合板の面内挙動における異方弾性と強さ

－鉄骨木質構造の研究 その7－

ANISOTROPIC ELASTICITY AND STRENGTH IN IN-PLANE BEHAVIOR OF PLYWOOD

－ Study on steel-framed timber structures Part 7－

桑 村 仁*

Hitoshi KUWAMURA

Elastic moduli and strengths of plywood and constituent veneer partly including the effect of adhesive are investigated by means of material tests and theoretical analyses. The material tests consist of tension, compression, and shear under in-plane loading. It was found that the elastic moduli of plywood are well predicted from those of veneer constituting the plywood by the theory of anisotropic elasticity, in that the plywood as well as the veneer was identified orthotropic and the effect of glue layers was observed considerable. The strengths of plywood in the principal axes were also well predicted by the common strength criteria of orthotropic plates. However, the strength of plywood in an inclined direction to the principal axes did not agree with the conventional Norris's and Tsai-Hill's criteria, because the fracture mode is different from that assumed in such criteria. The fracture path caused by the inclined directional loading is not a single line, but alternate lines associated with the shear fracture of the adhesive layers. This observation brought another method of strength evaluation for plywood, which gave a good agreement with the test results.

Keywords : Plywood, Veneer, Anisotropy, Elastic modulus, Strength, Fracture criteria

合板, 単板, 異方性, 弾性係数, 強さ, 破壊条件

1. はじめに

本稿は合板の面内挙動における異方特性を弾性係数と強さの観点から調べ、合板を構成する単板の力学的特性とどのように関連づけられ、また接着層はどのような影響を与えるかを実験と解析の両面から探ったものである。

合板は面材として用いられる関係で、平板としての面外挙動が注目されることが多く、実際、JAS¹⁾においても面外の曲げヤング係数や曲げ強さが重要な性能として規定されている。合板を耐力壁として利用するときは、その面内せん断抵抗に関する知見が必要で、それに関する研究は数多くあるが、合板の材料特性から説き起こしたものは見当たらない。そのため、合板の面内挙動についてはあまり知られていない。しかしながら、合板をボルト等で接合したときの接合部の変形や強さの問題では、合板の面内挙動に関する知見が欠かせない。そこで、本稿では、通常行わない、すなわち試験方法が定まっていない材料試験を取って実施し、合板およびそれを構成する単板の異方弾性ならびに異方強さについて明らかにすることとし、合板の破壊モードと破壊条件にも踏み込んだ。

合板とそれを構成する単板の力学的相互関係については、合板が普及し始めた頃、沢田ら^{2),3)}、浅野ら⁴⁾、大熊⁵⁾、高見⁶⁾による林産分野の研究がある。これらに対して、本研究の特徴は次の3点にある。すなわち、(1)単板の力学特性の調査にあたって単板試験片を当

該合板から直接採取したこと、(2)接着層の影響を考慮したこと、(3)力学特性の解析において異方弾性理論を厳密に適用したことである。上記の既往研究はこれら全部あるいは一部、特に(1)を満たしていないため、実験データの解釈に説得力を欠く点や誤解が否めない。

2. 実験に用いた合板

実験に用いた合板は、公称厚さが21mmの3×6サイズ(910×1820)の構造用合板で、単板の樹種はラワン、接着剤はメラミン・ユリア共縮合樹脂接着剤、密度は実測値470kg/m³である。JAS規格¹⁾における接着の程度は1類、等級は1級、板面の品質はB-Cである。積層数は図1に示すように9プライである。各単板の厚さも図中に記入しておいた。実測による全厚は20.8mmである。

合板の面内挙動を調べるにあたって重要なのは、互い違いに直角に配向された単板のL方向とT方向の厚さの構成である。そこで、まず合板の長辺方向をx軸、短辺方向をy軸と定める。図1に示すように、奇数番号の単板はx軸がL方向でy軸がT方向となり、偶数番号の単板はその逆になる。x軸方向の直応力度に対してL方向が抵抗する単板の厚さの合計の全厚に対する比を α_1 、逆にT方向を α_2 とすると、今回用いた合板は、 $\alpha_1=0.56$ 、 $\alpha_2=0.44$ である。図1の断面から分かるように、厚さ方向にほぼ対称に積層されているので、いわゆるカップリング効果(面内力によって面外変形が生じ

* 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 教授・Ph. D.

Prof., Dept. of Architecture, School of Engineering, The University of Tokyo, Ph. D.

図1 合板の積層状態

る現象)は無視できるものとする。なお、接着層は非常に薄いので、その厚さを計測することはできなかった。接着剤は単板表面の凹み部分や裏割れの開口部に溜まっており、接着層を平らな層と考えること自体に無理があるので、モデル上は接着剤単独の層厚を0とし、単板に接着剤が含浸している部分を接着層と呼ぶことにする。

3. 単板の力学的性質

3.1 単板の材料試験片

単板の材料試験片は、先ず合板から棒状あるいはブロック状の全厚試料を切り出し、さらにその接着面に沿って鋸切断して単板を分離し、欠陥が無いことを確認して、最終的に試験片形状に加工した。単板試験片の種類と採取方向を図2に示す。単板は丸太をロータリー切削、所謂、かつら剥きし、それを平板にしているので、単板の面は片方がL方向、もう一方がT方向、厚さ方向がR方向となっている。単板の材料試験は引張、圧縮、せん断試験で、引張と圧縮はそれぞれL、T、45°方向、せん断はT方向に垂直なせん断面にL方向のせん断载荷とした。

引張試験片のうち、L方向は接着層を完全に除去したものと接着層を残したものの2種類とした。前者は鋸の面を当該層の内部に位置させて棒状全厚試料を切断すれば得られ、後者は当該層の外で切断した後、付着している隣接層の残皮をサンダーで除去した。T方向と45°方向の引張試験片は、接着層を完全に除去すると試験片加工の際に試験片が破損しやすいので、接着層を部分的に残した。ただし、残存接着剤は繊維に沿った窪みに残るため、L方向では影響を及ぼしても、T方向と45°方向では接着層が試験片の軸方向に連続しないためほとんど影響がないと考えられる。引張試験片の形状はつかみ部の幅を20mm、平行部の幅と長さをそれぞれ10mmと60mmとし、平行部から破断させて引張強さを測定するとともに、試験片の軸方向のヤング係数をひずみゲージにより測定した。

