

氏名	小関 真琴
授与学位	博士 (生物資源科学)
学位授与年月日	平成27年3月20日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科専攻	秋田県立大学大学院生物資源科学研究科 博士後期課程 生物機能科学専攻
学位論文題目	非線形最小二乗法を用いた単板積層材エレメントの 強度分布推定手法の開発と有効性の検証
指導教員	教授 中村 昇
論文審査委員	主査 教授 中村 昇 副査 教授 林 知行 准教授 山内 秀文 特別 准教授 板垣 直行

## 論文内容要旨

### <研究の背景と目的>

構造用単板積層材(以降、LVL という)は、お互いの繊維方向が平行になるよう積層接着された木質材料で、日本で使われる LVL は建築用が最も多いが「単板積層材の日本農林規格」(以降、単板積層材 JAS という)に規定されるものしか使用は認められていない。また、単板積層材 JAS では、単板の縦継ぎの基準に従わない場合に曲げ性能の確認をシミュレーション計算で行うことが認められているが、この方法による JAS 認定を取得した工場はこれまで国内に存在しない。一方、「集成材の日本農林規格」(以降、集成材 JAS という)では、ラミナの構成の基準に従わない場合にシミュレーション計算を用いて強度等級の確認を行うことが認められており、複数の国内工場がシミュレーション計算による JAS 認定を取得している。このような相違が生じた理由としては、集成材の場合はエレメントとしてはラミナが考えられ、ラミナの強度を用いた集成材強度のシミュレーションが可能であるのに対し、LVL の場合はエレメントの特定が困難であることから、シミュレーションによる強度分布推定の研究が皆無であったことによると考えられる。集成材では上記のシミュレーションを用いて強度基準に対し適切な強度設計が可能であるのに対し、LVL ではこのような強度設計ができないことから、過剰品質による生産効率性の低さといった弊害も指摘されている。そこで、本研究は集成材と同様に LVL の強度設計を行うことを最終的な目的に、LVL のエレメントの強度分布の推定手法の開発と有効性の検討を行った。

### <LVL の強度実験>

まず、8ply~17ply と 1 層ずつ積層数を変化させた材料構成が単一の LVL 大板を製造し、縦使い方向(積層方向と垂直な荷重方向)の曲げ試験用、平使い方向(積層方向と平行な荷重方向)の曲げ試験用及び引張試験用の試験体を積層数毎に 14 体~42 体、24 体~26 体及び 13 体~24 体採取し作成した。更に、圧縮試験用の試験体は、曲げ試験及び引張試験の残体の破壊していない部分から、積層数毎に 39 片~76 体を採取し作成した。ただし、LVL 大板は、厚さが 3.45 mm、ダフリカカラマツ (*Larix gmelinii*) の単板を全層で使用し、単板はこれを用いた LVL が単板積層材 JAS に規定するヤング係数区分の 140E に該当するようグレーディングを施した。また、各単板の積層接着に使用した接着剤はフェノール系樹脂接着剤で、同一の横断面における単板の長さ方向の接着部の間隔は単板積層材 JAS

の特級に従った。LVL 試験体に対する縦使い方向及び平使い方向の曲げ試験は単板積層材 JAS に従い実施し、縦使い方向の曲げヤング係数(MOEv)と曲げ強度(MORv)及び平使い方向の曲げヤング係数(MOEH)と曲げ強度(MORh)をそれぞれ測定した。更に、LVL 試験体に対する引張試験及び圧縮試験を「構造用木材の強度試験法((財)日本住宅・木材技術センター(2000), pp.10-13, pp.35-40.)」に従い実施し、それぞれ引張強度(TS)及び圧縮強度(CS)を測定した。実験結果の例として、MOEH の積層数別の結果を(図 1)に、TS の積層数別の結果を(図 2)に示す。

