

異樹種構成3プライ合板の反り

吉田 弥明 田口 崇

合板に生ずる反りは省力化，生産性向上のための機械化，2次加工等の加工上の障害になるばかりでなく，商品価値を著しく低下させる。合板の構成は幾何学的にも，機械的・物理的性質の面からも対称であり，製造条件に重大なあやまりをおかさない限り障害になるような反りは発生しないはずである。しかし，原木径質の低下，表裏単板の量的バランス等の原木事情から必ずしも完全な対称構成をとることができない。例えば同一樹類でも表裏で物理的・機械的性質のかなり異なった単板を用いざるを得ない場合が多くなってきているし，極端な場合には表裏に異樹種単板を用いる場合さえある。このような合板にあつては必然的に反りの可能性をもっているといえる。

合板の場合最も問題になるのは，表裏の繊維方向すなわち合板の長手方向に沿った反りであり，これから問題にするのもこの反りである。合板の局部的なくると製造条件についての研究は多々あるが，長手方向の反りについての研究は上に述べたような理由から極めて少ない。われわれは今回表裏で樹種を異にする3プライ合板を意識的に作成し，長手方向の反りについての基礎知識を得るための試験を行ない，これについて理論的な考察を試みた。

しかし，今回の試験は計画の未熟さとデータの不足から十分な検討ができず，予備試験的な結果しか得られなかったことをお断りしておきます。

1. 試験方法

1.1 供試合板

表板に0.9mm厚（切削厚さ以下同じ）のセン，シナ，カバ，タモ 裏板に0.9mm厚のラワン，中芯に4.5mm厚のいずれもロータリー切削単板を用いて，JAS 類相当の3プライ6mm，91×182cmの合板を各4枚，更に比較のために表裏ともにラワンを用いた

第1表 供試単板の性状

樹種	単板厚 mm		含水率 %	比重(原木) (12% M.C)
	切削厚	乾燥厚		
セン	0.9	0.96	5—8	—
タモ	〃	0.92	4—7	0.70
シナ	〃	0.89	5以下	—
カバ	〃	0.91	4以下	0.72
ラワン	〃	0.93	〃	0.52
〃	4.5	4.41	〃	〃

合板を4枚作成した。使用単板の性状の詳細は第1表に示すとおりであり，接着糊液の配合，圧縮条件は下記のとおりである。

糊液の配合

ユリアレジン（樹脂率55%）	100部
小麦粉	20部
水	20部
硬化剤（塩安）	0.5部

圧縮条件

冷圧：12kg/cm ² ，室温（10℃），120分
熱圧：10kg/cm ² ，105～110℃，5分

1.2 合板の放置条件と反りの測定

熱板から取出した合板は，発生した水蒸気を速やかに逸散させ冷却するためにしばらく放置した後反りが安定した時点，次いで室温20±2℃，関係湿度65±5%の室内に4週間，更に室温20±2℃，関係湿度85±5%の室内に4週間放置した頂点で反りを測定した。合板の放置にあたっては巾方向に垂直に立てできるだけ自重による影響が長手方向の反りに及ばないように注意した。

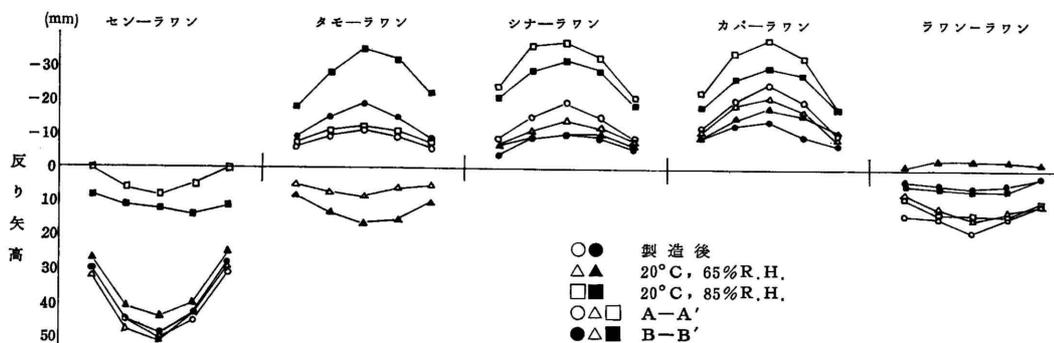
反りの測定は合板の長手方向の両縁に沿って矢高を測定することによって行なった。すなわち182cmの長