圧縮試験片は単板1枚だけでは座屈してしまうので、L、T、45°方向それぞれについて同一方向に3枚を接着し、厚さが6mm前後の短柱とした(図3参照)。このとき、元の接着層(メラミン樹脂)は完全に除去した。3枚接着の接着剤には水を溶剤としたエマルジョン型の酢酸ビニル樹脂を用いた。これは強度・剛性が比較的低い接着剤であるので、接着による力学的影響は小さいと考えてよいであろう。接着後、圧縮し、1週間の養生期間を与えてから圧縮試験を行った。この短柱試験片の幅は20mm、長さは60mmとした。これは軸方向と軸直交方向にひずみゲージを貼って弾性係数を測定するために必要な寸法であるが、結果的にはL方向のみ有効なデー

図2 単板材料試験片の種類と採取方向

図3 単板の圧縮試験片

タが得られた。T方向と45°方向は面外剛性が低い関係で、僅かな初期不整が圧縮载荷でたちまち増幅され、信頼できるひずみ値が得られなかったため、これらは棄却した。座屈の影響を受けないで圧縮強さを求めるために、長さを30mmとした極短柱を上記と同様の3枚接着により製作し、比例限強さと圧縮強さを測定した。このとき、L、T方向試験片の幅は20mm、45°試験片は斜めに走る破壊線が上下の载荷板と交差しないようにするため幅を10mmとした。

せん断試験片は単板1枚をJISのせん断試験方法にならって、20mm×30mmの長方形小板に10mm×10mmの欠込みを入れて製作した(厚さはJISの試験片寸法の条件をみたまない)。この場合も接着層を完全に除去すると、試験片加工中に破損しやすいので、接着層を部分的に残した。繊維に平行な窪み部分にメラミン樹脂が残存する状況であった。

3.2 単板の材料試験結果と考察

単板の材料試験結果を表1、表2に整理しておいた。試験片数は3個ずつとしたが、データのばらつきが大きい場合には数を追加して平均値を計算したケースがある。45°方向の特性については、後述の合板と区別するためにVeneerの頭文字Vを添字に付けて F_{V45} 、 E_{V45} などのように表記した。せん断強さの添字は、材料力学

におけるせん断応力度の表記方法に従うことにする。例えば、せん断強さ F_{ab} の場合、最初の添字 a はせん断面の法線方向、2番目の添字 b はせん断応力度の方向を表す。よって、前出図2のせん断試験片のせん断強さは F_{TL} で表示される。応力の釣合い条件からせん断応力度については共役性すなわち $\tau_{TL} = \tau_{LT}$ が成り立つが、強さには異方性があるので $F_{TL} \neq F_{LT}$ である。なお、接着層のせん断強さは F_{gx} のように表し、 g は接着層、 x はせん断応力度の方向を表すものとする。

表1に示す引張試験の結果から次のことがわかる。L方向について

て接着層の有無を比較すると、強さに対しては影響が見られるが(接着層の存在により1.3倍)。ヤング係数に対する影響は僅かである(同1.05倍)。引張強さ、ヤング係数ともL方向に比べてT方向と45°方向は極めて小さい。表2に示す圧縮試験結果においても同様に、L方向に対してT方向と45°方向の比例限と強さは非常に小さい。L方向について圧縮ヤング係数は引張ヤング係数より小さいが、10%の僅差である。

表3と表4に後で行う合板の解析用として単板の性能をまとめておいた。表3に示した単板の強さは表1と表2の実験データの平均

表1 単板の引張試験結果

試験片 番号	引張強さ				ヤング係数			
	L方向		T方向	45° 方向	L方向		T方向	45° 方向
	接着層 なし	接着層 あり	接着層部分 的付着	接着層部分 的付着	接着層 なし	接着層 あり	接着層部分 的付着	接着層部分 的付着
	F_L	F_L'	F_T	F_{V45}	E_L	E_L'	E_T	E_{V45}
1	47.3	63.7	1.67	1.41	12,300	14,200	490	620
2	37.0	45.4	1.24	1.94	11,600	10,300	480	760
3	61.7	100.1	1.21	1.92	12,900	13,500	440	620
4	30.0	34.4	-	-	9,400	11,900	-	-
5	53.1	-	-	-	13,100	-	-	-
平均	45.8	60.9	1.37	1.76	11,900	12,500	470	670

(注記) 引張強さとヤング係数の単位はN/mm²

表2 単板の圧縮試験結果およびせん断試験結果

試験片 番号	極短柱試験片						短柱試験片		せん断試験片
	圧縮比例限強さ			圧縮強さ			弾性係数		せん断強さ
	L方向	T方向	45° 方向	L方向	T方向	45° 方向	L方向		Tに垂直面のL方向
	pF_L	pF_T	pF_{V45}	F_L	F_T	F_{V45}	E_L	ν_L	F_{TL}
1	23.8	3.06	3.75	37.1	4.55	6.01	10,700	0.69	1.94
2	26.4	2.85	3.52	37.8	4.85	5.84	10,900	0.50	2.14
3	20.8	3.17	3.32	32.0	4.78	5.02	10,200	0.72	2.04
平均	23.7	3.03	3.53	35.6	4.73	5.62	10,600	0.64	2.04

(注記) 強さとヤング係数の単位はN/mm²

表3 単板の強さ(合板の解析用)

引張強さ (N/mm ²)				圧縮比例限強さ			圧縮強さ			せん断強さ
L方向		T方向	45° 方向	L方向	T方向	45° 方向	L方向	T方向	45° 方向	Tに垂直面のL方向
接着層 なし	接着層 あり	接着層 部分的 付着	接着層 部分的 付着	接着層 なし	接着層 なし	接着層 なし	接着層 なし	接着層 なし	接着層 なし	接着層なし
F_L	F_L'	F_T	F_{V45}	pF_L	pF_T	pF_{V45}	F_L	F_T	F_{V45}	F_{TL}
45.8	60.9	1.37	1.76	23.7	3.03	3.53	35.6	4.73	5.62	2.04

表4 単板の弾性係数(合板の解析用)

L方向		T方向		45° 方向		LT面内	池田の異方特性	
E_L	ν_L	E_T	ν_T	E_{V45}	ν_{V45}	G_{LT}	c_1	c_2
11,300	0.64	470	0.027	670	0.29	260	6.45	0.76