#### ＜非線形最小二乗法による LVL エlement 強度分布の推定＞

Element のヤング係数及び強度に関する記号は、 $E$ :ヤング係数、 $F$ :強度、 $E_v$ :縦使い方向の曲げヤング係数、 $E_h$ :平使い方向の曲げヤング係数、 $F_v$ :縦使い方向の曲げ強度、 $F_h$ :平使い方向の曲げ強度、 $F_t$ :引張強度、 $F_c$ :圧縮強度、 $R_{***}$ : $*$ と $**$ の相関係数、 $*_{avg}$ : $*$ の平均値、 $*_{std}$ : $*$ の標準偏差、とする。更に、 $n$ :LVL の積層数、 $s$ :積層数  $n$  における  $s$  番目のデータ、 $l.n$ :積層数  $n$  における実験値のデータ数とする。LVL のElement を接着層付きの単板と仮定し、LVL の強度実験値を用いて非線形最小二乗法(以降、NLM という)により、Element のヤング係数及び強度の各分布を推定した。その内、 $E_v$  の推定方法を次に示す。まず、MOEv の実験値を  $MOEv.test_{n,s}$ 、これに対応する計算値を  $MOEv.calc_{n,s}$  と表す。ただし、 $MOEv.calc_{n,s}$  は、各Element の  $E_v$  の平均値から求められるものである。ここで、 $E_v$  の分布を正規分布と仮定すると、分布のパラメータは 2 次元ベクトル  $(E_{avg}, E_{std})$  で表される。そこで、NLM により  $(E_{avg}, E_{std})$  を推定するアルゴリズムは次のとおりとなる(他の分布を仮定する場合も同様)。①  $(E_{avg}, E_{std})$  の初期値として、適当な値  $(P_1, P_2)$  ( $0 < P_2 < P_1$ ) を与える。② 0 以上 1 未満の一樣乱数を発生させ、平均  $P_1$ 、標準偏差  $P_2$  の正規乱数を作る。この操作は  $n$  回繰り返す。③  $n$  個の正規乱数を推定式に代入して  $E.calc_{n,s}$  を計算し、使用した一樣乱数を⑥まで固定する。④ 積層数毎に ( $n$  を 8 から 17 まで変化させて)、②～③をそれぞれ  $l.n$  回繰り返す。⑤ 次式の残差二乗和  $Se$  が最小になるよう  $(P_1, P_2)$  を動かし、収束値を  $(E_{avg}, E_{std})$  とする。  $Se = \sum_{n=8}^{17} \sum_{s=1}^{l.n} (MOEv.test_{n,s} - MOEv.calc_{n,s})^2$  ⑥ 収束値が正規方程式の解として収束したか確認する。⑦ ②～⑥を 2000 回繰り返し、 $Se$  が最小となる  $(E_{avg}, E_{std})$  を推定値とする。なお、 $E_h$  を推定する場合は、以上の MOEv を MOEH と読み換え、MOEH の計算値  $MOEH.calc_{n,s}$  は、各Element の曲げ剛性の総和を LVL の断面二次モーメントで除した推定式から求められる。また、 $F_v$ 、 $F_t$  及び  $F_c$  の推定は、次のとおりとなる。MORv、TS 及び CS の実験値を  $ST.test_{n,s}$ 、これに対応する計算値を  $ST.calc_{n,s}$  と表す。ただし、 $ST.calc_{n,s}$  は、LVL の破壊は  $F/E$  が  $n$  層の中で最小となるElement の破壊時と仮定したクライテリアによる推定式を用いる。この場合、Element の強度分布は 5 次元ベクトル  $(E_{avg}, E_{std}, F_{avg}, F_{std}, R_{E-F})$  で表され、その内の  $(F_{avg}, F_{std}, R_{E-F})$  を推定するアルゴリズムは、 $(E_{avg}, E_{std})$  をプールした上で次のとおりとなる。①  $(F_{avg}, F_{std}, R_{E-F})$  の初期値として、適当な値  $(P_3, P_4, P_5)$  ( $0 < P_4 < P_3, 0 < P_5 < 1$ ) を与える。② お互いが独立な一樣乱数を 2 個発生させ、その内の 1 個を用いて平均  $E_{avg}$ 、標準偏差  $E_{std}$  の正規乱数を作り、これら 2 個の一樣乱数を用いて平均  $P_3$ 、標準偏差  $P_4$ 、相関係数  $P_5$  の有相関正規乱数を作る。この操作は  $n$  回繰り返す。③  $n$  組の正規乱数と有相関正規乱数を推定式に代入して  $ST.calc_{n,s}$  を計算し、使用した一樣乱数をまで固定する。④ 積層数毎に ( $n$  を 8 から 17 まで変化させて)、②～③を  $l.n$  回繰り返す。⑤ 次式の残差二乗和  $Sf$  が最小になるよう  $(P_3, P_4, P_5)$  を動かし、収束値を  $(F_{avg}, F_{std}, R_{E-F})$  とする。  $Sf = \sum_{n=8}^{17} \sum_{s=1}^{l.n} (ST.test_{n,s} - ST.calc_{n,s})^2$  ⑥ 収束値が正規方程式の解として収束したか確認する。⑦ ②～⑥を 2 万回繰り返し、 $Sf$  が最小となる  $(F_{avg}, F_{std}, R_{E-F})$  を推定値とする。平使い方向の曲げの場合、LVL の破壊クライテリ

