単板積層材エレメントの強度分布推定手法に関する 有効性の検討 (第2報)[†]

積層効果を含む 1ply の強度分布と推定強度分布の比較による検討^{*1}

小関真琴^{*2}, 中村 昇^{*3}

Validation of the Estimation Method of the Element Strength Distribution of Laminated Veneer Lumber II.[†]

Validation by comparing 1-ply strength distributions including
a laminating effect with estimated strength distributions^{*1}

Makoto KOSEKI^{*2} and Noboru NAKAMURA^{*3}

From experiments and analyses in the previous report, it was found that element strength distributions (SD_C) obtained by the nonlinear least-squares method (NLM) included a laminating effect. In this report, we validated NLM by comparing 1-ply strength distributions (SD_L) including a laminating effect with SD_C . As the result, NLM was valid for estimating element strength distributions for tension, compression, and bending in the vertical use direction. NLM was also valid for estimating element strength distributions for tension by assuming the criterion that LVL fails by the stress in outermost edge of the tensile side in the horizontal use direction. However, we could not conclude that the NLM was valid for estimating element strength distributions for bending in the horizontal use direction by assuming the criterion that LVL fails by the combined stress in bending and tension in the outermost layer of the tensile side in the horizontal use direction.

Keywords: laminated veneer lumber (LVL), nonlinear least-squares method, element strength, laminating effect.

前報の実験及び解析の結果から、既報の非線形最小二乗法を用いた手法により推定されたエレメント強度分布には、積層の影響が含まれていることが分かった。そこで、本報では、1ply の強度試験結果を基に積層効果を含むエレメント強度値を求め、エレメント強度分布の推定値と比較を行うことにより、非線形最小二乗法による推定手法の有効性について検討した。その結果、引張強度、圧縮強度及び縦使い方向の曲げ強度については、非線形最小二乗法による推定手法は有効と考えられる。平使い方向の曲げ強度のクライテリアを引張応力による破壊と仮定した場合も、非線形最小二乗法による推定手法は有効と考えられる。ただし、クライテリアを複合応力形式による破壊と仮定した場合、既報の推定手法が有効かどうかは分からなかった。

[†] Report I: This Journal **61**, 55-66 (2015).

^{*1} Received April 14, 2015; accepted July 27, 2015. 本報の一部は、第63回日本木材学会大会 (2013年3月, 盛岡) で発表した。

^{*2} 公益財団法人日本合板検査会 Japan Plywood Inspection Corporation, Soka 340-0028, Japan

^{*3} 秋田県立大学木材高度加工研究所 Institute of Wood Technology, Akita Prefectural University, Noshiro 016-0878, Japan

Corresponding author: M. Koseki (m.koseki@jpica-ew.or.jp)

1. はじめに

本研究の最終的な目的は、集成材と同様にエレメントの強度分布を用いて構造用単板積層材（以降、LVL という）の強度を設計することである。そこで、既報¹⁾ではLVLのエレメントを片面接着層付きの単板と考え、各層の材質及び強度特性が単一と考えられるLVLの強度実験データ（積層数は8ply～17plyの10種類）より、非線形最小二乗法を用いてエレメントの強度分布の推定を行った。次に、前報²⁾では既報¹⁾のLVL試験体残片から1ply～3plyを切り出し、平使い方向・縦使い方向の曲げ、引張及び圧縮の強度実験を行った。その結果、実験による1plyの平使い方向の曲げヤング係数分布は、非線形最小二乗法により推定した曲げヤング係数分布とほぼ一致した。また、1plyの実験による強度分布と非線形最小二乗法により推定した強度分布を比較したところ、全ての強度について非線形最小二乗法により推定した強度分布が実験による強度分布より上に位置して（換言すれば、推定した強度値>実験値）おり、積層により強度が増すこと、つまり積層効果が示唆された。そこで、2・3plyの強度分布について、実験による1plyのヤング係数分布及び強度分布のパラメータを用いたシミュレーションによる強度分布（A）と、最尤法を用いて母集団強度分布（B）を推定し、AとBを比較した。縦使い方向の曲げ強度、引張強度及び圧縮強度では、BがAより上に位置しており積層効果の存在が明らかになった。一方、平使い方向の曲げ強度については、積層効果が存在するかどうかは判断できないことが分かった。