(注記) EとGの単位はN/mm²

値を転記したものである。ここで、強度則について検討してみる。直交異方板の強度則として、木質構造分野の Norris 球面相關式と複合材料分野の Tsai-Hill 式を用いる⁷⁾。これらは、 x 、 y を異方性主軸とすると、それぞれ次式で表される。

$$D_{Ns} \equiv \left(\frac{\sigma_x}{F_x} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{F_y} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{F_{xy}} \right)^2 = 1 \quad (1)$$

$$D_{T-H} \equiv \left(\frac{\sigma_x}{F_x} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{F_y} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{xy}}{F_{xy}} \right)^2 - \frac{\sigma_x \sigma_y}{F_x^2} = 1 \quad (2)$$

x 軸に対して θ 傾斜した方向に軸方向応力度 σ_k が作用するとき、 x 、 y 軸に関する応力度は次式となる。

$$\sigma_x = \sigma_k \cos^2 \theta, \quad \sigma_y = \sigma_k \sin^2 \theta, \quad \tau_{xy} = \sigma_k \sin \theta \cos \theta \quad (3)$$

これを上式に代入して、 $\sigma_k = F_k$ と置けば、 θ 方向の強さ F_k が次のように得られる。

$$\text{Norris: } \frac{1}{F_{k(Ns)}^2} = \frac{\cos^4 \theta}{F_x^2} + \frac{\sin^4 \theta}{F_y^2} + \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \theta}{F_{xy}^2} \quad (4)$$

$$\text{Tsai-Hill: } \frac{1}{F_{k(T-H)}^2} = \frac{\cos^4 \theta}{F_x^2} + \frac{\sin^4 \theta}{F_y^2} + \left(\frac{1}{F_{xy}^2} - \frac{1}{F_x^2} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \quad (5)$$

ここで、 $\theta = 45^\circ$ とし、 x 、 y を L 、 T に置き換えて表 3 の F_L 、 F_T 、 F_{TL} を引張と圧縮に応じて代入すれば、単板の 45° 方向強さが予測できることになる。その計算結果は次の通りで、単位は N/mm^2 である。

引張強さ： $F_{V45(Ns)} = 2.27$, $F_{V45(T-H)} = 2.27$

圧縮比例限強さ： $F_{V45(Ns)} = 3.38$, $F_{V45(T-H)} = 3.38$

圧縮強さ： $F_{V45(Ns)} = 3.74$, $F_{V45(T-H)} = 3.75$

単板では、 $F_L > F_{TL}$ であるため、Norris 則と Tsai-Hill 則の差はほとんど出てこない。表 3 に示すように実験値は上から順に 1.76, 3.53, 5.62 N/mm^2 である。実験値に対する予測誤差は順に +29%, -4%, -33% で、あまり大きくは外れていない。このことから、合板を構成する単板にも、スギや SPF で適用性が確認されている⁷⁾ 上記の強度相關式が当てはまると考えてよい。

次に、表 4 に示した単板の弾性係数は、次のように定めた。まず、 L 方向のヤング係数 E_L は引張と圧縮、また接着層有り無しでさほど差がないので、接着層無しの場合の引張と圧縮の平均値の平均をとり、 T 方向と 45° 方向のヤング係数 E_T 、 E_{V45} はそれぞれ表 1 の引張試験の平均値とし、 L 方向応力に対する T 方向のひずみを与えるポアソン比 ν_L (ν_{LT} を略して表記する) は表 2 の短柱試験の平均値とした。これら以外の弾性係数、すなわち T 方向応力に対するポアソン比 ν_T 、 45° 方向応力に対するポアソン比 ν_{V45} 、および LT 面内のせん断弾性係数 G_{LT} は今回の材料試験から直接得られていないので、単板が直交異方性を持つことを前提に、 x - y がその弾性対称軸となるとき次の公式から値を計算した。ここでは、 x - y を L - T に置き換えればよい。なお、 $C_{sym} = 1$ のとき、(7)式と(8)式は等価である。

$$C_{sym} = \frac{E_x \nu_y}{E_y \nu_x} = 1 \quad (6)$$

$$\frac{1}{G_{xy}} = \frac{4}{E_{45}} - \frac{1}{E_x} - \frac{1}{E_y} + 2 \frac{\nu_x}{E_x} \quad (7)$$

$$G_{xy} = \frac{E_{45}}{2(1 + \nu_{45})} \quad (8)$$

なお、これらの弾性係数を基に池田の異方特性 c_1 、 c_2 ⁸⁾ も併せて計算しておいた。多くの木材において c_2 は 1.0 前後の値をとること

が知られているが(文献⁸⁾によると 0.71~1.15)、この場合は 0.76 で、やや 1.0 から外れる材料のようである。

4. 合板の力学的性質

4.1 合板の材料試験片

合板の材料試験は全厚試験である。試験片は、全厚引張、全厚圧縮、全厚せん断、および接着層せん断試験片である。これらの試験片の採取方向を図 4 に示す。いずれも、合板の x 、 y 、 45° 方向である。

全厚引張試験片は平行部の幅と長さがそれぞれ 5mm と 60mm で、平行部で破断させて引張強さを測定するとともに、材軸方向のひずみを測定してヤング係数を求めることにした。全厚圧縮試験片は幅と長さがそれぞれ 20mm と 90mm で、圧縮の比例限強さと最大強さを測定するとともに、軸方向と軸直交方向にひずみゲージを貼付してヤング係数とポアソン比を求めることにした。全厚せん断試験片と接着層せん断試験片は 20mm × 30mm × 合板全厚の直方体ブロックに欠込みを入れたものであるが、図 5 に示すように、前者はせん断面が合板表面に垂直で、後者は平行である。いずれもせん断強さを求めるためのものである。接着層せん断試験では、後で見るように、接着層では破壊せず、接着層に近接した単板がせん断破壊するので、層間せん断試験あるいは層内せん断試験と言うほうが適切かもしれないが、ここでは表現上の分かりやすさを優先した。ちなみに、本稿で言う全厚せん断と接着層せん断は、米国⁹⁾ではそれぞれ through-thickness shear, rolling shear と呼ばれているものである。

4.2 合板の材料試験結果

合板の材料試験結果を表5, 6, 7, 8に示す。各ケース3個のデータを見ると、ばらつきは比較的小さく、単板よりも明らかに安定している。

表5には全厚引張試験から得られた x , y , 45° 方向の引張強さとヤング係数を、表6には全厚圧縮試験から得られた x , y , 45° 方向の比例限強さと最大強さを、表7には同じく全厚圧縮試験から得られたヤング係数とポアソン比を掲載してある。ヤング係数を表5の全厚引張と表7の全厚圧縮の場合で比較すると、概ね一致していると見られる。表7の計算値の欄には実験値3個の平均値を用いて関連する変数の値を与えておいた。コンプライアンス係数の対称性指数 C_{sym} は前記(6)式によるもので、この場合1.0に近い値となっているので、合板は x , y を弾性対称軸とする直交異方性板と考えてよいであろう。せん断弾性係数 G_{xy} は上段の数値が前記(7)式、下段の数値が前記(8)式によるもので、両者はだいたい一致している。これも直交異方と考えるとよいことを支持するものである。池田の異方特性 c_1 , c_2 も G_{xy} の二つの数値に対応して計算しておいた。合板の c_2 は池田¹⁰⁾が指摘しているように1.0から大きく外れる。