アとして引張側最外層における(1)最外縁応力破壊、(2)最外層応力破壊、(3)複合一次形式による破壊の3条件が考えられる。この内、(1)及び(2)を仮定する場合、エレメントの強度分布は5次元ベクトル( $E_{h_{avg}}, E_{h_{std}}, F_{t_{avg}}, F_{t_{std}}, R_{Eh-Ft}$ )で表されるが、( $E_{h_{avg}}, E_{h_{std}}$ )はプールできるので、3次元ベクトル( $F_{t_{avg}}, F_{t_{std}}, R_{Eh-Ft}$ )の推定値を上記と同様のアルゴリズムで求める。また、(3)を仮定した場合、エレメントの強度分布は9次元ベクトル( $E_{h_{avg}}, E_{h_{std}}, F_{h_{avg}}, F_{h_{std}}, F_{t_{avg}}, F_{t_{std}}, R_{Eh-Fh}, R_{Eh-Ft}, R_{Fh-Ft}$ )で表されるが、( $E_{h_{avg}}, E_{h_{std}}$ )は  $E_h$  の推定値で、( $F_{t_{avg}}, F_{t_{std}}, R_{Eh-Ft}$ )は TS の実験値による推定値でプールすると、残りの( $F_{h_{avg}}, F_{h_{std}}, R_{Eh-Fh}, R_{Fh-Ft}$ )の推定値は、お互いが独立な一様乱数を3個発生させた上で、上述と同様のアルゴリズムで求められる。以上によるエレメントの各強度分布の推定値は、偏微分係数がそれぞれ0に極めて近い数値となったことから、正規方程式の解として収束していると思えることができた。更に、エレメントのヤング係数及び強度の推定値は、それを用いて LVL 強度のシミュレーションを行い、LVL 強度の実験値による危険率5%(両側検定)の K-S 検定により適合性を評価した。その結果、 $E_v$ 、 $E_h$ 、 $F_v$ 、LVL の引張試験による  $F_t$ 、 $F_c$ 、LVL の平使い方向の曲げ試験による  $F_t$ (MORh の破壊クライテリアとして(1)及び(2)を仮定)及び  $F_h$ (MORh の破壊クライテリアとして(3)を仮定)の何れも分布も、正規分布、対数正規分布、2Pワイブル分布の中から適合する単独もしくは複数の統計分布を推定することができた。エレメント強度分布の推定例として、(表1)に LVL の引張試験による  $F_t$  の推定値と K-S 検定による適合性の確認結果を示す。