以上を踏まえ、本報では、前報²⁾の実験による1plyのヤング係数と強度の分布を用いて積層効果を含むエレメント強度分布を求め、既報¹⁾のLVLの強度実験データより非線形最小二乗法を用いて推定したエレメント強度分布と比較することにより、非線形最小二乗法によるLVLエレメントの推定手法の有効性について検討を行った。

2. LVLにおける積層効果の定量

2.1 8ply～17plyに存在する積層効果

以下に用いる記号の定義を、Table 1に示す。また、前報²⁾では、平使い方向の曲げヤング係数で引張ヤング係数、圧縮ヤング係数及び縦使い方向の曲げヤング係数を代用しており、本報ではこれらのヤング係数を単にヤング係数と表記する。ヤング係数と強度の分布形、パラメータ及びヤング係数と強度との相関係数を $[D_1, D_2]$ ($\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, \rho$)、分布形のみを示す場合は $[D_1, D_2]$ と表す。ここで、 D_1 はヤング係数の分布形、 D_2 は強度の分布形を表し、正規分布 N 、対数正規分布 LN 、または $2P$ ワイブル分布 $2PW$ の何れかとなる。 α_1 と α_2 はヤング係数分布のパラメータ、 β_1 と β_2 は強度分布のパラメータであり、 N と LN の場合 α_1 と β_1 は平均値、 α_2 と β_2 は標準偏差を、 $2PW$ の場合 α_1 と β_1 は尺度パラメータ、 α_2 と β_2 は形状パラメータを、 ρ はヤング係数と強度の相関係数を表す。また、 D_1 が N の場合 α_1 と α_2 の単位は kN/mm^2 、 D_2 が N の場合 β_1 と β_2 の単位は N/mm^2 、 D_1 が $2PW$ の場合 α_1 の単位は kN/mm^2 、 D_2 が $2PW$ の場合 β_1 の単位は N/mm^2 となる。

前報²⁾と同様に、積層数8～17のLVLについて

Table 1. List of symbols.

Symbol	Definition
SD_{SN}	Strength distribution of N -ply LVL simulated from the experimental data in modulus of elasticity and strength of 1-ply. Distribution of F_{SN} .
SD_{PN}	Population distribution of strength of N -ply LVL estimated by the maximum likelihood method using the experimental data.
ED_{SN}	Modulus of elasticity distribution of N -ply LVL simulated from the experimental data of modulus of elasticity of 1-ply. Distribution of E_{SN} .
E_{SN}	Modulus of elasticity of N -ply LVL simulated from the experimental data of modulus of elasticity of 1-ply.
F_{SN}	Strength of N -ply LVL simulated from the experimental data of modulus of elasticity and strength of 1-ply.
e_{SFN}	Modulus of elasticity at the fracture layer in N -ply LVL.
f_{SFN}	Strength at the fracture layer in N -ply LVL.
SD_{LF}	Distribution of f_{SFN} multiplied by the laminating effect factor.
SD_C	Element strength distribution estimated by the nonlinear least-squares method.
SD_{CF}	Strength distribution of the fracture layer calculated by SD_C .

