの で、A1、A2試片における側面の σ_r のY方向の傾斜はゆるくなり、したがって、(Π -1-4) 式から理 解できるように、 τ_{XY} のX一軸方向の傾斜はゆるくなり、その値は、示されている値よりも多分に低いだ ろう。

これに対して、コアー材の膨張が制約されて σ_x が圧縮応力の場合(B試片)には σ_r のYー軸方向の 傾斜はほとんどなく、したがってせん断応力の低下はA1、A2試片の場合ほど多くないと考えられる。

これらの気乾状態より飽水状態までの変位量より求められた応力状態は、Fig. IV-19、IV-20 に示す小 畠ら¹⁴⁾¹⁵⁾、また SCHNIEWIND¹⁸⁾の解析結果と比較してよく類似しているが、 τ_{XY} の最高値と、(X= 0、Y=1)における σ_X との比は、本実験結果の方が小さい。

Fig. IV-15~IV-17 の乾燥後の応力状態についても、全般的には前記飽水の場合と同様なことが考えられる。個々の場合について考察すれば、





Stress distribution in plastic lamination of 3 ply material composed of metal-plastic-metal (by KOBATAKE and INOUE).



Sx, Sy, Txy, Y, Xは Fig. 17-19のそれと同一.

Fig. Ⅳ-20 Oak 材間に接着されたプラスチック板中に生じた内部応力 (Oak 材の乾燥時) (A.P. SCHNIEWIND による) The stress in plastic plate glued between two Oak laminations (by A.P. SCHNIEWIND).

1) A1, A2試片ともに X = 0.727 付近て、 σ_X , σ_Y の分布曲線に変曲点をもち、 σ_X は側面に向かっ て急激に増加した後、0に向かって減少している。これは箆水後乾燥によって含水率が変化した部分であ るので、塑性変形は大きく、実際には示されている値よりも低い値になると考えられる。 み についても 同様なことがいえるだろう。

2) 注目すべき事がらは、A1試片の場合には、側面における or に、飽水時における圧縮応力の影響 が著しく残留しているらしいことである(Fig. Ⅳ-15)。A2試片では この残留はなく, 比較的高い引張 応力が働いている (Fig. Ⅳ-16 参照)。

このA1、A2試片の側面における引張応力 σ_{Y} は、側面よりの乾燥によって生じた含水率傾斜による 引張応力と、試片の上下面よりの乾燥によって、ミズナラ材中に生じた曲げモーメントに基づく接着層に 垂直に働く引張応力が重畳されたものである。後者の影響が大きいことは Fig. Ⅳ-18 の水分分布からも 理解できる。また同時に,飽水時における側面の or が後時まで残留し,その影響も大きいことを示して いるといえよう。上下面よりの乾燥によって生ずる垂直応力 σr が両側面で大きいことは、第Ι章におい て記したように、DIETZ ら¹⁶⁾が指摘したとおりである。

3) A1, A2試片ともに、X = 0.727の σ_x , σ_y の変曲点付近では水分傾斜によるせん断応力の増加 はさほど認められず、X = 0.818 に向かってやや増加し、その後 X = 1.000 に向かって減少している。と くにA1試片ではこの傾向が明らかに見られ、側面付近でのせん断応力集中の危険度は少ないと考えられ る。

4) B試片では、σr は飽水時の応力と比較して側面で急激に増加しており、 せん断応力は 側面付近で 高い。このことは両側面の接着層でせん断応力の集中の恐れがあることを示すものと考えられる。

以上の事がらは、塑性変形を含む変位量から求められた応力について、応力緩和試験結果と関連せしめ て考察を加えた結果であるが、Fig. Ⅳ-12~Ⅳ-17 の応力状態は、接着された 3 plies 集成材が含水率変 化をうけて応力が増大している段階におけるコアー材中の基本的な傾向を表わしていると考えてよいだろ う。

Ⅳ-2. ひき板集成材のはく離¹²⁾と内部応力との関係

Ⅳ-2-1. はく離促進試験方法

はく離促進試験の方法は、ASTM D1101-53: "Integrity of glue line in laminated wood products for exterior service"に準拠して行なった。

試片として,種々な比重のミズナラ板目および柾目と,比重 0.43~0.45 のエゾマツ板目および 0.37~ 0.40 のエゾマツ柾目のひき板を用いて、 Fig. Ⅳ-21 のよう な構成断面をもつ 7.0cm 長さの試片にフェノール・レゾル

シノール・フォルムアルデヒド共縮合樹脂接着剤(日本ライ ヒホールド株式会社製 TD453)を用いて接着した。

この試片を ASTM 法に準拠した方法で真空一加圧のサイ クルによって飽水状態とし, 乾球 30℃, 湿球 18℃, 風速1 m/sec の条件下で乾燥し、この飽水一乾燥を2サイクル繰り 返してはく離を測定した。ただし本実験では乾燥時に Table IV-1 のようなゴムによる被覆を試片に行なって, 試片表面 Accelerated delamination test specimen.



Fig. IV-21 はく離促進試片



Fig. IV-22 曲げ弾性係数および膨張率測定 用試片採取位置

Specimen for measuring of elastic modulus and swelling length in widthwise. からの乾燥を規整をすることによって、内部応力の状態を 変化させた。

一方,この試片の隣接部位より Fig. Ⅳ-22 のように採 取した試片によってひき板の含水率 12% 時の 曲げ 弾性係 数および含水率 12% より飽水までの膨張量を測定した。

また促進試片について,含水率 12% より 飽水まで の接 着層における膨張率をも測定した。

はく離は,最初試片の側面の接着層に沿った部分のみに 現われて,それ以外の部分に発生することがなく,しだい

Table IV-1. 各 試 片 の 被 覆 条 件

Drying condition of accelerated delamination test specimen

乾燥日程	試片の処理番	号 No. of cover treatment
drying (day)	No. 1	No. 2
1	木口および側面の全面を被覆し,上下面 は被覆せず。 Whole area of end and side face of specimen was covered, and top and bottom face was not covered. Side	木口および上下面の全面を被覆し,側面 は被覆せず。 Whole area of end and top and bottom face was covered, edge face was not covered.
2	上に同じ Do.	上に同じ Do.
3	木口および側面で上下面より0.5cm被覆 をとる。 Cover of 0.5cm length from top and bottom side was taken off.	木口および上下面で側端面より0.5cm被 覆をとる。 Cover of 0.5cm length from edge side at end and top and bottom face was taken off.
4	上下面より1.0cm被覆をとる。 Cover of 1.0cm length from top and bottom side was taken off.	側端面より1.0cm被覆をとる。 Cover of 1.0cm length from edeg side was taken off.
5	上下面より1.5cm被覆をとる。 Cover of 1.5cm length from top and bottom side was taken off.	側端面より1.5cm被覆をとる。 Cover of 1.5cm length from edge side was taken off.
6	上に同じ Do.	上に同じ Do.
7	上下面より2.0cm被覆をとる。 Cover of 2.0cm length from top and bottom side was taken off.	側端面より2.0cm被覆をとる。 Cover of 2.0cm length from edge side was taken off.



はく離量= $\frac{a+b}{2}$ ・ $l+\frac{a'}{2}$ ・l'

Diagram illustrating measuring of amount of delamination.



Fig. Π -24 矢 高 測 定 試 片 The specimen for measuring of curvature of lamination caused by drying from one surface.

Table IV-2. 表面からの乾燥によって生ずる幅方向の湾曲を測定した試片の乾燥条件 Drying condition of specimens for measuring of curvature of lamination caused by drying from one surface.

乾燥日程 Period of drying (day)	試片の処理条件 Cover treatment of specimen
1	下面,側面および木口全面を被覆し上面のみあける。 Whole area of end, side and bottom face was covered, top face was not covered. Side Bottom face was covered
2	上 に 同 じ Do.
3	側面および木口面の被覆を上面より 0.5cm とる。 Cover of 0.5cm length from top side was taken off.
4	側面および木口面の被覆を上面より 1.0cm とる。 Cover of 1.0cm length from top side was taken off.
5	側面および木口面の被覆を上面より 1.5cm とる。 Cover of 1.5cm length from top side was taken off.
6	上 に 同 じ Do.
7	側面および木口面の被覆を 2.0cm とる。 Cover of 2.0cm length from top side was taken off and only bottom face was covering.