表8の全厚せん断強さは x 方向, y 方向せん断とも、繊維直交方

向にせん断力が作用する層があるので比較的高い値を示し、層の構成比 $\alpha_1 > \alpha_2$ に対応して $F_{xy} > F_{yx}$ となる。なお、 45° 方向ではせん断試験片の支持部に圧壊が生じたため、真のせん断強さより小さい値が検出されている可能性が高い。今回のいす型せん断試験片では支持部の幅10mmに対してせん断面の高さが20mmであるので、せん断面のせん断破壊が支持部の圧縮破壊に先行するには、圧縮強さがせん断強さの2倍以上なければならない。 x 方向と y 方向はこれを満たしているが、 45° 方向は満たしていない。

同表8の接着層せん断では、メラミン接着剤の単独層および投錨効果を持つ含浸層（接着層）がともに強固なため、接着層に近接する単板にせん断破壊が生じる。したがって、破壊様式は、凝集破壊あるいは界面破壊（接着破壊）ではなく、基材破壊（被着材破壊）ということになる。せん断破壊する層は、せん断力の方向がT方向となる側の層、すなわち x 方向せん断では偶数番号の層、 y 方向せん断では奇数番号の層となり、所謂、ローリングシア破壊が起きる。前出図1より、偶数番号の層のほうが高く、き裂が進展しにくいため、 x 方向せん断のほうが高いせん断強さを示したものと推定される。 45° 方向せん断においてもせん断面に接する厚い方の単板がせん断破壊したが、界面破壊を部分的に含むものがあった。これ

表5 合板の全厚引張試験結果

試験片 番号	引張強さ (N/mm ²)			ヤング係数 (N/mm ²)		
	x方向	y方向	45° 方向	x方向	y方向	45° 方向
	F _x	F _y	F ₄₅	E _x	E _y	E ₄₅
1	38.8	23.1	5.56	6,770	5,770	1,150
2	33.5	20.5	4.56	6,710	6,090	1,160
3	36.9	27.2	5.61	6,740	5,620	1,140
平均	36.4	23.6	5.24	6,740	5,830	1,150

表6 合板の全厚圧縮試験結果（強さ）

試験片 番号	圧縮比例限 (N/mm ²)			圧縮強さ (N/mm ²)		
	x方向	y方向	45° 方向	x方向	y方向	45° 方向
	pF _x	pF _y	pF ₄₅	F _x	F _y	F ₄₅
1	24.2	16.5	5.88	27.6	20.7	8.95
2	21.4	15.8	5.58	26.9	20.7	8.82
3	21.6	14.0	5.56	26.9	20.6	8.67
平均	22.4	15.4	5.67	27.1	20.7	8.81

表7 合板の全厚圧縮試験結果（弾性係数）

試験片 番号	弾性係数 (E, Gの単位はN/mm ² , 他は無次元)									
	x方向		y方向		45° 方向		計算値			
	E _x	ν_x	E _y	ν_y	E ₄₅	ν_{45}	C_{sym}	G_{xy}	c_1	c_2
1	8,670	0.059	5,730	0.032	1,290	0.68				
2	7,410	0.051	5,710	0.038	1,350	0.80				
3	7,970	0.091	6,060	0.059	1,310	0.78				
平均	8,020	0.067	5,830	0.043	1,320	0.75	0.88	(1) 360 (2) 380	(1) 4.70 (2) 4.57	(1) 0.25 (2) 0.26

表8 合板の全厚せん断試験結果および接着層せん断試験結果

試験片 番号	全厚せん断強さ (N/mm ²)			接着層せん断強さ (N/mm ²)		
	x方向	y方向	45° 方向	x方向	y方向	45° 方向
	F _{yx}	F _{xy}	F _{S45}	F _{gx}	F _{gy}	F _{g45}
1	6.27	7.33	10.03	2.60	1.77	2.07
2	6.31	7.20	9.26	2.66	1.40	2.29
3	6.27	7.23	8.76	2.59	1.48	2.00
平均	6.28	7.25	9.35	2.62	1.55	2.12

図6 単板の応力-ひずみ曲線

図7 合板の応力-ひずみ曲線

はメラミンが繊維に沿った窪みに浸透する傾向があり、それに直交する方向のせん断には投錨効果があらわれるが、平行方向には投錨効果が小さいためと推定される。

単板で行ったと同様、合板についても強度則について検討してみる。Norris 式(4)と Tsai-Hill 式(5)を使って、45°方向の強さを推定すると次のようになる。単位は N/mm^2 である。

$$\text{引張強さ: } F_{45(N_9)} = 12.0, F_{45(T-H)} = 12.1$$

$$\text{圧縮比例限強さ: } {}_pF_{45(N_9)} = 11.3, {}_pF_{45(T-H)} = 11.6$$

$$\text{圧縮強さ: } F_{45(N_9)} = 11.7, F_{45(T-H)} = 12.0$$

この場合も、 $F_x \gg F_y$ であるため、Norris 則と Tsai-Hill 則の差は小さい。表5、6に示すように実験値は上から順に5.24、5.67、8.81 N/mm^2 である。実験値に対する Tsai-Hill 予測値の比は順に2.3倍、2.0倍、1.4倍で、到底容認できない予測精度である。合板の斜め方向強さについては単板で成り立つ強度相関式が適用できないと考えるべきである。これは、合板の斜め方向応力に対する破壊形式が、強度相関式が想定している破壊形式と異なるからであって、これについては次の章で検討することにする。

5. 単板と合板の力学的性質の関係

5.1 単板と合板の弾性係数の関係

合板の弾性係数が単板の弾性係数からどの程度理論的に説明できるかについて次の仮定を設けて検討する。

- (1) 合板を構成する単板はすべて同材質の直交異方性板である。
- (2) 単板は直角配向され、合板の厚さ方向に対称積層されている。
- (3) 単板同士は完全に接着され、接着層にズレは生じない。