も積層効果が存在するか確認するため、実験により得られた 1ply のヤング係数分布と強度分布を用いてシミュレーションした強度分布 SD_{SN} ($N=8, \dots, 17$) と、最尤法により推定した母集団を用いてシミュレーションした強度分布 SD_{PN} ($N=8, \dots, 17$) との比較を行った。例として、8ply の引張強度分布について、 SD_{S8} と SD_{P8} の関係を Fig. 1 に示した。Fig. 1 中の△印は、8ply のヤング係数 TE_{S8} と引張強度 TF_{S8} からなる 500 組の要素 (TE_{S8} , TF_{S8}) であり、 TF_{S8} の分布が SD_{S8} となる。また、 TE_{S8} の分布を ED_{S8} と表す。 TE_{S8} と TF_{S8} の求め方は、次のとおりである。Fig. 2 に示すように、実験により得られた 1ply のヤング係数と引張強度の分布に従う有相関非正規乱数³⁾を 8 組発生させ、 i 層目のヤング係数と引張強度をそれぞれ e_i , f_i とした。 TE_{S8} は 8 個のヤング係数の平均値から、 TF_{S8} はクライテリア $TF_{S8} = \min \{TE_{S8} \times (f_i/e_i)\} (i=1, \dots, 8)$ に従い求めた。ただし、 $\min(*)$ は $*$ の最小値を表す。また、前報²⁾で示したように 1ply のヤング係数と引張強度の分布の組合せにより、 ED_{S8} と SD_{S8} の組合せは 27 通りとなるが、分布形、パラメータ及びヤング係数と引張強度の相関係数は [LN, LN] (2.68, 0.05, 3.41, 0.22, 0.17) を用いた。一方、Fig. 1 中の●印も、8ply のヤング係数 TE_{S8} と引張強度 TF_{P8} からなる 500 組の要素 (TE_{S8} , TF_{P8}) であり、 TE_{S8} は△印と同一であり、その分布は ED_{S8} であるが、 TF_{P8} は最尤法より推定された 8ply の引張強度であり、その分布が SD_{P8} となる。 ED_{S8} と SD_{P8} の組合せも前報²⁾で示したように 9 通りとなるが、

Fig. 1. Comparison of tensile strengths in SD_{S8} and SD_{P8} .

Notes: SD_{S8} : 8-ply LVL strength distribution simulated by MOE distribution and strength distribution of 1-ply in the report²⁾, SD_{P8} : 8-ply LVL strength distribution estimated by the maximum likelihood method.

Fig. 1 と Fig. 2 で示した例では、分布形、パラメータ及びヤング係数と引張強度の相関係数は [LN, LN] (2.68, 0.05, 3.98, 0.10, 0.38) となる。ただし、 ED_{S8} と SD_{P8} の 1 つの組合せに対して、 ED_{S8} と SD_{S8} の組合せは 3 通り対応する。

Fig. 1 より、 SD_{P8} が SD_{S8} より上に位置して (SD_{P8} に含まれる強度値 $>$ SD_{S8} に含まれる強度値) おり、積層効果が存在していることが分かる。他の 26 通りの組合せについても、同様に積層効果が存在していることが分かった。8ply の圧縮強度及び縦使い方向の曲げ強度についても、また、他の積層数についても同様に積層効果が認められた。

2.2 積層効果の定量方法

2.1 で示した SD_{P8} と SD_{S8} の関係を、Fig. 3 で模式的に表した。 SD_{P8} と SD_{S8} の分布に含まれる全ての要素は、文献³⁾より、0 以上 1 未満の 2 つの独立な一様乱数 (u_1, u_2) を用いて表すことができる。また、 SD_{S8} に含まれる要素 (TF_{S8}) と SD_{P8} に含まれる要素 (TF_{P8}) は 1 対 1 で対応すると仮定し、同じ (u_1, u_2) を用いて表すことができると考えた。上述したように積層効果が存在することから $TF_{P8} > TF_{S8}$ であり、積層効果を定量的に表すために積層効果係数 (k) を $k = TF_{P8}/TF_{S8}$ として算出する。

ここで、例として Fig. 1 の一つの要素である Fig. 2 の LVL を例に、実際に k を求めると次のようになる。まず、(TE_{S8} , TF_{S8}) = (14.10 kN/mm², 38.19 N/mm²) から、(u_1, u_2) = (0.26, 0.88) が求められる。次に、(u_1, u_2) を用いて SD_{P8} に従う有相関非正規乱数に変換すると、(TE_{S8} , TF_{P8}) =

Fig. 2. An example of calculating LVL strength for SD_{S8} .