手方向を約30cmおきに5点特別な定規によって行なった。反りは両縁を測定すれば全体の傾向がほぼ把握でき、更に測定値は合板の厚さが6mmと比較的大きく剛性があり安定しており信頼できるものと考えられる。

2. 試験結果および考察

2.1 反りの表示

供試合板に発生した反りはその例を第1図に示すように、ほとんどは合板長の中点に最大矢高をもち、この点を変極点とした、すなわち2次曲線的なカーブと



第1図 反りの変化

なる。さらに両縁で数値的には多少異なるが同様の傾向を示し、逆の傾向を示したのはタモラワンの構成（表一裏単板のみを示す、以下同じ）で1例シナラワンで2例にすぎなかった。したがって、合板長の中点での最大矢高によって反りの程度を表示することができるが、これには普遍性がない。

一般に反りを現象で捉える場合は矢高による表示で十分であるが、本試験の場合のような反りはむしろ曲率によって表した方が普遍性があり、理論的に追求しようとするときは一層好都合である。

反りの矢高と曲率との関係式を求めるために、第2図のような円の一部を考え、矢高を δ 、弦長を l 、

曲率半径を r 、中心角を 2φ とすれば、

$$\begin{cases} \sin\varphi = \frac{\frac{l}{2}}{r} \\ \cos\varphi = \frac{r-\delta}{r} \\ \sin^2\varphi + \cos^2\varphi = 1 \end{cases}$$

$$\left(\frac{l}{2r}\right)^2 + \left(\frac{r-\delta}{r}\right)^2 = 1$$

$$\therefore \frac{1}{r} = \frac{2\delta}{\frac{l^2}{4} + \delta^2} = \rho \text{ (曲率)}$$

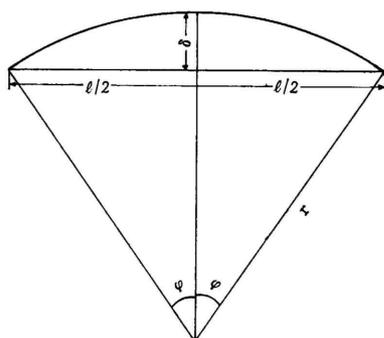
は弦長に比し微少であるから $\delta^2 \approx 0$ となり、曲率半径が極めて大きく弦長 l は合板長 L に等しくとって差し支えないとすれば、

$$\rho = -\frac{8\delta}{L^2} \quad (1)$$

第2表は実測による反り矢高から(1)式によって求めた曲率である。この表中の符号は正の場合は表が凹になるような方向、負の場合は逆の方向に反ることを示す。

2.2 反りの理論式の誘導

合板をパネルとせず巾方向の影響がないと考えれば梁とみなし得る。この時合板の反り発生機構は第



第2図 反り矢高と曲率半径

異積層構成3プライ合板の反り

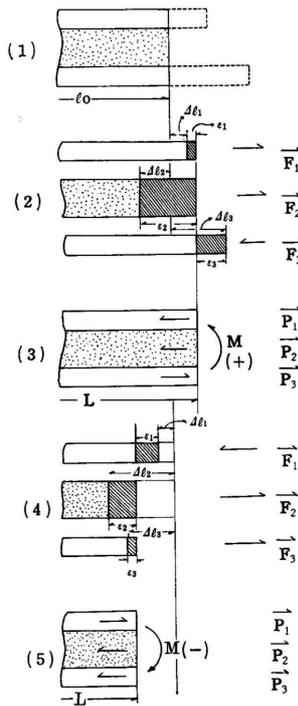
第2表 反りの曲率 ρ ($\times 10^{-8} \text{cm}$)