#### <LVL から切り出した 1ply 及び 2ply と 3ply に対する強度実験>

前項のエレメントの強度分布の推定値は、何れも LVL の破壊クライテリアを仮定して求められたものであり、NLM の有効性については推定した強度分布と実際のエレメントの強度分布と比較を行うことにより検討しなければならない。そこで、LVL の強度試験片の残部からエレメントと仮定した接着層有の 1ply を切り出して試験体として同様の強度試験を行った。また、集成材では積層効果が認められていることから、LVL についても同様の積層効果が存在するか確認するために、接着層付きの 2ply と 3ply(以降、2・3ply と表す)も切り出して試験体とし同様の強度試験を行った。

#### <非線形最小二乗法の有効性の検討>

エレメントのヤング係数と強度の各分布を対象に、NLM による推定値と 1ply の実験値を比較したところ、 $E_h$  はほぼ一致したが、何れの強度分布も推定値が実験値を上回り積層効果の存在が示唆された(表2)。そこで、1ply の実験値の強度分布を用いてシミュレーションした 2・3ply の強度分布(A)と、最尤法により推定した 2・3ply の強度の母集団分布(B)とを比較したところ、何れの強度も B が A より大きいことが分った。例として、2・3ply の引張強度における比較を(図3)に示す。このことから、8ply~17ply の LVL の強度を用いた NLM による推定値は、 $F_h$  以外の何れの強度も積層効果が存在することが明らかになった。そこで、積層効果係数を乗じた 1ply の実験値の分布を求め、NLM による推定値の分布と比較することにより、NLM の有効性を検討した。検討例として LVL の引張試験による  $F_t$  を対象とした(図4)を示すが、NLM による推定値の分布と積層効果を含むエレメント強度分布はよく一致している。したがって、NLM は  $F_c$  の推定に有効であると考えられる。更に、 $F_v$ 、LVL の引張試験及び平使い方向の曲げ試験による  $F_t$  も同様に、NLM による推定値の分布と積層効果を含むエレメント強度分布はよく一致した。以上をまとめると、NLM は LVL エレメントの強度分布推定手法として有効であると考えられる。したがって、NLM により推定されたエレメントの強度分布を用いて LVL のシミュレーションを行うことにより、LVL も集成材と同様に強度設計を行なえることが分かり、現在4つのメーカーと製造