Notes: e_i, f_{t_i} : MOE and tensile strength in i -th layer, simulated by MOE distribution and strength distribution of 1-ply in the report²⁾, u_1, u_2 : Seeds ($0 \leq u_1, u_2 < 1$), independent uniform random number, calculated from TE_{S8} and TF_{S8} , TE_{S8} : MOE of LVL, TF_{S8} : Tensile strength of LVL, SD_{S8} : See Fig. 1.

Fig. 3. Diagram for SD_{S8} and SD_{P8} .

Notes: TE_{S8} and TF_{S8} correspond to TE_{S8} and TF_{S8} respectively and these correspondents were calculated from the same seeds, SD_{S8} , SD_{P8} : See Fig. 1, TE_{S8} , TF_{S8} : See Fig. 2.

(14.10 kN/mm², 58.04 N/mm²) となる。従って、 $k = 58.04 \div 38.19 = 1.52$ が求められる。

2.3 積層効果を含んだ 1ply の強度分布の算定

2.2で算出した k を用いて、積層効果係数を乗じた 1ply の強度を求めることができる。Fig. 2 の LVL を用いて示すと、次のようになる。この LVL は 4 層目で破壊し、 $f_{t4} = 38.29$ N/mm² であり、1ply の強度は、 $k \times f_{t4}$ から $1.52 \times 38.29 = 58.19$ N/mm² と求められる。平使用方向の曲げ強度以外の強度について破壊クライテリアを考慮すると、積層効果係数は LVL の破壊された層の強度に乘じると考えるしかなく、破壊していない層についての積層効果係数は求める手段はない。Fig. 3 に示す他の要素についても同様に計算を行うことにより、8ply に関する積層効果係数を乗じた 1ply の強度を求めることができる。更に、他の積層数についても同様に計算していくと、積層効果係数を乗じた 1ply の強度分布 SD_{LF} を求めることができる。

以上より、 SD_{LF} を求めるアルゴリズムを次に示す。

- ① 1ply の強度試験により得られたヤング係数と強度の分布に従う有相関非正規乱数³⁾を N 組発生させて、積層数 N の仮想 LVL を 1 体作り、この LVL のヤング係数 E_{SN} を算出する。
- ② クライテリアに従い積層数 N の仮想 LVL の強度 F_{SN} を求める。また、仮想 LVL の破壊した層のヤング係数 e_{SFN} と強度 f_{SFN} をプールする。
- ③ ①～②を 500 回繰り返して積層数 N の仮想 LVL を 500 体作り、各 LVL のヤング係数と強度 (E_{SNj} , F_{SNj}) ($j=1, \dots, 500$) を求め、破壊した層のヤング係数と強度 (e_{SFNj} , f_{SFNj}) ($j=1, \dots, 500$) を

プールする。また、 ED_{SN} 及び SD_{SN} に N , LN または 2PW を当てはめそれぞれのパラメータを求める。

- ④ 前報²⁾で示した最尤法を用いて、積層数 N の LVL 強度の母集団と考えられる SD_{PN} を求める。
 - ⑤ 文献³⁾より、(E_{SNj} , F_{SNj}) と ED_{SN} 及び SD_{SN} のパラメータを用いて (u_{1Nj} , u_{2Nj}) を求め、更に (u_{1Nj} , u_{2Nj}) と ED_{SN} 及び SD_{PN} のパラメータを用いて F_{PNj} に変換する。1 対 1 で対応する F_{SNj} と F_{PNj} から $k_{Nj} = F_{PNj} / F_{SNj}$ を求め、 $k_{Nj} \cdot f_{SFNj}$ を算出する。これを $j=1, \dots, 500$ で行う。
 - ⑥ N を 8, 9, 11, $\dots$, 17 と変化させて、①～⑤を繰り返す。
 - ⑦ ⑥で得られた計 4500 組の (e_{SFNj} , $k_{Nj} \cdot f_{SFNj}$) のうち $k_{Nj} \cdot f_{SFNj}$ の分布を、積層効果係数を乗じた 1ply の強度分布 SD_{LF} とする。
- なお、⑥において $N=10$ を除いた理由は、既報¹⁾に記したとおりである。