この仮定により、合板はその長辺方向と短辺方向、すなわち x - y を弾性対称軸とする直交異方性板になることが証明でき、また、合板の各種弾性係数 E_x , E_y , E_{45} , ν_x , ν_y , ν_{45} , G_{xy} が、単板の弾性係数 E_L , E_T , ν_L , ν_T , G_{LT} から導かれる。それを付録1に解説しておいた。特に、今回の合板のように、 $E_L \gg E_T$, $\nu_L \nu_T \ll 1$ で、 α_1 と α_2 が同じオーダーの値ならば、次のような簡単式で表される。

$$E_x \cong \alpha_1 E_L, E_y \cong \alpha_2 E_L \quad (9a, b)$$

$$\nu_x \cong \frac{\nu_T}{\alpha_2}, \nu_y \cong \frac{\nu_T}{\alpha_1}, G_{xy} = G_{LT} \quad (9c, d, e)$$

$$\frac{1}{E_{45}} \approx \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\alpha_1 \alpha_2 E_L} + \frac{1}{G_{LT}} \right), \quad \nu_{45} \approx \frac{1 - \frac{G_{LT}}{\alpha_1 \alpha_2 E_L}}{1 + \frac{G_{LT}}{\alpha_1 \alpha_2 E_L}}, \quad G_{45} = \alpha_1 \alpha_2 E_L \quad (9f, g, h)$$

前出表4に示した単板の弾性係数値を上式に代入して推定した合板の弾性係数は次のようになる。 E と G の単位は N/mm^2 である。

$$E_x = 6300, \quad E_y = 5000, \quad \nu_x = 0.061, \quad \nu_y = 0.048, \quad G_{xy} = 260$$

$$E_{45} = 950, \quad \nu_{45} = 0.83$$

これに対して実験値は、順に、6740（圧縮で8020）、5830（圧縮でも5830）、0.067、0.043、360（または380）、1150（圧縮で1320）、0.75であり、推定値との対応は概ね良好と言えるであろう。両者の差は設定した仮定が完全には成立していないことに起因しており、とりわけ、すべての単板が厳密には同材質でないこと、配向が直角からずれていることが主な誤差要因と考えられる。

5.2 単板と合板の強さの関係

5.2.1 単板と合板の応力－ひずみ曲線

次に、合板の強さを単板の強さから推定する方法を検討する。その際、単板と合板の終局挙動が脆性的な破壊であるか、靱性を発揮するかを見ておく必要がある。図6に単板の材料試験で得られた応力－ひずみ曲線を各ケース代表1個について描いた。引張におけるひずみはひずみゲージによるものである。圧縮とせん断におけるひずみは試験機ヘッドのストロークを試験片の長さ（せん断試験片はせん断面の高さ）で除したものであるため、その立ち上がり勾配は弾性係数を直接表さない。同様に、図7に合板の材料試験から得られた応力－ひずみ曲線を描いた。この場合も、引張試験のひずみはひずみゲージ値で、他のもの（圧縮、せん断、接着層せん断）はストロークによるものである。

図6から単板について次の性質が看取される。単板引張では、いずれの方向についてもカーブの終点が耐力を完全に喪失する破壊点となっており、塑性変形がほとんど観察されない脆性破壊である。単板圧縮では、 T 方向は相当大きな靱性を示すが、 L 方向では靱性が乏しくなり、 45° 方向は斜め方向の繊維に沿って急激なせん断破壊が生じる脆性破壊である。単板せん断（この場合、繊維方向にせん断力が作用）においても、急激な破壊が起き脆性的である。

次に、図7から合板について次のことが観察される。合板全厚引張はカーブの終点が破断点となっており、方向によらず脆性的である。合板全厚圧縮では、方向によらずかなりの靱性が見られ、急激な破壊を起こしていない。合板全厚せん断も方向によらず相当の靱性を発揮する。接着層せん断ではどの方向も最大荷重以降の劣化は顕著であるが、せん断面の破壊が段階的に起きるため、さほど脆性的ではない。

5.2.2 合板の引張強さ

合板の x 、 y 方向の引張強さは、単板の L 方向が T 方向より圧倒的に強いので、 T 方向の応力分担は無視しても差し支えない。したがって、合板の x 、 y 方向の引張強さは単板の接着層付き L 方向引張強さから次式で推定される。

$$\text{合板の引張強さ} : F_x = \alpha_1 F_L', \quad F_y = \alpha_2 F_L' \quad (10)$$

これによる推定値はそれぞれ34.1、26.8 N/mm^2 となり、合板の実験値36.4、23.6 N/mm^2 に対する誤差はそれぞれ－6%、＋14%であ

る。推定は良好と言えるであろう。

合板の 45° 方向引張については、積層されている単板もすべて 45° 方向引張となるので、合板の引張強さは単板の引張強さに等しくなると一見思われ、そのように解釈する研究者⁴⁾もいる。しかし、両者は全く異なっている（単板1.76 N/mm^2 に対して合板5.24 N/mm^2 ）。その理由は、図8に示すように、単板の斜め 45° 破壊線が互い違いに直交する関係で、接着層のせん断破壊を伴うからである。個々の単板に生じるき裂は隣の単板で阻止され、合板の厚さ方向に単一平面を形成しない。これは、破壊線の拘束¹¹⁾として知られており、この場合は板の厚さ方向に拘束があると言える。4.2節で単板用の破壊相関式が合板に全く通用しなかった理由がこれである。したがって、合板の 45° 引張強さには接着面の 45° 方向せん断強さが加わる。図9のように、接着層のせん断破壊面を簡単にモデル化すると、せん断面の面積は $b^2/2$ となるので、合板の 45° 方向引張強さは次式で表される。

$$\text{合板の}45^\circ\text{方向引張強さ} : F_{45} = F_{45} + F_{g45} \cdot \frac{bn}{2t} \quad (11)$$

ここで、 b 、 t 、 n は合板の幅、厚さ、接着層の数で、ここではそれぞれ5mm、20.8mm、8である。推定値は3.80 N/mm^2 となり、実験値5.24 N/mm^2 に対して誤差は－27%である。上式(11)で単板の 45° 方向引張強さと接着層のせん断強さを単純加算しているが、その理由は、図7(1)の合板 45° 方向引張カーブの途中で単板あるいは接着層の破壊が生じた痕跡（荷重の急降下による応力－ひずみ曲線の段差）が認められないからである。図6(1)で見たように、単板は単独では引張挙動が脆性的であるにもかかわらず、積層接着によって各個撃破的な破壊が起きなくなる理由は現時点で不明である。

5.2.3 合板の圧縮強さ

圧縮については単板の L 、 T 方向ともに適度な靱性があるので、

図8 合板全厚斜め引張試験片の破面

図9 合板の 45° 方向引張破壊モード

塑性論における強さの累加則を適用してよいであろう。すると、合板の x, y 方向の圧縮強さは次式で推定できる。

$$\text{合板の圧縮強さ: } F_x = \alpha_1 F_L + \alpha_2 F_T, \quad F_y = \alpha_2 F_L + \alpha_1 F_T \quad (12)$$

