

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

Development and Validation for the Estimation of the Element Strength Distribution
of Laminated Veneer Lumber by Nonlinear Least-squares Method

2015.3.20

小関 真琴

Makoto Koseki

目次

第一章 緒言	1
第二章 単板積層材の強度試験	10
2.1 はじめに	10
2.2 試験体	10
2.3 実験方法	12
2.4 実験結果と考察	12
2.4.1 縦使い方向の曲げヤング係数と曲げ強度	12
2.4.2 平使い方向の曲げヤング係数と曲げ強度	15
2.4.3 引張強度	18
2.4.4 圧縮強度	20
2.5 縦振動ヤング係数から平使い方向曲げヤング係数への誘導	21
2.6 まとめ	24
第三章 非線形最小二乗法による単板積層材エレメント強度分布の推定	26
3.1 はじめに	26
3.2 エレメントの縦使い方向の曲げヤング係数分布の推定	26
3.2.1 LVL のヤング係数の推定式	26
3.2.2 アルゴリズム	27
3.2.3 結果	30
3.3 エレメントの平使い方向の曲げヤング係数分布の推定	32
3.3.1 LVL のヤング係数の推定式	32
3.3.2 アルゴリズム	32
3.3.3 結果	33
3.4 エレメントの縦使い方向の曲げ強度、引張強度及び圧縮強度分布の推定	34
3.4.1 クライテリア	34
3.4.2 アルゴリズム	35
3.4.3 結果	37
3.5 LVL の平使い方向の曲げ試験におけるエレメントの強度分布の推定	46
3.5.1 引張応力破壊	46
3.5.1.1 クライテリア	46
3.5.1.2 アルゴリズム	47
3.5.1.3 結果	49
3.5.2 複合応力破壊	56
3.5.2.1 クライテリア	56
3.5.2.2 アルゴリズム	56
3.5.2.3 結果	59
3.6 まとめ	64

第四章 単板積層材から切り出したエレメントと 2・3ply に対する強度実験	66
4.1 はじめに	66
4.2 試験体	66
4.3 実験方法	68
4.4 実験結果と考察	70
4.4.1 断面欠損のある試験体の扱い	70
4.4.2 縦使い方向の曲げヤング係数と曲げ強度	71
4.4.3 平使い方向の曲げヤング係数と曲げ強度	72
4.4.4 引張強度	73
4.4.5 圧縮強度	74
4.5 エレメントの実験結果と NML による推定値との比較	75
4.6 まとめ	76
第五章 2・3ply における積層効果の確認	77
5.1 はじめに	77
5.2 記号の定義	77
5.3 エレメントの強度分布を用いた 2・3ply 強度分布のシミュレーション	79
5.4 シミュレーションされた 2・3ply のヤング係数分布を用いた 2・3ply 強度分布(母集団分布)の推定	82
5.4.1 最尤法による推定	82
5.4.2 推定した強度分布のパラメータ	85
5.5 シミュレーションされた強度分布と母集団強度分布の比較	86
5.6 まとめ	95
第六章 NLM の有効性の検討	96
6.1 はじめに	96
6.2 記号及び用語の定義	97
6.3 単板積層材における積層効果の定義と定量	100
6.4 NLM の有効性の検討手法	106
6.5 NLM の有効性	107
6.5.1 平使い方向の曲げヤング係数を用いた縦使い方向の曲げ強度	107
6.5.2 平使い方向の曲げ強度	110
6.5.3 引張強度	116
6.5.4 圧縮強度	118
6.6 まとめ	120
第七章 総括	122
参考文献	124
謝辞	127

第一章 緒言

単板積層材(以降、LVL という)はロータリーレースまたはスライサー他により切削した単板を用いて、お互いの繊維方向がほぼ平行になるよう積層接着した木質材料である。ただし、単板積層材の日本農林規格¹⁾では、直交単板の割合を限定して使用する場合についても、LVLとして定義している。LVLの用途としては、建築用、産業用、日用品と多種多様²⁾であり、建築用としては木造住宅、倉庫、体育館及び畜舎の耐力部材、住宅の造作材や仮設の足場板等に、産業用としてはトラックの荷台、パレット、船室等に、日用品としては家具、ラケット類、ピアノ、まな板等の台所用用品に用いられている。

日本で使われるLVLは建築用が最も多く、日本農林規格に規定されるものしか使用は認められていないので、ここでLVLの日本農林規格を概説する。造作用に対する「単板積層材の日本農林規格」³⁾は1978年に制定され、構造用に対する「構造用単板積層材の日本農林規格」(以降、旧単板積層材JASという)⁴⁾は10年後の1988年に制定された。この2つの規格は2008年のJAS規格の見直し時に一本化され⁵⁾、2013年に再度改正されて現行の「単板積層材の日本農林規格」(以降、単板積層材JASという)¹⁾に至っている。単板積層材JASにおける構造用LVLの規格は、単板に関する基準(単板の品質、含水率、積層数、たて継ぎ、幅はぎ及び構成)と、LVLの性能に関する基準(接着の程度、含水率、曲げ性能)から構成されている。構造設計において重要となるLVLの曲げ性能の基準については、曲げヤング係数区分毎にLVLの曲げヤング係数(MOE)と曲げ強度(MOR)の基準値が定められている。2001年の建築基準法の基準⁶⁾は、単板積層材JASの曲げヤング係数区分毎に曲げの許容応力度を定めている。ただし、後述する「集成材の日本農林規格」⁷⁾(以降、集成材JASという)とは異なり、単板積層材JASでは単板の基準が曲げ性能の品質に直結している訳でないではない。単板の基準に適合したとしても、LVLの曲げ性能の適合性については、ロット毎に実際に曲げ試験を行い確認する必要がある。また、単板のたて継ぎの基準に従わない場合、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、現在この方法によるJAS認定を取得している工場は1社もない。

一方、集成材JASの構造用に関する規定では、ラミナの等級が機械区分あるいは目視区分で定められており、集成材の強度性能はラミナの構成に応じた強度等級の基準値が定められている。従って、ラミナの強度試験の結果がその等級の基準値に適合した場合、そのラミナから構成される製品は実大試験を行わなくとも、強度性能の基準を満たしたと判断することができる。また、ラミナの構成の基準に従わない場合、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いるが、現在この方法によりJAS認定を取得している工場が国内で8工場ある。その中の7工場が計算ソフトSiViG⁸⁾を使用しており、残りの1工場が北米のWeyerhaeuser Company Limitedが開発したPBDM(Probabilistic Beam design Method)⁹⁾を使用している。この2つの手法のうち、SiViGはエレメントとなるラミナの強度を用いて集成材の強度を確率的に推定することから、断面のラミナの構成を変更しながら推定を繰り返すことにより、強度性能の設計を行えることが最大のメリットとなる。

以上より、LVLでも同様の手法を用いることができれば、強度性能における過剰品質(詳

細については後述する)の解消にも役立つとみられる。従って、LVL についても集成材と同様の手法により、強度推定を行うことが必要と考えられるが、過去に LVL の強度推定を行った実績があるのは Weyerhaeuser Company Limited のみで、1990 年代に LVL のシミュレーション計算による JAS 認定を取得していた。しかし、Weyerhaeuser Company Limited も 10 年以上前にその認定を返上したことから、適用した手法の概略すら分からなくなっているが現状である。PBDM を使用していたとも聞いているが、その技術的な内容は一般に公開されていない。これより、LVL で集成材と同様の強度推定が行なわれないのは、推定手法自体が皆無であるからということが考えられる。ただし、これまでの研究成果が単に採用されてこなかった可能性もあることから、LVL の強度性能に関する既存研究を調べてみた。

まず、海外の研究を見ていくと、1966 年に Koch¹⁰⁾は断面の最外部分にヤング係数と比重の高い単板を配することにより、高耐力の LVL が製造できることを示した。1972 年に Schaffer ら¹¹⁾は単板の構成を変えることによって、低品質単板を用いた LVL であっても強度性能が製材と同等以上のものが作れることを示した。また、1972 年の Moody¹²⁾は単板のたて継ぎを Scarf Joint (SJ) とし、Press-Lam (単板の乾燥余熱を用いて LVL の積層接着を行う製造方法)¹³⁾を組み合わせることにより、LVL の引張強度の性能が向上することを示した。1972 年の Nelson¹⁴⁾は当時の Trus-Joist Corporation が開発した Micro-Lam (商品名)¹⁵⁾の製造方法及び強度性能を報告し、1978 年の Kunesh¹⁶⁾も同様の報告を行っている。単板の接合の性能に関する研究としては、1984 年の Youngquist ら¹⁷⁾が SJ、水平式または垂直式の Finger Joint でたて継ぎした 3 種類の単板の引張試験をそれぞれ行い、SJ の単板が最も強いことを示した。

以上のとおり、LVL の強度性能に関する海外の研究は 1960 年代後半から 1980 年代前半に集中しているが、その理由はこの時期に構造用の LVL の新たな製造方法が盛んに研究開発されたことによる。従って、構造用の LVL 自体が新しい材料であり、研究の傾向も LVL 強度と製造条件との関係を調べるのが主体となった。

一方、日本における LVL の研究が始まったのは、Press-Lam が日本に紹介された 1972 年以降と言われている²⁾。1973 年に有馬ら¹⁸⁾は引張側最外層とその内側 1 層のバットジョイント (BJ) の配置を変えた 4 種類のラワン LVL (6ply) を製造して強度試験を行い、強度性能に与える裏割れとたて継ぎの位置の影響を調べた。その結果のうち、MOR については隣接する 2 層のたて継ぎの位置を離すほど MOR への影響が少なくなることが確認された。

1974 年に大熊¹⁹⁾は BJ のない単板または BJ でたて継ぎした単板を用いて製造した 4ply、6ply 及び 9ply の LVL の実験結果を踏まえ、MOR と積層数、または MOR と隣接する層のたて継ぎの間隔との関係について次のとおり述べた。まず、BJ のない LVL の MOR について、裏割れへの接着剤への浸透による補強効果があることを指摘した。次に、隣接する層の BJ の間隔の影響は、縦使い方向 (積層方向と垂直な荷重方向) よりも平使い方向 (積層方向と平行な荷重方向) の方が大きいことを示した。最後に、隣接する層の BJ の間隔の影響と MOR の関係は、積層数が増すと同様の傾向になることを示した。

1984 年に森泉ら²⁰⁾は未成熟材を含む人工林カラマツの小径木を用いて林産試型システ

ム^{21,22)}によるLVLを製造し、強度性能とこれに影響を与える因子との関係について調べた。まず、LVLの平均厚さとMOR、または平均厚さとMOEの関係が反比例し、かつ相関が高いことを示した。1987年に森泉²³⁾は含む林産試型システム国産カラマツLVLの強度性能に関して、文献20)を含む一連の研究をひとつにまとめて報告した。LVLのMORとMOEに関する記述は20)とほぼ同一であるが、幾つかの見解を追加している。そのなかで、LVLの平均厚さからMORを推定することは可能であると判断されると述べている。また、MORについては大熊¹⁹⁾と同様に、積層数が増す毎に値が増加し、接着層の影響があることを指摘している。

1984年に李ら²⁴⁾は2plyのラワンLVLの曲げ性能及び破壊形状との比較により、5plyの国産カラマツLVLの曲げ性能が単板内における春材と夏材の材質の違いによる影響を受けることを指摘した。また、国産針葉樹4種の間伐材を用いて1層おきにBJを配置したLVLの曲げ試験を行い、それぞれ素材の強度性能と比較したところ、LVLのMORは素材より低減するが変動係数は小さくなることを示した。

以上が、1988年に旧単板積層材JASが制定される前の日本におけるLVLの強度性能に関する研究である。傾向としてはLVLの強度性能に対するたて継ぎの影響を重視しており、接合方法としてはBJを前提しているものがほとんどである。旧単板積層材JASが制定されて以降の研究については、次の通りである。

1989年に大熊²⁵⁾はBJ、SJ、Lap Joint(RJ)及びBeveled Joint(BEJ)の4種類のたて継ぎを施した単板を用いて、それぞれ引張側にこれらの単板を配置した4種類のLVLを作成し、たて継ぎのないタイプのLVLとともに曲げ強度試験を行った。たて継ぎのないタイプの強度に対する接合効率により、それぞれの接合の性能を比較したところ、SJが最も効率が良く、次にBEJで、RJとBJが同様に低い効率となった。従って、SJの接合の良さが再確認される結果となった。1993年に林ら²⁶⁾は樹種とたて継ぎの種類(BJ、SJ及びRJ)がそれぞれ異なる16種類の構造用LVLの実大試験を行い、LVLの強度分布に及ぼす因子について検討した。そのなかで、比重、MOR及びMOEの分布はばらつきが製材品よりも少なく、構造用材料としての適性が非常に高いことを示した。また、単板の品質がLVLの強度性能に大きく影響を及ぼすとし、単板の品等区分や品質管理の必要性を説いた。

1994年に岡崎ら²⁷⁾はBJを持つ3plyのLVLの破壊について、「破壊因子が複数あり、各因子に依存する破壊がお互いに独立に生じる」という直列系の事象の確率モデルである競合リスクモデルで表し、モデルによる予測値と実測値との比較を行い、モデルの適合性について検討した。まず、破壊のモデルは接着部の破壊と単板の破壊という2つの統計上の因子に大別し、接着部の破壊については接着部の重なり長さ L をパラメータとする試験体強度の分布関数で表し、単板の破壊は単板の引張強さの分布関数で表した。更に、それぞれの分布関数は実際の引張試験から求めたが、接着部の破壊の分布関数については L を変えた接着層の破壊実験の結果から求めた。以上の分布関数による予測値は、実際の引張試験との比較を行った。その結果、予測値の分布は実験結果の分布とよく一致しており、競合リスクモデルによる強度予測が有効であることを示した。その他としては、1996年に林²⁸⁾が構造用LVLの強度性能について、確率的な推定の必要性を総説で述べた。しかし、1990年

代後半以降、単板とLVLの強度性能に関する研究は、あまり見られなくなった。

以上が、1988年以降の日本におけるLVLの強度性能に関する研究である。傾向としてはBJ以外の接合に関するものと、強度予測に関するものの研究が見られ始め、岡崎らが3plyのLVLの破壊について確率的な予測を試みた研究が注目される。しかし、この研究がその後の実用化に向けて発展されることはなかった。従って、LVLについてはエレメントが明確に定義されておらず、また、エレメントの強度を用いてLVLの強度を推定する研究は皆無であることが分かった。次に、これに関連すると考えられるLVLの強度性能における過剰品質について述べる。

まず、ここで言う「品質の過剰」とは、強度性能の基準の要求より実際に製造された製品の方が性能の良い状態のことを意味する。例として単板積層材JASの性能区分を用いて表すと、「120Eの1級」あるいは「110Eの特級」の表示のあるロットの強度性能が、実際には「140Eの特級」が当てはまることを意味する。単板積層材JASの強度に係る基準には上限が設定されていないので、このような状態は制度上問題がないという扱いとなる。しかし、上述の例で示すと、本来であれば「140Eの特級」に見合う断面寸法で足りるところを、「120Eの1級」または「110Eの特級」に見合う断面寸法まで大きくしなければならなくなり、余分なコストをユーザーに強いることとなる。このような強度性能の品質過剰の傾向は旧単板積層材JASが制定された頃から指摘され²⁹⁾、今日に至るまでこの問題が解消されるに至っていない。その理由は、SiViGように強度性能の設計が行える推定手法がLVLでは開発されなかったことである。そこで、本研究ではLVLのエレメントを接着層付きの単板と仮定することにより、エレメントの強度を推定する手法の開発と手法の適合性の検証を行うこととした。更に、推定したエレメントの強度を用いて、集成材と同様にLVLの強度推定と強度性能の設計が可能となれば、よりの確で多様な強度品質のLVLをユーザーに提供できることが期待される。

これまで、集成材においては強度推定を行った研究が多く報告されている。これらの研究を歴史的に振り返ってみることは、LVLの強度推定にとっても有益と考えられる。

まず、1980年にFoschiら³⁰⁾により開発されたA Modelは、集成材の曲げ強度の分布を推定する推計的手法のはしりである。更に、コンピューターの使用を前提として手法を構築したことから、その後のコンピューターモデルの原型にもなった。A Modelの特徴としては、次のことが挙げられる。

- ① ラミナの長さ方向のヤング係数と引張強度のばらつきを表すために、ラミナを長さ6inch(152 mm)のセルに分割し、各セルにヤング係数と引張強度を与えた。ただし、セル同士は独立とした。
- ② ①のラミナを用いた集成材の応力解析に、有限要素法(FEM)を用いた。
- ③ セルの破壊はセル内の応力とそのセルの引張強度に達した時とし、集成材の破壊はセルの破壊が最初に発生した時と仮定した。
- ④ 積層によるセルの引張強度の補強効果を考慮した。このことを積層効果と呼んでいる。

A Modelの適合性については、8種類のタイプのベイマツ集成材を用いて、それぞれのタイプ毎に推定した強度分布と実大試験の強度分布を比較することにより検討した。比較

した結果、8種類中7種類の結果が良好であったことから、提案したモデルは集成材の強度予測を十分行えると結論付けた。なお、本手法ではラミナのたて継ぎの影響については考慮していない。

A Model は集成材の内部応力の解析に FEM を用いたが、これを基礎として同様の推定手法が多く提案された。1985 年に Ehlbeck³¹⁻³³⁾ によって開発された Karlsruhe calculation model もその内の一つである。Karlsruhe calculation model は集成材の最大曲げ耐力を推定するために開発されたものであり、2 つのコンピュータープログラムから構成された。最初のプログラムは、ラミナをセクション(長さ 15cm)に分割し、各セクションに比重を割り当て、節あるいは FJ の有無はランダムとした。各セクションのヤング係数と引張強度については、回帰式を用いて発生させた。2 番目のプログラムは FEM により集成材の最大曲げ耐力を推定するプログラムであり、セクションの破壊による応力の再配分と、材の圧縮における応力-歪みの非線形関係を考慮した。モデルの適合性の検証は、集成材の曲げ試験を用いて行い、その結果、推定と実験の最大荷重は満足いく一致を見た。

ここで、コンピューターモデルでの適用を前提に、ラミナのモデルを検討した研究を示す。まず、1989 年に Burk ら³⁴⁾ はたて継ぎの両側のヤング係数を説明変数とする回帰式によりたて継ぎ部のヤング係数を表し、更にたて継ぎ部のヤング係数を説明変数とする回帰式によりたて継ぎ部の引張強度を表すモデルを開発した。また、同年に Taylor ら³⁵⁾ は多変量の有相関正規変数をそれぞれ逆関数法により変換することにより、相関のあるヤング係数と引張強度の分布を作る手法を開発した。更に、翌年に Taylor ら³⁶⁾ はヤング係数と引張強度の相関、セグメント間のヤング係数と引張強度の相関を表すために、一次のマルコフ過程を用いたモデルを提唱した。

これらの研究は何れもラミナの長さ方向の強度のばらつきを考慮し、統計的手法を用いてラミナの局所的なヤング係数と引張強度を与える方法を提案している。ただし、A Model のような無欠点材を対象としたモデルではなく、日常の品質管理データが使用できるように、実際のラミナの強度試験データを元とした統計モデルを提案していることに特徴がある。

1992 年に Hernandez ら³⁷⁾ によって開発された PROLAM もコンピューターモデルの一種であるが、次に示す点で A Model とは異なる。

- ① ラミナは長さ 24inch(61cm)のセグメント毎に分割するが、セグメント毎のヤング係数と引張強度は Taylor³⁶⁾に従い作った。
- ② 集成材の強度に影響を与える因子としてたて継ぎ部の特性に重点を置いており、たて継ぎ部のヤング係数と引張強度は Burk ら³⁴⁾に従い作った。
- ③ 集成材の応力解析は FEM ではなく、等価断面法により行った。
- ④ 改良した 2 番目のモデルでは、セグメントの破壊の進展を考慮した破壊クライテリアを仮定した。
- ⑤ 集成材の MOE は、せん断の影響を考慮した仮想仕事法による計算式を用いて求めた。

PROLAM の適合性の検証は、16 層のベイマツ集成材 30 体の実大破壊試験結果とシミュレーションの推定値を比較することにより行った。その結果、MOE については推定値と実

験値はあまり一致せず、モデルの適合性は確認できなかった。その理由については、せん断の影響が考えられた。また、MOR については推定値と実験値の両方の累積分布曲線を同じ図に表し視覚的に比較したところ、両者はよく一致した。以上より、PROLAM の適合性については、ほぼ確認されたと結論付けた。

また、集成材の強度推定そのものではないが、集成材の強度性能に関して重要と思われるひとつの研究を示す。1995年にFalk³⁸⁾らは集成材のMORには積層の影響があると考え、その効果を適量的に表すために、積層効果係数として、MORを引張側最外層の積層された状態の引張強度で除した値で定義した。更に、ヨーロッパと北米の集成材を対象にラミナと実大の強度試験を行い分析したところ、積層効果係数がヨーロッパの集成材については0.95~2.51、北米の集成材については1.06~1.59の範囲にあることを示した。

以上で示した海外の研究は、1970年代半ばから1990年代半ばに行われたものである。シミュレーションモデルの傾向としては、ラミナをセルやセグメントに分割し、FEMを用いて応力解析をおこなうものが多かった。

日本において集成材の強度推定の研究が行なわれるようになったのは1980年代後半になってからであり、その先鞭をつけたのが林である。林は集成加工材料の製造及び品質管理においてモンテカルロシミュレーションを応用し、製品の信頼性を向上させるための一連の基礎研究を行った。海外の研究とは異なり、ラミナのヤング係数と引張強度については長さ方向のばらつきは考慮せず、一つの値で代表させた。

まず、1989年の文献39)で林は集成材やLVLといった集成加工材料のMOEを積層数や縦使い方向と平使い方向の別にモンテカルロシミュレーションを用いて推定し、積層効果、MOEに及ぼすエレメントのばらつき、トランケーション(分布のすそ野の部分を切り取ること)の程度、縦使い方向と平使い方向の違いの影響を定量的に検討した。ここで、積層数の増加に伴うMOE分布の5%下限値の上昇を、積層効果とよんだ。

次に、1990年の文献40)では4樹種のラミナをそれぞれ4種類の等級に分け、樹種毎に7種類の断面設計による5ply集成材を製造し実大試験を行った。同時に、これら5ply集成材のMORの推定を行った。ただし、集成材の破壊クライテリアは、引張側2層のラミナの何れかの曲げ応力度が、そのラミナの曲げ強度に達した時と仮定した。従って、MORは、1)等価断面法により引張側2層の外縁部の応力をそれぞれ求め、2)それぞれの層の曲げ応力の値を求めて比較し、3)曲げ応力の値の小さい方の層で破壊が生じるとし、4)破壊した層の外縁部の応力が曲げ強度に達した時のモーメントを求め、5)モーメントを断面係数で除するという手順で求めた。確率モデルの適合性については、樹種別及び断面構成別に推定値と実験値をヒストグラムで比較し確認した。

1991年の文献41)では、等級区分ラミナを用いた5ply集成材を対象に、集成材の引張強度(TS)を推定する確率モデルについて検討を行った。ここで、仮想ラミナの発生方法は、Taylorら³⁵⁾を参考にした方法を用いた。仮想集成材の破壊クライテリアについては、次の3種類をそれぞれ仮定し、実験値との比較により適合性の検討を行った。①各層は引張応力がその層の引張強度に達した時点で破壊し、層に最初の破壊が生じた時点で集成材が破壊する。②各層は引張応力がその層の引張強度に達した時点で破壊するが、残存した層に

よる断面で応力の再配分を繰り返し、断面が外力に耐えられなくなった時点で集成材が破壊する。③各層は引張応力がその層の引張強度に達した時点で破壊するが延性状態にあり、全ての層が延性状態となった時点で集成材が破壊する。以上のクライテリア別に推定値と実験値を比較したところ、②のクライテリアの場合が最も適合性を示した。

次に、1994年の平嶋ら⁴²⁾は集成材強度を計算するための力学的強度モデルと、材料強度の変動を考慮した統計的確率モデルを開発し、これらを用いて集成材の強度を推定することを試みた。強度モデルにおける集成材の破壊クライテリアは、次に示す二次形式による複合応力式とした。

$$\left(\frac{\sigma b_i}{F b_i}\right)^2 + \left(\frac{\sigma t_i}{F t_i}\right)^2 = 1 \dots\dots\dots (1.1)$$

ただし、 σb_i : i 層目ラミナの曲げ応力、 σt_i : i 層目ラミナの引張応力、 $F b_i$: i 層目ラミナの曲げ強度、 $F t_i$: i 層目ラミナの引張強度となる。

ラミナの引張試験はFJの有るものと無いものを混ぜて実施したが、引張強度と節径比との関係は相関が低いことから、FJと節は同等であると判断した。ヤング係数と引張強度の関係については、集成材のタイプ別及び積層別に回帰直線に当てはめて求めた。更に、節とFJを合わせた欠点間隔を測定し、その分布を対数正規分布に当てはめた。以上の実験データの解析から、確率モデルを構築して集成材の強度分布を推定し、これと実大試験結果の分布を比較することにより、強度モデル及び確率モデルの適合性を検証した。推定値は実験値に対し良く適合し、ほぼ満足いく結果となった。これらの比較結果から、用いたモデルの有効性は明らかとなり、ラミナの強度データから集成材の強度分布が求められるようになったと結んだ。

1996年の三橋ら⁴³⁾の研究で特徴的なのは、積層による補強効果によるラミナの引張強度の増大と、圧縮側断面の塑性化を考慮したスギ集成材の強度推定モデルを提案したことである。補強効果については、次のように考えた。

ラミナを1個の欠点を含む要素が直列に連なるシステムと考え、このシステムを破壊発生の確率過程理論に適用することにより、積層による補強効果を確率論的に評価した。ラミナが m 個の要素からなるシステムとし、積層により欠点を補強する効果を m の減少として考えると、引張側最外層の引張強度は積層の補強効果により、単体での強度の1.21倍になると評価された。

以上の積層による補強効果と圧縮側の塑性を考慮した推定モデルについて、補強効果のみを考慮した計算と両方を考慮した計算を行い、それぞれ実大実験値と比較した。その結果、両方を考慮した計算値が実験値とよく適合した。従って、積層による補強効果と圧縮側の塑性の両方を考慮した推定モデルの適合性が高いと考えられた。

一方、1997年の小松⁴⁴⁾は平嶋らと異なり、次に示す一次形式による破壊クライテリアを仮定した。

$$\frac{\sigma b_i}{F b_i} + \frac{\sigma t_i}{F t_i} = 1 \dots\dots\dots (1.2)$$

この(1.2)式を仮定した理由としては、二次形式の場合は積層数2でエレメントの強度より

集成材の強度の方が強くなる特異な性状を示すことを挙げている。推定式の適合性については、4タイプの実大実験の結果を用いて検証した。この4タイプ全体で21体の試験体について、実験結果と推定値の最大曲げモーメントを比較したところ、全体として良く一致していた。従って、誘導した推定式は実用上十分な適合性が確認されたと結論付けた。

その他に、次のような研究もある。2001年の森ら⁴⁵⁾は、既存の推定モデルは断面や応力状態が異なればモデルの変更が必要になると考え、集成材の破壊現象を忠実に再現し、様々な寸法、応力状態または樹種の違いに対応可能な汎用的な推定モデルの開発を試みた。2005年にLeeら⁴⁶⁾は節の情報(径比と長さ方向における位置)を用いてラミナをモデル化し、これを積層させた仮想集成材のMORに等価断面法を適用して計算する手法を試みた。また、2010年に土方ら⁴⁷⁾は、集成材を欠点の存在によって長さ方向に強度が変化する部材と考え、欠点のサイズと関連した集成材断面の耐力の推定を試みた。

以上のように、集成材については1980年代から2010年代まで様々な手法があるが、どれもラミナをエレメントと考えており、ラミナの強度を用いて集成材の強度を推定している。これに対し、LVLについては同様の研究がほぼ皆無だったが、その理由としては先述したとおりエレメントの特定が困難だったことが挙げられる。本研究では、LVLのエレメントを接着層付きの単板とし、LVLの強度を推定することを目的とした。

第二章では、エレメントを接着層付きの単板の強度を推定するために、単板積層材の強度実験と実験結果の解析を行った。実験は材料特性が単一のLVLの8ply~17plyを対象に、平使い方向と縦使い方向の曲げ試験、引張試験及び圧縮試験を行った。曲げ試験では縦振動と静的なMOE及びMORを、引張試験ではTSを、圧縮試験では圧縮強さ(CS)をそれぞれ測定し、何れの試験も測定後の試験体については破壊形態を調べた。これらの実験結果については、MOEと強度毎に、積層数毎の平均値とばらつきの傾向を考察し、破壊形態の傾向についても考察した。また、引張試験と圧縮試験については縦振動ヤング係数のみの測定だったので、平使い方向の曲げ試験におけるMOEと縦振動ヤング係数の関係を用いて、縦振動ヤング係数から引張ヤング係数と圧縮ヤング係数への換算を試験体毎に行った。

第三章では、**第二章**の実験結果を用いて、非線形最小二乗法による推定手法を適用してエレメントの曲げヤング係数及び各強度の分布を推定した。更に、収束解として算出されたエレメントの強度分布のパラメータを用いてシミュレーションを行い、K-S検定を用いて適合性を評価し、正規分布、対数正規分布、2Pワイブル分布のなかから適合する分布を検討した。

第四章では、**第二章**の実験に用いたLVLの残部から接着層付きの1plyをエレメントとして切り出して試験体とし、**第二章**と同様の強度試験を行った。また、集成材で認められている積層効果^{38,43)}がLVLでも存在するかを確認することを目的に、1plyと同様に**第二章**の実験に用いたLVLの残部から接着層付きの2plyと3plyも切り出して試験体とし、**第二章**と同様の強度試験を行った。更に、1plyの実験結果の分布については、**第三章**で推定した強度分布と比較した。

第五章では、**第四章**の1ply~3plyの実験結果について、1plyの実験値の分布を用いたシミュレーションによる2plyと3plyの強度分布と、最尤法により推定した2plyと3ply

の実験値の母集団分布を比較することにより、LVL の各強度における積層効果の有無について検討を行った。

第六章では、**第五章**の結果を踏まえ、1ply のヤング係数と強度の実験値の分布を基に積層効果を含むエレメント強度分布を求めた。更に、この分布と**第三章**で非線形最小二乗法より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推定手法の有効性について検討を行った。

最後に、**第七章**は総括とした。

第二章 単板積層材の強度試験

2.1 はじめに

第一章で示したように集成材と同様に LVL の強度設計を行うためには、LVL のエレメントのヤング係数と強度の分布を用いる必要がある。一般的に考えると、LVL のエレメントは単板と推定されるが、単板は厚さが数ミリと薄く裏割れ等も多数発生する。従って、裏割れ等に侵入した接着層の強度が単板の強度等に与える影響を考慮^{19, 23)}すると、LVL のエレメントは接着層を含む単板と仮定するしかないと考える。

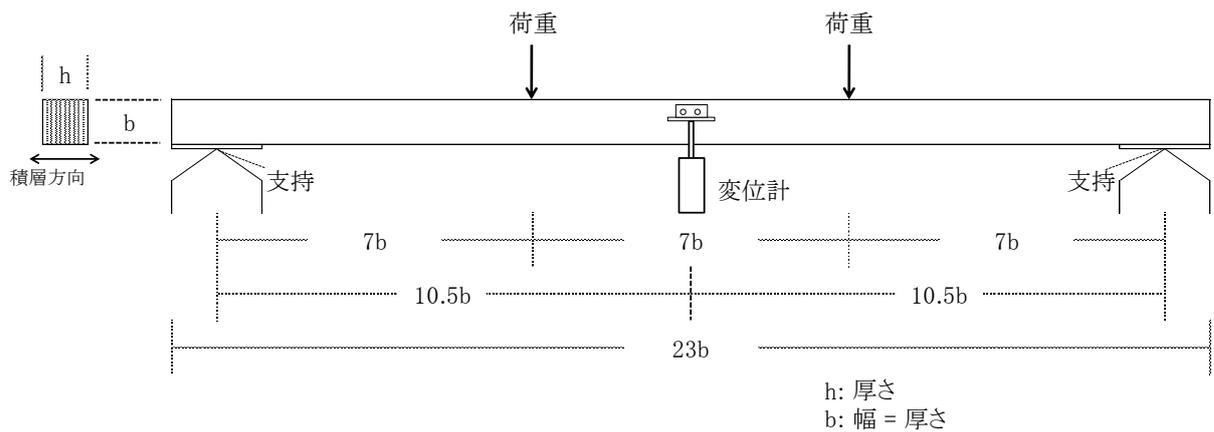
しかし、集成材のエレメントと考えられるラミナとは異なり、接着層を含む単板のヤング係数と強度の分布を得るのは容易ではない。強度試験を行なうにしても、正確に接着層付きの単板だけを LVL から切り出して試料とする必要が生じる。更に、強度分布のシミュレーションの信頼性を確保するには、ある程度多くの試験体数を用意しておく必要が生じる。それに伴う危険度及び労力を考慮に入れると、エレメントを切り出して強度試験を行う方法は、実用的とは言えない。そこで、エレメントのヤング係数と強度の分布を間接的に推定する手法が必要になると考え、本研究では材料構成が単一の LVL の強度試験データから、非線形最小二乗法を用いてエレメントのヤング係数と強度の分布を推定することを試みた。推定の対象としたのは、エレメントの縦使い方向の曲げヤング係数(E_v)と曲げ強度(F_v)、平使い方向の曲げヤング係数(E_h)と曲げ強度(F_h)、引張ヤング係数(E_t)と引張強度(F_t)及び圧縮ヤング係数(E_c)と圧縮強度(F_c)の分布である。したがって、これらの分布を求めるために、LVL 試験体に対し縦使い方向と平使い方向の曲げ試験、引張試験及び圧縮試験を行い、縦使い方向の曲げヤング係数(MOE $_v$)と曲げ強度(MOR $_v$)、平使い方向の曲げヤング係数(MOE $_h$)と曲げ強度(MOR $_h$)、引張強度(TS)及び圧縮強度(CS)の各実験値を収集した。

本章は以上の強度試験について述べるが、2.2 では LVL 試験体の作成方法、2.3 では LVL 試験体に対する試験方法、2.4 では各強度試験の結果と考察、2.5 では縦振動ヤング係数から静的ヤング係数への変換について示した。なお、2.6 は本章のまとめとなる。

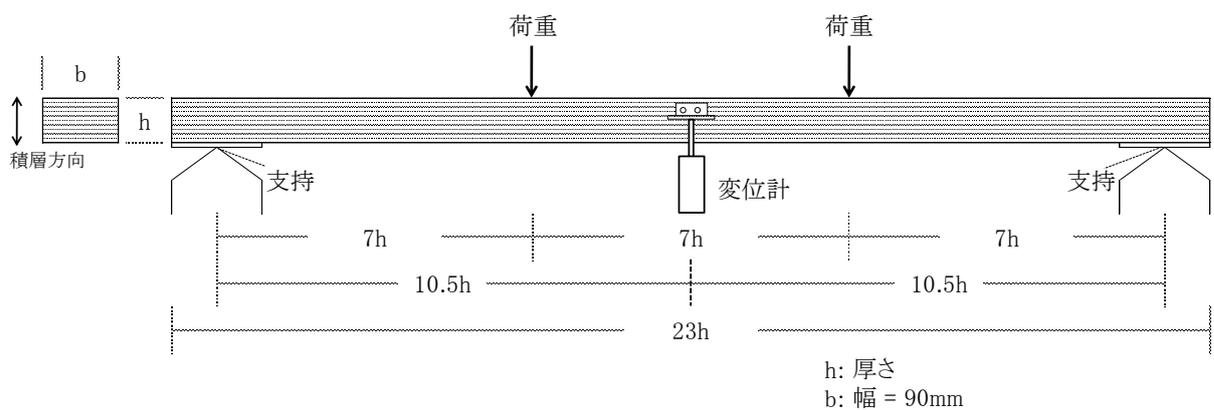
2.2 試験体

各強度試験用の LVL 試験体を作成するために、8ply~17ply まで 1 層ずつ積層数を変化させた LVL 大板(1,230mm×12,000mm)を(株)キーテックから購入した。この大板については、厚さが 3.45mm で樹種がダフリカカラマツ(*Larix gmelinii*)の単板で全層が構成され、各単板の積層接着にはフェノール系樹脂接着剤が使用された。各単板のグレーディングについては、これを用いた最終製品が単板積層材 JAS に規定するヤング係数区分の 140E に該当するよう超音波による選別が施された。また、同一断面上のたて継ぎ同士の間隔は、14 層(たて継ぎがある層から数えて次のたて継ぎが現れるまでの間隔)になるよう製造され、このたて継ぎ間隔の設定は単板積層材 JAS に定める特級に該当した。また、たて継ぎにはスカーフジョイント(SJ)を用いており、傾斜角は約 1/8.5 であった。

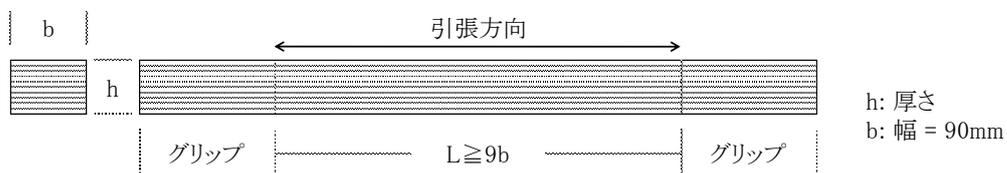
LVL 試験体は、縦使い方向の曲げ試験用の場合は積層数毎に 14 体~42 体、平使い方向の曲げ試験用の場合は積層数毎に 24 体~26 体を上述の LVL 大板から採取し、それぞれ単



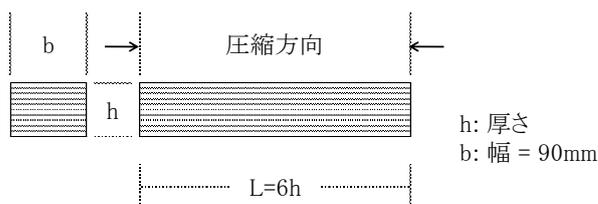
(a) 縦使い方向の曲げ試験



(b) 平使い方向の曲げ試験



(c) 引張試験



(d) 圧縮試験

図2.1. 試験体寸法と静的試験方法

板積層材 JAS に従い作成した。また、引張試験用の場合は 13 体～24 体を LVL 大板から採取し、それぞれ単板積層材 JAS に従い作成した。引張試験用の LVL 試験体は、積層数毎に 13 体～24 体を LVL 大板から採取し、構造用木材の強度試験法⁴⁸⁾に従い作成した。圧縮試験用の LVL 試験体は、平使い方向の曲げ試験及び引張試験の終了後、これらの試験に供した LVL 試験体の破壊していない部分から積層数毎に 35 体～76 体を採取し、構造用木材の強度試験法⁴⁸⁾に従い作成した。試験体の寸法は、縦使い方向の曲げ試験用の場合は図 2.1 の (a) に、平使い方向の曲げ試験用の場合は図 2.1 の (b) に、引張試験用の場合は図 2.1 の

(c)に、圧縮試験用の場合は図 2.1 の(d)にそれぞれ示した。

2.3 実験方法

縦使い方向の曲げ試験は、各試験体とも縦振動ヤング係数を測定した後、単板積層材 JAS に従い図 2.1 (a)の静的曲げ試験を行い、MOE_v と MOR_v を求め破壊形態を調べた。また、平使い方向の曲げ試験も、各試験体とも縦振動ヤング係数を測定した後、単板積層材 JAS に従い図 2.1 (b)の静的曲げ試験を行い、MOE_h と MOR_h を求め試験体の破壊形態を調べた。一方、引張試験は、各試験体とも縦振動ヤング係数を測定した後、構造用木材の強度試験法に従い図 2.1 (c)の強度試験を行い、TS を求め破壊形態を調べた。また、圧縮試験についても、各試験体とも縦振動ヤング係数を測定した後、構造用木材の強度試験法に従い図 2.1 (d)の強度試験を行い、CS を求めて試験体の破壊形態を調べた。

以上で示した全ての実験は、秋田県立大学高度加工研究所の実験棟で実施したが、試験場所の温湿度は測定しなかった。また、何れの試験体も、標準状態(温度 20℃、湿度 65%)による調湿は行わなかった。また、縦使い方向及び平使い方向の曲げ試験にはミネビア(株) AL 型引張圧縮試験機、引張試験には飯田工業(株) NET-401、圧縮試験には(株)東京衡機製造所 RUED-TK18A をそれぞれ用いた。

2.4 実験結果と考察

2.4.1 縦使い方向の曲げヤング係数と曲げ強度

実験結果は積層数毎に MOE_v と MOR_v の平均値と変動係数を算出し、MOE_v と MOR_v の相関係数 $R_{\text{MOE}_v\text{-MOR}_v}$ (以降、*と**の相関係数を $R_{*-\text{**}}$ と表す)も同様に算出し表 2.1 に示した。MOE_v と積層数との関係は図 2.2 に、MOR_v と積層数との関係は図 2.3 に、 $R_{\text{MOE}_v\text{-MOR}_v}$ と積層数との関係は図 2.4 に、破壊形態別の MOR_v のヒストグラムは図 2.5 にそれぞれ示した。

表2.1 縦使い方向の曲げ試験結果

積層数	試験体の厚さ	試験体数	MOE _v		MOR _v		$R_{\text{MOE}_v\text{-MOR}_v}$
			Ave. (kN/mm ²)	C.V. (%)	Ave. (N/mm ²)	C.V. (%)	
8	25mm	40	14.2	7.5	78.9	11.3	0.66
9	28mm	42	14.2	9.7	82.2	12.2	0.89
10	30mm	31	15.4	5.3	83.4	7.9	0.52
11	35mm	14	14.8	6.9	74.6	10.3	0.48
12	38mm	28	14.5	5.3	74.3	7.2	0.29
13	40mm	30	14.0	4.2	76.3	8.0	0.63
14	45mm	26	14.0	4.1	71.2	9.5	0.38
15	47mm	20	14.7	3.8	70.8	10.7	0.17
16	51mm	29	13.7	3.5	72.6	5.6	0.58
17	55mm	39	14.2	4.8	68.3	10.8	0.41

注：MOE_v:LVLの縦使い方向の曲げヤング係数を意味する。MOR_v:LVLの縦使い方向の曲げ強度を意味する。 $R_{\text{MOE}_v\text{-MOR}_v}$:LVLの縦使い方向の曲げヤング係数と曲げ強度の相関係数を意味する。Ave.:平均値を意味する。C.V.:変動係数を意味する。

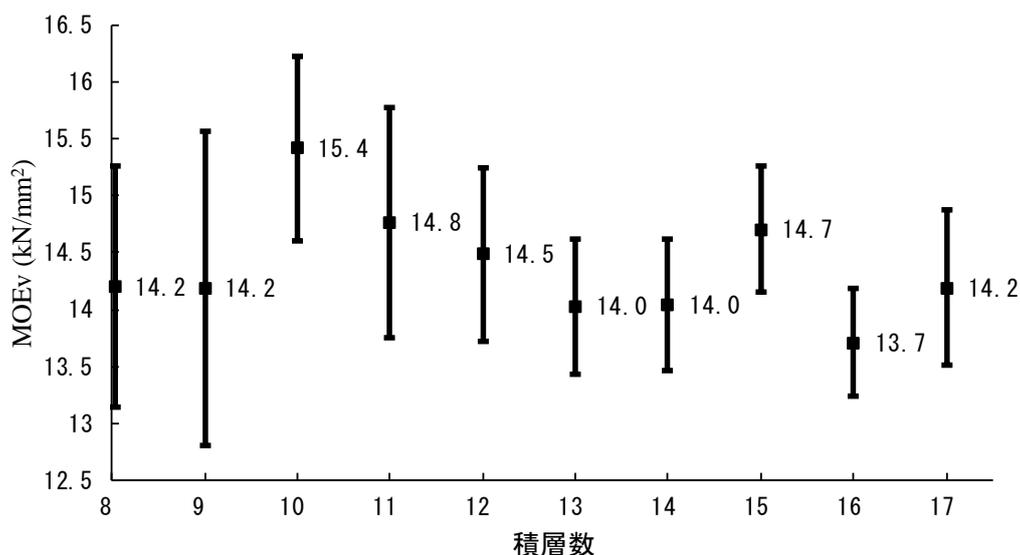


図2.2 MOEvと積層数との関係

注: MOEv: 表2.1を参照。■: 積層数毎のMOEvの平均値を表す。|: MOEvの平均値±標準偏差を示す。

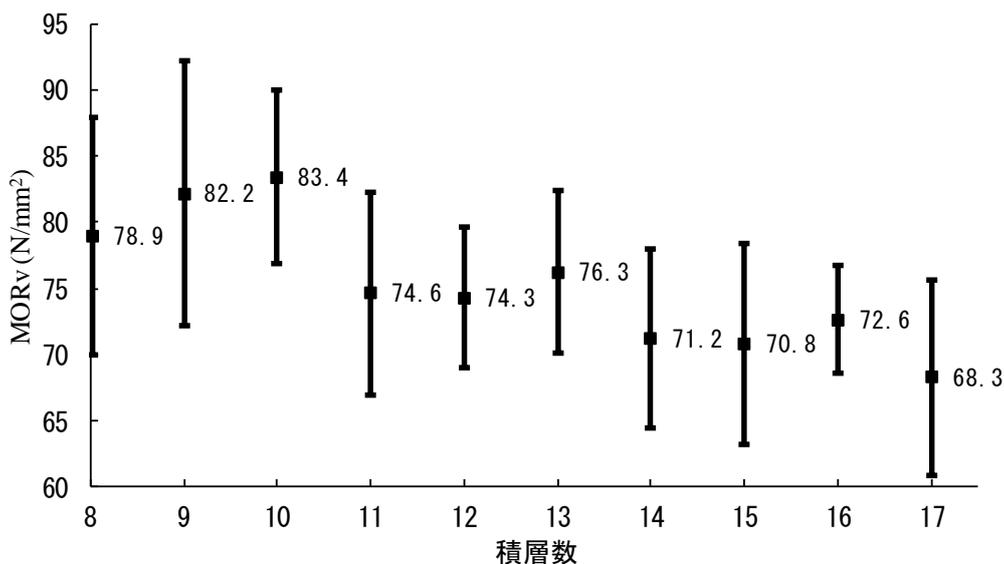


図2.3 MORvと積層数との関係

注: MORv: 表2.1を参照。■: 図2.2を参照。|: 図2.2を参照。

まず、図2.2を見ると、10plyを除きMOEvの積層別の平均値は13.7kN/mm²~14.8kN/mm²の範囲に入っており、10plyの平均値は15.4kN/mm²とやや高い値を示した。ただし、全体を見ると、MOEvの平均値と積層数との関係は明確な傾向はない。また、MOEvの平均値±標準偏差の範囲は9plyが最も広く次に8plyが広がったが、10ply~17plyは8ply及び9plyより狭くなったことから、全体として積層数の増加に伴い減少する傾向を示した。

図2.3を見ると、MORvの平均値が最も高いのが10plyの83.4N/mm²となり、2番目に9plyの82.2N/mm²、3番目が8plyの78.9N/mm²と、積層数の少ない3層が概ね80N/mm²

近辺となった。一方、積層数が 10ply より多くなると、13ply が 76.3N/mm^2 と若干高い値を示すが、その他の積層数は何れも 75N/mm^2 未満となり、17ply が 68.3N/mm^2 と最も低い値を示した。以上より、 MOR_v の平均値は、積層数の増加に伴い減少する傾向を示した。 MOR_v の平均値±標準偏差の範囲と積層数の関係は、明確な傾向が見られなかった。また、図 2.4 を見ると、 $R_{MOEv-MORv}$ と積層数との関係にも、明確な傾向が見られなかった。

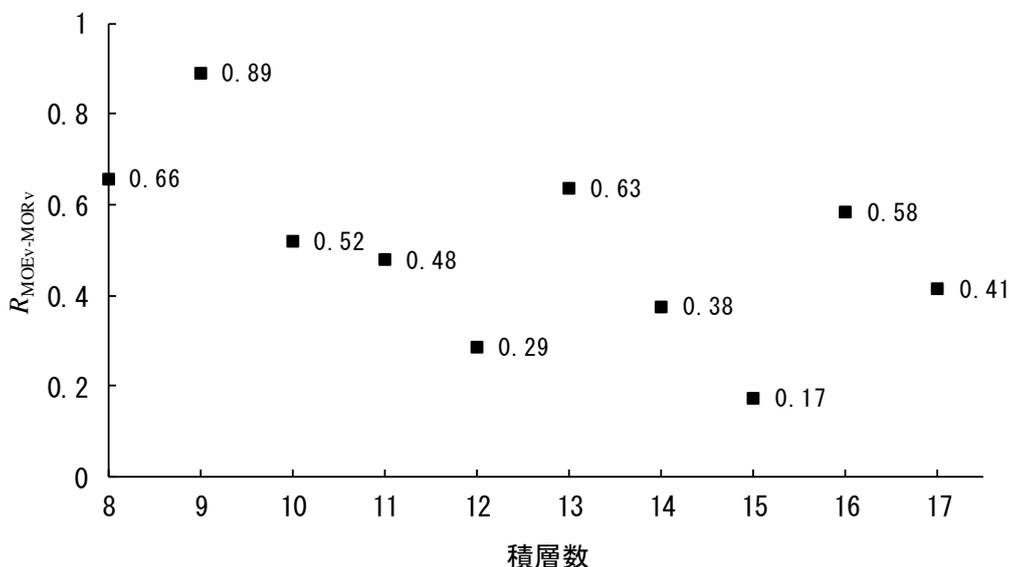


図2.4 $R_{MOEv-MORv}$ と積層数との関係

注: $R_{MOEv-MORv}$: 表2.1を参照。

図 2.5 を見ると、破壊形態として最も多く出現したのは繊維傾斜による破壊(SG)であり、これにより破壊された試験体は117体となった。次に試験体数が多かったのは曲げ破壊(B)で90体となり、3番目に多かったのは節と繊維傾斜による複合破壊(K+SG)で42体となった。この3つ主要な破壊形態の試験体数について、それぞれ試験体全体(298体)に占める割合を計算すると、SGは全体の39.3%を占め、Bは全体の30.2%、K+SGは全体の14.1%となった。これらの試験体数の合計が全体に占める割合を見ると83.6%となり、ほぼ大多数を占めた。その他の破壊形態については、節の破壊(K)が18体で全体の6.0%となり、曲げと繊維傾斜による複合破壊(B+SG)が17体で全体の5.7%、曲げと節による複合破壊(B+K)が9体で全体の3.0%、曲げと節と繊維傾斜による複合破壊(B+K+SG)が3体で全体の1.0%、曲げとたて継ぎによる複合破壊(B+J)が2体で全体の0.3%となった。このように、SGのみまたはSGが絡む破壊が多かったのは、使用した単板がロータリーレースで切削されており、繊維傾斜が大きかったことによるものと考えられる。

また、主要な破壊形態別の MOR_v の出現範囲を見ると、SGは範囲が約 45N/mm^2 ~ 約 105N/mm^2 となり、 MOR_v の範囲全体のほぼ全域に渡り出現した。Bは1体だけ 40N/mm^2 に近いが、その他は約 60N/mm^2 ~ 約 95N/mm^2 の範囲、K+SGは約 55N/mm^2 ~ 約 100N/mm^2 の範囲で出現した。

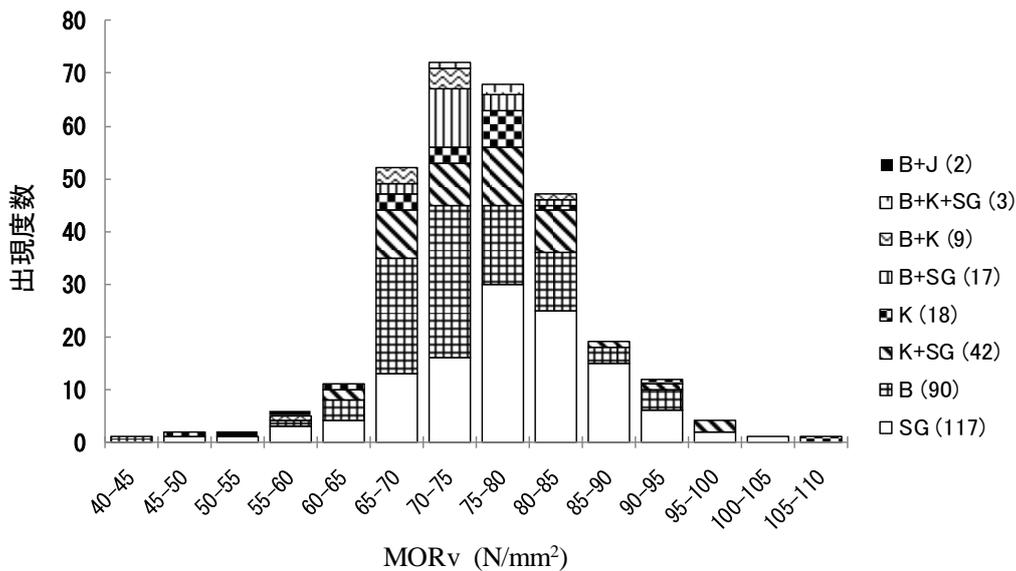


図2.5 MOR_vと破壊形態との関係

注：MOR_v:表2.1を参照。括弧内に示す数:括弧の左の記号または記号の合成による破壊形態のデータ数の合計を意味する。SG, B, K, J:繊維傾斜による破壊、曲げ破壊、節による破壊、接合部の破壊をそれぞれ意味する。

2.4.2 平使い方向の曲げヤング係数と曲げ強度

実験結果は積層数毎に MOE_h と MOR_h の平均値と変動係数を積層数毎に算出し、 $R_{MOEh-MORh}$ も同様に算出し表 2.2 に示した。MOE_h と積層数との関係は図 2.6 に、MOR_h と積層数との関係は図 2.7 に、 $R_{MOEh-MORh}$ と積層数との関係は図 2.8 に、破壊形態別の MOR_h のヒストグラムは図 2.9 にそれぞれ示した。

表2.2 平使い方向の曲げ試験結果

積層数	試験体の厚さ	試験体数	MOE _h		MOR _h		$R_{MOEh-MORh}$
			Ave. (kN/mm ²)	C.V. (%)	Ave. (N/mm ²)	C.V. (%)	
8	25mm	26	14.6	5.7	73.3	16.3	0.36
9	28mm	25	14.1	4.7	63.3	12.7	0.17
10	30mm	24	17.1	3.9	78.2	10.0	-0.33
11	35mm	26	14.8	4.8	68.1	10.0	0.01
12	38mm	25	14.3	5.1	67.2	13.8	0.54
13	40mm	25	14.7	5.8	69.2	9.6	0.63
14	45mm	26	13.9	3.8	58.9	10.6	0.28
15	47mm	25	14.8	4.5	60.7	11.6	0.01
16	51mm	24	14.2	4.8	68.4	10.0	0.53
17	55mm	24	14.1	6.3	60.3	9.2	0.20

注：MOE_h:LVLの平使い方向の曲げヤング係数を意味する。MOR_h:LVLの平使い方向の曲げ強度を意味する。 $R_{MOEh-MORh}$:LVLの平使い方向の曲げヤング係数と曲げ強度の相関係数を意味する。Ave.:表2.1を参照。C.V.:表2.1を参照。

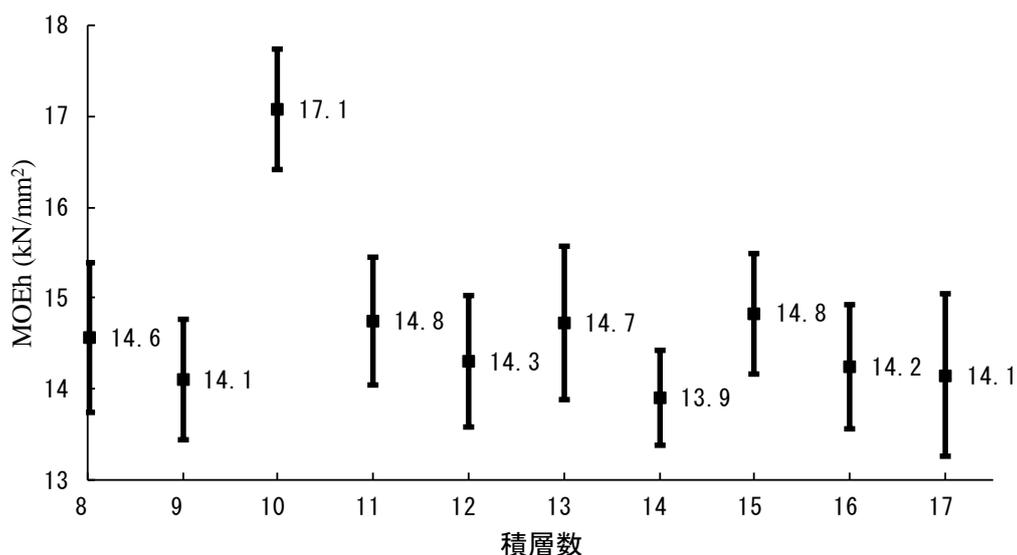


図2.6 MOEhと積層数との関係

注: MOEh: 表2.2を参照。■: 図2.2を参照。|: 図2.2を参照。

まず、図2.6を見ると、10plyを除きMOEhの積層別の平均値は13.9kN/mm²~14.8kN/mm²の範囲に入っていた。一方、10plyについては理由が不明であるが、平均値が17.1kN/mm²と1層だけ特異的に大きな値を示した。この10plyを除いて全体を見ると、MOEhの平均値と積層数の関係は、MOEvの場合と同様に明確な傾向は見えなかった。また、MOEhの平均値±標準偏差の範囲と積層数との関係は、13plyと17plyが若干大きく、反対に14plyが若干小さいが、全体として各層同程度で明確な傾向は見えなかった。

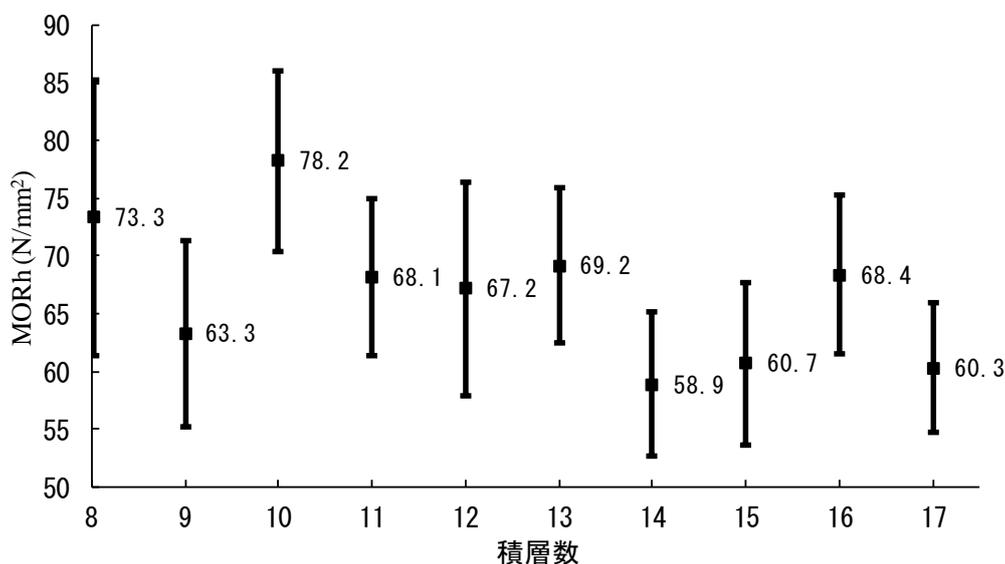


図2.7 MORhと積層数との関係

注: MORh: 表2.2を参照。■: 図2.2を参照。|: 図2.2を参照。

図2.7を見ると、まずMORhの平均値は8plyから9plyにかけて73.3N/mm²から63.3N/mm²と減少するが、10plyは78.2N/mm²と最も高い値を示し、それに続く11ply~13plyも

70.0N/mm²弱と全体の中で高い値を示した。しかし、14plyは58.9N/mm²と最も値が低く、15plyも同様に60.7N/mm²と値が低いが、16plyは68.4N/mm²と11ply~13plyと同様の高い値を示し、17plyは60.3N/mm²と再び低い値を示した。このように、積層数の増加に伴いMORhの平均値は増減を繰り返したが、全体を見ると平均値が70.0N/mm²を超えたの

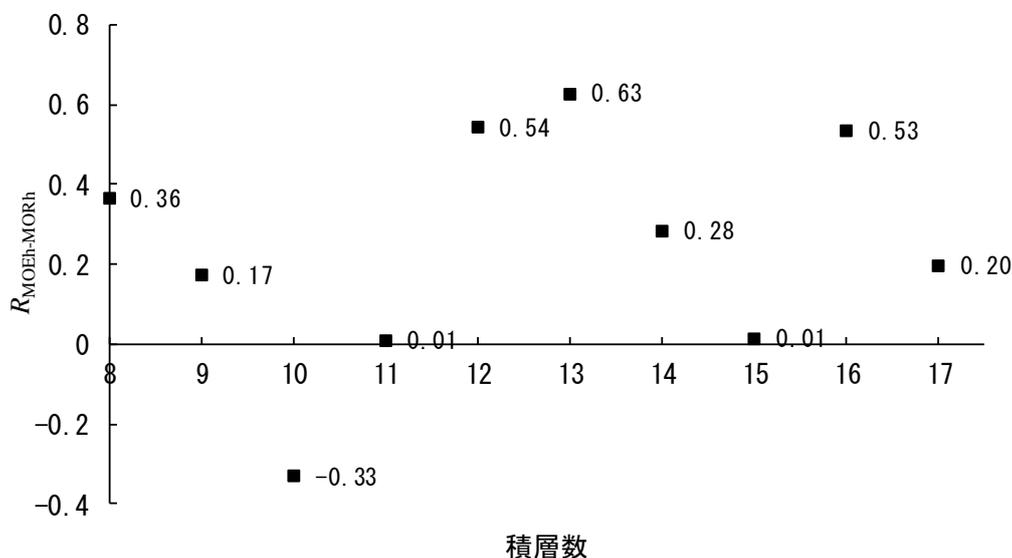


図2.8 $R_{MOEh-MORh}$ と積層数との関係

注: $R_{MOEh-MORh}$:表2.2を参照。

は8plyと10plyのみで、積層数の多い14ply~17plyでは平均値が60.0N/mm²の前後の場合が多かった。明確ではないが、MORhの平均値は積層数の増加に伴い減少する傾向にあった。ただし、MORhの平均値±標準偏差の範囲と積層数との関係は、明確な傾向は見えなかった。また、図2.8を見ると、 $R_{MOEh-MORh}$ と積層数との関係にも、明確な関係が見えなかった。

図2.9を見ると、破壊形態として最も多く出現したのは曲げとたて継ぎによる複合破壊(B+J)であり、この破壊による試験体は151体に及んだ。次に試験体数が多かったのは曲げと節による複合破壊(B+K)の30体で、3番目に多かったのはせん断破壊(S)の20体、4番目に曲げ破壊(B)の19体が続いた。この4つの破壊形態の試験体数について、それぞれ試験体全体(250体)に占める割合を計算すると、B+Jは全体の60.4%と全体の過半数以上を占め、B+Kは全体12.0%、Sは全体の8.0%、Bは全体の7.6%となった。したがって、これらの試験体数の合計が全体に占める割合を見ると、87.4%と大多数を占めた。その他の破壊形態については、曲げと繊維傾斜による複合破壊(B+SG)が10体で全体の4.0%となり、曲げと繊維傾斜とたて継ぎによる複合破壊(B+SG+J)が5体で全体の2.0%、曲げとせん断の複合破壊(B+S)が4体で全体の1.6%、曲げと節とたて継ぎによる複合破壊(B+K+J)が3体で全体の1.2%となった。更に、繊維傾斜による破壊(SG)と、曲げとせん断と繊維傾斜による複合破壊(B+S+SG)が、それぞれ2体ずつと全体の0.8%となった。ま

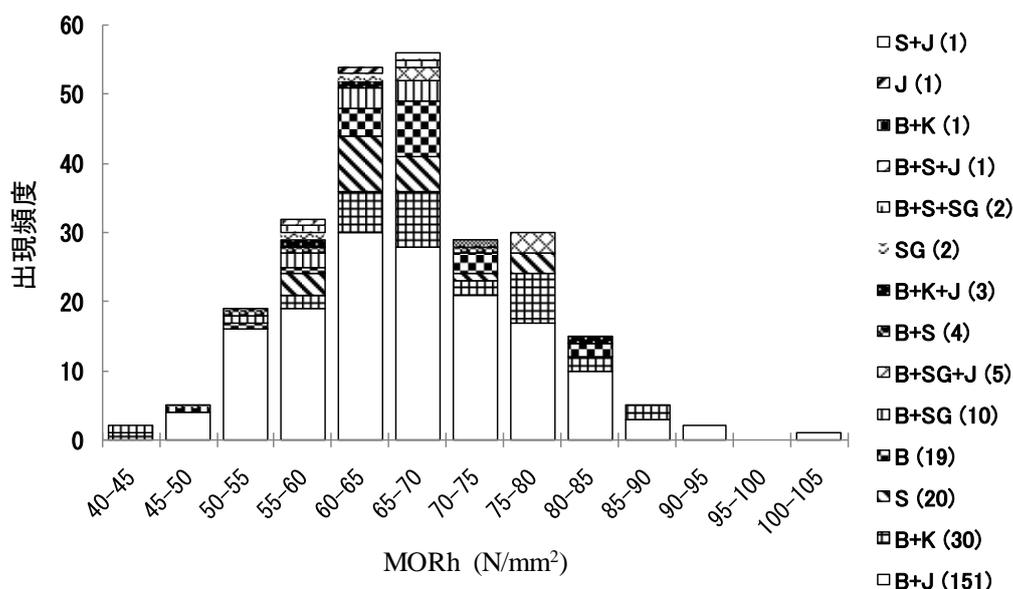


図2.9. MORhと破壊形態との関係

注：MORh:表2.2を参照。括弧内に示す数:図2.5を参照。SG, S, B, K, J:図2.5を参照。

た、曲げとせん断とたて継ぎによる複合破壊(B+S+J)、曲げと節による複合破壊(B+K)、たて継ぎの破壊(J)及びせん断とたて継ぎによる複合破壊(S+J)が、それぞれ1体ずつと全体の0.4%となった。以上のとおり、MORhの場合はMORvとは異なり、SGが絡む破壊が僅かで、BまたはBが絡む破壊の合計が全体の82.8%を占めた。そのなかで、Jが絡む破壊が全体の64.8%と多くなったのは、荷重点間(最大曲げモーメント区間)の中心に、引張側最外層のたて継ぎが必ず来るよう試験体を試験機にセットしたことによると考えられる。

主要な破壊形態別のMORhの出現範囲を見ると、B+Jは範囲が約45 N/mm²～約105 N/mm²となり、MORh全体の範囲のほぼ全域で広く出現した。B+Kは約40N/mm²～約90 N/mm²の範囲となり、MORh全体の範囲のやや下方に偏って出現した。SとBは何れも範囲が約55N/mm²～約80 N/mm²となり、MORh全体の範囲のほぼ中央に集中して出現した。また、B+SGは範囲が約45N/mm²～約70 N/mm²となり、明らかにMORh全体の範囲の下方に偏って出現した。

2.4.3 引張強度

実験結果は積層数毎にTSの平均値と変動係数を算出し、表2.3に示した。TSと積層数との関係は図2.10に、破壊形態別のTSのヒストグラムは図2.11にそれぞれ示した。

図2.10を見ると、TSの平均値は8ply～13plyの間、48.6N/mm²～54.2 N/mm²の範囲で1ply毎に増減を繰り返した後、14plyで43.6N/mm²と大きく値が低下した。その後の15plyは49.6N/mm²と一旦値が増加したが、16plyは48.7N/mm²となり17plyは46.5N/mm²という具合に値が低下した。したがって、明確ではないが、全体としてTSの平均値は積層数の増加に伴い減少する傾向にあった。また、TSの平均値±標準偏差の範囲は8ply～13plyの間はほぼ同じ広さとなり、14plyで相当狭くなった。また、15ply～17plyについても14ply

表2.3 引張試験結果

積層数	試験体の厚さ	試験体数	TS	
			Ave. (N/mm ²)	C.V. (%)
8	25mm	13	53.4	11.2
9	28mm	17	48.6	9.2
10	30mm	19	53.8	10.7
11	35mm	17	49.5	11.9
12	38mm	23	54.2	10.0
13	40mm	24	51.8	11.2
14	45mm	17	43.6	5.8
15	47mm	22	49.6	7.9
16	51mm	22	48.7	9.0
17	55mm	24	46.5	8.5

注：TS:LVLの引張強度を意味する。Ave:表2.1を参照。C.V.:表2.1を参照。.