3. エレメント強度分布推定手法の有効性の検討

3.1 非線形最小二乗法の有効性の検討方法

2. で示したとおり、 SD_{LF} は LVL の破壊された層のみの強度分布であり、一方、非線形最小二乗法 (NLM) により推定した強度分布 SD_C は破壊された層だけではなくエレメント全体の分布である¹⁾。従って、 SD_{LF} と SD_C はそのまま比較することはできない。そこで、 SD_C についても、NLM により推定されたエレメントの強度分布を用いて、2. と同様に積層数毎に 500 体の仮想 LVL を作り、破壊した層のみを対象としたヤング係数と強度による計 4500 組の (e_{CFNj} , f_{CFNj}) を求め、4500 個の f_{CFNj} の分布を SD_{CF} とし、 SD_{CF} と SD_{LF} を比較しなければならない。ただし、 SD_{CF} は NLM により推定されたエレメントの強度全体の分布ではなく、また、 SD_{LF} は積層効果を含む 1ply の強度全体の分布でないことから、K-S 検定により SD_{CF} と SD_{LF} の分布形を特定することはできない。 SD_C が適切に推定されているかどうかは、次のようにして判断した。1) まず、1ply のヤング係数と強度の分布の組合せ、及び推定されたエレメントのヤング係数と強度の分布の組合せ毎に 4500 組の (e_{CFNj} , f_{CFNj}) と (e_{SFNj} , $k_{Nj} \cdot f_{SFNj}$) を同一の散布図に表す。2) 全ての組合せのなかで、 SD_{CF} と SD_{LF} が視覚的に重なっていると考えられる組合せがあれば、NLM は有効であると判断する。以後、各強度について、NLM の有効性を検討する。

3.2 引張強度

1ply の実験によるヤング係数と強度の分布を N ,

LN, 2PW と仮定すると、9通りの組合せとなる。その組合せ毎に、2.3に示すアルゴリズムに従い k 及び SD_{LF} を求めた。 k の値は、ヤング係数と強度の分布の組合せが [N, 2PW], [LN, 2PW], [2PW, 2PW], [N, N], [LN, N], [2PW, N] では17を超えるものもあった。LVLに関する積層効果係数の研究は皆無であるが、集成材に関する文献⁴⁾などから、強度が17倍になることはあり得ないのではないかと考えた。これに対し、強度分布をLNと仮定した [N, LN], [LN, LN] または [2PW, LN] の場合は、 k の値は1.00~2.97となり妥当な値と考え、[N, LN], [LN, LN] または [2PW, LN] の場合の3通りの SD_{LF} を比較に用いることとした。

一方、NLMで推定したヤング係数と引張強度の分布の組合せも9通りとなることから¹⁾、組合せ毎に3.1に従い SD_{CF} を求めた。 SD_{LF} は3通りであることから、 $3 \times 9 = 27$ 通りの組合せについて、 SD_{CF} と SD_{LF} との比較を行う必要がある。ただし、1plyの実験とNLMの推定によるヤング係数の分布はほぼ一致しているので、9通りの組合せについて、 SD_{CF} と SD_{LF} との比較を行った。そのうち、[LN, LN] の場合の SD_{CF} と、[LN, LN] の場合の SD_{LF} をFig. 4に示した。Fig. 4を見ると、 SD_{CF} は SD_{LF} とほぼ重なり合っていることが分かる。また、NLMはヤング係数と積層効果を含んだ強度との相関係数を推定していることになり、1plyにおける相関係数と推定値を単純に比較することはできないが、 SD_{CF} と SD_{LF} がほぼ重なり合っていることから、相関係数も含めNLMは有効であると考えられる。

