

単板積層材の直交異方性を考慮した非線形解析

NONLINEAR ANALYSIS FOR LAMINATED VENEER LUMBER CONSIDERED AS ORTHOTROPIC MATERIALS

永岡 伊玖磨*
Ikuma NAGAOKA

In recent years, stabilizing material quality, from the viewpoint of ensuring the dimensional accuracy, it has been developed for engineered wood. In order to make effective use of wood as a building material, it is important to elucidate the complex strength performance of "orthotropic materials". From the background, in this report, we aim to build high precision evaluation method of material properties by first focusing on veneer laminate among various wooden materials. In numerical analysis, elastic and elasto-plastic analysis is performed considering orthotropic anisotropy.

Keywords : *Laminated Veneer Lumber, Orthotropic, Elastic-plastic analysis, Finite Element Method*

単板積層材, 直交異方性 弾塑性解析, 有限要素法

1. はじめに

地球温暖化に対する CO₂ の固定化という環境性能の観点から、木質材料の更なる有効活用が注目されている。近年では都市空間における木質材料の需要拡大を目指す研究が数多く進められており¹⁾、材料品質の安定化、寸法精度の確保の観点から、集成材、単板積層材(LVL)、直交集成板(CLT)などのエンジニアードウッドの開発が進んでいる。木材は繊維方向の力に対しては高い強度特性を有するが、繊維直交方向の力に対しては脆弱な特性を示すような“直交異方性材料”であり、木材を建築材料としてさらに大規模な建築物に対して有効活用するためには、このような複雑な材料の強度性能を詳細に解明することが重要となる。

近年、木質ラーメン構造に関する研究²⁾が進められてきたが、今後、より大規模化が求められる木質材料の新たな可能性を検討するために、大断面木質部材における材料の直交異方性特性が構造性能に及ぼす影響因子を明らかにすることが重要となっている。本研究では、種々の木質材料の中でも、強度性能の制御が容易で、寸法安定性に優れた構造用単板積層材(LVL)に着目し、材料特性の高精度評価法の構築を目指す。そして、これらの検討に重要かつ必要最低限の基礎物理量の合理的な確定方法とそれをを用いた汎用的な解析技術を確立することにより、木質構造の新たな可能性を検討することが本研究の目的である。ここでの必要最低限の基礎物理量というものは、日本農林規格(JAS)に定められている木質材料の規格区分(曲げヤング係数区分/水平せん断性能区分)に対する標準的な強度特性値(基準材料強度、基準弾性係数等)から材料を直交異方性体とした数値解析モデルに必要となる 9 つの弾性係数(各方向のヤング係数 E_L, E_R, E_T 、ポアソン比 $\nu_{LR}, \nu_{RT}, \nu_{LT}$ 、せん断弾性係数

G_{LR}, G_{RT}, G_{LT})と 6 種類の塑性係数(各方向の降伏応力度 F_L, F_R, F_T 、降伏せん断応力度 F_{LR}, F_{RT}, F_{LT})を示している。また、これらの要素実験は合理的な試験体サイズで実施することで検証の容易な評価方法の構築を目指しており、応用性が高く、実設計への発展性が容易であることから数値検証には汎用性の高い有限要素法を用いることとする。本研究で扱う単板積層材(LVL)は、原木からロータリーレース加工(大根のかつら剥き)によって製造される単板の積層方向が制御された材料であり、直交異方性のモデルを構築する際に、基本となる繊維方向(L 方向)、半径方向(R 方向)、接線方向(T 方向)の各方向の構成要素を統一的に定義しやすい木質材料である。(Fig.1 参照)LVL は材軸方向が平行単板のみで構成された A 種 LVL と全体の 30%程度を直交単板とした B 種 LVL の 2 種類の規格が存在するが、本研究では特にこれら 2 種類の強度特性を検証するための基礎データを蓄積する。解析を行うために必要な基礎物理量を得る実験は、縦圧縮試験と水平せん断試験とねじり試験の 3 種類を行う。また、解析では、前述した 3 つの実験の解析モデルを作成し実験と比較する。本研究では、汎用ソフトである ANSYS³⁾を用いた。また数値解析では、直交異方性を考慮した、弾塑性解析を行い LVL の破壊形状をシミュレーションする。

2 解析方法

2.1 応力-ひずみ関係

本研究では、文献 4) を参考にして、直交異方性を考慮した弾性応力により解析を行う。直交異方性の主軸を (L,R,T) とする直交異方性座標を考える。(Fig.1 参照)