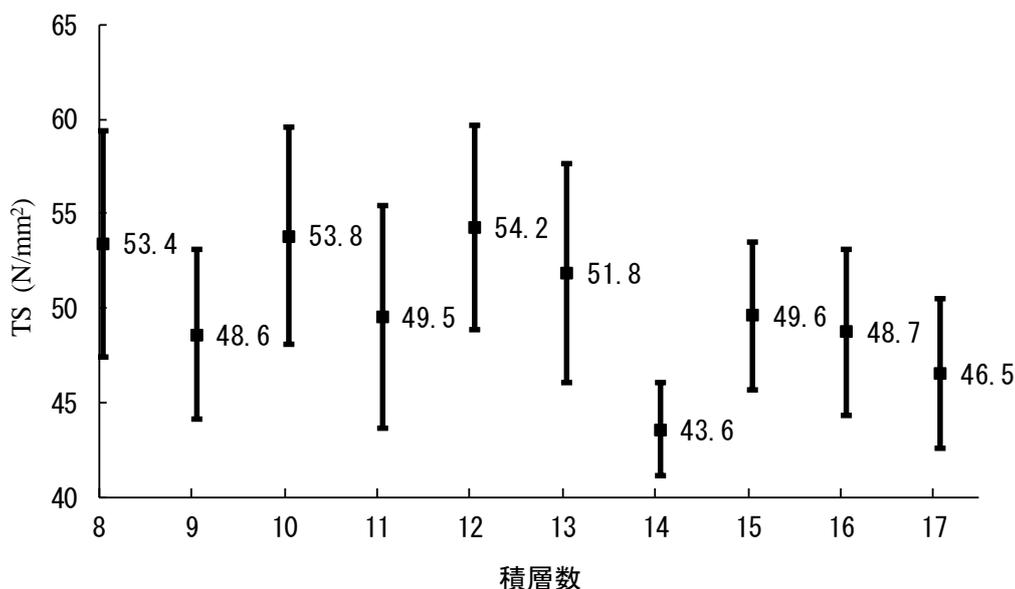


図2.10 TSと積層数との関係

注：TS：表2.3を参照。■：図2.2を参照。|：図2.2を参照。

ほどではないが、8ply~13ply に比べ狭くなった。明確ではないが、TS の平均値±標準偏差の範囲は、積層数の増加に伴い狭くなる傾向にあった。

図 2.11 を見ると、破壊形態として最も多く出現したのは節による破壊(K)であり、これの破壊による試験体は 80 体となった。次に試験体数が多かったのはたて継ぎによる破壊(J)と引張破壊(T)の 48 体で、その次には節とたて継ぎによる複合破壊(K+J)の 19 体が続いた。この 4 つの破壊形態の試験体数について、それぞれ試験体全体(198 体)に占める割合を計算すると、K は全体の 40.4%となり、J と T はそれぞれ全体の 24.2%、K+J は全体の 9.6%となった。したがって、これらの試験体数の合計が全体に占める割合を見ると、

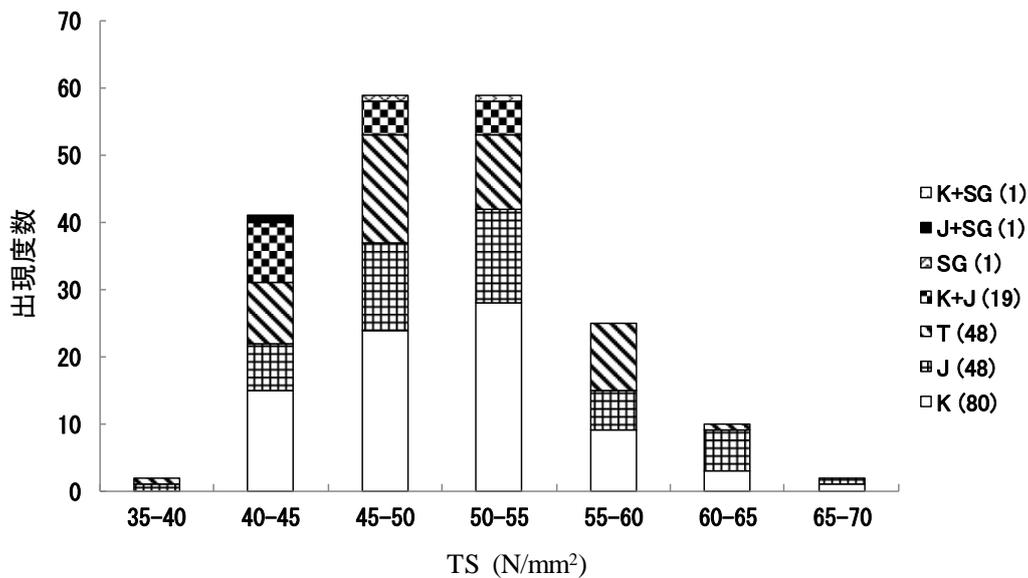


図2.11 TSと破壊形態との関係

注：TS:表2.3を参照。括弧内に示す数:図2.5を参照。SG, S, B, K, J:図2.5を参照。

98.4%とほぼ全体を占めた。その他の破壊形態については、繊維傾斜による破壊(SG)、たて継ぎと繊維傾斜による複合破壊(J+SG)及び節と繊維傾斜による複合破壊(K+SG)がそれぞれ1体ずつと、何れも全体の0.5%となった。

また、主要な破壊形態別のTSの出現範囲を見ると、K、J及びにTについては何れも範囲が約40 N/mm²～約70 N/mm²となり、TS全体の範囲のほぼ全域の広い範囲で出現した。ただし、K+Jは範囲が約40N/mm²～約55 N/mm²となり、TS全体の範囲の下方に偏って出現した。K単独の破壊によるTSは上述のとおりであるので、この場合のTSの値が低いのは、Jの影響によると見られる。

2.4.4 圧縮強度

実験結果は積層数毎にCSの平均値と変動係数を算出して表2.4に、CSと積層数との関係は図2.12に示した。ただし、CSはほぼ100%が圧縮により破壊されたので、CSの破壊形態の関係については図示していない。

図2.12を見ると、まずCSの平均値は8plyから9plyにかけて微減したが、10plyで最大となり67.2 N/mm²を示した。ただし、10ply～14plyはまでは1plyずつ微減し、14plyでは最小の57.5N/mm²を示した。その後の15ply～17plyは58.9N/mm²～60.7N/mm²と60.0N/mm²前後に納まった。以上のとおり、CSの平均値は他の強度の平均値と異なり、積層間での変動が比較的少なかった。ただし、8ply～11plyの平均値は全て65.0N/mm²を上回ったが、13ply～17plyの平均値は全て61.0N/mm²を下回った。従って、明確ではないが、CSの平均値は積層数の増加に伴い減少する傾向にあった。また、Cの平均値±標準偏差の範囲と積層数との関係を見ると、8ply～16plyはばらつきの大きさの増減を繰り返し、17plyはそれまでよりばらつきが半分程度まで減少した。したがって、この場合も明確ではないが、CSの平均値±標準偏差の範囲と積層数との関係は、積層数の増加に伴いばらつきが減

少する傾向にあったと言える。

表2.4 圧縮試験結果

積層数	試験体の厚さ	試験体数	CS	
			Ave. (N/mm ²)	C.V. (%)
8	25mm	50	65.4	9.6
9	28mm	50	65.2	5.9
10	30mm	50	67.2	7.3
11	35mm	50	65.3	5.5
12	38mm	50	63.5	5.5
13	40mm	50	59.9	7.0
14	45mm	76	57.5	4.9
15	47mm	35	60.3	7.9
16	51mm	39	58.9	4.9
17	55mm	48	60.7	2.9

注：CS:LVLの圧縮強度を意味する。Ave:表2.1を参照。C.V.:表2.1を参照。

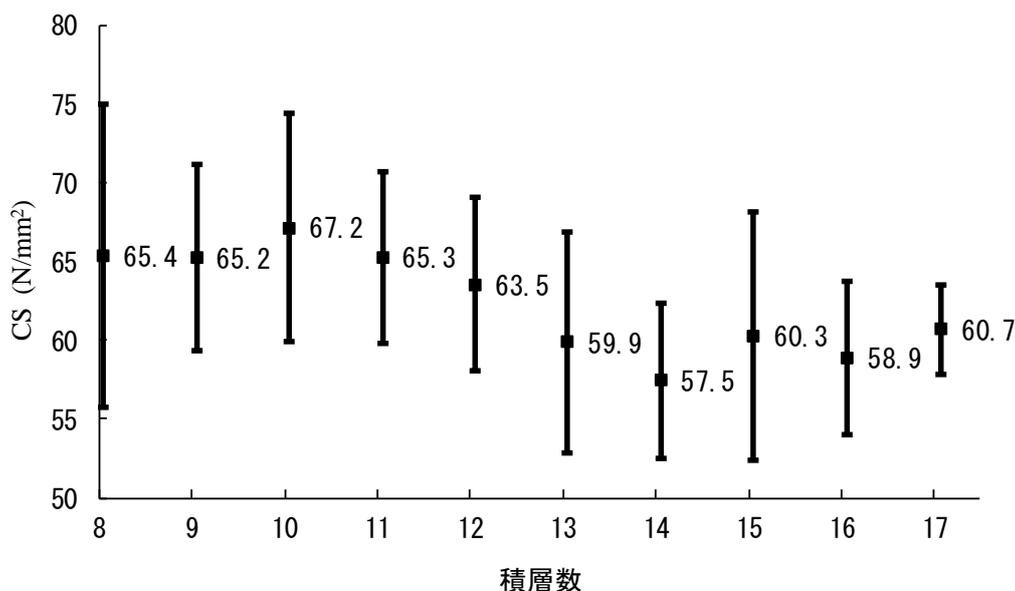


図2.12 CSと積層数との関係

注：CS：表2.4を参照。■：図2.2を参照。|：図2.2を参照。

2.5 縦振動ヤング係数から平使い方向曲げヤング係数への誘導

引張及び圧縮試験における静的ヤング係数を TE 及び TC、引張及び圧縮試験の縦振動ヤング係数を Ef(T)及び Ef(C)、平使い方向の曲げ試験体の縦振動ヤング係数を Ef と表す。2.3 に示すとおり引張試験及び圧縮試験では Ef(T)及び Ef(C)を測定したが、TE 及び CE の測定は行わなかった。しかし、これらの実験の時点では分からなかったが、のちの解析(第 6 章)では TE 及び CE の実験値として代用した MORh の実験値を用いる必要があることが判

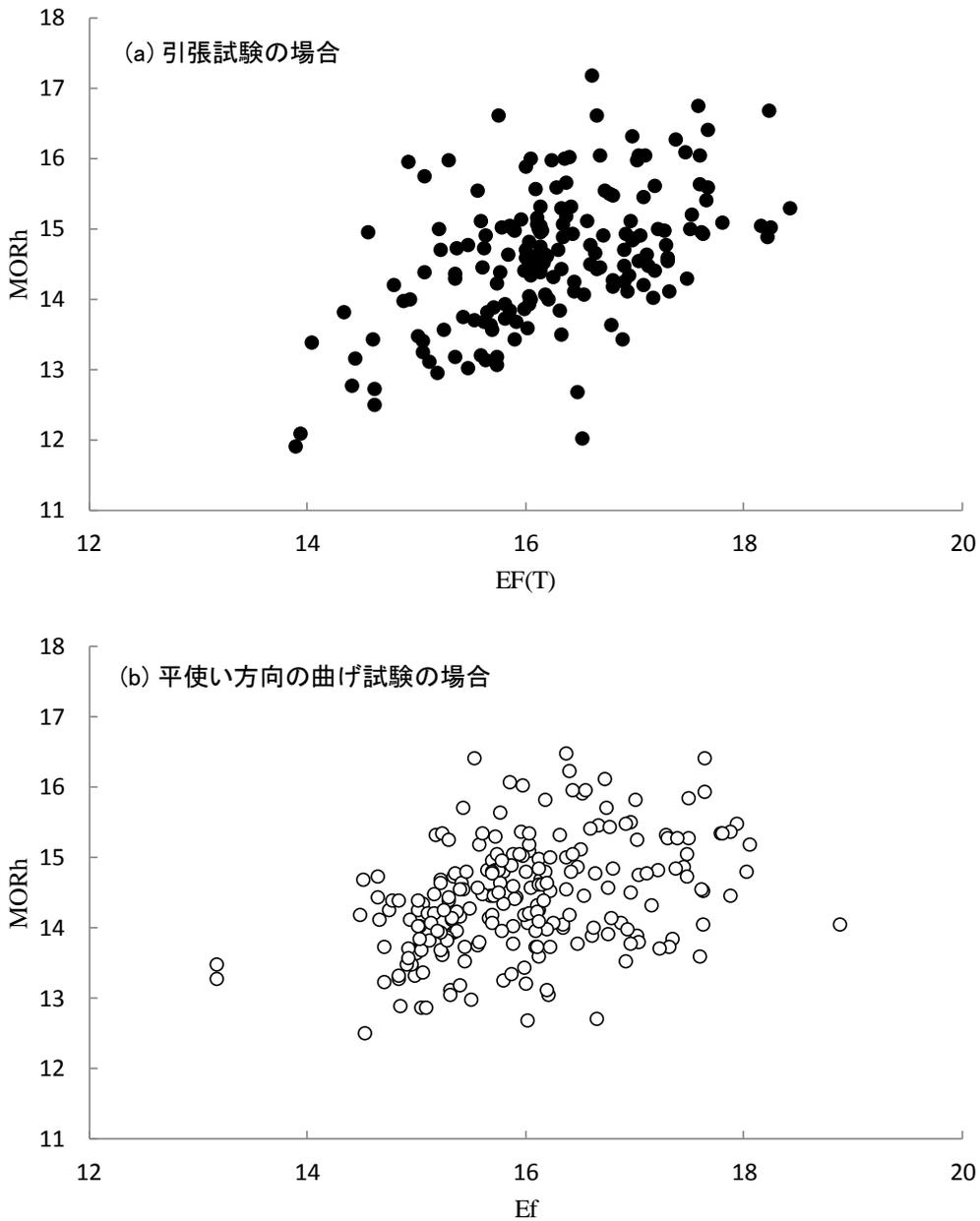


図2.13 縦振動ヤング係数と平使い方向の曲げヤング係数との関係

-LVLの引張試験と平使い方向の曲げ試験の場合の比較-

注: MORh: 表2.2を参照。Ef: LVLの平使い方向の曲げ試験における試験体の縦振動ヤング係数を意味する。Ef(T): LVLの引張試験における試験体の縦振動ヤング係数を意味する。

明した。そこで、Taylor ら³⁵⁾の手法を適用することにより、Ef と MOEh の関係を用いて Ef(T)から MOEh 及び Ef(C)から MOEh への換算を行った。具体的な手順は、Ef(T)から MOEh への換算を例に次に示す。

- ① 積層数 N ($N = 8, 9, 11, \dots, 17$) の Ef(T)の実験値を t_j ($j=1, \dots, L(N)$ 、ただし、 $L(N)$ は積層数 N における試験体数) と表し、積層数 N の累積分布関数における t_j の累積確率 u_1 ($0 \leq u_1 < 1$) を求める。
- ② 標準正規累積分布関数の逆関数を用いて、 u_1 を独立標準正規乱数 e_1 に変換する。

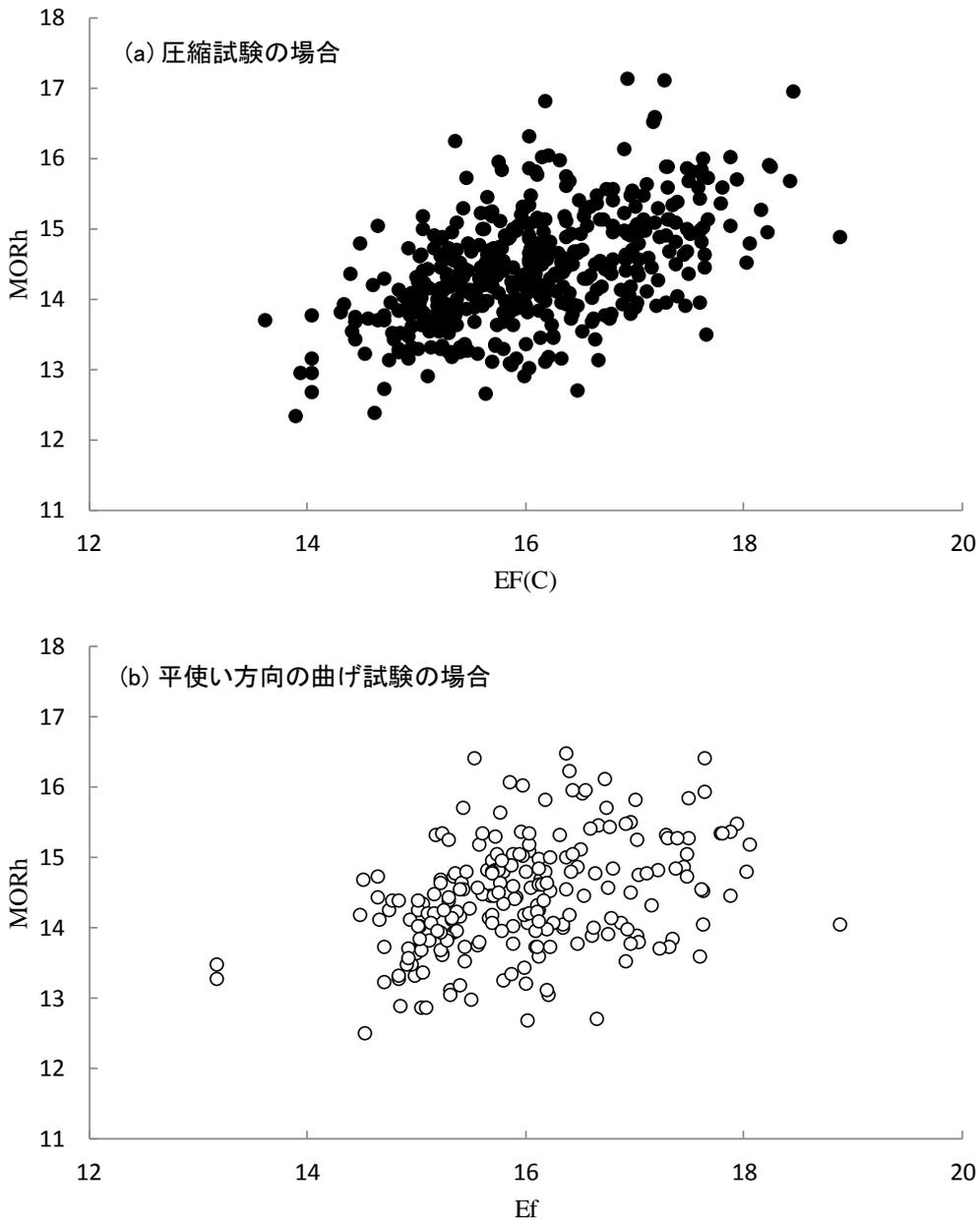


図2.14 縦振動ヤング係数と平使い方向の曲げヤング係数との関係

-LVLの圧縮試験と平使い方向の曲げ試験の場合の比較-

注: MORh: 表2.2を参照。Ef: 2.13を参照。Ef(C): LVLの圧縮試験における試験体の縦振動ヤング係数を意味する。

- ③ 0 以上 1 未満の独立一様乱数 u_2 を発生させ、標準正規累積分布関数の逆関数を用いて u_2 から独立標準正規乱数 e_2 に変換する。
- ④ コレスキー分解行列³⁵⁾による次式を用いて、独立標準正規乱数ベクトル $(e_1, e_2)^T$ から相関係数 ρ の有相関標準正規乱数ベクトル $(r_1, r_2)^T$ への変換を行う。ただし、式中の ρ は $R_{Ef-MOEh}$ を意味する。

$$\begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \rho & \sqrt{1-\rho^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \end{pmatrix}$$

- ⑤ r_2 を積層数 N の MOE_h の分布に従うよう変換^{49,50)}する。
- ⑥ $j=1, \dots, L(N)$ で①から⑤を行い積層数 N における MOE_h の換算値を求め、更に MOE_h の換算値と TS の相関係数 $R_{\text{MORh-TS}}$ を求める。
- ⑦ $R_{\text{MORh-TS}}$ が TE(f) と TS の相関係数 $R_{\text{TE(f)-TS}}$ とほぼ同じ(差が 0.1 未満)になるまで、①～⑥をやり直す。
- ⑧ 積層数 $N=8, 9, 11, \dots, 17$ で①～⑦を実施することにより、10ply を除く全ての積層数で TE(f) から MOE_h の換算を行う。

なお、換算から 10ply を除外したのは、2.4.2 で記したとおり 10ply の MOE_h が特異的な値を示したからである。また、Ef(C) から MOE_h への換算は、以上の手順中の Ef(T) を Ef(C) に読み換えて行う。

Ef(T) と MOE_h の換算値との関係を図 2.13 の (a) に、Ef と MOE_h の関係を同図の (b) にプロットし、(a) と (b) のそれぞれの分布を比較することにより、Ef(T) から MOE_h への換算の妥当性を確認した。同図を見ると、(b) では Ef が 14.5 kN/mm^2 未満のデータの出現が極端に少なくなるものの、縦振動ヤング係数と静的曲げヤング係数による 2 次元分布は (a) と (b) で概ね一致していると言える。したがって、Ef(T) から MOE_h への換算は、妥当であると考えられる。また、Ef(C) と MOE_h の換算値との関係を図 2.14 の (a) に、Ef と MOE_h の関係を同図の (b) にプロットし、Ef(T) から MOE_h への換算と同様に比較を行った。同図を見ると、この場合も、縦振動ヤング係数と静的曲げヤング係数による 2 次元分布は (a) と (b) で概ね一致していると言える。したがって、Ef(C) から MOE_h への換算は、妥当であると考えられる。

2.6 まとめ

集成材と同様に LVL のヤング係数と強度の分布を求めるには、LVL のエレメントのヤング係数と強度の分布を用いる必要がある。そこで、LVL のエレメントを接着層付きの単板と仮定し、エレメントのヤング係数と強度の分布を間接的に推定するのに必要な LVL の強度実験を行った。

実験では、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 大板から曲げ試験用と引張試験用の試験体を積層数毎に 13 体～42 体作成し、それぞれ強度試験を行い縦使い方向及び平使い方向の曲げヤング係数と曲げ強度の実験値、引張強度の実験値を収集した。更に、曲げ試験と引張試験の執権体の破壊されていない部分から圧縮試験用の試験体を積層数毎 35 体～76 体作成し、それぞれ圧縮試験を行い圧縮強度の実験値を収集した。また、何れの試験も測定後の各試験体については、それぞれ破壊形態を調べた。以上の実験データについて解析し考察を行ったところ、次のことが分かった。

- ① 縦使い方向の曲げヤング係数は積層数毎の平均値は傾向が明確ではないが、平均値±標準偏差は積層数の増加に伴い減少する傾向にあった。
- ② 平使い方向の曲げヤング係数は、10ply の平均値が特異的に高い値を示した。10ply を除いた積層数の場合、積層数毎の平均値及び平均値±標準偏差の何れも明確な傾向は見えなかった。
- ③ 縦使い方向の曲げ強度は、積層数毎の平均値が積層数の増加に伴い減少する傾向にあっ

たが、平均値±標準偏差は明確な傾向が見えなかった。縦使い方向の曲げヤング係数との相関係数との関係は、積層数毎の傾向が明確でなかった。破壊形態として最も多く出現したのは繊維傾斜による破壊であり、全体に占める割合は39.3%となった。2番目に多かったのが曲げ破壊であり、全体に占める割合は30.2%となり、3番目に多かったのは節と繊維傾斜による複合破壊であり、全体に占める割合は14.1%となった。

- ④ 平使い方向の曲げ強度は、積層数毎の平均値及び平均値±標準偏差の何れも積層数の増加に伴い減少する傾向にあった。平使い方向の曲げヤング係数との相関係数との関係は、積層数毎の傾向が明確でなかった。破壊形態として最も多く出現したのは曲げとたて継ぎによる複合破壊であり、全体に占める割合は60.4%と全体の過半数以上となった。2番目に多かったのは曲げと節による複合破壊で全体に占める割合は12.0%、3番目はせん断破壊で全体に占める割合は8.0%、4番目は曲げ破壊で全体に占める割合は7.6%となった。
- ⑤ 引張強度は、積層数毎の平均値及び平均値±標準偏差の何れもが積層数の増加に伴い減少する傾向にあった。破壊形態として最も多く出現したのは節による破壊であり、全体に占める割合は40.4%となった。2番目に多かったのはたて継ぎによる破壊と引張破壊で全体に占める割合は24.2%、4番目は節とたて継ぎによる複合破壊で全体に占める割合は9.6%となった。
- ⑥ 圧縮強度は、積層数毎の平均値及び平均値±標準偏差の何れもが積層数の増加に伴い減少する傾向にあった。破壊形態については、全試験体のほぼ100%が圧縮破壊であった。以上で示したLVL強度の実験値については、エレメントのヤング係数と強度の分布を推定するのに用いた。このことについては、次の**第三章**で述べることとする。

また、以上の引張試験と圧縮試験については、何れも静的ヤング係数の測定を行っておらず、測定したのは縦振動ヤング係数のみであった。そこで、平使い方向の曲げ試験における曲げヤング係数と縦振動ヤング係数の関係を用いて、縦振動ヤング係数から平使い方向の曲げヤング係数への換算を試験体毎に行った。引張試験及び圧縮試験における縦振動ヤング係数と平使い方向の曲げヤング係数の換算値の分布は、平使い方向の曲げ試験における縦振動ヤング係数と曲げヤング係数の分布と比較した。その結果、引張試験及び圧縮試験の何れの場合についても、縦振動ヤング係数と曲げヤング係数の分布はほぼ一致し、換算した曲げヤング係数の妥当性が確認された。したがって、引張試験と圧縮試験の曲げヤング係数の換算値は、それぞれ**第六章**の解析に用いることとした。

第三章 非線形最小二乗法による単板積層材エレメント強度分布の推定

3.1 はじめに

第二章では、材料特性が単一な単板から構成された LVL 試験体を対象に強度実験を行い、縦使い方向の曲げヤング係数(MOE_v)と曲げ強度(MOR_v)、平使い方向の曲げヤング係数(MOE_h)と曲げ強度(MOR_h)、引張強度(TS)及び圧縮強度(CS)を測定した。一方、これらの実験値については、それぞれエレメントのヤング係数またはヤング係数と強度をパラメータとする計算式(非線形の連続関数)により推定することができる。そこで、本章では観測値に対し最適な推定値のパラメータを求めるための汎用的手法である非線形最小二乗法(Nonlinear Least-squares Method、以降 NLM という)を適用し、第二章の強度実験値を用いて LVL のエレメントのヤング係数分布と強度分布の推定を試みた。

本章の構成を示すと、次のとおりとなる。まず、3.2 では E_v 分布の推定を行ったが、3.2.1 では E_v をパラメータとする MOE_v の推定式を示し、3.2.2 では第二章の強度実験値と MOE_v の推定式を用いて E_v 分布を推定するアルゴリズムを示し、3.2.3 では E_v 分布の推定結果を示すとともに、 E_v 分布の推定値の適合性について検討した。3.3 では E_h 分布の推定を行ったが、3.3.1~3.3.3 の構成は 3.2.1~3.2.3 と同様とした。3.4 では LVL 強度の推定式が同一の形式となる F_v 分布、 F_t 分布及び F_c 分布の推定を行ったが、3.4.1~3.4.3 の構成は 3.2.1~3.2.3 と同様とした。3.5 では F_h 分布の推定を行ったが、3.5.1 では LVL の引張側最外層の引張応力破壊を仮定した場合の推定を、3.5.2 では LVL の複合応力破壊を仮定した場合の推定を記した。ただし、3.5.1.1~3.5.1.3 または 3.5.2.1~3.5.2.3 の構成については、3.2.1~3.2.3 と同様とした。最後に、3.6 は本章のまとめとした。

3.2 エレメントの縦使い方向の曲げヤング係数分布の推定

3.2.1 LVL のヤング係数の推定式

まず、本章で対象としたのは、図 3.1 に示す積層数 N の矩形断面の LVL である。この LVL は片面に接着層を含む単板をエレメントと仮定し、材料特性が単一なエレメントにより全層が構成され積層接着されたものである。ただし、積層接着された後の接着層の厚さは各層で異なっていると思われるが、既往の集成材のシミュレーション^{30-33, 37, 39-47)}と同様に無視することとする。ここで、エレメントの厚さを T 、幅を B と表す。また、曲げなどによる応力が生じてもエレメント間には接着によりズレが生じないことと、断面は破壊が生じるまで同一平面を維持することの 2 点を仮定する⁴⁴⁾。

以上で示した積層数 N の LVL を縦使い方向で曲げた場合、LVL に縦使い方向の曲げモーメントが生じ、LVL 全体とエレメント各層の曲率が一致し、更にエレメント各層のモーメントの総和が LVL のモーメントとなる。したがって、MOE_v の推定式は次式で表される⁴¹⁾。

$$MOE_v = \frac{\sum_{i=1}^N E_{v_i}}{N} \quad (3.1)$$

ここで、 E_{v_i} は、 i 層目のエレメントの E_v を表す。

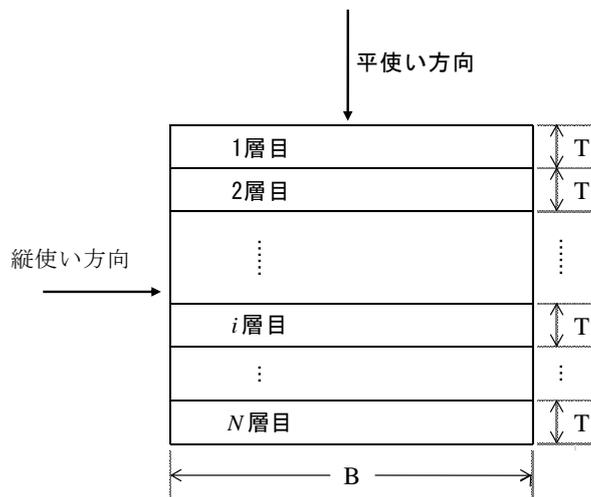


図3.1 LVLの断面図

3.2.2 アルゴリズム

3.2.1 で示した (3.1)式の右辺のパラメータは、 N を除くと各エレメントの E_v のみで構成されている。そこで、 E_v 分布を推定するアルゴリズムは、次のとおり構築した。

まず、 E_v 分布を汎用的な統計分布で表すこととし、木材または木質製品のヤング係数分布としてよく使われる正規分布、対数正規分布または 2P ワイブル分布のどれかと仮定する。したがって、何れの分布もパラメータは 2 個となり、 E_v 分布のパラメータは 2 次元ベクトル (Pe_1, Pe_2) で表すことにできるので、この Pe_1 と Pe_2 が推定対象となる。ただし、 E_v 分布として正規分布または対数正規分布を仮定する場合、 Pe_1 は平均値、 Pe_2 は標準偏差を表し、正規分布を仮定する場合、 Pe_1 と Pe_2 の単位は何れも kN/mm^2 となる。また、 E_v 分布として 2P ワイブル分布を仮定する場合、 Pe_1 は尺度パラメータ、 Pe_2 は形状パラメータを表し、 Pe_1 の単位は kN/mm^2 である。

次に、積層数 N の MOE_v の実験値は昇順に並べ替え、昇順を表す記号 s を用いて $EX_{(N, s)}$ ($s=1, \dots, L(N)$) と表す。ここで、 $L(N)$ は N における試験体の総数を表す。一方、積層数 N の MOE_v の推定値も、(3.1)式を用いて $L(N)$ 個の値を求め、これらを昇順に並べ替えて s を用いて $CAL_{(N, s)}$ ($i=1, \dots, L(N)$) と表す。ただし、 $CAL_{(N, s)}$ の計算に用いる各エレメントの E_v の値は、 (Pf_1, Pf_2, R_{E-F}) に初期値を与えて次のとおり求める。エレメント毎に 0 以上 1 未満の一樣乱数を発生させ、これらを逆関数法³⁵⁾により標準正規乱数 e に変換し、更に e を (Pe_1, Pe_2) の初期値に従うよう変換^{49, 50)}して E_v の値とする。

また、 $CAL_{(N, s)}$ の計算には N 個の E_v を用いることから、これらの E_v を要素とする N 次元ベクトルを \mathbf{E}_v と表す。更に、 \mathbf{E}_v には N 個の e を用いることから、これら N 個の e を要素とする N 次元ベクトルを \mathbf{e} と表すと、 $CAL_{(N, s)}$ のパラメータは以上より、 $(N+2)$ 次元ベクトル (\mathbf{e}, Pe_1, Pe_2) で表され、 \mathbf{e} の要素の値を全て固定すると、これ以降の $CAL_{(N, s)}$ のパラメータは (Pe_1, Pe_2) となる。したがって、一樣乱数の発生からこれまでの操作を $N=8, \dots, 17$ の積層数毎に $s=1, \dots, L(N)$ で繰り返すと、 $EX_{(N, s)}$ と $CAL_{(N, s)}$ の残差二乗和 Se のパラメータは (Pe_1, Pe_2) となる。したがって、 Se の正規方程式に NLM の収束計算⁵¹⁾を適用することによ

り、 (Pe_1, Pe_2) の推定値が求められる。

以上をまとめると、 Ev 分布のパラメータ (Pe_1, Pe_2) を推定するアルゴリズムは、次のとおりとなる。ただし、添字の意味は、これまで示してきたとおりである。

- ① Ev 分布として、正規分布、対数正規分布または2Pワイブル分布の何れかを仮定する。
- ② 推定対象となる (Pe_1, Pe_2) に、初期値として (Ple_1, Ple_2) ($0 < Ple_2 < Ple_1$)を与える。
- ③ MOEv(積層数 N)の実験値を全て昇順に並び替え、それぞれ昇順番号 s ($s=1, \dots, L(N)$)を貼付して $EX_{(N,s)}$ と表す。
- ④ 0以上1未満の独立一様乱数を発生させて、逆関数法³⁵⁾により標準正規乱数 e に変換する。この操作を N 回繰り返し、得られた N 個の e を要素とする N 次元ベクトルを \mathbf{e} と表す。
- ⑤ \mathbf{e} の各要素を分布のパラメータが (Ple_1, Ple_2) となる N 個の Ev の値に変換^{49,50)}し、これらを要素とする N 次元ベクトルを \mathbf{Ev} と表す。
- ⑥ N と \mathbf{Ev} の各要素を(3.1)式に代入し、MOEv(積層数 N)の推定値を求める。
- ⑦ ④～⑥を $L(N)$ 回繰り返し、求めた MOEv(積層数 N)の推定値を全て昇順に並び替え、昇順番号 s ($s=1, \dots, L(N)$)を貼付して $CAL_{(N,s)}$ と表す。
- ⑧ $s=1, \dots, L(N)$ で、 $CAL_{(N,s)}$ に用いている \mathbf{e} の全ての要素の値を固定する。
- ⑨ $N=8, \dots, 17$ の積層数毎に、③～⑧を繰り返す。
- ⑩ 以下に示す $EX_{(N,s)}$ と $CAL_{(N,s)}$ の残差二乗和 Se が最小になるよう、 Ple_1 と Ple_2 の値から動かしていき、 Pe_1 と Pe_2 の収束値を求める⁵¹⁾。

$$Se = \frac{1}{2} \sum_{N=8}^{17} \sum_{s=1}^{L(N)} (EX_{(N,s)} - CAL_{(N,s)})^2$$

- ⑪ Pe_1 と Pe_2 の収束値が正規方程式の解として収束したか、(3.2)式を用いて確認する⁵¹⁾。

$$\frac{\partial Se}{\partial Pe_1} \cong 0 \quad \frac{\partial Se}{\partial Pe_2} \cong 0 \quad (3.2)$$

- ⑫ ②～⑪を繰り返して2000組の (Pe_1, Pe_2) を計算し、そのなかで Se が最小となる (Pe_1, Pe_2) を推定値とする。

なお、パラメータの初期値の与え方は、MOEvの実験値を初期値として積層数毎に以上のアルゴリズムを行い、積層数毎の Pe_1 と Pe_2 の推定値を求める。更に、積層数毎の Pe_1 の平均値を Ple_1 、積層数毎の Pe_2 の平均値を Ple_2 とする。以上の初期値の与え方は、他のエレメントのヤング係数分布または強度分布を求める場合も同様である。

ここで、以上のアルゴリズムの計算例として、図3.2を示す。同図は、 Ev の分布を正規分布と仮定した場合について、アルゴリズムの②～⑪によるデータから、8plyの実験値 $(EX_{(8,1)}, \dots, EX_{(8,40)})$ と推定値 $(CAL_{ex(8,1)}, \dots, CAL_{(8,40)})$ を抽出し、それぞれの累積確率をメディアンランクで評価して図示したものである。ただし、同図(a)は Ev 分布のパラメータが初期値の場合、同図(b)は Ev 分布のパラメータが収束値の場合を示している。また、何れの図も実験値は●、推定値は■でプロットし、累積確率が同一な実験値●と推定値■の間は横棒—で結び、両者の差を表した。

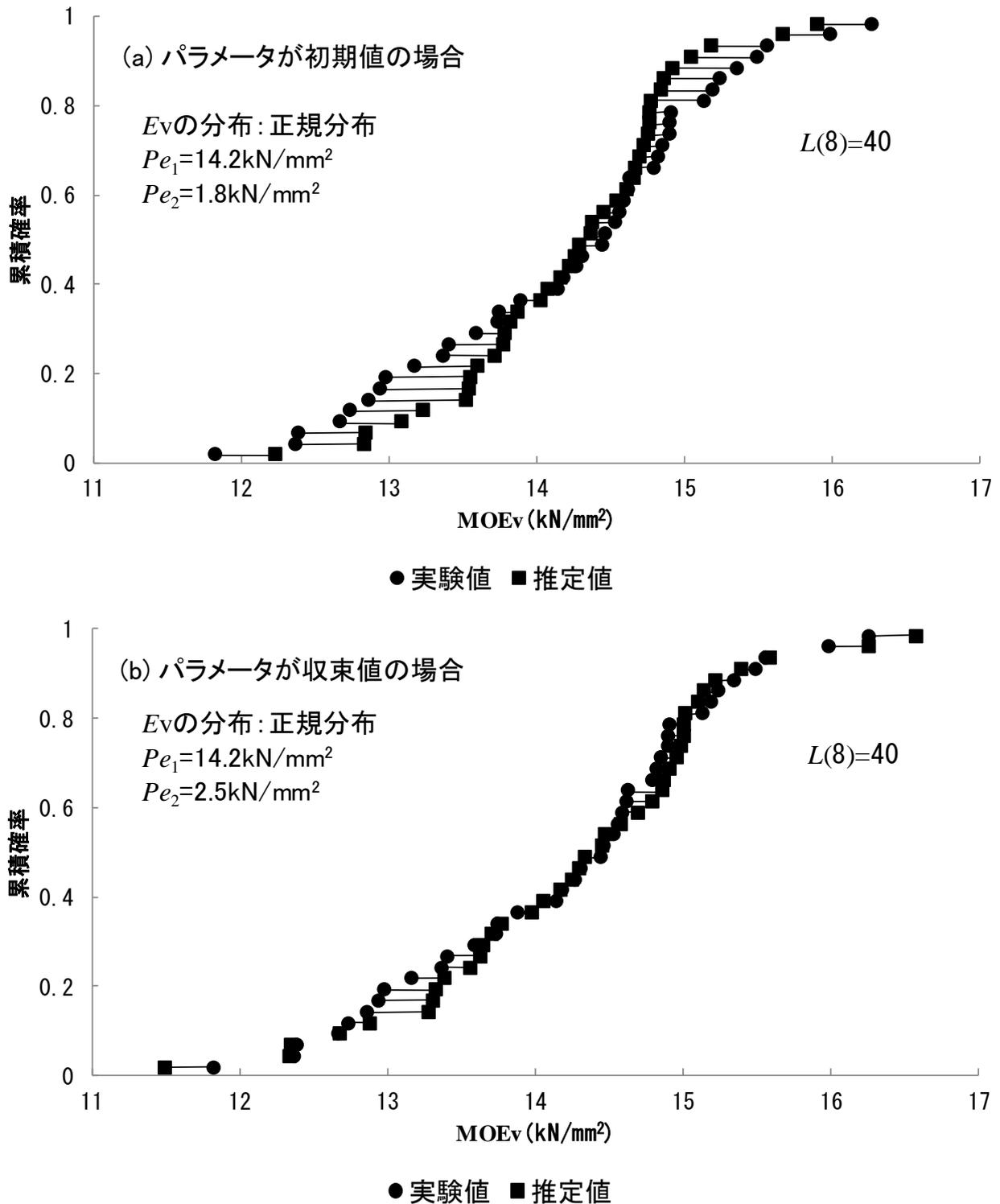


図3.2 非線形最小二乗法の計算例 (8plyのMOEvの実験値と推定値)

注: MOEv: LVLの縦使い方向の曲げヤング係数を表す。 E_v : LVLの元素の縦使い方向の曲げヤング係数を表す。 Pe_1 : E_v の分布のパラメータで正規分布の平均値を表す。 Pe_2 : E_v の分布のパラメータで正規分布の標準偏差を表す。実験値: 8plyのMOEvの実験値を昇順に並び替えたものを表す。推定値: pe_1 と pe_2 をパラメータとするMOEvの推定式による8plyの計算値で、パラメータが初期値の段階で昇順に並び替えて累積確率が同じ実験値に対応させるたものを表す。 $L(8)$: 8plyにおける実験値と推定値のそれぞれのデータ数を表す。—: 累積確率が同一な実験値と推定値のMOEvの差を表す。

まず、同図(a)を見ると、 E_v 分布のパラメータが初期値の段階では、累積確率が0.4以下と0.6以上の双方で実験値と推定値に明らかな差が生じている。一方、 E_v 分布のパラメータがNMLによる収束値である同図(b)では、累積確率が0近辺及び1近辺と0.1~0.2の辺りで若干の差は生じているが、全体を見ると実験値と推定値はほぼ一致している。この間の E_v 分布のパラメータは、 Pe_1 (平均値)は14.2 kN/mm²と変わらず、 Pe_2 (標準偏差)は1.8 kN/mm²から2.5 kN/mm²と大きくなり、これに伴い変動係数も12.7%から17.6%と増加した。このように E_v 分布のパラメータを初期値と収束値と比較すると、 E_v 分布のパラメータは上述のアルゴリズムにより、累積確率の同一な実験値と推定値の差が少なくなるよう動かされたことがよく分かる。

3.2.3 結果

3.2.2のアルゴリズムによる E_v 分布は、同分布を正規分布、対数正規分布、または2Pワイブル分布と仮定した場合の推定値をそれぞれ求めた。何れの場合も(3.2)式の偏微分係数がそれぞれ0に極めて近い数値となり、正規方程式の解として収束していたことを確認した。更に、それぞれの分布毎に2000個の収束値を追加して再計算しても、残差二乗和を含め値の変動が生じないかごく僅かであることを確認した。

ただし、3.2.2のアルゴリズムは、いわば E_v 分布を用いたMOE $_v$ 分布のシミュレーションの逆計算を行ったことに相当する。したがって、 E_v 分布の推定値を用いてMOE $_v$ 分布のシミュレーションを行い、シミュレーションの計算値とMOE $_v$ の実験値の両分布が一致しなければ、 E_v 分布の推定値は適合性を有するとは言えない。そこで、この推定値の適合性については、次の手順中に示す2段階のプロセスを用いて確認を実施した。ただし、記号の意味はこれまでと同様である。

- ① E_v 分布の推定値のうち、正規分布、対数正規分布または2Pワイブル分布の何れかの場合の推定値を選択する。
- ② 0以上1未満の独立一様乱数を発生させて、逆関数法³⁵⁾により標準正規乱数 e に変換する。この操作を N 回繰り返し、得られた N 個の e を要素とする N 次元ベクトルを \mathbf{e} と表す。
- ③ \mathbf{e} の各要素を①で選択した分布のパラメータに従う N 個の E_v の値に変換^{49,50)}し、これらを要素とする N 次元ベクトルを \mathbf{E}_v と表す。
- ④ N と \mathbf{E}_v の各要素を(3.1)式に代入し、MOE $_v$ (積層数 N)の計算値を求める。
- ⑤ ②~④を500回繰り返し、MOE $_v$ (積層数 N)の計算値を500個求める。
- ⑥ $N=8, \dots, 17$ の積層数毎に②~⑤を繰り返し、5000個のMOE $_v$ の計算値を求める。
- ⑦ 5000個のMOE $_v$ の計算値について、正規分布、対数正規分布または2Pワイブル分布の何れかと仮定し、最も適合する分布をMOE $_v$ の計算値の分布とする。
- ⑧ MOE $_v$ の計算値の累積確率分布関数と、 $N=8, \dots, 17$ のMOE $_v$ の実験値を用いて危険率5%(両側検定)によるK-S検定を行い、①で選択した E_v 分布の推定値の適合性を評価する(第1段階)。
- ⑨ 5000個のMOE $_v$ の計算値を昇順で並べ、累積確率をメディアンランクで評価する。

- ⑩ 積層数 $N=8, \dots, 17$ の MOE_v の実験値についても昇順に並べ替え、累積確率をメディアンランクで評価する。
- ⑪ 累積確率をメディアンランクで評価した MOE_v の計算値と実験値を図示し、計算値と実験値のそれぞれの累積分布の一致の具合を目視にて確認することにより、①で選択した E_v 分布の推定値の適合性を評価する(第2段階)。

以上で示した(第1段階)は E_v 分布が正規分布、対数正規分布または2Pワイブル分布の場合の3通り全てで実施し、(第2段階)は(第1段階)で適合した分布のみに適用した。

表3.1 E_v 分布の推定値とK-S検定による適合性の確認結果

E_v 分布の推定値			残差二乗和	K-S検定	
分布形	Pe_1	Pe_2		dn	d(0.05, 299)
正規分布	14.33	2.64	32.24	0.073	0.079
対数正規分布	2.65	0.18	32.00	0.083	0.079
2Pワイブル分布	15.48	5.71	29.11	0.052	0.079

注: E_v : エレメントの縦使い方向の曲げヤング係数を表す。 Pe_1, Pe_2 : E_v 分布のパラメータを表すが、 E_v 分布が正規分布または対数正規分布の場合、 Pe_1 は平均値、 Pe_2 は標準偏差を表し(E_v 分布が正規分布の場合のみ Pe_1 と Pe_2 の単位は kN/mm^2 となる)、 E_v 分布が2Pワイブル分布の場合、 Pe_1 は尺度パラメータ、 Pe_2 は形状パラメータを表す(Pe_1 の単位は kN/mm^2 となる)。dn: K-S検定の判定基準値を表す。d(0.05, 299): 両側危険率5%で試料数299の場合のK-S検定における基準限界値を表す。

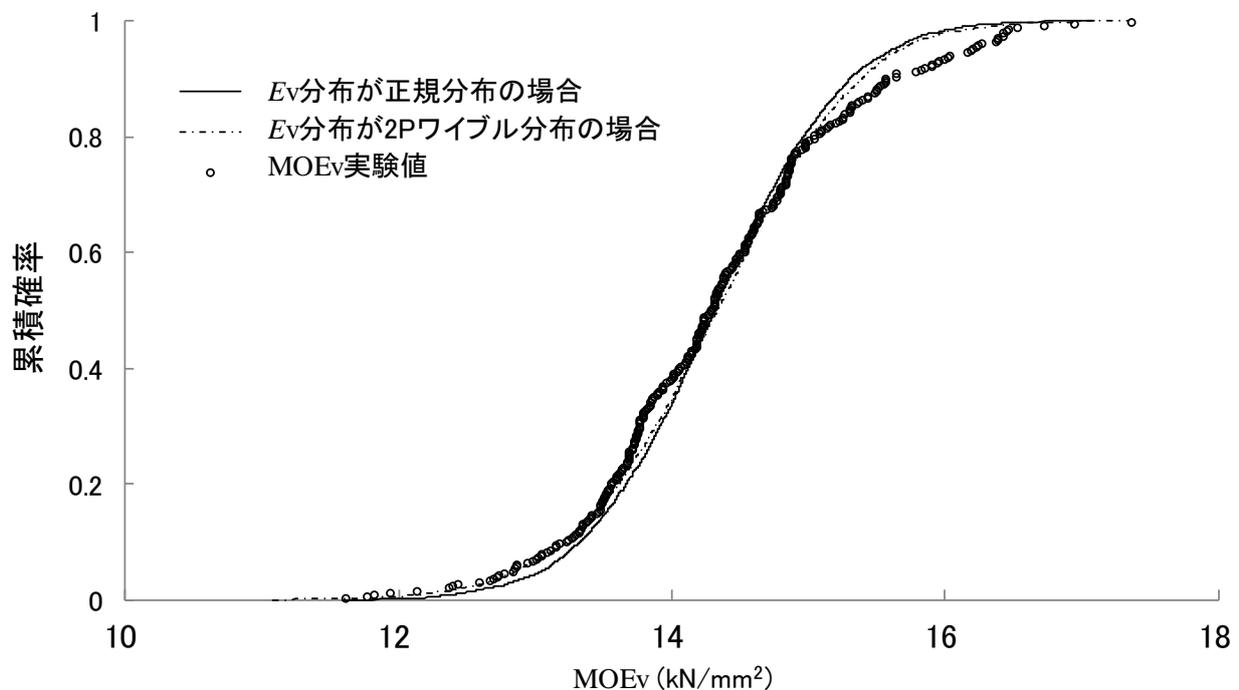


図3.3 MOE_v のシミュレーションにおける計算値と実験値の比較

注: MOE_v : LVLの縦使い方向の曲げヤング係数を表す。 E_v : 表3.1を参照。

ここで、3.2.2のアルゴリズムによる E_v 分布の推定値と、(第1段階)の K-S 検定による適合性の確認結果を表 3.1 に示した。同表より、 E_v 分布が正規分布または 2P ワイブル分布と仮定した推定値の場合、判定基準値である dn が両側 5%の試料数 299 における基準限界値 $d(0.05, 299)$ よりも小さくなり、K-S 検定に適合した。したがって、この 2通りの推定値については、(第1段階)による適合性が確認された。しかし、 E_v 分布が対数正規分布の場合、 dn は $d(0.05, 299)$ より大きくなり、(第1段階)による適合性を示すことができなかった。なお、試料数が 2.4.1 に示した 298 体より 1 体多いのは、 MOE_v は計測し MOR_v の計測に失敗した 1 体のデータも追加して E_v 分布の推定を行ったからである。

次に、(第1段階)による適合性が確認された 2通りの E_v 分布の推定値は、それぞれ(第2段階)に従い MOE_v 分布のシミュレーションを行い、求められた MOE_v の計算値と実験値の累積分布を図 3.3 に表した。同図を見ると、 E_v 分布が正規分布の場合、シミュレーションによる MOE_v は累積確率が 0.4 以下で少し実験値から外れ気味となり、累積確率が 0.8 以上では明確に外れているが、全体を見ると MOE_v の実験値と概ね一致している。一方、 E_v 分布が 2P ワイブル分布の場合、シミュレーションによる MOE_v は累積確率が 0.8 以上では一致しないが、それ以下では MOE_v の実験値と概ね一致している。したがって、 E_v 分布が正規分布と 2P ワイブル分布の何れの場合も、(第2段階)による適合性が確認された。

3.3 エレメントの平使い方向の曲げヤング係数分布の推定

3.3.1 LVL のヤング係数の推定式

図 3.1 に示した積層数 N の LVL を平使い方向で曲げた場合、 MOE_h の推定式は、平使い方向の曲げ剛性 $(EI)_e$ を LVL の断面二次モーメント $I(= N^3BT^3/12)$ で除した次式で表される^{39, 43, 44)}。

$$MOE_h = \frac{(EI)_e}{I} \quad (3.3)$$

ここで、 $(EI)_e = \sum_{i=1}^N E_h i I_{i-NN}$ であり、 E_h は i 層目のエレメントの E_h 、 I_{i-NN} は i 層目の断面二次モーメントを表すが、 $I_{i-NN} = BT^3/12 + g_i^2 BT$ から求められる。ここで、 g_i は中立軸 λ から i 層目のエレメントの中心までの距離を表し、 $g_i = \lambda + (-i + 1/2)T$ から求められる。また、中立軸 λ は、 $\lambda = (1/2) |(\sum_{i=1}^N E_h i (2i - 1) / \sum_{i=1}^N E_h i)|$ から求められる。以上の記号は、これ以降も同様に用いる。

3.3.2 アルゴリズム

(3.3)式の右辺は N 、 B 及び T 除くと、各エレメントの E_h のみで構成される。そこで、 E_h 分布についても正規分布、対数正規分布または 2P ワイブル分布の何れかと仮定すると、 E_h 分布のパラメータは (Pe_1, Pe_2) となる。したがって、この 2個のパラメータが推定対象となるが、推定に用いる LVL の実験値は、2.4.2 で示したとおり 10ply の MOE_h を除外することとする。以上より、 E_h 分布の (Pe_1, Pe_2) を推定するアルゴリズムは、3.2.2 の①～⑬を準用するが、 E_v は E_h に、 \mathbf{E}_v は \mathbf{E}_h に、(3.1)式は(3.3)式に、 $N=8, \dots, 17$ は $N=8, 9, 11, \dots, 17$ に、残差二乗和 Se は次式にそれぞれ読み換えることとする。

$$Se = \frac{1}{2} \sum_{N=8}^9 \sum_{S=1}^{L(N)} (EX_{(N,S)} - CAL_{(N,S)})^2 + \frac{1}{2} \sum_{N=11}^{17} \sum_{S=1}^{L(N)} (EX_{(N,S)} - CAL_{(N,S)})^2$$

3.3.3 結果

3.3.2 のアルゴリズムによる E_h 分布の推定は、同分布を正規分布、対数正規分布、または 2P ワイブル分布と仮定した場合の推定値をそれぞれ求めた。何れの場合も(3.2)式の偏微分係数がそれぞれ 0 に極めて近い数値となり、正規方程式の解として収束していたことを確認した。更に、それぞれの分布毎に 2000 個の収束値を追加して再計算しても、残差二乗和を含め値の変動が生じないかごく僅かであることを確認した。推定値の適合性については、3.2.3 に示した①～⑩の手順中、 E_v は E_h に、 E_v は E_h に、 MOE_v は MOE_h に、(3.1)式は(3.3)式に、 $N=8, \dots, 17$ は $N=8, 9, 11, \dots, 17$ に、5000 個は 4500 個にそれぞれ読み換えて(第 1 段階)と(第 2 段階)を実施した。

ここで、3.3.2 のアルゴリズムによる E_h 分布の推定値と、(第 1 段階)の K-S 検定による適合性の確認結果を表 3.2 に示した。同表より、 E_h 分布を何れの分布と仮定した場合も、 dn が $d(0.05, 226)$ よりも小さくなり、(第 1 段階)による適合性が確認された。ただし、試料数が 226 体なのは、2.4.2 に示した全体の 250 体から 10ply の 24 体を差し引いたからである。

表3.2 E_h 分布の推定値とK-S検定による適合性の確認結果

E_h 分布の推定値			残差二乗和	K-S検定	
分布形	Pe_1	Pe_2		dn	$d(0.05, 226)$
正規分布	14.48	1.86	9.80	0.067	0.090
対数正規分布	2.66	0.12	11.79	0.052	0.090
2Pワイブル分布	15.16	9.97	13.24	0.075	0.090

注: E_h : エレメントの平使い方向の曲げヤング係数を表す。 Pe_1, Pe_2 : E_h 分布のパラメータを表すが、 E_h 分布が正規分布または対数正規分布の場合、 Pe_1 は平均値、 Pe_2 は標準偏差を表し(E_h 分布が正規分布の場合のみ Pe_1 と Pe_2 の単位は kN/mm^2 となる)、 E_h 分布が2Pワイブル分布の場合、 Pe_1 は尺度パラメータ、 Pe_2 は形状パラメータを表す(Pe_1 の単位は kN/mm^2 となる)。 dn : 表3.1を参照。 $d(0.05, 226)$: 両側危険率5%で試料数226の場合のK-S検定における基準限界値を表す。