林業試験場研究報告 第211号

Table IV-3. は く 離 促

The results of accelerated

		1	1	1	and the second		
試片記号 Marks of specimen	木 理 の 組 合 せ Combination of grain	年輪密度 Density of annual rings	比 重 Specific gravity	曲げ弾性 係 数 Bending modulus E ₀ , Es × 10 ³ kg/cm ²	ミズナラおよ びエゾマツ材 の膨張率 Swelling percentage of Oak and Spruce Jl ₁ (%)	促進試片の接着 層におけるエグ マツ材の膨張率 Swelling percentage of Spruce on the glue line ⊿l ₂ (%)	$E_S imes \Delta l$ kg /cm ²
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
TTA 1	NT ET NT	10	0.52 0.43 0.51	$\begin{array}{c} 6.1^{*1} \\ 4.3^{*2} \\ 3.3^{*3} \\ 6.4^{*4} \end{array}$	4.92*5 4.62*6 4.77*7 5.54*8	5.08*9 5.38*10	20.0 20.0
TTB 1	NT ET NT	10	0.64 0.45 0.64	6.5 3.8 3.4 7.5	6.31 5.23 5.38 6.77	5.85 6.00	23.1 21.5
TTC 1	NT ET NT	11	0.73 0.43 0.73	8.4 5.4 4.0 9.3	7.69 4.62 4.77 8.00	7.08 6.62	132.3 73.8
RTA 1	N R E T N R	10	0.67 0.45 0.67	12.7 4.9 5.6 12.6	2.31 5.23 5.54 2.77	3.23 3.54	-98.5 -112.3
RTB 1	N R E T N R	10	0.76 0.45 0.77	14.4 5.1 3.9 13.4	2.92 5.38 5.54 3.08	3.69 4.00	-86.2 -60.0
TTA 2	NT ET NT	8	0.50 0.45 0.48	5.7 4.7 5.1 5.6	4.46 5.23 5.23 4.46	4.92 4.77	-15.4 -23.1
TTB2	NT ET NT	7	0.59 0.45 0.59	6.3 3.3 3.1 6.7	5.38 5.23 5.08 5.54	5.38 5.54	4.6 13.8
TTC 2	NT ET NT	7	0.63 0.45 0.63	6.6 4.1 3.8 6.1	5.69 5.08 5.54 7.54	6.62 7.08	63.1 58.5
TTD 2	NT ET NT	7	0.67 0.44 0.67	7.3 5.3 4.2 8.2	7.38 5.23 5.38 6.92	6.46 6.62	64.6 52.3

注)NT:ミズナラ板目,ET:エゾマツ板目,NR:ミズナラ柾目,ER:エゾマツ柾目

 E_0 :ミズナラの曲げ弾性係数, E_s :エゾマツ材の曲げ弾性係数

*1, *4 は E_0 , *2, *8 は E_s の値を示す。*5, *8 はミズナラの Al_1 , *6, *7 はエゾマツの Al_1 値を示す。*9, *10 は促進試片の上下接着層における Al_2 値を示す。

積層接着された木材の内部応力に関する研究(椋代)

進試験結果

delamination test

No.1被覆処理試片 No.1 cover treatment				No. 2 被覆処理試片 No. 2 cover treatment			
1 サイクル	/ 1 cycle	2 サイクル	 2 cycle 	1サイクル 1 cycle		2サイクル 2 cycle	
はく離まで の乾燥日数 Period of drying (days)	はく離量 Amount of delamination (mm ²)	はく離まで の乾燥日数 Period of drying (days)	はく離量 Amount of delamination (mm ²)	はく離まで の乾燥日数 Period of drying (days)	はくり量 Amount of delamination (mm ²)	はく離まで の乾燥日数 Period of drying (days)	はく離量 Amount of delamination (mm ²)
(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
5	60		190		0		0
	0	5	70		0		0
3	450		750	1	0		0
2	1090		1540	2	865		1260
1	1165		1420	1	1125		1175
	0	5	80		0		0
5	75		380		0		0
	0	5	60		0		0
5	25		85		0		0

Note) NT: flat grained Oak, ET: flat grained Spruce, NR: edge grained Oak, ER: edge grained Spruce.

- 45 -

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
TTE 2	NT ET NT	7	0.70 0.45 0.70	8.9 4.9 4.8 7.9	6.46 5.38 5.69 7.54	6.46 6.77	52.3 52.3
TTF 2	NT ET NT	6	0.76 0.45 0.77	8.5 4.7 3.9 8.4	8.31 5.08 5.69 8.92	6.92 7.08	86.2 53.8
RTA 2	N R E T N R	6	0.49 0.44 0.52	10.2 2.6 2.8 10.7	2.00 4.62 5.08 2.31	3.08 3.69	-40.0 -38.5
RTB 2	N R E T N R	6	0.67 0.45 0.67	10.9 4.5 3.6 11.4	2.92 4.92 5.08 3.08	4.00 4.15	-41.5 -38.5
RTC 2	N R E T N R	6	0.74 0.45 0.72	13.1 5.2 5.5 14.7	3.54 5.39 5.69 3.08	4.15 4.46	-64.6 -67.7
TTA 3	NT ET NT	7	0.59 0.35 0.59	6.7 2.8 4.1 7.6	7.23 4.15 4.15 5.85	6.15 5.08	55.4 38.5
TTB3	NT ET NT	7	0.60 0.35 0.63	6.8 3.1 3.7 7.5	6.62 4.15 4.31 7.54	5.69 5.39	47.7 40.0
TTC 3	NT ET NT	7	0.68 0.35 0.68	7.6 3.6 4.3 8.1	9.54 4.15 4.31 6.62	7.85 5.54	133.8 52.3
TTD 3	NT ET NT	7	0.76 0.36 0.74	8.2 3.0 2.7 9.1	6.62 4.46 4.46 8.00	6.15 6.15	50.8 46.2
RTA 3	N R E T N R	7	0.59 0.35 0.59	8.0 4.1 3.2 8.8	3.54 5.23 5.23 3.54	2.92 3.69	-93.8 -49.2
RTB 3	N R E T N R	7	0.62 0.35 0.61	9.7 3.1 3.7 7.6	2.46 4.31 4.15 2.00	2.62 2.15	-52.3 -73.8
RTC 3	N R E T N R	8	0.65 0.34 0.65	13.1 2.7 3.1 11.2	2.15 4.00 4.15 2.62	2.15 2.62	-49.2 -47.7
RTD 3	N R E T N R	7	0.72 0.35 0.71	13.3 3.2 3.6 11.9	2.15 4.15 4.31 1.85	2.31 2.31	-58.5 -72.3

Table IV-3. (つづき) (Continued)

— 46 —

積層接着された木材の内部応力に関する研究(椋代)

— 47 —

(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
5	75		195		0		0
	0	5	90		0		0
	0		0	3	70		90
	0		0		0		0
1	750		950	1	1125		1150
4	120		350		0		0
4	10		180		0		0
4	140		560		0		0
4	140		875		0		0
	0	2	320		0	2	50
	0	1	130		0	1	70
	0	3	10		0		0
	0	1	150		0	1	103

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(8)	(7)
RRA 1	N R E R N R	4	0.57 0.40 0.57	9.8 1.7 3.9 7.9	2.62 0.92 0.92 2.77	1.54 1.69	10.8 30.8
RRB 1	N R E R N R	4	0.63 0.39 0.64	10.5 2.2 1.1 10.8	1.85 1.23 1.23 2.00	1.69 1.69	10.8 4.6
RRC 1	N R E R N R	5	0.66 0.39 0.66	13.8 3.3 4.9 10.8	2.46 0.77 0.77 3.39	1.54 1.69	26.2 44.6
RRD 1	N R E R N R	4	0.72 0.39 0.72	13.5 2.7 4.5 12.9	2.15 0.92 0.92 2.31	1.39 1.39	12.3 21.5
RRE 1	N R E R N R	5	0.74 0.39 0.74	12.7 2.3 2.6 12.5	2.92 0.92 0.92 2.62	2.15 1.69	27.7 20.0
TRA 1	N T E R N T	4	0.53 0.40 0.54	5.6 3.8 2.2 5.2	4.77 0.92 0.92 6.46	3.23 3.39	69.2 53.8
TRB 1	N T E R N T	4	0.68 0.38 0.67	3.2 2.6 7.1	3.2 2.6 7.1	4.00 4.46	103.1 95.4
TRC 1	N T E R N T	4	0.73 0.37 0.73	8.1 1.6 2.6 8.1	9.23 1.08 1.08 8.31	5.39 5.85	69.2 124.6
RRA 2	N R E R N R	5	0.59 0.39 0.59	10.1 1.7 3.0 10.2	2.31 1.08 0.77 2.00	1.69 1.39	10.8 18.5
RRB 2	N R E R N R	5	0.73 0.37 0.73	12.9 3.0 1.8 12.6	3.39 1.08 1.08 2.77	2.00 1.69	27.7 10.8
TRA 2	N T E R N T	5	0.63 0.39 0.63	6.1 1.4 1.8 6.6	6.31 0.92 0.92 6.62	3.85 4.46	41.5 63.1
TRB 2	N T E R N T	5	0.68 0.39 0.68	7.4 2.6 2.1 7.5	8.C0 1.23 1.23 7.08	4.62 4.77	87.7 73.8
TRC 2	N T E R N T	5	0.71 0.38 0.71	8.3 1.6 2.1 8.4	8.92 0.77 0.77 7.85	3.69 4.77	46.2 84.6