* 近畿大学大学院システム工学研究科 博士前期課程

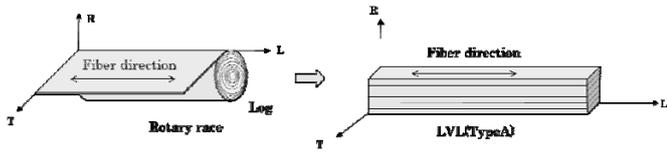


Fig.1 Definition of Coordinates

2.2 材料の降伏特性

直交異方性材料の降伏(破壊)条件は多く存在するが⁹⁾、本解析では最も基礎的な直交異方性材料の降伏特性を検討するために、以下に示す Hill 型¹⁰⁾の降伏条件を用いた解析を行う。Hill の基準は、材料の異方性の降伏を考慮するために、von Mises の考案した降伏条件を拡張したものであり、この基準が等方硬化則として使用される場合、降伏関数は次式で与えられる。

$$f(\sigma) = \sqrt{\{\sigma\}^T [C_p] \{\sigma\}} - \sigma_0 (\varepsilon^{-p}) \quad (1)$$

σ_0 = 参考降伏応力, (ε^{-p}) = 相当ひずみ

$\{\sigma\}$ = 応力ベクトル, $[C_p]$ = 塑性コンプライアンスマトリクス

また、移動硬化則として扱われる場合には、降伏関数は、以下のようになる。

$$f(\sigma) = \sqrt{(\{\sigma\} - \{\alpha\})^T [C_p] (\{\sigma\} - \{\alpha\})} - \sigma_0 (\varepsilon^{-p}) \quad (2)$$

材料は、3つの対称直交平面を持つと仮定すると、材料座標系がこれらの対称平面に対して法線方向である場合、塑性コンプライアンスマトリクスは (3)式のように表すことができる。

$$[C_p] = \begin{bmatrix} G+H & -H & -G & 0 & 0 & 0 \\ -H & F+H & -F & 0 & 0 & 0 \\ -G & -F & F+G & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2N \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここに、 F, G, H, L, M, N は、異方性パラメータであり、(4)~(9)式のように定義される。

$$F = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{yy}^2} + \frac{1}{R_{zz}^2} - \frac{1}{R_{xx}^2} \right), G = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{zz}^2} + \frac{1}{R_{xx}^2} - \frac{1}{R_{yy}^2} \right), N = \frac{3}{2} \left(\frac{1}{R_{xx}^2} \right) \\ H = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{xx}^2} + \frac{1}{R_{yy}^2} - \frac{1}{R_{zz}^2} \right), L = \frac{3}{2} \left(\frac{1}{R_{xy}^2} \right), M = \frac{3}{2} \left(\frac{1}{R_{yz}^2} \right) \quad (4) \sim (9)$$

ここに $R_{xx}, R_{yy}, R_{zz}, R_{xy}, R_{yz}, R_{zx}$ は降伏応力比である。降伏応力比は、解析の際に異方向の軸同士の降伏応力を用いて定めるもので一般に降伏応力 σ_{ij}^y を用いて以下の式(10)~(15)で計算される。

$$R_{xx} = \frac{\sigma_{xx}^y}{\sigma_0}, \quad R_{yy} = \frac{\sigma_{yy}^y}{\sigma_0}, \quad R_{zz} = \frac{\sigma_{zz}^y}{\sigma_0} \\ R_{xy} = \frac{\sqrt{3}\sigma_{xy}^y}{\sigma_0}, \quad R_{yz} = \frac{\sqrt{3}\sigma_{yz}^y}{\sigma_0}, \quad R_{zx} = \frac{\sqrt{3}\sigma_{zx}^y}{\sigma_0} \quad (10) \sim (15)$$

ここで σ_0 は参照降伏応力であり、本研究では材料強度が最も大きい繊維方向(L方向)に対する圧縮強度(σ_L^y)を用いることとする。塑性 Hill 定数およびその降伏関数は、応力 6 次元空間の各軸方向の負荷に対する初期降伏応力同士の相対的な大きさ(あるいは比率)により既定される。また、塑性ひずみ増分 $\Delta\varepsilon^p$ は関連流れ則(Associated flow rule)に基づき(16)式で与えられるものとする。

$$\Delta\varepsilon^p = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma} \quad (16)$$

ここに λ は塑性ひずみの大きさを表すスカラーであり $\lambda < 0$ のとき除荷となる。

3 実験による材料定数の固定

3.1 縦圧縮試験

解析で用いる基礎材料特性値を定めるために、30×30×90 (mm) の大きさの Fig.2 のような試験体を作成し縦圧縮試験を行う。試験体では LVL の A 種(110E 特級,60V-51H)と B 種(80E215F,40V-26H)の強度特性を把握する。直交異方性を考慮するために、試験体は、繊維方向 (L 方向)、半径方向 (R 方向)、接線方向 (T 方向) の各 3 方向に切り出している、本試験では、各方向の最大耐力とヤング係数、ポアソン比の算定する。ひずみゲージを試験体の 4 側面に水平、垂直の各 2 方向に貼り付け各方向のポアソン比を計測する。(試験体 1 体に取り付けるひずみゲージは 8 本となる。) 試験は JAS 規格に準じた縦圧縮試験を行う。Fig.2 に縦圧縮試験の概略図を示す。