推定値はそれぞれ22.0, 18.3N/mm²で、実験値27.1, 20.7N/mm²に対する誤差はそれぞれ-19%, -12%である。概ね、良好のようである。

45°方向の圧縮強さについては、引張と同様に(11)式を用いると、この場合、 $b=20$ なので、推定値は13.8となり、実験値8.81に対して誤差は+57%となり、推定精度がやや粗い。

5.2.3 合板のせん断強さ

合板の x, y 方向せん断強さも、上記と同様に、繊維方向せん断強さ F_{TL} と繊維直交方向せん断強さ F_{LT} が厚さの構成比に応じて寄与すると考えると、推定式は次式となる。

$$\text{合板のせん断強さ: } F_{yx} = \alpha_1 F_{TL} + \alpha_2 F_{LT}, \quad F_{xy} = \alpha_1 F_{LT} + \alpha_2 F_{TL} \quad (13)$$

今回の実験では F_{LT} が得られていない。そこで、それ以外のデータを上式に代入して、逆に F_{LT} を計算すると、上記第1式から11.7, 第2式から11.3という数値が得られ、両者は整合している。なお、いす型せん断試験で F_{LT} が得られない理由は、支持面が横圧縮になるため、せん断面の破壊よりも支圧面の圧壊が先行するからである。

6. 結び

構造用合板（9 プライ）とそれを構成する単板（ラワンベニヤ）の弾性係数と強さについてその異方性を調査し、接着層の影響についても調べた。得られた知見は次の通りである。(1)単板と合板はそれぞれ直交異方性を持った板として扱うことができる。(2)接着剤が単独で形成する層の厚さはゼロとみなせるほど薄い、接着剤の含浸によって単板は強化され、引張強さは30%、ヤング係数は5%増加する。(3)単板の弾性係数から合板の弾性係数を異方弾性理論により推定することができる。(4)単板の繊維傾斜方向の強さは通常の木材と同様、強度相関式（Norris 式あるいは Tsai-Hill 式）を用いて、その自然軸 L, T 方向に関する基本強さから推定することができる。(5)合板の繊維傾斜方向の強さについては、単板で成り立つ強度相関式は成立しない。その理由は、破壊面が単一平面とならず、接着層のせん断破壊を伴う複合破壊面となるからである。そのため、接着層のせん断耐力を加味しなければ合板の斜め方向強さは正しく評価できない。

本稿における合板と単板の力学特性に関する具体的数値は、本稿で用いた合板固有のものである。いうまでもなく、これらの値は単板の樹種、接着剤の種類、積層数などに依存する。近年、構造用合板に国産針葉樹を用いたものが増えてきており、そのような場合にも、本稿で述べた合板と単板の力学的相互関係が成立することを確認しておく必要があると思われる。

本稿で合板の異方性に関する基本的な性質がだいたい分かったので、これを基に次稿で合板の割裂について論考する予定である。

付録 1

単板を直角に積層した合板の弾性について、専門書類^{(12), (13)}にも書

かれていないので、少々紙面を割いて、ここで整理しておくことにする。この問題は、既に高見⁽⁶⁾が解いているが、ひずみの適合条件式（後出(付9)式）を厳密に守っていないため、ここで導かれる解とは一部異なっている。

まず、付図1は直交異方性を有する単板で、図のように座標をとる。 L, T を弾性対称軸とすると、平面応力状態における応力とひずみの関係は次式となることは周知のとおりである。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{LT} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_L & -\nu_T/E_T & 0 \\ -\nu_L/E_L & 1/E_T & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{LT} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{Bmatrix} \quad (付1)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\nu} E_L & \bar{\nu} \nu_L E_T & 0 \\ \bar{\nu} \nu_T E_L & \bar{\nu} E_T & 0 \\ 0 & 0 & G_{LT} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{LT} \end{Bmatrix} \quad (付2)$$

上式で、次の記号を導入した。

$$\bar{\nu} = \frac{1}{1 - \nu_L \nu_T} \quad (付3)$$

上記の柔性行列と剛性行列はそれぞれ対称行列で、 $\nu_L E_T = \nu_T E_L$ の関係がある。せん断応力度が直ひずみ度をもたさない、あるいはせん断ひずみ度が直応力度をもたさないことが直交異方性板の主軸に関する弾性法則の特徴である。

付図1 単板

$L-T$ 軸から反時計回りに θ 回転した $u-v$ 軸に関する弾性法則は、座標変換により次のように表される。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_u \\ \varepsilon_v \\ \gamma_{uv} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{uu} & C_{uv} & C_{us} \\ C_{uv} & C_{vv} & C_{vs} \\ C_{us} & C_{vs} & C_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_u \\ \sigma_v \\ \tau_{uv} \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} \sigma_u \\ \sigma_v \\ \tau_{uv} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{uu} & E_{uv} & E_{us} \\ E_{uv} & E_{vv} & E_{vs} \\ E_{us} & E_{vs} & E_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_u \\ \varepsilon_v \\ \gamma_{uv} \end{Bmatrix} \quad (付4)$$

この柔性行列と剛性行列はやはり対称行列で、その要素は θ の関数となるので、上式を次のように簡略表示する。

$$\{\varepsilon_u\} = [C(\theta)]\{\sigma_u\}, \quad \{\sigma_u\} = [E(\theta)]\{\varepsilon_u\} \quad (付5)$$

ここで、 $l = \cos\theta$, $m = \sin\theta$ とすると、上記行列の要素は次のようになる。

$$\begin{aligned} C_{uu} &= \frac{l^4}{E_L} + \frac{m^4}{E_T} + \left(\frac{1}{G_{LT}} - \frac{2\nu_L}{E_L} \right) l^2 m^2 \\ C_{vv} &= \frac{m^4}{E_L} + \frac{l^4}{E_T} + \left(\frac{1}{G_{LT}} - \frac{2\nu_T}{E_T} \right) l^2 m^2 \\ C_{ss} &= 4 \left(\frac{1}{E_L} + \frac{1}{E_T} + \frac{2\nu_L}{E_L} \right) l^2 m^2 + \frac{1}{G_{LT}} (l^2 - m^2)^2 \\ C_{uv} &= -\frac{\nu_L}{E_L} (l^4 + m^4) + \left(\frac{1}{E_L} + \frac{1}{E_T} - \frac{1}{G_{LT}} \right) l^2 m^2 \\ C_{us} &= -2 \left(\frac{l^2}{E_L} - \frac{m^2}{E_T} \right) lm + \left(\frac{1}{G_{LT}} - \frac{2\nu_L}{E_L} \right) lm (l^2 - m^2) \\ C_{vs} &= -2 \left(\frac{m^2}{E_L} - \frac{l^2}{E_T} \right) lm - \left(\frac{1}{G_{LT}} - \frac{2\nu_T}{E_T} \right) lm (l^2 - m^2) \end{aligned} \quad (付6)$$