Table IV-3. (つづき) (Continued)

積層接着された木材の内部応力に関する研究(椋代)

- 49 -

(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
	0		0		ο		
	0	4	15		0		0
	0		0		0		0
	0		0		0		0
4	15		30		0		0
	0		0		0		0
	0		0		Ο		0
	0	4	40		0		0
	0		0		0		0
	0	2	30		0		0
	0	4	20		0		0
	0	4	25		0		0
	0		c		0		0

- 50 -

そこで、このはく離長さ *l* を側面で測定し、深さを両木口面で測定して *a*, *b* とし、はく離量を次式で 表わすこととした (Fig. IV-23 参照)。

はく離量 $D = \frac{a+b}{2} \cdot l$

外側材であるミズナラの外側面(上下面)よりの乾燥のために生ずるミズナラ材中の曲げモーメントに よって、側面の接着層に垂直な引張応力が生じ、その垂直応力の影響が大きいことを Ⅳ-1 において指摘 したが、この経過を検討するために、Fig. Ⅳ-24 のような試片を2種類の比重のミズナラ板目および征 目板より採取して、はく離促進試験と同一方法によって飽水とした。その後、Table Ⅳ-2 のように木口 および側面にゴム被覆をして、はく離促進試片の場合と同一の条件下で乾燥した。ただし、下面はアルミ 微紛入りワニスによって被覆した。そして、この試片の両木口面より1 cm 内方および長さ方向の中央に おける幅方向の湾曲の矢高をスパン 6 cm の中央で測定した。

Ⅳ-2-2. 実験結果および考察

前記の測定値を Table IV-3 および Fig. IV-25 に示す。本実験におけるはく離は、観察の結果、接着





The relation of period of drying and depth of curvature of outer lamination caused by drying from surface according to Table IV-2.

層中または接着層と木材の界面での破壊によるはく離ではなく,接着界面に沿ってエゾマツの繊維がごく 薄くミズナラ側に付着した木部破壊であった。

はく離は乾燥過程においてのみ生じた。

エゾマツ材の膨張率測定試片 (Fig. IV-22) による膨張率 dl_1 と,はく離促進用の試片 (Fig. IV-21) の接着層における膨張率 dl_2 の差 $dl = dl_2 - dl_1$ をとり、さらに、この値にエゾマツ材の曲げ弾性係数 を乗じた *Es*・*dl* の値を、 IV-1 に示したエゾマツ材中の σ_x の指標とした。また各サイクルの乾燥開始 よりはく離するまでに要した日数を求め、これらを Table IV-3 に示した。

これらの結果では, 柾目のエゾマツを用いた試片は, はく離がきわめて少なく, その傾向ははあくしが たいので, まず板目エゾマツを用いた試片のはく離発生の傾向について考察することとする。

1) $E_s \cdot dl$ 値が負 (σ_x が圧縮応力) の場合, Table IV-1 に示す被覆条件の異なる No. 1, No. 2 の 試片についての関係は明らかで, No. 1 ではく離量が多いほど No. 2 でも多く, はく離までの日数も ほぼ一致する。

2) 実際の使用状態に近いと考えられる No. 1 の試片について見れば、

i) $E_s \cdot \mathcal{I}_l$ 値が正 (σ_x が引張応力) の場合には、はく離量と $E_s \cdot \mathcal{I}_l$ 値の大小関係は明りょうではな い。

ii) E_{s} ・ Δl 値が負の場合には、はく離量と E_{s} ・ Δl 値の大小との関係は比較的明りょうで、 E_{s} ・ Δl 値が 大きいほどはく離量も大きい。

iii) はく離量を生ずるまでの日数について見れば、 E_{s} ・ Δl 値が正の場合にはほぼ 3 ~ 5 日を要している が、負の場合には 1 ~ 2 日である。

板目エゾマツを用いた No.1 のはく離状態と IV-1 に記した応力状態との関連について考察すれば,

1) ミズナラ材の被覆状態の関係から見れば、IV-1 におけるA1試片の乾燥過程における応力状態は、 本実験におけるミズナラ板目ーエゾマツ板目ーミズナラ板目試片の乾燥2~3日目のそれに相当すると考 えられ、側面において *τxr* の集中の危険度は少なく、また側面における *σr* も飽水時における圧縮応力 の影響が残留しているために、はく離の危険度は少ない。本実験結果もそれを示していると考えられる。

2) IV-1 におけるA2試片の乾燥過程における応力状態は、本実験におけるミズナラ板目ーエゾマツ 板目ーミズナラ板目の乾燥の4~5日目のそれに相当し、側面における τxr の集中と同時に、A1試片 に見られるような飽水時における側面の圧縮応力の残留はなくなり、高い引張応力 σr によって、はく離 の危険度は大きく、本実験結果もそれを示していると考えられる。

また,はく離促進試片のミズナラ外側材の上下面よりの乾燥による側面の引張応力 σ_r の変化は, Fig. IV-25 からも推察され,この実験結果ともほぼ一致することが認められる。

3) B試片の乾燥時における応力状態は、本実験のミズナラ柾目ーエゾマツ板目ーミズナラ柾目試片の 乾燥1~2日目のそれに相当すると考えられる。側面における *τxy*の集中とともに高い引張応力 *σy* に よって、はく離の危険度は大きい。本実験結果もそのことを明らかにしている。

以上の事がらから考察されるように,はく離に対しては,側面におけるせん断応力の集中もさることながら,側面における接着層に垂直な応力 *o*_Y の影響が大きいと考えられる。

本実験に用いた試片によって,この σ_Y とはく離の関係を模式的に示せば Fig. Ⅳ-26 のごとくで,材の組合せにあたっては, σ_Y に関連するこれらの因子に留意する必要がある。



(A):外側材の膨張率<コアー材の膨張率の場合

(B):外側材の膨張率>コアー材の膨張率の場合

Ft : コアー材側面の接着層における引張強度

I-I:試片の上下面よりの乾燥によって外側材が湾曲しようとして生ずるコア ー材側面の接着層に垂着な引張応力

- Ⅱ-Ⅱ:試片側面からの乾燥によって生ずるコアー材側面の接着層に垂直な引張 応力
- Ⅲ-Ⅲ:外側材とコアー材の膨張収縮によって生ずるコアー材側面の接着層に垂 直な応力

Case of (A): swelling of outer lamination<swelling of core lamination.

Case of (B): swelling of outer lamination>swelling of core lamination. Fig. IV-26 側面の接着層に垂直な応力とはく離との関係

Schematic diagrams illustrating the time when delamination developed in the specimen.