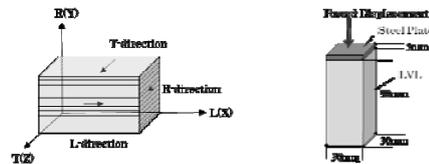


Fig.2 Test piece size and Overview of compression test

LVL A 種および B 種の L,R,T 各方向に対する応力度—ひずみ関係のグラフを Fig.3 および Fig.4 に示す。また、試験結果一覧を Table 1 に示す。試験結果から、A 種と B 種を比較すると、A 種では R 方向加力と T 方向加力はほぼ同様の応力度—ひずみ度特性を示しているが、B 種では、T 方向加力は強度、剛性ともに R 方向に比べ増大しており、R 方向と T 方向の強弱の特性が入れ替わっていることがわかる。また、B 種では A 種よりも L 方向の強度が 13.6% 減少するが、R 方向は 57.4%、T 方向は 66.1% 強度が上昇していることがわかる。また方向別に比較すると、A 種 LVL では、L 方向の強度に対して、R 方向は 20%、T 方向は 24% 程の強度しかなかったが、B 種 LVL の強度では、L 方向に対して R 方向は 37%、T 方向は 47% 強度があり、各方向の強度の差が小さくなっていることがわかる。また B 種 R 方向の破壊性状はアコーディオンのようなおりたみ形状となることが観察された。(Photo1 参照) B 種 LVL の R 方向の破壊形状と B 種 LVL の L 方向の破壊形状の比較を示す。B 種の R 方向がこのような破壊性状となるのは粘りながら破壊されているためである。

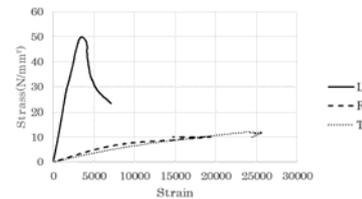


Fig.3 Stress-Strain curve (LVL Type-A)

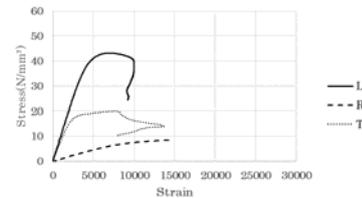


Fig.4 Stress-Strain curve (LVL Type-B)

Table1 Result of Compression test (N/mm²)

	Direction	Elastic modulus	Strength(max)
LVL Type-A	L	17989	50.0
	R	1004	10.1
	T	671	12.1
LVL Type-B	L	10226	43.2
	R	832	15.9
	T	7987	20.1

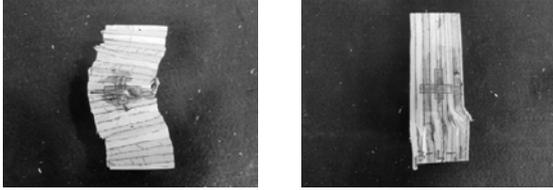


Photo1 Test piece of after Compression test (Type B-R and B-L)

3.2 ねじり試験

木材のねじり試験を行い、ねじり変形に対するねじり剛性から材料のせん断弾性係数を求めることとした。ねじり試験は、日本住宅・木材技術センターの試験方法⁷⁾を参考に行う。本試験では、静的にねじりモーメントを与えることで、ねじり剛性($G \cdot K$)を算出し、そこからせん断弾性係数 G を求める。

$$G = \frac{1}{K} \frac{\Delta T}{\Delta \omega} \quad (17)$$

ここに、 K : サンプナンのねじり定数、 $\Delta T/\Delta \omega$: $T-\omega$ 関係の傾き
 T : ねじりモーメント、 ω : ねじり角 θ/L_g

区間 L_g におけるねじり角、 L_g : ねじり角測定区間の距離

本試験での試験体の寸法や荷重方向の概略を Fig.5 に示す。Fig.5 の D1~D4 の変位点で水平変位を計測して、ねじり角を計算する。本試験での試験体の数は、A 種 LVL と B 種 LVL の 2 種類の長辺方向が L 方向と T 方向のものであるため合計 4 体となる。本試験では、回転軸が L 方向および T 方向となる試験体のねじり試験を行う。回転軸が R 方向の場合、ねじりモーメントをかけると単板同士の接着面に荷重がかかり、容易に破壊されると予想されるため、今回の試験では R 方向をねじり軸としたねじり試験は行わない。