次に、(第 1 段階)による適合性が確認された 3 通りの E_h 分布の推定値は、それぞれ(第 2 段階)に従い推定した分布のパラメータを用いて MOE_h 分布のシミュレーションを行い、求められた MOE_h の計算値と実験値の累積分布を図 3.4 に表した。同図を見ると、シミュレーションによる MOE_h は E_h 分布が何れの分布の場合も、累積確率が 0.5 未満で MOE_h の実験値から少し外れ気味になっている。また、 E_h 分布が 2P ワイブル分布の場合、シミュレーションによる MOE_h は、累積確率が 0.8 以上でも MOE_h の実験値から少し外れ気味になっている。しかし、何れの分布の場合も全体を見ると、シミュレーションによる MOE_h は概ね MOE_h の実験値と一致している。したがって、何れの E_h 分布の推定値も、(方法

2)による適合性が確認された。また、3.2.3の E_v の場合と同様に、文献50)の値及び2.2を考慮すると、正規分布と2Pワイブル分布の何れの推定値も妥当な大きさと言える。

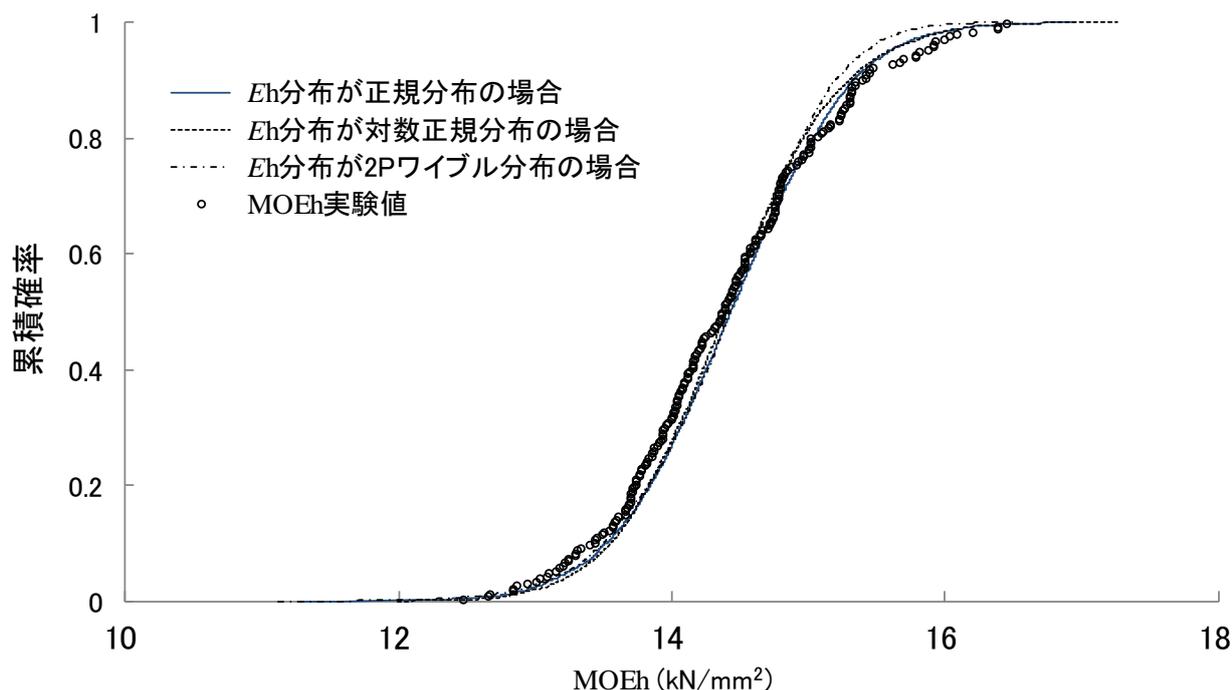


図3.4 MOEhのシミュレーションにおける計算値と実験値の比較

注: MOEh: LVLの平使い方向の曲げヤング係数を表す。Eh: 表3.2を参照。

3.4 エレメントの縦使い方向の曲げ強度、引張強度及び圧縮強度分布の推定

3.4.1 クライテリア

(a) 縦使い方向の曲げ強度

図3.1に示した積層数 N のLVLを縦使い方向で曲げた場合、LVL全体とエレメント各層で曲率が一致し、エレメント各層のモーメントの総和がLVLのモーメントとなる。更に、縦使い方向の曲げにおけるLVLの中立軸の位置を $B/2$ とすると、 i 層目の引張側最外縁における曲げ応力 σ_{v_i} は、中立軸から $B/2$ 離れた地点でのひずみに、その層の曲げヤング係数 E_{v_i} を乗じることにより算出される。

以上より、エレメントの破壊は σ_{v_i} がその層の曲げ強度 F_{v_i} に達した時と仮定すると、 i 層目のエレメントで破壊した場合のLVLの曲げ強度は $MOR_{v_i} = MOE_v(F_{v_i}/E_{v_i})$ と表せられる。ここで、縦使い方向の曲げのクライテリアを最初のエレメントの破壊が発生した時点でLVLが破壊すると仮定すると、 N 個の MOR_{v_i} の最小値がLVLの MOR_v となることから、 MOR_v の推定式は次式で表される。

$$MOR_v = \min \left[MOE_v \left(\frac{F_{v_i}}{E_{v_i}} \right) \right] \quad (i = 1, \dots, N) \quad (3.4)$$

(b) 引張強度

図3.1に示した積層数 N のLVLを引張した場合、LVLのエレメント各層のひずみが一

致し、エレメント各層の引張荷重の総和が LVL の引張荷重となることから、TE は次のとおり表される。

$$TE = \frac{\sum_{i=1}^N Et_i}{N} \quad (3.5)$$

ここで、 Et_i は、 i 層目のエレメントの Et を表す。

また、 i 層目のひずみはその層の引張応力 σ_i を Et_i で除して求められ、このひずみは LVL の応力 σ を TE で除したひずみとも一致する。したがって、エレメントの破壊は σ_i がその層のエレメントの引張強度 Ft_i に達した時と仮定すると、 i 層目で破壊した場合の LVL の引張強度は、 $TS_i = TE(Ft_i/Et_i)$ と表される。ここで、引張のクライテリアを最初のエレメントの破壊が発生した時点で LVL が破壊すると仮定すると、 N 個の TS_i の最小値が LVL の TS となることから、TS の推定式は次のとおり表される。

$$TS = \min \left[TE \left(\frac{Ft_i}{Et_i} \right) \right] \quad (i = 1, \dots, N) \quad (3.6)$$

(c) 圧縮強度

図 3.1 に示した積層数 N の LVL を圧縮した場合、LVL の CE 及び CS の推定式は引張の場合と同様の計算過程で導かれ、それぞれ次のとおり表される。

$$CE = \frac{\sum_{i=1}^N Ec_i}{N} \quad (3.7)$$

$$CS = \min \left[TE \left(\frac{Fc_i}{Ec_i} \right) \right] \quad (i = 1, \dots, N) \quad (3.8)$$

ここで、 Ec_i は i 層目のエレメントの Ec 、 Fc_i は i 層目のエレメントの Fc を表す。

3.4.2 アルゴリズム

MOR_v の推定式(3.4)式、TS の推定式(3.6)式及び CS の推定式(3.8)式は、何れも右辺のパラメータがエレメントのヤング係数と強度から構成される同じ形式の式として表される。そこで、MOE_v、TE または CE を LVL $\cdot E$ 、MOR_v、TS または CS を LVL $\cdot F$ 、 E_v 、 E_t 及び E_c を E 、 F_v 、 F_t 及び F_c を F というそれぞれ共通する記号で表すこととし、 E と F による強度分布を推定するアルゴリズムは、次のとおり導入した。

まず、3.2.2 及び 3.3.2 と同様に、 F 分布を正規分布、対数正規分布または 2P ワイブル分布と仮定すると、 F 分布のパラメータは 2 次元ベクトル(Pf_1, Pf_2)で表せられる。ただし、 F 分布として正規分布または対数正規分布を仮定する場合、 Pf_1 は平均値、 Pf_2 は標準偏差を表し、正規分布を仮定する場合のみ、 Pf_1 と Pf_2 の単位は N/mm^2 となる。また、 F 分布として 2P ワイブル分布を仮定する場合、 Pf_1 は尺度パラメータ、 Pf_2 は形状パラメータを表し、 Pf_1 の単位は N/mm^2 である。

更に、 E と F の関係を相関係数 R_{E-F} で表すと、エレメントの強度分布のパラメータは 5 次元ベクトル($Pe_1, Pe_2, Pf_1, Pf_2, R_{E-F}$)で表されられる。ただし、 F が F_v の場合、(Pe_1, Pe_2) については 3.2 より求めたので、その推定値を用いると(Pf_1, Pf_2, R_{E-F})が未知パラメータとして残る。また、 F が F_t または F_c の場合、3.1 で記したとおり E_t または E_c は E_h と分

布がほぼ一致すると仮定し、 (Pe_1, Pe_2) については3.3の推定値で代用したので、この場合も (Pfi, Pfi, R_{E-F}) が未知パラメータとして残る。したがって、 Fv 、 Ft または Fc の何れの強度分布についても、3次元ベクトル (Pfi, Pfi, R_{E-F}) が推定対象となる。

次に、積層数 N の $LVL.F$ の実験値は昇順に並び替え、昇順を表す s を用いて $EX_{(N, s)}$ ($s=1, \dots, L(N)$)と表す。一方、積層数 N の $LVL.F$ の推定値は $LVL.F$ が $MORv$ の場合は(3.4)式、 TS の場合は(3.6)式、 CS の場合は(3.8)式より $L(N)$ 個の値を求めて昇順に並び替え、 s を用いて $CAL_{(N, s)}$ ($s=1, \dots, L(N)$)と表す。ただし、 $CAL_{(N, s)}$ の計算に用いる各エレメントの E と F の値は、 (Pfi, Pfi, R_{E-F}) に初期値を与えて次のとおり求める。

まず、0 以上 1 未満の独立一様乱数 2 個を発生させて、それぞれ逆関数法³⁵⁾を用いて 2 個の独立標準正規乱数 e_1 及び e_2 に変換する。更に、これらを要素とする独立標準正規乱数ベクトル $(e_1, e_2)^T$ は、コレスキー分解行列³⁵⁾による次式を用いて、相関係数が R_{E-F} の有相関標準正規乱数ベクトル $(r_1, r_2)^T$ に変換する。

$$\begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ R_{E-F} & \sqrt{1 - R_{E-F}^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

ここで、 r_1 は表3.1または表3.2に示す推定値の (Pe_1, Pe_2) に従うよう変換^{49,50)}して E の値とし、 r_2 は (Pfi, Pfi) の初期値に従うよう変換^{49,50)}して F の値とする。

以上より、 E は e_1 を、 F は e_1 と e_2 を用いることが分かる(ただし、 e_1 は E と F で共通である)。このことから、 $CAL_{(N, s)}$ の計算に用いる N 個の E と F をそれぞれ N 次元ベクトル \mathbf{E} と \mathbf{F} と表すと、 \mathbf{E} は N 個の e_1 、 \mathbf{F} は N 個ずつの e_1 と e_2 を用いることが分かる。したがって、 N 個の e_1 または e_2 を要素とする N 次元ベクトルを \mathbf{e}_1 または \mathbf{e}_2 と表すと、 $CAL_{(N, s)}$ のパラメータは $(2 \times N + 5)$ 次元ベクトル $(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, Pe_1, Pe_2, Pfi, Pfi, R_{E-F})$ と表せられる。ただし、 (Pe_1, Pe_2) は上述のとおり固定するので、 $CAL_{(N, s)}$ の実際のパラメータは $(2 \times N + 3)$ 次元ベクトル $(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, Pfi, Pfi, R_{E-F})$ となる。そこで、 \mathbf{e}_1 と \mathbf{e}_2 の要素の値を全て固定すると、これ以降の $CAL_{(N, s)}$ のパラメータは (Pfi, Pfi, R_{E-F}) となる。したがって、一様乱数の発生からこれまでの操作を F が $MORv$ の場合は $N=8, \dots, 17$ の積層数毎に、 TS または CS の場合は $N=8, 9, 11, \dots, 17$ の積層数毎に $s=1, \dots, L(N)$ で繰り返すと、 $EX_{(N, s)}$ と $CAL_{(N, s)}$ の残差二乗和 Sf のパラメータは (Pfi, Pfi, R_{E-F}) となる。したがって、 Sf の正規方程式に NLM の収束計算⁵¹⁾を適用し、 (Pfi, Pfi, R_{E-F}) の推定値が求められる。

以上をまとめると、 E と F による強度分布のパラメータ $(Pe_1, Pe_2, Pfi, Pfi, R_{E-F})$ のうち、 (Pfi, Pfi, R_{E-F}) を推定するアルゴリズムは、次のとおりとなる。ただし、記号の意味はこれまでと同様である。

- ① E 分布と F 分布のそれぞれで、正規分布、対数正規分布または 2P ワイブル分布の何れかを仮定する。
- ② 推定対象となる (Pfi, Pfi, R_{E-F}) に、初期値として (Pif_1, Pif_2, RI_{E-F}) ($0 < Pif_2 < Pif_1, 0 < RI_{E-F} < 1$)を与える。
- ③ $LVL.F$ (積層数 N) の実験値を全て昇順に並び替え、それぞれ昇順番号 s ($s=1, \dots, L(N)$) を貼付して $EX_{(N, s)}$ と表す。

- ④ 0 以上 1 未満の独立一様乱数を 2 個発生させて、それぞれ逆関数法³⁵⁾により独立標準正規乱数(e_1, e_2)に変換する。更に、(e_1, e_2)に(3.9)式を適用して、相関係数が RI_{E-F} の 2 次元有相関標準正規乱数(r_1, r_2)に変換³⁵⁾する。
- ⑤ ④の操作を N 回繰り返して、それぞれ N 個の e_1, e_2, r_1 及び r_2 を求める。更に、 N 個の e_1 を要素とする N 次元ベクトルを \mathbf{e}_1 と表し、以下同様に N 個の e_2 を \mathbf{e}_2 、 N 個の r_1 を \mathbf{r}_1 及び N 個の r_2 を \mathbf{r}_2 と表す。
- ⑥ \mathbf{r}_1 の各要素を分布が(Pe_1, Pe_2)に従う N 個の E に変換^{49,50)}し、これらを要素とする N 次元ベクトルを \mathbf{E} と表す。ただし、(Pe_1, Pe_2)は LVL.F が MORv の場合は表 3.1、LVL.F が TS または CS の場合は表 3.2 に示す値のうち、①で仮定した分布の値で固定する。
- ⑦ \mathbf{r}_2 の各要素を分布が(Pf_1, Pf_2)に従う N 個の F に変換^{49,50)}し、これらを要素とする N 次元ベクトルを \mathbf{F} と表す。
- ⑧ 積層数 N と \mathbf{E} の各要素を LVL.E が MOEv の場合は(3.1)式に、LVL.E が TE の場合は(3.5)式に、LVL.E が CE の場合は(3.7)式に代入し、LVL.E (積層数 N) の推定値を求める。
- ⑨ 積層数 N 、LVL.E (積層数 N) の推定値、 \mathbf{E} 及び \mathbf{F} の各要素を LVL.F が MORv の場合は(3.4)式に、LVL.F が TS の場合は(3.6)式に、LVL.F が CS の場合は(3.8)式に代入し、LVL.F (積層数 N) の推定値を求める。
- ⑩ ④～⑨を $L(N)$ 回繰り返して、求められた LVL.F (積層数 N) の推定値を全て昇順に並び替え、昇順番号 s ($s=1, \dots, L(N)$) を貼付して $CAL_{(N,s)}$ と表す。
- ⑪ $s=1, \dots, L(N)$ で、 $CAL_{(N,s)}$ に用いている \mathbf{e}_1 と \mathbf{e}_2 の全ての要素の値を固定する。
- ⑫ LVL.F が MORv の場合は $N=8, \dots, 17$ の積層数毎に、LVL.F が TS または CS の場合は $N=8, 9, 11, \dots, 17$ の積層数毎に③～⑪を繰り返す。
- ⑬ 以下に示す $EX_{(N,s)}$ と $CAL_{(N,s)}$ の残差二乗和 Sf が最小になるよう、 Pf_1, Pf_2 及び RI_{E-F} の値から動かしていき、 Pf_1, Pf_2 及び R_{E-F} の収束値を求める⁵¹⁾。

1) LVL.F が MORv の場合

$$Sf = \frac{1}{2} \sum_{N=8}^{17} \sum_{S=1}^{L(N)} (EX_{(N,S)} - CAL_{(N,S)})^2$$

2) LVL.F が TS または CS の場合

$$Sf = \frac{1}{2} \sum_{N=8}^9 \sum_{S=1}^{L(N)} (EX_{(N,S)} - CAL_{(N,S)})^2 + \frac{1}{2} \sum_{N=11}^{17} \sum_{S=1}^{L(N)} (EX_{(N,S)} - CAL_{(N,S)})^2$$

- ⑭ (Pf_1, Pf_2, R_{E-F}) の収束値が正規方程式の解として収束したか、(3.10)式を用いて確認する⁵¹⁾。

$$\frac{\partial Sf}{\partial Pf_1} \cong 0 \quad \frac{\partial Sf}{\partial Pf_2} \cong 0 \quad \frac{\partial Sf}{\partial R_{E-F}} \cong 0 \quad (3.10)$$

- ⑮ ②～⑭を繰り返して 20000 個の (Pf_1, Pf_2, R_{E-F}) を計算し、そのなかで Sf が最小となる (Pf_1, Pf_2, R_{E-F}) を推定値とする。

3.4.3 結果

E と F によるエレメントの強度分布は E と F の何れも正規分布、対数正規分布または 2P

ワイブル分布の3通りの分布となることから、 $3 \times 3 = 9$ 通りの分布の組合せ毎に、3.4.2のアルゴリズムによる推定を行った。以上の9種類の推定値については、何れも(3.10)式の偏微分係数がそれぞれ0に極めて近い数値となり、正規方程式の解として収束していることを確認した。更に、それぞれの分布の組合せ毎に20000個の収束値を追加して再計算しても、残差二乗和を含め値の変動が生じないかごく僅かであることを確認した。

推定値の適合性については、次の手順を用いて確認した。ただし、記号の意味はこれまでと同様である。

- ① E と F の分布の組合せで $3 \times 3 = 9$ 通りとなるエレメントの強度分布の推定値のうち、何れかの分布の組合せの推定値を選択する。
- ② 0 以上 1 未満の独立一様乱数を 2 個発生させて、それぞれ逆関数法³⁵⁾により独立標準正規乱数(e_1, e_2)に変換する。
- ③ (e_1, e_2)に(3.9)式を適用して、相関係数が R_{E-F} の 2 次元有相関標準正規乱数(r_1, r_2)に変換³⁵⁾する。ただし、 R_{E-F} は 3.4.2 による推定値のうち、①で選択した分布の組合せの値を用いる。
- ④ ②～③の操作を N 回繰り返し、それぞれ N 個の r_1 及び r_2 を求める。更に、 N 個の r_1 を要素とする N 次元ベクトルを \mathbf{r}_1 と表し、以下同様に N 個の r_2 を \mathbf{r}_2 と表す。
- ⑤ \mathbf{r}_1 の各要素を分布が(Pe_1, Pe_2)に従う N 個の E に変換^{49,50)}し、これらを要素とする N 次元ベクトルを \mathbf{E} と表す。ただし、(Pe_1, Pe_2)は LVL.F が MORv の場合は表 3.1、LVL.F が TS または CS の場合は表 3.2 に示す値のうち、①で選択した分布の値を用いる。
- ⑥ \mathbf{r}_2 の各要素を分布が(Pf_1, Pf_2)に従う N 個の F に変換^{49,50)}し、これらを要素とする N 次元ベクトルを \mathbf{F} と表す。ただし、(Pf_1, Pf_2)は 3.4.2 による推定値のうち、①で選択した分布の組み合わせの値を用いる。
- ⑦ 積層数 N と \mathbf{E} の各要素を LVL.E が MOEv の場合は(3.1)式に、LVL.E が TE の場合は(3.5)式に、LVL.E が CE の場合は(3.7)式に代入し、LVL.E (積層数 N) の計算値を求める。
- ⑧ 積層数 N 、LVL.E (積層数 N) の計算値、 \mathbf{E} 及び \mathbf{F} の各要素を LVL.F が MORv の場合は(3.4)式に、LVL.F が TS の場合は(3.6)式に、LVL.F が CS の場合は(3.8)式に代入し、LVL.F (積層数 N) の計算値を求める。
- ⑨ ②～⑧を 500 回繰り返し、LVL.F (積層数 N) の計算値を 500 個求める。
- ⑩ LVL.F が MORv の場合は積層数 $N=8, \dots, 17$ で②～⑨を繰り返し、5000 個の LVL.F の計算値を求める。また、LVL.F が TS または CS の場合は積層数 $N=8, 9, 11, \dots, 17$ で②～⑨を繰り返し、4500 個の LVL.F の計算値を求める。
- ⑪ LVL.F が MORv の場合は 5000 個の計算値、LVL.F が TS または CS の場合は 4500 個の計算値について、正規分布、対数正規分布または 2P ワイブル分布の何れかと仮定し、最も適合する分布を LVL.F の計算値の分布とする。
- ⑫ ⑪による計算値の累積分布に対し、LVL.F が MORv の場合は積層数 $N=8, \dots, 17$ の実験値、LVL.F が TS または CS の場合は積層数 $N=8, 9, 11, \dots, 17$ の実験値を用いて危険率 5%(両側検定)による K-S 検定を行うことにより、①で選択した分布の組合せによる推定値の適合性を評価する(第 1 段階)。

- ⑬ LVL.F が MOR_v の場合は 5000 個の、LVL.F が TS または CS の場合は 4500 個の計算値を昇順で並べ、累積確率をメディアンランクで評価する。
- ⑭ LVL.F が MOR_v の場合は積層数 $N=8, \dots, 17$ 、LVL.F が TS または CS の場合は積層数 $N=8, 9, 11, \dots, 17$ の LVL.F の実験値についても昇順に並べ替え、累積確率をメディアンランクで評価する。
- ⑮ 累積確率をメディアンランクで評価した LVL.F の計算値と実験値を図示し、計算値と実験値のそれぞれの累積分布の一致の具合を目視にて確認することにより、①で選択した分布の組合せの推定値について適合性を評価する(第 2 段階)。

以上に示した(第 1 段階)は全ての分布の組合せによる推定値に対し適用し、(第 2 段階)は(第 1 段階)で適合した分布の組合せの推定値のみに適用した。

(a) 縦使い方向の曲げ強度

3.4.2 のアルゴリズムによる F_v 分布の推定値と、(第 1 段階)の K-S 検定による適合性の確認結果を表 3.3 に示した。同表より、 E_v と F_v の何れの分布の組合せも dn が $d(0.05, 299)$ よりも小さくなり、(第 1 段階)による適合性が確認された。

表3.3 F_v 分布の推定値とK-S検定による適合性の確認結果

E_v 分布形	F_v 分布形	F_v 分布の推定値					残差 二乗和	K-S検定	
		Pe_1	Pe_2	Pf_1	Pf_2	R_{E-F}		dn	$d(0.05, 299)$
正規分布	正規分布	14.33	2.64	96.31	17.35	0.68	2117.16	0.051	0.079
正規分布	対数正規分布	14.33	2.64	4.60	0.21	0.60	2191.22	0.037	0.079
正規分布	2Pワイブル分布	14.33	2.64	101.01	7.16	0.71	2189.05	0.056	0.079
対数正規分布	正規分布	2.65	0.18	96.75	17.82	0.68	2021.67	0.046	0.079
対数正規分布	対数正規分布	2.65	0.18	4.59	0.23	0.65	2002.56	0.038	0.079
対数正規分布	2Pワイブル分布	2.65	0.18	104.55	7.67	0.59	2344.17	0.057	0.079
2Pワイブル分布	正規分布	15.48	5.67	97.54	17.66	0.65	2185.15	0.061	0.079
2Pワイブル分布	対数正規分布	15.48	5.67	4.59	0.23	0.66	2097.64	0.053	0.079
2Pワイブル分布	2Pワイブル分布	15.48	5.67	102.59	7.13	0.67	2411.16	0.066	0.079

注: E_v : 表3.1を参照。 F_v : エレメントの縦使い方向の曲げ強さを表す。 Pe_1, Pe_2 : 表3.1を参照。 Pf_1, Pf_2 : F_v 分布のパラメータを表すが、 F_v 分布が正規分布または対数正規分布の場合、 Pf_1 は平均値、 Pf_2 は標準偏差を表し(F_v 分布が正規分布の場合のみ、 Pf_1 と Pf_2 の単位は N/mm^2 となる)、 F_v 分布が2Pワイブル分布の場合、 Pf_1 は尺度パラメータ、 Pf_2 は形状パラメータを表す(Pf_1 の単位は N/mm^2 となる)。 R_{E-F} : E_v と F_v の相関係数を表す。 dn : 表3.1を参照。 $d(0.05, 299)$: 両側危険率5%で試料数299の場合のK-S検定における基準限界値を表す。

次に、 E_v と F_v の全ての分布の組合せの推定値は、(第 2 段階)に従いそれぞれの組合せ毎に MOR_v 分布のシミュレーションを行い、MOR_v の計算値の累積分布と実験値の累積分布を比較した。そのうち、 E_v が正規分布の場合は図 3.5 に、 E_v が対数正規分布の場合は図 3.6 に、 E_v が 2P ワイブル分布の場合は図 3.7 にそれぞれ示した。

何れの図も、 F_v が正規分布または 2P ワイブル分布の場合、シミュレーションによる MOR_v は累積確率が 0.2 以下と 0.8 以上で実験値に対し多少ずれが生じているが、全体的に実験値とほぼ一致している。また、 F_v が対数正規分布の場合、シミュレーションによる MOR_v は累積確率が 0.9 以上でわずかに実験値とずれが生じており、 E_v が 2P ワイブル分布の場合は累積確率が 0.2 以下でも外れているが、全体を見ると実験値と良く一致して

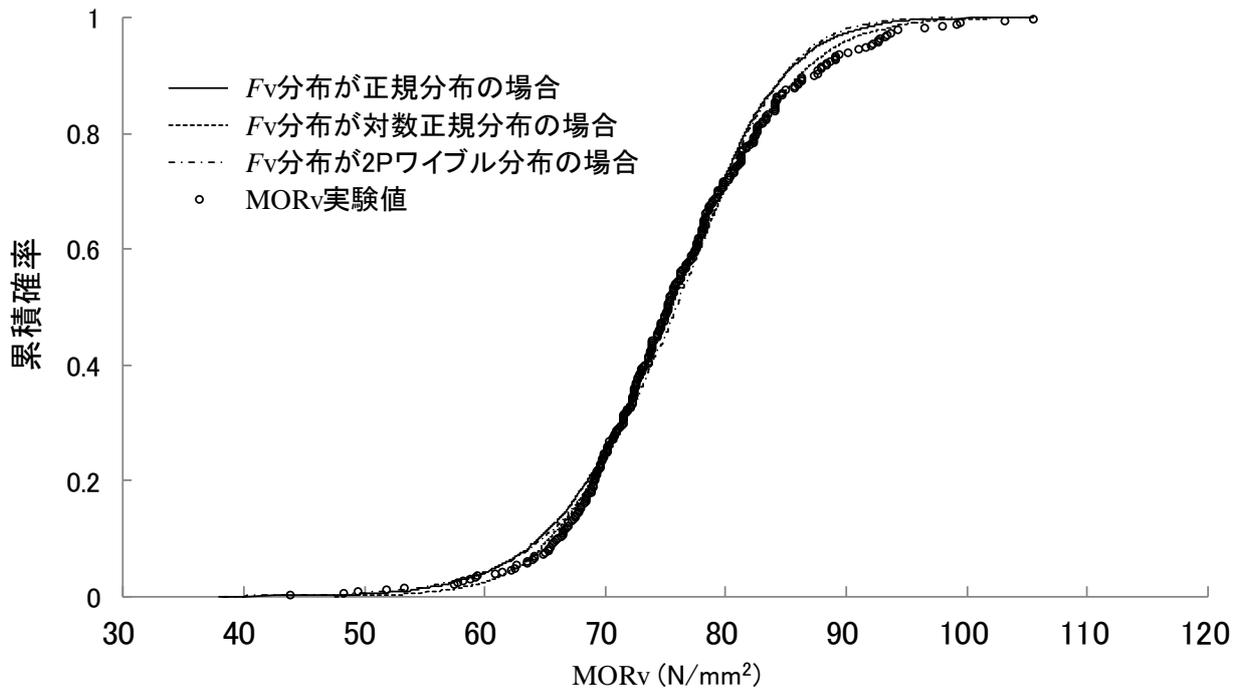


図3.5 MORvのシミュレーションにおける計算値と実験値の比較1

— E_v が正規分布の場合—

注: MORv: LVLの縦使い方向の曲げ強度を表す。 E_v : 表3.1を参照。 F_v : 表3.3を参照。

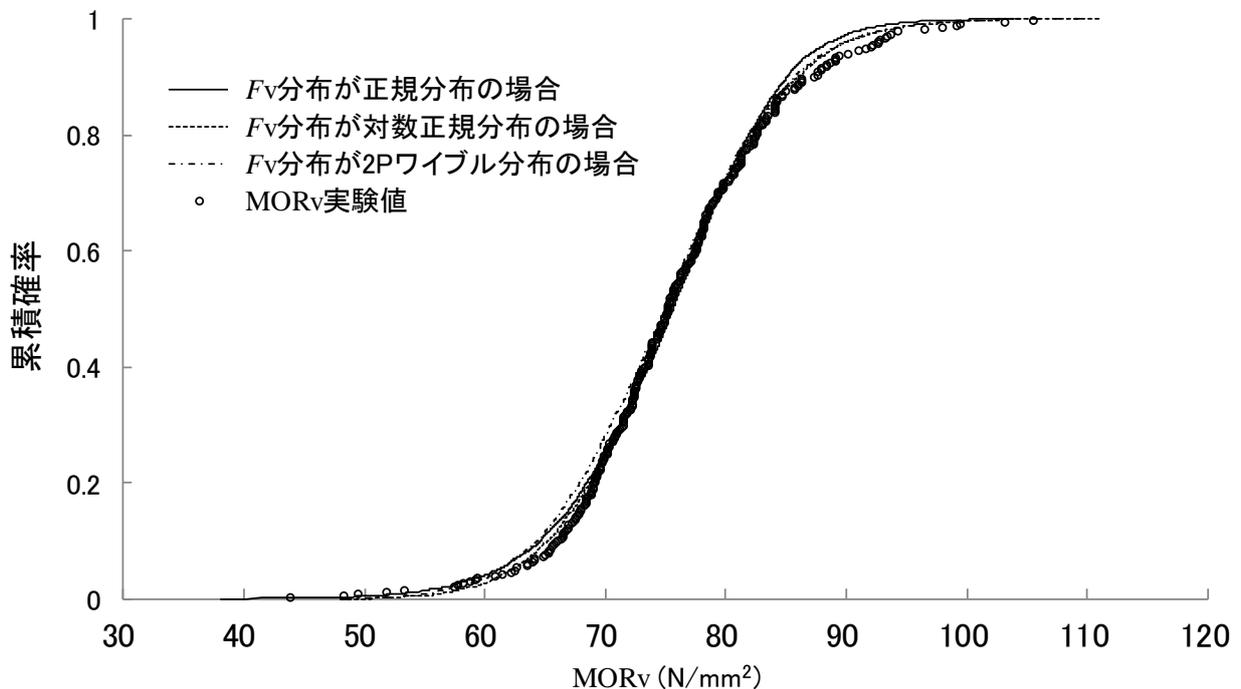


図3.6 MORvのシミュレーションにおける計算値と実験値の比較2

— E_v が対数正規分布の場合—

注: MORv: 図3.5を参照。 E_v : 表3.1を参照。 F_v : 表3.3を参照。

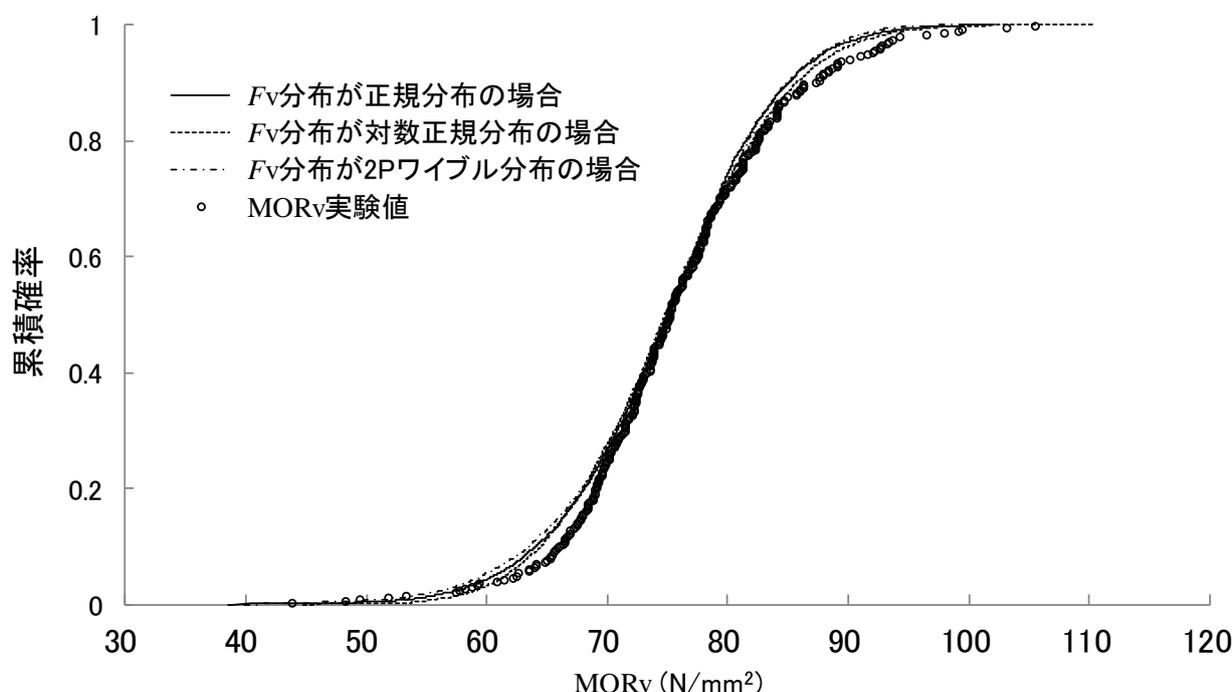


図3.7 MORvのシミュレーションにおける計算値と実験値の比較3

— E_v が2Pワイブル分布の場合

注: MORv: 図3.5を参照。 E_v : 表3.1を参照。 F_v : 表3.3を参照。

いる。したがって、 E_v と F_v の何れの分布の組合せの場合も、(第2段階)による適合性が確認された。

(b) 引張強度

3.4.2のアルゴリズムによる F_t 分布の推定値と、(第1段階)のK-S検定による適合性の

表3.4 F_t 分布の推定値とK-S検定による適合性の確認結果

E_t 分布形	F_t 分布形	F_t 分布の推定値					残差 二乗和	K-S検定	
		Pe_1	Pe_2	Pf_1	Pf_2	R_{E-F}		dn	d(0.05, 177)
正規分布	正規分布	14.48	1.86	64.00	10.98	0.57	379.67	0.055	0.102
正規分布	対数正規分布	14.48	1.86	4.18	0.20	0.47	384.07	0.059	0.102
正規分布	2Pワイブル分布	14.48	1.86	66.90	7.84	0.59	431.77	0.071	0.102
対数正規分布	正規分布	2.66	0.12	64.60	10.86	0.51	397.26	0.058	0.102
対数正規分布	対数正規分布	2.66	0.12	4.18	0.20	0.48	372.28	0.047	0.102
対数正規分布	2Pワイブル分布	2.66	0.12	66.95	8.24	0.53	456.23	0.068	0.102
2Pワイブル分布	正規分布	15.16	9.97	64.00	10.68	0.55	377.46	0.053	0.102
2Pワイブル分布	対数正規分布	15.16	9.97	4.18	0.19	0.44	385.16	0.059	0.102
2Pワイブル分布	2Pワイブル分布	15.16	9.97	66.17	8.11	0.60	393.52	0.065	0.102

注: E_t : エレメントの平使い方向の曲げヤング係数を用いて代用した引張ヤング係数を表す。 F_t : エレメントの引張強度を表す。 Pe_1, Pe_2 : E_t 分布のパラメータを表すが、 E_t 分布が正規分布または対数正規分布の場合、 Pe_1 は平均値、 Pe_2 は標準偏差を表し(E_t 分布が正規分布の場合のみ、 Pe_1 と Pe_2 の単位は kN/mm^2 となる)、 E_t 分布が2Pワイブル分布の場合、 Pe_1 は尺度パラメータ、 Pe_2 は形状パラメータを表す(Pe_1 の単位は kN/mm^2 となる)。 Pf_1, Pf_2 : F_t 分布のパラメータを表すが、 F_t 分布が正規分布または対数正規分布の場合、 Pf_1 は平均値、 Pf_2 は標準偏差を表し(F_t 分布が正規分布の場合のみ、 Pf_1 と Pf_2 の単位は N/mm^2 となる)、 F_t 分布が2Pワイブル分布の場合、 Pf_1 は尺度パラメータ、 Pf_2 は形状パラメータを表す(Pf_1 の単位は N/mm^2 となる)。 R_{E-F} : E_t と F_t 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。

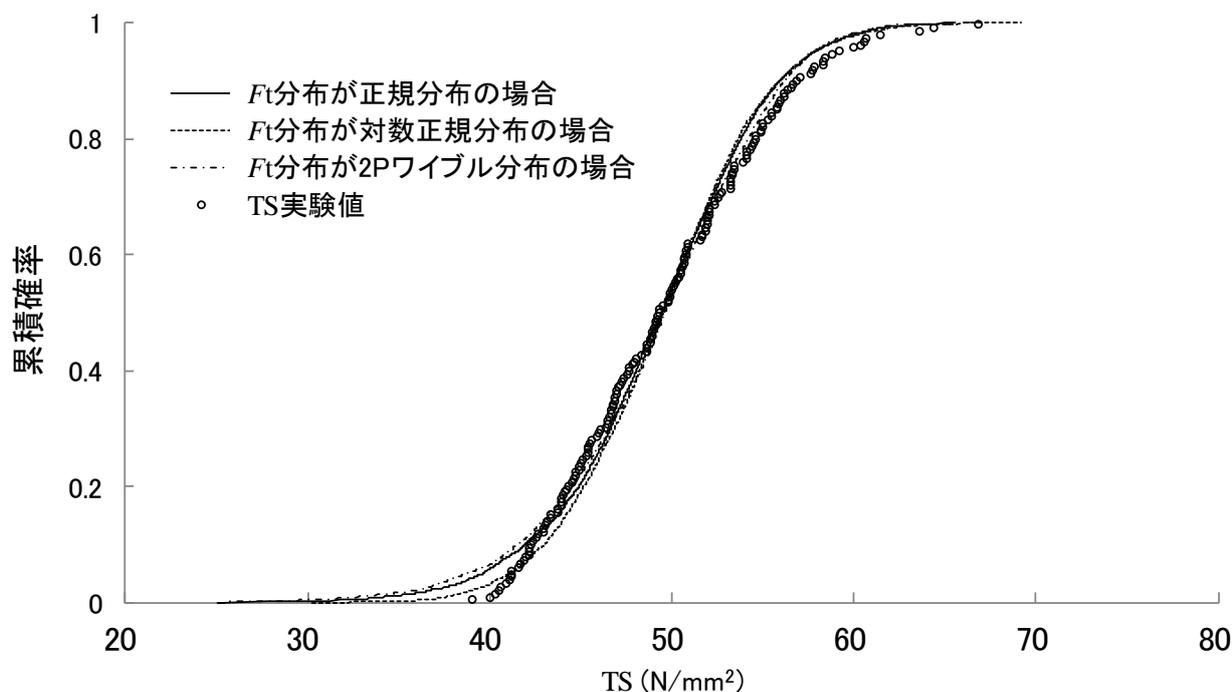


図3.8 TSにおけるシミュレーションの計算値と実験値の比較1

— E_t が正規分布の場合—

注: TS: LVLの引張強度を表す。 E_t : 表3.4を参照。 F_t : 表3.4を参照。

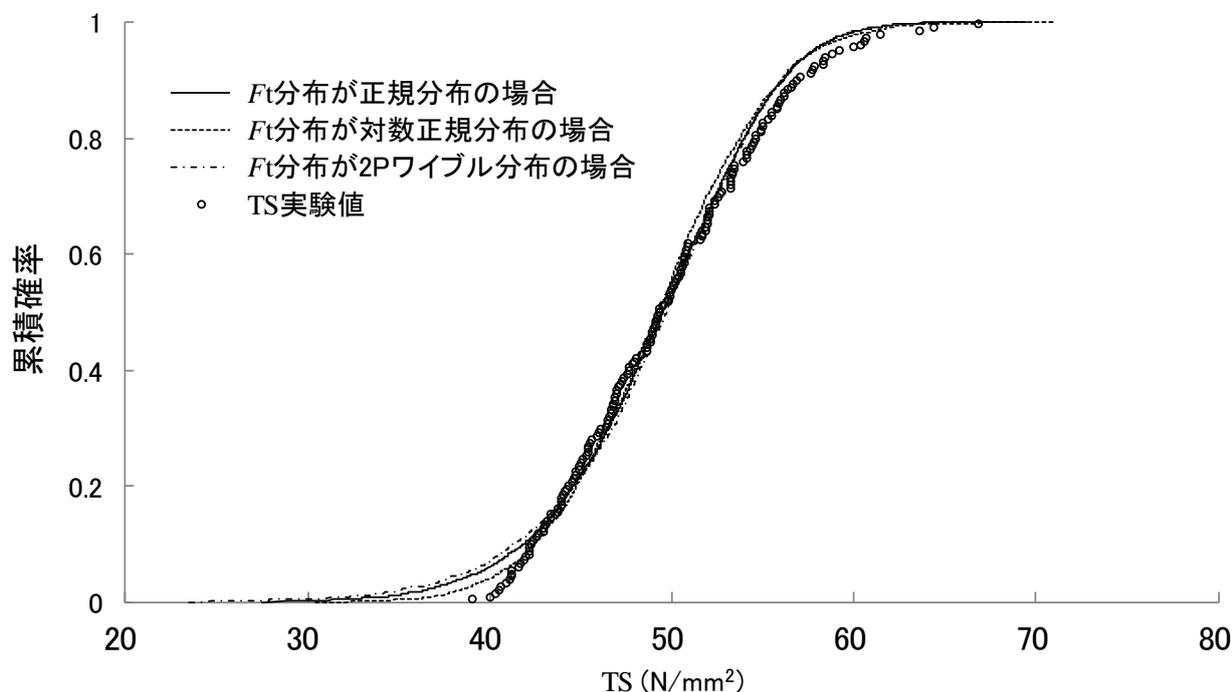


図3.9 TSにおけるシミュレーションの計算値と実験値の比較2

— E_t が対数正規分布の場合—

注: TS: 図3.8を参照。 E_t : 表3.4を参照。 F_t : 表3.4を参照。

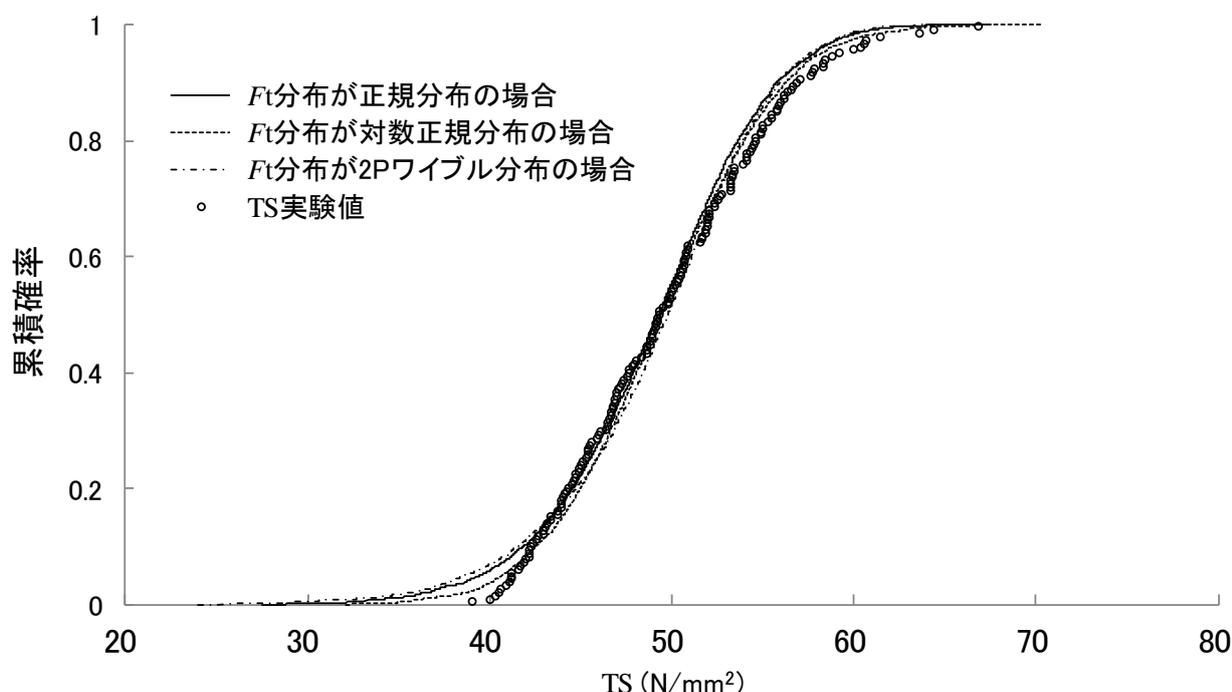


図3.10 TSにおけるシミュレーションの計算値と実験値の比較3

— E_t が2Pワイブル分布の場合 —

注: TS: 図3.8を参照。 E_t : 表3.4を参照。 F_t : 表3.4を参照。

確認結果を表 3.4 に示した。同表より、何れの分布の組合せも dn が $d(0.05, 177)$ よりも小さくなり、(第1段階)による適合性が確認された。

次に、 E_t と F_t の全ての分布の組合せの推定値は、(第2段階)に従いそれぞれの分布の組合せ毎に TS 分布のシミュレーションを行い、求められた TS の計算値の累積分布と実験値の累積分布とを比較した。そのうち、 E_t が正規分布の場合は図 3.8 に、 E_t が対数正規分布の場合は図 3.9 に、 E_t が 2P ワイブル分布の場合は図 3.10 にそれぞれ示した。

何れの図を見ても、シミュレーションによる TS は、 E_t が正規分布及び 2P ワイブル分布の場合は累積確率が 0.1 以下で、 E_t が対数正規分布の場合は累積確率が 0.05 以下で差が生じ、実験値より小さな数値も見られる。しかし、何れの図もそれぞれの分布毎に全体を見ると、シミュレーションによる TS は TS の実験値とほぼ一致している。したがって、 E_t と F_t が何れの分布の組合せの場合も、(第2段階)による適合性が確認された。

(c) 圧縮強度

3.4.2 のアルゴリズムによる F_c 分布の推定値と、(第1段階)の K-S 検定による適合性の確認結果を表 3.5 に示した。同表より、 F_c 分布を正規分布または対数正規分布と仮定した推定値の場合、 E_c 分布が何れの分布であっても dn が $d(0.05, 477)$ よりも小さくなり、K-S 検定に適合した。したがって、この $3 \times 2 = 6$ 通りの推定値については、(第1段階)による適合性が確認された。しかし、 F_c 分布を 2P ワイブル分布と仮定した推定値の場合、 E_c 分布が何れの分布であっても dn が $d(0.05, 477)$ よりも大きくなり、この $3 \times 1 = 3$ 通りの推定値については、(第1段階)による適合性を確認することはできなかった。

次に、(第1段階)による適合性が確認された $3 \times 2 = 6$ 通りの分布の組合せの推定値毎に、

表3.5 F_c 分布の推定値とK-S検定による適合性の確認結果

E_c 分布形	F_c 分布形	F_c 分布の推定値					残差 二乗和	K-S検定	
		Pe_1	Pe_2	Pf_1	Pf_2	R_{E-F}		dn	d(0.05, 447)
正規分布	正規分布	14.48	1.86	73.86	8.50	0.57	1247.91	0.061	0.064
正規分布	対数正規分布	14.48	1.86	4.30	0.12	0.54	1225.15	0.056	0.064
正規分布	2Pワイブル分布	14.48	1.86	76.28	12.28	0.60	1344.28	0.072	0.064
対数正規分布	正規分布	2.66	0.12	75.02	9.29	0.55	1370.49	0.061	0.064
対数正規分布	対数正規分布	2.66	0.12	4.30	0.12	0.54	1201.39	0.057	0.064
対数正規分布	2Pワイブル分布	2.66	0.12	76.46	12.39	0.59	1366.11	0.076	0.064
2Pワイブル分布	正規分布	15.16	9.97	73.50	8.50	0.58	1265.83	0.058	0.064
2Pワイブル分布	対数正規分布	15.16	9.97	4.30	0.12	0.54	1231.90	0.059	0.064
2Pワイブル分布	2Pワイブル分布	15.16	9.97	75.91	12.24	0.62	1489.56	0.118	0.064

注: E_c : エレメントの平使い方向の曲げヤング係数を用いて代用した圧縮ヤング係数を表す。 F_c : エレメントの圧縮強さを表す。 Pe_1, Pe_2 : E_c 分布のパラメータを表すが、 E_c 分布が正規分布または対数正規分布の場合、 Pe_1 は平均値、 Pe_2 は標準偏差を表し(E_c 分布が正規分布の場合のみ、 Pe_1 と Pe_2 の単位は kN/mm^2 となる)、 E_c 分布が2Pワイブル分布の場合、 Pe_1 は尺度パラメータ、 Pe_2 は形状パラメータを表す(Pe_1 の単位は kN/mm^2 となる)。 Pf_1, Pf_2 : F_c 分布のパラメータを表すが、 F_c 分布が正規分布または対数正規分布の場合、 Pf_1 は平均値、 Pf_2 は標準偏差を表し(F_c 分布が正規分布の場合のみ、 Pf_1 と Pf_2 の単位は N/mm^2 となる)、 F_c 分布が2Pワイブル分布の場合、 Pf_1 は尺度パラメータ、 Pf_2 は形状パラメータを表す(Pf_1 の単位は N/mm^2 となる)。 R_{E-F} : E_c と F_c の相関係数を表す。dn: 表3.1を参照。d(0.05, 447): 両側危険率5%で試料数447の場合のK-S検定における基準限界値を表す。

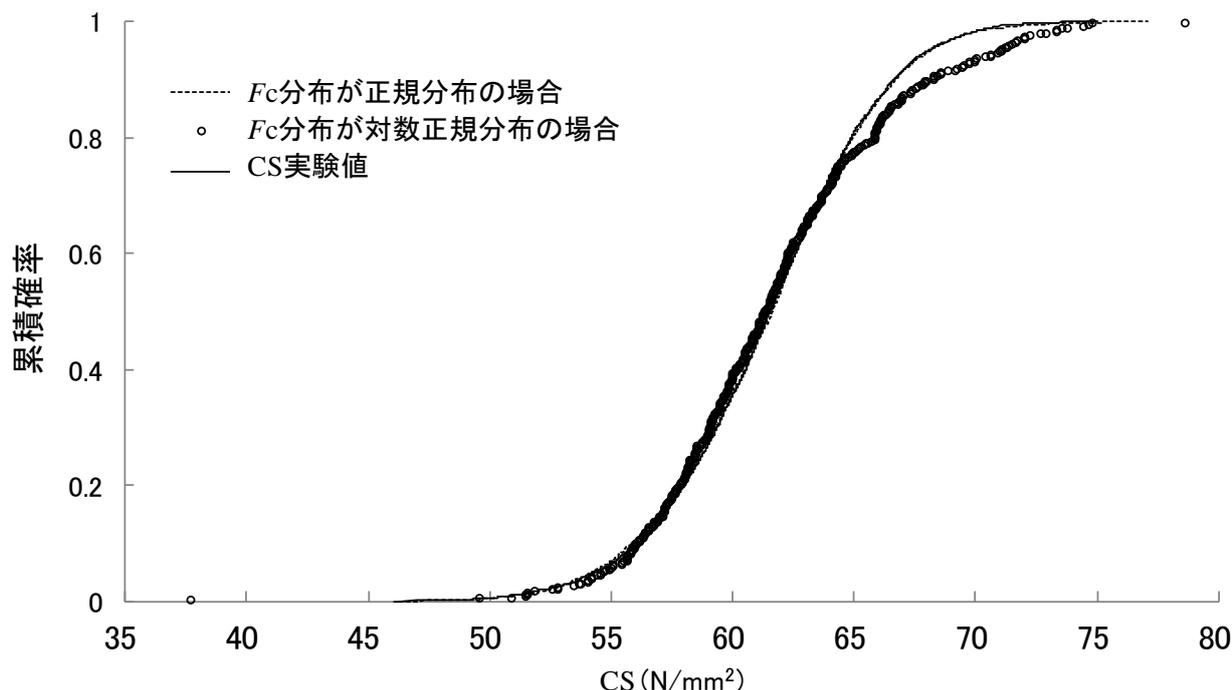


図3.11 CSにおけるシミュレーションの計算値と実験値の比較1

— E_c が正規分布の場合 —

注: CS: LVLの圧縮強度を表す。 E_c : 表3.5を参照。 F_c : 表3.5を参照。

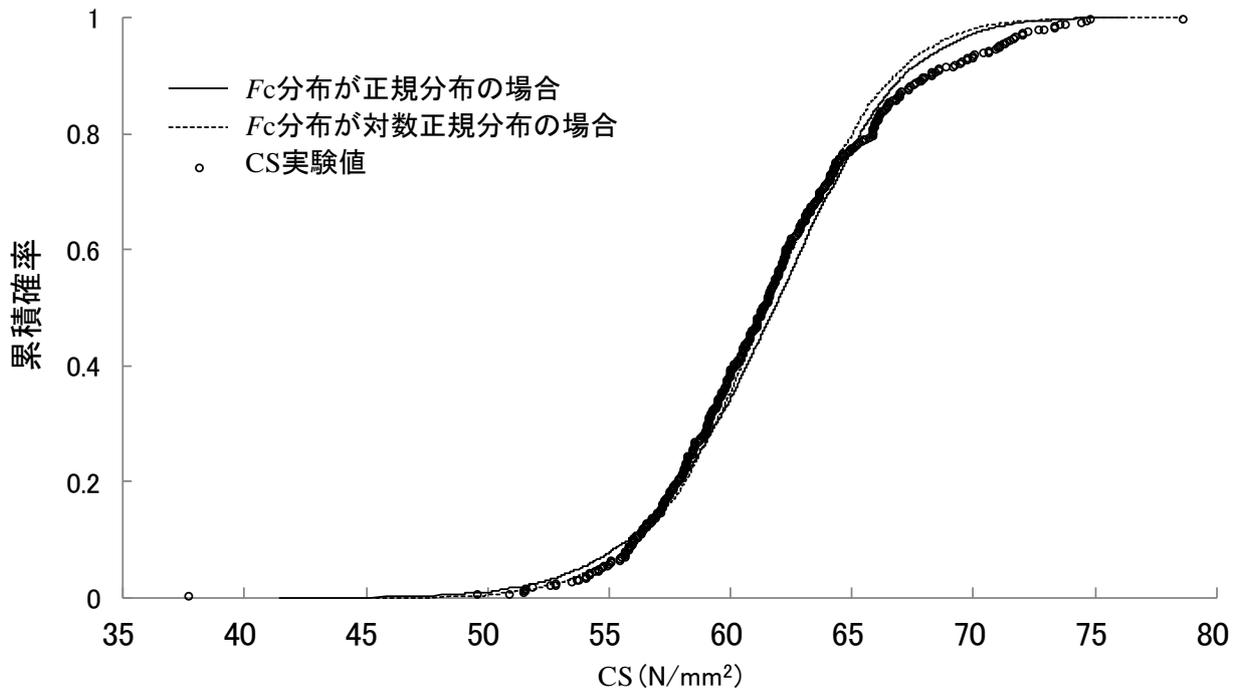


図3.12 CSにおけるシミュレーションの計算値と実験値の比較2

— E_c が対数正規分布の場合—

注: CS: 図3.11を参照。 E_c : 表3.5を参照。 F_c : 表3.5を参照。

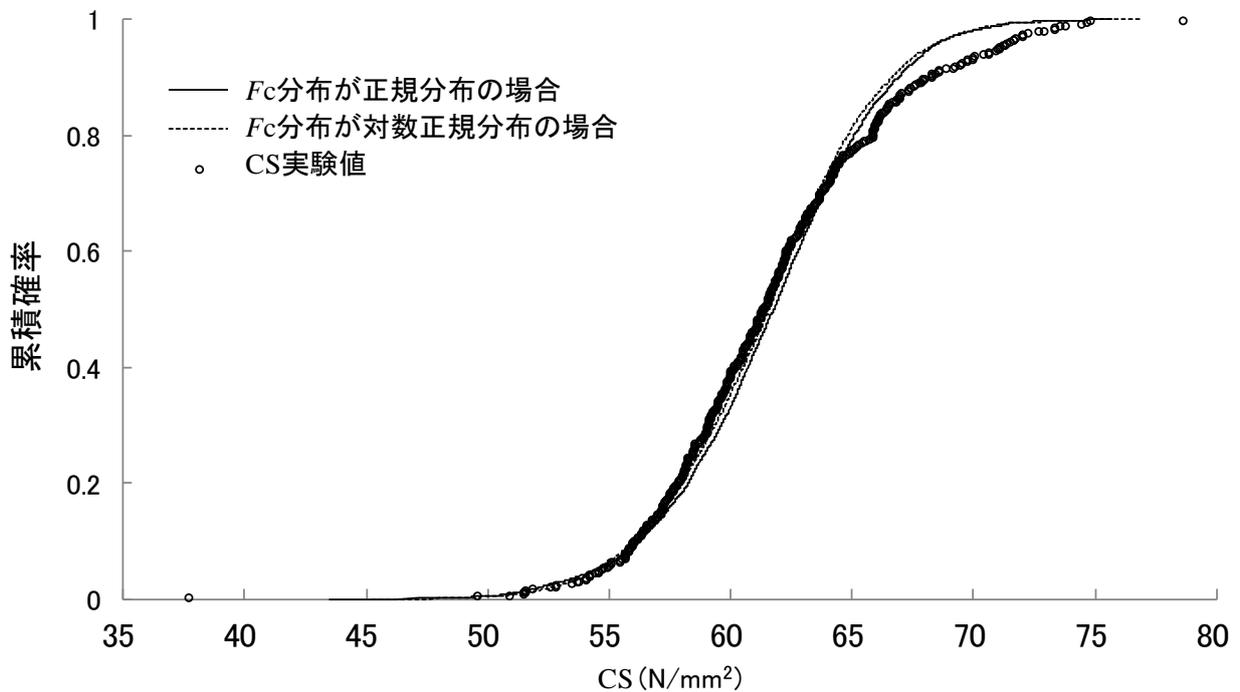


図3.13 CSにおけるシミュレーションの計算値と実験値の比較3

— E_c が2Pワイブル分布の場合—

注: CS: 図3.11を参照。 E_c : 表3.5を参照。 F_c : 表3.5を参照。

(第2段階)に従い MOR_v 分布のシミュレーションを行い、求められた MOR_v の計算値の累積分布と実験値の累積分布を比較した。そのうち、E_c が正規分布の場合は図 3.11 に、E_t が対数正規分布の場合は図 3.12 に、E_c が 2P ワイブル分布の場合は図 3.13 にそれぞれ示した。

何れの図を見ても、シミュレーションによる CS は累積確率が 0.8 以上で明らかに差が生じているが、それ以下の累積確率では CS の実験値とほぼ一致している。したがって、F_c 分布が正規分布または対数正規分布の場合、(第2段階)による適合性が確認された。

3.5 LVL の平使い方向の曲げ試験におけるエレメントの強度分布の推定

3.5.1 引張応力破壊

3.5.1.1 クライテリア

(a) 最外縁応力破壊を仮定する場合

図 3.1 に示した積層数 N の LVL を平使い方向で曲げた場合、平使い方向の曲げモーメントが LVL に加わりひずみが生じる。そこで、 i 層目のエレメントに発生するひずみ ε_i と表すと、 ε_i はエレメントの曲げモーメントに起因するひずみ ε_{i-b} と軸力に起因するひずみ ε_{i-t} に分けられることから、次のとおり表せられる。

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{i-t} + \varepsilon_{i-b} \quad (3.11)$$

更に、LVL 全体と各層の曲率が一致することから、LVL と各層の曲率を ρ と表すと、LVL の曲げモーメント M と LVL 各層の曲げモーメント M_i との関係は、次のとおり表される。

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{(EI)_e} = \frac{M_i}{Eh_i I_{i-NN}} \quad \therefore M_i = \left\{ \frac{Eh_i}{(EI)_e} \right\} M \quad (3.12)$$

また、LVL 上面からの距離を y と表すと、 ε_i は λ からの距離に比例し ρ とは反比例するので、(3.11)式に及び(3.12)式を用いて次のとおり表される。

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{i-t} + \varepsilon_{i-b} = \frac{y - \lambda}{\rho} = \frac{M}{(EI)_e} (y - \lambda) \quad (3.13)$$

ここで、エレメント各層で曲げモーメントに起因するひずみ ε_{i-b} が生じないのは、 λ からの距離 $|y - \lambda|$ が $|g_i|$ の地点である。したがって、LVL の引張側最外層(以降、引張側最外層という)の軸力に起因する引張応力 σ_{tN} は、 $|y - \lambda| = |g_N|$ を(3.13)式に代入し Eh_N を乗じることにより、次のとおり表される。

$$\sigma_{tN} = \frac{MEh_N}{(EI)_e} |g_N| \quad (3.14)$$

また、引張側最外層の曲げモーメントに起因する応力 σ_{hN} は、(3.12)式による引張側最外層の曲げモーメント M_N をその層の断面係数 Z_N で除して、次のとおり表される。

$$\sigma_{hN} = \frac{MEh_N T}{(EI)_e 2} \quad (3.15)$$

引張側最外縁のひずみ ε_N は(3.11)式より ε_{N-b} と ε_{N-t} の和であることから、引張側最外縁の応力 $\sigma_{(lg_N+T/2)}$ は σ_{tN} と σ_{hN} の複合応力となる。したがって、 $\sigma_{(lg_N+T/2)}$ は(3.14)式と(3.15)式の和から、次のとおり表される。

$$\sigma_{t(|g_N|+T/2)} = \frac{MEh_N}{(EI)_e} \left(|g_N| + \frac{T}{2} \right) \quad (3.16)$$