エゾマツ
柾目を用いた
試片には,はく
離が非常に少なく,板目を用いたものにはく
離が多い。この
原因 について
は次のように
考えられる。

エゾマツ板目を用いた試片では、側面に早材と晩材の境界があらわれ、それが必然的に接着層に接す る。この早材と晩材との関係は、本実験におけるミズナラ材とエゾマツ材の関係と同様に、この境界には 応力集中が生ずると考えられ、このためにはく離の発生が多くなったと考えられる。

以上ひき板集成材の内部応力と促進試験によって生じたはく離との関係について考察を加えたが,これ から次の事がらがいえよう。

1) 外側材によってコアー材の膨張収縮が制約されている量が少ないほどはく離の危険度が少ない。

2) コアー材の膨張が制約されている場合と、収縮が制約されている場合とを比較すれば、前者の場合、 側面には接着層に垂直な引張応力を生じ、制約されている量が多いほどその値は高い。側面からの乾燥に よって生ずる同方向の引張応力および外側材表面からの乾燥による引張応力がこれに重畳されるため、は く離に対しては一般的には収縮が制約されている場合より危険度が高いと考えられる。収縮が制約された 場合には側面で接着層に垂直な圧縮応力を生ずるために、膨張が制約されている場合より有利であるが、 外側材の表面から乾燥によって生ずる外側材の曲げモーメントが大きいときには、側面の接着層に垂直な 応力に強く影響するので,外側材の選定は, このような曲げモーメントの小さな材を選定する必要がある。

3) 針葉樹の場合,板目材(集成材の幅方向と接線方向とが一致する材)のものは,早材と晩材との境 界に応力集中を生じ,この境界が接着層に近い場合にはく離の危険度は高い。

Ⅳ-3. 化粧集成柱

Ⅳ-3-1.研究の目的

近年集成材をわが国の木造家屋に適用させる試みがなされ,化粧単板を集成角柱の表面に接着したいわ ゆる化粧集成柱が製品化され,市販されるに至った。この集成柱は一面において構造用材としての使命を 有するとともに,他面において銘木柱の代替材としての使命を強調されている。このために化粧用単板の 干割れを防止するため,集成コアー材の表面と化粧単板との間にクロスバンドを接着した構成をとってい る場合が多い。

この構成の集成柱を用いた木造家屋 の建築に湿式法(土壁による壁体構築 法)を行なった場合,まず接着力が低 いと見られるクロスバンドの木口接着 面にはく離を生じ,その後,大きな割 れをコアー材のかどよりほぼ対角線方 向に生じ(Photo. IV-1 参照),これ は集成材工業界に大きな破もんを投げ かけた。

この原因について、種々憶測がなさ れたが、明確な解明はいまだなされて いない。

本研究は,この割れの原因が湿式法 による集成柱の含水率変化にともなう



Photo. IV-1 市販集成材の割れ The V-shape crack in the fancy veneered laminated column. コアー材:ラワン クロスバンド:ラワン 表化粧単板:ヒノキ

内部応力にあると考え、この集成柱中の内部応力を解析して割れの原因を究明しようとしたものである。

Ⅳ-3-2. 応力解析方法

前記のように、割れはコアー材のかどから中心部に向かって生ずるので、この原因を究明するために集 成柱のコアー材中の内部応力を解析することとした。

半径および接線方向がそれぞれ*X*-, *Y*-軸に一致したとき,

X方向の変位量を v,

Y 方向の変位量を u,

としたとき、そのひずみはそれぞれ

$$\left. \begin{array}{c} \varepsilon_{X} = \frac{\partial v}{\partial x} \\ \varepsilon_{Y} = \frac{\partial u}{\partial y} \\ \gamma_{XY} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \end{array} \right\}$$
....(IV-3-1)

ここで, $\varepsilon_x: X$ 方向のひずみ

εy:Y方向のひずみ

Yxy: *X*−*Y*面におけるせん断ひずみ

一方,

$$\sigma_{X} = \frac{E_{X}}{(1 - \mu_{XY}\mu_{YX})} (\varepsilon_{X} + \mu_{YX}\varepsilon_{Y})$$

$$\sigma_{Y} = \frac{E_{Y}}{(1 - \mu_{XY}\mu_{YX})} (\varepsilon_{Y} + \mu_{XY}\varepsilon_{X})$$

$$\tau_{XY} = G_{XY}\gamma_{XY}$$
(IV-3-2)

ここで、 σ_X : X方向の、Y軸に垂直な方向の応力

*o*_Y: Y 方向の, X 軸に垂直な方向の応力

 $\tau_{XY}: X - Y$ 面内のせん断応力

E_x:X方向の弾性係数

E_Y: *Y*方向の弾性係数

 $G_{XY}: X - Y$ 面内でのせん断弾性係数

µxy:ポアンソ比(Y方向のひずみ/X方向のひずみ)

µyx:ポアソン比(X方向のひずみ/Y方向のひずみ)

したがって,

$$\sigma_{X} = \frac{E_{X}}{(1 - \mu_{XY}\mu_{YX})} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \mu_{YX} \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

$$\sigma_{Y} = \frac{E_{Y}}{(1 - \mu_{XY}\mu_{YX})} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \mu_{XY} \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

$$\tau_{XY} = G_{XY} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$
(IV-3-3)

一方応力の平衡方程式は,

(Ⅳ-3-4) 式へ (Ⅳ-3-3) 式を代入して,

$$\frac{E_{\chi}}{(1-\mu_{XY}\mu_{YX})} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + G_{Y\chi} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \left\{ G_{Y\chi} + \frac{\mu_{Y\chi}E_{\chi}}{(1-\mu_{XY}\mu_{Y\chi})} \right\} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} = 0 \\ \frac{E_{Y}}{(1-\mu_{XY}\mu_{Y\chi})} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + G_{\chi Y} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \left\{ G_{\chi Y} + \frac{\mu_{\chi Y}E_{Y}}{(1-\mu_{XY}\mu_{Y\chi})} \right\} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} = 0 \right\} \dots (IV-3-5)$$

ゆえに、(IV-3-5) 式を与えられた u、v に関する境界条件によって解き、各点の u、v を求めて (IV-3-3) 式によって各点の応力が求められる。

この境界条件の変位量 *u*, *v* は接着線上における膨張収縮による変位およびレオロジー的な塑性変位を 除いた弾性変位のみをさすものである。

このためには,試片を測定時に*X*-, *Y*-方向に薄くスライスして,スライス片のスライス前と後の瞬間的な長さの変化(瞬間弾性回復変位)を測定して,この変位量*u*,*v*を境界条件とすればよい。コアー材の中心点に*X*-,*Y*-軸の原点をとれば,左右上下対称となるので,応力はコアー材の1/4部分について求めればよい。

— 54 —

(I∇-3-5) 式の解は IV-1 におけると同様に数値解析法の Gauss-Seidel 法により, NEAC 1210 小型電子計算機を 用いて求めた。

Ⅳ-3-3. 実 験 方 法

試片:比重 0.37, 年輪密度7のエゾマツ (Picea jezoensis CARR.)の1.9cm 厚さの板目板を含水率14.7% に 調湿後, Fig. IV-27 のように, レゾルシノール樹脂接着 剤(日本ライヒホールド株式会社製プライオーヘン6000) を用いて完全な接着が行なわれるようにして5plies と し,接着後輻方向の長さを9.50cm に仕上げて9.50cm 角 のコアー材を製作した。この角材の表面に1.6mm 厚さの ヒノキ(Chamaecyparis oblusa ENDL.)板目板を繊維方向 がコアー材のそれと直交するようにして,前記接着剤を用 いて接着した。この集成角柱より5mm厚さのコアー材木 口面の試片を採取して,ふたたび14.7%含水率に2週間 調湿した。

応力解析は次の2つの場合について行なうこととした。

1) 吸湿して一様に含水率 21.4% になった場合

2) 乾燥して一様に含水率 8.7% になった場合

1) にするためには、その後 Na₂CO₃10H₂O の飽和溶液によってデシケーター中で9日間調湿した。

2) にするためには、乾球 30°C, 湿球 21°C の恒温恒湿室中で7日間調湿した。

実験条件:それぞれの場合について4枚を1組として、3組についてスライス法によって弾性回復変位 *u*,*v*を求めた。

スライスは1)の場合は 20°C, R.H. 95% の恒温恒湿室で,また2)の場合には, 30°C, R.H. 45% の恒温恒湿室で行なった。

おのおのの条件1組のうち,1枚の試片では、板目方向に,他の試片では柾目方向にスライスしてダイ ヤルゲージで瞬間弾性回復変位(スライス後約5分)を求めた。コアー材とヒノキ単板との間の接着層に おける層に平行な方向の瞬間弾性回復変位は、スライス前にあらかじめ接着層のすぐ内側につけた標点の 各点間の距離を投影機で測定し、スライス時にはヒノキ単板および接着層を取り除いて約1.5mm幅のス ライス片として、ダイヤルゲージで全長についての瞬間弾性回復変位を測定した後、ふたたび投影機で各 標点間の距離を測定して瞬間弾性回復変位を測定した。