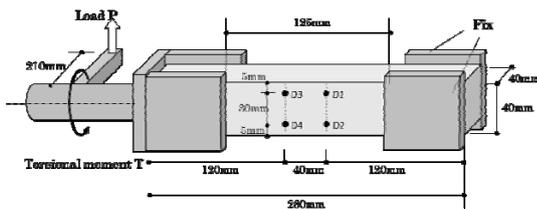


Fig.5 Overview of Twisting test

試験により得られたねじりモーメント-ねじり角関係のグラフを Fig.6 に示す。Fig.6 からねじり剛性(あるいは、せん断弾性係数)は A 種 LVL の L 方向が最も大きく、A 種 LVL の T 方向が最も小さくなり、B 種 LVL がその 2 つの間ほどの数値になるという知見を得た。これは、B 種 LVL の直交層の効果が顕著に表れている結果になっていると考えられる。また、Table.2 に本試験で得られたせん断弾性係数を示す。この値から解析で用いるせん断弾性係数の計算法を次節に示す。

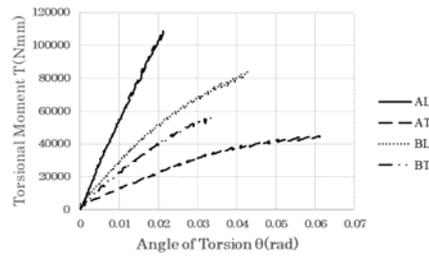


Fig.6 Torsional moment - Angle of torsion relation

Table2 Result of Twisting test (N/mm²)

Test piece	TypeA-L	TypeA-T	TypeB-L	TypeB-T
Shear modulus G	605.9	124.3	287.4	248.6

3.3 せん断弾性係数の算出

前節に示した L 軸まわりのねじり試験より、直交異方性体の L 方向に関するせん断弾性係数 G_{LR}, G_{LT} の各平均値が得られていると仮定する。また同様に、T 軸まわりのねじり試験より、T 方向に関するせん断弾性係数 G_{TR}, G_{TL} が得られていると仮定すると、次式の関係が得られる。

$$\frac{G_{LR} + G_{LT}}{2} = \bar{G}_L, \quad \frac{G_{TR} + G_{TL}}{2} = \bar{G}_T \quad (18)$$

ここに \bar{G}_L : L 軸まわりのねじり試験より得られるせん断弾性係数

\bar{G}_T : T 軸まわりのねじり試験より得られるせん断弾性係数

また、R 軸まわりのねじり試験は、治具で拘束し、十分な一樣ねじり変形を生じさせるだけの十分な長さの試験体を切り出して製作することが困難であったために実施していない。そのため、R 方向に関するせん断弾性係数 G_{RL}, G_{RT} はねじり試験からは得ることができていないため、文献 8), 9) に示される値を参考として、 $G_{RT} = E_R/30$ として算出することとした。

このとき、各軸まわりのねじり変形に伴って生じる共役関係となるせん断応力度から、せん断弾性係数には次式が成り立つ。

$$G_{LR} = G_{LT}, G_{RL} = G_{RT}, G_{TL} = G_{TR} \quad (19)$$

式(18)と式(19)から、

$$G_{LR} = 2\bar{G}_L - 2\bar{G}_T + G_{RT}, G_{LT} = 2\bar{G}_T - G_{RT}, G_{RT} = E_R/30 \quad (20)$$

以上の関係式を用いて解析で用いるせん断弾性係数は G_{LR}, G_{RL}, G_{LT} を算出すると Table3 となる。

Table3 Shear modulus (N/mm²)

Test piece	G_{LR}	G_{RT}	G_{LT}
LVL Type-A	996.7	33.47	215.1
LVL Type-B	100.4	22.73	474.4

4 解析による材料定数の検証

4.1 解析で用いる直交異方性パラメータ

前節までに示した各材料実験により固定した 9 つの弾性係数(各方向のヤング係数 E_L, E_R, E_T 、ポアソン比 $\nu_{LR}, \nu_{RT}, \nu_{LT}$ 、せん断弾性係数 G_{LR}, G_{RT}, G_{LT})を Table4(LVL・A 種)、Table5(LVL・B 種)に示す。各方向のヤング係数 E_L, E_R, E_T については、3.1 節に示した縦圧縮試験によって得られる応力度-ひずみ関係の初期の弾性域における剛性(0.1Pmax と 0.4Pmax を結ぶ割線剛性)から算出した。また、各縦圧縮試験体の 4 側面に縦横 2 枚ずつ貼り付けたひずみゲ-