構成 (表板-裏板)	放 置 条 件						
	製 造 後		20°C, 65% R. H.		20°C, 85% R. H.		
	A-A'	B-B'	A-A'	B-B'	A-A'	B-B'	
センターラワン	1	1.014	1.328	0.990	1.135	0.145*	0.169*
	2	1.208	1.183	1.232	1.111	0.193	0.290*
	3	0.894	1.304	0.797	1.280	-0.652	-0.483**
	4	1.328	1.377	1.111	1.449	0.725	0.097*
タモラワン	1	0.193	0.217	0.072	0.097	-0.338	-0.217
	2	-0.217	0.338	0.242	0.072	-0.483	-0.628
	3	0.290	0.531	0.193	0.290	-0.749	-0.386
	4	-0.266	-0.459	0.193	0.386	-0.290	-0.845
シナラワン	1	-0.266	-0.459	-0.338	-0.700	-1.087	-1.159
	2	0.217	0.072	0.072	-0.290	-0.555	-0.749
	3	0.628	-0.604	0.290	-0.555	-0.290	-1.208
	4	-0.459	-0.242	-0.338	-0.242	-0.894	-0.773
カバーラワン	1	-0.242	-0.459	-0.242	-0.435	-0.676	-0.700
	2	-0.604	-0.338	-0.507	-0.435	-0.918	-0.725
	3	-0.749	-0.217	-0.555	-0.314	-0.797	-0.942
	4	-0.386	-0.386	-0.290	-0.242	-0.676	-0.628

A-A', B-B'とは合板の両測定線で一方をA-A', 他方をB-B'とした。

*反りが他にも変極点をもつ。

**矢高の最大になる点が合板長の中点でない。



第3図 反り発生の様式図

3図(1)~(5)の様式図で説明することができる。すなわち、接着糊液を塗布された中芯、および表裏単板はアセンブリーされ冷圧されて第3図(1)の実線で示したような状態で板となるが、もし単板が自由に動くことができるとすれば単板は糊液中の水分の移行によって点線で示される長さまで膨潤するポテンシャルをもっている。これが熱圧を受けると単板中に移行拡散され

た水分は水蒸気となって合板外に去ってゆき、膨潤した単板は逆に収縮し、糊液によって与えられた水分が熱圧によって発散した水分よりも多いとき(この場合を $u > 0$ とする)、単板は最終的に第3図(2)で示した変位ポテンシャルになり、熱圧によって発散した水分が糊液によって与えられた水分よりも多いとき(この場合を $u < 0$ とする)第3図(4)に示すような変位ポテンシャルになる。各単板がこのようなポテンシャルをもち、第3図(3)、第3図(5)に示すように合板となる。このような状態にするためには単板を影線を施した部分について F_1, F_2, F_3 の力で伸縮させて貼り合わせなければならない。このようにしてできた合板内の各単板には P_1, P_2, P_3 の応力が生じ、これによって曲げモーメント M が発生し合板は反る。以上の理論ではすでに明らかなように水分の吸・脱着による膨潤・収縮に対しては同等の挙動を示すと考えた。また、合板単板内の水分については水分傾斜はなく均一と考え、移動については製造直前・直後の最も激しい範囲を選んだが、この水分の関係は合板のその後の使用環境にまで及ぶことは言うまでもない。

冷圧直前の単板の含水率と熱圧後(合板は冷却され

発生した水蒸気は放散し平衡に達した状態を指す)の単板との差を u とする。 u は先にも述べたように、糊液によって与えられた水分が熱圧によって発散する水分より多い時を正、逆に少ない時を負とする。(第3図参照)ここで、表、中芯、裏単板の膨脹・収縮率を $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 、厚さを h_1, h_2, h_3 、曲げ弾性定数を E_1, E_2, E_3 とし、第3図(1)の状態における単板長を l_0 とすれば、合板長 L は、 $u > 0$ の時

$$\begin{cases} L = \Delta l_1 + \varepsilon_1 + l_0 \\ L = \Delta l_2 + \varepsilon_2 + l_0 \\ L = \Delta l_3 - \varepsilon_3 + l_0 \end{cases} \dots\dots\dots(2)$$

$$\begin{cases} \Delta l_1 = l_0 \cdot \alpha_1 \cdot \Delta u \\ \Delta l_2 = -l_0 \cdot \alpha_2 \cdot \Delta u \quad (\alpha_1 < \alpha_3 \text{ とする}) \dots\dots(3) \\ \Delta l_3 = l_0 \cdot \alpha_3 \cdot \Delta u \end{cases}$$