恒温恒湿室外での投影機による測定の間の含水率変化を防ぐために,あらかじめ透明度の高いビニール テープを張り付けて密封した。

このようにして求められたコアー材周辺の変位量 u, v を境界条件として前記(IV-3-5)式を解いた。 その際弾性常数は、

1)の場合については,

 E_T (接線方向の弾性係数): 3.4×10³kg/cm²





E_R(半径方向の弾性係数):7.1×10³kg/cm²

 G_{TR} (T-R面におけるせん断弾性係数): 0.18×10³kg/cm²

μ_{TR} (ポアソン比:半径方向のひずみ/接線方向のひずみ):0.34

μRT (ポアソン比:接線方向のひずみ/半径方向のひずみ):0.71

2)の場合については,

 $E_T: 5.6 \times 10^3 \text{kg/cm}^2$

 $E_R: 12.3 \times 10^3 \text{kg/cm}^2$

 $G_{TR}: 0.26 \times 10^{3} \text{kg/cm}^{2}$

 $\mu_{TR}: 0.25$

 $\mu_{RT}:0.55$

とした。

Ⅳ-3-4. 実験結果および考察

以上のようにして測定したコアー材周辺の瞬間弾性回復変位量は, Fig. Ⅳ-28, Ⅳ-29 に示すとおりである。

この変位量を境界条件として求めたコアー材中の板目方向の垂直応力 σ_r ,および 柾目方向の垂直応力 σ_R , X - Y 面内のせん断応力 τ_{TR} の状態は Fig. IV-30~IV-36 に示す。接着線上の応力は、その勾配が (IV-3-4) 式を満足するように外そう法によって決定した。



Fig. IV-28 接着線上の変位量-含水率 15%→22% 吸湿後-Displacement on the glue line. M.C. 15%→22%

- 56 -



Fig. IV-30 化粧集成材コアー材の板目方向の垂直応力 σ_T 一含水率 15%→22% 吸湿時— Normal stress σ_T in the crossbanded laminated core. M.C. 15%→22%

X-軸, $Y-軸の原点をコアー材の中心にとって、これに対する座標をそれぞれ <math>x_i$, y_i で表わしたとき、コアー材の辺長をHとして、

$$X = \frac{x_i}{\frac{H}{2}} \qquad Y = \frac{y_i}{\frac{H}{2}}$$

をもって各点の位置を表わした。

これらの実験結果から次の事がらが認められる。

1) 試片を含水率 15% より 22% まで吸湿せしめた後の垂直応力 σ_r , σ_R (Fig. IV-30, IV-31) は圧縮 応力を示し、おのおの (X=0.950, Y=1) および (X=1, Y=0.950) の接着層付近で最高値を示し、 σ_r は X=0, σ_R は Y=0 へ向かって減少しほぼ 0 となる。

 σ_T および σ_R の最高値は、 $-20 \sim -30 \text{kg/cm}^2$ に達するが、 σ_T は X=1、 σ_R は Y=1 へ向かって急激に低下して引張応力になると考えられる。

含水率 15% から 9% まで乾燥せしめた後の σ_r , σ_R (Fig. IV-34, IV-35 参照) は引張応力となり, σ_r は (X=0.950, Y=1), σ_R は (X=1, Y=0.950) 付近でおのおの最高値 50kg/cm² 程度に達し, σ_r は X=1 へ, σ_R は Y=1 へ向かってわずかに減少し,またそれぞれ X=0, Y=0 へ向かってしだいに 減少し,ついにほぼ 0 となる。

2) せん断応力(Fig. IV-32, IV-33, IV-36 参照)について見れば、吸湿せしめた後、(X=1, Y=
1) で最高値の 9kg/cm² 程度に達すると考えられ、 X=0 または Y=0 に向かって減少し 0 となる。



Fig. IV-31 化粧集成材コアー材の柾目方向の垂直応力 σ_R —含水率 15%→22% 吸湿時— Normal stress σ_R in the crossbanded laminated core. M.C. 15%→22%

- 58 -



Fig. IV-32 化粧集成材コアー材のT-R面内のせん断応力 τ_{TR} 一含水率 15%→22% 吸湿時ー Shear stress τ_{TR} in the crossbanded laminated core. M.C. 15%→22%



Fig. IV-33 化粧集成材コアー材の点 (X=1, Y=1) よりの各方向における でTR 一含水率 15%→22% 吸湿時一

Distribution of shear stress τ_{TR} in each direction from the corner (X=1, Y=1) to the center line. M.C. $15\%\rightarrow 22\%$



(X=1, Y=1)よりコアー材の内方の各方向に向かっての減少勾配を見れば、Fig. IV-33 のように $(X = 1, Y=0\sim 1)$ および $(Y=1, X=0\sim 1)$ の接着層におけるよりも、X軸に対して $\theta = \tan^{-1\frac{1}{2}}$ の方向に最もゆるい。

乾燥の場合について見れば、最高でも約 5 kg/cm² 程度で、(X=1, Y=1) においてほぼ0 に近いと 推定される。

吸湿の場合と乾燥の場合の応力状態におけるこのような相違の原因について、次のように考えられる。

すなわち,吸湿の場合,含水率変化の初期にコアー材中に発生する応力, σ_T , σ_R , τ_{TR} はともに接着層 において高く,特に (X=1, Y=1) において最も高いと推測される。 このうち, σ_T , σ_R について見れ ば,(X=1, Y=1) において σ_T は少なくとも -20kg/cm^2 以上, σ_R は -30kg/cm^2 以上の相当の高 さに達する。しかしながら,この応力は高いため,また吸湿による含水率変化のために,緩和しやすく, このためにすべり変形を生じようとする。

またコアー材の膨張のために、接着力がほとんどないと見なされるクロスバンドの木口接着面に引張応力によるはく離を生ずる。そのために接着層 (X=1, Y=0~1) における圧縮応力 σ_r (Y=1, X=0~1)における圧縮応力 σ_r は低下し、(X=1, Y=1)付近ではむしろ引張応力となるだろう。

積層接着された木材の内部応力に関する研究(椋代)



Normal stress σ_R in the crossbanded laminated core. M.C. 15% \rightarrow 9%

このことは, IV-1 の Fig. IV-14 において, コアー材の膨張が表板, 裏板によって 制約されたときの コアー材の側面における接着層に垂直な応力が引張応力であることから推測される。

事実, Fig. IV-30, IV-31 に示すように, σ_T は X=1, σ_R は Y=1 において急激に低下して0に近づ くので, 接着層の σ_T , σ_R は (X=1, Y=1) 付近で引張応力になるものと推測される。

さらに,第Ⅲ章における実験結果および浅野ら¹⁷⁾が示しているように,接着層およびその近辺における 木材の組織には,接着剤の水分添加ならびに硬化収縮に起因すると考えられる高い残留引張応力を生じて いる。このために,接着層近辺において圧縮応力は急激に低下する。

せん断応力はこのような理由のために (X=1, Y=1) において約 9 kg/cm² もの最高値に達すると考えられる。

一方,乾燥した場合,コアー材中には引張応力を生じており,これは初期には接着層近辺で最も高いと 考えられる。しかしながら,この場合は,含水率約15%より9%までの乾燥過程であるため,また調湿 時間も吸湿の場合より短いので,応力緩和は,前記の吸湿の場合ほど起こらないと考えられる。またコア ー材が収縮するために,クロスバンドの木口接着面には圧縮応力を生ずるので,はく離を生ずることもな く,したがって,(X=1,Y=1)近辺ではせん断応力は低いと推測される。



Shear stress τ_{TR} in the crossbanded laminated core. M.C. 15% \rightarrow 9%

コアー材の吸湿時における割れは,まず (X=1, Y=1) のクロスバンドの木口接着面にはく離を生 じ,その後 (X=1, Y=0~1), (Y=1, X=0~1)の接着層に沿うことなく, X一軸またはY一軸に対 して約 30~60°の間の方向で内部に向かって生ずる場合が多い。吸湿時のせん 断応力の 分布状態を見れ ば, (X=1, Y=1) において約 9 kg/cm² に達すると考えられるが,これはエゾマツの従来の強度試験 結果⁴⁸ よりこの含水率における強度を推測すると、せん断破壊する程度の大きさに相当する。Fig. IV-33 に認められるように、割れの進行方向も (X=1. Y=1)よりせん断応力の減少する傾斜の最もゆるい方 向にほぼ一致している (Photo. IV-2 参照)。