ジの弾性域における値から計測(向かい合う対となる方向において)は平均ひずみを算出)される各方向の縦ひずみと横ひずみの比率から、各方向で共役となる組み合わせのポアソン比については、別途で行った各方向のせん断試験から同定したせん断弾性係数(G_{LR}, G_{RT}, G_{LT})を用いて、コンプライアンスマトリクス $[C]$ が対称性を満足するように、得られたポアソン比の結果を算術的に補正した。このとき算出されたメジャーポアソン比 $\nu_{LR}, \nu_{RT}, \nu_{LT}$ の値を表に示している。また、Table6(LVL・A種)、Table7(LVL・B種)に6種類の塑性係数(各方向の降伏応力度 F_L, F_R, F_T 、降伏せん断応力度 F_{LR}, F_{RT}, F_{LT})を示す。これらの表には繊維方向主軸Lに対する各方向の係数の比を示している。実験での比率と一般的な比率を比較するとヤング係数では、A種はL方向とT方向は似た値となるがR方向は実験での比率が小さくなっていることがわかる。B種では、T方向が非常に大きな値となっていることがわかる。直交層の効果によりR方向とT方向の強弱が入れ替わることでこのような傾向が表れたと考えられる。せん断弾性係数の場合、本研究は、 $G_{RT} = E_R/30$ として計算しているため、誤差が少ない傾向にある。参照降伏応力比を $\sigma_o = F_L$ とし、接線係数を $E_t = E_L/1000$ として各方向の降伏応力比を計算して、解析を行う。

Table4 Experiment ratio and Common ratio (LVL Type-A)

LVL Type-A		value		Experiment ratio	Common ratio
Elastic modulus (N/mm ²)	E_L	17989	E_L/E_L	1.00	1.00
	E_R	1004	E_R/E_L	0.056	0.1
	E_T	671	E_T/E_L	0.037	0.05
Poisson ratio	ν_{LR}	0.370	—	—	—
	ν_{RT}	0.406	—	—	—
	ν_{LT}	0.854	—	—	—
Shear modulus (N/mm ²)	G_{LR}	996.7	E_L/G_{LR}	18.0	15-20
	G_{RT}	33.5	E_R/G_{RT}	30.0	25-55
	G_{LT}	215.1	E_T/G_{LT}	3.1	0.5-1

Table5 Experiment ratio and Common ratio (LVL Type-B)

LVL Type-B		value		Experiment ratio	Common ratio
Elastic modulus (N/mm ²)	E_L	10226	E_L/E_L	1.00	1.00
	E_R	832	E_R/E_L	0.081	0.1
	E_T	7987	E_T/E_L	0.781	0.05
Poisson ratio	ν_{LR}	0.655	—	—	—
	ν_{RT}	0.097	—	—	—
	ν_{LT}	0.000	—	—	—
Shear modulus (N/mm ²)	G_{LR}	100.4	E_L/G_{LR}	101.8	15-20
	G_{RT}	22.7	E_R/G_{RT}	36.6	25-55
	G_{LT}	474.4	E_T/G_{LT}	16.8	0.5-1

Table6 Hill Parameter (LVL Type-A)

F_L	50.0	N/mm ²	F_L/σ_o	1.0
F_R	10.1	N/mm ²	F_R/σ_o	0.202
F_T	12.1	N/mm ²	F_T/σ_o	0.242
F_{LR}	10.78	N/mm ²	$\sqrt{3}F_{LR}/\sigma_o$	0.3735
F_{RT}	2.46	N/mm ²	$\sqrt{3}F_{RT}/\sigma_o$	0.0853
F_{LT}	8.82	N/mm ²	$\sqrt{3}F_{LT}/\sigma_o$	0.3054
σ_o	50.0	N/mm ²	$\sigma_o = F_L$	
E_t	17.99	N/mm ²	$E_t = E_L/1000$	

Table7 Hill Parameter (LVL Type-B)

F_L	43.2	N/mm ²	F_L/σ_o	1.0
F_R	15.9	N/mm ²	F_R/σ_o	0.202
F_T	20.1	N/mm ²	F_T/σ_o	0.242
F_{LR}	6.21	N/mm ²	$\sqrt{3}F_{LR}/\sigma_o$	0.3735
F_{RT}	4.19	N/mm ²	$\sqrt{3}F_{RT}/\sigma_o$	0.0853
F_{LT}	8.90	N/mm ²	$\sqrt{3}F_{LT}/\sigma_o$	0.3054
σ_o	43.2	N/mm ²	$\sigma_o = F_L$	
E_t	10.226	N/mm ²	$E_t = E_L/1000$	

4.2 解析例1(縦圧縮試験)

前章で述べた実験によって算出した直交異方性体の各材料特性を用いて、有限要素解析を行う。本研究では、木材の直交異方性を考慮して弾塑性解析を行うため、L,R,T(x,y,z)の3方向のパラメータが重要となってくる。本研究では、前章で行った3つの実験の解析モデルと過去に行った曲げ試験の解析モデルを作成し、有限要素解析を行い実験と比較し、解析の有用性を検証する。解析では微小変形解析を行う。解析例1では、縦圧縮試験の解析を行う。解析モデルは実験と同様の解析を行う。解析モデルの寸法や境界条件等をFig.7に示す。荷重は実験と同様で上部に下向きの強制変位をかけ、境界条件は、下部に完全拘束として応力とひずみ度を計算する。