応力 $\vec{P}_1, \vec{P}_2, \vec{P}_3$ とこれによって生じる変位 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ との間には合板の巾を b とすれば

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = l_0 \frac{P_1}{bh_1 E_1} \\ \varepsilon_2 = l_0 \frac{P_2}{bh_2 E_2} \\ \varepsilon_3 = l_0 \frac{P_3}{bh_3 E_3} \end{cases} \dots\dots\dots(4)$$

この中で中芯の u については、アセンブリー前に糊液が塗布され、水分のかなりの部分がすでに移行しており高含水率になって冷・熱圧を受けるので、含水率の差は u だけでなく $u+x$ の差が生じるが合板では中芯の弾性を無視するので u として計算した。更に膨潤した状態で圧縮されるので l_2 は負にならなければならない。

$u < 0$ の場合は(2), (3)式に相当する同様の式が成立する。

$$\begin{cases} L = \Delta l_1 - \varepsilon_1 + l_0 \\ L = \Delta l_2 + \varepsilon_2 + l_0 \\ L = \Delta l_3 + \varepsilon_3 + l_0 \end{cases} \dots\dots\dots(5)$$

$$\begin{cases} \Delta l_1 = l_0 \cdot \alpha_1 \cdot \Delta u \\ \Delta l_2 = l_0 \cdot \alpha_2 \cdot \Delta u \quad (\alpha_1 < \alpha_3) \dots\dots\dots(6) \\ \Delta l_3 = l_0 \cdot \alpha_3 \cdot \Delta u \end{cases}$$

各単板の変位ポテンシャルによって合板内の各単板に生じる応力 $\vec{P}_1, \vec{P}_2, \vec{P}_3$ は

$$\vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \vec{P}_3 = 0 \dots\dots\dots(7)$$

次に $\vec{P}_1, \vec{P}_2, \vec{P}_3$ によって生じる曲げモーメント M は中立軸から下底までの距離を η とし、接着層の影響をなすとすれば

$$M = P_1 \left(\frac{h_1}{2} + h_2 + h_3 - \eta \right) + P_2 \left(\frac{h_2}{2} + h_3 - \eta \right) - P_3 \left(\frac{h_3}{2} - \eta \right) \quad (\Delta u > 0) \dots\dots\dots(8)$$

$$M = -P_1 \left(\frac{h_1}{2} + h_2 + h_3 - \eta \right) + P_2 \left(\frac{h_2}{2} + h_3 - \eta \right) + P_3 \left(\frac{h_3}{2} - \eta \right) \quad (\Delta u < 0) \dots\dots\dots(9)$$

$$\eta = \frac{\sum (E_i \eta_i A_i)}{\sum (E_i A_i)} \dots\dots\dots(10)$$

i = 下底から各単板の断面重心までの距離

E_i = 各単板の弾性定数

A_i = 各単板の断面積

曲げモーメント M と撓み y との関係は

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M}{EIz} = -\rho \dots\dots\dots(11)$$

Ez は合板の剛性で、 E は合板の弾性定数、 z は断面2次モーメントである。(11)式から

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\rho \dots\dots\dots(12)$$

$$\begin{aligned} \therefore y &= -\frac{\rho}{2} x^2 + \frac{\rho l}{2} x \\ &= -\frac{\rho}{2} \left(x - \frac{l}{2} \right)^2 + \frac{\rho l^2}{8} \dots\dots\dots(13) \end{aligned}$$