$$\begin{aligned}
E_{uu} &= \bar{\nu} E_T m^4 + 2(\bar{\nu} \nu_L E_T + 2G_{LT}) l^2 m^2 + \bar{\nu} E_L l^4 \\
E_{vv} &= \bar{\nu} E_L m^4 + 2(\bar{\nu} \nu_L E_T + 2G_{LT}) l^2 m^2 + \bar{\nu} E_T l^4 \\
E_{ss} &= \bar{\nu} (E_L + E_T - 2\nu_L E_T) l^2 m^2 + G_{LT} (l^2 - m^2)^2 \\
E_{uv} &= \bar{\nu} \nu_L E_T (l^4 + m^4) + [\bar{\nu} (E_L + E_T) - 4G_{LT}] l^2 m^2 \\
E_{us} &= \bar{\nu} E_T l m^3 - \bar{\nu} E_L l^3 m + (\bar{\nu} \nu_L E_T + 2G_{LT}) l m (l^2 - m^2) \\
E_{vs} &= \bar{\nu} E_T l^3 m - \bar{\nu} E_L l m^3 - (\bar{\nu} \nu_L E_T + 2G_{LT}) l m (l^2 - m^2)
\end{aligned} \quad (付7)$$

次に、付図2のように直交配向された単板1, 2からなる合板の弾性法則を導く。ただし、対称積層されているものとし、単板1と2が占める厚さは全厚に対してそれぞれ α_1, α_2 とする。単板1と2の u - v 軸に関する弾性法則は(付5)式より、それぞれ次式となる。

$$\{\sigma_u\} = [E(-\theta)] \{\varepsilon_u\}, \quad \{\sigma_v\} = [E(\pi/2 - \theta)] \{\varepsilon_v\} \quad (付8)$$

ここで、単板は完全に接着され接着層にずれが生じないとすると、

$$\{\varepsilon_u\} = \{\varepsilon_v\} = \{\varepsilon_u^*\} \quad (付9)$$

となる。合板の平均応力は単板1と2の応力を厚さで比例配分したものととなるので、

$$\{\sigma_u^*\} = \alpha_1 \{\sigma_u\} + \alpha_2 \{\sigma_v\} \quad (付10)$$

で表される。合板を1枚の単一板とみなしたときの弾性法則を次のように書くことにする。

$$\{\sigma_u^*\} = [E^*(\theta)] \{\varepsilon_u^*\} \quad (付11)$$

すると、(付8)、(付9)、(付10)より、次の関係があることがわかる。

$$[E^*(\theta)] = \alpha_1 [E(-\theta)] + \alpha_2 [E(\pi/2 - \theta)] \quad (付12)$$

上式の右辺を(付7)式を用いて計算すると、 $[E^*(\theta)]$ の要素が次のように得られる。

$$\begin{aligned}
E_{uu}^* &= \alpha_1 \bar{\nu} (E_L - E_T) (l^2 - m^2) + \bar{\nu} E_T l^4 + 2(\bar{\nu} \nu_L E_T + 2G_{LT}) l^2 m^2 + \bar{\nu} E_L m^4 \\
E_{vv}^* &= -\alpha_1 \bar{\nu} (E_L - E_T) (l^2 - m^2) + \bar{\nu} E_L l^4 + 2(\bar{\nu} \nu_L E_T + 2G_{LT}) l^2 m^2 + \bar{\nu} E_T m^4 \\
E_{ss}^* &= \bar{\nu} (E_L + E_T - 2\nu_L E_T) l^2 m^2 + G_{LT} (l^2 - m^2)^2 \\
E_{uv}^* &= \bar{\nu} \nu_L E_T (l^4 + m^4) + [\bar{\nu} (E_L + E_T) - 4G_{LT}] l^2 m^2 \\
E_{us}^* &= l m [\alpha_1 \bar{\nu} (E_L - E_T) + \bar{\nu} E_T l^2 - \bar{\nu} E_L m^2 - (\bar{\nu} \nu_L E_T + 2G_{LT}) (l^2 - m^2)] \\
E_{vs}^* &= l m [\alpha_1 \bar{\nu} (E_L - E_T) + \bar{\nu} E_T m^2 - \bar{\nu} E_L l^2 + (\bar{\nu} \nu_L E_T + 2G_{LT}) (l^2 - m^2)]
\end{aligned} \quad (付13)$$

このとき、 u - v 軸が合板の弾性対称軸であるには、 $E_{us}^* = E_{vs}^* = 0$

付図2 合板

でなければならない。これを満たすのは $lm=0$ である（ただし、 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1/2$ の場合に限り、 $l^2 = m^2 = 1/2$ もこれを満たす）。よって、合板の弾性対称軸すなわち合板全体としての異方性主軸は θ が 0° と 90° となる。 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1/2$ の特殊な場合は $\pm 45^\circ$ も主軸となるが、今回の合板はそれを満たさないで、このケースは無視する。合板の弾性対称軸 x - y に関する E^* は(付13)において、 $l=1, m=0$ とすればよいので、次式を得る。

$$\begin{aligned}
E_{xx}^* &= \bar{\nu} (\alpha_1 E_L + \alpha_2 E_T) \\
E_{yy}^* &= \bar{\nu} (\alpha_1 E_T + \alpha_2 E_L) \\
E_{ss}^* &= G_{LT} \\
E_{xy}^* &= \bar{\nu} \nu_L E_T \\
E_{xs}^* &= E_{ys}^* = 0
\end{aligned} \quad (付14)$$