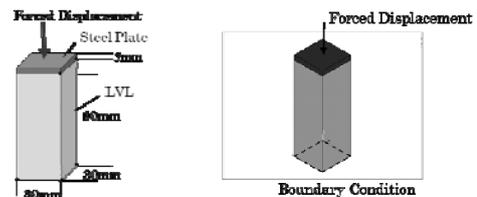


Fig.7 Overview of Model-1

A種LVLの応力度-ひずみ関係の解析結果と実験結果を比較したグラフをFig.8に、B種LVLをFig.9に示す。Fig.8からA種LVLでは、解析も実験も最大応力は $L > T > R$ の順になっている傾向は一致していることがわかる。また、弾性域では3方向とも実験と解析がほぼ同じ値となるが、降伏を迎えると実験では急激に応力度が減少しているのに対して、解析では、ゆっくりと減少するという結果になり誤差が生じていることがわかる。しかし、開発で必要と考えられる微小変形部分では、解析の精度が十分であった。Fig.9からB種LVLの場合でも同様の結果を得ることができた。また、B種LVLのほうが解析の精度が良いという知見を得た。これは、直交層があることで、LVLの異方性が弱まり本研究での直交異方性理論

を用いた連続体としての有限要素解析の解析モデルでも精度の高い解析をできたと考える。破壊形状を Fig.10 に解析結果の変形状態と実験での破壊形状を示す。A 種 LVL の L 方向の結果で、左が解析結果で右に実験での破壊の様子を示す。応力の集中している部分と変形の仕方が実験でのひび割れの発生している部分がほぼ同じになっている様子が見られることから、解析での実験のシミュレーションができたことが伺える。他の 2 方向の解析でも同様の結果が得られ、解析の有効性が示された。

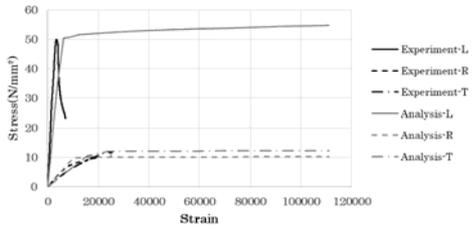


Fig.8 Stress-Strain curve (LVL Type-A)

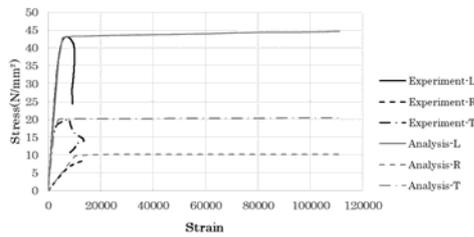


Fig.9 Stress - Strain curve (LVL Type-B)

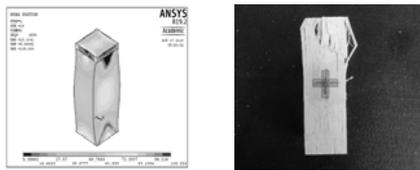


Fig.10 Fracture Form (A-L)

4.3 解析例 2(ねじり試験)

解析例 2 では、ねじり試験の解析を行う。ねじり試験の解析モデルの概略図を Fig.11 に示す。要素分割を簡略化するために、実験における治具の部分のモデルは簡略し、境界条件を与えることで実験を模擬している。LVL の部分が一樣なねじれとなるように Fig.11 右のように治具の部分の 4 点に荷重を与え回転力としている。荷重の大きさは実験のねじりモーメントから回転力が $100000\text{N}\cdot\text{mm}$ となるように 4 点それぞれに 2500N を与える。境界条件は LVL の端部を完全拘束としている。実験と同様に、Fig.11 のように D1~D4 点を与え D1 と D2 点の変位から θ_1 , D3 と D4 点の変位から θ_2 を計算する。

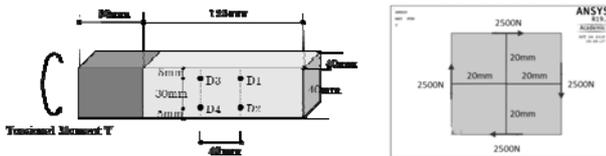


Fig.11 Overview of Model-2

A 種 LVL のねじりモーメント-ねじり角関係の実験と解析を比較したグラフを Fig.12 に B 種 LVL を Fig.13 に示す。左が L 方向、右が T 方向の比較を示す。Fig.12 から、A 種 LVL の場合 L 方向の剛性が大きくなり、T 方向が小さいという結果になった。また L 方向でも T 方向でも θ_1, θ_2 とも実験と解析の値が少しずれている結果