すなわち最大挟み(矢高)を δ とすれば、 δ は合板長の中心に生じ、

$$\delta = \frac{\rho l^2}{8} \dots\dots\dots(14)$$

これは(1)式に一致する。(11)式において Ez すなわち合板の剛性は

$$Ez = \frac{\sum (E_i I_i)}{Iz} \therefore EIz = \sum (E_i I_i) \dots\dots\dots(15)$$

I_i = 中立軸 η に関する各単板の断面2次モーメント

合板の場合には、中芯の弾性定数は無視し得るから

$E_2 = 0$, 更に $h_1 = h_3$ を考慮して(5)~(10)式から曲げモーメント M を求めれば, Δu の正負に拘わらず

$$M = bh_1^2 \alpha_1 E_1 \frac{e_2(t_1 + 1)(S_2 - 1)}{e_2 + 1} \Delta u \quad (16)$$

合板の剛性 EI_z は

$$EI_z = \frac{bh_1^3 E_1}{12} \cdot \frac{3e_2^3 + (12t_1^2 + 24t_1 + 19)e_2^2 + (4t_1^2 + 18t_1 + 9)e_2 + 1}{(e_2 + 1)^2} \dots\dots\dots(17)$$

ただし, $t_1 = \frac{h_2}{h_1}$, $t_2 = \frac{h_3}{h_1} = 1$,

$$e_1 = \frac{E_2}{E_1} = 0, \quad e_2 = \frac{E_3}{E_1}$$

$$S_1 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1}, \quad S_2 = \frac{\alpha_3}{\alpha_1}$$

(16), (17)式から ρ を求めれば,

$$\rho = k \cdot \frac{12\alpha_1 (S_2 - 1) \Delta u}{h_1} \dots\dots\dots(18)$$

$k =$

$$\frac{e_2 (e_2 + 1) (t_1 + 1)}{3e_2^3 + (12t_1^2 + 24t_1 + 19)e_2^2 + (4t_1^2 + 8t_1 + 9)e_2 + 1} \dots\dots\dots(19)$$

2.3 反りの解析

反りすなわち曲率は (18) 式から $S_2 - 1 = 0$ あるいは $u = 0$ のとき 0 となる。つまり表裏の膨張・収縮率が等しければ応力を生じるような変位は生じないし, 含水率のうごきがあれば変位を生じないことは言うまでもない。しかし実際の合板の使用条件にあつては特殊な場合を除き, $u = 0$ となることは極めて少ない。したがつて, 表裏に同一樹種を用いることによつて, $S_2 - 1 = 0$ となるようにして u のいかに拘わらず反りが発生しないようにしている。

しかし, 今回製造した異樹種構成合板や, 同一樹種を表裏に用いていてもかなり性質に差異のある単板を用いる場合には $S_2 - 1 \neq 0$ となり必然的に反りの可能性をもつ, この時, 反りは同一方向に限定されるわけではなく, (18) 式から分かるように u の正負によつての正負が左右され反りの方向が逆転する。すなわち, $1 < 3$ とすれば $S_2 - 1 > 0$ となり, $u > 0$ であれば > 0 となり合板は表面が凹に反り, $u < 0$ であれば

< 0 となり表面を凸になるように反る。したがつて, 合板の含水状態が高含水状態から低含水状態になるにしたがい, $1, 3$ の大小によつて合板の反りは凹から凸に, あるいは凸から凹に変化する。