ここで、LVLの平使い方向の曲げにおける破壊クライテリアとして、引張側最外縁の応力がその層の引張強度 Ft_N に達した時の破壊(以降、最外縁応力破壊という)を仮定すると、クライテリアは次式で表される。

$$\frac{\sigma_{(|g_N|+T/2)}}{Ft_N} = 1 \quad (3.17)$$

以上より、(3.16)式に(3.17)式を代入して LVL 破壊時の曲げ応力 M が求められることから、MORh の推定式は M を LVL の断面係数 $Ze (= N^2BT^2/6)$ で除して次のとおり求められる。

$$MORh = \left\{ \frac{(EI)_e}{Eh_N Ze} \right\} \left(\frac{2Ft_N}{2|g_N| + T} \right) \quad (3.18)$$

(b) 最外層応力破壊を仮定する場合

(a)では、平使い方向の曲げで LVL の引張側最外層に生じる応力が、 σ_{t_N} と σ_{h_N} の合成により表されると考えた。ただし、図 3.1 に示す 8ply~17ply と積層数が多いことから、引張側最外層に生じる全ての応力に対し、曲げ応力と引張応力のそれぞれ占める割合を調べてみた。

まず、8ply~17ply を対象に各層 500 体ずつの仮想 LVL を作り、引張側最外層生じる曲げ応力と引張応力の平均の割合を算出した。引張側最外層に生じる全ての応力を 100%とした場合、8ply では曲げ応力が 12.5%で引張応力が 87.5%となり、引張応力の占める割合が非常に大きくなった。この引張応力の割合は積層数が増す毎に増大し、17ply では曲げ応力が 5.9%に対し引張応力が 94.9%までになった。

以上の結果に加え、LVL ではエレメントの厚さが数ミリ程度と非常に薄いことも考慮すると、LVL の引張側最外層の生じるひずみはほぼ ϵ_{N-t} のみと考えられ、応力も σ_{t_N} のみと考えられる。そこで、LVL の平使い方向の曲げにおける破壊クライテリアとして、引張側最外層の応力がその層の引張強度に達した時の破壊(以降、最外層応力破壊という)を仮定すると、クライテリアは次式で表される。

$$\frac{\sigma_{t_N}}{Ft_N} = 1 \quad (3.19)$$

したがって、(3.14)式に(3.19)式を代入して M が求められることから、MORh の推定式は M を Ze で除して次のとおり表される。

$$MORh = \left\{ \frac{(EI)_e}{Eh_N Ze} \right\} \left(\frac{Ft_N}{|g_N|} \right) \quad (3.20)$$

3.5.1.2 アルゴリズム

MORh の推定式である(3.18)式または(3.20)式の右辺は、 N 、 B 及び T を除くと、各エレメントの Eh と引張側最外層の Ft で構成される。したがって、LVL の平使い方向の曲げにおいて引張応力破壊のクライテリアを仮定する場合、エレメントの強度分布のパラメータは 5 次元ベクトル $(Pe_1, Pe_2, Pt_1, Pt_2, R_{E-T})$ で表される。ここで、 Ft 分布として正規分布また

は対数正規分布を仮定する場合、 Pt_1 は平均値、 Pt_2 は標準偏差を表し、正規分布を仮定する場合のみ、 Pt_1 と Pt_2 の単位は N/mm^2 となる。また、 Ft 分布として 2P ワイブル分布を仮定する場合、 Pt_1 は尺度パラメータ、 Pt_2 は形状パラメータを表し、 Pt_1 の単位は N/mm^2 である。更に、 R_{E-T} は Eh と Ft の相関係数を表す。

以上で示した $(Pe_1, Pe_2, Pt_1, Pt_2, R_{E-T})$ のうち、 (Pe_1, Pe_2) は表 3.2 に示す推定値を用いることができる。したがって、残りの 3 次元ベクトル (Pt_1, Pt_2, R_{E-T}) が推定対象となることから、これらのパラメータを推定するアルゴリズムは 3.4.2 を準用し、次のとおりとする。ただし、記号の意味はこれまで示してきたとおりである。

- ① Eh 分布と Ft 分布のそれぞれで、正規分布、対数正規分布または 2P ワイブル分布の何れかを仮定する。
- ② 推定対象となる (Pt_1, Pt_2, R_{E-T}) に、初期値として (Plt_1, Plt_2, RI_{E-T}) ($0 < Plt_2 < Plt_1, 0 < RI_{E-T} < 1$) を与える。
- ③ MORh (積層数 N) の実験値を全て昇順に並び替え、それぞれ昇順番号 s ($s=1, \dots, L(N)$) を貼付して $EX_{(N,s)}$ と表す。
- ④ 0 以上 1 未満の独立一様乱数を 2 個発生させて、それぞれ逆関数法³⁵⁾により独立標準正規乱数 (e_1, e_2) に変換する。更に、 (e_1, e_2) に(3.9)式を適用して、相関係数が RI_{E-T} の 2 次元有相関標準正規乱数 (r_1, r_2) に変換³⁵⁾する。
- ⑤ ④の操作を N 回繰り返し、それぞれ N 個の e_1, e_2, r_1 及び r_2 を求める。更に、 N 個の e_1 を要素とする N 次元ベクトルを \mathbf{e}_1 と表し、以下同様に N 個の e_2 を \mathbf{e}_2 、 N 個の r_1 を \mathbf{r}_1 及び N 個の r_2 を \mathbf{r}_2 と表す。
- ⑥ \mathbf{r}_1 の各要素を分布が (Pe_1, Pe_2) に従う N 個の Eh に変換^{49,50)}し、これらを要素とする N 次元ベクトルを \mathbf{Eh} と表す。ただし、 (Pe_1, Pe_2) は表 3.2 に示す値のうち、①で仮定した分布の値で固定する。
- ⑦ \mathbf{r}_2 の各要素を分布が (Plt_1, Plt_2) に従う N 個の Ft に変換^{49,50)}し、これらを要素とする N 次元ベクトルを \mathbf{Ft} と表す。
- ⑧ 積層数 N と \mathbf{E} の各要素を(3.3)式に代入し、MOEh (積層数 N) の推定値を求める。
- ⑨ 積層数 N 、MOEh (積層数 N) の推定値、 \mathbf{Eh} 及び \mathbf{Ft} の各要素をクライテリアとして最外縁応力破壊を仮定する場合は(3.18)式、最外層応力破壊を仮定する場合は(3.20)式に代入し、MORh (積層数 N) の推定値を求める。
- ⑩ ④～⑨を $L(N)$ 回繰り返し、求められた MORh (積層数 N) の推定値を全て昇順に並び替え、昇順番号 s ($s=1, \dots, L(N)$) を貼付して $CAL_{(N,s)}$ と表す。
- ⑪ $s=1, \dots, L(N)$ で、 $CAL_{(N,s)}$ に用いている \mathbf{e}_1 と \mathbf{e}_2 の全ての要素の値を固定する。
- ⑫ $N=8, 9, 11, \dots, 17$ の積層数毎に、③～⑪を繰り返す。
- ⑬ 以下に示す $EX_{(N,s)}$ と $CAL_{(N,s)}$ の残差二乗和 St が最小になるよう、 Plt_1, Plt_2 及び RI_{E-T} の値から動かしていき、 Pt_1, Pt_2 及び R_{E-T} の収束値を求める⁵¹⁾。

$$St = \frac{1}{2} \sum_{N=8}^9 \sum_{s=1}^{L(N)} (EX_{(N,s)} - CAL_{(N,s)})^2 + \frac{1}{2} \sum_{N=11}^{17} \sum_{s=1}^{L(N)} (EX_{(N,s)} - CAL_{(N,s)})^2$$

- ⑭ (Pt_1, Pt_2, R_{E-T}) の収束値が正規方程式の解として収束したか、(3.10)式を用いて確認する

⁵¹⁾。ただし、式中の S_f は S_t に、 P_{f1} は P_{t1} に、 P_{f2} は P_{t2} に、 R_{E-F} は R_{E-T} にそれぞれ読み替える。

- ⑮ ②～⑭を繰り返して 20000 個の $(P_{t1}, P_{t2}, R_{E-T})$ を計算し、そのなかで S_t が最小となる $(P_{t1}, P_{t2}, R_{E-T})$ を推定値とする。

3.5.1.3 結果

E_h と F_t によるエレメントの強度分布は 3.4.3 と同様に分布の組合せが $3 \times 3 = 9$ 通りとなることから、それぞれの組合せ毎に 3.5.1.2 のアルゴリズムによる推定を行った。以上の 9 種類の推定値については、何れも(3.10)式の偏微分係数がそれぞれ 0 に極めて近い数値となり、正規方程式の解として収束していることを確認した。更に、それぞれの分布の組合せ毎に 20000 個の収束値を追加して再計算しても、残差二乗和を含め値の変動が生じないかごく僅かであることを確認した。

推定値の適合性については 3.4.3 を準用し、次の手順で確認を行った。ただし、記号の意味はこれまでと同様である。

- ① E_h と F_t の分布の組合せで $3 \times 3 = 9$ 通りとなるエレメントの強度分布の推定値のうち、何れかの分布の組合せの推定値を選択する。
- ② 0 以上 1 未満の独立一様乱数を 2 個発生させて、それぞれ逆関数法³⁵⁾により独立標準正規乱数 (e_1, e_2) に変換する。
- ③ (e_1, e_2) に(3.9)式を適用して、相関係数が R_{E-T} の 2 次元有相関標準正規乱数 (r_1, r_2) に変換³⁵⁾する。ただし、 R_{E-T} は 3.5.1.2 による推定値のうち、①で選択した分布の組合せの値を用いる。
- ④ ②～③の操作を N 回繰り返し、それぞれ N 個の r_1 及び r_2 を求める。更に、 N 個の r_1 を要素とする N 次元ベクトルを \mathbf{r}_1 と表し、以下同様に N 個の r_2 を \mathbf{r}_2 と表す。
- ⑤ \mathbf{r}_1 の各要素を分布が (P_{e1}, P_{e2}) に従う N 個の E_h に変換^{49,50)}し、これらを要素とする N 次元ベクトルを \mathbf{Eh} と表す。ただし、 (P_{e1}, P_{e2}) は表 3.2 に示す値のうち、①で選択した分布の値を用いる。
- ⑥ \mathbf{r}_2 の各要素を分布が (P_{t1}, P_{t2}) に従う N 個の F_t に変換^{49,50)}し、これらを要素とする N 次元ベクトルを \mathbf{Ft} と表す。ただし、 (P_{t1}, P_{t2}) は 3.5.1.2 による推定値のうち、①で選択した分布の組み合わせの値を用いる。
- ⑦ 積層数 N と \mathbf{Eh} の各要素を(3.3)式に代入し、 MOE_h (積層数 N) の計算値を求める。
- ⑧ 積層数 N 、 MOE_h (積層数 N) の計算値、 \mathbf{Eh} と \mathbf{Ft} の各要素をクライテリアとして最外縁応力破壊を仮定する場合は(3.18)式に、クライテリアとして最外層応力破壊を仮定する場合は(3.20)式に代入し、 MOR_h (積層数 N) の計算値を求める。
- ⑨ ②～⑧を 500 回繰り返し、 MOR_h (積層数 N) の計算値を 500 個求める。
- ⑩ 積層数 $N=8, 9, 11, \dots, 17$ で②～⑨を繰り返し、4500 個の MOR_h の計算値を求める。
- ⑪ 4500 個の MOR_h の計算値について、正規分布、対数正規分布または 2P ワイブル分布の何れかと仮定し、最も適合する分布を MOR_h の計算値の分布とする。
- ⑫ ⑪による MOR_h の計算値の累積分布に対し、積層数 $N=8, 9, 11, \dots, 17$ の MOR_h の実験

値を用いて危険率 5%(両側検定)による K-S 検定を行うことにより、①で選択した分布の組合せによる推定値の適合性を評価する(第 1 段階)。

- ⑬ 4500 個の MORh の計算値を昇順で並べ、累積確率をメディアンランクで評価する。
- ⑭ 積層数 $N=8, 9, 11, \dots, 17$ の MORh の実験値についても昇順に並べ替え、累積確率をメディアンランクで評価する。
- ⑮ 累積確率をメディアンランクで評価した MORh の計算値と実験値を図示し、計算値と実験値のそれぞれの累積分布の一致の具合を目視にて確認することにより、①で選択した分布の組合せの推定値について適合性を評価する(第 2 段階)。

以上で示した(第 1 段階)は全ての分布の組合せによる推定値に対し適用し、(第 2 段階)は(第 1 段階)で適合した分布の組合せによる推定値のみに適用した。

また、3.5.1.2 で示したエレメントの強度分布は、表記は異なるがパラメータの構成は 3.4 の F_t 分布と同じである。そこで、3.4 で推定した F_t 分布についても適合性を有するか、同様に確認を行った。

(a) 最外縁応力破壊を仮定する場合

3.5.1.2 のアルゴリズムによる F_t 分布の推定値と、(第 1 段階)の K-S 検定による適合性の確認結果を表 3.6 に示した。同表より、 E_h と F_t の何れの分布の組合せも dn が $d(0.05, 226)$ よりも小さくなり、(第 1 段階)による適合性が確認された。

表3.6 F_t 分布の推定値とK-S検定による適合性の確認結果

—平使い方向の曲げのクライテリアを最外縁応力破壊と仮定した場合—

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 ₁	Pe ₂	Pt ₁	Pt ₂	R _{E-T}		dn	d(0.05, 226)
正規分布	正規分布	14.48	1.86	65.66	11.13	0.68	1720.36	0.063	0.090
正規分布	対数正規分布	14.48	1.86	4.17	0.17	0.68	1776.23	0.043	0.090
正規分布	2Pワイブル分布	14.48	1.86	70.35	6.58	0.74	1770.04	0.072	0.090
対数正規分布	正規分布	2.66	0.12	65.67	11.49	0.72	1738.26	0.059	0.090
対数正規分布	対数正規分布	2.66	0.12	4.17	0.17	0.68	1805.32	0.036	0.090
対数正規分布	2Pワイブル分布	2.66	0.12	70.18	6.82	0.70	1773.30	0.073	0.090
2Pワイブル分布	正規分布	15.16	9.97	65.69	11.17	0.72	1744.84	0.063	0.090
2Pワイブル分布	対数正規分布	15.16	9.97	4.17	0.16	0.70	1824.73	0.053	0.090
2Pワイブル分布	2Pワイブル分布	15.16	9.97	69.32	6.73	0.74	1858.47	0.071	0.090

注: Eh: 表3.2を参照。Ft: 平使い方向の曲げのクライテリアを最外縁応力破壊と仮定した場合の引張側最外層エレメントの引張強さを表す。Pe₁, Pe₂: 表3.2を参照。Pt₁, Pt₂: 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、Pt₁は平均値、Pt₂は標準偏差を表し(Ft分布が正規分布の場合のみ、Pt₁とPt₂の単位はN/mm²となる)、Ft分布が2Pワイブル分布の場合、Pt₁は尺度パラメータ、Pt₂は形状パラメータを表す(Pt₁の単位はN/mm²となる)。R_{E-T}: EhとFtの相関係数を表す。dn: 表3.1を参照。d(0.05, 226): 表3.2を参照。

次に、 E_h と F_t の全ての分布の組合せの推定値は、(第 2 段階)に従いそれぞれの分布の組合せ毎に MORh 分布のシミュレーションを行い、求められた MORh の計算値の累積分布と実験値の累積分布を比較した。そのうち、 E_h が正規分布の場合は図 3.14 に、 E_h が対数正規分布の場合は図 3.15 に、 E_h が 2P ワイブル分布の場合は図 3.16 にそれぞれ示した。

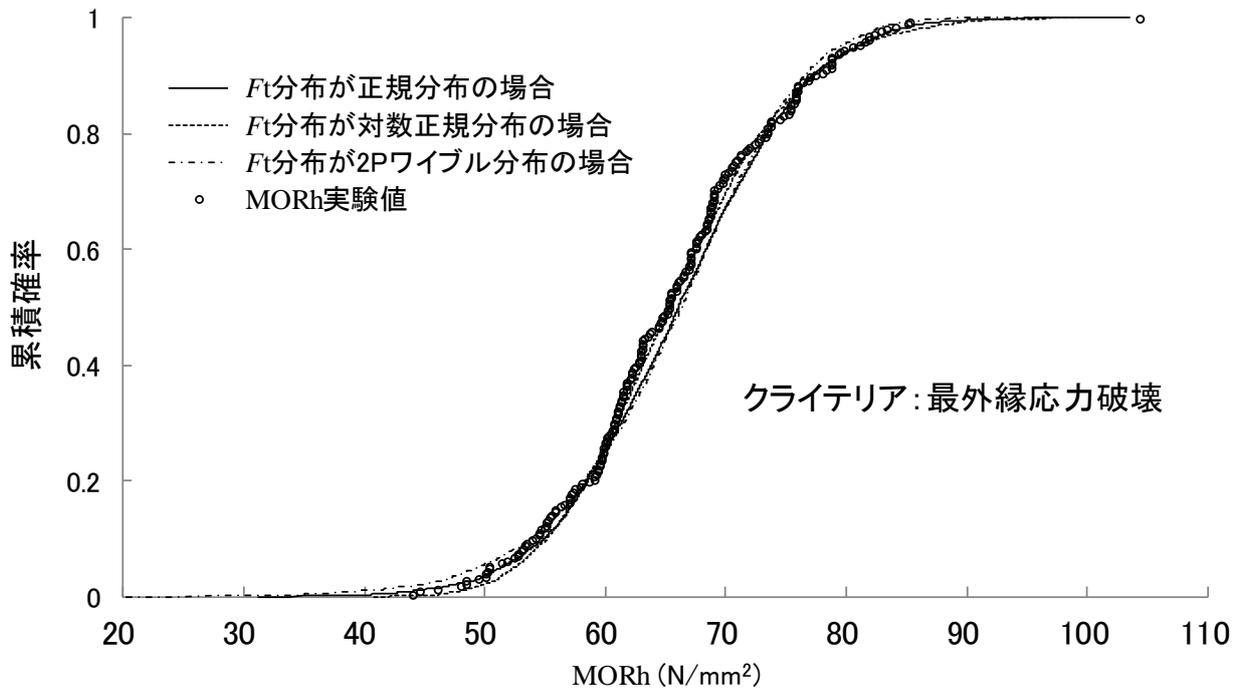


図3.14 MORhのシミュレーションにおける計算値と実験値の比較1
 — E_h が正規分布の場合—

注: MORh: LVLの平使い方向の曲げ強度を表す。 E_h : 表3.2を参照。 F_t : 表3.6を参照。

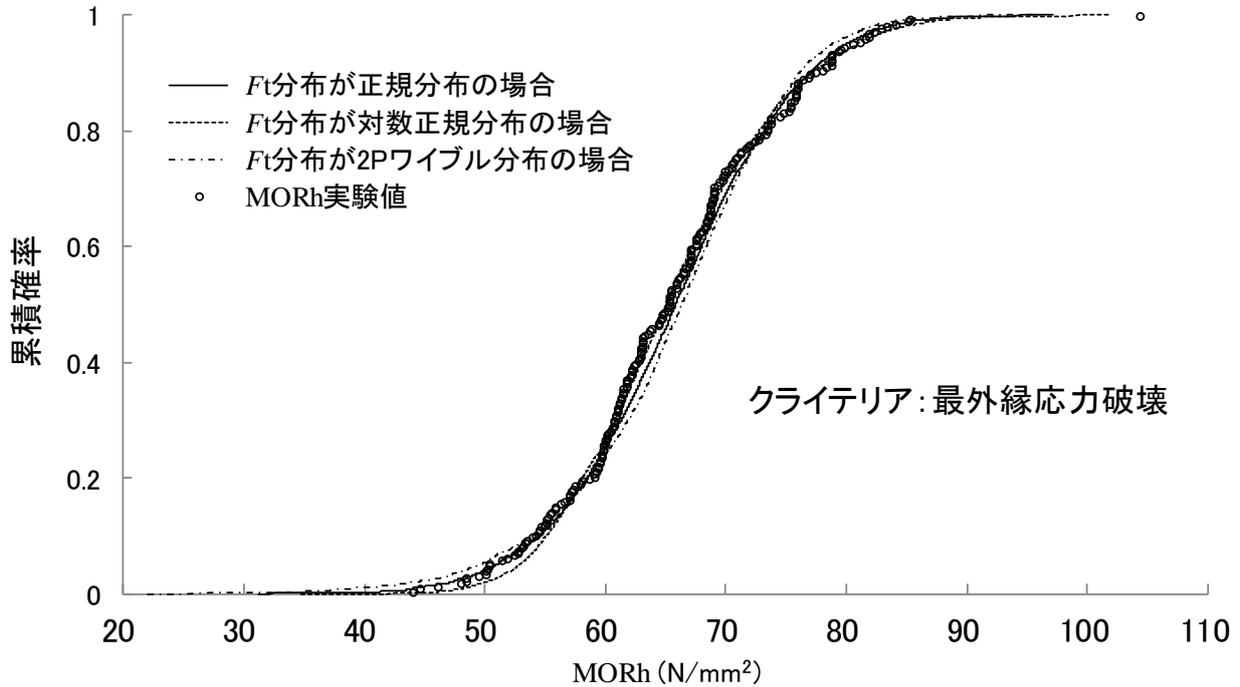


図3.15 MORhのシミュレーションにおける計算値と実験値の比較2
 — E_h が対数正規分布の場合—

注: MORh: 図3.14を参照。 E_h : 表3.2を参照。 F_t : 表3.6を参照。

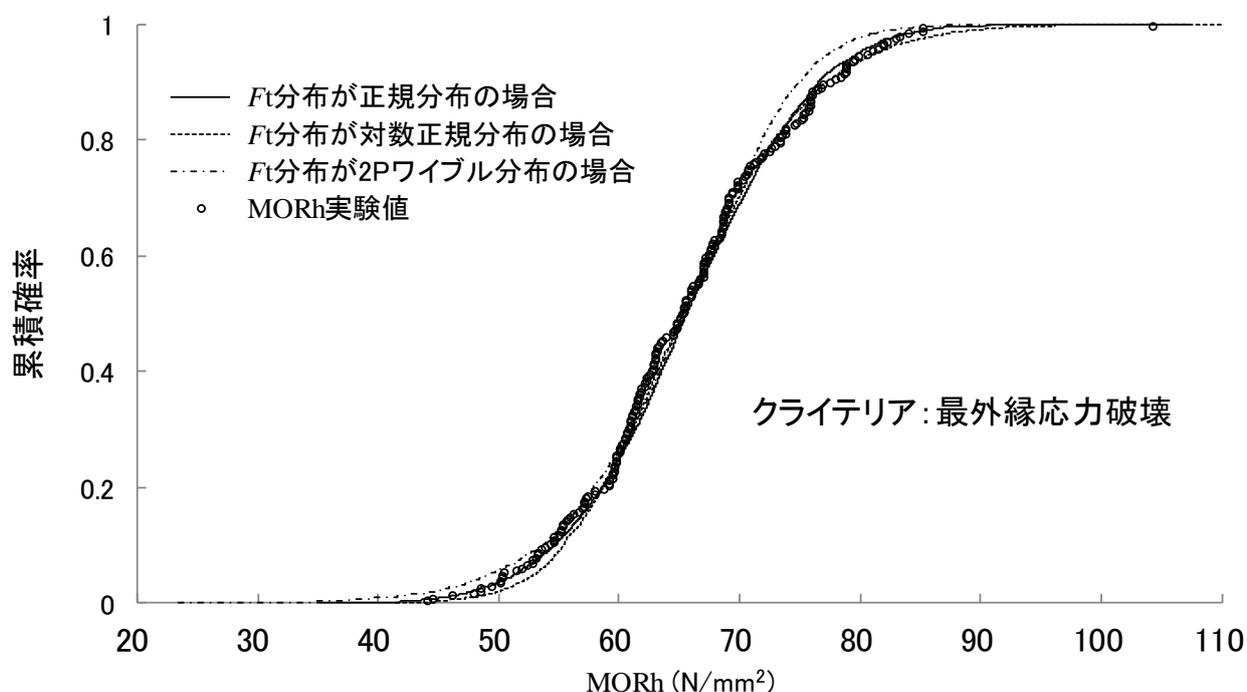


図3.16 MORhのシミュレーションにおける計算値と実験値の比較3

— E_h が2Pワイブル分布の場合 —

注: MORh: 図3.14を参照。 E_h : 表3.2を参照。 F_t : 表3.6を参照。

F_h が正規分布の場合、何れの図もシミュレーションによる MORh は累積確率が 0.3 以上 0.4 以下で僅かに差が生じているが、全体としては MORh の実験値とほぼ一致している。 F_h が対数正規分布の場合、何れの図もシミュレーションによる MORh は累積確率が 0.1 未満で差が生じ、累積確率が 0.3 以上 0.4 以下では僅かに差が生じているが、全体としては MORh の実験値と概ね一致している。最後に、 F_h が 2P ワイブル分布の場合、何れの図でもシミュレーションによる MORh は実験値より相当低い最小値が出現している。更に、 E_h が正規分布及び対数正規分布の場合は累積確率が 0.3 以上 0.4 以下で、 E_h が 2P ワイブル分布の場合は累積確率が 0.2 未満と 0.8 以上で差が生じているが、全体としては MORh の実験値と概ね一致している。以上より、 E_h と F_t が何れの分布の組合せの場合も、(第 2 段階)による適合性が確認された。

3.4 の F_t 分布については、 $3 \times 3 = 9$ 通りの分布の組合せ毎に確認したところ、(第 1 段階)の K-S 検定により適合と見なされたのは、 E_h が対数正規分布で F_t が正規分布の 1 通りの組合せであった(分布のパラメータは表 3.4 を参照)。そこで、(第 2 段階)に従いこの組合せの F_t 分布のパラメータを用いて MORh 分布のシミュレーションを行い、求められた MORh の計算値の累積分布と実験値の累積分布との比較を図 3.17 に示した。

同図を見ると、シミュレーションによる MORh は、累積確率が 0.3 以下で MORh の実験値と差が生じているが、それより上の累積確率では概ね一致している。したがって、3.4 の F_t 分布の推定値のうち、 E_h が対数正規分布で F_t が正規分布の推定値は適合する結果となった。しかし、全体の結果としては、大半の分布の組合せの推定値が不適合となった。更に、図 3.14～図 3.16 のそれぞれと図 3.17 を比べてみても、平使い方向の曲げのクライ

テリアとしては、最外縁応力破壊の適合性の方が高いものと見られる。

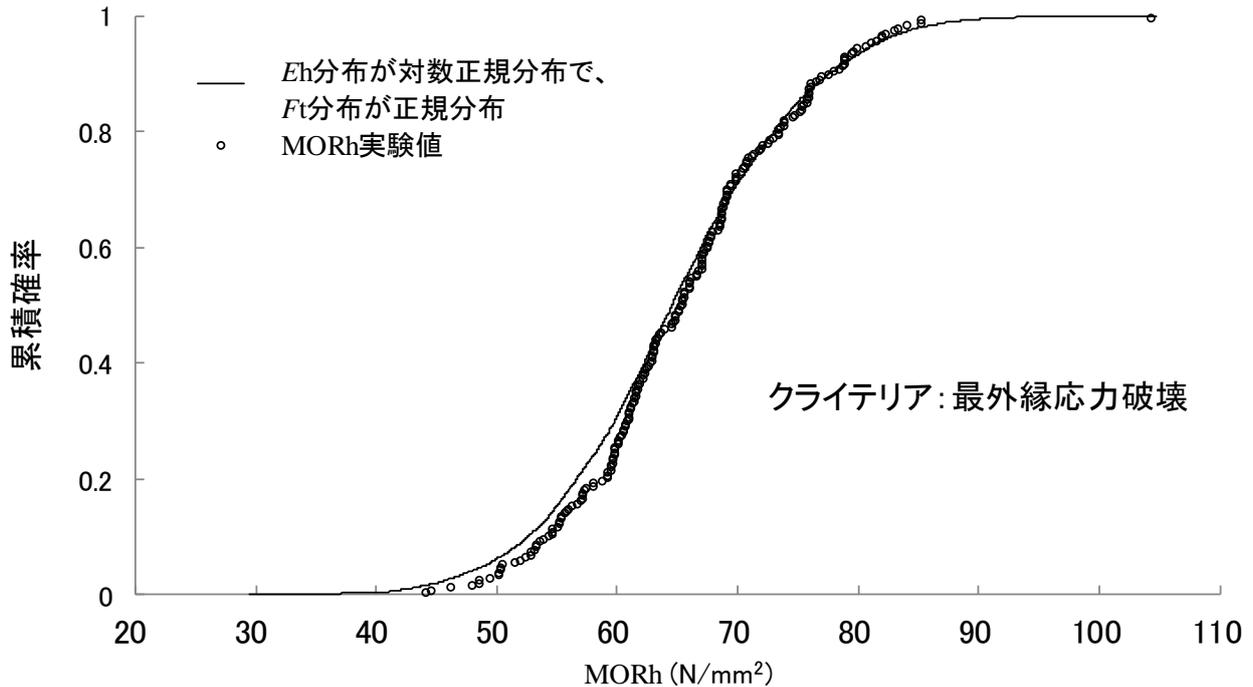


図3.17 MORhのシミュレーションにおける計算値と実験値の比較4

— F_t がLVLの引張試験による推定値の場合—

注: MORh: 図3.14を参照。Eh: 表3.2を参照。Ft: 表3.4を参照。

以上より、LVLの平使い方向の曲げ試験と引張試験では、 F_t 分布が異なることが考えられる。その理由としては、LVLの平使い方向の曲げと引張における試験方法の違いが挙げられる。平使い方向の曲げ試験では外側に行くにしたがってひずみが増大し最外層で最大となるのに対し、引張試験ではLVL試験体の各層にほぼ均一なひずみが生じる。更に、平使い方向の曲げ試験の場合、破壊が生じると考えられる引張側最外層には、曲げモーメントが最大となる荷重点間にスカーフジョイント(SJ)が1個配置されている。したがって、2.4.2と2.4.3に示したLVL試験体の破壊形態の違いを見ても分かる通り、平使い方向の曲げ試験はSJからの破壊が多いが、引張試験ではSJ以外からの破壊が多い。この影響により、LVLの平使い方向の曲げと引張で F_t 分布が異なることが考えられる。

また、 F_t に積層効果^{38,43)}が存在する場合、LVLの平使い方向の曲げ試験と引張試験とでは、上述したとおりLVL試験体に生じるひずみが異なると考えられる。したがって、それぞれのLVL試験体で内部応力の分布が異なることから、積層効果の大きさも異なることが考えられ、この影響により F_t 分布が異なることも考えられる。そこで、 F_t における積層効果の有無については、第五章で検討を行うこととする。

(b) 最外層応力破壊を仮定する場合

3.5.1.2のアルゴリズムによる F_t 分布の推定値と、(第1段階)のK-S検定による適合性の確認結果を表3.7に示した。同表より、Ehと F_t の何れの分布の組合せも d_n が $d(0.05, 226)$ よりも小さくなり、(第1段階)による適合性が確認された。

表3.7 F_t 分布の推定値とK-S検定による適合性の確認結果

—平使い方向の曲げのクライテリアを最外層応力破壊と仮定した場合—

E_h 分布形	F_t 分布形	F_t 分布の推定値					残差 二乗和	K-S検定	
		Pe_1	Pe_2	Pt_1	Pt_2	R_{E-T}		dn	d(0.05, 226)
正規分布	正規分布	14.48	1.86	60.11	10.12	0.70	1496.25	0.053	0.090
正規分布	対数正規分布	14.48	1.86	4.07	0.16	0.70	1456.58	0.062	0.090
正規分布	2Pワイブル分布	14.48	1.86	64.24	6.89	0.72	1483.99	0.077	0.090
対数正規分布	正規分布	2.66	0.12	60.11	10.12	0.70	1474.22	0.049	0.090
対数正規分布	対数正規分布	2.66	0.12	4.07	0.16	0.71	1442.12	0.058	0.090
対数正規分布	2Pワイブル分布	2.66	0.12	64.14	7.07	0.70	1486.89	0.077	0.090
2Pワイブル分布	正規分布	15.16	9.97	60.13	10.07	0.73	1524.54	0.058	0.090
2Pワイブル分布	対数正規分布	15.16	9.97	4.07	0.16	0.71	1468.26	0.066	0.090
2Pワイブル分布	2Pワイブル分布	15.16	9.97	64.25	6.92	0.73	1545.48	0.079	0.090

注: E_h : 表3.2を参照。 F_t : 平使い方向の曲げのクライテリアを最外層応力破壊と仮定した場合の引張側最外層エレメントの引張強さを表す。 Pe_1, Pe_2 : 表3.2を参照。 Pt_1, Pt_2 : 表3.6を参照。 R_{E-T} : 表3.6を参照。dn: 表3.1を参照。d(0.05, 226): 表3.2を参照。

次に、 E_h と F_t の全ての分布の組合せの推定値は、(第2段階)に従いそれぞれの分布の組合せ毎に MORh 分布のシミュレーションを行い、求められた MORh の計算値の累積分布と実験値の累積分布とを比較した。そのうち、 E_h が正規分布の場合は図 3.18 に、 E_h が対数正規分布の場合は図 3.19 に、 E_h が 2P ワイブル分布の場合は図 3.20 にそれぞれ示した。

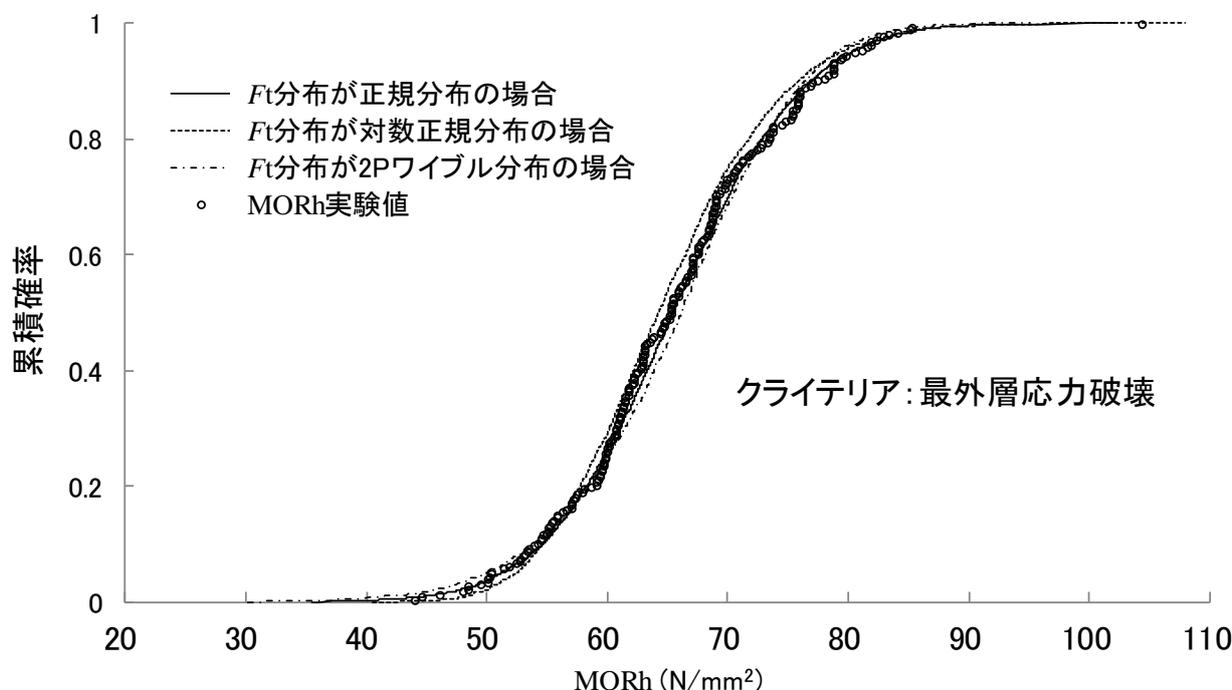


図3.18 MORhのシミュレーションにおける計算値と実験値の比較5

— E_h が正規分布の場合—

注: MORh: 図3.14を参照。 E_h : 表3.2を参照。 F_t : 表3.7を参照。

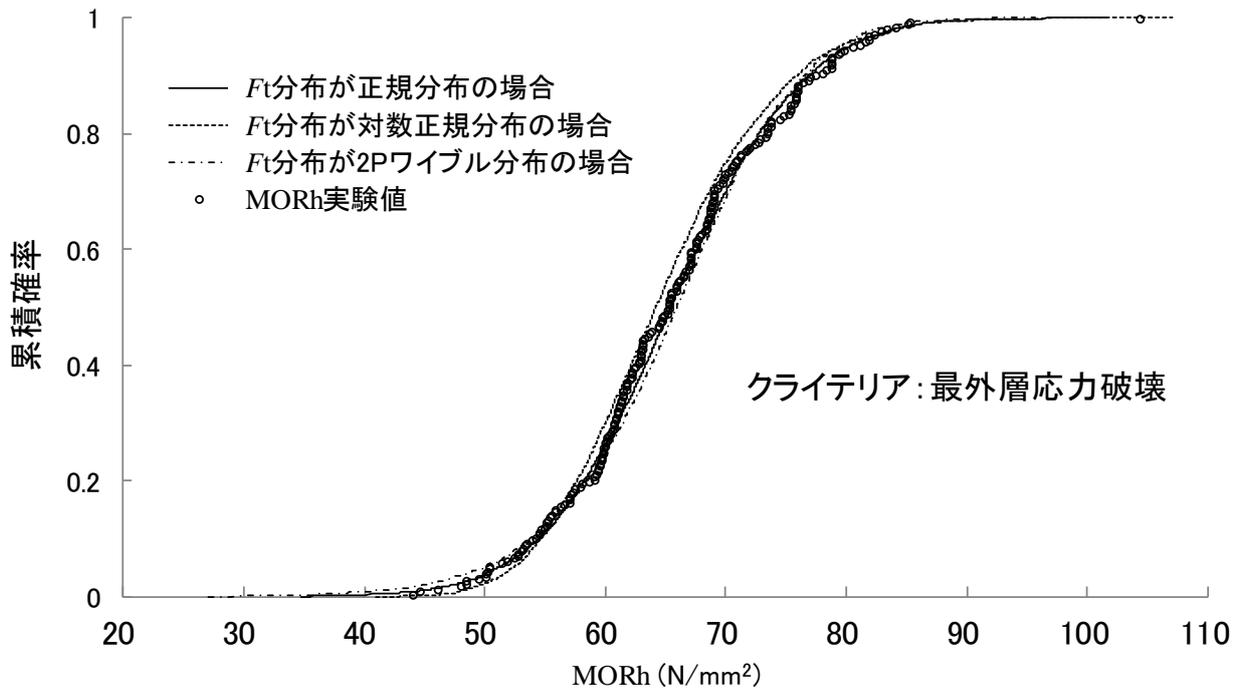


図3.19 MORhのシミュレーションにおける計算値と実験値の比較6

— E_h が対数正規分布の場合—

注: MORh: 図3.14を参照。 E_h : 表3.2を参照。 F_t : 表3.7を参照。

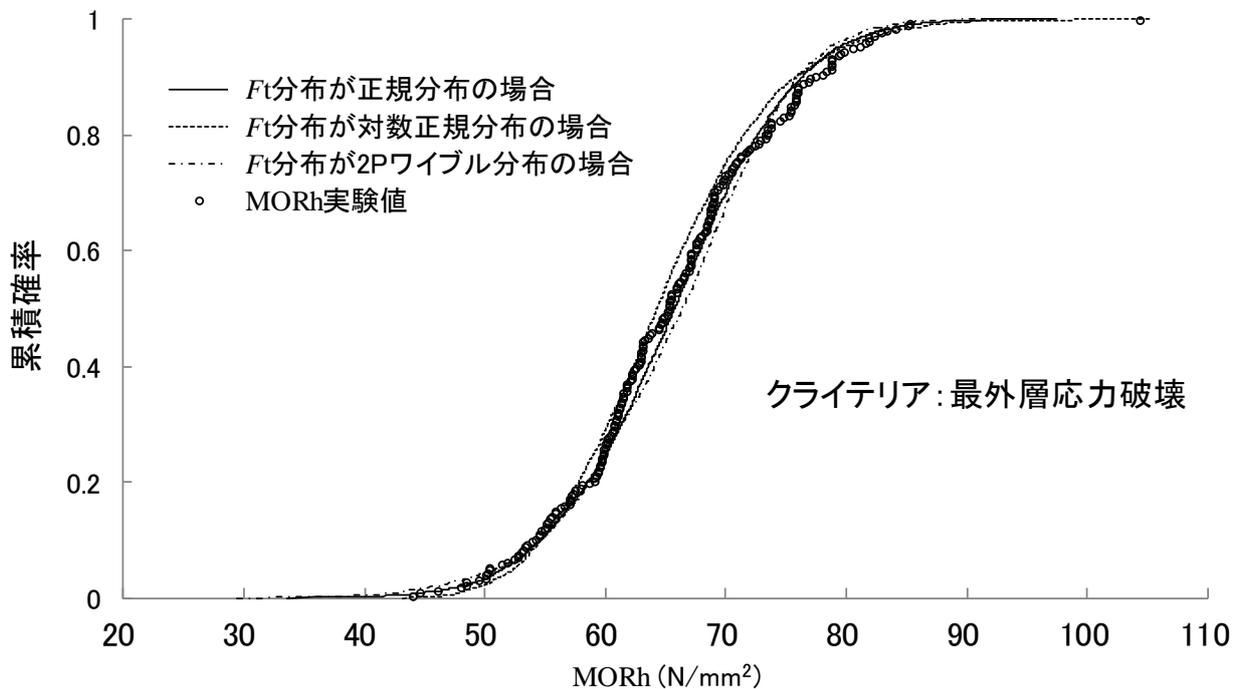


図3.20 MORhのシミュレーションにおける計算値と実験値の比較7

— E_h が2Pワイブル分布の場合—

注: MORh: 図3.14を参照。 E_h : 表3.2を参照。 F_t : 表3.7を参照。

何れの図も、シミュレーションによる MORh は同じ傾向を示しており、Ft が正規分布の場合は実験値の MORh の累積分布と良く一致している。Ft が対数正規分布の場合は累積確率が 0.2 以上で多少ずれが生じ、MOR の実験値より値が少し低い傾向にある。一方、Ft が 2P ワイブル分布の場合はこれとは逆に、MOR の実験値より値が少し高い傾向にある。しかし、何れの分布も全体を見ると、シミュレーションによる MORh は MORh の実験値と概ね一致している。したがって、Eh と Ft が何れの分布の組合せの場合も、(第 2 段階) による適合性が確認された。

また、3.4 の Ft 分布については、3×3=9 通りの分布の組合せ毎に確認したところ、何れの分布も組み合わせも(第 1 段階)の K-S 検定で不適合となった。したがって、平使い方向の曲げのクライテリアを最外層応力破壊と仮定する場合、3.4 の Ft 分布は推定値として不適合であると考えられる。

3.5.2 複合応力破壊

3.5.2.1 クライテリア

LVL の平使い方向の曲げのクライテリアとして、引張側最外層の曲げ応力と引張応力による複合応力一次形式による破壊(以降、複合応力一次形式という)を仮定⁴⁴⁾する場合、クライテリアは次式で表される。

$$\frac{\sigma_{h_N}}{F_{h_N}} + \frac{\sigma_{t_N}}{F_{t_N}} = 1 \quad (3.21)$$

したがって、(3.14)式と(3.15)式を(3.21)式に代入することにより M が求められ、MORh の推定式は M を Ze で除して次式で表される。

$$\text{MORh} = \left\{ \frac{(EI)e}{E_{h_N}Ze} \right\} \left(\frac{2F_{h_N}F_{t_N}}{2|g_N|F_{h_N} + TF_{t_N}} \right) \quad (3.22)$$

また、LVL のクライテリアとして引張側最外層の曲げと引張による複合応力の二次形式による破壊(以降、複合応力二次形式という)を仮定⁴²⁾する場合、クライテリアは次式で表される。

$$\left(\frac{\sigma_{h_N}}{F_{h_N}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{t_N}}{F_{t_N}} \right)^2 = 1 \quad (3.23)$$

したがって、(3.14)式と(3.15)式を(3.23)式に代入することにより M が求められ、MORh の推定式は M を Ze で除して次式で表される。

$$\text{MORh} = \left\{ \frac{(EI)e}{E_{h_N}Ze} \right\} \left(\frac{2F_{h_N}F_{t_N}}{\sqrt{4g_N^2F_{h_N}^2 + T^2F_{t_N}^2}} \right) \quad (3.24)$$

3.5.2.2 アルゴリズム

MORh の推定式である(3.22)式または(3.24)式の右辺は、N、B 及び T を除くと、各エレメントの Eh、Fh 及び Ft で構成されている。そこで、Eh、Fh 及び Ft による強度分布を推

定するアルゴリズムについて、次のとおり導入を試みた。

まず、これまで推定してきた強度と同様に、 Fh 分布を正規分布、対数正規分布または 2P ワイブル分布と仮定すると、 Fh 分布のパラメータは 2 次元ベクトル (Pf_1, Pf_2) で表される。ただし、 Fh 分布として正規分布または対数正規分布を仮定する場合、 Pf_1 は平均値、 Pf_2 は標準偏差を表し、正規分布を仮定する場合、 Pf_1 と Pf_2 の単位は N/mm^2 となる。また、 Fh 分布として 2P ワイブル分布を仮定する場合、 Pf_1 は尺度パラメータ、 Pf_2 は形状パラメータを表し、 Pf_1 の単位は N/mm^2 である。

ここで、 Eh と Fh の関係は相関係数 R_{E-F} 、 Eh と Ft の関係は相関係数 R_{E-T} 、 Fh と Ft の関係は相関係数 R_{F-T} で表す。したがって、平使い方向の曲げにおいて複合応力破壊を仮定する場合の強度分布は、9 次元ベクトル $(Pe_1, Pe_2, Pf_1, Pf_2, Pt_1, Pt_2, R_{E-F}, R_{E-T}, R_{F-T})$ で表される。ただし、 (Pe_1, Pe_2) はこれまでと同様に 3.3 の推定値を用いることができることから、未知パラメータは 7 次元ベクトル $(Pf_1, Pf_2, Pt_1, Pt_2, R_{E-F}, R_{E-T}, R_{F-T})$ となるが、この 7 個のパラメータを MORh の実験値のみで収束させるのは不可能である。そこで、3.4 の Ft 分布の推定値を用いて (Pt_1, Pt_2, R_{E-T}) を固定することにより、エレメントの強度分布のパラメータのなかで、 $(Pf_1, Pf_2, R_{E-F}, R_{F-T})$ で表される 4 個のパラメータを推定対象として求める。なお、 Ft に積層効果が存在する場合、上述の仮定は成立しない可能性があることから、 Ft における積層効果の有無の検証は、3.5.1.3 でも述べたとおり第五章で行うこととする。

次に、積層数 N の MORh の実験値は昇順に並べ替え、これまでと同様に昇順番号 s を用いて $EX_{(N,s)}$ ($s=1, \dots, L(N)$) と表す。一方、積層数 N の MORh の推定値も、複合応力一次形式の場合は(3.22)式、複合応力二次形式の場合は(3.24)式により $L(N)$ 個の値を求めて昇順に並び替え、 s を用いて $CAL_{(N,s)}$ ($s=1, \dots, L(N)$) と表す。ここで、 $CAL_{(N,s)}$ の計算に用いる各エレメントの Eh 、 Fh 及び Ft の値は、 $(Pf_1, Pf_2, R_{E-F}, R_{F-T})$ に初期値を与えて次のとおり求める。

まず、0 以上 1 未満の独立一様乱数 3 個を発生させて、それぞれ逆関数法³⁵⁾を用いて 3 個の独立標準正規乱数 (e_1, e_2, e_3) に変換する。更に、独立標準正規乱数ベクトル $(e_1, e_2, e_3)^T$ から有相関標準正規乱数ベクトル $(r_1, r_2, r_3)^T$ への変換³⁵⁾は、コレスキー分解行列を用いて次式のとおり行う。ただし、 R_{E-T} は 3.4 の推定値で固定した値であり、 R_{E-F} と R_{F-T} は初期値として与えた値であるが、何れも 0 以上 1 未満の値である。

$$\begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ R_{E-F} & \sqrt{1 - R_{E-F}^2} & 0 \\ R_{E-T} & \frac{R_{F-T} - R_{E-F} R_{E-T}}{\sqrt{1 - R_{E-F}^2}} & 1 - R_{E-T}^2 - \frac{(R_{F-T} - R_{E-F} R_{E-T})^2}{1 - R_{E-F}^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{pmatrix} \quad (3.25)$$

ここで、 r_1 は 3.3 で推定した (Pe_1, Pe_2) に従うよう変換^{49,50)}して Eh の値とし、 r_2 は (Pf_1, Pf_2) の初期値に従うよう変換^{49,50)}して Fh の値とし、 r_3 は 3.4 の推定値を用いて固定した (Pt_1, Pt_2) に従うよう変換^{49,50)}して Ft の値とする。

以上より、 Eh は e_1 を、 Fh は e_1 と e_2 を、 Ft は e_1 、 e_2 及び e_3 を用いることが分かる(ただし、 e_1 は Eh 、 Fh 及び Ft で、 e_2 は Fh と Ft でそれぞれ共通である)。このことから、 $CAL_{(N)}$

s)の計算に用いる N 個の Eh 、 Fh 及び Ft をそれぞれ N 次元ベクトル \mathbf{Eh} 、 \mathbf{Fh} 及び \mathbf{Ft} と表すと、 \mathbf{Eh} は N 個の e_1 、 \mathbf{Fh} は N 個ずつの e_1 と e_2 、 \mathbf{Ft} は N 個ずつの e_1 、 e_2 及び e_3 を用いることが分かる。したがって、 N 個の e_1 、 e_2 または e_3 を要素とする N 次元ベクトルを \mathbf{e}_1 、 \mathbf{e}_2 または \mathbf{e}_3 と表すと、 $CAL_{(N,s)}$ のパラメータは $(3 \times N + 9)$ 次元ベクトル $(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3, Pe_1, Pe_2, Pf_1, Pf_2, Pt_1, Pt_2, R_{E-F}, R_{E-T}, R_{F-T})$ と表される。ただし、 (Pe_1, Pe_2) は 3.3 の推定値を用いて、 (Pt_1, Pt_2, R_{E-T}) は 3.4 の推定値を用いてそれぞれ固定するので、 $CAL_{(N,s)}$ の実際のパラメータは $(3 \times N + 4)$ 次元ベクトル $(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3, Pf_1, Pf_2, R_{E-F}, R_{F-T})$ となる。そこで、 \mathbf{e}_1 、 \mathbf{e}_2 及び \mathbf{e}_3 の要素の値を全て固定すると、これ以降の $CAL_{(N,s)}$ のパラメータは $(Pf_1, Pf_2, R_{E-F}, R_{F-T})$ となる。したがって、一様乱数の発生からこれまでの操作を $N=8, 9, 11, \dots, 17$ の積層数毎に $s=1, \dots, L(N)$ で繰り返すと、 $EX_{(N,s)}$ と $CAL_{(N,s)}$ の残差二乗和 Sf のパラメータは $(Pf_1, Pf_2, R_{E-F}, R_{F-T})$ となる。したがって、 Sf の正規方程式に NLM の収束計算⁵¹⁾を適用することにより、 $(Pf_1, Pf_2, R_{E-F}, R_{F-T})$ の推定値が求められる。

以上をまとめると、 Eh 、 Fh 及び Ft の強度分布のパラメータ $(Pe_1, Pe_2, Pf_1, Pf_2, Pt_1, Pt_2, R_{E-F}, R_{E-T}, R_{F-T})$ のうち、 $(Pf_1, Pf_2, R_{E-F}, R_{F-T})$ を推定するアルゴリズムは、次のとおりとなる。ただし、記号の意味はこれまで示してきたとおりである。

- ① Eh 分布、 Fh 分布及び Ft 分布のそれぞれについて、正規分布、対数正規分布または 2P ワイブル分布の何れかを仮定する。
- ② 推定対象となる $(Pf_1, Pf_2, R_{E-F}, R_{F-T})$ の初期値として、 $(PIf_1, PIf_2, RI_{E-F}, RI_{F-T})$ ($0 < PIf_2 < Pf_1$, $0 < RI_{E-F} < 1$, $0 < RI_{F-T} < 1$) を与える。
- ③ MORh (積層数 N) の実験値を全て昇順に並び替え、それぞれ昇順番号 s ($s=1, \dots, L(N)$) を貼付して $EX_{(N,s)}$ と表す。
- ④ 0 以上 1 未満の独立一様乱数を 3 個発生させて、それぞれ逆関数法³⁵⁾により独立標準正規乱数 (e_1, e_2, e_3) に変換する。
- ⑤ (e_1, e_2, e_3) に (3.25) 式を適用して、相関係数が RI_{E-F} 、 R_{E-T} 及び RI_{F-T} の 3 次元有相関標準正規乱数 (r_1, r_2, r_3) に変換³⁵⁾する。ただし、 R_{E-T} は表 3.4 に示す値のうち、①で仮定した分布の組み合わせの値を用いて固定する。
- ⑥ ④～⑤の操作を N 回繰り返し、それぞれ N 個の e_1 、 e_2 、 e_3 、 r_1 、 r_2 及び r_3 を求める。更に、 N 個の e_1 を要素とする N 次元ベクトルを \mathbf{e}_1 と表し、以下同様に N 個の e_2 を \mathbf{e}_2 、 N 個の e_3 を \mathbf{e}_3 、 N 個の r_1 を \mathbf{r}_1 、 N 個の r_2 を \mathbf{r}_2 及び N 個の r_3 を \mathbf{r}_3 と表す。
- ⑦ \mathbf{r}_1 の各要素を分布が (Pe_1, Pe_2) に従う N 個の Eh に変換^{49,50)}し、これらを要素とする N 次元ベクトルを \mathbf{Eh} と表す。ただし、 (Pe_1, Pe_2) は表 3.2 に示す値のうち、①で仮定した分布の値で固定する。
- ⑧ \mathbf{r}_2 の各要素を分布が (PIf_1, PIf_2) に従う N 個の Fh に変換^{49,50)}し、これらを要素とする N 次元ベクトルを \mathbf{Fh} と表す。
- ⑨ \mathbf{r}_3 の各要素を分布が (Pt_1, Pt_2) に従う N 個の Ft に変換^{49,50)}し、これらを要素とする N 次元ベクトルを \mathbf{Ft} と表す。ただし、 (Pt_1, Pt_2) は表 3.4 に示す値のうち、①で仮定した分布の組み合わせの値を用いて固定する。
- ⑩ 積層数 N と \mathbf{Eh} の各要素を (3.3) 式に代入し、MOEh (積層数 N) の推定値を求める。

- ⑪ 積層数 N 、MOEh(積層数 N)の推定値、 Eh 、 Fh 及び Ft の各要素を、クライテリアとして複合応力一次形式を仮定する場合は(3.22)式、クライテリアとして複合応力二次形式を仮定する場合は(3.24)式に代入し、MORh(積層数 N)の推定値を求める。
- ⑫ ④～⑨を $L(N)$ 回繰り返す、求められた MORh(積層数 N)の推定値を全て昇順に並び替え、昇順番号 s ($s=1, \dots, L(N)$)を貼付して $CAL_{(N,s)}$ と表す。
- ⑬ $s=1, \dots, L(N)$ で、 $CAL_{(N,s)}$ に用いている e_1 、 e_2 及び e_3 の全ての要素の値を固定する。
- ⑭ $N=8, 9, 11, \dots, 17$ の積層数毎に、③～⑬を繰り返す。
- ⑮ 以下に示す $EX_{(N,s)}$ と $CAL_{(N,s)}$ の残差二乗和 Sf が最小になるよう、 Pf_1 、 Pf_2 、 R_{E-F} 及び R_{F-T} の値から動かしていき、 Pf_1 、 Pf_2 、 R_{E-F} 及び R_{F-T} の収束値を求める⁵¹⁾。

$$Sf = \frac{1}{2} \sum_{N=8}^9 \sum_{S=1}^{L(N)} (EX_{(N,S)} - CAL_{(N,S)})^2 + \frac{1}{2} \sum_{N=11}^{17} \sum_{S=1}^{L(N)} (EX_{(N,S)} - CAL_{(N,S)})^2$$

- ⑯ (Pf_1 、 Pf_2 、 R_{E-F} 、 R_{F-T})の収束値が正規方程式の解として収束したか、(3.26)式を用いて確認する⁵¹⁾。

$$\frac{\partial Sf}{\partial Pf_1} \cong 0 \quad \frac{\partial Sf}{\partial Pf_2} \cong 0 \quad \frac{\partial Sf}{\partial R_{E-F}} \cong 0 \quad \frac{\partial Sf}{\partial R_{F-T}} \cong 0 \quad (3.26)$$

- ⑰ ②～⑯を繰り返して 20000 個の(Pf_1 、 Pf_2 、 R_{E-F} 、 R_{F-T})を計算する。そのなかで、 Sf が最小となる(Pf_1 、 Pf_2 、 R_{E-F} 、 R_{F-T})を推定値とする。

3.5.2.3 結果

(a) 複合応力一次形式を仮定する場合

Eh 、 Fh 及び Ft によるエレメントの強度分布は分布の組合せが $3 \times 3 \times 3 = 27$ 通りとなることから、それぞれの分布の組合せ毎に 3.5.2.2 のアルゴリズムに従い推定を行った。以上の 27 種類の推定値については、何れも(3.24)式の偏微分係数がそれぞれ 0 に極めて近い数値となり、正規方程式の解として収束していることを確認した。更に、それぞれの分布の組合せ毎に 20000 個の収束値を追加して再計算しても、残差二乗和を含め値の変動が生じないかごく僅かであることを確認した。

また、それぞれの推定値の適合性については、以下の手順により確認を行った。ただし、記号の意味はこれまでと同様である。

- ① Eh 、 Fh 及び Ft の分布の組合せで $3 \times 3 \times 3 = 27$ 通りとなるエレメントの強度分布の推定値のうち、何れかの分布の組合せの推定値を選択する。
- ② 0 以上 1 未満の独立一様乱数を 3 個発生させて、それぞれ逆関数法³⁵⁾により独立標準正規乱数(e_1 、 e_2 、 e_3)に変換する。
- ③ (e_1 、 e_2 、 e_3)に(3.25)式を適用して、相関係数が R_{E-F} 、 R_{E-T} 及び R_{F-T} の 3 次元有相関標準正規乱数(r_1 、 r_2 、 r_3)に変換³⁵⁾する。ただし、 R_{E-F} 及び R_{F-T} は 3.5.2.3 による推定値のうち、 R_{E-T} は表 3.4 に示す値のうち、①で選択した分布の組み合わせの値を用いる。
- ④ ②～③の操作を N 回繰り返す、それぞれ N 個の r_1 、 r_2 及び r_3 を求める。更に、 N 個の r_1 を要素とする N 次元ベクトルを \mathbf{r}_1 と表し、以下同様に N 個の r_2 を \mathbf{r}_2 、 N 個の r_3 を \mathbf{r}_3 と表す。

- ⑤ r_1 の各要素を分布が (Pe_1, Pe_2) に従う N 個の Eh に変換^{49,50)} し、これらを要素とする N 次元ベクトルを Eh と表す。ただし、 (Pe_1, Pe_2) は表 3.2 に示す値のうち、①で選択した分布の値を用いる。
- ⑥ r_2 の各要素を分布が (Pf_1, Pf_2) に従う N 個の Fh に変換^{49,50)} し、これらを要素とする N 次元ベクトルを Fh と表す。ただし、 (Pf_1, Pf_2) は 3.5.2.2 による推定値のうち、①で選択した分布の組み合わせの値を用いる。
- ⑦ r_3 の各要素を分布が (Pt_1, Pt_2) に従う N 個の Ft に変換^{49,50)} し、これらを要素とする N 次元ベクトルを Ft と表す。ただし、 (Pt_1, Pt_2) は表 3.4 に示す値のうち、①で選択した分布の組み合わせの値を用いる。
- ⑧ 積層数 N と Eh の各要素を(3.3)式に代入し、 $MOEh$ (積層数 N) の計算値を求める。
- ⑨ 積層数 N 、 $MOEh$ (積層数 N) の計算値、 Eh 、 Fh 及び Ft の各要素をクライテリアとして複合応力一次形式を仮定する場合は(3.22)式、クライテリアとして複合応力二次形式を仮定する場合は(3.24)式に代入し、 $MORh$ (積層数 N) の計算値を求める。
- ⑩ ②～⑨を 500 回繰り返し、積層数 N の $MORh$ の計算値を 500 個求める。
- ⑪ $N=8, 9, 11, \dots, 17$ で②～⑩を繰り返し、4500 個の $MORh$ の計算値を求める。
- ⑫ 4500 個の $MORh$ の計算値について、正規分布、対数正規分布または 2P ワイブル分布の何れかと仮定し、最も適合する分布を $MORh$ の計算値の分布とする。
- ⑬ ⑫による計算値の累積分布に対し、積層数 $N=8, 9, 11, \dots, 17$ の $MORh$ の実験値を用いて危険率 5%(両側検定)による K-S 検定を行い、①で選択した分布の組合せの推定値について適合性を評価する(第 1 段階)。
- ⑭ 4500 個の $MORh$ の計算値を昇順で並べ、累積確率をメディアンランクで評価する。
- ⑮ 積層数 $N=8, 9, 11, \dots, 17$ の $MORh$ の実験値についても昇順に並べ替え、累積確率をメディアンランクで評価する。
- ⑯ 累積確率をメディアンランクで評価した $MORh$ の計算値と実験値を図示し、計算値と実験値のそれぞれの累積分布の一致の具合を目視にて確認することにより、①で選択した分布の組合せの推定値について適合性を評価する(第 2 段階)。

以上で示した(第 1 段階)は全ての分布の組合せによる推定値に対し適用し、(第 2 段階)には(第 1 段階)で適合した分布の組合せの推定値のみに適用した。更に、推定値の大きさについては、文献 50)に示すダフリカカラマツの曲げ強度の値を参考に妥当性を検討した。

ここで、3.5.2.2 のアルゴリズムによる Fh 分布の推定値と、(第 1 段階)の K-S 検定による適合性の確認結果を表 3.8 に示した。ただし、分布の組み合わせによる推定値の種類が多ことから、同表には K-S 検定の判定結果も追加した。同表より、 Ft を対数正規分布とした 9 種類のパラメータは、何れの分布の組み合わせも K-S 検定に適合しなかった。次に、 Ft を 2P ワイブル分布とした 9 種類のパラメータは、 Eh を正規分布とした 3 種類のみ K-S 検定に適合した。最後に Ft を正分布とした 9 種類のパラメータは、全ての分布の組み合わせで K-S 検定に適合した。