になった。L 方向の初期剛性のズレは実験の初期滑りが原因と考えられる。T 方向で L 方向と比較して、誤差が大きくなっているのは、T 方向は木材の異方性の観点から、せん断降伏やせん断強度が小さくなりすぐに破壊に至るため、解析でも同様のことが起こり、解析が不安定になることが原因と考えられる。B 種 LVL の場合も Fig.13 から、A 種 LVL と同様に L 方向の剛性が大きくなり T 方向が小さい結果になっており A 種 LVL の結果と比較するとその差が小さくなる結果になっている。実験からこれは直交層効果によるものであるとわかり解析でもそういった特徴が表れたと考えられる。また、A 種よりも B 種のほうが解析の精度が高いことがわかる。これも、B 種 LVL の直交層による影響であると考えられる。直交層があることで、異方性が弱まり直交異方性での解析の精度が高くなったと考えられる。特に、B 種 LVL の T 方向は直交層があることによって強度が大きくなるため、直交層の影響を受ける方向であり、解析の精度が高くなったと考えられる。

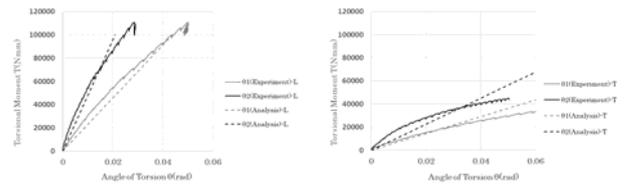


Fig.12 Torsional Moment - Angle of Torsion curve (LVL Type-A)

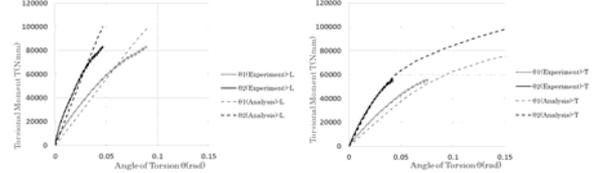


Fig.13 Torsional Moment - Angle of Torsion curve (LVL Type-B)

4.4 解析例 3(曲げ試験)

解析例 1, 2 では、解析で用いる値を算出するために行った実験であるため、実験と解析の一致度がある程度高いとも考えられる。そこで解析例 3 では、過去に行った曲げ試験を参考にして、解析モデルを作成することで簡単な実験で定めた基礎物理量でも解析が行えることを検証する。曲げ試験での解析モデルの概略図を Fig.14 に示す。解析例 3 では対称な面が 2 面あるため、対称境界条件を与えることで 1/4 解析とする。荷重は上部の治具に下向き強制変位をかける。境界条件は下部の治具を完全固定とする。また、LVL と鋼材には摩擦係数 $\mu=0.2$ を与える。解析の名前としては、LVL のみで長手方向を L 方向とし縦使いとしたものを A-1 と B-1、平使いとしたものを A-2 と B-2 とする。

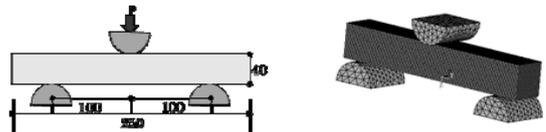


Fig.14 Overview of Model-4

A 種 LVL の荷重-変位関係の実験と解析の結果を比較したグラフを Fig.15 に B 種 LVL のものを Fig.16 に示す。A 種 LVL では、解析の安定度から微小変形解析で解析を行っている。Fig.15 から、実験と解析が縦使い(A-1)の場合も平使い(A-2)の場合も初期剛性は類似した値になっていることがわかる。A-2 の場合解析の剛性が少

し減少しているが、これは荷重方向が R 方向となることでせん断弾性係数が減少することによる影響であると考えられる。次に、B 種 LVL では、解析の精度を高くすることと解析を安定させるために大変形解析を行っている。Fig.16 から B 種 LVL では、B-1 と B-2 では解析結果が実験結果よりも大きくなっている。これは解析で用いた降伏値が少し大きかった可能性を示唆している。しかし、初期剛性では、解析と実験の値が類似している結果になっている。これも出の解析例と同様、B 種 LVL では、直交層があることで異方性が弱くなり直交異方性での解析で安定した解析が出るという結果になっている。A-1 と B-1 の解析での応力集中と変形の仕方と実験での終局状態を Fig.17 と Fig.18 に示す。Fig.17 と Fig.18 から A-1 も B-1 の場合も応力の集中している部分と実験でのひび割れの発生している部分が一致している。A-1 と B-1 では実験と解析は共通して曲げ破壊をしている様子見られることから、解析での実験のシミュレーションを行うことができたと考えられる。また、A-2 でも B-2 でも同様の結果が得られており、解析の有効性が確認された。