の最適化を図る共同研究を実施している。

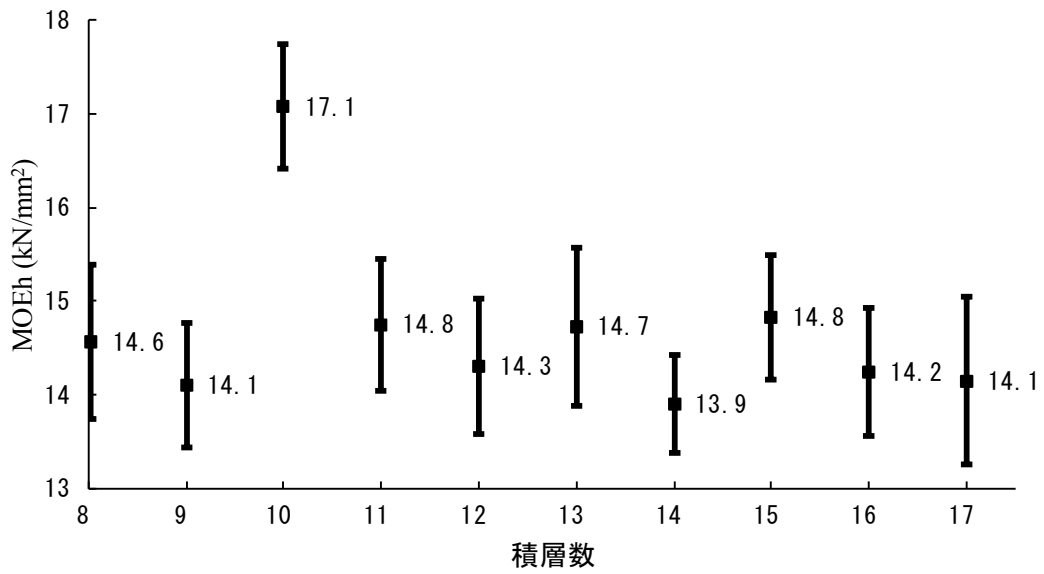


図1 MOEhと積層数との関係

注: MOEh : LVLの平使い方向の曲げヤング係数を表す。■ : 積層数毎のMOEhの平均値を表す。| : MOEhの平均値±標準偏差を表す。

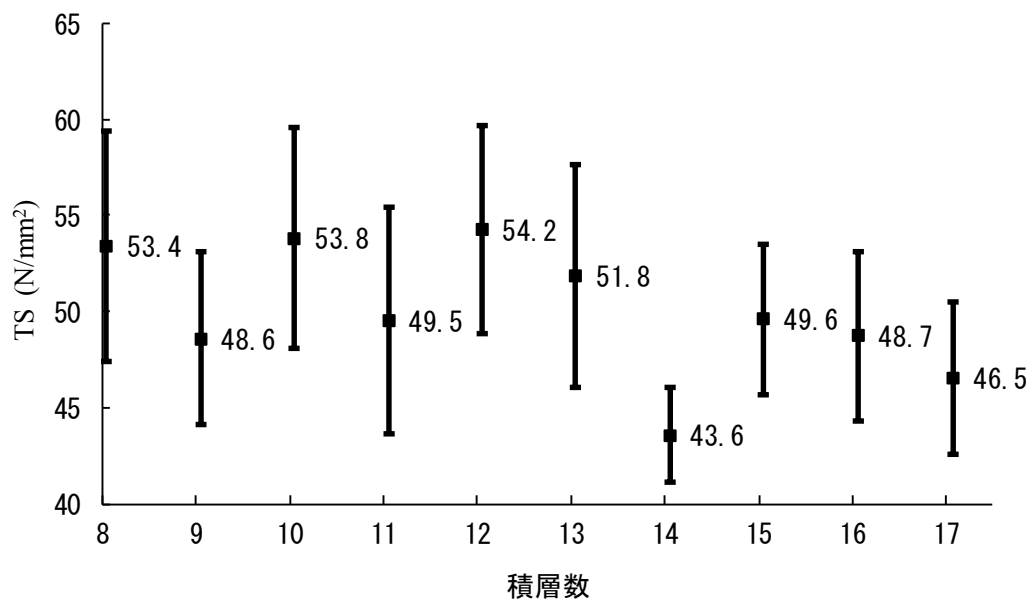


図2 TSと積層数との関係

注: TS : LVLの引張強度を表す。■ : 図1を参照。| : 図1を参照。

表1 Ft分布の推定値とK-S検定による適合性の確認結果

Eh分布形	Ft分布形	Ft分布の推定値					残差 二乗和	K-S検定	
		Pe <sub>1</sub>	Pe <sub>2</sub>	Pf <sub>1</sub>	Pf <sub>2</sub>	R <sub>Eh-Ft</sub>		dn	d(0.05, 177)
正規分布	正規分布	14.5	1.9	64.0	11.0	0.57	379.7	0.055	0.102
正規分布	対数正規分布	14.5	1.9	4.2	0.2	0.47	384.1	0.059	0.102
正規分布	2Pワイブル分布	14.5	1.9	66.9	7.8	0.59	431.8	0.071	0.102
対数正規分布	正規分布	2.7	0.1	64.6	10.9	0.51	397.3	0.058	0.102
対数正規分布	対数正規分布	2.7	0.1	4.2	0.2	0.48	372.3	0.047	0.102
対数正規分布	2Pワイブル分布	2.7	0.1	66.9	8.2	0.53	456.2	0.068	0.102
2Pワイブル分布	正規分布	15.2	10.0	64.0	10.7	0.55	377.5	0.053	0.102
2Pワイブル分布	対数正規分布	15.2	10.0	4.2	0.2	0.44	385.2	0.059	0.102
2Pワイブル分布	2Pワイブル分布	15.2	10.0	66.2	8.1	0.60	393.5	0.065	0.102