表3.8 Fh分布の推定値とK-S検定による適合性の確認結果

－平使い方向の曲げのクライテリアを複合応力一次形式による破壊と仮定した場合－

Eh分布	Fh分布	Ft分布	Fh分布の推定値									残差 二乗和	K-S検定		
			Pe ₁	Pe ₂	Pf ₁	Pf ₂	Pt ₁	Pt ₂	R _{·E-F}	R _{·E-T}	R _{·F-T}		dn	d(0.05, 226)	適否
正規	正規	正規	14.48	1.86	105.43	31.61	64.00	10.98	0.62	0.57	0.25	1805.49	0.064	0.090	適
正規	対数正規	正規	14.48	1.86	4.68	0.51	64.00	10.98	0.45	0.57	0.08	1747.02	0.066	0.090	適
正規	2Pワイブル	正規	14.48	1.86	116.42	3.80	64.00	10.98	0.61	0.57	0.25	1784.99	0.067	0.090	適
対数正規	正規	正規	2.66	0.12	91.57	27.06	64.60	10.86	0.64	0.51	0.25	1948.66	0.065	0.090	適
対数正規	対数正規	正規	2.66	0.12	4.50	0.43	64.60	10.86	0.52	0.51	0.14	1883.46	0.070	0.090	適
対数正規	2Pワイブル	正規	2.66	0.12	101.98	3.72	64.60	10.86	0.65	0.51	0.25	1937.32	0.063	0.090	適
2Pワイブル	正規	正規	15.16	9.97	104.46	30.88	64.00	10.68	0.71	0.55	0.33	1742.65	0.069	0.090	適
2Pワイブル	対数正規	正規	15.16	9.97	4.66	0.50	64.00	10.68	0.56	0.55	0.18	1723.72	0.061	0.090	適
2Pワイブル	2Pワイブル	正規	15.16	9.97	116.54	3.68	64.00	10.68	0.71	0.55	0.32	1719.05	0.067	0.090	適
正規	正規	対数正規	14.48	1.86	59.64	14.63	4.18	0.20	0.70	0.47	0.28	2811.18	0.091	0.090	不適
正規	対数正規	対数正規	14.48	1.86	4.11	0.42	4.18	0.20	0.47	0.47	0.06	2737.30	0.104	0.090	不適
正規	2Pワイブル	対数正規	14.48	1.86	63.82	5.40	4.18	0.20	0.80	0.47	0.37	2816.38	0.091	0.090	不適
対数正規	正規	対数正規	2.66	0.12	56.53	15.29	4.18	0.20	0.52	0.48	0.13	3158.65	0.110	0.090	不適
対数正規	対数正規	対数正規	2.66	0.12	4.04	0.42	4.18	0.20	0.32	0.48	-0.05	3045.89	0.091	0.090	不適
対数正規	2Pワイブル	対数正規	2.66	0.12	60.80	4.70	4.18	0.20	0.60	0.48	0.23	3194.94	0.113	0.090	不適
2Pワイブル	正規	対数正規	15.16	9.97	57.45	14.83	4.18	0.19	0.74	0.44	0.29	2880.89	0.096	0.090	不適
2Pワイブル	対数正規	対数正規	15.16	9.97	4.06	0.43	4.18	0.19	0.49	0.44	0.07	2839.93	0.105	0.090	不適
2Pワイブル	2Pワイブル	対数正規	15.16	9.97	60.37	5.74	4.18	0.19	0.92	0.44	0.43	2853.44	0.091	0.090	不適
正規	正規	2Pワイブル	14.48	1.86	149.82	45.78	66.90	7.84	0.75	0.59	0.37	1682.03	0.067	0.090	適
正規	対数正規	2Pワイブル	14.48	1.86	5.02	0.49	66.90	7.84	0.56	0.59	0.18	1682.27	0.084	0.090	適
正規	2Pワイブル	2Pワイブル	14.48	1.86	172.73	3.22	66.90	7.84	0.62	0.59	0.25	1659.74	0.090	0.090	適
対数正規	正規	2Pワイブル	2.66	0.12	143.85	46.70	66.95	8.24	0.60	0.53	0.25	1738.15	0.101	0.090	不適
対数正規	対数正規	2Pワイブル	2.66	0.12	4.96	0.49	66.95	8.24	0.59	0.53	0.21	1696.20	0.096	0.090	不適
対数正規	2Pワイブル	2Pワイブル	2.66	0.12	155.29	3.79	66.95	8.24	0.64	0.53	0.28	1706.38	0.101	0.090	不適
2Pワイブル	正規	2Pワイブル	15.16	9.97	200.62	68.16	66.17	8.11	0.53	0.60	0.21	1517.89	0.108	0.090	不適
2Pワイブル	対数正規	2Pワイブル	15.16	9.97	5.35	0.62	66.17	8.11	0.57	0.60	0.19	1568.97	0.091	0.090	不適
2Pワイブル	2Pワイブル	2Pワイブル	15.16	9.97	248.46	2.54	66.17	8.11	0.55	0.60	0.21	1511.58	0.092	0.090	不適

注: Eh: 表3.2を参照。Fh: エレメントの平使い方向の曲げ強度を表す。Ft: 表3.4を参照。Pe₁, Pe₂: 表3.2を参照。Pf₁, Pf₂: Fh分布のパラメータで、Fh分布が正規分布または対数正規分布の場合、Pf₁は平均値、Pf₂は標準偏差を表し(Fh分布が正規分布の場合のみ、Pf₁とPf₂の単位はN/mm²となる)、Fh分布が2Pワイブル分布の場合、Pf₁は尺度パラメータ、Pf₂は形状パラメータを表す(Pf₁の単位はN/mm²となる)。Pt₁, Pt₂: Ft分布のパラメータで、Ft分布が正規分布または対数正規分布の場合、Pt₁は平均値、Pt₂は標準偏差を表し(Ft分布が正規分布の場合のみ、Pt₁とPt₂の単位はN/mm²となる)、Ft分布が2Pワイブル分布の場合、Pt₁は尺度パラメータ、Pt₂は形状パラメータを表す(Pt₁の単位はN/mm²となる)。R_{·E-F}: EhとFhの相関係数を表す。R_{·E-T}: EhとFtの相関係数を表す。R_{·F-T}: FhとFtの相関係数を表す。dn: 表3.1を参照。d(0.05, 226): 表3.2を参照。

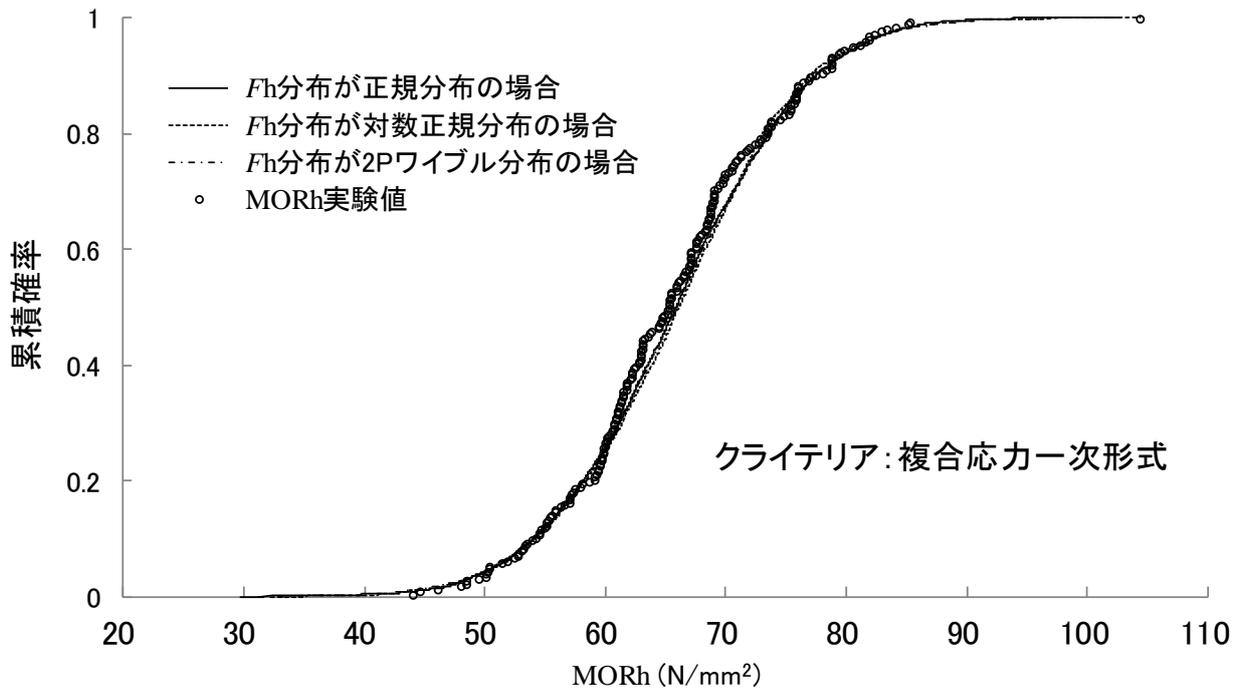


図3.21 MORhのシミュレーションにおける計算値と実験値の比較8

— E_h と F_t が正規分布の場合—

注: MORh: 図3.14を参照。 E_h : 表3.2を参照。 F_h : 表3.8を参照。 F_t : 表3.8を参照。

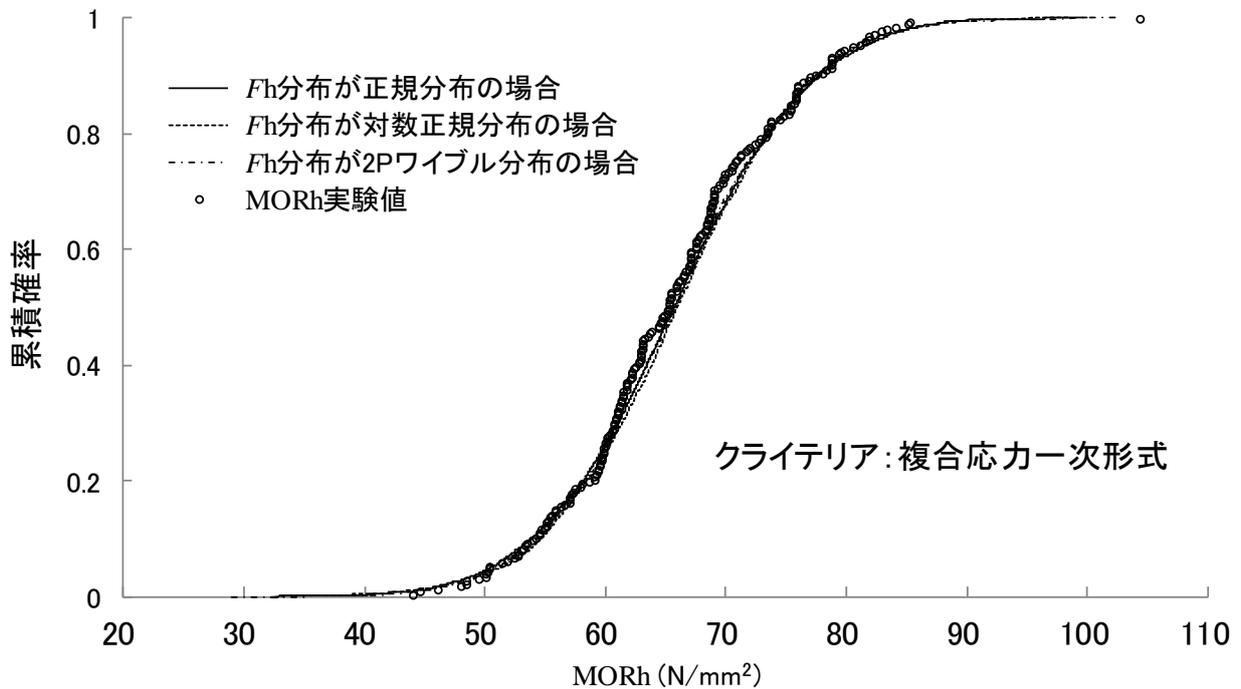


図3.22 MORhのシミュレーションにおける計算値と実験値の比較9

— E_h が対数正規分布で F_t が正規分布の場合—

注: MORh: 図3.14を参照。 E_h : 表3.2を参照。 F_h : 表3.8を参照。 F_t : 表3.8を参照。

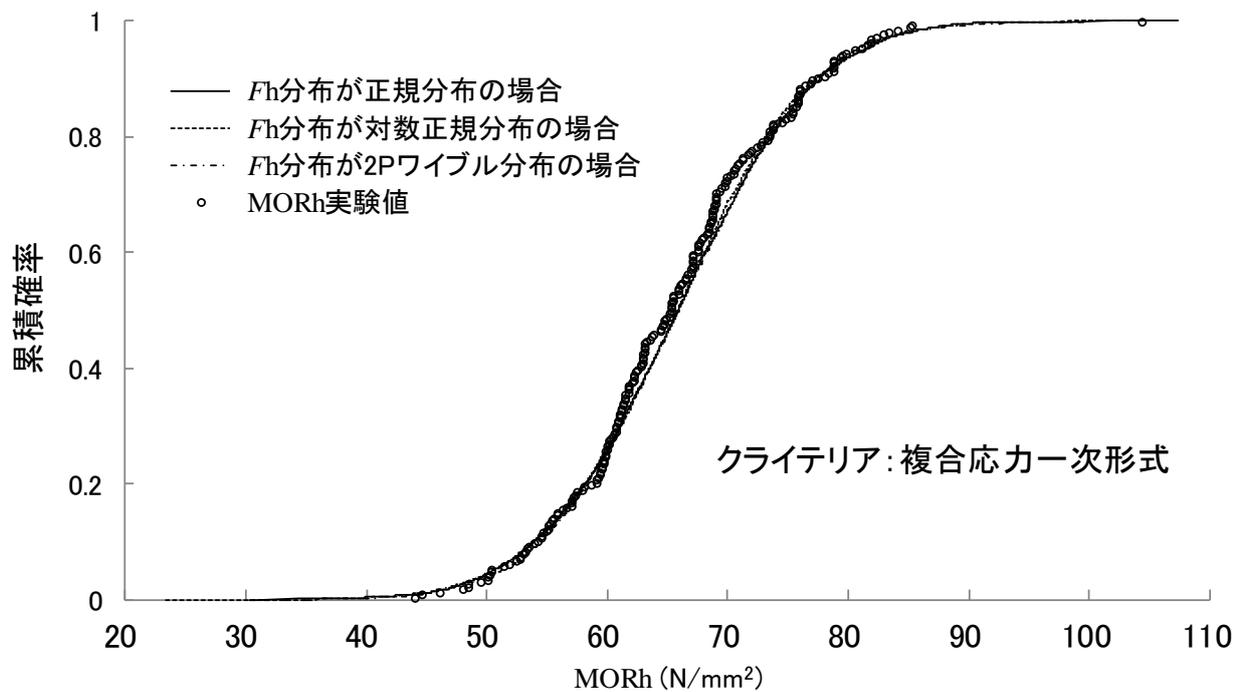


図3.23 MORhのシミュレーションにおける計算値と実験値の比較10

— E_h が2Pワイブル分布で F_t が正規分布の場合—

注: MORh: 図3.14を参照。 E_h : 表3.2を参照。 F_h : 表3.8を参照。 F_t : 表3.8を参照。

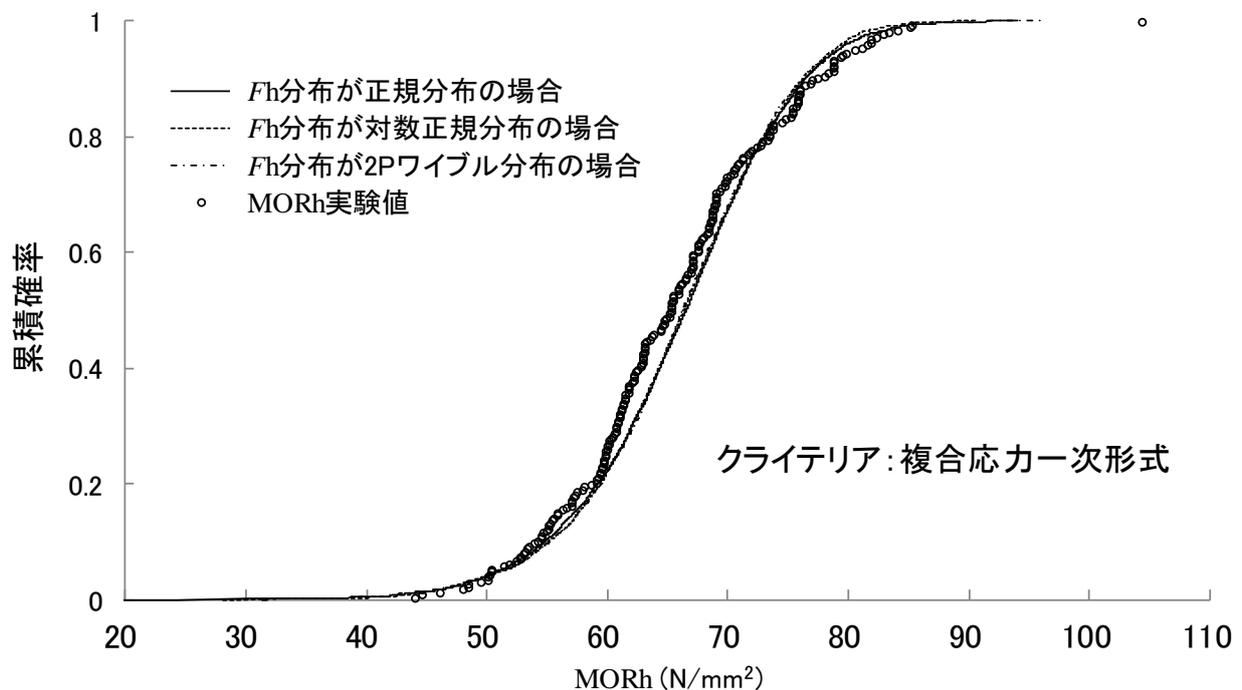


図3.24 MORhのシミュレーションにおける計算値と実験値の比較11

— E_h が正規分布で F_t が2Pワイブル分布の場合—

注: MORh: 図3.14を参照。 E_h : 表3.2を参照。 F_h : 表3.8を参照。 F_t : 表3.8を参照。

次に、(第1段階)に適合した12種類の分布の組合せの推定値は、(第2段階)に従いそれぞれの分布の組合せ毎に MORh 分布のシミュレーションを行い、求められた MORh の計算値の累積分布と実験値の累積分布とを比較した。そのうち、Eh と Ft が正規分布の場合は図 3.21 に、Eh が対数正規分布で Ft が正規分布の場合は図 3.22 に、Eh が 2P ワイブル分布で Ft が正規分布の場合は図 3.23 に、Eh が正規分布で Ft が正規分布 2P ワイブル分布の場合は図 3.24 にそれぞれ示した。

Ft が正規分布の場合の図 3.21、図 3.22 及び図 3.23 を見ると、Eh と Fh が何れの分布の組み合わせでも、シミュレーションによる MORh は累積確率が 0.3 以上 0.8 以下で若干ずれが生じているが、全体としては実験値の MORh と一致している。しかし、Fh が対数正規分布の場合、累積確率 0.95 での値が 250 N/mm² を越えることから、対数正規分布は不適合と判断される。一方、Fh が正規分布と 2P ワイブル分布の場合、累積確率 0.95 での値が何れも 140 N/mm² 程度に留まる。文献 52) に示すダフリカカラマツの曲げ強さ 100 N/mm² と考慮すると、Ft が正規分布の場合、Fh 分布の推定値としては正規分布と 2P ワイブル分布が適合すると考えられる。

また、Eh が正規分布で Ft が 2P ワイブル分布の場合の図 3.24 を見ると、シミュレーションによる MORh は累積確率が 0.3 以上で MORh の実験値とずれが生じており、Fh が正規分布の場合は実験値より相当低い最小値が出現している。更に、Fh が何れの分布の場合も平均値が 150N/mm² 前後と大きくなり、上述の文献 50) の値も考慮すると、Ft が 2P ワイブル分布の場合は、Fh として何れの分布も不適合と判断される。

(b) 複合応力二次形式を仮定する場合

3.5.2.2 のアルゴリズムによる Fh 分布の推定値は、3×3×3=27 通となる何れの分布の組み合わせも、平均値が 30 N/mm² 以下となった。したがって、平使い方向の曲げのクライテリアとしては、複合応力二次形式は不適合と考えられる。

3.6 まとめ

本章では、LVL のエレメントを接着層付きの単板と仮定し、材料構成は単一であるが積層数の異なる LVL の実験値に対し非線形最小二乗法を適用することにより、Ev、Eh、Fv、LVL の引張における Ft 及び Fc のそれぞれの分布を実際に推定した。更に、LVL の平使い方向の曲げのクライテリアとして最外縁応力破壊または最外層応力破壊を仮定し、LVL の平使い方向の曲げにおける Ft 分布を推定した。また、LVL の平使い方向の曲げのクライテリアとして複合応力一次形式または複合応力二次形式による破壊を仮定し、Fh 分布を推定した。

以上で求めたエレメントのヤング係数分布または強度分布のうち、Ev または Eh の推定値は、仮定した分布毎にパラメータの値を用いて MOEv または MOEh のシミュレーションを行った。更に、シミュレーションの計算値と実験値の分布を統計的及び目視的な手法で比較することにより、Ev または Eh の推定値としての適合性を確認した。Fv、Ft または Fc の推定値は、仮定した分布の組み合わせ毎にパラメータの値を用いて MORv、TS または CS のシミュレーションを行い、上記と同様にシミュレーションの計算値と実験値の分

布を比較することにより、それぞれ推定値としての適合性を確認した。LVLの平使い方向の曲げにおける F_t または F_h の推定値についても、分布の組み合わせ毎にパラメータの値を用いてMORhのシミュレーションを行い、同様の比較により推定値としての適合性を確認した。以上より、次のことが分かった。

1. E_v 、 E_h 、 F_v 、LVLの引張における F_t 、 F_c 、LVLの平使い方向の曲げにおける F_t 及び F_h について、何れも分布のパラメータを非線形最小二乗法の収束解として算出し求めることができた。
2. E_v 分布としては、正規分布及び2Pワイブル分布が適合した。
3. E_h 分布としては、正規分布、対数正規分布及び2Pワイブル分布の何れの分布も適合した。
4. F_v 分布としては、正規分布、対数正規分布及び2Pワイブル分布の何れの分布も適合した。
5. LVLの引張における F_t 分布としては、正規分布、対数正規分布及び2Pワイブル分布の何れの分布も適合した。
6. F_c 分布としては、正規分布及び対数正規分布が適合した。
7. 平使い方向の曲げのクライテリアとして引張応力破壊を仮定する場合、LVLの平使い方向の曲げにおける F_t 分布としては、正規分布、対数正規分布及び2Pワイブル分布の何れの分布も適合した。

平使い方向の曲げのクライテリアとして曲げ応力と引張応力による複合破壊を仮定する場合、複合応力一次形式が適合すると見られる。この場合、 E_h は何れの分布も、 F_t は正規分布が、 F_h は正規分布と2Pワイブル分布が適合した。

第四章 単板積層材から切り出したエレメントと 2・3ply に対する強度実験

4.1 はじめに

第二章では、強度特性が単一な 8ply~17ply の LVL を用いて試験体を作成し、縦使い方向及び平使い方向の曲げ強度試験、引張試験及び圧縮試験を実施し、LVL の縦使い方向の曲げヤング係数(MOE_v)と曲げ強度(MOR_v)、平使い方向の曲げヤング係数(MOE_h)と曲げ強度(MOR_h)、引張強度(TS)及び圧縮強度(CS)の実験値を収集した。第三章では、これらの実験値を用いて非線形最小二乗法(以降、NLM という)を適用し、エレメントの縦使い方向の曲げヤング係数(E_v)と曲げ強度(F_v)、平使い方向の曲げヤング係数(E_h)と曲げ強度(F_h)、LVL の引張における引張強度(F_t)、圧縮強度(F_c)及び LVL の平使い方向の曲げにおける引張強度(F_t)のそれぞれの分布を推定した。ただし、これらの強度分布の推定値はあくまでも LVL の破壊クライテリアを仮定して求められたことから、実際のエレメントの強度分布と比較を行うことにより、NLM 自体の有効性について検討する必要がある。そこで、本章では、第二章の強度実験で用いた試験体の残部からエレメントと仮定した接着層付きの 1ply(以降、1ply という)を切り出して試験体を作成し、第二章と同様の強度試験を実施して F_v 、 E_h 、 F_h 、 F_t 及び F_c の実験値を収集し、それぞれ第三章の NLM で求めた F_v 、 E_h 、 F_h 、 F_t 及び F_c の推定値と比較した。

ただし、集成材のエレメントであるラミナの強度には積層効果が存在することが報告されており、文献 38)では最外層ラミナの引張強度に対する集成材の曲げ強度の比を積層効果として算出し、文献 43)では積層による欠点の減少が確率論的に強度の増加に繋がることを評価し、ラミナの引張強度の積層効果としている。仮に LVL の方でも同様の積層効果が存在する場合、上述の 1ply の実験値と推定値の分布の単純な比較により、NLM の有効性を検討することはできない。1ply の実験値に積層効果が含まれるエレメント強度分布を求め、第三章の NLM で推定したエレメント強度分布と比較することにより、NLM の有効性について検討を行う必要があると考える。そこで、本章では、LVL のエレメントの強度にも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 と記す)も第二章の強度実験で用いた試験体の残部から切り出して試験体とし、1ply と同様の強度試験を行った。

本章の構成を示すと、次のとおりとなる。まず、4.2 では 1ply~3ply の試験体の作成方法を示し、4.3 では実験方法を示し、4.4 は実験結果の考察を行った。ただし、試験体のなかにはスカーフジョイント(SJ)による断面欠損の生じていたものもことから、4.4.1 ではこれに該当する試験体の扱いについて検討した。4.4.2 は縦使い方向の曲げヤング係数と曲げ強度、4.4.3 は平使い方向の曲げヤング係数と曲げ強度、4.4.4 は引張強度、4.4.5 は圧縮強度のそれぞれの実験結果について考察した。4.5 では 1ply の実験値の強度分布と、第三章の NLM により推定したエレメントの強度分布との比較を行った。最後に、4.6 は本章のまとめとなる。

4.2 試験体

第二章で実験を行った 8ply~17ply の 10 種類の LVL の残部を幅 90mm×長さ 400mm の寸

法で切り落とし、そこからエレメントと仮定した接着層付きの単板=1ply を切り取った。更に、幅 90mm×長さ 400mm の寸法で切り落とした LVL の残部から 2・3ply を切り取った。その際、何れの積層数も、長さ方向の中心に SJ によるたて継ぎ部を配置したタイプ(以降、SJ 有という)と、SJ が存在しないタイプ(以降、SJ 無という)の 2 種類を採取した。採取した試験体数は、積層数別、SJ の有無別、及び接着層の有無別に表 4.1 に示した。

表 4.1 LVLから採取した試験体数

	試験体数	積層	縦継ぎの	接着層の
			有無	有無
1ply	29	-	SJ有	有
	8	-	SJ有	無
	19	-	SJ無	有
2ply	16	2層目	SJ無	有
		1層目	SJ有	有
	15	2層目	SJ無	有
		1層目	SJ無	有
3ply	10	3層目	SJ無	有
		2層目	SJ無	有
		1層目	SJ有	有
	7	3層目	SJ無	有
		2層目	SJ無	有
		1層目	SJ無	有

注: SJ: スカーフジョイントを表す。

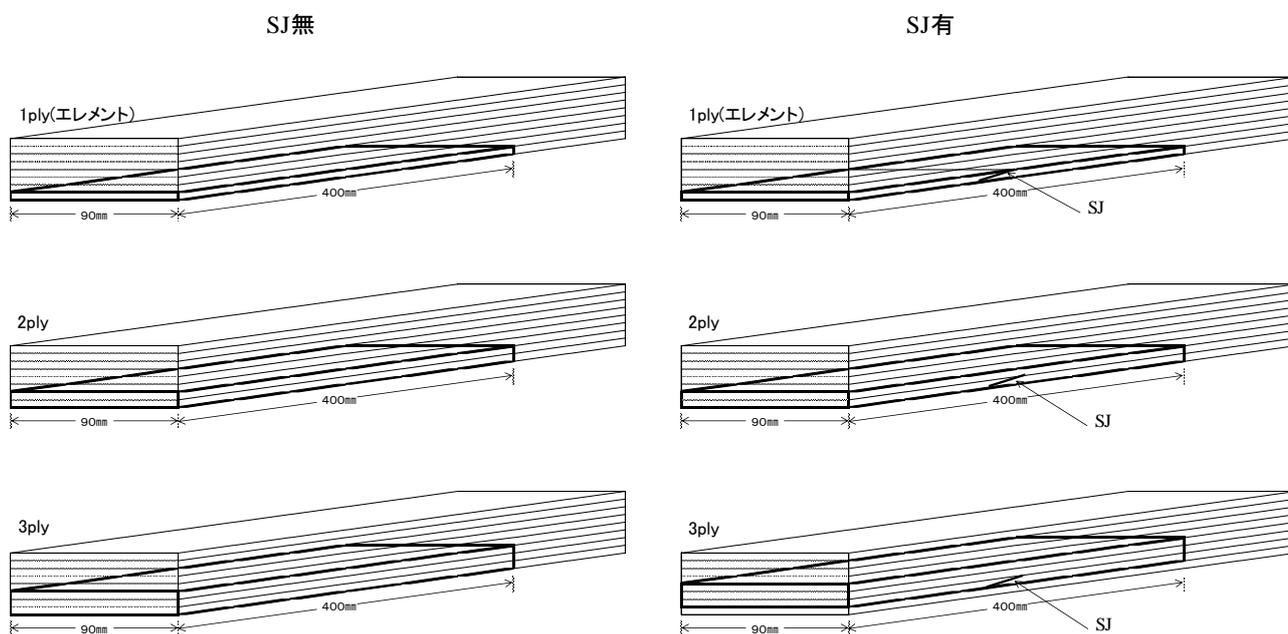


図 4.1 試験体のLVLからの切り出し位置

注: SJ: 表4.1を参照。3plyのSJ無の試験体には、最外層を含まない内側から採取したものがある。

同表中、1ply の SJ 有・接着層無以外の試験体は、図 4.1 に示すとおり全て LVL の最外層を含んでおり、SJ は LVL の最外層のみに存在し、内層には存在していない。ただし、

1ply の SJ 有・接着層無は片面の接着層を残そうとしたが、均一に残すことが不可能だったため、両面の接着層をサンダーで取り除いたが、裏割れに入り込んでいた接着剤は残っていたことを確認している。以上の 1ply～3ply の試験体に対し、平使い方向と縦使い方向の曲げ、引張、及び圧縮に関する強度試験を行うこととした。ただし、これらの試験は、2.3 と同じ 90 mm 幅の試験体で実施するのが理想的だが、強度間の相関を求めることと、試験片の横倒れや座屈を防止することの必要性から、全ての試験体は図 4.2 に示す通り短冊状の試験片(以後、短冊試験体という)に分割した。ただし、短冊試験体の強度は、何れも 90 mm 幅の試験体で実施した強度と同じと考えた。

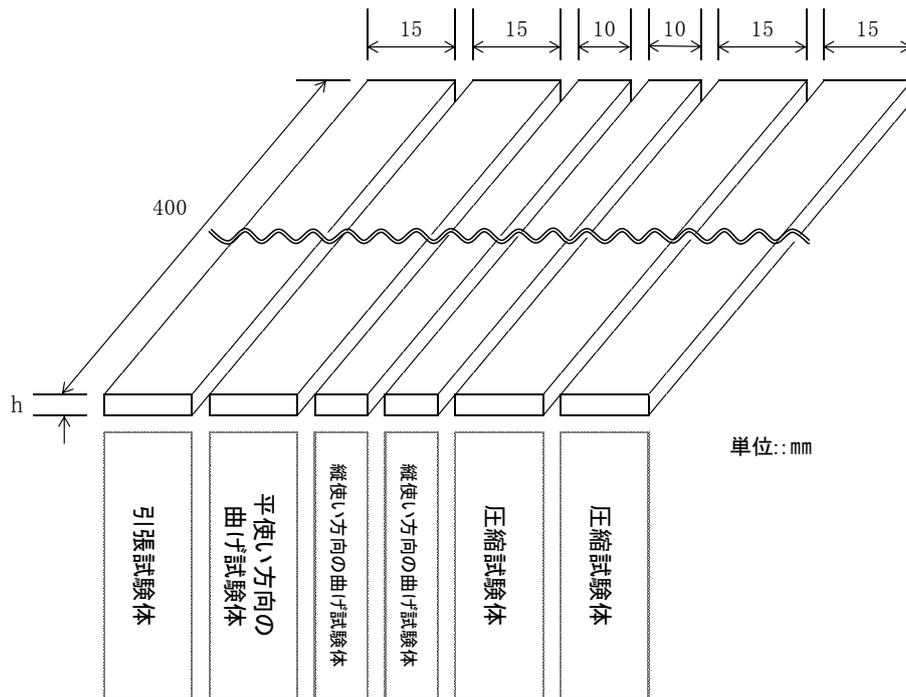


図 4.2 短冊試験体

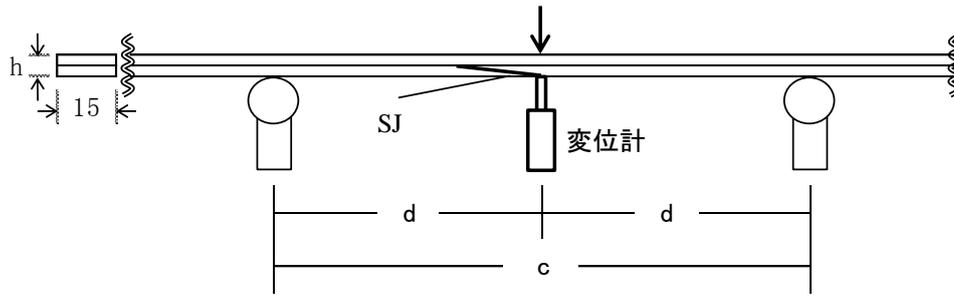
注: h: 標準厚さを表し、1ply の場合は 3.4mm, 2ply の場合は 6.8mm, 3ply の場合は 10.2mm となり、以下同様とする。

縦使い方向の曲げ強度の試験片は横倒れの発生を防ぐために、圧縮試験の試験片は座屈を防ぐために、張り合わせた試験片の作成を予定して短冊試験体を 2 枚としていた。しかし、何れの試験もその後に横倒れが発生し難い治具(以降、サポートという)を作成し用いたので、個々の短冊試験体毎に試験を行うこととした。

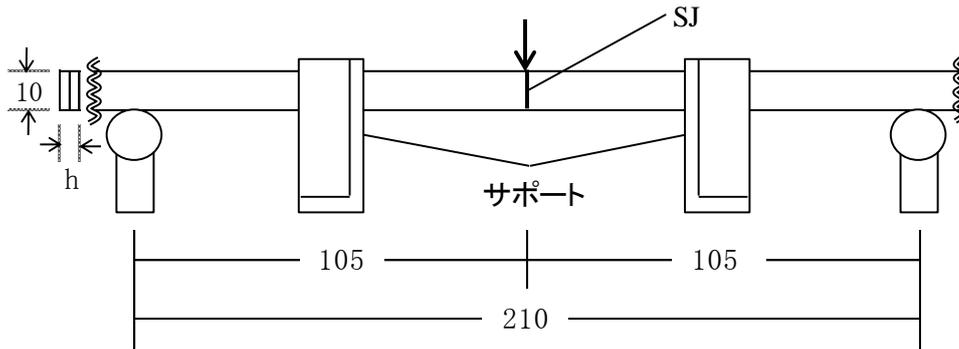
4.3 実験方法

これ以降は、2・3ply の縦使い方向の曲げヤング係数及び曲げ強度を $E_{V(2,3)}$ 及び $F_{V(2,3)}$ 、2・3ply の平使い方向の曲げヤング係数及び曲げ強度を $E_{h(2,3)}$ 及び $F_{h(2,3)}$ 、2・3ply の引張強度及び圧縮強さを $F_{t(2,3)}$ 及び $F_{c(2,3)}$ と表す。

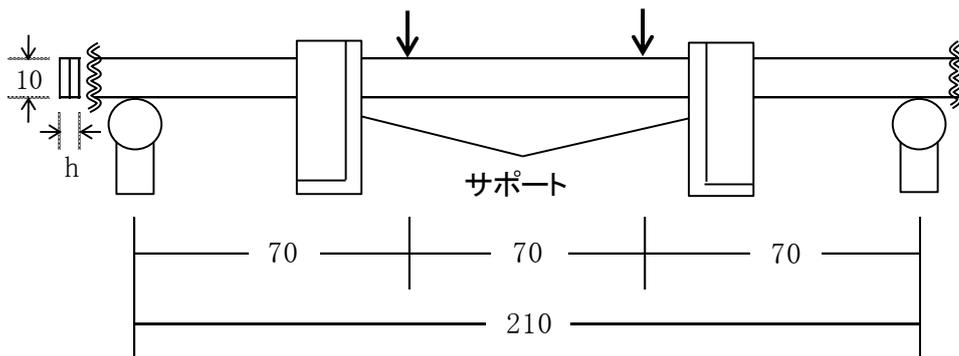
試験方法は、図 4.3 に示した。まず、図 4.2 に示す 6 つの短冊試験体全てに、図 4.3(a) に示す中央集中荷重方式による静的曲げ試験を実施し、比例域内の荷重とたわみ量の関係か



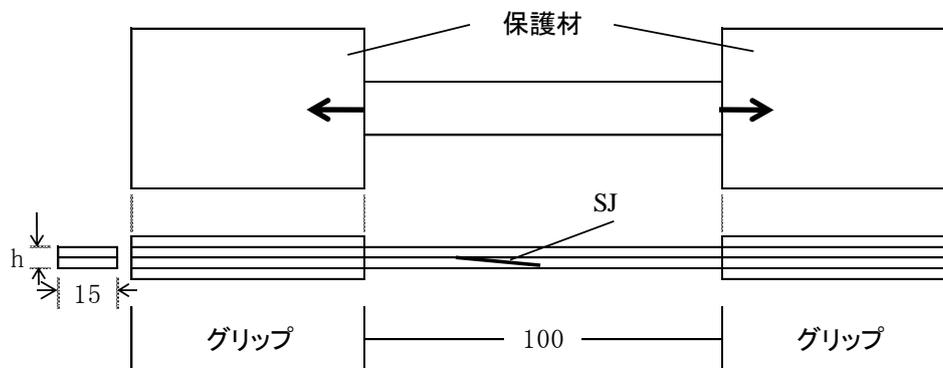
(a) 平使い方向の曲げ試験



(b) 縦使い方向の曲げ強度試験(SJ有タイプ試験体)



(c) 縦使い方向の曲げ強度試験(SJ無タイプ試験体)



(d) 引張試験

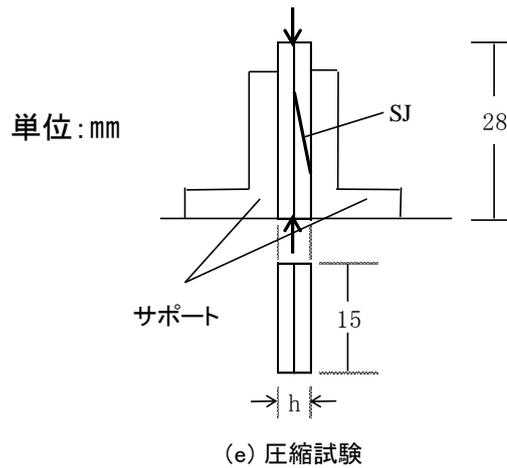


図 4.3 静的試験方法

注：c: スパンを表し、1ply の場合は 150 mm、2ply と 3ply の場合は 210 mm となる。

d: スパンの半分を表す。h: 表 4.2 を参照。SJ: 表 4.1 を参照。

らヤング係数の実験値を求めた。平使い方向の曲げ強度試験は、同じ中央集中荷重方式による静的曲げ試験を実施し、最大荷重から F_h と $F_{h(2,3)}$ の実験値を求めた。

縦使い方向の曲げ試験は、スカーフ有の場合は図 4.3 (b) に示す中央集中荷重方式、スカーフ無の場合は図 4.3 (c) に示す 3 等分点荷重方式による静的曲げ試験を実施し、最大荷重から F_v と $F_{v(2,3)}$ の実験値を求めた。ここで、スカーフ有の曲げ試験を中央集中荷重方式としたのは、スカーフ以外の部分からの破壊を防止するためであり、スカーフ無の曲げ試験を 3 等分点荷重方式としたのは、一定モーメント区間の最弱部での破壊を観測するためである。引張試験は、図 4.3 (d) に示す強度試験を実施し、最大荷重から F_t と $F_{t(2,3)}$ の実験値を求めた。圧縮試験は、図 4.3 (e) に示す強度試験を実施し、最大荷重から F_c と $F_{c(2,3)}$ の実験値を求めた。以上の実験で使用した試験機は、オリエンテック RTC-1325 25kN である。また、試験体の調湿は第二章の LVL 試験体と同様に行わず、試験も一定の温湿度条件下で行わなかった。

4.4 実験結果と考察

4.4.1 断面欠損のある試験体の扱い

第二章の LVL 試験体を実験後に調べたところ、最外層のスカーフに断面欠損が生じているものがあつた。第三章で推定したエレメントの強度分布は、第二章の LVL 試験体を構成するすべての単板のヤング係数や強度から導き出されたことから、以上の断面欠損の影響を含むと考えられる。ただし、第二章の LVL 試験体は断面欠損が最外層に限定され、8ply ~ 17ply と積層数が多いことから、第三章で推定したエレメントの強度分布に対するその影響は極めて小さくなると考えられる。

一方、4.3 の実験で用いた試験体は第二章の LVL 試験体の残部から採取されたことから、

SJ 有・接着層有の試験体には最外層の SJ に断面欠損が生じているものがあり、積層数が少ないことから断面欠損の影響が大きいことが考えられる。したがって、第三章で推定した強度分布と比較するためには、4.3 の実験値に対する断面欠損の影響を評価し、その影響が大きいと見られる実験値を除いておく必要がある。そこで、1ply 及び 2ply の SJ 有・接着層有の試験体毎に接合効率(α)の値を算出し、それぞれの試験体に対する断面欠損の影響を調べた。ただし、 α は次のようにして求めた。

まず、4.3 の平使い方向の曲げ試験に用いた SJ 有・接着層有の試験体の残片を対象に、それぞれ破壊された中心部を取り除いた両側の健全部分から 2 片の試験残片を抽出した。この 2 片の試験残片は、図 4.3(a)と同様に中央集中荷重方式で荷重とたわみを測定し、それぞれ平使い方向の曲げヤング係数 E_1 と E_2 を求めた。ここで、この両側の試験残片が剛の状態に直列に接合した場合を考えると、接合されて一体化した試験残片の平使い方向の曲げヤング係数の推定値 E_0 は、次のとおり求められる³⁰⁾。

$$E_0 = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2}$$

そこで、1ply の場合は E_h の実験値を、2ply の場合は $E_{h(2,3)}$ の実験値を E_0 で除した値を α とした。

求められた積層数毎の α の範囲は、1ply の SJ 有・接着層有が 0.61~1.38 となり、2ply の SJ 有・接着層有が 0.84~1.25 となった。一方、断面欠損のない 1ply の SJ 有・接着層無についても α の値を求めると、範囲は 0.92~1.24 となった。単板におけるスカーフ加工及び接着前後のヤング係数の比に関する文献は皆無であるが、文献 53) ではラミナにおける SJ 加工及び接着前後のヤング係数の比を 0.74~1.21 と示している。これらの数値を比較すると、最小値は 1ply の SJ 有・接着層有が最も小さく、ラミナ、2ply の SJ 有・接着層有、1ply の SJ 有・接着層無という順に大きくなり、最大値は 1ply の SJ 有・接着層有の 1.38 を除くと何れもほぼ同じ値となった。ここで、 $\alpha=1.38$ の試験残片を調べてみたが、このように大きな値となる理由は分からなかった。

以上より、1ply の SJ 有・接着層無の実験値については、断面欠損の影響が存在すると考えられる。したがって、表 4.1 に示した 27 体の 1ply の SJ 有・接着層無のうち、断面欠損が生じていた 22 体の試験体の実験値は、これ以降の解析に用いないことにした。そこで、表 4.2 に、これ以降の解析に用いる試験体の数を示した。なお、3ply についても同様の検討をしようとしたが、3ply の試験体は曲げ破壊試験後、引張試験の添え木に使用してしまい、残念ながら測定できなかった。しかし、3ply は 2ply よりも断面が大きくなるので、2ply の考察から、断面欠損の影響はないと考えてよいと思われる。

4.4.2 縦使い方向の曲げヤング係数と曲げ強度

縦使い方向の曲げの場合、2.2 の LVL 試験体は積層数により断面寸法が異なったが、3.2 は 90 mm 幅の E_v として推定した。本章でも 90 mm 幅のヤング係数として、4.4.3 で後述する 1ply の場合は E_h の、2・3ply の場合は $E_{h(2,3)}$ の実験値を求めた。以上より、 E_v と $E_{v(2,3)}$ の実験値は E_h と $E_{h(2,3)}$ の実験値で代用した。また、 F_v の実験値は試験片 2 片の強度の平均

から求め、 $F_{V(2,3)}$ の実験値も同様に試験片 2 片の強度の平均から求めた。

表4.3 縦使い方向の曲げ強度試験結果

積層数	試験体数	記号	平均値(N/mm ²)	変動係数(%)	相関係数
1ply	30	F_v	78.80	21.29	0.15
2ply	31	$F_{V(2,3)}$	84.61	17.90	0.53
3ply	17	$F_{V(2,3)}$	84.43	14.19	0.48

注： F_v : 1plyの縦使い方向の曲げ強度を表す、 $F_{V(2,3)}$: 2plyまたは3plyの縦使い方向の曲げ強度を表す。1plyの場合、相関係数は、 E_h の実験値で代用した E_v の実験値と F_v の実験値との関係を表す。2plyまたは3plyの場合、相関係数は、 $E_{h(2,3)}$ の実験値で代用した $E_{v(2,3)}$ の実験値と $F_{V(2,3)}$ の実験値との関係を表す。SJ: 表4.1を参照。1plyは、断面欠損のないSJ有・接着層有、SJ有・接着層無及びSJ無・接着層有を合せた結果である。2・3plyは、SJ有・接着層有とSJ無・接着層有を合せた結果である。

実験結果は、積層数別に表 4.3 に示した。ただし、3.4 では、LVL 各層のスカーフの有無を考慮せずに F_v を推定した。また、2.4.1 で示した LVL 試験体の破壊形態も、SJ 以外の欠点によるものが多かった。したがって、 F_v 分布の推定値と比較するために、1ply の実験値は、断面欠損のない SJ 有・接着層有、SJ 有・接着層無及び SJ 無・接着層有を合せた結果を同表に示した。更に、2・3ply の実験値についても、SJ 有・接着層有と SJ 無・接着層有を合せた結果を示した。ここで、表 4.2 とは異なり 1ply の試験体数が 30 体なのは、図 4.3(b)または(c)に示すサポートを設置したにも関わらず、横倒れが発生した試験体が 1ply で 2 体生じたからである。

同表より、曲げ強度 (F_v と $F_{V(2,3)}$) については、平均値は 2ply が最も大きくなり、3ply がそれより若干小さく、1ply が最も小さくなる結果となり、変動係数は積層数が増える毎に小さくなる結果となった。また、ヤング係数と曲げ強度の相関係数については、平均値と同様の結果であるが、1ply と 2・3ply の間に大きな差が生じている。文献 52) に示すダフリカカラマツの曲げ強度 100N/mm^2 と比較すると、 F_v の平均値は相当低い値を示している。その理由は、4.3 の実験に用いた短冊試験体は繊維傾斜が大きく、試験体の破壊は目切れによるものが大半を占めたことにより、強度が低減したものと考えられる。

4.4.3 平使い方向の曲げヤング係数と曲げ強度

4.3 では図 4.2 に示す 6 片の短冊試験体のヤング係数を測定したが、90 mm幅の曲げヤング係数はこの 6 片のヤング係数の相加平均値を求め、1ply の場合は E_h 、2・3ply の場合は $E_{h(2,3)}$ の実験値としてそれぞれ表した。以上の E_h 及び $E_{h(2,3)}$ を含む実験結果は、積層数別に表 4.4 に示した。ただし、3.5.2 では、平使い方向の曲げのクライテリアを複合応力一次形式による破壊と仮定し、 F_t 分布を LVL の引張試験による推定値を用いて固定して F_h 分布を推定した。この LVL の引張試験による F_t 分布を推定値は、LVL 各層の SJ の有無を考慮せずに推定したことから、 F_t 分布も SJ の有無を考慮せずに推定したことになる。し

たがって、 F_t 分布の推定値と比較するために、1ply の実験値の結果は、断面欠損のない SJ 有・接着層有、SJ 有・接着層無及び SJ 無・接着層有を合せた結果を同表に示した。更に、2・3ply の実験値についても、SJ 有・接着層有と SJ 無・接着層有を合せた結果を示した。

表4.4 平使い方向の曲げ試験結果

積層数	試験体数	平使い方向の曲げヤング係数			平使い方向の曲げ強度			
		記号	平均値(kN/mm ²)	変動係数(%)	記号	平均値(N/mm ²)	変動係数(%)	相関係数
1ply	32	E_h	14.42	13.29	F_h	96.80	34.22	0.59
2ply	31	$E_{h(2.3)}$	13.24	11.68	$F_{h(2.3)}$	87.29	26.45	0.67
3ply	17	$E_{h(2.3)}$	12.43	10.39	$F_{h(2.3)}$	79.24	21.15	0.73

注: E_h : 1plyの平使い方向の曲げヤング係数を表す、 $E_{h(2.3)}$: 2plyまたは3plyの平使い方向の曲げヤング係数を表す。 F_h : 1plyの平使い方向の曲げ強度を表す、 $F_{h(2.3)}$: 2plyまたは3plyの平使い方向の曲げ強度を表す。SJ: 表4.1を参照。1plyは、断面欠損のないSJ有・接着層有、SJ有・接着層無及びSJ無・接着層有を合せた結果である。2・3plyは、SJ有・接着層有とSJ無・接着層有を合せた結果である。

同表より、曲げヤング係数(E_h と $E_{h(2.3)}$)については、平均値は積層数が増す毎に低下し、変動係数も積層数が増す毎に小さくなった。曲げ強度(F_h と $F_{h(2.3)}$)については、曲げヤング係数の場合と同様に、平均値は積層数が増す毎に低下し、変動係数も積層数が増す毎に小さくなった。曲げヤング係数と曲げ強度の相関係数については、積層数の増加に伴い大きくなる結果となった。また、上述のとおり LVL のクライテリアとして複合応力一次形式を仮定しているため、 F_h と F_t または $F_{h(2.3)}$ と $F_{t(2.3)}$ の相関係数の実験値が必要である。同表には示していないが、1ply の場合は 0.57、2ply の場合は 0.62、3ply の場合は 0.37 となり、積層数別の傾向は見られなかった。文献 52) の曲げ強度 100N/mm² と比較すると、 F_h の平均値は若干低い値を示している。その理由としては、SJ による強度の低減の影響が考えられる。

4.4.4 引張強度

3.4 の F_t 分布の推定では、 E_t 分布の推定値を NLM により推定した E_h 分布で代用した。したがって、 E_t の実験値は 4.4.3 の E_h の実験値で代用し、更に $E_{t(2.3)}$ の実験値も $E_{h(2.3)}$ の実験値で代用した。

実験結果は、積層数別に表 4.5 に示した。ここで、表 4.2 とは異なり試験体数が 2ply で 30 体及び 3ply で 15 体なのは、図 4.3(d) に示す保護材の根元から破壊された試験体が 2ply で 1 体及び 3ply で 2 体生じたため、これらの実験値を除いたからである。

同表より、引張強度(F_t と $F_{t(2.3)}$)については、縦使い方向の曲げ強度と同様に、平均値は 2ply が最も大きく 3ply がそれより若干小さく、1ply が最も小さくなる結果となり、変動係数は積層数が増える毎に小さくなる結果となった。また、ヤング係数と引張強度との相関係数については、積層数が増す毎に小さくなった。文献 52) に示すダフリカカラマツの縦引張強度 170N/mm² と比較すると、同表の F_t の平均値は相当低い値を示している。その理由としては、4.3 の実験に用いた短冊試験体は目切れや SJ で破壊されたものが多く、これらの影響を受けて強度が大きく低減したからと考えられる。

表4.5 引張試験結果

積層数	試験体数	記号	平均値(N/mm ²)	変動係数(%)	相関係数
1ply	32	F_t	53.78	34.27	0.45
2ply	30	$F_{t(2.3)}$	61.95	24.96	0.41
3ply	15	$F_{t(2.3)}$	59.59	18.43	0.37

注: F_t : 1plyの引張強度を表す、 $F_{t(2.3)}$: 2plyまたは3plyの引張強度を表す。1plyの場合、相関係数は、 E_h の実験値で代用した E_t の実験値と F_t の実験値との関係を表す。2plyまたは3plyの場合、相関係数は、 $E_{h(2.3)}$ の実験値で代用した $E_{t(2.3)}$ の実験値と $F_{t(2.3)}$ の実験値との関係を表す。SJ: 表4.1を参照。1plyは、断面欠損のないSJ有・接着層有、SJ有・接着層無及びSJ無・接着層有を合せた結果である。2・3plyは、SJ有・接着層有とSJ無・接着層有を合せた結果である。

4.4.5 圧縮強度

E_t 分布の場合と同様に、3.4 では E_c 分布の推定値を NLM により推定した E_h 分布で代用し F_c 分布の推定を行った。したがって、 E_c の実験値は 4.4.3 の E_h の実験値で代用した。更に、 $E_{c(2.3)}$ の実験値についても、同様に $E_{h(2.3)}$ の実験値で代用した。また、 F_c の実験値は試験片 2 片の強度の平均から求め、 $F_{c(2.3)}$ の実験値も同様に試験片 2 片の強度の平均から求めた。

表4.6 圧縮試験結果

積層数	試験体数	記号	平均値(N/mm ²)	変動係数(%)	相関係数
1ply	31	F_c	60.17	13.03	0.50
2ply	29	$F_{c(2.3)}$	58.39	17.27	0.43
3ply	15	$F_{c(2.3)}$	58.27	10.21	0.69

注: F_c : 1plyの圧縮強度を表す、 $F_{c(2.3)}$: 2plyまたは3plyの圧縮強度を表す。1plyの場合、相関係数は、 E_h の実験値で代用した E_c の実験値と F_c の実験値との関係を表す。2plyまたは3plyの場合、相関係数は、 $E_{h(2.3)}$ の実験値で代用した $E_{c(2.3)}$ の実験値と $F_{c(2.3)}$ の実験値との関係を表す。SJ: 表4.1を参照。1plyは、断面欠損のないSJ有・接着層有、SJ有・接着層無及びSJ無・接着層有を合せた結果である。2・3plyは、SJ有・接着層有とSJ無・接着層有を合せた結果である

実験結果は、積層数別に表 4.6 に示した。ただし、 F_v 及び F_t と同様に、3.4 では LVL 各層のスカーフの有無を考慮せずに F_c を推定した。また、 F_c 分布の推定値と比較するために、1ply の実験値は断面欠損のない SJ 有・接着層有、SJ 有・接着層無及び SJ 無・接着層有を合せた結果を同表に示した。更に、2・3ply の実験値についても、SJ 有・接着層有と SJ 無・接着層有を合せた結果を示した。ここで、表 4.2 とは異なり試験体数が 2ply で 29 体及び 3ply で 15 体なのは、図 4.3(e) に示すサポートを設置したにも関わらず、座屈が生

じた試験体が 2ply と 3ply で 2 体ずつ生じたため、これらの実験値を除いたからである。同表より、圧縮強度(F_t と $F_{t(2,3)}$)の平均値については、積層数が増す毎に小さくなったがその差は僅かであり、1ply から 3ply までほぼ同等の大きさとなったと言える。圧縮強度(F_t と $F_{t(2,3)}$)の変動係数については、2ply が最も大きく次に 1ply が続き、3ply が最も小さくなる結果となった。また、ヤング係数と圧縮強度の相関係数については、3ply が最も大きく次に 1ply が続き、2ply が最も小さくなる結果となった。

文献 52) に示すダフリカカラマツの縦圧縮強度 45N/mm^2 と比較すると、同表の F_c の平均値は相当大きい値を示している。その理由としては、圧縮の場合は部分的に破壊されても、他の箇所に応力が再配分されて全体としては破壊されないことによると考えられる。

4.5 エレメントの実験結果と NLM による推定値との比較

4.4.2~4.4.5 では、エレメントと考えられる 1ply の F_v 、 E_h 、 F_h 、 F_t 及び F_c の実験値を示した。そこで、第三章の NLM による推定値と比較するために、 F_v 、 E_h 、 F_h 、 F_t 及び F_c のそれぞれで、実験値と推定値の別に平均値と変動係数を表 4.7 に示した。

表4.7 LVLエレメントのヤング係数と強度の実験値と推定値の比較

強度	LVLの強度試験	破壊クライテリア	実験値		推定値	
			平均値	変動係数(%)	平均値	変動係数(%)
E_h	平使い方向の曲げ試験		14.42 (kN/mm ²)	13.29	14.48 (kN/mm ²)	12.85
F_h	平使い方向の曲げ試験	複合応力一次形式	96.80 (N/mm ²)	34.22	105.43 (N/mm ²)	29.99
F_v	縦使い方向の曲げ試験	最小値破壊	78.80 (N/mm ²)	21.29	96.31 (N/mm ²)	18.01
F_t	引張試験	最小値破壊	53.78 (N/mm ²)	34.27	64.00 (N/mm ²)	17.15
F_t	平使い方向の曲げ試験	最外縁応力破壊	47.27 (N/mm ²)	24.47	65.66 (N/mm ²)	16.96
F_t	平使い方向の曲げ試験	最外層応力破壊	47.27 (N/mm ²)	24.47	60.11 (N/mm ²)	16.83
F_c	圧縮試験	最小値破壊	60.17 (N/mm ²)	13.03	73.86 (N/mm ²)	11.50

注: E_h : 表4.4を参照。 F_h : 表4.4を参照。 F_v : 表4.3を参照。 F_t : 表4.5を参照。 F_c : 表4.6を参照。 NLM: 非線形最小二乗法を表す。 LVLの強度試験: LNMの推定に用いたLVLのヤング係数または強度の試験を表す。 破壊クライテリア: NLMによる推定の際、仮定したLVLの破壊クライテリアを表す。 複合応力一次形式: 3.5.2.1を参照。 最小値破壊: 3.4.1を参照。 最外縁応力破壊: 3.5.1.1を参照。 最外層応力破壊: 3.5.1.1を参照。 実験値: エレメントと仮定される1plyの強度実験値を表す。 推定値: NLMによるエレメントのヤング係数または強度の推定値を表す。

同表より、 E_h については、実験値(平均値 14.4kN/mm^2 、変動係数 13.3%)に対し、推定値(平均値 14.5kN/mm^2 、変動係数 12.8%)となり、実験値と推定値はほぼ一致した。 F_h については、実験値(平均値 96.8kN/mm^2 、変動係数 34.2%)に対し、推定値(平均値 105.4N/mm^2 、変動係数 30.0%)となり、推定値の方が実験値より少し上回る結果となった。また、 F_v については、実験値(平均値 78.8N/mm^2 、変動係数 21.3%)に対し、推定値(平均値 96.3N/mm^2 、変動係数 18.0%)となり、実験値より推定値の方が大きくなった。

LVL の引張による F_t については、実験値(平均値 53.8N/mm^2 、変動係数 34.3%)に対し、推定値(平均値 64.0N/mm^2 、変動係数 17.2%)となり、実験値より推定値の方が大きくなった。LVL の平使い方向の曲げによる F_t については、実験値(平均値 47.3N/mm^2 、変動係数 24.5%)

に対し、クライテリアとして最外縁応力破壊を仮定する場合は推定値(平均値 65.7N/mm²、変動係数 17.0%)、最外層応力破壊を仮定する場合は推定値(平均値 60.1N/mm²、変動係数 16.8%)となり、何れも実験値より推定値の方が大きくなった。最後に、 F_c についても同様に、実験値(平均値 60.2N/mm²、変動係数 13.0%)に対し、推定値(平均値 73.9N/mm²、変動係数 11.5%)となり、実験値より推定値の方が大きくなった。

以上の結果をまとめると、 F_h について推定値が実験値を若干上回り、これ以外の各強度については推定値が実験値を上回った。その理由としては、LVLの各強度に積層効果が含まれており、8ply~17plyのLVLの強度を用いて求めた第三章のNLMによる推定値にもこの影響が存在すると考えられる。したがって、積層された状態になく積層効果が存在しないと考えられる1plyの実験値と比べると、積層効果の影響を受けた分だけ値が高くなったと考えられる。

4.6 まとめ

本章では、第二章の強度実験で用いたLVL試験体の残部から1ply~3plyの試験体を切り取り、第二章と同様の縦使い方向の曲げ強度試験、平使い方向の曲げ試験、引張試験及び圧縮試験を行い、縦使い方向の曲げ強度、平使い方向の曲げヤング係数と曲げ強度、引張強度及び圧縮強度の実験値を収集した。そのなかで、エレメントと考えられる1plyの実験値については、平使い方向の曲げヤング係数とそれぞれの強度毎に、第三章のNLMによる推定値との比較を行った。その結果、平使い方向のヤング係数については、実験値と推定値でほぼ同等の大きさとなった。しかし、縦使い方向の曲げ強度、LVLの引張による引張強度、LVLの平使い方向の曲げによる引張強度及び圧縮強度については、実験値より推定値の方が大きくなった。また、平使い方向の曲げ強度については、推定値の方が実験値より若干大きくなった。

以上の結果となった理由については、第三章の推定で用いた8ply~17plyのLVLの実験値に積層効果の影響が存在しており、エレメントの各強度の推定値も、この影響を受けて1plyの実験値より大きくなったと考えられる。そこで、次章の第五章では、本章の2・3plyの実験値における積層効果の存在を確認することにより、第三章の推定で用いた8ply~17plyのLVLの実験値における積層効果の有無を検討することとした。