この逆行列を計算すると、合板の弾性対称軸 x - y に関する C^* が次のように導かれる。

$$\begin{aligned}
C_{xx}^* &= \frac{(1 - \nu_L \nu_T) (\alpha_1 E_T + \alpha_2 E_L)}{(\alpha_1 E_L + \alpha_2 E_T) (\alpha_1 E_T + \alpha_2 E_L) - \nu_L^2 E_T^2} \\
C_{yy}^* &= \frac{(1 - \nu_L \nu_T) (\alpha_1 E_L + \alpha_2 E_T)}{(\alpha_1 E_L + \alpha_2 E_T) (\alpha_1 E_T + \alpha_2 E_L) - \nu_L^2 E_T^2} \\
C_{xy}^* &= -\frac{(1 - \nu_L \nu_T) \nu_L E_T}{(\alpha_1 E_L + \alpha_2 E_T) (\alpha_1 E_T + \alpha_2 E_L) - \nu_L^2 E_T^2} \\
C_{ss}^* &= 1/G_{LT} \\
C_{xs}^* &= C_{ys}^* = 0
\end{aligned} \quad (付15)$$

このことから、合板の弾性対称軸 x - y に関する弾性係数が次のように表されることになる。

$$\begin{aligned}
E_x &= 1/C_{xx}^* = \frac{(\alpha_1 E_L + \alpha_2 E_T) (\alpha_1 E_T + \alpha_2 E_L) - \nu_L^2 E_T^2}{(1 - \nu_L \nu_T) (\alpha_1 E_T + \alpha_2 E_L)} \\
E_y &= 1/C_{yy}^* = \frac{(\alpha_1 E_L + \alpha_2 E_T) (\alpha_1 E_T + \alpha_2 E_L) - \nu_L^2 E_T^2}{(1 - \nu_L \nu_T) (\alpha_1 E_L + \alpha_2 E_T)} \\
\nu_x &= -E_x C_{xy}^* = \frac{\nu_L E_T}{\alpha_1 E_T + \alpha_2 E_L} = \frac{\nu_T E_L}{\alpha_1 E_T + \alpha_2 E_L} \\
\nu_y &= -E_y C_{xy}^* = \frac{\nu_L E_T}{\alpha_1 E_L + \alpha_2 E_T} = \frac{\nu_T E_L}{\alpha_1 E_L + \alpha_2 E_T} \\
G_{xy} &= 1/C_{ss}^* = G_{LT}
\end{aligned} \quad (付16)$$

ここで、 $E_L \gg E_T, \nu_L \nu_T \ll 1$ で、 α_1 と α_2 が同じオーダーの値とすると、上式は次のように簡略化できる。本文で用いたのはこれである。

$$E_x \cong \alpha_1 E_L, \quad E_y \cong \alpha_2 E_L, \quad \nu_x \cong \frac{\nu_T}{\alpha_2}, \quad \nu_y \cong \frac{\nu_T}{\alpha_1} \quad (付17)$$

合板の弾性対称軸 x - y から 45° 傾いた軸に関する柔行列 $[_{45}C]$ の要素 $_{45}C_{uu}, _{45}C_{uv}, _{45}C_{ss}$ などは(付6)式で $l=m=1/\sqrt{2}$ とし、 L, T をそれぞれ x, y に置き換えたものとなる。したがって、 45° 方向のヤング係数、ポアソン比、せん断弾性係数は、

$$E_{45} = \frac{1}{_{45}C_{uu}} \left(= \frac{1}{_{45}C_{vv}} \right), \quad \nu_{45} = -E_{45} \cdot _{45}C_{uv}, \quad G_{45} = \frac{1}{_{45}C_{ss}}$$

の関係から、次のように求められる。

$$\frac{1}{E_{45}} = \frac{1}{4} \left(e^- + \frac{1}{G_{LT}} \right), \quad \nu_{45} = \frac{1 - e^- \cdot G_{LT}}{1 + e^- \cdot G_{LT}}, \quad G_{45} = \frac{1}{e^+} \quad (付18)$$

ここで、

$$e^\pm = \frac{(1 - \nu_L \nu_T) (E_L + E_T \pm 2\nu_L E_T)}{(\alpha_1 E_L + \alpha_2 E_T) (\alpha_1 E_T + \alpha_2 E_L) - \nu_L^2 E_T^2} \quad (付19)$$

上式の複号±は+が e^+ に、-が e^- に当てられる。この場合も、同様に簡略化すると、

$$\frac{1}{E_{45}} \cong \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\alpha_1 \alpha_2 E_L} + \frac{1}{G_{LT}} \right), \quad \nu_{45} \cong \frac{1 - \frac{G_{LT}}{\alpha_1 \alpha_2 E_L}}{1 + \frac{G_{LT}}{\alpha_1 \alpha_2 E_L}}, \quad G_{45} \cong \alpha_1 \alpha_2 E_L$$

(付20)

が導かれ、これを本文で用いた。

参考文献

- 1) 日本農林規格協会：合板，2003.6.
- 2) 沢田 稔，畑 健一：合板の弾性に関する研究（第1報），木材学会誌，5(2)，pp.45-49，1959.4.
- 3) 沢田 稔，近藤孝一，畑 健一：合板の弾性に関する研究（第2報），木材学会誌，5(4)，pp.131-138，1959.8.
- 4) 浅野猪久夫，都築一雄：合板の強度的異方性について，材料，12(121)，pp.761-768，1963.10.
- 5) 大熊幹章：合板の機械的性質に関する研究（第1報），木材学会誌，12(1)，pp.15-20，1966.2：同（第2報），12(1)，pp.20-25，1966.2：同（第3報），12(2)，pp.71-74，1966.4：同（第4報），12(1)，pp.75-80，1966.4：同（第5報），12(3)，pp.123-128，1966.6.
- 6) 高見 勇：合板の強さについて(1)，林業試験場研究報告，208号，pp.1-84，1968.
- 7) 桑村 仁：テーパー木梁の破壊荷重から導かれる木材の割裂条件－鉄骨木質構造の研究 その4－，日本建築学会構造系論文集，第74巻，第641号，pp.1295-1302，2009.7.
- 8) 桑村 仁：円孔内圧による木材の割裂－鉄骨木質構造の研究 その5－，日本建築学会構造系論文集，第75巻，第647号，pp.175-184，2010.1.
- 9) APA - The Engineered Wood Association：Plywood Design Specification，Tacoma, USA, 1997.1.
- 10) 池田 健，植村益次，武藤政男：一様な内圧又は剪断力を受ける孔を有する直交異方性板の応力分布に就て，応用力学（日本応用力学会），第1巻，第1号，pp.8-14，1948.1.
- 11) 桑村 仁：木材の割裂破壊線とフラクトグラフィ－鉄骨木質構造の研究 その6－，日本建築学会構造系論文集，第75巻，第650号，pp.831-838，2010.4.
- 12) 林 毅：複合材料工学，日科技連出版社，1971.
- 13) Dietz, A. G. H.：Composite Engineering Laminates, The MIT Press, 1969.

(2010年2月7日原稿受理，2010年4月6日採用決定)