注: Eh: エレメントの平使い方向の曲げヤング係数を表す。Ft: エレメントの引張強さを表す。Pe<sub>1</sub>, Pe<sub>2</sub>: Eh分布のパラメータを表すが、Eh分布が正規分布または対数正規分布の場合、Pe<sub>1</sub>は平均値、Pe<sub>2</sub>は標準偏差を表し(Eh分布が正規分布の場合のみ、Pe<sub>1</sub>とPe<sub>2</sub>の単位はkN/mm<sup>2</sup>となる)、Eh分布が2Pワイブル分布の場合、Pe<sub>1</sub>は尺度パラメータ、Pe<sub>2</sub>は形状パラメータを表す(Pe<sub>1</sub>の単位はkN/mm<sup>2</sup>となる)。Pf<sub>1</sub>, Pf<sub>2</sub>: Ft分布のパラメータを表すが、Ft分布が正規分布または対数正規分布の場合、Pf<sub>1</sub>は平均値、Pf<sub>2</sub>は標準偏差を表し(Ft分布が正規分布の場合のみ、Pf<sub>1</sub>とPf<sub>2</sub>の単位はN/mm<sup>2</sup>となる)、Ft分布が2Pワイブル分布の場合、Pf<sub>1</sub>は尺度パラメータ、Pf<sub>2</sub>は形状パラメータを表す(Pf<sub>1</sub>の単位はN/mm<sup>2</sup>となる)。R<sub>Eh-Ft</sub>: EhとFtの相関係数を表す。dn: 表3.1を参照。d(0.05, 177): 両側危険率5%で試料数177の場合のK-S検定における基準限界値を表す。

表2 非線形最小二乗法によるエレメント強度分布の推定値と1plyの強度実験値との比較

LVLの強度試験	エレメントの強度	破壊クライテリア	NLMによる推定値		1plyの実験値	
			平均値	変動係数(%)	平均値	変動係数(%)
平使い方向の曲げ試験	Eh	複合応力一次形式	14.5 kN/mm <sup>2</sup>	12.9	14.4 kN/mm <sup>2</sup>	13.3
平使い方向の曲げ試験	Fh		105.4 N/mm <sup>2</sup>	30.0	96.8 N/mm <sup>2</sup>	34.2
縦使い方向の曲げ試験	Fv	最小値破壊	96.3 N/mm <sup>2</sup>	18.0	78.8 N/mm <sup>2</sup>	21.3
引張試験	Ft	最小値破壊	64.0 N/mm <sup>2</sup>	17.2	53.8 N/mm <sup>2</sup>	34.3
平使い方向の曲げ試験	Ft	最外縁応力破壊	65.7 N/mm <sup>2</sup>	17.0	47.3 N/mm <sup>2</sup>	24.5
平使い方向の曲げ試験	Ft	最外層応力破壊	60.1 N/mm <sup>2</sup>	16.8	47.3 N/mm <sup>2</sup>	24.5
圧縮試験	Fc	最小値破壊	73.9 N/mm <sup>2</sup>	11.5	60.2 N/mm <sup>2</sup>	13.0

注: NLM: 非線形最小二乗法を表す。Fh, Fv, Fc: エレメントの平使い方向の曲げ強度、縦使い方向の曲げ強度及び圧縮強度を表す。Eh, Ft: 表1を参照。