第五章 2・3plyにおける積層効果の確認

5.1 はじめに

LVLの強度に積層効果が存在するか確認するために、本章では、**第四章**の2plyまたは3ply(以降、2・3plyという)の実験値の強度の分布と、同じ**第四章**の1plyの実験値の強度分布を用いたシミュレーションによる2・3plyの強度の分布を比較した。ここで、1plyの実験値はLVLの積層から切り離されており、積層効果が存在しないものと考えられる。したがって、実験値の強度の分布がシミュレーションの強度の分布より大きい場合、2・3plyの強度には積層効果の影響が存在するものと考えられる。更に、2・3plyより積層数が多い**第二章**のLVLの強度実験値も同様と考えられ、このLVLの強度実験値を用いて推定した**第三章**のエレメントの強度分布には、積層効果の影響が存在すると考えられる。

以上の比較と検討を行うために、本章は次のとおり構成した。まず、**5.2**では、本章で使用する記号を定義した。**5.3**では、2・3plyの縦使い方向の曲げ強度($F_{v(2.3)}$)、平使い方向の曲げ強度($F_{h(2.3)}$)、引張強度($F_{t(2.3)}$)または圧縮強度($F_{c(2.3)}$)の各分布を対象に、**第四章**で示した1plyの実験値の強度分布を用いてシミュレーションを行う方法を示した。ただし、同じく**第四章**で示した $F_{v(2.3)}$ 、 $F_{h(2.3)}$ 、 $F_{t(2.3)}$ 及び $F_{c(2.3)}$ の実験値の強度の分布は、**5.3**のシミュレーションによる強度の分布と比較するために、最も確からしいと考えられる母集団分布を求める必要が生じた。そこで、**5.4.1**では、2・3plyの実験値による各強度の分布に対し、最尤法を適用して母集団分布を求める方法を示した。更に、**5.4.2**では、2・3plyの実験値の各強度の分布について、**5.4.1**の最尤法を適用して求めた母集団分布のパラメータを示した。**5.5**では、 $F_{v(2.3)}$ 、 $F_{h(2.3)}$ 、 $F_{t(2.3)}$ または $F_{c(2.3)}$ のそれぞれを対象に、**5.3**のシミュレーションによる分布と**5.4.2**の実験値の母集団分布を比較することにより、各強度に積層効果が存在するか確認した。更に、LVLの縦使い方向の曲げ強度(MOR_v)、平使い方向の曲げ強度(MOR_h)、引張強度(TS)及び圧縮強度(CS)の実験値について、積層効果が存在するか検討を行った。

5.2 記号の定義

これまで使用したものを含め、本章で使用する記号を次のとおり定義する。まず、正規分布をN、対数正規分布をLN、2Pワイブル分布を2PWと表す。エレメント(LVLから1plyに切り離された状態を含む)のヤング係数と強度については、縦使い方向の曲げヤング係数と曲げ強度を E_v と F_v 、平使い方向の曲げ強度を E_h と F_h 、引張ヤング係数と引張強度を E_t と F_t 、圧縮ヤング係数と圧縮強度を E_c と F_c と表す。

また、 E_h の実験値の分布のパラメータを($\underline{P_{e1}}$, $\underline{P_{e2}}$)、 F_v または F_h の実験値の分布のパラメータを($\underline{P_{f1}}$, $\underline{P_{f2}}$)、 F_t の実験値の分布のパラメータを($\underline{P_{t1}}$, $\underline{P_{t2}}$)、 F_c の実験値の分布のパラメータを($\underline{P_{c1}}$, $\underline{P_{c2}}$)と表す。ここで、記号の下線は実験値による値であることを表し、各パラメータの定義については、 P_{e1} と P_{e2} は E_v の E_h に読み換えて**3.2.2**に、 P_{f1} と P_{f2} は**3.4.2**または**3.5.2.2**に、 P_{t1} と P_{t2} は**3.5.1.2**に、 P_{c1} と P_{c2} は P_{f1} と P_{f2} を P_{c1} と P_{c2} に読み換えて**3.4.2**にそれぞれ示すとおりである。更に、 E_h と F_v または E_h と F_h の実験値の相関係数を $\underline{R_{E-F}}$ 、 E_h と F_t の実験値の相関係数を $\underline{R_{E-T}}$ 、 E_h と F_c の実験値の相関係数を $\underline{R_{E-C}}$ 、 E_h 、

図5.1 記号の定義

記号		定義
統計	N	正規分布
	LN	対数正規分布
	2PW	2Pワ이블分布
エレメント	E_h	表3.2を参照
	F_h	表3.8を参照
	E_v	表3.1を参照
	F_v	表3.3を参照
	E_t	表3.4を参照
	F_t	表3.4、表3.6または表3.7を参照
	E_c	表3.5を参照
	F_c	表3.5を参照
分布の パラメータ	Pe_1, Pe_2	E_h の分布のパラメータで、個々の記号の意味は表3.2を参照
	Pf_1, Pf_2	F_v または F_h の分布のパラメータで、個々の記号の意味は表3.3または表3.8を参照
	Pt_1, Pt_2	F_t の分布のパラメータで、個々の記号の意味は Pf_1 及び Pf_2 を Pt_1 及び Pt_2 に読み換えた表3.4、表3.6、表3.7または表3.8を参照
	Pc_1, Pc_2	F_c の分布のパラメータで、個々の記号の意味は Pf_1 及び Pf_2 を Pt_1 及び Pt_2 に読み換えて表3.5を参照
	R_{E-F}	E_h と F_v または E_h と F_h の相関係数
	R_{E-T}	E_h と F_t の相関係数
	R_{E-C}	E_h と F_c の相関係数
	R_{F-T}	F_h と F_t の相関係数
2plyまたは3ply	$E_{h(2,3)}$	2plyまたは3plyの平使い方向の曲げヤング係数
	$F_{h(2,3)}$	2plyまたは3plyの平使い方向の曲げ強度
	$E_{v(2,3)}$	2plyまたは3plyの縦使い方向の曲げヤング係数
	$F_{v(2,3)}$	2plyまたは3plyの縦使い方向の曲げ強度
	$E_{t(2,3)}$	2plyまたは3plyの引張ヤング係数
	$F_{t(2,3)}$	2plyまたは3plyの引張強度
	$E_{c(2,3)}$	2plyまたは3plyの圧縮ヤング係数
	$F_{c(2,3)}$	2plyまたは3plyの圧縮強度
LVL	MOE _h	LVLの平使い方向の曲げヤング係数
	MOR _h	LVLの平使い方向の曲げ強度
	MOR _v	LVLの縦使い方向の曲げ強度
	TS	LVLの引張強度
	CS	LVLの圧縮強度
2plyまたは3ply の分布	$ED_{(2,3)cal}$	E_h の実験値の分布と用いてシミュレーションした $E_{h(2,3)}$ の計算値の分布
	$SD_{(2,3)cal}$	E_h と F_v 、 E_h と F_t 、 E_h と F_c 、若しくは E_h 、 F_h 及び F_t の実験値の分布を用いてシミュレーションした2plyまたは3plyの強度の計算値の分布
	$SD_{(2,3)ex}$	2plyまたは3plyの強度の実験値の分布
	$SD_{(2,3)ex-P}$	最尤法で推定した $SD_{(2,3)}$ の母集団分布
その他の記号	*_*	*の実験値

注 エレメント:LVLから切り離された1plyを含む。

F_h と F_t の実験値の相関係数を R_{F-T} とそれぞれ表す。

更に、2・3ply のヤング係数と強度については、縦使い方向の曲げヤング係数と曲げ強度を $E_{V(2.3)}$ と $F_{V(2.3)}$ 、平使い方向の曲げヤング係数と曲げ強度を $E_{h(2.3)}$ と $F_{h(2.3)}$ 、引張ヤング係数と引張強度を $E_{t(2.3)}$ と $F_{t(2.3)}$ 、圧縮ヤング係数と圧縮強度を $E_{c(2.3)}$ と $F_{c(2.3)}$ と表す。LVL については、平使い方向の曲げヤング係数と曲げ強度を MOE_h と MOR_h 、縦使い方向の曲げ強度を MOR_v 、引張強度を TS 、圧縮強度を CS と表す。

計算方法は 5.3 で述べるが、 E_h の実験値を用いてシミュレーションした $E_{h(2.3)}$ の計算値の分布を $ED_{(2.3)cal}$ と、1ply の実験値の曲げヤング係数と強度分布を用いてシミュレーションした $F_{V(2.3)}$ 、 $F_{h(2.3)}$ 、 $F_{t(2.3)}$ または $F_{c(2.3)}$ の計算値の分布を $SD_{(2.3)cal}$ と表す。一方、 $F_{h(2.3)}$ 、 $F_{V(2.3)}$ 、 $F_{t(2.3)}$ または $F_{c(2.3)}$ のそれぞれの実験値の分布を $SD_{(2.3)ex}$ 、5.4.1 に示す最尤法で推定される $SD_{(2.3)ex}$ の母集団分布を $SD_{(2.3)ex-P}$ と表す。以上の記号の定義は、表 5.1 に示した。

5.3 エレメントの強度分布を用いた 2・3ply 強度分布のシミュレーション

4.5 で示したエレメントの実験値と推定値の比較結果を踏まえ、 $F_{V(2.3)}$ 、 $F_{h(2.3)}$ 、 $F_{t(2.3)}$ 及び $F_{c(2.3)}$ を対象に、 $SD_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)ex}$ をそれぞれ比較することを考えた。ここで、 $SD_{(2.3)cal}$ は、LVL から切り離れた 1ply の実験値を用いてシミュレーションした 2・3ply の強度の計算値の分布であることから、積層効果の影響が存在しないと考えられる。一方、 $SD_{(2.3)ex}$ は、2・3ply の試験体の強度実験値の分布である。従って、仮に $SD_{(2.3)ex}$ が $SD_{(2.3)cal}$ よりも大きくなった場合、2・3ply の強度実験値には積層効果の影響が存在し、積層数の多い LVL の強度実験値についても同様と考えられる。そこで、本項では 2・3ply の強度毎に $SD_{(2.3)cal}$ の算出方法を示すが、 $F_{h(2.3)}$ については仮定したクライテリア別となる。

まず、4.4.2、4.4.4 及び 4.4.5 で述べたとおり、 E_v 、 E_t 及び E_c の実験値は 90 mm 幅の E_h の実験値で代用した。したがって、 E_v 、 E_t 及び E_c の実験値は何れも E_h の実験値で表し、 E_h の実験値を用いてシミュレーションした $E_{V(2.3)}$ 、 $E_{t(2.3)}$ 及び $E_{c(2.3)}$ の計算値も、何れも $E_{h(2.3)}$ の計算値と表すこととする。

図5.2 1plyの実験値の分布パラメータ1

—SJ有とSJ無を合わせた結果—

E_h		F_h		F_v		F_t		F_c						
N	平均値 (kN/mm ²)	14.42	N	平均値 (kN/mm ²)	96.80	N	平均値 (kN/mm ²)	78.80	N	平均値 (kN/mm ²)	53.78	N	平均値 (kN/mm ²)	60.17
	標準偏差 (kN/mm ²)	1.92		標準偏差 (kN/mm ²)	33.13		標準偏差 (kN/mm ²)	16.78		標準偏差 (kN/mm ²)	18.43		標準偏差 (kN/mm ²)	7.84
LN	中央値	2.66	LN	中央値	4.51	LN	中央値	4.35	LN	中央値	3.92	LN	中央値	4.09
	標準偏差	0.14		標準偏差	0.36		標準偏差	0.21		標準偏差	0.36		標準偏差	0.13
2PW	尺度パラメータ (kN/mm ²)	15.24	2PW	尺度パラメータ (kN/mm ²)	108.17	2PW	尺度パラメータ (kN/mm ²)	85.63	2PW	尺度パラメータ (kN/mm ²)	60.11	2PW	尺度パラメータ (kN/mm ²)	63.55
	形状パラメータ	9.04		形状パラメータ	3.21		形状パラメータ	4.89		形状パラメータ	3.26		形状パラメータ	8.61

注：N、LN、2PW、 E_h 、 F_h 、 F_v 、 F_t 、 F_c ：表5.1を参照。SJ：表4.1を参照。表に示す分布のパラメータの値は、断面欠損のないSJ有・接着層有、SJ有・接着層無及びSJ無・接着層有の実験値により求められた。

E_h を含む 1ply の実験値は、平均値と変動係数を 4.4.2～4.4.5 で示したが、それぞれの分布としては、第三章で用いた N、LN または 2PW が考えられる。そこで、 E_h 、 F_h 、 F_v 、 F_t 及び F_c の各実験値について、N、LN または 2PW を仮定し、積率法により分布のパラメータを求め K-S 検定を行なった。その結果、 E_h 、 F_h 、 F_v 、 F_t 及び F_c の何れの実験値も、

N、LN または 2PW の 3 通り全ての分布が適合したことから、これらの分布のパラメータを表 5.2 に示した。

また、3.5.1 では、LVL の平使い方向の曲げ強度の破壊クライテリアを引張応力破壊と仮定し、LVL の平使い方向の曲げ試験による F_t 分布を推定した。この F_t 分布の推定値は LVL の引張試験における F_t 分布と異なるが、その理由は 3.5.1.3 の (a) に示したとおりである。したがって、LVL の平使い方向の曲げによる F_t 分布の推定値は、全てが SJ で破壊された訳ではないが、ほぼ SJ で破壊されたエレメントの F_t 分布と見なすことができる。したがって、この F_t 分布の推定値と比較するために、断面欠損のない SJ 有・接着層有と SJ 有・接着層無を合せた 1ply の実験結果についても、N、LN または 2PW を仮定し、積率法により分布のパラメータを求め K-S 検定を行なった。その結果、N、LN または 2PW の 3 通り全ての分布が適合したことから、これらの分布のパラメータを表 5.3 に示した。

図5.3 1plyの実験値の分布パラメータ2

—SJ有のみの F_t の結果—

F_t					
N		LN		2PW	
平均値 (N/mm^2)	47.27	中央値	3.83	尺度パラメータ (N/mm^2)	51.67
標準偏差 (N/mm^2)	11.57	標準偏差	0.25	形状パラメータ	4.59

注：N, LN, 2PW, F_t : 表5.1を参照。SJ: 表4.1を参照。表に示す分布のパラメータの値は、断面欠損のないSJ有・接着層有及びSJ有・接着層無の実験値により求められた。

以上より、 E_h と F_v 、 E_h と F_t または E_h と F_c の実験値の分布の組合せは $3 \times 3 = 9$ 通りとなる。したがって、 $F_{v(2,3)}$ 、 $F_{t(2,3)}$ または $F_{c(2,3)}$ をシミュレーションする場合、この 9 通りの分布の組合せで $SD_{(2,3)cal}$ を算出する。また、 $F_{h(2,3)}$ のシミュレーションで引張応力破壊と仮定する場合、 E_h と SJ 有のみの F_t の実験値の分布の組合せは上記のとおり $3 \times 3 = 9$ 通りとなる。したがって、 $SD_{(2,3)cal}$ はこの 9 通りの分布の組み合わせで算出する。ただし、 E_h 分布は表 5.2 に示すパラメータで代用し、 F_t 分布は表 5.3 に示すパラメータを用いる。SJ 有のみの試験体による E_h を全ての試験体による E_h で代用するのは、4.4.4 で示したとおり、両者の分布がほぼ一致するからである。最後に、 $F_{h(2,3)}$ のシミュレーションで複合一次形式による破壊と仮定する場合、 E_h 、 F_h 及び F_t の実験値は $3 \times 3 \times 3 = 27$ 通りの組合せとなるので、 $SD_{(2,3)cal}$ はこの 27 通りの分布の組み合わせで算出する。

(a) 縦使い方向の曲げ強度

- ⑯ $3 \times 3 = 9$ 通りとなる E_h と F_v の分布の組み合わせのうち、何れか 1 つの分布の組合せを選択する。
- ⑰ 0 以上 1 未満の独立一様乱数を 2 個発生させて、それぞれ逆関数法³⁵⁾により独立標準正規乱数(e_1, e_2)に変換し、更に(e_1, e_2)に(3.9)式を適用して、相関係数が R_{E-F} の 2 次元有相関標準正規乱数(r_1, r_2)に変換³⁵⁾する。ただし、 R_{E-F} は表 4.4 に示す値を用いる。

- ⑱ 積層数 2 の場合は②の操作を 2 回、積層数 3 の場合は②を 3 回繰り返す、この操作で得られた 2 個または 3 個(以降、2・3 個という)の r_1 及び r_2 を、それぞれ 2 または 3 次元(以降 2・3 次元という)ベクトル \mathbf{r}_1 及び \mathbf{r}_2 と表す。
- ⑲ $(\underline{Pe}_1, \underline{Pe}_2)$ を用いて \mathbf{r}_1 の各要素を変換^{49,50)}して 2・3 個の Eh の値とし、これらを要素とする 2・3 次元ベクトルを \mathbf{Eh} と表す。ただし、 $(\underline{Pe}_1, \underline{Pe}_2)$ は表 5.2 に示す Eh のパラメータのうち、①で選択した分布のパラメータを用いる。
- ⑳ $(\underline{Pf}_1, \underline{Pf}_2)$ を用いて \mathbf{r}_2 の各要素を変換^{49,50)}して 2・3 個の Fv の値とし、これらを要素とする 2・3 次元ベクトルを \mathbf{Fv} と表す。ただし、 $(\underline{Pf}_1, \underline{Pf}_2)$ は表 5.2 に示す Fv のうち、①で選択した分布のパラメータを用いる。
- 21 積層数 2 または 3(以降、積層数 2・3 という)と \mathbf{Eh} の各要素を(3.3)式に代入し、 $Eh_{(2.3)}$ の計算値を求める。
- 22 積層数 2・3、 $Eh_{(2.3)}$ の計算値及び \mathbf{Eh} と \mathbf{Fv} の各要素を(3.4)式に代入し、 $Fv_{(2.3)}$ の計算値を求める。
- 23 ②～⑦を 500 回繰り返す、 $Eh_{(2.3)}$ と $Fv_{(2.3)}$ の計算値を 500 組求める。
- 24 ⑧で求められた 500 個の $Eh_{(2.3)}$ の分布を $ED_{(2.3)cal}$ とし、500 個の $Fv_{(2.3)}$ の分布を $SD_{(2.3)cal}$ とする。

(b) 引張強度

$SD_{(2.3)cal}$ を求める手順は(a)の①～⑨を準用するが、 Fv は Ft に、 \mathbf{Fv} は \mathbf{Ft} に、 $(\underline{Pf}_1, \underline{Pf}_2, \underline{R}_{E-F})$ は $(\underline{Pt}_1, \underline{Pt}_2, \underline{R}_{E-T})$ に、表 4.4 は表 4.5 に、(3.4)式は(3.6)式にそれぞれ読み換えることとする。

(c) 圧縮強度

$SD_{(2.3)cal}$ を求める手順は(a)の①～⑨を準用するが、 Fv は Fc に、 \mathbf{Fv} は \mathbf{Fc} に、 $(\underline{Pf}_1, \underline{Pf}_2, \underline{R}_{E-F})$ は $(\underline{Pc}_1, \underline{Pc}_2, \underline{R}_{E-C})$ に、表 4.4 は表 4.7 に、(3.4)式は(3.8)式にそれぞれ読み換える。

(d) 平使い方向の曲げ強度(最外縁応力破壊を仮定)

$SD_{(2.3)cal}$ を求める手順は(a)の①～⑨を準用するが、 Fv は Ft に、 \mathbf{Fv} は \mathbf{Ft} に、 $(\underline{Pf}_1, \underline{Pf}_2, \underline{R}_{E-F})$ は $(\underline{Pt}_1, \underline{Pt}_2, \underline{R}_{E-T})$ に、表 4.4 は表 4.6 に、(3.4)式は(3.18)式に、⑤の表 5.2 は表 5.3 にそれぞれ読み換える。

(e) 平使い方向の曲げ強度(最外層応力破壊を仮定)

$SD_{(2.3)cal}$ を求める手順は(a)の①～⑨を準用するが、 Fv は Ft に、 \mathbf{Fv} は \mathbf{Ft} に、 $(\underline{Pf}_1, \underline{Pf}_2, \underline{R}_{E-F})$ は $(\underline{Pt}_1, \underline{Pt}_2, \underline{R}_{E-T})$ に、表 4.4 は表 4.6 に、(3.4)式は(3.20)式に、⑤の表 5.2 は表 5.3 にそれぞれ読み換える。

(f) 平使い方向の曲げ強度(複合応力一次形式による破壊を仮定)

- ① $3 \times 3 \times 3 = 27$ 通りとなる Eh 、 Fh 及び Ft の分布の組み合わせのうち、何れか 1 つの分布の組合せを選択する。
- ② 0 以上 1 未満の独立一様乱数を 3 個発生させて、それぞれ逆関数法³⁵⁾により独立標準正規乱数(e_1, e_2, e_3)に変換し、更に(e_1, e_2, e_3)に(3.25)式を適用して、相関係数が \underline{R}_{E-F} 、 \underline{R}_{E-T} 及び \underline{R}_{F-T} の 3 次元有相関標準正規乱数(r_1, r_2, r_3)に変換³⁵⁾する。ただし、 \underline{R}_{E-F} は表 4.4、 \underline{R}_{E-T} は表 4.5、 \underline{R}_{F-T} は 4.4.3 に示す値を用いる。
- ③ 積層数 2 の場合は②を 2 回、積層数 3 の場合は②を 3 回繰り返す、この操作で得られ

た2・3個の r_1 、 r_2 及び r_3 を、それぞれ2・3次元ベクトル \mathbf{r}_1 、 \mathbf{r}_2 及び \mathbf{r}_3 と表す。

- ④ $(\underline{P}_{e1}, \underline{P}_{e2})$ を用いて \mathbf{r}_1 の各要素を変換^{49,50)}して2・3個の Eh の値とし、これらを要素とする2・3次元ベクトルを \mathbf{Eh} と表す。ただし、 $(\underline{P}_{e1}, \underline{P}_{e2})$ は表5.2に示す Eh のパラメータのうち、①で選択した分布の組み合わせによるパラメータを用いる。
- ⑤ $(\underline{P}_{f1}, \underline{P}_{f2})$ を用いて \mathbf{r}_2 の各要素を変換^{49,50)}して2・3個の Fh の値とし、これらを要素とする2・3次元ベクトルを \mathbf{Fh} と表す。ただし、 $(\underline{P}_{f1}, \underline{P}_{f2})$ は表5.2に示す Fh のパラメータのうち、①で選択した分布の組み合わせによるパラメータを用いる。
- ⑥ $(\underline{P}_{t1}, \underline{P}_{t2})$ を用いて \mathbf{r}_3 の各要素を変換^{49,50)}して2・3個の Ft の値とし、これらを要素とする2・3次元ベクトルを \mathbf{Ft} と表す。ただし、 $(\underline{P}_{t1}, \underline{P}_{t2})$ は表5.2に示す Ft のパラメータのうち、①で選択した分布の組み合わせによるパラメータを用いる。
- ⑦ 積層数2・3と \mathbf{Eh} の各要素を(3.3)式に代入し、 $Eh_{(2.3)}$ の計算値を求める。
- ⑧ 積層数2・3、 $Eh_{(2.3)}$ の計算値、 \mathbf{Eh} 、 \mathbf{Fh} 及び \mathbf{Ft} の各要素を(3.22)式に代入し、 $Fh_{(2.3)}$ の計算値を求める。
- ⑨ ②～⑧を500回繰り返し、 $Eh_{(2.3)}$ と $Fv_{(2.3)}$ の計算値を500組求める。
- ⑩ ⑨で求められた500組の計算値のうち、500個の $Eh_{(2.3)}$ の分布を $ED_{(2.3)cal}$ とし、500個の $Fh_{(2.3)}$ の分布を $SD_{(2.3)cal}$ とする。

5.4 シミュレーションされた2・3plyのヤング係数分布を用いた2・3ply強度分布(母集団分布)の推定

5.4.1 最尤法による推定

4.4.2、4.4.4及び4.4.5で示したが、 $Ev_{(2.3)}$ 、 $Et_{(2.3)}$ 及び $Ec_{(2.3)}$ の実験値は、90mm幅の $Eh_{(2.3)}$ の実験値で代用した。したがって、 $Ev_{(2.3)}$ 、 $Et_{(2.3)}$ 及び $Ec_{(2.3)}$ の実験値は、何れも $Eh_{(2.3)}$ の実験値と表記こととする。

前項では、1plyの実験値の強度分布を用いて2・3plyの強度分布をシミュレーションする方法を示し、ヤング係数の分布を $ED_{(2.3)cal}$ 、強度の分布を $SD_{(2.3)cal}$ と表すこととした。一方、2・3plyの実験値の強度分布では、ヤング係数の分布が $Eh_{(2.3)}$ の実験値の分布、強度の分布が $SD_{(2.3)ex}$ と表される。以上の2つの強度分布は何れも同じ2・3plyを対象としていることから、それぞれのヤング係数分布は共通でなければならない。そこで、実際に $ED_{(2.3)cal}$ を算出し、 $Eh_{(2.3)}$ の実験値の分布と比較してみた。

まず、 $ED_{(2.3)cal}$ については、各要素を(3.3)式を用いて算出したことから、1plyの実験値の分布がN、LNまたは2PWの何れであっても、2・3plyの計算結果は平均値が1plyとほぼ同等で標準偏差だけが減少した。また、2.2で示したとおり、LVL試験体は材料構成が単一であることから各単板が一体化すれば、積層数が増してもヤング係数分布の平均値はほぼ変わらず、変動係数のみが減少すると考えられる³⁹⁾。したがって、 $ED_{(2.3)cal}$ はこの傾向に合致したことから、 $ED_{(2.3)cal}$ を $SD_{(2.3)ex}$ と $SD_{(2.3)cal}$ で共通する曲げヤング係数の母集団分布と見なした。

一方、 $Eh_{(2.3)}$ の実験値の分布は4.4.3で示したとおり、積層数が増す毎に変動係数だけでなく平均値も減少した。図5.1に積層数別の Eh と Fv 、 $Eh_{(2.3)}$ と $Fv_{(2.3)}$ の実験値の関係を

示したが、同図を見ても、3plyの $Eh_{(2.3)}$ の範囲が1plyの Eh 及び2plyの $Eh_{(2.3)}$ の範囲の下方に偏る結果となった。この理由は、積層数が増す毎に試験体も大きくなり、大きさと量に限りがあるLVL残部からの採取が難しく、試験体数の確保に限界があったためと考えられる。以上より、 $SD_{(2.3)ex}$ も母集団分布から偏っている可能性があり、そのまま $SD_{(2.3)ex}$ を $SD_{(2.3)cal}$ との比較に用いることはできないと考えた。

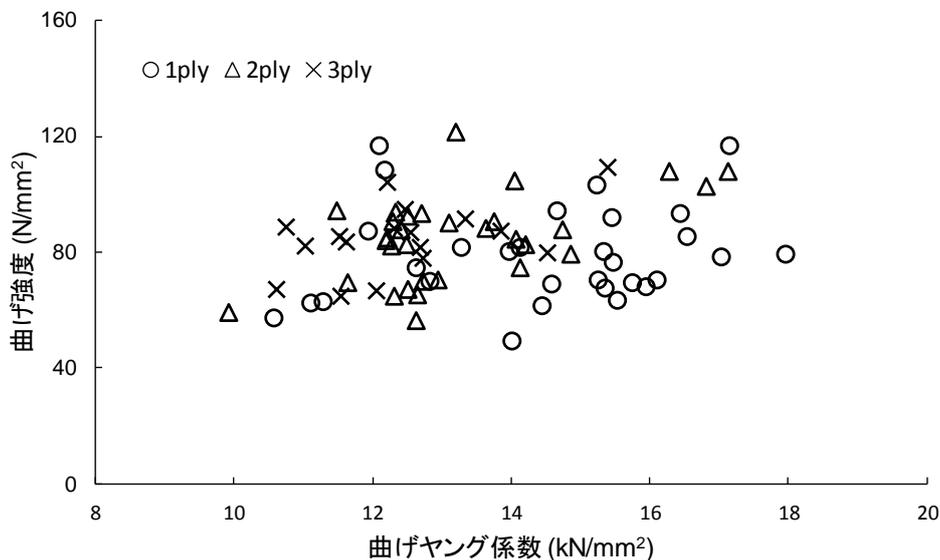


図5.1 縦使い方向の曲げヤング係数と曲げ強度の関係

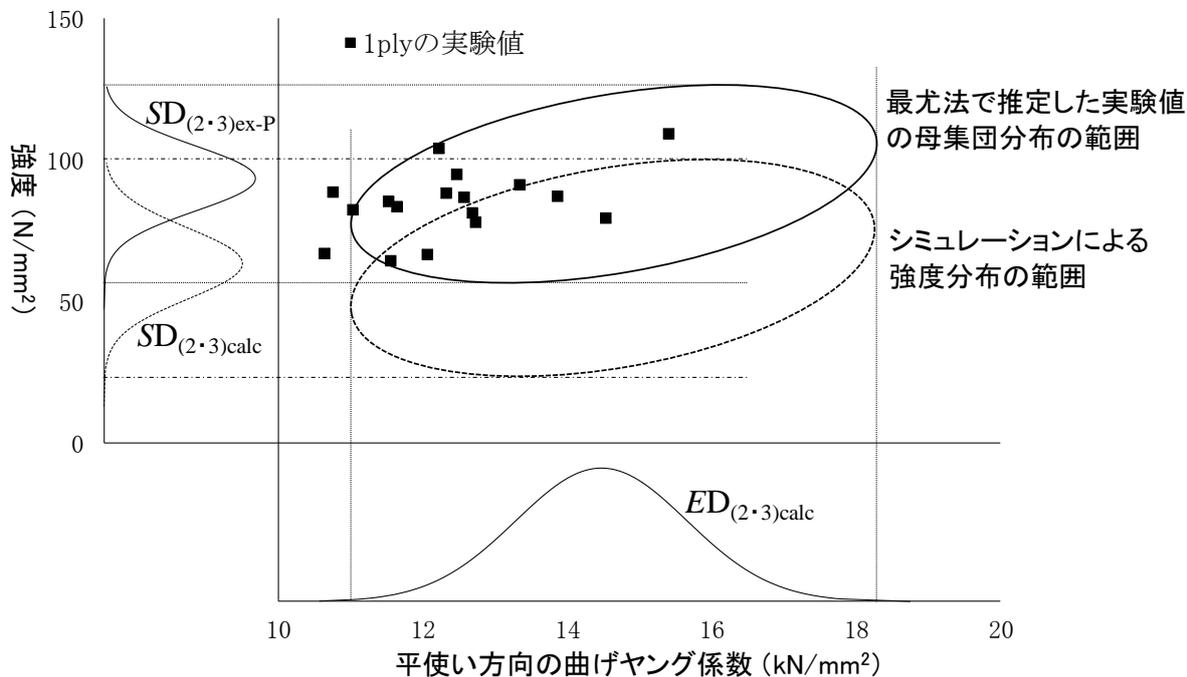


図5.2 $SD_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)ex-P}$ との比較.

注: $ED_{(2.3)cal}$, $SD_{(2.3)cal}$, $SD_{(2.3)ex-P}$:表5.1を参照。

そこで、**図 5.2** に示すように、 $ED_{(2.3)cal}$ を用いて 2・3ply の実験値が最も確からしいと考えられる強度分布 $SD_{(2.3)ex-P}$ ($SD_{(2.3)ex}$ の母集団分布と考えられる) を最尤法⁵⁴⁾により推定し、ヤング係数分布が共通となる $SD_{(2.3)cal}$ との比較を行うこととした。 $SD_{(2.3)ex-P}$ を求める方法は、以下のとおりである

① 確率変数 (x_1, x_2) の同時確率密度関数 $f_1(x_1, x_2)$ は、次式で表される⁵⁵⁾。

$$f(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho_0^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2(1-\rho_0^2)}(z_1^2 - 2\rho_0 z_1 z_2 + z_2^2)\right\} \frac{f_1(x_1) f_2(x_2)}{\varphi(z_1) \varphi(z_2)} \quad (5.1)$$

ここで、 x_1 : 2.3ply の曲げヤング係数を表す確率変数

x_2 : 2.3ply の強度を表す確率変数

$\varphi(\cdot)$: \cdot の標準正規分布関数

z_1 : x_1 の任意の値で累積確率及び確率密度の値が等しい
等価な正規変数

z_2 : x_2 の任意の値で累積確率及び確率密度の値が等しい
等価な正規変数

$f_1(x_1)$: x_1 の確率密度関数

$f_2(x_2)$: x_2 の確率密度関数

ρ_0 : x_1 と x_2 の相関係数

② x_1 及び x_2 の確率分布として、N、LN または 2PW の何れかを仮定する。これらの統計分布は何れも 2 次のパラメータを持つことから、次のことが定義される。

α_i : $f_i(x_i)$ ($i=1,2$) の分布のパラメータで、 $f_i(x_i)$ ($i=1,2$) が N、
LN の場合は平均値、2PW の場合は尺度パラメータ
を表す

β_i : $f_i(x_i)$ ($i=1,2$) の分布のパラメータで、 $f_i(x_i)$ ($i=1,2$) が N、
LN の場合は標準偏差、2PW の場合は形状パラメータ
を表す。

③ 以上より、(5.1)式のパラメータは 5 次元ベクトル $(\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2, \rho_0)$ で表されるが、 (α_1, β_1) は $ED_{(2.3)cal}$ のパラメータとなる。

④ N、LN 及び 2PW の 3 通りの仮定の元で 5.3 に従い $ED_{(2.3)cal}$ を算出し、それぞれ分布のパラメータを求める。

⑤ ④に従い求めた 3 通りの分布のパラメータは $ED_{(2.3)cal}$ の計算値を用いて K-S 検定を行い、最も適合した分布のパラメータを用いて (α_1, β_1) を固定する。

⑥ (α_1, β_1) が既知となったことから、3 次元ベクトル $P=(\alpha_2, \beta_2, \rho_0)$ を最尤法⁵³⁾の推定対象とする。

⑦ 実験値 $(x_{1-1}, x_{2-1}), \dots, (x_{1-N}, x_{2-N})$ による尤度関数 $L = \prod_{i=1}^N f(x_{1-i}, x_{2-i})$ を最大にする P を求めるが、これは次式の $LL = -\log L$ を最小にすることと同義である。

$$LL = N \log(2\pi) + \frac{N}{2} \log(1 - \rho_0^2) + \frac{1}{2(1 - \rho_0^2)} \sum_{i=1}^N (z_{1-i}^2 - 2\rho_0 z_{1-i} z_{2-i} + z_{2-i}^2)$$

$$-\sum_{i=1}^N \log\{f_1(x_{1-i})\} + \sum_{i=1}^N \log\{\varphi(z_{1-i})\} - \sum_{i=1}^N \log\{f_2(x_{2-i})\} + \sum_{i=1}^N \log\{\varphi(z_{2-i})\} \quad (5.2)$$

⑧ LL を最小にする P は、(5.2)式を $\alpha_2, \beta_2, \rho_0$ のそれぞれで偏微分して 0 と置いた(5.3)式の非線形連立方程式を解くことにより求められる。ただし、(5.3)式を解析的に解くことは不可能なので、Newton 法による数値計算の収束値を P の推定値とする。

$$\begin{cases} \partial LL / \partial \alpha_2 = 0 \\ \partial LL / \partial \beta_2 = 0 \\ \partial LL / \partial \rho_0 = 0 \end{cases} \quad (5.3)$$

- ⑨ x_2 の分布が N、LN 及び 2PW の 3 通りの仮定のもと、①～⑧に従い $P=(\alpha_2, \beta_2, \rho_0)$ の推定値を求める。
- ⑩ ⑨による 3 通りの推定値のうち、 LL の残差二乗和が最小となる推定値のパラメータ $(\alpha_2, \beta_2, \rho_0)$ を、2・3ply の強度母集団分布のパラメータ(の一部)とする。
- ⑪ α_2 と β_2 で表される分布を $SD_{(2.3)ex-P}$ とし、 ρ_0 を $ED_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)ex-P}$ の相関係数とする。

5.4.2 推定した強度分布のパラメータ

2・3ply については、5.4.1 のアルゴリズムに従い推定した母集団を実験値として用いる。従って、 $Eh_{(2.3)}$ 、 $Fh_{(2.3)}$ 、 $Fv_{(2.3)}$ 、 $Ft_{(2.3)}$ 及び $Fc_{(2.3)}$ の各実験値は、N、LN または 2PW の 3 通りとなる Eh の実験値の分布毎に、 $ED_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)ex-P}$ を算出した。その結果、 $Fh_{(2.3)}$ については表 5.4 に示したが、同表の分布のパラメータのうち $Eh_{(2.3)}$ が $ED_{(2.3)cal}$ を表し、 $Fh_{(2.3)}$ が $SD_{(2.3)ex-P}$ を表す。以下同様に、 $Fv_{(2.3)}$ については表 5.5 に、 $Ft_{(2.3)}$ については表 5.6 に、 $Fc_{(2.3)}$ については表 5.7 に示した。

以上より、 $Fh_{(2.3)}$ については、 $Fh_{(2.3)}$ については、0 以上 1 未満の独立一様乱数を 500 組発生³⁵⁾させ、それぞれ表 5.4 に示す 2ply または 3ply の強度分布のパラメータに従う 2 個 1 組の有相関乱数に変換^{35,49,50)}する。そのうち 500 個の $Eh_{(2.3)}$ の分布を $SD_{(2.3)cal}$ と共通の $ED_{(2.3)cal}$ とし、500 個の $Fh_{(2.3)}$ の分布を $SD_{(2.3)ex-P}$ とする。また、 $Eh_{(2.3)}$ と $Fh_{(2.3)}$ の実験値の分布の組み合わせは表 5.4 に示すとおり、2ply と 3ply の別に $3 \times 1 = 3$ 通りとなるので、この組み合わせ

表 5.4 最尤法で推定した 2ply と 3ply の強度の母集団分布のパラメータ 1
— 平使い方向の曲げ強度 —

積層数	分布			パラメータ					残差二乗和
	Eh	$Eh_{(2.3)}$	$Fh_{(2.3)}$	$Eh_{(2.3)} (SE_{(2.3)Cal})$		$Fh_{(2.3)} (SD_{(2.3)ex-P})$		ρ	
				P_1	P_2	P_1	P_2		
2ply	N	N	LN	14.33 (kN/mm ²)	1.54 (kN/mm ²)	4.55	0.25	0.64	194.67
	LN	LN	LN	2.66	0.10	4.54	0.24	0.56	196.69
	2PW	2PW	LN	14.96 (kN/mm ²)	11.03	4.54	0.25	0.67	196.33
3ply	N	N	LN	14.26 (kN/mm ²)	1.35 (kN/mm ²)	4.57	0.22	0.75	108.80
	LN	LN	LN	2.66	0.10	4.58	0.22	0.76	109.26
	2PW	2PW	LN	14.92 (kN/mm ²)	12.15	4.59	0.25	0.80	108.67

注: N, LN, 2PW, Eh , $Eh_{(2.3)}$, $Fh_{(2.3)}$: 表 5.1 を参照。 P_1 : 分布が N と LN の場合は平均値、2PW の場合は尺度パラメータを表す。 P_2 : 分布が N と LN の場合は標準偏差、2PW の場合は形状パラメータを表す。 ρ : $Eh_{(2.3)}$ と 2・3 ply の強度との相関係数を表す。

表5.5 最尤法で推定した2plyと3plyの強度の母集団分布のパラメータ2

—縦使い方向の曲げ強度—

積層数	分布			パラメータ				残差二乗和	
	Eh	Eh _(2・3)	F _{V(2・3)}	Eh _(2・3) (SE _{(2・3)Calc})		F _{V(2・3)} (SD _{(2・3)ex-P})			ρ
				P ₁	P ₂	P ₁	P ₂		
2ply	N	N	LN	14.55 (kN/mm ²)	1.41 (kN/mm ²)	4.50	0.18	0.56	193.33
	LN	N	N	14.54 (kN/mm ²)	1.48 (kN/mm ²)	91.28 (N/mm ²)	14.80 (N/mm ²)	0.52	191.42
	2PW	2PW	N	15.25 (kN/mm ²)	12.15	91.32 (N/mm ²)	14.85 (N/mm ²)	0.53	195.74
3ply	N	N	N	14.55 (kN/mm ²)	1.18 (kN/mm ²)	93.79 (N/mm ²)	11.46 (N/mm ²)	0.49	119.25
	LN	N	N	14.62 (kN/mm ²)	1.22 (kN/mm ²)	94.10 (N/mm ²)	11.55 (N/mm ²)	0.50	118.98
	2PW	N	N	14.66 (kN/mm ²)	1.12 (kN/mm ²)	94.27 (N/mm ²)	11.34 (N/mm ²)	0.47	125.76

注: N, LN, 2PW, Eh, Eh_(2・3), F_{V(2・3)}:表5.1を参照。P₁, P₂, ρ:表5.4を参照。

表5.6 最尤法で推定した2plyと3plyの強度の母集団分布のパラメータ3

—引張強度—

積層数	分布			パラメータ				残差二乗和	
	Eh	Eh _(2・3)	F _{t(2・3)}	Eh _(2・3) (SE _{(2・3)Calc})		F _{t(2・3)} (SD _{(2・3)ex-P})			ρ
				P ₁	P ₂	P ₁	P ₂		
2ply	N	N	N	14.47 (kN/mm ²)	1.37 (kN/mm ²)	66.76 (N/mm ²)	14.93 (N/mm ²)	0.39	188.97
	LN	LN	N	2.67	0.10	66.48 (N/mm ²)	14.94 (N/mm ²)	0.38	187.87
	2PW	2PW	N	15.16 (kN/mm ²)	11.96	66.80 (N/mm ²)	15.12 (N/mm ²)	0.44	190.28
3ply	N	N	LN	14.55 (kN/mm ²)	1.12 (kN/mm ²)	4.19	0.18	0.31	104.68
	LN	LN	LN	2.67	0.08	4.19	0.18	0.29	105.79
	2PW	N	LN	14.59 (kN/mm ²)	1.10 (kN/mm ²)	4.20	0.18	0.30	106.60

注: N, LN, 2PW, Eh, Eh_(2・3), F_{t(2・3)}:表5.1を参照。P₁, P₂, ρ:表5.4を参照。

表5.7 最尤法で推定した2plyと3plyの強度の母集団分布のパラメータ4

—圧縮強度—

積層数	分布			パラメータ				残差二乗和	
	Eh	Eh _(2・3)	F _{c(2・3)}	Eh _(2・3) (SE _{(2・3)Calc})		F _{c(2・3)} (SD _{(2・3)ex-P})			ρ
				P ₁	P ₂	P ₁	P ₂		
2ply	N	N	2PW	14.42 (kN/mm ²)	1.49 (kN/mm ²)	64.92 (N/mm ²)	8.70	0.46	166.92
	LN	N	2PW	14.56 (kN/mm ²)	1.50 (kN/mm ²)	65.23 (N/mm ²)	8.81	0.46	168.87
	2PW	N	2PW	14.49 (kN/mm ²)	1.31 (kN/mm ²)	65.09 (N/mm ²)	9.03	0.42	171.52
3ply	N	N	N	14.39 (kN/mm ²)	1.19 (kN/mm ²)	64.22 (N/mm ²)	5.72 (N/mm ²)	0.69	83.23
	LN	N	N	14.43 (kN/mm ²)	1.21 (kN/mm ²)	64.38 (N/mm ²)	5.90 (N/mm ²)	0.71	81.99
	2PW	2PW	LN	15.03 (kN/mm ²)	14.76	4.18	0.11	0.75	82.72

注: N, LN, 2PW, Eh, Eh_(2・3), F_{c(2・3)}:表5.1を参照。P₁, P₂, ρ:表5.4を参照。

わせに従いED_{(2・3)cal}とSD_{(2・3)ex-P}を算出する。以下同様に、F_{V(2・3)}は表5.5に、F_{t(2・3)}は表5.6に、F_{c(2・3)}は表5.7に示すパラメータにそれぞれ従い、ED_{(2・3)cal}とSD_{(2・3)ex-P}を算出する。2plyと3plyの別に算出する分布の組み合わせも、F_{h(2・3)}と同様に3×1=3通りとなる。

5.5 シミュレーションされた強度分布と母集団強度分布の比較

2・3plyの強度毎(F_{h(2・3)})については、最外縁応力破壊、最外層応力破壊または複合応力一次形式による破壊の3通りのクライテリア別に、5.3に従いED_{(2・3)cal}とSD_{(2・3)cal}、5.4.2に従いED_{(2・3)cal}とSD_{(2・3)ex-P}を求め、何れも同一の散布図に表してSD_{(2・3)cal}とSD_{(2・3)ex-P}の比較を行った。この比較により、SD_{(2・3)ex-P}がSD_{(2・3)cal}より大きければ、5.4.1で述べたと2・3plyの強度に積層効果が存在することになる。ただし、SD_{(2・3)cal}とSD_{(2・3)ex-P}でヤング係数

分布が共通することから、比較する分布の組み合わせは 5.3 及び 5.4.2 より、次のとおりとなった。

$Fv_{(2.3)}$ については、 Eh の実験値の分布が N、LN または 2PW となる 3 通りの $ED_{(2.3)cal}$ 毎に、 Fv が N、LN または 2PW となる 3 通りの $SD_{(2.3)cal}$ が算出される。これに対し、3 通りの $ED_{(2.3)cal}$ の分布毎に $SD_{(2.3)ex-P}$ は最適なひとつの分布しか算出されない。したがって、 Eh の実験値の分布が N、LN または 2PW のそれぞれで、3 通りの分布の $SD_{(2.3)cal}$ に対しひとつの分布の $SD_{(2.3)ex-P}$ を対応させ比較を行った。更に、 $Ft_{(2.3)}$ 、 $Fc_{(2.3)}$ 、クライテリアが最外縁応力破壊または最外層応力破壊の場合の $Fh_{(2.3)}$ についても、同様の組み合わせで比較を行った。また、クライテリアが複合応力一次形式の場合の $Fh_{(2.3)}$ については、3 通りの $ED_{(2.3)cal}$ 毎に、 Fh と Ft の分布の組み合わせで $3 \times 3 = 9$ 通りの $SD_{(2.3)cal}$ が算出され、 $SD_{(2.3)ex-P}$ ひとつの分布しか算出されない。したがって、 Eh の実験値の分布が N、LN または 2PW のそれぞれで、分布の組み合わせで $3 \times 3 = 9$ 通りの $SD_{(2.3)cal}$ に対し、ひとつの分布の $SD_{(2.3)ex-P}$ を対応させて比較を行った。これ以降は、2・3ply の強度毎に比較した結果と考察を示す。

(a) 2・3ply の縦使い方向の曲げ強度

$Fv_{(2.3)}$ について、 $SD_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)ex-P}$ を比較した例を次に示す。まず、 $ED_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)cal}$ は 5.3 の (a) に従い算出したが、計算に用いた Eh と Fv の実験値の分布は、何れも K-S 検定による適合度が他の分布より高い 2PW と仮定した。一方、 $ED_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)ex-P}$ は 5.4.2 に従い算出したが、2ply の場合は表 5.5 に示す Eh が 2PW、 $ED_{(2.3)cal}$ が 2PW 及び $SD_{(2.3)ex-P}$ が N の、3ply の場合は同表に示す Eh が 2PW、 $ED_{(2.3)cal}$ が N 及び $SD_{(2.3)ex-P}$ が N のパラメータをそれぞれ用いた。以上の $ED_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)cal}$ 及び $ED_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)ex-P}$ の各 500 組の値は、同一図上にプロットし図 5.3 として示した。同図中の×印は $ED_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)cal}$ を構成する 500 組のデータ、○印は $ED_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)ex-P}$ を構成する 500 組のデータである。以下、同様である。

同図より、 $SD_{(2.3)cal}$ より $SD_{(2.3)ex-P}$ の方が大きくなったことが分かるが、このことは、他の分布の組み合わせでも同様であった。このことから、 $SD_{(2.3)ex-P}$ を構成する $Fv_{(2.3)}$ の実験値には積層効果の影響が存在すると考えた。従って、8ply～17ply の MOR_v の実験値を用いた第三章の Fv の推定値も、積層の影響が存在すると考えられる。

(b) 2・3ply の引張強度

$Ft_{(2.3)}$ について、 $SD_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)ex-P}$ を比較した例を次に示す。まず、 $ED_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)cal}$ は、5.3 の (b) に従い算出した。計算に用いた Eh と Ft の実験値の分布は 2PW と LN であり、何れも K-S 検定による適合度が最も高い分布である。一方、 $ED_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)ex-P}$ は 5.4.2 に従い算出したが、2ply の場合は表 5.6 に示す Eh が 2PW、 $ED_{(2.3)cal}$ が 2PW 及び $SD_{(2.3)ex-P}$ が N の、3ply の場合は同表に示す Eh が 2PW、 $ED_{(2.3)cal}$ が N 及び $SD_{(2.3)ex-P}$ が LN のパラメータをそれぞれ用いた。以上の $ED_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)cal}$ 及び $ED_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)ex-P}$ の各 500 組の値は、同一図上にプロットし図 5.4 として示した。

同図より、2ply と 3ply の何れも、 $SD_{(2.3)cal}$ より $SD_{(2.3)ex-P}$ の方が大きくなったことが分かる。更に、2ply よりも 3ply の方が、 $SD_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)ex-P}$ との差が広がっている。以上は他の分布の組み合わせでも同様であったことから、 $SD_{(2.3)ex-P}$ を構成する $Ft_{(2.3)}$ の実験値には

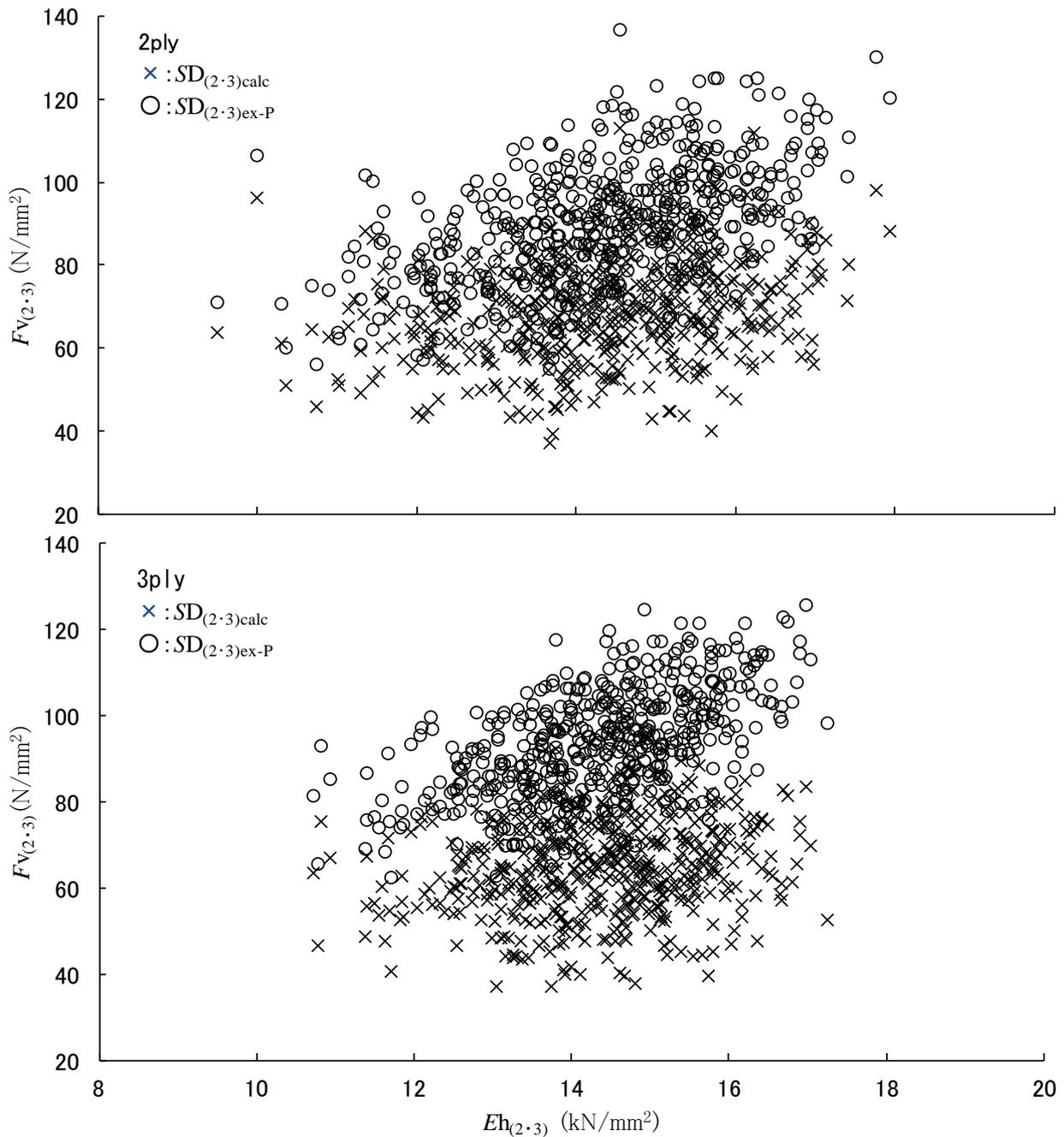


図5.3 シミュレーション分布と実験値の母集団分布との比較1
 - 2plyと3plyの縦使い方向の曲げ強度 -

注: $Eh_{(2.3)}$, $Fv_{(2.3)}$, $SD_{(2.3)calc}$, $SD_{(2.3)ex-P}$: 表5.1を参照。

積層効果の影響が存在すると考えられる。従って、8ply~17plyのTSの実験値を用いた第三章の Ft の推定値も、積層効果の影響が存在すると考えられる。

(c) 2・3plyの圧縮強度

$Fc_{(2.3)}$ について、 $SD_{(2.3)calc}$ と $SD_{(2.3)ex-P}$ を比較した例を次に示す。まず、 $ED_{(2.3)calc}$ と $SD_{(2.3)calc}$ は、5.3の(c)に従い算出した。計算に用いた Eh と Fc の実験値の分布は2PWとNであり、何れもK-S検定による適合度が最も高い分布である。一方、 $ED_{(2.3)calc}$ と $SD_{(2.3)ex-P}$ の算出は

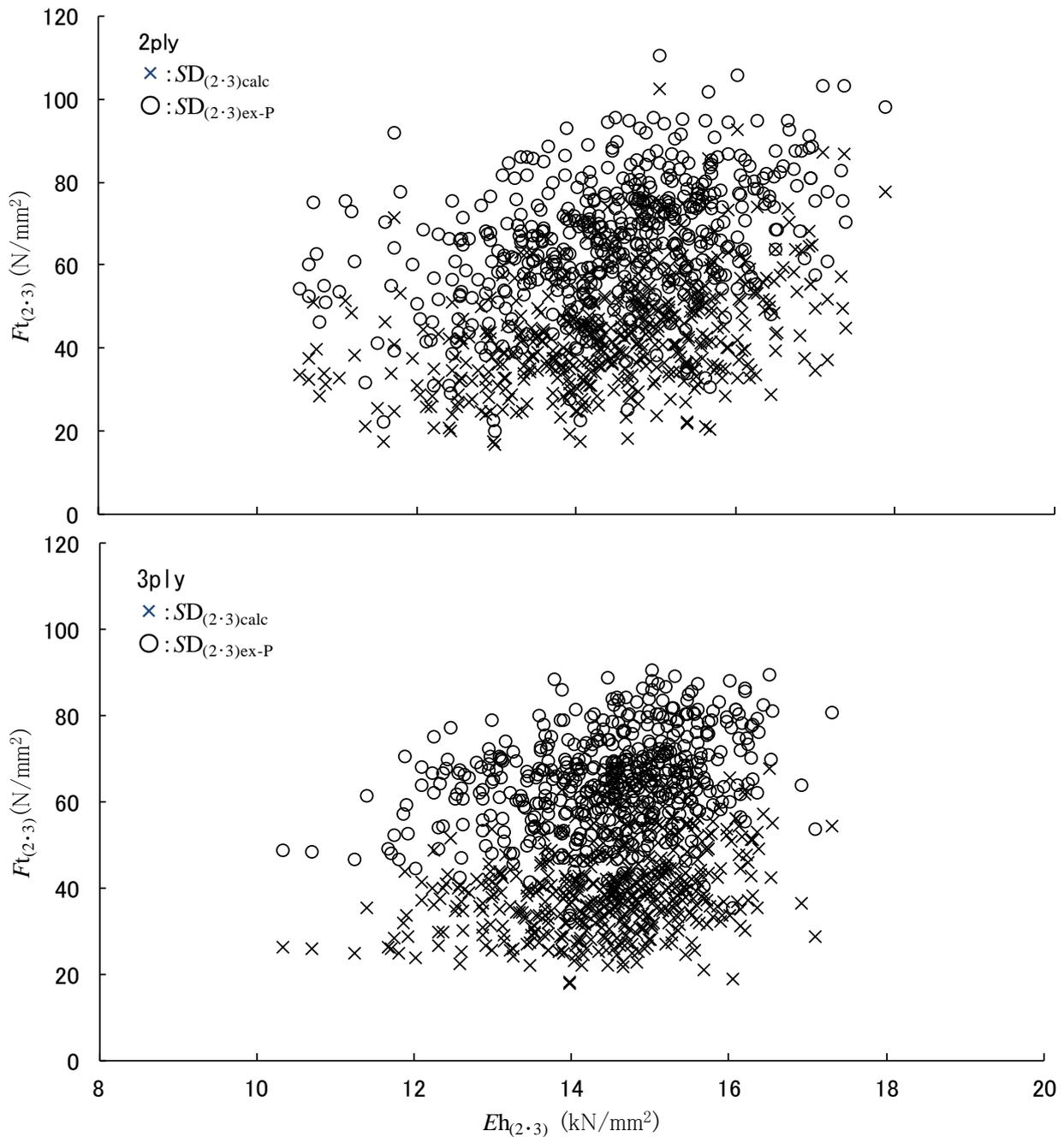


図5.4 シミュレーション分布と実験値の母集団分布との比較2
 - 2plyと3plyの引張強度 -

注: $Eh_{(2.3)}$, $Ft_{(2.3)}$, $SD_{(2.3)calc}$, $SD_{(2.3)ex-P}$: 表5.1を参照。

これまでと同様に 5.4.2 に従うが、2ply の場合は表 5.7 に示す Eh が 2PW、 $ED_{(2.3)cal}$ が 2PW 及び $SD_{(2.3)ex-P}$ が N の、3ply の場合は同表に示す Eh が 2PW、 $ED_{(2.3)cal}$ が 2PW 及び $SD_{(2.3)ex-P}$ が LN のパラメータをそれぞれ用いた。以上の $ED_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)cal}$ 、及び $ED_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)ex-P}$ の各 500 組の値は、同一図上にプロットし図 5.5 として示した。

同図より、2ply では $SD_{(2.3)cal}$ より $SD_{(2.3)ex-P}$ の方が若干大きい、3ply では $SD_{(2.3)cal}$ より $SD_{(2.3)ex-P}$ の方が明らかに大きいことが分かる。以上は他の分布の組み合わせでも同様であ

ったことから、 $SD_{(2.3)ex-P}$ を構成する $F_{C(2.3)}$ の実験値には積層効果の影響が存在すると考えられる。従って、8ply~17ply の CS の実験値を用いた第三章の F_c の推定値も、積層効果の影響が存在すると考えられる。

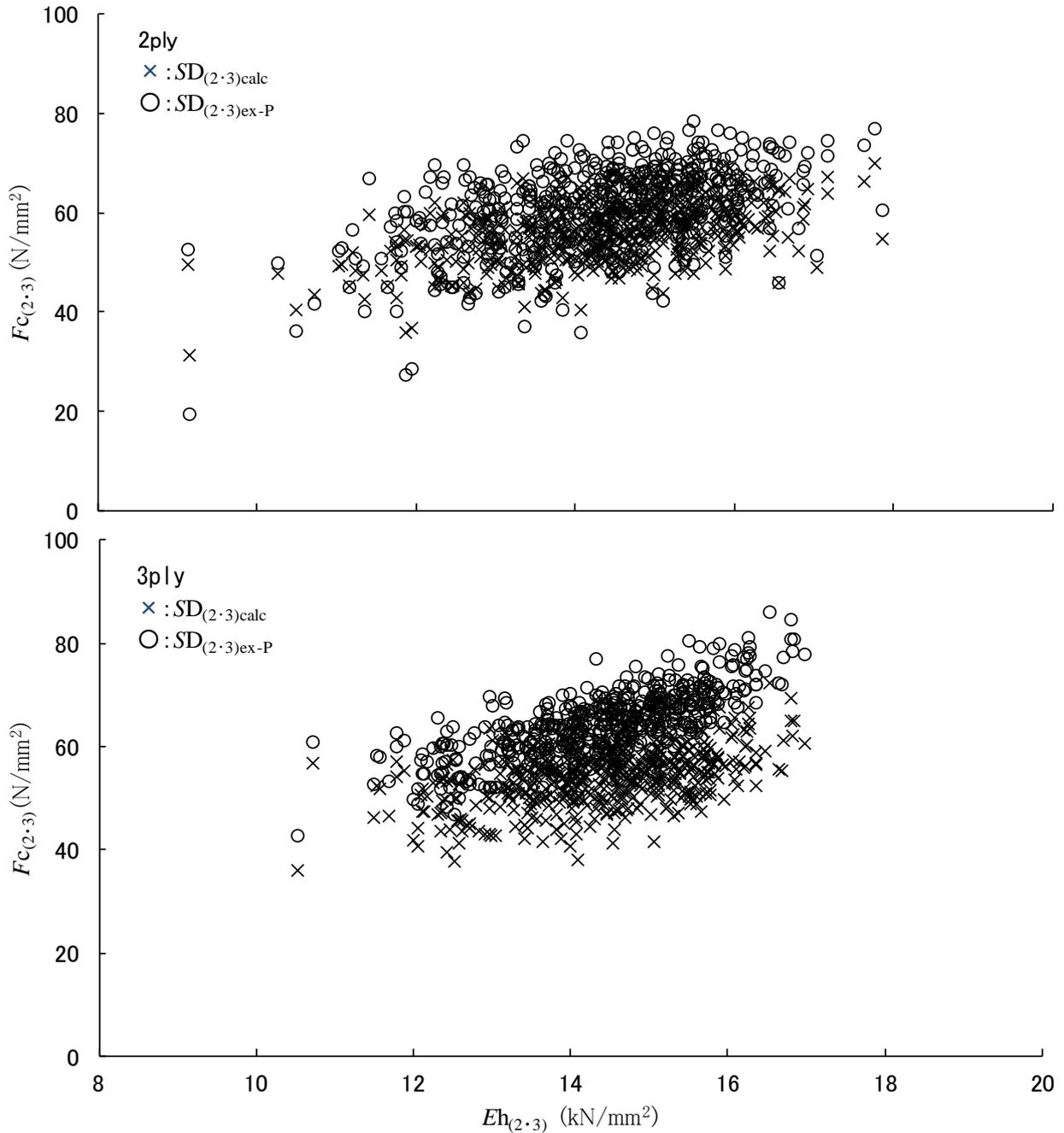


図5.5 シミュレーション分布と実験値の母集団分布との比較3
—2plyと3plyの圧縮強度—

注: $Eh_{(2.3)}$, $F_{C(2.3)}$, $SD_{(2.3)calc}$, $SD_{(2.3)ex-P}$:表5.1を参照。

(d) 2・3ply の平使い方向の曲げ強度 (最外縁応力破壊を仮定)