3.3 圧縮強度

1plyの実験によるヤング係数と圧縮強度の分布の組合せは9通りとなることから、3.2と同様に9

通りの組合せ毎に k 及び SD_{LF} を求めた。 k の値は1.10~2.52と3.2の引張強度と同じような範囲となり、9通り全ての SD_{LF} を比較に用いることとした。

一方、NLMで推定した組合せは6通りとなり¹⁾、組合せ毎に3.2と同様に SD_{CF} を求めた。9通りとなる SD_{LF} との組合せは $9 \times 6 = 54$ 通りとなるが、ヤング係数の分布が一致する18通りの組合せについて、 SD_{CF} と SD_{LF} との比較を行った。そのうち、[N, LN] の場合の SD_{CF} と、[N, LN] の場合の SD_{LF} をFig. 5に示した。Fig. 5を見ると、 SD_{CF} は SD_{LF} とほぼ重なり合っていることが分かる。従って、NLMは有効であると考えられる。

3.4 縦使い方向の曲げ強度

3.4.1 NLMによるエレメント強度分布推定

既報¹⁾でNLMより推定した縦使い方向のヤング係数分布は平均値14.33 kN/mm²、標準偏差2.64 kN/mm²となり、実験による1plyの平使い方向の曲げヤング係数の平均値14.42 kN/mm²、標準偏差1.92 kN/mm²と平均値はほぼ一致しているが、標準偏差に差が生じている。従って、NLMより推定した縦使い方向の曲げヤング係数と曲げ強度については、 SD_{CF} と SD_{LF} との比較を行うことができない。NLMより推定した縦使い方向と平使い方向の曲げヤング係数は一致しなかったが、材質が均一であれば両者はほぼ一致すると考えられる。そこで、平使い方向の曲げヤング係数の分布を縦使い方向の曲げヤング係数と見なし、改めてNLMにより曲げ強度の SD_C を求め、NLMの有効性について検討することとした。ただし、分布の組合せは9通りとなることから、組合せ毎にNLMにより SD_C を推定した。更に、K-S検定¹⁾により適合性を調べた結果、適合した7通りの組合せの SD_C のパラメータ及び相関

Fig. 4. Comparison between SD_{CF} and SD_{LF} in the tensile test for LVL.

Notes: SD_{CF} , SD_{LF} : See Table 1, ft : Tensile strength of the element, e : See Table 2.

Fig. 5. Comparison between SD_{CF} and SD_{LF} of fc in the compression test for LVL.

Notes: SD_{CF} , SD_{LF} : See Table 1, fc : Compression strength of the element, e : See Table 2.

係数を Table 2 に示した。

3.4.2 推定手法の有効性の検討

分布の組合せは 9 通りとなることから, 3.2 と同様に 9 通りの組合せ毎に k 及び SD_{LF} を求めた。 k の値は 1.04~6.93 となり, 9 通り全ての SD_{LF} を比較に用いることとした。

一方, NLM で推定した分布の組合せは Table 2 に示すとおり 7 通りとなることから, 組合せ毎に 3.2 と同様に SD_{CF} を求めた。従って, 9 通りとなる SD_{LF} との組合せは $9 \times 7 = 63$ 通りとなるが, ヤング係数の分布が一致する 21 通りの組合せについて, SD_{CF} と SD_{LF} の比較を行った。そのうち, [N, LN] の場合の SD_{CF} と, [N, 2PW] の場合の SD_{LF} を Fig. 6 に示した。Fig. 6 を見ると, SD_{CF} は SD_{LF} とほぼ重なりあっていることが分かる。従って, NLM は有効であると考えられる。