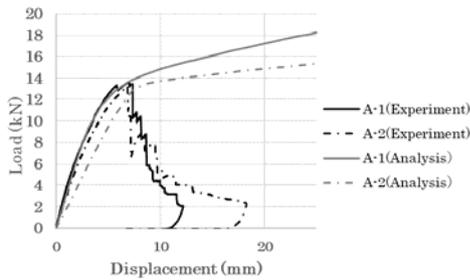


Fig.15 Load – Displacement curve (LVL Type-A)

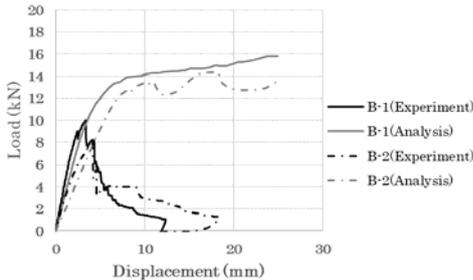


Fig.16 Load – Displacement curve (LVL Type-B)

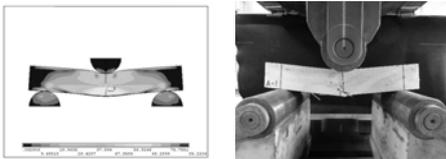


Fig.17 Stress Concentration (A-1)

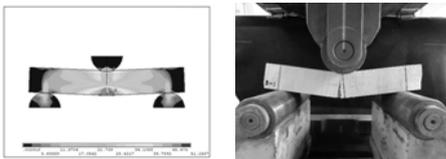


Fig.18 Stress Concentration (B-1)

5 まとめ

本研究では、種々の木質材料の中でも、単板積層材(LVL)に焦点を絞った材料特性の高精度評価法の構築を目指すために、合理的なサイズでの 3 つの要素実験(縦圧縮試験、水平せん断試験、ねじり試験)を行った。また、要素実験で得た実験値を用いて汎用ソフト ANSYS での数値解析(有限要素法)を行い解析の有効性を検証した。結果として以下のような知見を得ることができた。

- 小型の試験体での要素実験の場合でも、材料特性の高精度評価法の構築に重要かつ必要最低限の基礎物理量を算出することは可能であり、小型であることから実験が容易に行うことができるため、本研究での基礎物理量の確定方法の有効性が示された。
- 水平せん断試験では、小型の試験体を用いるとめり込みが起り弾性係수에誤差が生じやすいため、せん断弾性係数を定める場合は、ねじり試験が有効である。
- せん断弾性係数を算出する際に $G_{RT} = E_R/30$ として算出したが、解析からこの倍率での精度が最も高いため、本研究でのせん断弾性係数の確定方法の有効性が示された。
- 本研究の解析では、汎用的な数値解析である有限要素法を用いて解析を行っており、解析結果の応用性が高く、実設計への発展性を示唆することができた。

以上より、有限要素解析で LVL の解析を行う場合は、本研究で行った実験を行い、基礎物理量をしっかりと定めることである程度の精度のある解析結果を得ることができた。また、汎用ソフトである ANSYS を用いた解析である程度の解析結果を得ることができたため、実設計での実験先行型の開発でなく解析先行型の開発になる可能性を示唆することができた。そうなれば、作業効率の上昇を望むことができるため今後の研究に期待したい。

参考文献

- 1) 一般社団法人 公共建築協会, 公共建築, 「特集 木造建築の新たな展開」 Vol.60, No.214, 2018.4
- 2) 大橋好光監修, 木質ラーメン構造の設計(特集 木質ラーメン構造で住宅をつくる), 建築技術, No.688, pp.92-97, 2007.5
- 3) ANSYS : <https://www.ansys.com/>(accessed 2019.1.8)
- 4) 光井周平, 近藤一夫, 堀文, 上述真由香, 河内武, 強度比無次元化応力を用いた直交異方性降伏条件とひずみ硬化則 木材のめり込み挙動のイソパラメトリック有限要素解析(その 2), 日本建築学会構造系論文集, 第 79 巻, 第 700 号, pp.741-749, 2014.6
- 5) M.N.Nahas, Survey of Failure and Post-Failure Theories of Laminated Fiber-Reinforced Composites, Journal of Composites Technology and Research, No.8, pp.138-153, 1986
- 6) R-Hill, The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford University Press, New York, 1983
- 7) 日本住宅・木材技術センター, 構造用木材の強度試験マニュアル pp.19-21
- 8) 日本木材学会編, 木質の物理, 文永堂出版, pp104, 105, 2007.6
- 9) 山井良三郎, 木材の圧縮異方性に関する研究, 林業試験場研究報告, 第 113 号, pp.58-110, 1959