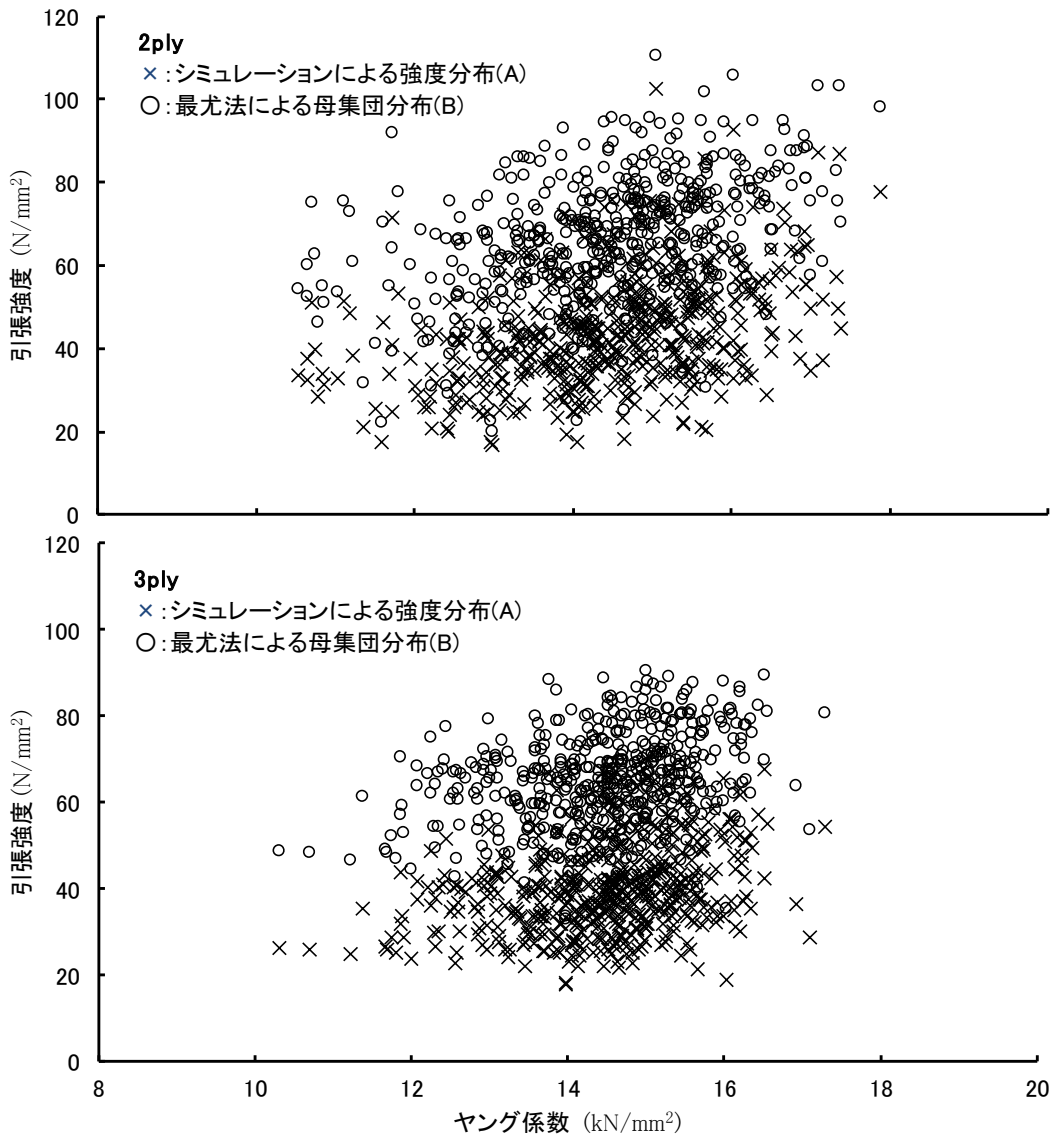


図3 2・3plyの引張強度におけるシミュレーション分布と実験値の母集団分布との比較

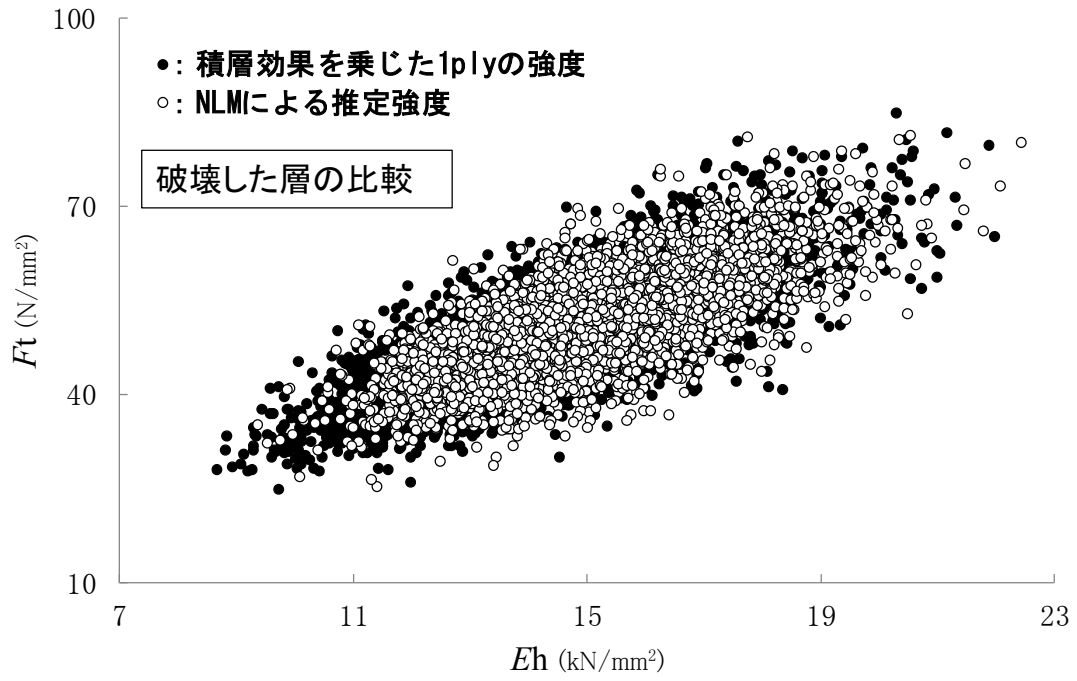


図4 LVLの引張試験による $F_t$ の比較

注:  $E_h, F_t$ : 表1を参照。NLM: 表2を参照。

## 論文審査結果要旨

本研究の最終的な目的は、構造用集成材(以後、集成材という)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(以後、LVL という)の強度を設計することであるが、LVL では、集成材で用いられているような手法を用いた強度分布推定の研究は皆無である。

そこで、LVL のエレメントを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 8ply~17ply の LVL の強度実験を行ない、その強度データより、非線形最小二乗法(以後、NLM という)による LVL エレメント強度分布の推定を行なった。その結果、適合する複数の統計分布を推定することができた。

しかし、推定値はあくまでも推定値であり、NLM の有効性については、推定した強度分布と実際のエレメントの強度分布を比較する必要がある。そこで、強度試験に用いた LVL から切り出した 1ply 及び 2ply と 3ply に対する強度実験を LVL の強度実験と同様に行った。その結果、NLM による推定値が 1ply の実験値を上回ったことから、積層の影響が存在することが分かった。

これより、1ply の実験値に積層効果係数を乗じた強度値を求め、NLM による推定値と比較することにより、非線形最小二乗法の有効性の検討を行なった。その結果、引張強度、圧縮強度分布及び縦使い方向の曲げ強度について、NLM による推定手法は有効と考えられることが明らかとなった。

博士学位論文公開審査会は、2015年2月18日に行なわれ、その後、審査員4名による判定を行なった。その結果、論文の内容は博士学位論文として十分であり、公開審査会における発表、その後の質疑応答についても十分に満足ゆく内容であるものと判断した。

以上により、審査員は申請者が博士の学位を授与される資格があるものと判断した。