矢高の測定値から算出した曲率の変化を第3表で見ると, 環境条件が高湿から低湿になると曲率は負から正に向かい, センーラワン (表一裏板) の1例,

第3表 繊維方向の収縮率 %/%

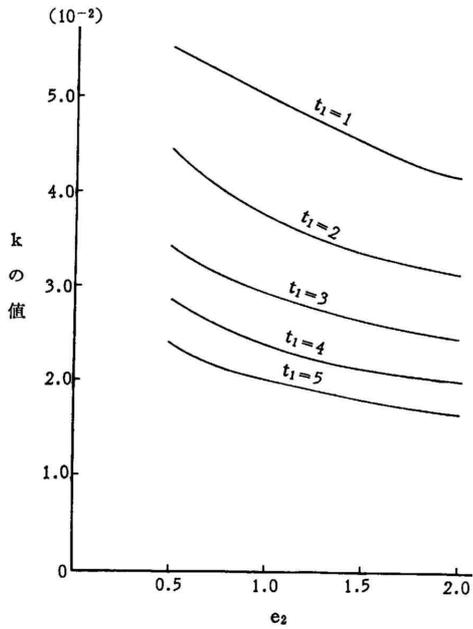
樹種	含水率の範囲		
	18→12%	18→0%	12→0%
タモ	0.0110	0.0151	0.0168
カバ	0.0092	0.0130	0.0146
ラワン	0.0093	0.0125	0.0140

測定方法は JIS Z 103-57 によつて行なつた。測定個数は原木の関係上, カバ, タモ11ヶ, ラワン3ヶ, 数値はこれらの平均である。

タモーラワン構成については全例に負から正への逆転現象がみられる。これらの場合, 高湿環境条件下にあつては $u > 0$ と考えるのが妥当であり, したがつて $S_2 - 1 < 0$ でなければならず, $1 > 3$ とならざるを得ない。追試によつて求めた原木の収縮率はこれを裏付けているが, シナ, センについては試料不足のため断定できない。センーラワン, タモーラワン構成に逆転現象がみられるのは第1表でみるように, タモ, セン単板は他に比べて単板含水率が高く熱圧によつて容易に $u < 0$ となり得たのではないかと考えられる。

理論的には $t_1 = \frac{h_2}{h_1}$, $e_2 = \frac{E_3}{E_1}$, $S_2 = \frac{\alpha_3}{\alpha_1}$ を知る

ことができれば (18) 式から曲率が求められ, 反り矢高が算出できるが, e_2 すなわち単板の繊維方向についての収縮・膨張挙動についての知識が乏しく, 実測値との比較検討にまでは至らなかった。しかし, (18) 式によつて反りをコントロールする示唆は与えられる。すなわち, 曲率を小さくするためには, $k, 1, S_2 - 1, u$ を小さく h_1 を大きくすればよいのであるが, 表面材は指定される場合が多いので $1, h_1$ は動かすことができない。そこで $S_2 - 1$, および u はできるだけ小さくすることが望ましい。つまり, できるだけ表裏単板の膨張・収縮率を等しくし, 使用条件と単板の含水率の差をなくすという常識的な結論に達する。



第4図 e₂, t₁とkとの関係

しかし、どうしてもこのような条件が整わない場合には、反りの方向を、単板含水率の差 u の正負と t_1, t_3 の大小によってコントロールすることが可能であり、好ましくない反りの方向はさけることができる。

kについては(19)式で示されるように $e_2 = \frac{E_3}{E_1}$, $t_1 =$

$\frac{h_2}{h}$ すなわち表裏単板の弾性定数の比、および表と中芯の厚さ構成比によって決定される定数で、一般的には $e_2 = 0.5 \sim 2.0$, $t_1 = 1 \sim 5$ の範囲にあるものと考えられる。第4図はこれらの範囲について t_1 をパラメータとして描いたkの値である。 e_2, t_1 の増加にともないkの値はともに小さくなり、反りに対しては有利と考えられるが、 t_1 はある程度限定されるので e_2 すなわち表裏の弾性定数の比を大きくとることがよい。

3. おわりに

異樹種構成 3 プライ合板を製造し、長手方向の反りについて2次的に力学上の考察をおこない、ほぼ理論的に解明する見透しを得た。すなわち、異樹種構成合板の反りの曲率は(18)式によって表わされ、これは実際の合板の反り挙動とよく一致する。しかし、理論値と実測値の比較検討にまでは至らず、今後の基礎データの集積をまたなければならぬ。特に繊維方向についての単板の膨脹・収縮挙動についての基礎試験が望まれる。

一試験部 合板試験科 -
(原稿受理 47.7.1)