このように本実験における応力解析結果によって明確に割れの現象を説明することができる。

以上の実験結果に見られるように、応力状態は材のレオロジー特性に強く影響されており、微視的には 藤田ら²²⁾が指摘しているように、材が含水率変化をうけている過程での木材実質のすべりやすさが応力状 態に、ひいては割れに対して強く影響しているものと考えられる。

したがって,一般的に,接着によって生ずるこのような割れ.およびはく離(Ⅳ-2 におけるような接 着層に沿う組織の破断によるはく離は,このような割れと共通しているといえよう)と接着された材の材 質との関係について次のようなことがいえよう。

-62 -

1) 膨潤応力または収縮応力の大き な材は,はく離および前記のような割 れを生じやすいことは当然である。

2) 含水率変化の初期に材間の膨張 収縮差のために接着層近辺にせん断応 力とともに高い圧縮応力または引張応 力を生じ,これらの応力は接着層から の距離とともに減少する。その応力状 態の基本型については Ⅳ-1 に示した とおりである。この接着層近辺の高い 応力のために、この近辺では応力緩和 が接着層よりはなれた部分に比して著 しく,一方含水率変化は、木材のミク



Photo. IV-2 本実験に用いた試片の割れ The crack in the crossbanded laminated core used for the test.

ロな組織に内部応力を生ぜしめるため,また細胞膜実質の可塑化によって緩和はさらに進行する。この緩 和の進行はその過程において接着層近辺のせん断応力を減少させるが,著しく進行すれば接着層近辺の組 織内に急激なすべりを生じようとし,これが接着層近辺のせん断応力の急激な増大を導き,はく離または 前記のような割れを生ずる原因となるだろう。

したがって、含水率変化時において、応力緩和またはクリープの少ない(時間とともに緩和弾性率が小 とならないか、またはクリープコンプライアンスが大とならない)材質のもの、および与えたひずみの増 大とともに、緩和の著しく増加する(緩和弾性率が著しく小となる)材質、または与えられた応力の増大 とともにクリープが著しく増大する(クリープコンプライアンスが著しく大となる)材質のものは、特に 構成(材の組合せなど)、含水率規正に留意する必要があると考えられる。

なお、本研究に用いた応力解析方法について、問題点を考察すれば次のとおりである。

1) スライス法によって、瞬間弾性回復変位量を測定するために、測定技術上,ある程度以上の大きさをもつ試片を必要とする。またスライス片はある程度の幅を必要とするので、局部的に変位が急激に変化 する場合などには、正確かつ詳細に変位量を測定することは困難である。

2) このスライス法によれば、切削してから測定までにある程度の時間を必要とし、瞬間弾性回復変位 量のみを測定することは困難で、ある程度弾性余効によるクリープ回復変位量が含まれるための誤差を生 ずる。これは高含水率の場合、または応力が高い場合に留意する必要があるだろう。

3) 変位量を高精度で測定することは困難である。

4) 数値解析を行なうために、Mesh point をとる必要があるが、この point 数を多くとることによっ て精度を高めることができる。このためには記憶容量の多い電子計算機が必要であろう。

以上問題点を記したが、本方法によって内部応力の大略の傾向を知ることは可能であろう。

総 括

本研究では,積層接着によって生ずる木質材料中の残留応力および吸湿または乾燥によって生ずる木質 材料中の内部応力について,それぞれの木質材料に適した応力解析法を確立し,これらによって応力の分 布状態およびその変移を明らかにし、さらに応力と木質材料のはく離,割れとの関連および残留応力分布 と接着剤の種類,熱圧時の単板の挙動,単板含水率との関連の合理性を検討することによって,これらの 新しい応力解析方法が妥当であることを立証した。

この成果によって,さらに内部応力に基づく欠点の防止方策を考察して,これら木質材料の製造法の確 立に寄与しようとしたものである。

まず,含水率変化によって生ずる積層接着された木材中の内部応力の時間経過による変化について知見 をうるために,種々の含水率条件下,とくに水分の非平衡状態下における木材の応力緩和試験を行なって,

1) 含水率 11.7~21.4% の範囲内の水分平衡条件下では、 与えたひずみが大きいほど 応力緩和はほぼ 大で、一定ひずみ条件下では、含水率の低いほど緩和は小であった。

2) 水分平衡状態における応力緩和と水分非平衡状態におけるそれを比較すると、後者が大である。また含水率変化範囲が同一のとき、乾燥過程よりも吸湿過程の方が応力緩和は大である。

3) 応力緩和している木材の含水率を周期的に急激に変化させた場合,その変化が乾燥,吸湿のいずれの場合にも一時的に弾性回復の期間が存在するが,この現象は含水率変化の速度が大きいときに顕著に表われるものと思われる(Fig. II-1~II-6)。

などの事がらを明らかにするとともに、本研究において行なったスライスによる内部応力解析法の基礎と なる瞬間弾性回復たわみ、およびクリープ回復たわみを応力緩和後に測定し、またその時の瞬間回復弾性 係数と初期荷重との関係について明らかにした(Fig. Ⅱ-7, Table Ⅱ-1)。

積層接着された木材中の内部応力の実態を明らかにするためには、まず解_{νレン}う法が問題とされるが、本 研究では、積層接着された薄い板(単板積層板、合板)および厚い積層材(ひき板集成材、化粧集成柱) にたいする解析方法を検討し、いずれの場合も、試片のスライスによる弾性変位を測定して、この測定値 より応力を算出する方法を用いた。

単板積層板,合板の残留応力の解析法として,これらの表面より漸次薄層を削り去り,その際生ずる曲率の変化より応力を計算する方法を適用した。

積層板に対しては、〔(Ⅲ-1-A)、(Ⅲ-1-B)式〕によって、断面に垂直な応力の厚さ方向の変化を繊維 に直角および平行の2方向について解析した。

ついで,この方法を合板に対しても適用しうるように,弾性の異なった材が接着された場合の計算式 〔(Ⅲ-2-A),(Ⅲ-2-B)式〕を導いて,表板の繊維に直角方向の応力を厚さ方向に解析した。

そして、残留応力に及ぼす影響を、接着剤の種類、熱圧温度、単板間の含水率差について調べた。

1) ユリア系樹脂、レゾルシノール系樹脂、エポキシ系樹脂、酢酸ビニール系樹脂について解析した結果から、エポキシ樹脂では残留応力は低いが、他樹脂では接着層からの距離がほぼ1mm以内で接着層に向かうにしたがって引張応力が急増し、接着層付近では、30~50kg/cm²にも達することが認められた。この引張応力の大きさの順位は、

- の列張応力の入ささの順位は,

ユリア樹脂>レゾルシノール樹脂>酢ビ樹脂>エポキシ樹脂

であった。

また,接着層付近のせん断応力の大小を示すと考えられる引張応力の増加勾配も,同様な順位となって いることが認められた。

この大きい引張応力が残留することに、

- 64 -

i)接着剤の水分による材の膨潤

ii) 接着剤の硬化による収縮

iii)硬化した接着剤の弾性係数

が関係し、接着剤の性状によって応力の分布状態が特徴づけられることを明らかにした。

2) 熱硬化性で硬化過程で脱水をともなう接着剤(たとえばユリア樹脂)では、熱圧によって接着層中の引張応力およびその付近の材中の引張応力、せん断応力は減少するが、過度に高い熱圧温度および圧締 圧力は単板表面に高い圧縮応力を残留せしめ、また組織間に過酷なすべりを生じさせようとして材質を劣 化させる。

3) コアー単板の含水率が表単板に比して低く,接着後にコアー単板中に高い圧縮応力が残留する場合 は、これと反対の場合にくらべて、表単板に引張応力が残留することとなり、またせん断応力も高いとお えられるので、接着性能および表単板の表面割れに対して不利であろう(Fig. II-3、II-7~II-10)など の事がらを明らかにするとともに、これらの結果が接着剤の特性、熱圧時の単板の挙動、接着前単板含水 率と接着後の平衡含水率の差異による膨張収縮によって理論的、かつ実証的に説明づけられ、この応力解 析結果が妥当であることを確認した。そしてこの解析方法を用いた場合の問題点をも示した。