3.5 平使い方向の曲げ強度

3.5.1 引張応力破壊を仮定した場合のエレメント強度分布推定

クライテリアを複合応力一次形式と仮定した場合, エレメントの平使い方向の曲げ強度と引張強度に対する積層効果を定量化する必要があるが, クライテリアは 1 つの式で表されているので, 2 つの強度に対する積層効果係数を確定することができない。そこで, クライテリアを LVL の引張側最外層における応力による破壊 (以降, 引張応力破壊と表す) と仮定し, 引張強度分布を求めることとした。

まず, NLM により引張応力破壊における引張強度の SD_C を求めた。ただし, 分布は組合せで 9 通りとなることから, 組合せ毎に NLM により SD_C を推定した。次に, K-S 検定¹⁾ により適合性を調べた結果, 9 通り全てが適合したことから, 全ての組

合せの SD_C のパラメータ及び相関係数を Table 3 に示した。同表より, パラメータは [N, N] (14.48, 1.86, 60.11, 10.12, 0.70) となり, LVL の引張試験によるパラメータ [N, N] (14.48, 1.86, 64.00, 10.98, 0.57)¹⁾ と比べると, 引張強度と相関係数に差が生じていることが分かる。他の組合せでも, 同様の結果であった。

3.5.2 最外層の引張応力破壊を仮定した推定手法の有効性の検討

分布の組合せは 9 通りとなることから, 3.2 と同様に 9 通りの組合せ毎に k 及び SD_{LF} を求めた。一方, NLM で推定した組合せも Table 3 に示すとおり 9 通りとなることから, 組合せ毎に 3.2 と同様に SD_{CF} を求めた。従って, 9 通りとなる SD_{LF} との組合せは $9 \times 9 = 81$ 通りとなるが, ヤング係数分布が一致する 27 通りの組合せについて, SD_{CF} と SD_{LF} の比較を行った。そのうち, [N, N] の場合の SD_{CF} と,

Fig. 6. Comparison between SD_{CF} and SD_{LF} of f_v in the bending test in the vertical use direction for LVL.

Notes: SD_{CF} , SD_{LF} : See Table 1, e , f_v : See Table 2.

Table 2. Parameters of e and f_v assuming e is same in the horizontal and vertical use directions.

Distributions		Parameters					
e	f_v	e		f_v		R	
		P_1	P_2	P_1	P_2		
N	N	14.48 (kN/mm ²)	1.86 (kN/mm ²)	95.03 (kN/mm ²)	16.18 (kN/mm ²)	0.66	
N	LN	14.48 (kN/mm ²)	1.86 (kN/mm ²)	4.57	0.21	0.62	
N	2PW	14.48 (kN/mm ²)	1.86 (kN/mm ²)	98.43 (kN/mm ²)	7.97	0.68	
LN	N	2.66	0.12	95.02 (kN/mm ²)	16.59 (kN/mm ²)	0.66	
LN	LN	2.66	0.12	4.59	0.23	0.62	
LN	2PW	2.66	0.12	98.23 (kN/mm ²)	8.07	0.68	
2PW	N	15.16 (kN/mm ²)	9.97	94.92 (kN/mm ²)	16.33 (kN/mm ²)	0.63	

Notes: N, LN, 2PW: Normal distribution, lognormal distribution, and 2P-Weibull distribution, e : MOE of the element in the horizontal use direction, f_v : MOR of the element in the vertical use direction, R : Correlation coefficient between e and f_v , P_1 , P_2 : Average and standard deviation in N, LN and scale parameter and shape parameter in 2PW.