平使い方向の曲げの破壊クライテリアを最外縁応力破壊と仮定した場合の $Fh_{(2.3)}$ について、 $SD_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)ex-P}$ を比較した例を次に示す。まず、 $ED_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)cal}$ は 5.3 の (d)

に従い算出したが、計算に用いた Eh の分布は以上と同様の 2PW である。ただし、 F_t の分布については、表 5.3 に示す分布のうち、K-S 検定による適合度が最も高い 2PW を用いた。一方、 $ED_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)ex-P}$ は以上と同様に算出したが、2ply と 3ply の何れも表 5.4 に示す Eh が 2PW、 $ED_{(2.3)cal}$ が 2PW 及び $SD_{(2.3)ex-P}$ が LN のパラメータを用いた。以上の $ED_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)cal}$ 及び $ED_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)ex-P}$ の各 500 組の値は、同一図上にプロットし図 5.6 として示した。

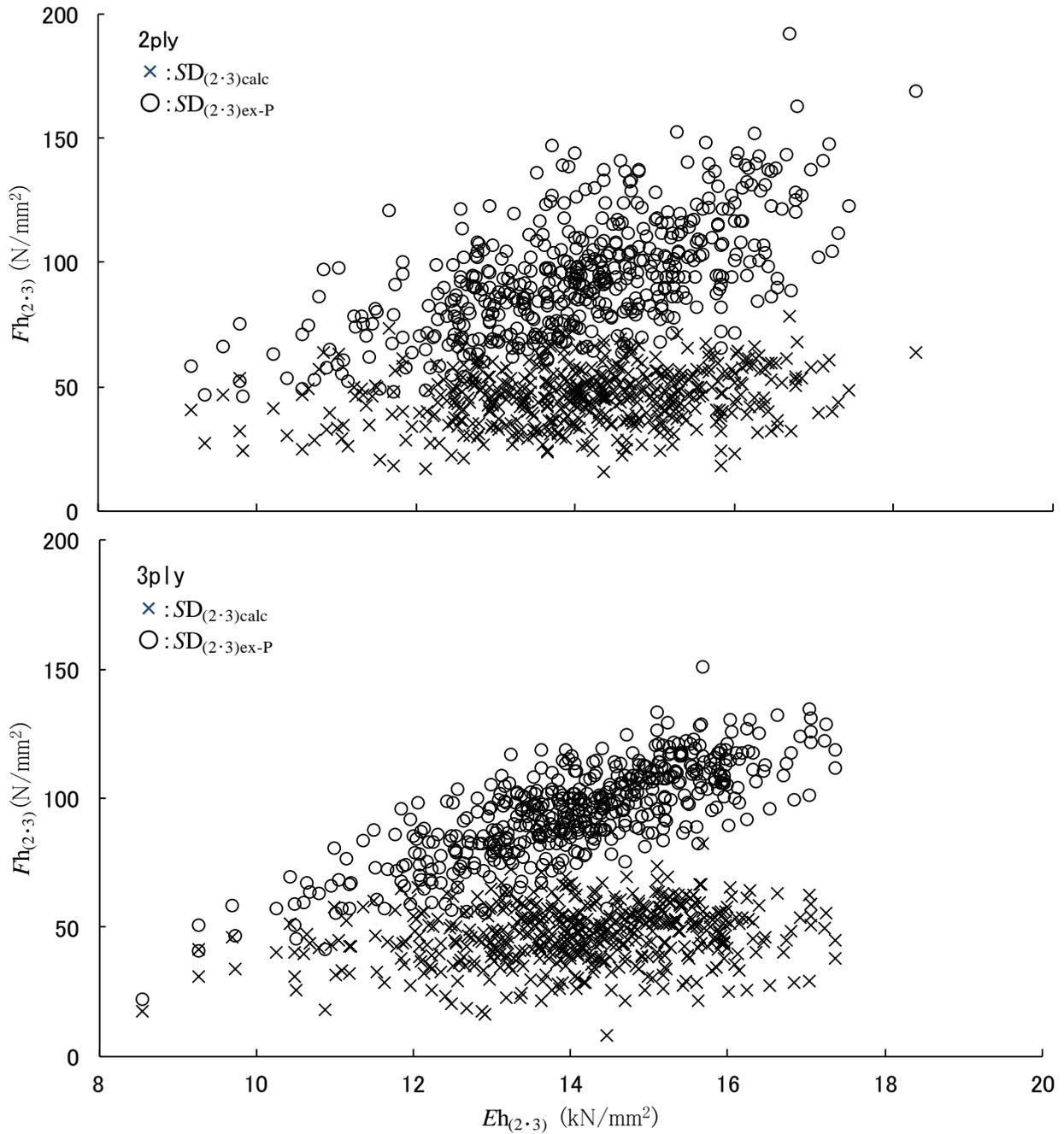


図5.6 シミュレーション分布と実験値の母集団分布との比較4

—2plyと3plyの平使い方向の曲げ強度(破壊クライテリアを最外縁応力破壊と仮定)—

注: $Eh_{(2.3)}$, $Fh_{(2.3)}$, $SD_{(2.3)calc}$, $SD_{(2.3)ex-P}$:表5.1を参照。

同図より、2ply と 3ply の何れも、 $SD_{(2.3)cal}$ より $SD_{(2.3)ex-P}$ の方が非常に大きくなったことから、 $SD_{(2.3)ex-P}$ を構成する $Fh_{(2.3)}$ の実験値に積層の影響があると考えられ、8ply~17ply の MORh の実験値も積層の影響があると考えられる。また、このクライテリアの場合、MORh の推定式におけるエレメントの強度のパラメータは Ft のみとなる。したがって、8ply~17ply の MORh を用いた第三章の Ft の推定値も、積層効果の影響が存在すると考えられる。

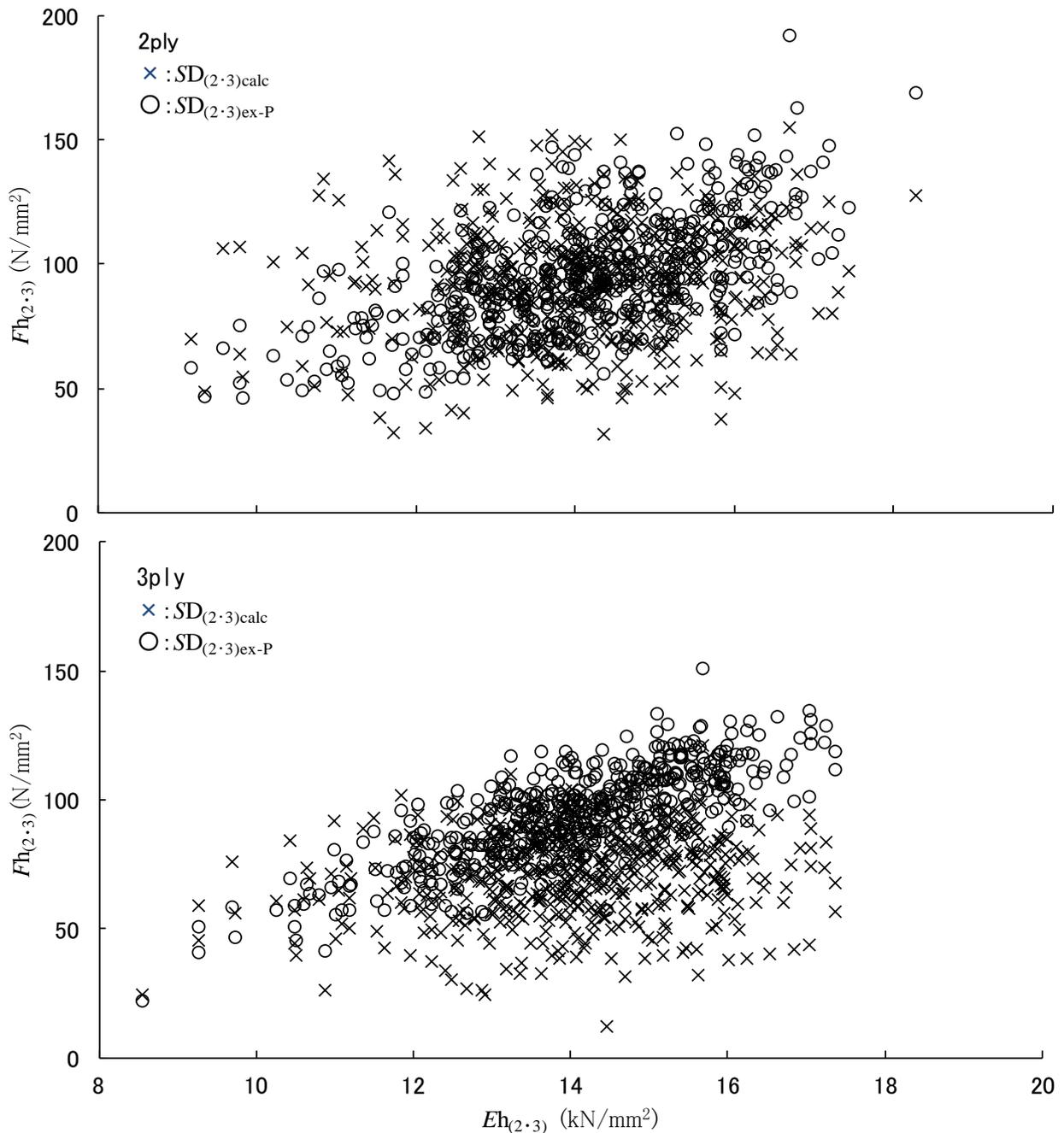


図5.7 シミュレーション分布と実験値の母集団分布との比較5

—2plyと3plyの平使い方向の曲げ強度(破壊クライテリアを最外層応力破壊と仮定)—

注: $Eh_{(2.3)}$, $Fh_{(2.3)}$, $SD_{(2.3)calc}$, $SD_{(2.3)ex-P}$:表5.1を参照。

(e) 平使い方向の曲げ強度(最外層応力破壊を仮定)

平使い方向の曲げの破壊クライテリアを最外層応力破壊と仮定した場合の $Fh_{(2.3)}$ について、 $SD_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)ex-P}$ を比較した例を次に示す。まず、 $ED_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)cal}$ は 5.3 の (e) に従い算出したが、計算に用いた Eh と Ft の分布は最外層応力破壊の場合と同じである。更に、 $ED_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)ex-P}$ のパラメータも、最外層応力破壊の場合と同じである。以上の $ED_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)cal}$ 及び $ED_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)ex-P}$ の各 500 組の値は、同一図上にプロットし図 5.7 として示した。

同図より、2ply の場合は $SD_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)ex-P}$ の大きさはほぼ同等となり、 $SD_{(2.3)ex-P}$ を構成する $Fc_{(2.3)}$ の実験値に積層効果が存在するか確認されなかった。しかし、3ply の場合は $SD_{(2.3)cal}$ より $SD_{(2.3)ex-P}$ の方がばらつきは少なく、分布としても大きくなった。以上は他の分布の組み合わせでも同様であったことから、3ply の場合は $SD_{(2.3)ex-P}$ を構成する $Fc_{(2.3)}$ の実験値に積層効果の影響が存在すると考えられる。従って、8ply~17ply の MORh の実験値を用いた第三章の Ft の推定値も、積層効果の影響が存在すると考えられる。

(f) 2・3ply の平使い方向の曲げ強度(複合応力一次形式を仮定)

平使い方向の曲げの破壊クライテリアを複合応力一次形式による破壊と仮定した場合の $Fh_{(2.3)}$ について、 $SD_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)ex-P}$ を比較した例を次に示す。まず、 $ED_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)cal}$ は 5.3 の (f) に従い算出したが、計算に用いた Eh の分布はこれまでと同様の 2PW、 Fh と Ft の分布は第三章で適合した N を用いた。一方、 $ED_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)ex-P}$ のパラメータは、最外縁及び最外層応力破壊の場合と同じである。以上の $ED_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)cal}$ 及び $ED_{(2.3)cal}$ と $SD_{(2.3)ex-P}$ の各 500 組の値は、同一図上にプロットし図 5.8 として示した。

同図より、2ply と 3ply の何れも、 $SD_{(2.3)cal}$ より $SD_{(2.3)ex-P}$ の方が大きくなったこと。以上は他の分布の組み合わせでも同様であったことから、 $SD_{(2.3)ex-P}$ を構成する $Fh_{(2.3)}$ の実験値には積層効果の影響が存在すると考えられる。したがって、8ply~17ply の MORh の実験値も同様と考えられるが、このことをもって第三章の Fh の推定値に積層効果が存在するか判断できないと考えた。その理由については、次のとおりである。

3.5.2.2 では、LVL の破壊クライテリアとして引張側最外層における曲げと引張の複合一次形式による破壊を仮定した。ただし、このクライテリアによる MORh の推定式を用いると、非線形最小二乗法において Eh 、 Fh 及び Ft による強度分布を表す 9 個の変数を扱うことになり、MORh の実験値のみで 9 個の変数を収束させるのは不可能であった。そこで、 Eh の分布を表す 2 個の変数については、8ply~17ply の MOEh の実験値による Eh の推定値を用いて固定した。更に、 Ft の 3 個の変数(2 個の Ft の分布のパラメータと Eh との相関係数)については、8ply~17ply の TS の実験値による Ft の推定値を用いて固定し、残りの 4 個の変数(2 個の Fh の分布のパラメータと Eh と Fh 及び Fh と Ft の相関係数)を 8ply~17ply の MORh の実験値を用いて収束させることにより、 Fh の推定値を求めることができた。

ところが、上述の 5.5 の (b) に示した通り、TS の実験値を用いた Ft の推定値には、積層効果の影響が存在することが示唆された。更に、LVL の引張試験と平使い方向の曲げ試験とでは、LVL の内部応力の分布状態が異なることから、それぞれの試験時における LVL

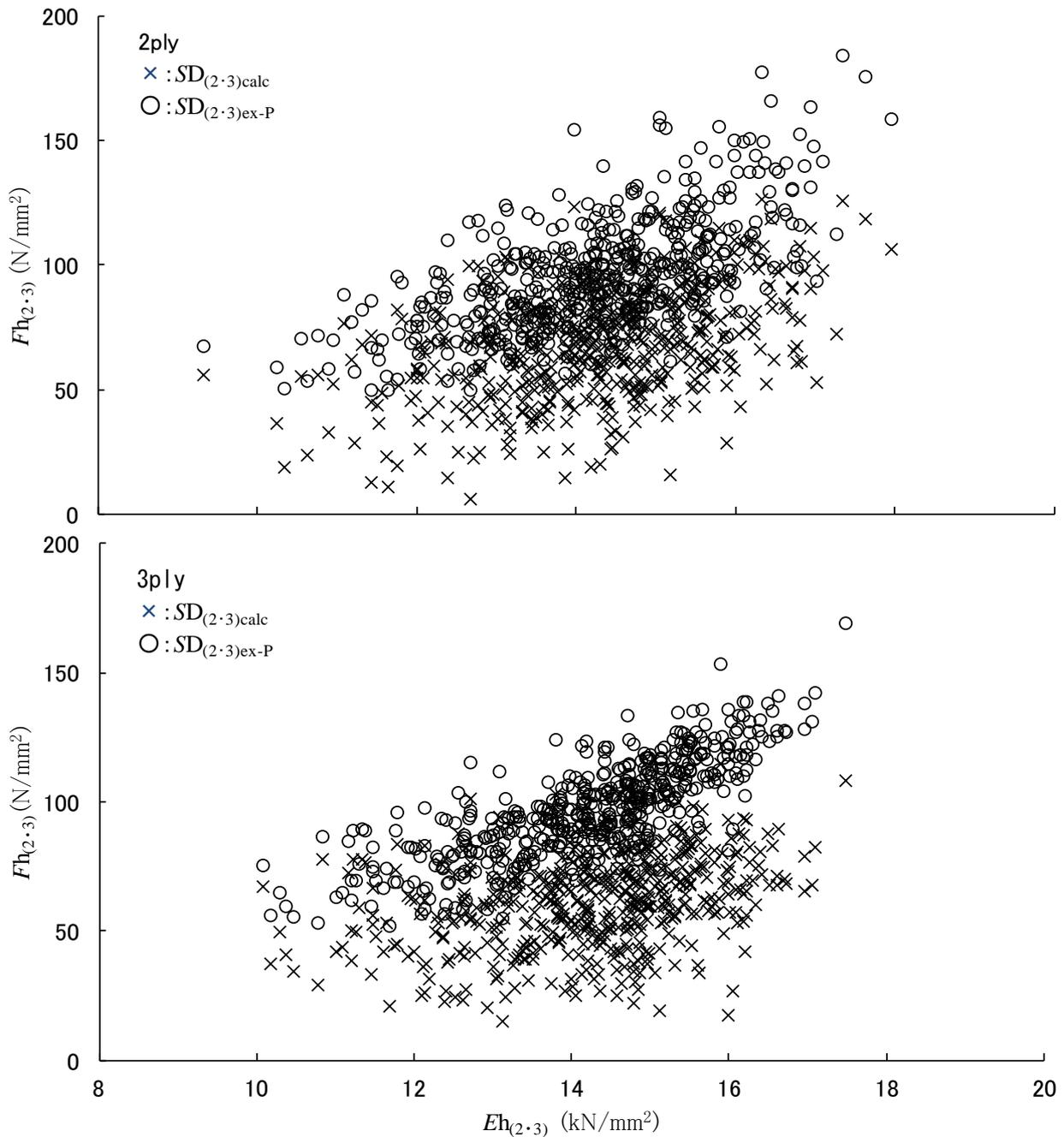


図5.8 シミュレーション分布と実験値の母集団分布との比較6

—2plyと3plyの平使い方向の曲げ強度(破壊クライテリアを複合応力一次形式による破壊と仮定)—

注: $E_{h(2.3)}$, $F_{h(2.3)}$, $SD_{(2.3)calc}$, $SD_{(2.3)ex-P}$:表5.1を参照。

の元素(LVLに積層された状態にある)における F_t の大きさは、積層効果の影響の違いにより異なることが考えられる。このことから、MORhの実験値による F_h の推定に、TSの実験値による F_t の推定値を用いることはできないことが分かる。

そこで、改めて非線形最小二乗法を用いて、 F_h と F_t (LVLの平使い方向の曲げ試験における元素の引張強さ。以下同様)の分布を推定し直す必要が生じたが、 F_h と F_t の分布を表す7個の変数をMORhの実験値のみで収束させることは不可能である。即ち、MORh

の実験値に積層効果の影響が存在するにしても、 F_h と F_t の何れも推定できない以上、 F_h と F_t でどのような割合で積層効果の影響が存在するか一切分からないことが判明した。これまでのことより、既報の F_h の推定値については妥当なのかどうか分からず、積層の影響の存在についても判断がつかないという結論に至った。

(g) 相関係数

上述した 5.5 の (a)～(e) より、第三章で推定した E_h と各強度との相関係数は、曲げヤング係数と積層効果の影響が存在する強度との相関係数を推定したことになると考えられる。従って、これらの相関係数と第四章に示した 1ply の実験値における曲げヤング係数と各強度との相関係数は、それぞれを単純に比較することはできないと考える。そこで、第三章で推定した相関係数の有効性については、第六章で検証することとする。

5.6 まとめ

第四章では、第二章の実験で使用した LVL の残部から 1ply～3ply を切り出し、第二章と同様の強度実験を行った。更に、1ply(エレメントと考えられる)の平使い方向の曲げヤング係数と曲げ強度、縦使い方向の曲げ強度、引張試験における引張強度、平使い方向の曲げにおける引張強度及び圧縮強度を対象に、強度実験の実験値と第三章の推定値を比較した。その結果、各強度については推定値が実験値を上回ったが、その理由としては強度に対する積層効果の影響が考えられた。

そこで、本章では各強度における積層効果の影響を確認するために、第三章で推定を行った強度を対象に、1ply の実験値の強度分布を用いて 2・3ply の強度分布をシミュレーションした。一方、2・3ply の実験結果は偏りが見られたため、最尤法により母集団と考えられる分布を推定した。2・3ply の強度毎に、シミュレーションによる計算値の分布と最尤法による実験値の母集団分布を比較したところ、何れの強度も母集団の分布の方が大きかった。したがって、2・3ply の縦使い方向の曲げ強度、引張試験における引張強度、平使い方向の曲げにおける引張強度及び圧縮強度については、実験値に積層効果の影響の存在があることが確認された。したがって、これらの強度については LVL 強度の実験値の方にも積層効果が存在し、この実験値を用いて推定した第三章のエレメントの強度分布の推定値にも、積層効果の影響が存在すると考えられた。しかし、破壊クライテリアを曲げと引張による複合一次形式による破壊と仮定する場合、エレメントの平使い方向の曲げ強度に積層効果が存在するか、判断できないことが分かった。

以上より、積層された状態のエレメントの縦使い方向の曲げ強度、引張試験における引張強度、平使い方向の曲げにおける引張強度及び圧縮強度については、積層効果の影響が存在すると考えられる。したがって、これらの強度に対する第三章の推定手法の有効性を検証するには、積層効果を定量化した上で、この積層効果の影響を受けた 1ply の実験値の強度分布を求め、第三章の推定値の強度分布と比較する必要があると考える。このことについては、第六章で述べることとする。

第六章 NLMの有効性の検討

6.1 はじめに

第五章では、2ply または 3ply の試験体を用いて、積層された状態のエレメントの各強度には積層効果の影響が存在することを確認した。このことから、第三章の非線形最小二乗法(NLM)によるエレメントの強度分布推定で用いた 8ply~17ply の LVL の強度についても、2ply または 3ply と同様に、エレメントの各強度に積層効果の影響が存在することが示唆された。そこで、本章では最初にこのことを確認するために、LVL の各強度を対象として第五章と同様に、1ply の実験値を用いたシミュレーションによる LVL 強度の計算値の分布と、最尤法^{53,54)}により推定した LVL 強度の実験値の母集団分布を比較した。この比較は LVL の各強度の 8ply~17ply の積層数毎に行ったが、何れの強度の何れの積層数においても、強度の母集団分布の方がシミュレーションによる計算値の分布よりも大きくなり、8ply~17ply の LVL の各強度には、積層効果の影響が存在することが確認された。

以上より、第三章の非線形最小二乗法(NLM)の有効性を確認するには、エレメントの強度毎に NLM による推定値の分布と積層効果の影響を受けた 1ply の実験値の分布を比較する必要があることが分かった。そのためには、積層効果を定量化して表す必要があることから積層効果係数 k を導入し、 k を上述の母集団分布の LVL 強度に対するのシミュレーションの LVL 強度の比として定義した。更に、 k を 1ply の実験値の強度に乘じることにより、積層効果の影響を受けた 1ply の実験値の強度を求めることとし、8ply~17ply の LVL の積層効果の影響を受けた 1ply の実験値の強度の分布を求めるアルゴリズムを導入した。

NLM の有効性を検討は、NLM により推定したエレメントの強度の分布と、以上により求められた積層効果の影響を受けた 1ply の実験値の強度の分布を比較することを行った。比較対象としたのは、エレメントの縦使い方向の曲げ強度(F_v)、LVL の平使い方向の曲げ試験におけるエレメントの引張強度(F_t)、LVL の引張試験におけるエレメントの引張強度(F_t)及びエレメントの圧縮強度(F_c)である。したがって、NLM の有効性を検討は、これらのエレメントの強度を推定するのに用いた LVL の強度試験毎に行った。ただし、3.4.2 に示すとおり、NLM による F_v 分布の推定では E_v 分布の推定値を用いており、この E_v 分布の推定値は E_h の実験値の分布と異なった。そこで、 E_h の実験値の分布とほぼ同一な E_h の推定値を用いて F_v 分布を推定し直し、積層効果の影響を受けた 1ply の実験値の強度の分布と比較した。また、LVL の平使い方向の曲げについては 3.5.1.1 に示すとおり、最外縁応力破壊と最外層応力破壊の 2 つの LVL の破壊クライテリアを仮定し、それぞれ仮定の元で平使い方向の曲げ試験における F_t 分布を推定した。したがって、平使い方向の曲げ試験における NLM の有効性を検討は、この 2 つの破壊クライテリア別に行った。なお、3.5.2.1 では LVL の破壊クライテリアを複合応力一次形式による破壊を仮定し、エレメントの平使い方向の曲げ強度(F_h)の分布を推定した。しかし、第五章では NLM によりこの F_h 分布の推定がほぼ不可能であることを示したことから、複合応力一次形式による破壊の場合については、本章の NLM の有効性を検討から除外した。

本章の構成は、次のとおりである。まず、6.3 では、本章で用いる記号を定義した。6.3 の(a)では、8ply の引張強度(TS)を例に示すことにより、8ply~17ply の LVL の強度に積

層効果の影響が存在することを示した。6.3の(b)では、積層効果を定量化するための積層効果係数の導入と定義を行った。6.3の(c)では、積層効果係数を求めるアルゴリズムの概略を示した。6.3の(d)では、積層効果係数の求め方を含め、8ply~17plyのLVLの積層効果の影響を受けた1plyの実験値の強度の分布を求めるアルゴリズムを示した。6.3の(e)では、NLMにより推定したエレメントの強度分布と積層効果の影響を受けた1plyの実験値の強度の分布を比較する手法について検討した。6.4では、6.3の(e)に従いNLMの有効性について検討を行い、その結果を示した。6.4.1は、縦使い方向の曲げ試験を対象に、NLMの有効性について検討を行った。ただし、NLMによるFv分布の推定は、上述したとおりのEh分布の推定値を用いてやり直している。以下同様に、6.4.2は、平使い方向の曲げ試験を対象に、上述したとおりの2つの破壊クライテリアの仮定別にNLMの有効性について検討した。6.4.3は、引張試験を対象に、NLMの有効性について検討した。6.4.4は、圧縮試験を対象に、NLMの有効性について検討した。6.5は、本章のまとめとなる。

6.2 記号及び用語の定義

本章で用いる主要な記号と用語は、次のとおり定義する。ただし、6.3の(a)で限定的に用いる記号は除外している。

- 1) N、LN及び2PW：5.2を参照。
- 2) E_v 、 F_v 、 E_h 、 F_h 、 E_t 、 F_t 、 E_c 及び F_c ：5.2を参照。
- 3) MOEh、MORh、MORv、TS及びCS：5.2を参照。
- 4) N ：LVLの積層数($N=8, \dots, 17$)を表す。
- 5) NLM：第三章で用いた非線形最小二乗法によるLVLエレメントの強度分布推定手法を表す。
- 6) i ：積層数 $N(N=8, \dots, 17)$ 毎の計算の繰り返しに伴う識別番号($i=1, \dots, M$)を表す。
- 7) M ：積層数 $N(N=8, \dots, 17)$ 毎の計算の繰り返し数を表す。
- 8) E 及び F ：エレメント(LVLから切り取られた1plyを含む)の任意のヤング係数と強度を表す。ただし、 E は E_v 、 E_h 、 E_t または E_c の何れかとなるが、 E_v 、 E_t または E_c は E_h の実験値で代用しているので全て E_h であり、 F は F_v 、 F_t または F_c の何れかとなる。
- 9) $E_{(N,i,j)}$ 及び $F_{(N,i,j)}$ ：識別番号 i の仮想LVL(積層数 N)を構成する j 層目($j=1, \dots, N$)の E 及び F を表す。ただし、何れの値も E と F の実験値による強度分布に従うよう、0以上1未満の2次元独立一様乱数を変換^{35,49,50)}して得られたものである。
- 10) LVL.E及びLVL.F：任意のヤング係数と強度をLVL.EとLVL.Fと表す。ただし、LVL.Eは8)と同様の理由によりMOEhとなり、LVL.FはMORh、MORv、TSまたはCSの何れかとなる。
- 11) $(LVL.E_{(N,i)calc}, LVL.F_{(N,i)calc})$ ：5.3の(a)~(d)の何れかを準用したシミュレーションにより、全層を $E_{(N,i,j)}$ 及び $F_{(N,i,j)}$ ($j=1, \dots, N$)で構成された M 組の仮想LVL(積層数 N)の(LVL.E, LVL.F)の計算値のうち、識別番号 i ($i=1, \dots, M$)の仮想LVLの(LVL.E, LVL.F)を表す。
- 12) $ED_{(N)calc}$ ：LVL.E_{(N,i)calc}($i=1, \dots, M$)による分布を表す。
- 13) $SD_{(N)calc}$ ：LVL.F_{(N,i)calc}($i=1, \dots, M$)による分布を表す。

- 14) $R_{(N)\text{calc}}$: $ED_{(N)\text{calc}}$ と $SD_{(N)\text{calc}}$ を構成するそれぞれの要素間の相関係数を表す。
- 15) 強度分布 A : $SD_{(N)\text{calc}}$ と $ED_{(N)\text{calc}}$ のパラメータ及び $R_{(N)\text{calc}}$ で表される LVL.E と LVL.F の強度分布を表す。
- 16) $SD_{(N)\text{ex-P}}$: $ED_{(N)\text{calc}}$ を用いた 5.4.1 の最尤法^{53,54)}により推定された LVL.F (積層数 N) の実験値の母集団分布を表す。
- 17) $R_{(N)\text{ex-P}}$: $ED_{(N)\text{calc}}$ と $SD_{(N)\text{ex-P}}$ を構成するそれぞれの要素間の相関係数を表す。
- 18) 強度分布 B : $ED_{(N)\text{calc}}$ と $SD_{(N)\text{ex-P}}$ のパラメータ及び $R_{(N)\text{ex-P}}$ で表される LVL.E と LVL.F の強度分布を表す。
- 19) $(LVL.E_{(N,i)\text{ex}}, LVL.F_{(N,i)\text{ex}})$: 0 以上 1 未満の 2 次元独立一様乱数から強度分布 B に従うよう変換^{35,49,50)}した M 組の $(LVL.E, LVL.F)$ (積層数 N) の推定値のうち、識別番号 i ($i = 1, \dots, M$) の $(LVL.E, LVL.F)$ を表す。
- 20) k : 一般的な表記として積層効果係数を表す。
- 21) $k_{(N,i)}$: 識別番号 i ($i = 1, \dots, M$) の仮想 LVL (積層数 N) における積層効果係数を表す。
- 22) $S(N,i)$: 識別番号 i ($i = 1, \dots, M$) の仮想 LVL (積層数 N) が破壊された層を表す ($1 \leq S(N,i) \leq N$)。
- 23) $ra_{(N,i)}$: 強度分布 A に従うよう、 $(LVL.E_{(N,i)\text{calc}}, LVL.F_{(N,i)\text{calc}})$ ($i = 1, \dots, M$) に変換^{35,49,50)}される 2 個 1 組の独立一様乱数 (0 以上 1 未満) の Seed による 2 次元ベクトルを表す。
- 24) $rb_{(N,i)}$: 強度分布 B に従うよう、 $(LVL.E_{(N,i)\text{ex}}, LVL.F_{(N,i)\text{ex}})$ ($i = 1, \dots, M$) に変換^{35,49,50)}される 2 個 1 組の独立一様乱数の Seed による 2 次元ベクトルを表す。
- 25) x_1 : LVL.E の確率変数を表す。
- 26) x_2 : LVL.F の確率変数を表す。
- 27) $f_A(x_1, x_2)$: (5.1)式による強度分布 A の同時確率密度関数を表す。
- 28) $f_B(x_1, x_2)$: (5.1)式による強度分布 B の同時確率密度関数を表す。
- 29) $P_{A(N,i)}$: (6.3)式による LVL.F_{(N,i)calc} の累積確率を表す。
- 30) $P_{B(N,i)}$: (6.4)式による LVL.F_{(N,i)ex} の累積確率を表す。
- 31) 実験値 E 分布 : $E_{(N,i,S(N,i))}$ ($i = 1, \dots, 500$) ($N = 8, 9, 11, \dots, 17$) によるエレメントのヤング係数の分布を表す。
- 32) 実験値 F 分布 : $k_{(N,i)} \times F_{(N,i,S(N,i))}$ ($i = 1, \dots, 500$) ($N = 8, 9, 11, \dots, 17$) による積層効果の影響を受けたエレメントの強度の分布を表す。
- 33) 実験値 E-F 分布 : $(E_{(N,i,S(N,i))}, k_{(N,i)} \times F_{(N,i,S(N,i))})$ ($i = 1, \dots, 500$) ($N = 8, 9, 11, \dots, 17$) による積層効果の影響を受けたエレメントの強度分布を表す。
- 34) 推定値 E 分布 : NLM によるエレメントの強度分布の推定値を用いて積層数毎に 500 体ずつの仮想 LVL を作り、それぞれの破壊された層の E によるエレメントのヤング係数の分布を表す。
- 35) 推定値 F 分布 : NLM によるエレメントの強度分布の推定値を用いて積層数毎に 500 体ずつの仮想 LVL を作り、それぞれの破壊された層の F によるエレメントの強度の分布を表す。
- 36) 推定値 E-F 分布 : NLM によるエレメントの強度分布の推定値を用いて積層数毎に 500

図6.1 記号及び用語の定義

記号	定義	
自然数	N	LVLの積層数($N=8, \dots, 17$)
	i	積層数 $N(N=8, \dots, 17)$ 毎の計算の繰り返しに伴う識別番号($i=1, \dots, M$)
	M	積層数 $N(N=8, \dots, 17)$ 毎の計算の繰り返し数
推定手法	NLM	第三章で用いた非線形最小二乗法によるLVLエレメントの強度分布推定手法
エレメント	E	エレメントの任意のヤング係数 (E_h)
	F	エレメントの任意の強度 (F_v, F_t または F_c)
	$E_{(N,i,j)}$	識別番号 $i(i=1, \dots, M)$ の仮想LVL(積層数 N)を構成する $j(j=1, \dots, N)$ 層目の E
	$F_{(N,i,j)}$	識別番号 $i(i=1, \dots, M)$ の仮想LVL(積層数 N)を構成する $j(j=1, \dots, N)$ 層目の F
LVL	LVL E	LVLの任意のヤング係数(MORh)
	LVL F	LVLの任意の強度(MOR v , MOR h , TSまたはCS)
	$S(N,i)$	識別番号 $i(i=1, \dots, M)$ のLVL(積層数 N)が破壊された層($1 \leq S(N,i) \leq N$)
LVL計算値 (シミュレーション)	LVL $E_{(N,i)calc}$	E の実験値の分布を用いたシミュレーションにより得られた M 個のLVL E (積層数 N)の計算値のうち、識別番号 $i(i=1, \dots, M)$ のLVL E
	LVL $F_{(N,i)calc}$	E と F の実験値の強度分布を用いたシミュレーションにより得られた M 個のLVL F (積層数 N)の計算値のうち、識別番号 $i(i=1, \dots, M)$ のLVL F
	$ED_{(N)calc}$	LVL $E_{(N,i)calc}(i=1, \dots, M)$ による分布
	$SD_{(N)calc}$	LVL $F_{(N,i)calc}(i=1, \dots, M)$ による分布
	$R_{(N)calc}$	$ED_{(N)calc}$ と $SD_{(N)calc}$ の各要素の相関係数
	強度分布A	$ED_{(N)calc}$ と $SD_{(N)calc}$ のパラメータ及び $R_{(N)calc}$ により表される強度分布
LVL実験値 (母集団)	LVL $E_{(N,i)ex}$	0以上1未満の2次元独立一様乱数から $ED_{(N)calc}$ に従うよう変換した M 個のLVL E (積層数 N)の推定値うち、識別番号 i のLVL E
	LVL $F_{(N,i)ex}$	0以上1未満の2次元独立一様乱数から $SD_{(N)ex-P}$ に従うよう変換した M 個のLVL F (積層数 N)の推定値うち、識別番号 i のLVL F
	$SD_{(N)ex-P}$	$ED_{(N)calc}$ を用いた最尤法によるLVL F (積層数 N)の実験値の母集団分布
	$R_{(N)ex-P}$	$ED_{(N)calc}$ と $SD_{(N)ex-P}$ の各要素の相関係数
	強度分布B	$ED_{(N)calc}$ と $SD_{(N)ex-P}$ のパラメータ及び $R_{(N)ex-P}$ により表される強度分布
積層効果係数	k	積層効果係数
	$k_{(N,i)}$	識別番号 $i(i=1, \dots, M)$ のLVL(積層数 N)における積層効果係数
乱数	$ra_{(N,i)}$	強度分布A に従うよう、(LVL $E_{(N,i)calc}$, LVL $F_{(N,i)calc}$)に変換される2個1組の独立一様乱数のSeedによる2次元ベクトル
	$rb_{(N,i)}$	強度分布B に従うよう、(LVL $E_{(N,i)ex}$, LVL $F_{(N,i)ex}$)に変換される2個1組の独立一様乱数のSeedによる2次元ベクトル
同時確率 密度関数	x_1	LVL E の確率変数
	x_2	LVL F の確率変数
	$f_A(x_1, x_2)$	強度分布A の同時確率密度関数
	$f_B(x_1, x_2)$	強度分布B の同時確率密度関数
	$P_{A(N,i)}$	(6.3)式によるLVL $F_{(N,i)calc}$ の累積確率
	$P_{B(N,i)}$	(6.4)式によるLVL $F_{(N,i)ex}$ の累積確率
エレメント 実験値	実験値E分布	$E_{(N,i,S(N,i))}(i=1, \dots, M)$ ($N=8, 9, 11, \dots, 17$)で構成されるエレメントのヤング係数の分布
	実験値F分布	$k_{(N,i)} \times F_{(N,i,S(N,i))}(i=1, \dots, M)$ ($N=8, 9, 11, \dots, 17$)で構成される積層効果の影響を受けたエレメントの強度の分布
	実験値$E-F$分布	$(E_{(N,i,S(N,i))}, k_{(N,i)} \times F_{(N,i,S(N,i))})(i=1, \dots, M)$ ($N=8, 9, 11, \dots, 17$)で構成されるエレメントの強度分布
エレメント 推定値	推定値E分布	NLMによるエレメントの強度分布の推定値を用いて、積層数毎に M 体ずつ作った仮想LVLの破壊された層のヤング係数の分布
	推定値F分布	NLMによるエレメントの強度分布の推定値を用いて、積層数毎に M 体ずつ作った仮想LVLの破壊された層の強度の分布
	推定値$E-F$分布	NLMによるエレメントの強度分布の推定値を用いて、積層数毎に M 体ずつ作った仮想LVLの破壊された層のヤング係数と強度の分布

注 エレメント:LVLから切り離された1plyを含む。 $E_{(N,i,j)}$, $F_{(N,i,j)}$: 実験値の E と F による強度分布に従う。

体ずつの仮想 LVL を作り、それぞれの破壊された層の(E , F)によるエレメントの強度分布を表す。

以上の記号と用語の定義の内、4)～36)を表 6.1 に示した。

6.3 単板積層材における積層効果の定義と定量

(a) 8ply～17ply の強度における積層効果の確認

第五章で指摘したとおり、8ply～17ply の LVL についても、各強度には積層効果の影響が存在すると考えられる。そこで、例として TS を対象に、1ply の実験値の強度分布を用いて 8ply の強度分布をシミュレーションし、最尤法^{53,54)}による 8ply の実験値の母集団分布との比較を図 6.1 に示した。

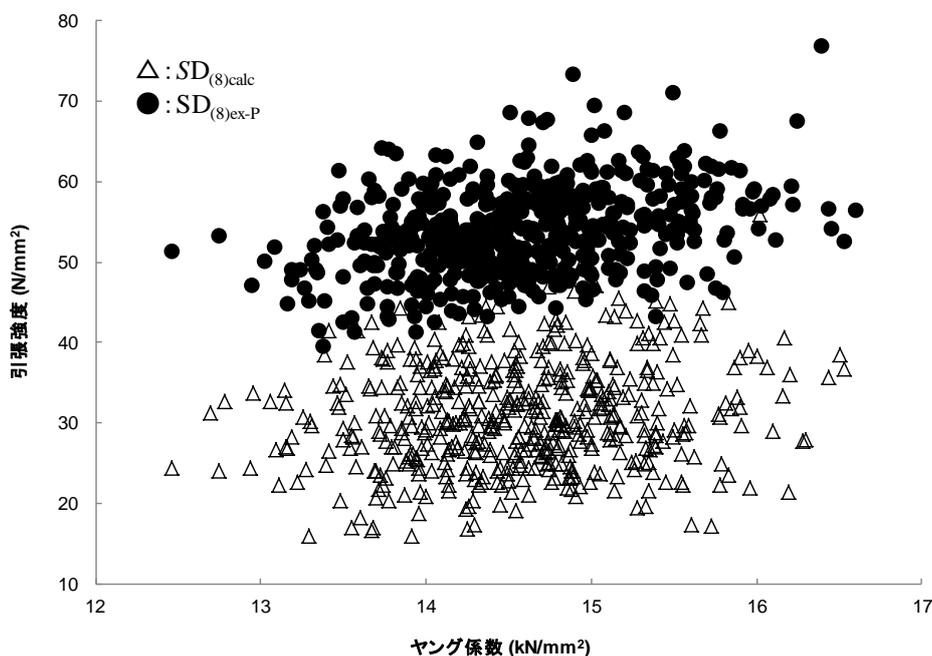


図6.1 8plyの引張強度における $SD_{(8)calc}$ と $SD_{(8)ex-P}$ の比較.

注: $SD_{(8)calc}$: 1plyのヤング係数と引張強度の実験値による強度分布を用いたシミュレーションによる8plyの引張強度の分布を表す。 $SD_{(8)ex-P}$: 最尤法により推定した8plyの引張強度の母集団分布を表す。

ここで、シミュレーションによる 8ply の TS 分布は $SD_{(8)calc}$ 、8ply の実験値の TS 分布(母集団分布)は $SD_{(8)ex-P}$ 、 $SD_{(8)calc}$ と $SD_{(8)ex-P}$ で共通する 8ply の TE 分布は $ED_{(8)calc}$ と表した。同図中の△印はシミュレーションによる 8ply のヤング係数と引張強度($TE_{(8,i)calc}$, $TS_{(8,i)calc}$) ($i=1, \dots, 500$)を表し、 $TE_{(8,i)calc}$ ($i=1, \dots, 500$)は $ED_{(8)calc}$ に、 $TS_{(8,i)calc}$ ($i=1, \dots, 500$)は $SD_{(8)calc}$ にそれぞれ属している。なお、 $TE_{(8,i)calc}$ と $TE_{(8,i)calc}$ の計算方法は第五章の 5.3 の (b) を準用したが、計算に用いた Eh と Ft の分布は何れもが LN であり、パラメータを示すと Eh の平均値が 2.68 で標準偏差が 0.05、 Ft の平均値が 3.41 で標準偏差が 0.22、 Eh と Ft の相関係数が 0.17 である。

一方、同図中の●印も、8ply のヤング係数と引張強度($TE_{(8,i)ex}$, $TS_{(8,i)ex-P}$) ($i=1, \dots, 500$)を表し、 $TE_{(8,i)ex}$ はシミュレーションと共通の $ED_{(8)calc}$ に属しているが、 $TS_{(8,i)ex-P}$ は 8ply の TS

の実験値の母集団分布 $SD_{(8)ex-P}$ に属している。 $TE_{(8,i)ex}$ と $TS_{(8,i)ex-P}$ の計算方法は第五章の 5.4.2 を準用したが、5.4.1 の最尤法^{53,54)} で求められたパラメータは、 Eh はシミュレーションと共通であり、 Ft は分布が LN で平均値が 3.98、標準偏差が 0.10、 Eh との相関係数が 0.38 となった。そこで、2 個 1 組の 0 以上 1 未満の独立一様乱数を 500 組発生させ、それぞれを以上のパラメータに従う 2 次元有相関非正規乱数に変換すると、 $(TE_{(8,i)ex}, TS_{(8,i)ex-P})$ ($i=1, \dots, 500$) が得られた。

同図より、 $SD_{(8)calc}$ より $SD_{(8)ex-P}$ の方が値として大きく、8ply の TS の実験値に積層効果が存在していることが分かる。このことは、8ply の MORv、平使い方向の曲げの破壊クライテリアを引張応力破壊と仮定した場合の MORh 及び CS でも同様であった。更に、何れの強度の何れの積層数においても、同様であった。したがって、8ply~17ply の MORv、MORh、TS 及び CS については、第五章で指摘したとおり積層効果が存在することが確認された。

(b) 積層効果の定義

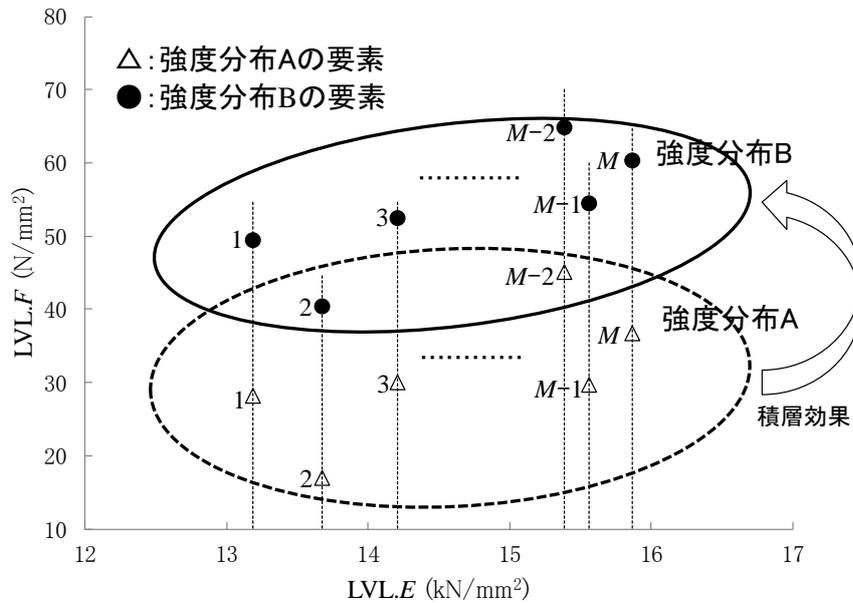
6.3 の (a) では、MORv、MORh、TS 及び CS に積層効果の影響が存在することを確認した。そこで、これ以降は LVL のヤング係数及び強度を 6.2 で定義した LVL.E 及び LVL.F を用いて総称し、エレメントのヤング係数及び強度についても同様に、 E と F を用いて総称することとする。

まず、ある積層数 N (10py を除く 8ply~17ply の何れか) の LVL.E 及び LVL.F を対象に、表 5.2 または表 5.3 に示す E と F の実験値による強度分布を用いたシミュレーション (5.3 の (a)~(e) のうち、積層数を N に読み換えて該当する方法を準用) により M 体の仮想 LVL を作り、それぞれ $(LVL.E_{(N,i)calc}, LVL.F_{(N,i)calc})$ ($i=1, \dots, M$) を求める。更に、 $(LVL.E_{(N,i)calc}, LVL.F_{(N,i)calc})$ ($i=1, \dots, M$) を用いて $ED_{(N)calc}$ と $SD_{(N)calc}$ のパラメータ及び $R_{(N)calc}$ を求め、これらのパラメータにより表される強度分布を強度分布 A と呼称する。したがって、 $(LVL.E_{(N,i)calc}, LVL.F_{(N,i)calc})$ ($i=1, \dots, M$) は、強度分布 A を構成する要素となる。

一方、 $ED_{(N)calc}$ のパラメータを用いた 5.4.1 の最尤法^{53,54)} により、LVL.F の実験値の母集団分布 $SD_{(N)ex-P}$ と $R_{(N)ex-P}$ を推定し、 $ED_{(N)calc}$ と $SD_{(N)ex-P}$ のパラメータ及び $R_{(N)ex-P}$ により表される強度分布を強度分布 B と呼称する。更に、 M 組の 0 以上 1 未満の 2 次元独立一様乱数を発生させ、強度分布 B に従うよう変換^{35,49,50)} した $(LVL.E, LVL.F)$ (積層数 N) の推定値のうち、識別番号 i ($i=1, \dots, M$) の $(LVL.E, LVL.F)$ を $(LVL.E_{(N,i)ex}, LVL.F_{(N,i)ex})$ ($i=1, \dots, M$) と表す。従って、 $(LVL.E_{(N,i)ex}, LVL.F_{(N,i)ex})$ ($i=1, \dots, M$) は、強度分布 B を構成する要素となる。

以上のとおり、強度分布 A と強度分布 B はそれぞれ求めるアルゴリズムは異なるが、お互いに同一の LVL の集合を対象としている。そこで、強度分布 A と強度分布 B の各要素は、それぞれ識別番号 i ($i=1, \dots, M$) が同じもので同一の LVL を対象とし、お互いに 1 対 1 で対応していると考えられる。この関係を考慮し、強度分布 A と強度分布 B を同一の散布図に模式的に表すと、図 6.2 のとおりとなる。

同図中の△印は強度分布 A を構成する各要素で、 $(LVL.E_{(N,i)calc}, LVL.F_{(N,i)calc})$ ($i=1, \dots, M$) で表される。一方、同図中の●印は強度分布 B を構成する各要素で、 $(LVL.E_{(N,i)ex}, LVL.F_{(N,i)ex})$ ($i=1, \dots, M$) で表される。同図を見ると、強度分布 B は強度分布 A より全体として強度の高



i	●	△
1	$(LVL.E_{(N,1)ex}, LVL.F_{(N,1)ex})$	$(LVL.E_{(N,1)calc}, LVL.F_{(N,1)calc})$
2	$(LVL.E_{(N,2)ex}, LVL.F_{(N,2)ex})$	$(LVL.E_{(N,2)calc}, LVL.F_{(N,2)calc})$
3	$(LVL.E_{(N,3)ex}, LVL.F_{(N,3)ex})$	$(LVL.E_{(N,3)calc}, LVL.F_{(N,3)calc})$
⋮	⋮	⋮
$M-2$	$(LVL.E_{(N,M-2)ex}, LVL.F_{(N,M-2)ex})$	$(LVL.E_{(N,M-2)calc}, LVL.F_{(N,M-2)calc})$
$M-1$	$(LVL.E_{(N,M-1)ex}, LVL.F_{(N,M-1)ex})$	$(LVL.E_{(N,M-1)calc}, LVL.F_{(N,M-1)calc})$
M	$(LVL.E_{(N,M)ex}, LVL.F_{(N,M)ex})$	$(LVL.E_{(N,M)calc}, LVL.F_{(N,M)calc})$

図6.2 強度分布Aと強度分布Bの比較

注: 強度分布A、強度分布B、 i 、 N 、 M 、 $LVL.E$ 、 $LVL.F$ 、 $LVL.E_{(N,i)calc}$ 、 $LVL.F_{(N,i)calc}$ 、 $LVL.E_{(N,i)ex}$ 、 $LVL.F_{(N,i)ex}$: 表6.1参照。

い傾向にあり、縦軸が強度となる同図中、強度分布 B は強度分布 A の上方に位置している。そこで、それぞれの分布にプロットされた個々のデータの間関係を見ると、お互いに 1 対 1 で対応する識別番号が同じもの同士は、同一の LVL を対象としておりヤング係数は一致する。この関係を式で表すと、 $LVL.E_{(N,i)calc} = LVL.E_{(N,i)ex}$ ($i = 1, \dots, M$)となる。ところが、お互いに 1 対 1 で対応する識別番号が同じもの同士でも、強度については上述したとおり強度分布 B の方の値が大きく、 $LVL.F_{(N,i)calc} < LVL.F_{(N,i)ex}$ ($i = 1, \dots, M$)という傾向を示している。その理由はこれまで述べてきたとおり、 $LVL.F_{(N,i)calc}$ は 1ply に切り取られた E と F の実験値から算出されており積層効果が存在しないのに対し、 $LVL.F_{(N,i)ex}$ が $LVL.F$ の実験値の母集団分布に従うデータであり積層効果が存在するからである。そこで、 $LVL.F$ に存在する積層効果を定量的に表すために積層効果係数 k を導入すると、 $LVL.F_{(N,i)ex}$ における $k_{(N,i)}$ は上述の $LVL.F_{(N,i)calc}$ と $LVL.F_{(N,i)ex}$ の関係から、次のとおり表される。

$$k_{(N,i)} = \frac{LVL.F_{(N,i)ex}}{LVL.F_{(N,i)calc}} \quad (i = 1, \dots, M) \quad (6.1)$$

(c) 積層効果係数の算出

(6.1) 式を用いて実際に $k_{(N,i)}$ を求めるには、図 6.2 に示したとおり ($LVL.E_{(N,i)calc}$ 、 $LVL.F_{(N,i)calc}$) と ($LVL.E_{(N,i)ex}$ 、 $LVL.F_{(N,i)ex}$) をお互い 1 対 1 で対応させる必要がある。そこで、

$k_{(N,i)}$ を求めるアルゴリズムは、 $(LVL.E_{(N,i)calc}, LVL.F_{(N,i)calc})$ と $(LVL.E_{(N,i)ex}, LVL.F_{(N,i)ex})$ をどのようにお互い1対1で対応させるかということを中心に、次のとおり導入した。

まず、 $(LVL.E_{(N,i)calc}, LVL.F_{(N,i)calc})$ と $(LVL.E_{(N,i)ex}, LVL.F_{(N,i)ex})$ は、それぞれ $\mathbf{ra}_{(N,i)}$ と $\mathbf{rb}_{(N,i)}$ を変換^{35,49,50)}させて表すことができる。ただし、 $(LVL.E_{(N,i)calc}, LVL.F_{(N,i)calc})$ はシミュレーションによる計算値なので、実際に $\mathbf{ra}_{(N,i)}$ を求めるには、 $\mathbf{ra}_{(N,i)}$ から $(LVL.E_{(N,i)calc}, LVL.F_{(N,i)calc})$ への変換^{35,49,50)}を逆にたどる操作(以降、逆変換という)が必要となる。そこで、最初にこの逆変換の手順を示す。

$LVL.E_{(N,i)calc}$ を $ED_{(N)calc}$ の累積分布関数に代入し、 $LVL.E_{(N,i)calc}$ の累積確率 $r_{1(N,i)}$ を求める。同様に、 $LVL.F_{(N,i)calc}$ を $SD_{(N)calc}$ の累積分布関数に代入し、 $LVL.F_{(N,i)calc}$ の累積確率 $r_{2(N,i)}$ を求める。更に、この $(r_{1(N,i)}, r_{2(N,i)})$ をそれぞれ標準正規累積分布関数の逆関数に代入すると、標準正規乱数 $(e_{1(N,i)}, e_{2(N,i)})$ が求められる。ただし、この2個の乱数は相関係数が $R_{(N)calc}$ となることから、次のとおりコレスキー分解行列³⁵⁾の逆行列を用いて、独立標準正規乱数 $(e_{1(N,i)}, e_{2(N,i)})$ に変換する。

$$\begin{pmatrix} e_{1(N,i)} \\ e_{2(N,i)} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{1 - R_{(N)calc}^2}} \begin{pmatrix} \sqrt{1 - R_{(N)calc}^2} & 0 \\ -R_{(N)calc} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_{1(N,i)} \\ e_{2(N,i)} \end{pmatrix} \quad (6.2)$$

最後に、 $e_{1(N,i)}$ と $e_{2(N,i)}$ を標準正規累積分布関数に代入してそれぞれ累積確率を算出すると、 $\mathbf{ra}_{(N,i)}=(ra_{1(N,i)}, ra_{2(N,i)})$ が求められる。

また、 $x_1=LVL.E_{(N,i)calc}$ における $LVL.F_{(N,i)calc}$ の累積確率 $P_{A(N,i)}$ は、次のとおり表される。

$$P_{A(N,i)} = \int_0^{LVL.F_{(N,i)calc}} f_A(LVL.E_{(N,i)calc}, x_2) dx_2 \quad (i = 1, \dots, M) \quad (6.3)$$

同様に、 $x_1=LVL.E_{(N,i)ex}$ (= $LVL.E_{(N,i)calc}$)における $LVL.F_{(N,i)ex}$ の累積確率 $P_{B(N,i)}$ は、次のとおり表される。

$$P_{B(N,i)} = \int_0^{LVL.F_{(N,i)ex}} f_B(LVL.E_{(N,i)calc}, x_2) dx_2 \quad (i = 1, \dots, M) \quad (6.4)$$

ここで、**図 6.2**と同様に、強度分布 A と強度分布 B を同一の散布図に模式的に表した**図 6.3**を示した。ただし、同図には、強度分布 A に属しヤング係数が同一な $(LVL.E_{(N,c)calc}, LVL.F_{(N,c)calc})$ と $(LVL.E_{(N,d)calc}, LVL.F_{(N,d)calc})$ ($c \neq d, 1 \leq c \leq M, 1 \leq d \leq M$)の2組の要素と、この2組の要素とそれぞれ対応し、強度分布 B に属する $(LVL.E_{(N,c)ex}, LVL.F_{(N,c)ex})$ と $(LVL.E_{(N,d)ex}, LVL.F_{(N,d)ex})$ の2組の要素をプロットした。ただし、 $LVL.E_{(N,c)calc} = LVL.E_{(N,d)calc} = LVL.E_{(N,c)ex} = LVL.E_{(N,d)ex}$ である。

強度分布 A と強度分布 B はこれまで述べてきたとおり、全ての要素同士はそれぞれ同じLVLを対象としており、お互い1対1で対応している。このことから、強度分布 A の2組の要素間で $LVL.F_{(N,c)calc} < LVL.F_{(N,d)calc}$ の関係がある場合、同図に示すとおり強度分布 B の2組の要素間でも $LVL.F_{(N,c)ex} < LVL.F_{(N,d)ex}$ の関係になると仮定する。更に、ヤング係数が同一な全ての要素間でこの関係が成り立つと仮定すると、(6.3)式による累積確率 $P_{A(N,i)}$ と(6.4)式による累積確率 $P_{B(N,i)}$ は、**図 6.4**に示すとおり、お互いに一致すると仮定できる。そこで、 $\mathbf{ra}_{(N,i)}$ をパラメータとする $LVL.F_{(N,i)calc}$ を(6.3)式に代入し、同様に $\mathbf{rb}_{(N,i)}$ をパラメータと

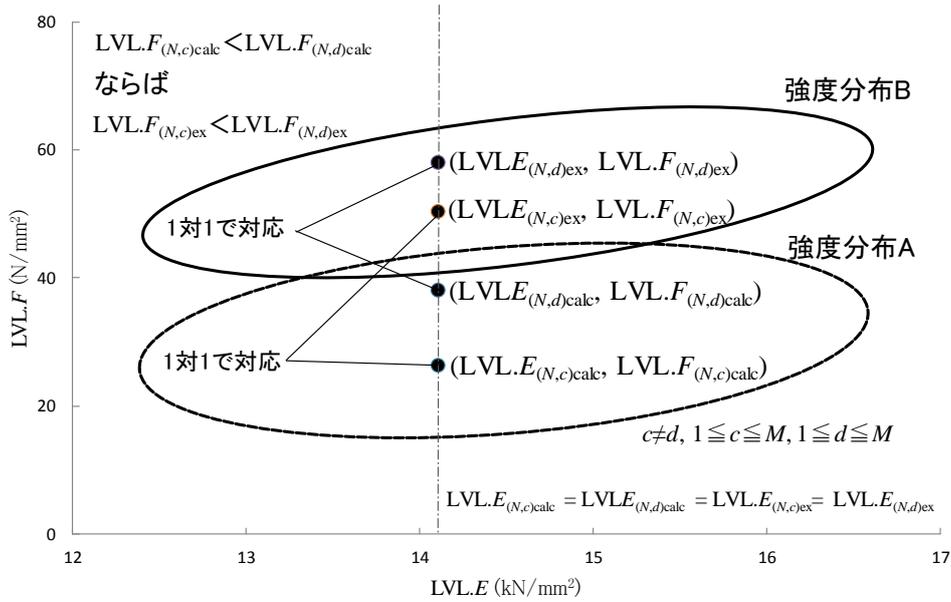


図6.3 同一のヤング係数上にある強度分布Aの2個の要素と強度分布Bの2個の要素の関係
 注: c 及び d : 識別番号 i に含まれる1以上 M 以下の自然数を表す。 $i, M, N, LVL.E_{(N,i)calc}, LVL.F_{(N,i)calc}, LVL.E_{(N,i)ex}$ 及び $LVL.F_{(N,i)ex}$: 表6.1を参照。

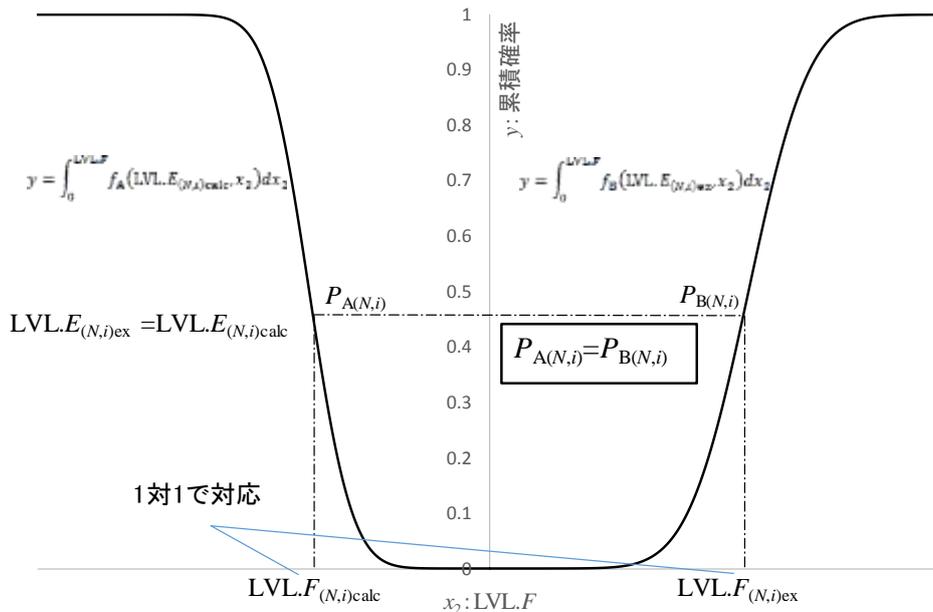


図6.4 お互いに1対1で対応する強度間の累積確率の関係

注: $i, N, P_{A(N,i)}, P_{B(N,i)}, LVL.E_{(N,i)calc}, LVL.F_{(N,i)calc}, LVL.E_{(N,i)ex}, LVL.F_{(N,i)ex}, x_1, x_2, f_A(x_1, x_2), f_B(x_1, x_2)$: 表6.1を参照。