ついで、ミズナラーエゾマツーミズナラの 3 plies ひき板集成材については、含水率変化にともなうコ アー材中の応力を平面応力状態として解析するために、 *X*-, *Y*-軸方向に ついて 境界線上の 全変位量 *v*, *u* を測定して、この値を境界条件とし、

1) 一様な含水率変化を生じて含水率傾斜がないときは(Ⅳ-1-5)式

2) 含水率変化を生じてX-軸方向に含水率傾斜のあるときは(Ⅳ-1-6)式

のそれぞれを数値解析法によって解き,膨張収縮量を除いて応力を計算した。そして第Ⅱ章における応力 緩和試験結果と関連して考察し,

1) 含水率傾斜のないとき,試片の接着層に平行な垂直応力 σ_x が引張応力ならば側面において接着層 に垂直な応力 σ_Y は圧縮応力となり, σ_x が圧縮応力ならば σ_Y は引張応力となる。 σ_Y の値は, σ_x の最 高値とほぼ同程度であろう。

2) 一様な含水率変化を受けたとき、側面の接着層付近でせん断応力は最高値を示す。その値は *a_x* の 絶対値が大きいほど大きい。最高せん断応力を示す位置は、*X*一軸方向の含水率分布によって異なる。

3) 外側材の表面よりの乾燥によって、両側面の接着層における σ_{r} は強く影響される。 など、一様な含水率変化を受けた場合 (Fig. IV-12~IV-14)、含水率傾斜のあった場合 (Fig. IV-15~IV -17) について基本的な応力分布の傾向を明らかにした。

そして同一構成の集成材について行なったはく離促進試験結果と関連して考察し,はく離発生の傾向と 応力分布状態がよく一致することを認めた。

ついで、クロスバンドを接着した化粧集成柱の含水率変化にともなうコアー材中の内部応力を、平面応 力状態で解析するために次のような方法を用いた。

試片をスライスすることによって、コアー材とクロスバンドの接着線上の瞬間弾性回復変位 *v*, *u* を *X* -, *Y*-軸方向について測定し、この *u*, *v* で表わした連立偏微分方程式 〔(Ⅳ-3-5) 式〕を数値解析法 によって、測定された瞬間弾性変位量を境界条件として解き、内部応力を算出した。

その結果吸湿の場合,試片の4つのかどにせん断応力が集中して(Fig. IV-32)割れを生じ,乾燥の場

<u>- 66 -</u>

林業試験場研究報告 第211号

合には、このような応力集中はなく(Fig. IV-36)割れを生じないことが明らかとなった。 これらの結果から、ひき板集成材のはく離および化粧集成柱の割れに対しては、

1) 接着された材間の制約された膨張収縮量が小さいほどはく離および割れの危険度は低い。

2) 含水率変化によってコアー材の膨張が制約されている場合と、収縮が制約されている場合を比較す るとき、はく離および割れに対して一般的に後者の方が前者よりも有利と考えられる。

3) 外側材の表面からの乾燥にともなって生ずる曲げモーメントははく離と高い関連をもつ。

4) 材質の観点から見れば、応力緩和またはクリープの少ない材質のもの、および含水率変化時において、与えられたひずみの増加によって著しく応力緩和が増大するもの、または与えられた応力の増加によって著しくクリープが増大するものはひき板の組合せにあたって考慮が必要である。 などの事がらを明らかにするとともに、前記の解析方法を用いた場合の問題点を示した。

以上のように、本研究によって積層接着した木材の内部応力解析法を確立し、この方法によって内部応 力の実態を明らかにしたが、これらは膨張、収縮が制約された場合に生ずる応力状態を巨視的に解明した ものである。木材が含水率変化を受けた場合には、微視的な組織構造にゆらいする内部応力が発生して、 これらの内部応力が重畳されて応力集中を生じ、はく離、割れの起因となる。したがって、この微視的な 組織構造内に生ずる内部応力をも明らかにする必要があり、

1) 含水率変化によって細胞膜内で生ずる内部応力の解明

2) 含水率変化によって,膨張収縮量の異なった組織または細胞集合体間に発生する内部応力の解明 が今後に残された課題であると考えられる。

文

1) N.A.DE BRYNE, R. HOUWINK: Adhesion and adhesives. Elsevier pub. com., N.Y., (1951)

献

- J.J. BIKERMANN : The Science of adhesive joints. Academic press, N.Y., pp. 103~112, (1961)
- 3) A.G.H. DIETZ: Engineering laminates. John Wiley & Sons Inc., N.Y., (1949)
- 4) 林業試験場編:木材工業ハンドブック,丸善,(1957)
- 5) 中川鶴太郎・神戸博太郎:レオロジー,みすず書房,(1959)
- 6) 応力測定技術研究会編:応力測定法,朝倉書店,pp. 372~377,(1955)
- D.N. DE G. ALLEN : Relaxation methods in engineering and science. McGraw-Hill com. N.Y., (1954)
- 8) 刀根 薰:数值解析,日本電子工業振興協会, pp. 31~33, 104~115, (1964)
- 9) R.G. TREUTING, W.T.READ: A Mechanical determination of blaxial residual stress in sheet materials. J. Appl. phys., 22, 2, (1951)
- 10) 川田雄一:残留応力とその測定,日本機械学会誌,55,11,(1952)
- 11) 椋代純輔:接着によって生ずる合板中の内部応力について、林試研報、155,(1963)
- 12) ----・森屋和美:集成材に関する研究 第10報,林試研報,153,(1963)
- 13) -----: 接着された木質材料中の内部応力 第1報,林試研報, 176, (1965)
- [4] 小畠陽之助・井上幸彦:接着層における残留応力の解析,工業化学雑誌,61,1,(1958)
- 15) 井上幸彦・小畠陽之助:接着接合材における残留応力の評価,工業化学雑誌,61,9,(1958)
- 16) A.G.H. DIETZ, H. GRINSFELDER, E. REISSNER: Glue-line stresses in laminated wood. A.S.M.E., (1946)

- 17) 残野猪久夫・都築一雄・鷲見博:集成材の耐久性に関する研究,内部応力について,木材研究,31 (1963)
- 18) A.P. SCHNIEWIND: Mechanism of Check formation. Forest prod. J., 13, 11, (1963)
- 19) 井阪三部:プラスチック板オーバーレイ製品の反り、木材工業,14,9,(1959)
- 20) 則元 京・山田 正:木材表面成層過程における力学的現象,木材工業,20,3,(1965)
- 21) ――・高原省吾・山田 正:木材表面における樹脂層形成のレオロジー(1),木材研究,36,(1965)
- 22) 藤田晋輔・中戸莞二:乾燥割れに関する研究(第1報),木材学会誌,11,4,(1965)
- 24) A.J. KASS: Shrinkage stresses in externally restrained wood. Forest prod. J., 15, 6, (1965)
- 25) R. KEYLWERTH : Untersuchungen über freie und behinderte Quellung von Holz (I). Holz als R.u.W., 20, 7, (1962)

- 30) A.P. SCHNIEWIND: On the nature of drying stresses in wood. Holzforschung, 14, 6, (1960)
- E.L. ELLWOOD: Properties of American beech in tension and compression perpendicular to the grain and their relation to drying. Yale university, school of Forestry Bull., 61, (1954)
- 32) J.M. MCMILLEN: Drying stresses in red oak. Forest prod. J. 5, 1, (1955)
- 34) R.L. YOUNG: The perpendicular-to-grain mechanical properties of red oak as related to temperature, moisture content, and time, U.S. Forest prod. Lab. Rept. No. 2079, (1957)

- 37) 小倉武夫:木材の水分移動性および乾燥中に生ずる歪みの温度による影響,林試研報,77,(1955)
- 38) 福山万次郎:木材の乾燥応力について,京都府立大学学術報告,14,(1962)
- 40) 山田 正・竹村富男・梶田 茂:木材のレオロジーに関する研究(第3報),木材学会誌,7,2,(1961)
- 41) 山田 正・佐道 健・白石信夫:木材のレオロジーに関する研究(第6報),材料,11,(1962)
- 42) ————:木材の静的粘弾性,木材研究,34,(1965)
- 43) 竹村富男・福山万次郎・池田 豊:水分非平衡と応力緩和,島根農大研報,11,(1963)
- 44) 山田 正・浦上弘幸・宮野寛文:木材の水分拡散と粘弾性の異方性,材料,12,(1963)
- 45) L.D. ARMSTRONG, R.S.T. KINGSTON: The effect of moisture content changes on the

deformation of wood under stress. Rept. Australian J. of Appl. Sci., 13, 4, (1962)

- 46) P.U.A. GROSSMAN, R.S.T. KINGSTON : Some aspect of the rheological behavior of wood. Australian J. of Appl. Sci., 14, (1963)
- 47) R.F.S. HEARMON: The elasticity of wood and plywood. Foret prod. Res. special report,7, (1948)
- 48) 山井良三郎:木材の圧縮異方性に関する研究,林試研報,113,(1959)
- 49) 大沼加茂也・斉藤寿義:加熱圧締による薄板の収縮率について、木材工業、13、9、(1958)
- 50) 山岸祥恭・岡田幹夫:合板製品の表面割れについて,北海道林指研報,14,(1959)
- 51) 岩下 睦:メラミン化粧板オーバーレイ・パーティクルボードの反り、日本硬質繊維板工業会依託 研究報告,(1965)
- 52) 則元 京・山田 正:ヒノキの曲げ応力緩和に及ぼす湿度の影響,木材研究,35,(1965)

The Internal Stresses in Glued Wood

Junsuke MUKUDAI

(Résumé)

It is often recognized that the internal stress in the glued wood has an effect on the warping and the check or crack of the face laminate.