[N, N] の場合の SD_{LF} を Fig. 7 に示した。この場合の k の値は, 0.85~4.43 であった。Fig. 7 を見ると, SD_{CF} は SD_{LF} とほぼ重なり合っていることが分かる。従って, NLM は有効であると考えられる。また, k の値が 1 より小さい場合があるのは, 最外層で破壊すると特定してしまっているからではないかと考えられる。

4. 結 論

本報では, LVL の引張試験における引張強度, 圧縮強度及び縦使い方向の曲げ強度について, 積層効果を含む 1ply の強度分布と非線形最小二乗法によるエレメントの強度分布を LVL の破壊した層のみを対象に比較することにより, 非線形最小二乗法による推定手法の有効性について検討した。平使い方向の曲げについては, クライテリアを引張応力破壊と仮定して求めた引張強度に関して上記と同様に比較を行い, 非線形最小二乗法による推定手法の有効性について検討した。その結果, 何れの強度についても, 積層効果を含む 1ply の強度分布と非線形最小二乗法によるエレメントの強度分布は一致する分布の組合せがあり, 非線形最小二乗法による推定手法が有効であることが確認された。

以上より, 非線形最小二乗法により推定したエレメントの強度分布を用いることにより, 集成材と同様に LVL の強度分布推定を行うことが可能になると考えられる。例えば, LVL を製造する際に超音波による単板の選別を行う場合, 選別した単板の等級毎に LVL 試験体を作成し, その強度試験結果を用いて非線形最小二乗法により単板の等級毎の強度分布を推定する。更に, これらの単板の等級毎の強度分布を用いて, 集成材と同様に LVL の強度性能

の設計を行うことができる。また, 異なる樹種の単板を用いて断面を構成する場合も, それぞれの樹種毎のエレメントの強度分布を非線形最小二乗法により推定し, これらの強度分布を用いて上述と同様に LVL の強度性能の設計を行うこともできると考えられる。

文 献

- 1) 小関真琴, 中村 昇: 非線形最小二乗法を用いた単板積層材エレメントの強度分布推定. 木材学会誌 58, 125-136 (2012).
- 2) 小関真琴, 中村 昇: 単板積層材エレメントの強度分布推定手法に関する有効性の検討 (第 1 報) 単板積層材強度における積層効果. 木材学会誌 61(2), 55-66 (2015).
- 3) 中村 昇: 木材構造のここが分からない: 第

Fig. 7. Comparison between SD_{CF} and SD_{LF} of f_t in the bending test in the horizontal use direction for LVL.

Notes: SD_{CF} , SD_{LF} : See Table 1, f_t : See Fig. 4, e : See Table 2.

Table 3. Parameters of e and f_t assuming the rupture criterion is $\sigma_{t_n}/f_{t_n} = 1$.

Distributions		Parameters					
e	f_t	e		f_t		R	
		P_1	P_2	P_1	P_2		
N	N	14.48 (kN/mm ²)	1.86 (kN/mm ²)	60.11 (kN/mm ²)	10.12 (kN/mm ²)	0.70	
N	LN	14.48 (kN/mm ²)	1.86 (kN/mm ²)	4.07	0.16	0.70	
N	2PW	14.48 (kN/mm ²)	1.86 (kN/mm ²)	64.24 (kN/mm ²)	6.89	0.72	
LN	N	2.66	0.12	60.11 (kN/mm ²)	10.12 (kN/mm ²)	0.70	
LN	LN	2.66	0.12	4.07	0.16	0.71	
LN	2PW	2.66	0.12	64.14 (kN/mm ²)	7.07	0.70	
2PW	N	15.16 (kN/mm ²)	9.97	60.13 (kN/mm ²)	10.07 (kN/mm ²)	0.73	
2PW	LN	15.16 (kN/mm ²)	9.97	4.07	0.16	0.71	
2PW	2PW	15.16 (kN/mm ²)	9.97	64.25 (kN/mm ²)	6.92	0.73	

Notes: R : Correlation coefficient between e and f_t , σ_{t_n} , f_{t_n} : Tensile stress and strength of n -th layer, e , N, LN, 2PW, P_1 , P_2 : See Table 2.

9 回 MOEからMORをどうやって発生させる? - 有相関非正規乱数の発生法 -. *J. Timber Eng.* **19**(2), 53-58 (2006).

4) Falk, R. H., Cooling, F.: Laminating effects in glued-laminated timber beams. *J. Struct. Eng.* **121**(12), 1857-1863 (1995).