For example, several years ago, crossbanded laminated wood was used for the core of fancy veneered square columns used in Japanese wooden dwelling houses and glued fancy veneers were used on their surfaces. When the fancy veneered columns were subjected to severe moisture content changes under actual conditions prevailing, they encountered trouble in that they cracked in a V shape towards the center of core column from the corners (Photo. IV-1).

The progress of development of the internal stress in a glued wood may be divided into the following two stages :

1) The residual stress resulting from gluing procedure, which develops when uniformly conditioned to air dry equilibrium moisture content after gluing, such as the stress set up by the shrinkage of the glue resulting from hardening, and from difference of moisture content between laminates prior to gluing.

2) The internal stress due to moisture gradient and difference of shrinkage-swelling between laminates, which develop under prevailing conditions when in use.

This report describes the results of the analysis of residual stresses in sawed veneer-laminated plates and in plywood glued under various gluing conditions, i.e. various glues and hot pressing temperature, veneers conditioned in various moisture content; and further, on the results of the analysis of the internal stress in the crossbanded laminated core columm set up after being subjected to uniformly moisture content changes.

I. Residual stress resulting from various gluing conditions

A) Method of analysis of residual stress

Whenever thin layers were sliced off one after another from the face side of sawed veneer 3-ply laminated plates shown in Fig. III-1, the variation of depth of curvature in X- and Y-axis directions and the thickness of the plates were measured (reference to Fig. III-2).

In this case, the residual stress in X-direction can be calculated by Eqs. (III-1-A) and the stress in Y-direction can also be calculated by the similar formula to Eqs. (III-1-B).

- 68 -

For the face veneer, back and core veneer, Japanese beech (*Fagus crenata* BL.), sapwood veneer specimen (thickness $2 \text{ mm} \times \text{width } 160 \text{ mm} \times \text{length } 160 \text{ mm}$) were made by planing after cutting from solid timber.

Veneers were matched in nine groups and used for investigation of residual stress in 3-ply veneer laminated plates glued under the following condition of gluing.

a) The type of glues used for laminated gluing.

The above-mentioned veneers were conditioned in about 12% moisture content.

The following four glues and gluing condition are used.

1)	Urea resin glue
	resin content: $70\pm 2\%$
	specific gravity: 1.31±0.05 at 30°C
	hardner : addition of NH4Cl 20% solution 5 parts to resin glue 100 parts
2)	Resorcinol resin glue

```
resin contents : 58±2%
specific gravity : 1.13±1
hardner : addition of 15 parts to resin glue 100 parts
```

3) Epoxy resin glue
 resin contents : epoxy resin 100%
 polyamide resin 100%
 specific gravity : epoxy resin 1.24
 polyamide resin 0.98 at 20°C

```
mixing ratio:1:1
```

 Polyvinyl acetate resin emulsion glue resin contents: 45±1% specific gravity: 1.25±0.05 at 20°C

Each veneer laminated plate was glued at room temperature 20°C under the pressure of 15 kg/cm^2 for 3 days, with the above-mentioned resin glues.

b) Hot press temperature

Three 3-ply laminated plates were glued with urea resin under the following press condition :

1) 20°C room temperature pressing : 3 days

- 2) 60°C hot pressing : 25 min.
- 3) 120°C hot pressing : 5 min.

The pressure of gluing : 15 kg/cm^2

Each plate was conditioned again under the air of dry bulb 20°C, relative humidity 65% for 10 days, in the following moisture content.

The specimen glued at 20°C : 12.8%

The specimen glued at 60°C: 12.1%

The specimen glued at 120°C:9.7%

After conditioning, each specimen was tested by the slicing method.

c) The difference of moisture content between the face, back veneer and core veneer.

After veneers were conditioned in the following moisture content, 3-ply laminated plates composed from 14% face, back veneer and 5% core veneer, and from 5% face, back veneer and 14% core veneer were glued with urea resin glue under the air of dry bulb 20°C, relative humidity 70% for 3 days, and the pressure of 15 kg/cm².

Results are shown in Fig. Ⅲ-3. Ⅲ-7, Ⅲ-10.

According to results shown in these figures, the state of distribution of residual stress in these plates are effected directly by the chemical and physical properties of resin glues.

- 70 -

1) The low residual stress set up in the specimen glued with epoxy resin because of no shrinkage of resin glue at hardening and no swelling of veneer resulting from absorption of medium.

2) In the specimen glued with urea resin, resorcinol resin and with polyvinyl resin, high tensile stress develops in the glue line and thereabouts, and decreases toward the face surface and to the center of core, because of shrinkage of resin resulting from the hardening and drying of veneer and swelling due to absorbing water in glue. Tensile stress in the glue line is highest in the specimen glued with urea resin, and lowest in the specimen with polyvinyl resin.

3) In the specimen glued with urea resin, when the resin hardened at the low temperature, the amount of water evaporation after hardening is more than that at the high temperature.

Therefore, the tensile stress in glue line is highest in the specimen glued at 20°C, and is lowest in the specimen at 120°C (reference Fig. \mathbb{II} -7).

4) In two specimens composed of veneers differing in moisture content between face, back veneers and core veneer, the state of distribution of residual stress was different between the two specimens, as shown in Fig. III-10.

${\rm I\hspace{-1.5pt}I}$. Internal stress in the crossbanded laminated wood

A) Method of analysis of internal stress and test method

After the 5-ply laminated wood composed of Ezomatsu (*Picea jezoensis* CARR.) lamination of thickness 1.9cm conditioned in moisture content 14.7% was glued with resorcinol resin at room temperature, Hinoki (*Chamaecyparis oblusa* ENDL.) veneers of 1.6 mm thickness were crossbanded with resorcinol resin perpendicular to fibre of laminated wood, as shown in Fig. IV-27.

Twelve cross section specimens of thickness 5 mm cut from the above-mentioned crossbanded laminated wood were matched in 3 groups, and conditioned again in moisture content 14.7%.

Then, two of each group were conditioned in moisture content 21.4% and another two specimens were conditioned in moisture content 8.7%.

One of each group conditioned in the same moisture content was sliced into eleven slices in the direction of X-axis, and another of each group was sliced in the direction of Y-axis.

The change in length of each slice between after and before slicing, and the change of distance between the marked point on the extreme outside slice was measured after cutting off the crossband veneer from the outside slices.

The displacement measured by slicing method was used as the elastic displacement on the boundary for Eqs. (IV-3-5).

The solution of Eqs. (IV-3-5) was obtained by finding the solution of finite-difference approximation by numerical method.

B) Results

Results are shown in Fig. IV-28~IV-36. When the moisture content of the specimen increased by absorption, the high shear stress developed at the corner of specimen.

On the other hand, when the specimen dried, no shear stress concentrated at the corners.

In the crack test on similar specimen to the above, the specimen conditioned in 21.4% moisture content cracked in V shape toward the center of specimen from the corner, while no specimen dried in 8.7% moisture content cracked at any place at all. The concentration of the shear stress at the corner of specimen conditioned in 21.4% moisture content caused the V shape crack to develop at the corner.

It seems that the state of shear stress at the corner was effected by the characteristics of creep and stress relaxation of laminates used for laminated wood core.