する $LVL.F_{(N,i)ex}$ を(6.4)式に代入し、 $P_{A(N,i)}=P_{B(N,i)}$ の条件下で $ra_{(N,i)}$ と $rb_{(N,i)}$ の関係を調べると、 $f_A(x_1, x_2)$ と $f_B(x_1, x_2)$ が N, LN または $2PW$ による $3 \times 3=9$ 通りの何れの分布の組み合わせであっても、 $ra_{(N,i)}=rb_{(N,i)}$ になることが確かめられた。したがって、 $(LVL.E_{(N,i)calc}, LVL.F_{(N,i)calc})$ を表す $ra_{(N,i)}$ を用いて $(LVL.E_{(N,i)ex}, LVL.F_{(N,i)ex})$ も表すと、お互いに1対1で対応させることができると考えられる。

以上より、 $k_{(N,i)}$ を求めるアルゴリズムの概略は、 E と F の実験値による強度分布を用いたシミュレーションにより $(LVL.E_{(N,i)calc}, LVL.F_{(N,i)calc})$ を算出し、強度分布Aのパラメータを

用いて(LVL. $E_{(N,i)calc}$, LVL. $F_{(N,i)calc}$)から $ra_{(N,i)}$ に逆変換し、更に $ra_{(N,i)}$ を強度分布 B に従うよう(LVL. $E_{(N,i)ex}$, LVL. $F_{(N,i)ex}$)に変換^{35,49,50)}する。以上の操作により、(LVL. $E_{(N,i)calc}$, LVL. $F_{(N,i)calc}$)と(LVL. $E_{(N,i)ex}$, LVL. $F_{(N,i)ex}$)はお互い 1 対 1 で対応することになる。そこで、(6.1)式よりLVL. $F_{(N,i)ex}$ をLVL. $F_{(N,i)calc}$ で除すると、 $k_{(N,i)}$ が求められることになる。

(d) 積層効果の影響を受けたエレメントの強度分布の算出

(c) では積層効果係数 $k_{(N,i)}$ を求めるアルゴリズムの概略を示したが、その算出に用いるLVL. $F_{(N,i)calc}$ は破壊クライテリアの仮定に基づく推定式にものである。そこで、LVL. F がMORv、TS またが CS の場合、LVL. $F_{(N,i)calc}$ の推定式を示すと、(3.4)式、(3.6)式及び(3.8)式より、何れの強度の場合も次のとおり同一の形式となる。

$$LVL.F_{(N,i)calc} = \min \left[LVL.E_{calc-i} \left\{ \frac{F_{(N,i,j)}}{E_{(N,i,j)}} \right\} \right] \quad (i = 1, \dots, M) \quad (j = 1, \dots, N) \quad (6.5)$$

したがって、(6.1)式及び(6.5)式より、LVL. $F_{(N,i)ex}$ は次のとおり表される。

$$\begin{aligned} LVL.F_{(N,i)ex} &= k_{(N,i)} \times LVL.F_{(N,i)calc} \\ &= k_{(N,i)} \times \min \left[LVL.E_{(N,i)calc} \left\{ \frac{F_{(N,i,j)}}{E_{(N,i,j)}} \right\} \right] \\ &\quad (i = 1, \dots, M) \quad (j = 1, \dots, N) \quad (6.6) \end{aligned}$$

ここで、積層効果は強度のみに影響を与えることから、LVL F に積層効果が存在するのは、エレメントの強度に積層効果が存在するからと考えられる。ただし、(6.6)式を考慮すると、6.3 の(c)により求められた $k_{(N,i)}$ は LVL の破壊された層の強度に乘じるしかなく、破壊されていない残りの $N-1$ 層については積層効果を求める手段がないものと考えられる。

以上より、識別番号 i の LVL(積層数 N)が $S(N,i)$ 層目($1 \leq S(N,i) \leq N$)で破壊されると、積層効果の影響が存在するエレメントの強度は $k_{(N,i)} \times F_{(N,i,S(N,i))}$ と表される。したがって、 $i=1, \dots, M$ で $k_{(N,i)}$ を求め $F_{(N,i,S(N,i))}$ に乘じる操作を積層数 8, 9, 11, \dots , 17 で繰り返すと、 $F_{(N,i,S(N,i))}$ と対になる $E_{(N,i,S(N,i))}$ ($i=1, \dots, M$) (8, 9, 11, \dots , 17)による**実験値 E 分布**、 $k_{(N,i)} \times F_{(N,i,S(N,i))}$ ($i=1, \dots, M$) (8, 9, 11, \dots , 17)による**実験値 F 分布**、 $(E_{(N,i,S(N,i))}, k_{(N,i)} \times F_{(N,i,S(N,i))})$ ($i=1, \dots, M$) (8, 9, 11, \dots , 17)による**実験値 E-F 分布**が求められる。

これまで述べたことをまとめると、**実験値 E 分布**、**実験値 F 分布**及び**実験値 E-F 分布**を求めるアルゴリズムは次のとおりとなる。また、各記号の意味はこれまで示してきたとおりとするが、 M は 500 に設定している。

- ① E と F の実験値による強度分布を用いたシミュレーションにより、500 体の積層数 N の仮想 LVL を作り、LVL. E は(3.2)式を用いて、LVL. F は(3.4)式、(3.6)式または(3.8)式を用いて、それぞれの仮想 LVL の LVL. E と LVL. F の計算値(LVL. $E_{(N,i)calc}$, LVL. $F_{(N,i)calc}$) ($i=1, \dots, 500$)を求める。
- ② 500 体の仮想 LVL(積層数 N)について、それぞれ破壊された層のヤング係数と強度 ($E_{(N,i,S(N,i))}$, $F_{(N,i,S(N,i))}$) ($i=1, \dots, 500$)をプールする。
- ③ ①による(LVL. $E_{(N,i)calc}$, LVL. $F_{(N,i)calc}$) ($i=1, \dots, 500$)を用いて、 $ED_{(N)calc}$ と $SD_{(N)calc}$ のパラメータ及び $R_{(N)calc}$ を求める。

- ④ $ED_{(N)calc}$ のパラメータを用いた 5.4.1 の最尤法^{53,54)}により、 $LVL.F$ の実験値の母集団分布 $SD_{(N)ex-P}$ と $R_{(N)ex-P}$ を推定する。
- ⑤ $LVL.E_{(N,i)calc}$ を $ED_{(N)calc}$ の累積分布関数に、 $LVL.F_{(N,i)calc}$ を $SD_{(N)calc}$ の累積分布関数にそれぞれ代入し、 $LVL.E_{(N,i)calc}$ の累積確率 $\underline{r}_{1(N,i)}$ 及び $LVL.F_{(N,i)calc}$ の累積確率 $\underline{r}_{2(N,i)}$ を求める。
- ⑥ $(\underline{r}_{1(N,i)}, \underline{r}_{2(N,i)})$ の各要素をそれぞれ標準正規累積分布関数の逆関数に代入し、標準正規乱数ベクトル $(\underline{e}_{1(N,i)}, \underline{e}_{2(N,i)})$ に変換する。
- ⑦ $R_{(N)calc}$ と $(\underline{e}_{1(N,i)}, \underline{e}_{2(N,i)})^T$ を(6.2)式に代入し、独立標準正規乱数ベクトル $(e_{1(N,i)}, e_{2(N,i)})^T$ に変換する。
- ⑧ $(e_{1(N,i)}, e_{2(N,i)})$ の各要素をそれぞれ標準正規累積分布関数に代入し、 $\mathbf{ra}_{(N,i)} = (ra_{1(N,i)}, ra_{2(N,i)})$ を求める。
- ⑨ $\mathbf{ra}_{(N,i)}$ を $ED_{(N)calc}$ と $SD_{(N)ex-P}$ のパラメータ及び R_{ex-P} に従う 2 個 1 組の有相関非正規乱数に変換^{35,49,50)} し、 $(LVL.E_{(N,i)ex}, LVL.F_{(N,i)ex})$ と表す。ただし、 $LVL.E_{(N,i)calc} = LVL.E_{(N,i)ex}$ となる。
- ⑩ (6.1)式に従い、 $LVL.F_{(N,i)ex}$ を $LVL.E_{(N,i)calc}$ で除して $k_{(N,i)}$ を求める。
- ⑪ $k_{(N,i)} \times F_{(N,i,S(N,i))}$ を、エレメントの強度(積層の影響を受けた 1ply の実験値の強度)とする。
- ⑫ $i=1, \dots, 500$ で④～⑨を繰り返し、 $k_{(N,i)} \times F_{(N,i,S(N,i))}$ ($i=1, \dots, 500$) をプールする。
- ⑬ $N=8, 9, 11, \dots, 17$ で①～⑫を繰り返し、求められた $E_{(N,i,S(N,i))}$ ($i=1, \dots, 500$) ($N=8, 9, 11, \dots, 17$) の分布を**実験値 E 分布**、 $k_{(N,i)} \times F_{(N,i,S(N,i))}$ ($i=1, \dots, 500$) ($N=8, 9, 11, \dots, 17$) の分布を**実験値 F 分布**、 $(E_{(N,i,S(N,i))}, k_{(N,i)} \times F_{(N,i,S(N,i))})$ ($i=1, \dots, 500$) ($N=8, 9, 11, \dots, 17$) の分布を**実験値 E-F 分布**と表す。

また、 $LVL.F$ が MORh の場合、 $LVL.F_{(N,i)calc}$ の推定式は(3.18)式または(3.20)式となるが、何れの場合も仮想 LVL が破壊されるのは引張側最外層の N 層目となる。したがって、上述のアルゴリズムの②でプルするヤング係数と強度は、 $(E_{(N,i,N)}, F_{(N,i,N)})$ ($i=1, \dots, 500$) となる。このことから、 $k_{(N,i)}$ は $F_{(N,i,N)}$ に乗じるしかなく、 $k_{(N,i)} \times F_{(N,i,N)}$ がエレメントの強度(積層効果の影響が存在する 1ply の実験値の強度)となる。以上より、 $N=8, 9, 11, \dots, 17$ の積層数毎の $i=1, \dots, 500$ で集計された $E_{(N,i,N)}$ の分布が**実験値 E 分布**となり、以下同様に $k_{(N,i)} \times F_{(N,i,N)}$ の分布が**実験値 F 分布**、 $(E_{(N,i,N)}, k_{(N,i)} \times F_{(N,i,N)})$ の分布が**実験値 E-F 分布**となる。

6.4 NLM の有効性の検討手法

6.3 で示した**実験値 E 分布**、**実験値 F 分布**及び**実験値 E-F 分布**は、合計 4500 体の仮想 LVL の破壊された層のみを対象としている。したがって、4500 体の仮想 LVL の全層をエレメント全体の集合と考えた場合、以上の 3 分布による集合はエレメント全体の部分集合でしかない。

一方、 $LVL.F$ が MORh 以外の場合、NLM によるエレメントの強度分布の推定値は、破壊された層だけではなくエレメント全体の分布となる。したがって、NLM により推定したエレメントの強度の分布は、そのまま単純に**実験値 F 分布**と比較することはできない。そこで、NLM によるエレメントの強度分布の推定値についても、これを用いて 6.3 と同様に

積層数 $N(N=8, 9, 11, \dots, 17)$ 毎に 500 体ずつの合計 4500 体の仮想 LVL を作り、それぞれ破壊された層のヤング係数と強度をプールし、4500 個のヤング係数の分布を**推定値 E 分布**、4500 個の強度の分布を**推定値 F 分布**、4500 組のヤング係数と強度の分布を**推定値 $E-F$ 分布**と表す。

また、LVL F が MORh の場合、6.3 で示した**実験値 E 分布**、**実験値 F 分布**及び**実験値 $E-F$ 分布**は、4500 体の仮想 LVL の引張側最外層のみを対象としている。これに対し、NLM により推定したエレメントの強度の分布も、(3.18)式または(3.20)式より、LVL の引張側最外層のみを対象としている。そこで、NLM によるエレメントの強度分布の推定値を用いて 4500 体の仮想 LVL を作り、それぞれ破壊された引張側最外層のヤング係数と引張強度をプールし、MORh 以外の場合と同様に 4500 個のヤング係数の分布を**推定値 E 分布**、4500 個の引張強度の分布を**推定値 F 分布**、4500 組のヤング係数と引張強度の分布を**推定値 $E-F$ 分布**と表すこととした。

以上より、NLM の有効性を検討するには、エレメントの強度毎に**実験値 F 分布**と**推定値 F 分布**を比較することになる。ただし、**実験値 F 分布**と**推定値 F 分布**は上述したとおり、何れもエレメント全体の分布ではないことから、K-S 検定によりそれぞれの分布形を特定し比較することに意味はないと考える。仮に K-S 検定により両者の分布に差が生じる結果になったとしても、エレメント全体の分布では差が無いことも考えられる。NLM によるエレメントの強度の分布が適切に推定されているかどうかは、**実験値 $E-F$ 分布**と**推定値 $E-F$ 分布**を同一の散布図にプロットし、**実験値 F 分布**と**推定値 F 分布**を視覚的に比較し、同じような分布であれば NLM は有効であると考えることとする。

6.5 NLM の有効性

6.5.1 平使い方向の曲げヤング係数を用いた縦使い方向の曲げ強度

これ以降は、6.3 に従い**実験値 F 分布**と**推定値 F 分布**を比較し、NLM の有効性について検討していくこととする。

3.2 で NLM より推定した E_v 分布は平均値 14.33kN/mm^2 、標準偏差 2.64kN/mm^2 となり、4.3 の実験による E_h 分布の平均値 14.42kN/mm^2 、標準偏差 1.92kN/mm^2 と一致しなかった。従って、NLM による F_v 分布の推定値については、**実験値 F 分布**と**推定値 F 分布**との比較を行うことはできない。 E_v 分布の推定値と E_h 分布の実験値は一致しなかったが、材質が均一な状態であれば両者はほぼ一致すると見られる。そこで、ヤング係数分布を E_h と見なして、改めて NLM によりエレメントの E_h と F_v による強度分布の推定し、NLM の有効性について検討することとした。ただし、 E_h と F_v による分布の組合せは $3 \times 3 = 9$ 通りとなることから、この組合せ毎に NLM を適用して E_h と F_v による強度分布を推定した。更に、 E_v を E_h に読み換えて 3.2.3 に従い推定値の適合性を調べた結果、適合した 7 通りの分布の組合せの F_v 分布のパラメータ及び E_h と F_v の相関係数を表 6.2 に示した。

次に、**実験値 $E-F$ 分布**を求めたが、計算に用いる E_h と F_v の実験値の分布は、5.3 に示すとおり何れも N, LN または 2PW の 3 通りとなった。そこで、 $3 \times 3 = 9$ 通りとなる E_h と F_v の実験値の分布の組み合わせ毎に、6.3 の (d) のアルゴリズムを適用し k と**実験値 $E-F$ 分布**

を求めた。ここで、 $3 \times 3 = 9$ 通りの分布の組み合わせ全体の k の範囲を見ると、1.04~6.93 となった。LVLに関する積層効果係数の研究は皆無であるので、集成材に関する積層効果係数の既往の研究と比較すると、文献38)では k の範囲は0.95~2.51、文献56)では1.84~2.04であった。ただし、文献毎に積層効果係数の定義と算出方法は異なる。以上より、**実験値 $E-F$ 分布の k は集成材での報告より高い値が出現しているが、極端な違いは見られないことから、9通り全ての分布の組み合わせによる**実験値 $E-F$ 分布**を比較に用いることとした。**

表6.2 F_v 分布の推定値とK-S検定による適合性の確認結果2
— E_h 分布分布を用いた再計算結果—

E_h 分布形	F_v 分布形	F_v 分布の推定値					残差 二乗和	K-S検定	
		Pe_1	Pe_2	Pf_1	Pf_2	R_{E-F}		dn	d(0.05, 299)
正規分布	正規分布	14.48	1.86	95.03	16.81	0.66	1485.77	0.067	0.083
正規分布	対数正規分布	14.48	1.86	4.57	0.21	0.62	1132.82	0.058	0.083
正規分布	2Pワイブル分布	14.48	1.86	98.43	7.97	0.68	1528.62	0.071	0.083
対数正規分布	正規分布	2.66	0.12	95.02	16.59	0.66	1468.02	0.067	0.083
対数正規分布	対数正規分布	2.66	0.12	4.59	0.23	0.62	1431.28	0.064	0.083
対数正規分布	2Pワイブル分布	2.66	0.12	98.23	8.07	0.68	1452.15	0.075	0.083
2Pワイブル分布	正規分布	15.16	9.97	94.92	16.33	0.63	1459.45	0.064	0.083
2Pワイブル分布	対数正規分布	15.16	9.97	4.60	0.23	0.61	1349.51	0.084	0.083
2Pワイブル分布	2Pワイブル分布	15.16	9.97	96.65	8.59	0.69	1451.84	0.093	0.083

注: E_h, F_v : 表6.1を参照。 Pe_1, Pe_2 : 表3.1を参照。 Pf_1, Pf_2 : 表3.3を参照。 R_{E-F} : E_h と F_v の相関係数を表す。dn: 表3.1を参照。d(0.05, 299): 表3.3を参照。

一方、**推定値 $E-F$ 分布**については、計算に用いる E_h と F_v による強度分布の推定値が上述のとおり7通りとなった。そこで、この7通りの分布の組み合わせ毎に、6.3に従い**推定値 $E-F$ 分布**を求めた。したがって、9通りとなる**実験値 $E-F$ 分布**との分布の組み合わせは、 $9 \times 7 = 63$ 通りとなる。ただし、 E_h の実験値と推定値は分布が一致するので、**実験値 E 分布**と**推定値 E 分布**の分布形が同一な21通りの組合せについて、**実験値 $E-F$ 分布**と**推定値 $E-F$ 分布**を同一の散布図にプロットし、それぞれ**実験値 F 分布**と**推定値 F 分布**との比較を行った。そのなかで、実験値の E_h と F_v が N と 2PW の場合の**実験値 $E-F$ 分布**と、推定値の E_h と F_v が N と LN の場合の**推定値 $E-F$ 分布**を同一の散布図にプロットし、**図 6.5**として示した。同図を見ると、**実験値 F 分布**と**推定値 F 分布**はお互い重なり合いほぼ一致していることが分かる。これ以外では、実験値の E_h と F_v が N と N、推定値の E_h と F_v が N と LN の組合せの場合、**実験値 F 分布**と**推定値 F 分布**がほぼ一致した。また、実験値の F_v と k との関係性を散布図に表し、**図 6.6**として示した。ただし、同図に示した4500組の (F_v, k) は、**図 6.5**の比較に用いた4500体の仮想LVLの破壊された層の値であり、 F_v は積層効果係数を乗じる前(積層効果の影響を受けていない)の値である。同図を見ると、 F_v の値が低いほど k の値は大きくなる傾向にあることが分かる。強度の値が低い場合、エレメントに何らかの欠点が存在することが多いことから、積層効果はこれまでの報告^{30,38,43,45)}通り欠点の補強効果と考えられる。

上述したとおり、NLMによる F_v 分布の推定値は、 E_h と F_v が N と LN の場合に、**実験値 F 分布**と**推定値 F 分布**がほぼ一致した。したがって、 F_v 分布の推定に対し、NLMは有

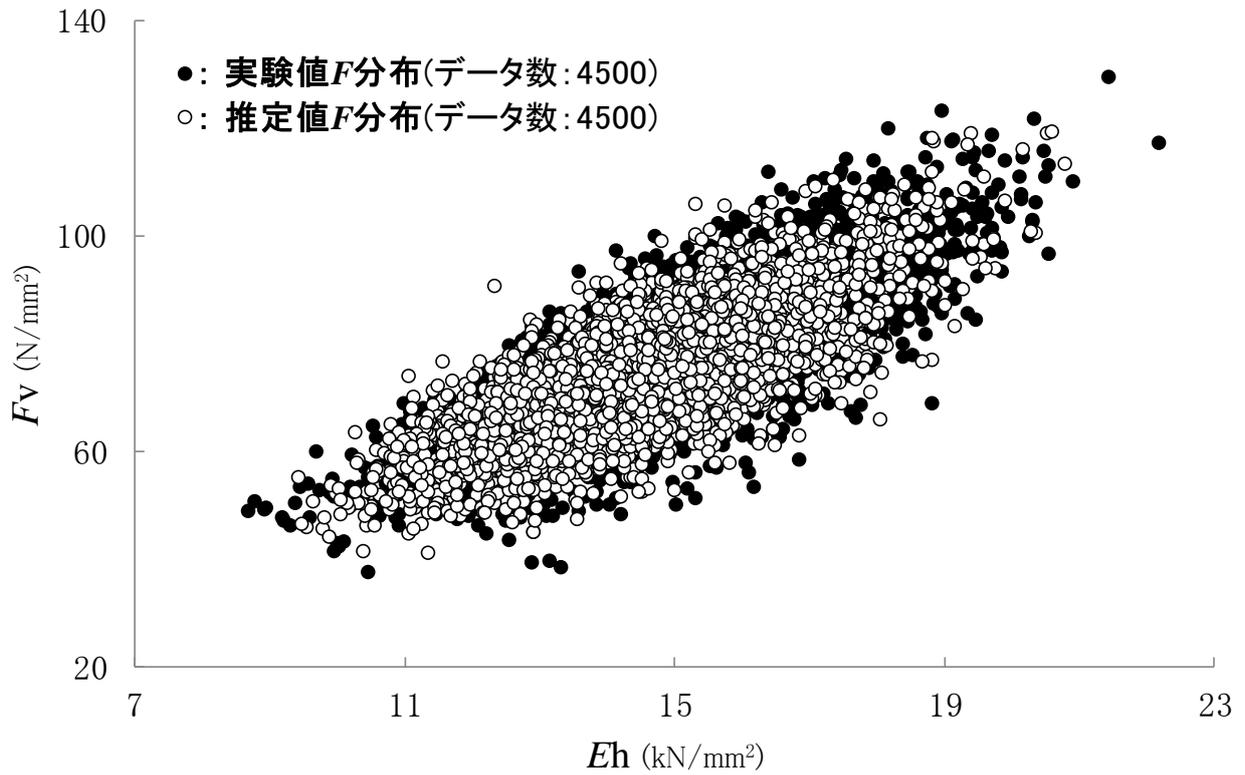


図6.5 F_v における実験値 F 分布と推定値 F 分布の比較

—LVLの縦使い方向の曲げ試験—

注: E_h , F_v , 実験値 F 分布, 推定値 F 分布: 表6.1を参照。

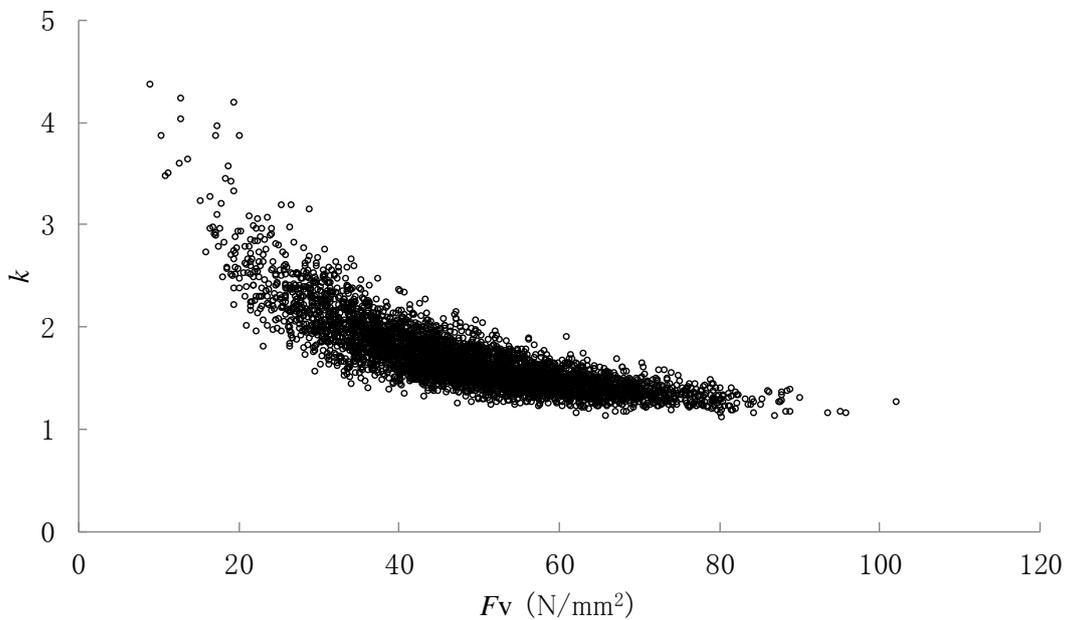


図6.6 実験値の F_v と k との関係

—LVLの縦使い方向の曲げ試験—

注: F_v , k : 図6.5の比較に用いた4500体の仮想LVLの破壊された層の値であり、 F_v には k を乗じていない。

効であると考えられる。また、NLM はエレメントのヤング係数と積層効果の影響を受けた強度との相関係数を推定していることなるので、**第四章**で示した 1ply の実験値におけるヤング係数と強度の相関係数と単純に比較することはできない。ただし、**図 6.5** のとおり**実験値 E-F 分布**と**推定値 E-F 分布**が重なり合っていたことから、相関係数を含め NLM は有効であると考えられる。

6.5.2 平使い方向の曲げ強度

(a) 破壊クライテリアを最外縁応力破壊と仮定する場合

実験値 E-F 分布の計算に用いる E_h と F_t の実験値の分布は、**5.3** に示すとおり何れも N、LN、2PW の 3 通りとなった。したがって、 $3 \times 3 = 9$ 通りの分布の組み合わせで、**6.5.1** と同様に k と**実験値 E-F 分布**を求めた。ただし、それぞれの組合せ毎に k の範囲を見ると、何れも k の最小値が 1 を下回っていた。**6.5.1** に示した文献(38)では k の最小値が 0.95 であるが、積層効果は上述したとおりエレメントの欠点の補強効果^{30,38,43,45)}と考えられることから、 k の値は全て 1 以上になるものと考えられる。しかし、以上のとおり k が 1 を下回るものが生じた理由としては、次のとおり考える。

まず、**実験値 E-F 分布**を計算には、**6.2** で示したとおり MOE_h と MOR_h 及び E_h と F_t のそれぞれの実験値による強度分布を用いた。そのなかの MOE_h と MOR_h の測定に用いた LVL 試験体は **2.4.2** に示すとおり、全体の 64.8% がスカーフジョイント (SJ) の絡む破壊であり、他の 35.2% が SJ 以外の欠点による破壊であった。したがって、LVL 試験体の引張側最外層の F_t 分布は、全体の 65% 程度が SJ 有の F_t で、他の 35% 程度が SJ 無の F_t で構成されていると考えられる。更に、均一な曲げモーメントが生じている荷重点間の中で SJ 以外から破壊されたことを考慮すると、SJ 有の F_t 分布より SJ 無の F_t 分布の方が小さい傾向にあるものと考えられる。

一方、 F_t の実験値は **5.3** に示したとおり、SJ 有の試験体のみの結果を用いており、引張試験においてほぼ全量が SJ から破壊されたものである。したがって、 F_t の実験値には、LVL 試験体の引張側最外層の F_t に見られるような、SJ より弱い部分の F_t は含まれていないことになる。このことより、 E_h と F_t の実験値による強度分布を用いて MOR_h をシミュレーションすると、MOR_h の実験値より大きな計算値が出現する場合があると考えられる。即ち、**6.3** の表記に従うと、 $LVL.F_{(N,i)ex} < LVL.E_{(N,i)calc}$ となり、**6.1 式** より $k_{(N,i)} < 1$ となる。

以上より、 F_t の実験値に SJ 無の試験体の結果を混合することも考えられるが、SJ 無の試験体の F_t 分布は SJ 有の分布より大きく (**表 4.5** を参照)、SJ 有と SJ 無を混合させた実験値による強度分布を用いてシミュレーションすると、 $k < 1$ となる頻度が SJ 有のみの場合より更に増大する。したがって、**実験値 E-F 分布**の計算には SJ 有の試験体のみによる F_t の実験値を用いるしかなく、1 に近い値で数パーセント程度の割合であれば 1 未満の k が出現するのやむを得ないと考える。したがって、 k の最小値と $k < 1$ となるデータの割合については分布の組み合わせ毎に調べ、それぞれ**実験値 E-F 分布**との比較に用いることができるか検討することとした。

そこで、9 通りとなる分布の組み合わせ毎に **6.3** の (d) のアルゴリズムを 3 回繰り返し、

表6.3 実験値強度分布における k の範囲及び1未満の値の割合1
 ー最外縁応力破壊の場合ー

実験値の分布形		k の範囲		$k < 1$ の割合
F_h	F_t	最小値	最大値	
N	N	0.90	4.85	0.5%
N	N	0.88	4.84	0.8%
N	N	0.90	6.75	0.4%
N	LN	0.78	2.62	2.0%
N	LN	0.75	2.81	1.7%
N	LN	0.76	2.43	1.9%
N	2PW	0.90	5.40	0.6%
N	2PW	0.90	4.58	0.7%
N	2PW	0.92	5.45	0.3%
LN	N	0.91	4.69	0.8%
LN	N	0.93	5.85	0.6%
LN	N	0.91	4.91	0.3%
LN	LN	0.72	2.44	1.9%
LN	LN	0.76	3.28	1.8%
LN	LN	0.78	2.81	2.2%
LN	2PW	0.94	5.45	0.7%
LN	2PW	0.95	5.39	0.4%
LN	2PW	0.89	6.48	0.5%
2PW	N	0.76	5.13	1.0%
2PW	N	0.85	6.19	0.9%
2PW	N	0.82	5.50	1.2%
2PW	LN	0.78	2.72	2.6%
2PW	LN	0.71	2.49	2.8%
2PW	LN	0.77	2.61	2.2%
2PW	2PW	0.85	3.86	0.6%
2PW	2PW	0.85	5.60	0.6%
2PW	2PW	0.88	4.23	0.9%

注: N, LN, 2PW, E_h , F_t , k , 実験値強度分布: 表6.1を参照。実験値の分布形: 実験値高度分布を計算する際に用いる1plyの E_h と F_t の実験値を表す。

それぞれ k の範囲と全体のデータの中で $k < 1$ が出現した割合を求め表6.3に示した。同表より、何れの分布の組み合わせも $k < 1$ が出現した割合は低く、特に実験値の E_h と F_t がNとN、Nと2PW、LNとN、LNと2PW及2PWと2PWの5通りの組合せについては、何れも $k < 1$ の割合が1%未満と非常に低くなった。更に、この5通りの場合の k の最小値の範囲は0.85~0.95となり、文献38)に示す k の最小値0.95と比べて差が少ないと考えられた。一方、実験値の E_h と F_t がNとLN、LNとLN、2PWとN及び2PWとLNの場合の4通りの組合せについては、 k の最小値の範囲は0.71~0.85となり、文献38)の0.95から差が生じていた。以上より、上述の5通りの分布の組み合わせによる実験値 E - F 分布を比較に用いることとした。

一方、推定値 E - F 分布については、計算に用いる E_h と F_t による強度分布の推定値が3.5.1.3の(a)に示すとおり、 $3 \times 3 = 9$ 通りの分布の組み合わせとなった。したがって、5通りとなる実験値 E - F 分布と推定値 E - F 分布は $5 \times 9 = 45$ 通りの分布の組み合わせとなるが、6.5.1と同様に実験値 E 分布と推定値 E 分布の分布形が同一な15通りの組合せについて、実験値 F 分布と推定値 F 分布との比較を行った。そのなかで、実験値の E_h と F_t がNと

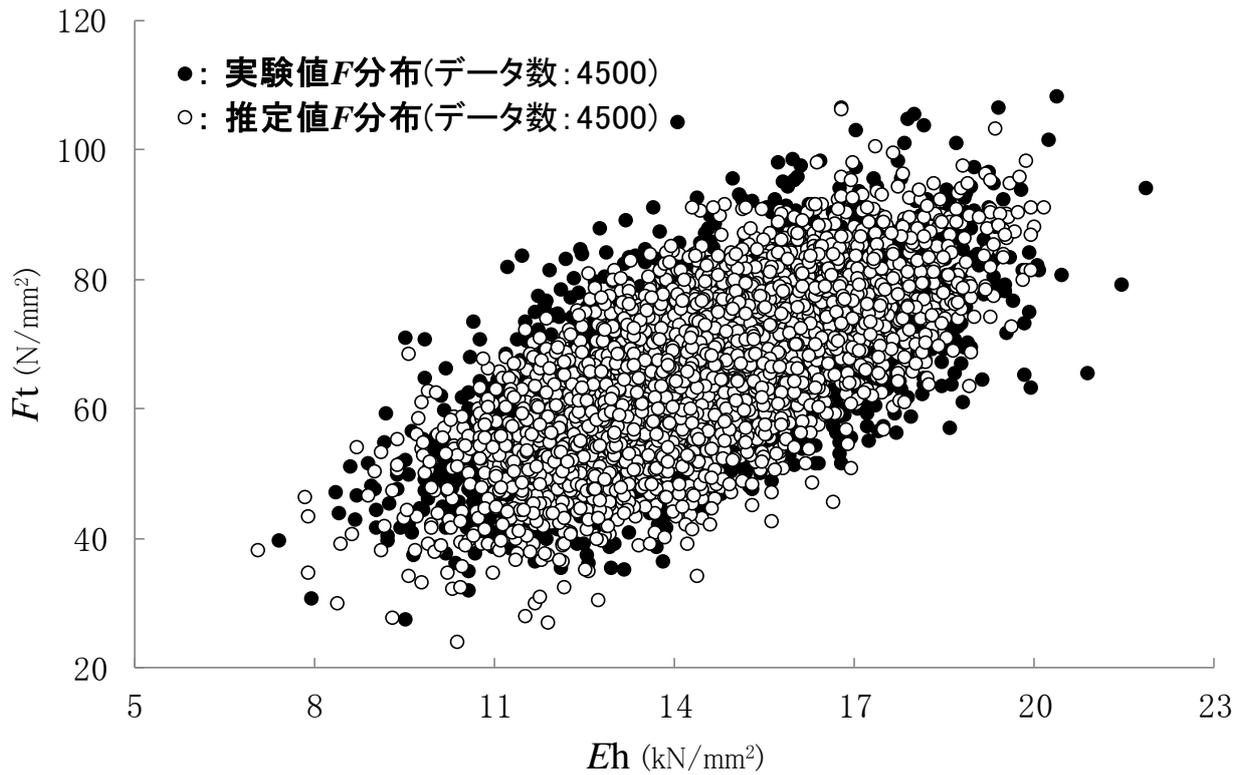


図6.7 F_t における実験値 F 分布と推定値 F 分布の比較1

—LVLの平使い方向の曲げ試験(最外縁応力破壊)—

注: E_h, F_t , 実験値 F 分布, 推定値 F 分布: 表6.1を参照。

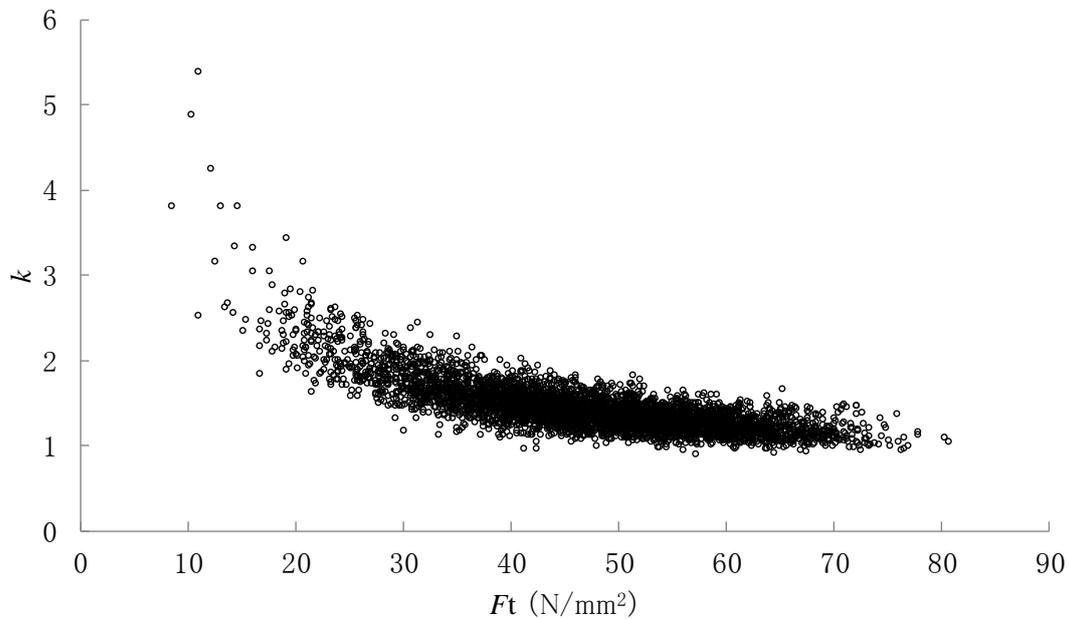


図6.8 実験値の F_t と k との関係1

—LVLの平使い方向の曲げ試験(最外縁応力破壊)—

注: $F_t, k, : F_v$ を F_t に読み換えて図6.6を参照。

2PW、推定値の E_h と F_t が N と N の場合の組み合わせについて、**実験値 $E-F$ 分布**と**推定値 $E-F$ 分布**を同一の散布図にプロットし、**図 6.8**として示した。

同図を見ると、**実験値 F 分布**と**推定値 F 分布**はお互い重なり合いほぼ一致していることが分かる。更に、上記を含めた 15 通りの分布の組み合わせで**実験値 F 分布**と**推定値 F 分布**を比較、**実験値 F 分布**と**推定値 F 分布**がほぼ一致していた組み合わせは、次の 3 通りとなる。

1. 実験値の E_h と F_t が N と N、推定値の E_h と F_t が N と N の場合
2. 実験値の E_h と F_t が N と 2PW、推定値の E_h と F_t が N と N の場合
3. 実験値の E_h と F_t が N と 2PW、推定値の E_h と F_t が N と LN の場合

また、6.5.1と同様に、**推定値 F 分布**を構成する F_t と k の関係を散布図に表し、**図 6.9**として示した。同図より、 F_t と k との関係は**図 6.6**と同様であるが、 F_t が大きくなると 1 未満の k が出現していることが分かる。しかし、 $k < 1$ となるデータ数はわずかであり、その範囲も非常に狭いことが分かる。

上述したとおり、NLMによる推定値の E_h と F_t が N と N、N と LN の場合は、**実験値 F 分布**と**推定値 F 分布**がほぼ一致した。したがって、LVLの平使い方向の曲げの破壊クライテリアを最外縁応力破壊と仮定した場合、 F_t 分布の推定に対し NLM は有効であると考えられる。また、6.5.1と同様に、 E_h と F_t の相関係数の推定に対しても、NLM は有効であると考えられる。

(b) 破壊クライテリアを最外層応力破壊と仮定する場合

実験値 $E-F$ 分布の計算には 6.5.2 の (a) と同じ E_h と F_t の実験値を用いるので、 $3 \times 3 = 9$ 通りの分布の組み合わせで 6.5.1と同様に k と**実験値 $E-F$ 分布**を求めた。それぞれの組合せ毎に k の範囲を見ると、何れも k の最小値が 1 を下回っていた。そこで、9 通りとなる分布の組み合わせ毎に、6.5.2と同様に $k < 1$ が出現した割合と k を求めて**表 6.4**に示した。

同表より、何れの分布の組み合わせでも $k < 1$ が出現した割合は、最外縁応力破壊の場合より高く 2.3%~6.7%となった。そのなかで、実験値の E_h と F_t が N と N、N と 2PW、LN と N 及び 2PW と 2PW の場合の 4 通りの組合せについては、 $k < 1$ の割合は 3%程度と比較的低い水準に留まった。この 4 通り場合の k の最小値の範囲は 0.81~0.87 となり、文献 38) の最小値 0.95 と比べて少し差が生じているが、最外縁応力破壊での k の最小値の範囲 0.85~0.95 と比べると、極端な差はないものと考えられる。次に、実験値の E_h と F_t が LN と 2PW の場合は、 $k < 1$ の割合は少し高くなり 4%を超えるものも生じたが、 k の最小値の範囲は 0.84~0.87 となり、上述の最外縁応力破壊の範囲に対し差は少なかった。最後に、実験値の E_h と F_t が N と LN、LN と LN、2PW と N 及び 2PW と LN の 4 通りの組合せについては、 $k < 1$ となる割合が 6%を超え、 k の最小値の範囲も 0.59~0.78 と明らかに低い値を示した。以上より、比較に用いる**実験値 $E-F$ 分布**の分布の組み合わせは 6.5.2 の (a) と同様に、実験値の E_h と F_t が N と N、N と 2PW、LN と N、LN と 2PW 及び 2PW と 2PW の場合の 5 通りとした。

一方、**推定値 $E-F$ 分布**も計算に用いる E_h と F_t の推定値は、3.5.1.3 の (b) に示すとおり $3 \times 3 = 9$ 通りの分布の組み合わせとなった。したがって、 $5 \times 9 = 45$ 通りとなる**実験値 $E-F$**

表6.4 実験値強度分布における k の範囲及び1未満の値の割合2
 —最外層応力破壊の場合—

実験値の分布形		k の範囲		$k < 1$ の割合
F_h	F_t	最小値	最大値	
N	N	0.90	4.85	0.5%
N	N	0.88	4.84	0.8%
N	N	0.90	6.75	0.4%
N	LN	0.78	2.62	2.0%
N	LN	0.75	2.81	1.7%
N	LN	0.76	2.43	1.9%
N	2PW	0.90	5.40	0.6%
N	2PW	0.90	4.58	0.7%
N	2PW	0.92	5.45	0.3%
LN	N	0.91	4.69	0.8%
LN	N	0.93	5.85	0.6%
LN	N	0.91	4.91	0.3%
LN	LN	0.72	2.44	1.9%
LN	LN	0.76	3.28	1.8%
LN	LN	0.78	2.81	2.2%
LN	2PW	0.94	5.45	0.7%
LN	2PW	0.95	5.39	0.4%
LN	2PW	0.89	6.48	0.5%
2PW	N	0.76	5.13	1.0%
2PW	N	0.85	6.19	0.9%
2PW	N	0.82	5.50	1.2%
2PW	LN	0.78	2.72	2.6%
2PW	LN	0.71	2.49	2.8%
2PW	LN	0.77	2.61	2.2%
2PW	2PW	0.85	3.86	0.6%
2PW	2PW	0.85	5.60	0.6%
2PW	2PW	0.88	4.23	0.9%

注: N, LN, 2PW, E_h , F_t , k , 実験値強度分布: 表6.1を参照。実験値の分布形: 表6.3を参照。

分布と推定値 E - F 分布の組み合わせのなかで、6.5.2の(a)と同様に実験値 E 分布と推定値 E 分布の分布形が同一な15通りの組合せについて、実験値 F 分布と推定値 F 分布との比較を行った。そのなかで、実験値の E_h と F_t が N と N、推定値の E_h と F_t が N と N の場合の組み合わせについて、実験値 E - F 分布と推定値 E - F 分布を同一の散布図にプロットし、図6.9として示した。

同図を見ると、実験値 F 分布と推定値 F 分布はお互い重なり合いほぼ一致していることが分かる。更に、上記を含めた15通りの分布の組み合わせで実験値 F 分布と推定値 F 分布を比較した結果、実験値 F 分布と推定値 F 分布がほぼ一致していた組み合わせは、次の7通りとなる。

1. 実験値の E_h と F_t が N と N、推定値の E_h と F_t が N と N の場合
2. 実験値の E_h と F_t が N と N、推定値の E_h と F_t が N と LN の場合
3. 実験値の E_h と F_t が N と 2PW、推定値の E_h と F_t が N と N の場合
4. 実験値の E_h と F_t が N と 2PW、推定値の E_h と F_t が N と LN の場合
5. 実験値の E_h と F_t が LN と N、推定値の E_h と F_t が LN と LN の場合

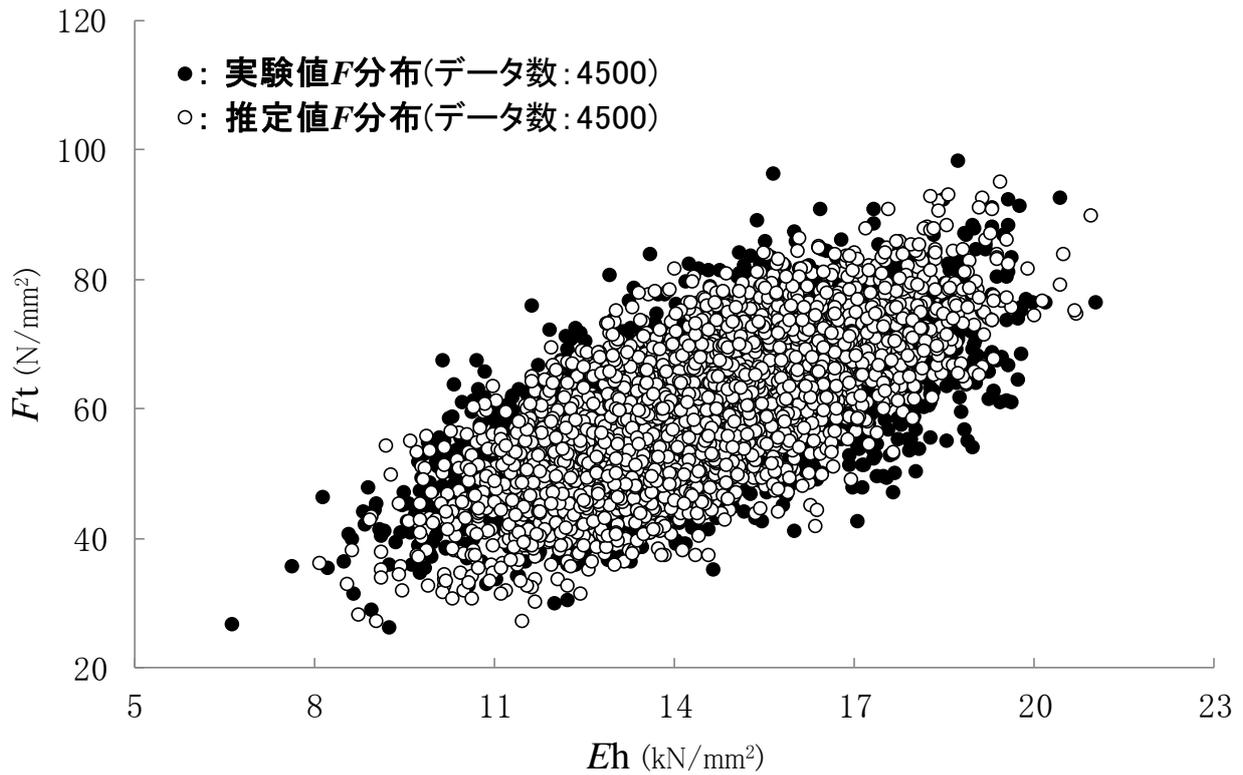


図6.9 F_t における実験値 F 分布と推定値 F 分布の比較2

—LVLの平使い方向の曲げ試験(最外層応力破壊)—

注: E_h, F_t , 実験値 F 分布, 推定値 F 分布: 表6.1を参照。

6.

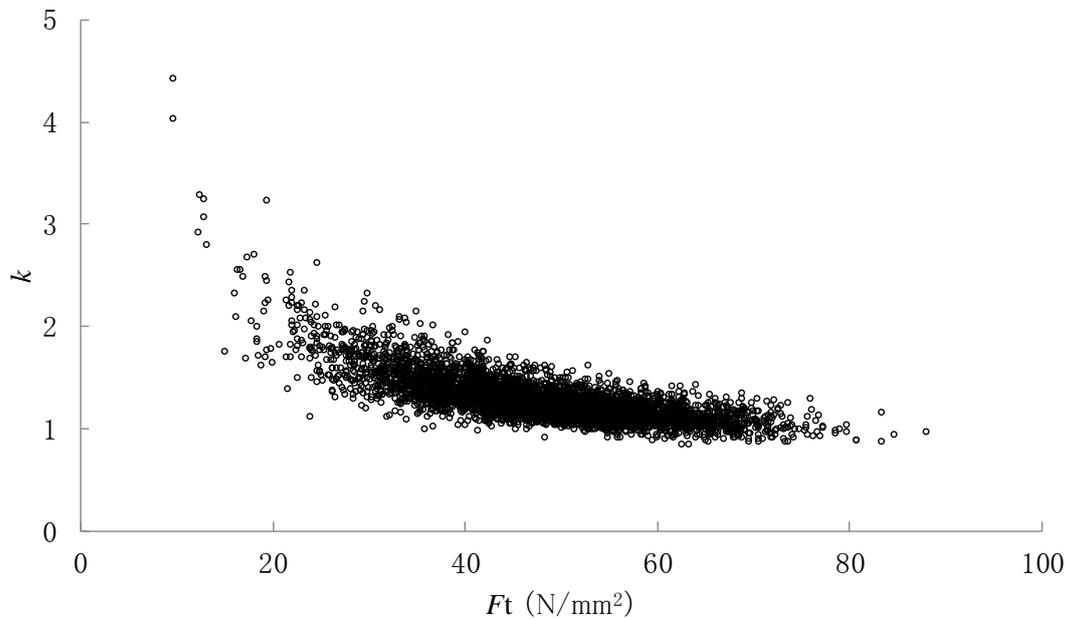


図6.10 実験値の F_t と k との関係2

—LVLの平使い方向の曲げ試験(最外層応力破壊)—

注: F_t, k : F_v を F_t に読み換えて図6.6を参照。

7. 実験値の E_h と F_t が LN と 2PW、推定値の E_h と F_t が LN と N の場合
8. 実験値の E_h と F_t が LN と 2PW、推定値の E_h と F_t が LN と LN の場合

以上の組み合わせにおける k の最小値の範囲は 0.83~0.87 となり、結果的に最外縁応力破壊の k の最小値の範囲と差が少なかったことを記す。

また、これまでと同様に、 F_t と k の関係を散布図に表し、**図 6.10** として示した。同図より、 F_t と k との関係は**図 6.6** と同様であるが、 $k < 1$ となるデータ数の範囲が、**図 6.8** よりも大きいことが分かる。しかし、 F_t と k の分布全体と比べると、その範囲は狭く、また $k=1$ の近傍に沿っていることが分かる。

上述したとおり、NLM による推定値の E_h と F_t が N と N、N と LN、LN と N 及び LN と LN の場合は、**実験値 F 分布**と**推定値 F 分布**がほぼ一致した。したがって、LVL の平使い方向の曲げの破壊クライテリアを最外層応力破壊と仮定した場合、 F_t 分布の推定に対し NLM は有効であると考えられる。また、6.5.2 の (a) と同様に、 E_h と F_t の相関係数の推定に対しても、NLM は有効であると考えられる。

6.5.3 引張強度

実験値 $E-F$ 分布の計算に用いる E_h と F_t の実験値の分布は、5.3 に示すとおり何れも N、LN、2PW の 3 通りとなった。したがって、 $3 \times 3 = 9$ 通りの分布の組み合わせ毎に、6.2 の (d) のアルゴリズムを適用し k と**実験値 $E-F$ 分布**を求めた。ただし、アルゴリズムの④において最尤法^{53,54)}を適用する際、5.4.1 に示すとおり TE と TS の実験値が必要となる。そのうち、TE について 2.1 で述べたとおり、LVL 試験体による実験をおこなっていない。そこで、2.5 による MOR_h への換算値を用いて最尤法^{53,54)}の計算を行った。

それぞれの分布の組合せ毎に、以上で求められた k の値を見ると、実験値の E_h と F_t が N と N、N と 2PW、LN と N、LN と 2PW、2PW と N 及び 2PW と 2PW の場合の 6 通りでは 17 を超えるものが出現した。この理由は強度の分布に従う有相関非正規乱数を発生させる際、実験値の F_t 分布を N または 2PW を仮定すると、0 に近い強度が出現することによる。これに対し、実験値の F_t が F_t が N と LN、LN と L 及び 2PW と LN の場合の 3 通りの組み合わせでは、以上のような積層効果係数の出現は起こらず、 k の値の範囲は 1.00~2.97 となった。6.5.1 で示した文献 38) の k の範囲 0.95~2.51、文献 56) の範囲 1.84~2.04 と比べても大きな差はないことから、以上の 3 通りの分布の目合わせによる**実験値 $E-F$ 分布**を比較に用いることとした。

一方、**推定値 $E-F$ 分布**も計算に用いる E_h と F_t の推定値は、3.4.3 の (b) に示すとおり $3 \times 3 = 9$ 通りの分布の組み合わせとなった。したがって、 $3 \times 9 = 27$ 通りとなる**実験値 $E-F$ 分布**と**推定値 $E-F$ 分布**の分布の組み合わせのなかで、6.5.1 と同様に**実験値 E 分布**と**推定値 E 分布**の分布形が同一な 9 通りの組合せについて、**実験値 F 分布**と**推定値 F 分布**との比較を行った。そのなかで、実験値の E_h と F_t が LN と LN、推定値の E_h と F_t が LN と LN の場合の組み合わせについて、**実験値 $E-F$ 分布**と**推定値 $E-F$ 分布**を同一の散布図にプロットし、**図 6.9** として示した。同図を見ると、 F_t の値が低い周辺では多少ずれが生じているが、**実験値 F 分布**と**推定値 F 分布**はお互い重なり合い概ね一致していることが分かる。ただし、

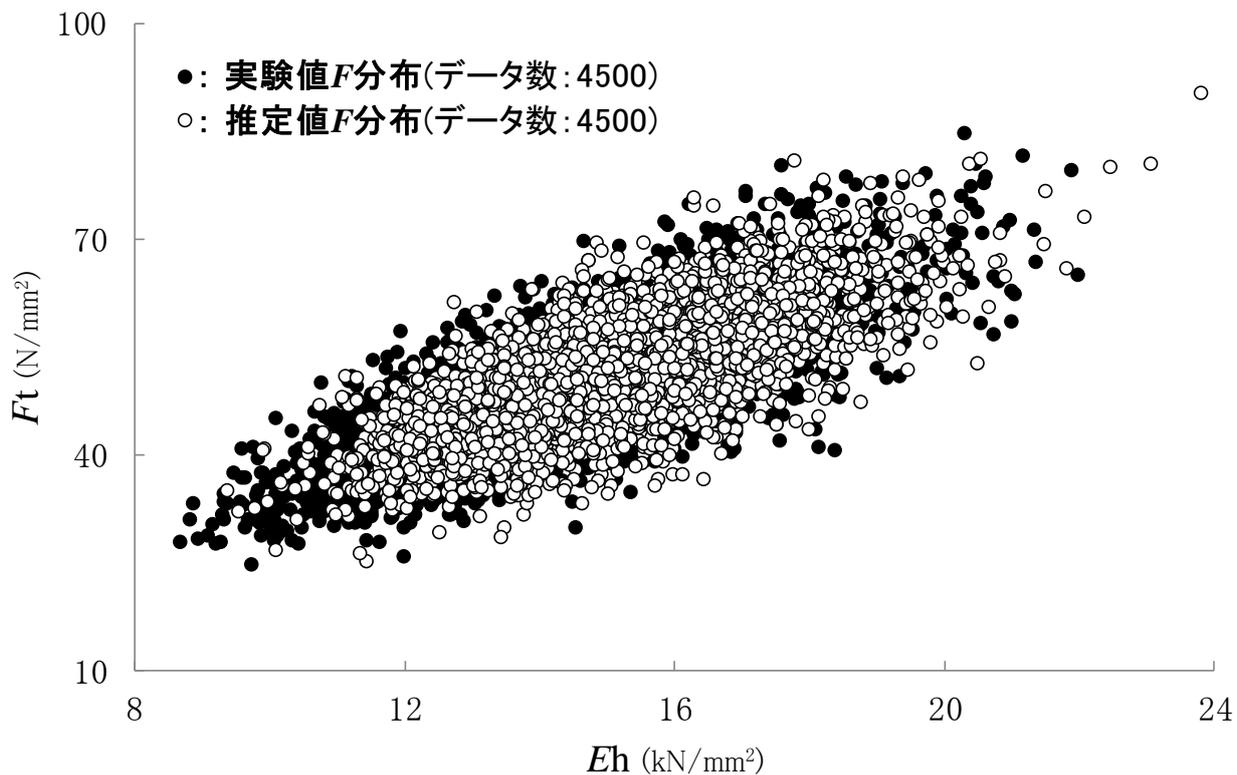


図6.11 F_t における実験値 F 分布と推定値 F 分布の比較3

—LVLの引張試験—

注: E_h, F_t , 実験値 F 分布, 推定値 F 分布: 表6.1を参照。

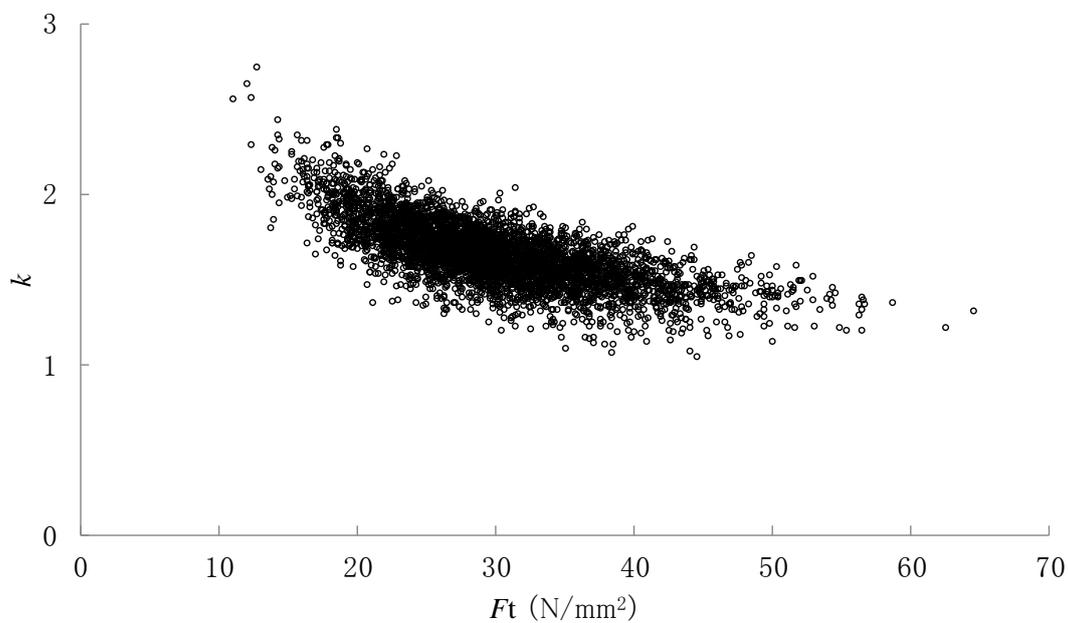


図6.12 実験値の F_t と k との関係3

—LVLの引張試験—

注: F_v, k : F_v を F_t と読み換えて図6.6を参照。

9通りの分布の組み合わせのなかで、**実験値 F 分布**と**推定値 F 分布**がほぼ一致したのは、この1通りのみであった。

また、これまでと同様に、 F_t と k の関係を散布図に表し、**図 6.12** として示した。同図より、 F_t と k との関係はこれまでと同様に、 F_t が大きくなるのに従い k が小さくなること分かる。

上述の通り、NLMによる推定値の E_h と F_t が LN と LN の場合は、**実験値 F 分布**と**推定値 F 分布**がほぼ一致した。このことから、 F_t 分布の推定に対し NLM は有効であると考えられ、 E_t と F_t の相関係数の推定に対しても同様と考えられる。

6.5.4 圧縮強度

実験値 $E-F$ 分布の計算に用いる E_h と F_c の実験値の分布は、5.3に示すとおり何れも N、LN、2PW の3通りとなった。したがって、 $3 \times 3 = 9$ 通りの分布の組み合わせ毎に、6.2の(d)のアルゴリズムを適用し k と **実験値 $E-F$ 分布** を求めた。ただし、6.5.3と同様に、アルゴリズムの④で用いる CE の実験値には、2.5による MOR_h への換算値を用いた。以上で求められた k の範囲は 1.10~2.52 となり、6.5.3の引張試験と同様の値を示した。圧縮強度における積層効果の報告は皆無であるが、文献 38)の k の範囲 0.95~2.51、文献 56)の範囲 1.84~2.04 と比べても妥当な範囲と考えられる。したがって、9通り全ての分布の組み合わせによる**実験値 $E-F$ 分布**を比較に用いることとした。

一方、**推定値 $E-F$ 分布**も計算に用いる E_h と F_t の推定値は、3.4.3の(c)に示すとおり $3 \times 2 = 6$ 通りの分布の組み合わせとなった。したがって、 $9 \times 6 = 54$ 通りとなる**実験値 $E-F$ 分布**と**推定値 $E-F$ 分布**の分布の組み合わせのなかで、6.5.1と同様に**実験値 E 分布**と**推定値 E 分布**の分布形が同一な 18通りの組合せについて、**実験値 F 分布**と**推定値 F 分布**との比較を行った。そのなかで、実験値の E_h と F_c が N と LN、推定値の E_h と F_c が N と LN の場合の組み合わせについて、**実験値 $E-F$ 分布**と**推定値 $E-F$ 分布**を同一の散布図にプロットし、**図 6.13** として示した。同図を見ると、両分布の上辺で多少ずれが生じているが、**実験値 F 分布**と**推定値 F 分布**はお互い重なり合い概ね一致していることが分かる。更に、上記を含めた 18通りの分布の組み合わせで**実験値 F 分布**と**推定値 F 分布**を比較した結果、**実験値 F 分布**と**推定値 F 分布**がほぼ一致していた組み合わせは、次の4通りとなる。

1. 実験値の E_h と F_t が N と N、推定値の E_h と F_t が N と N の場合
2. 実験値の E_h と F_t が N と N、推定値の E_h と F_t が N と LN の場合
3. 実験値の E_h と F_t が N と LN、推定値の E_h と F_t が N と N の場合
4. 実験値の E_h と F_t が N と LN、推定値の E_h と F_t が N と LN の場合

また、これまでと同様に、 F_c と k の関係を散布図に表し、**図 6.12** として示した。同図より、 F_c と k との関係はこれまでとは異なり、 F_c が大きくなっても k の大きさは変わらず、任意の F_c の値に対しほぼ一定のばらつきで分布していることが分かる。この理由については、圧縮の場合は靱性破壊であり、脆性破壊の場合と比べて欠点の強度に与える影響が少ないからと考えられる。

上述のとおり、NLMによる推定値の E_h と F_c が N と及び N と LN の場合は、**実験値 F**

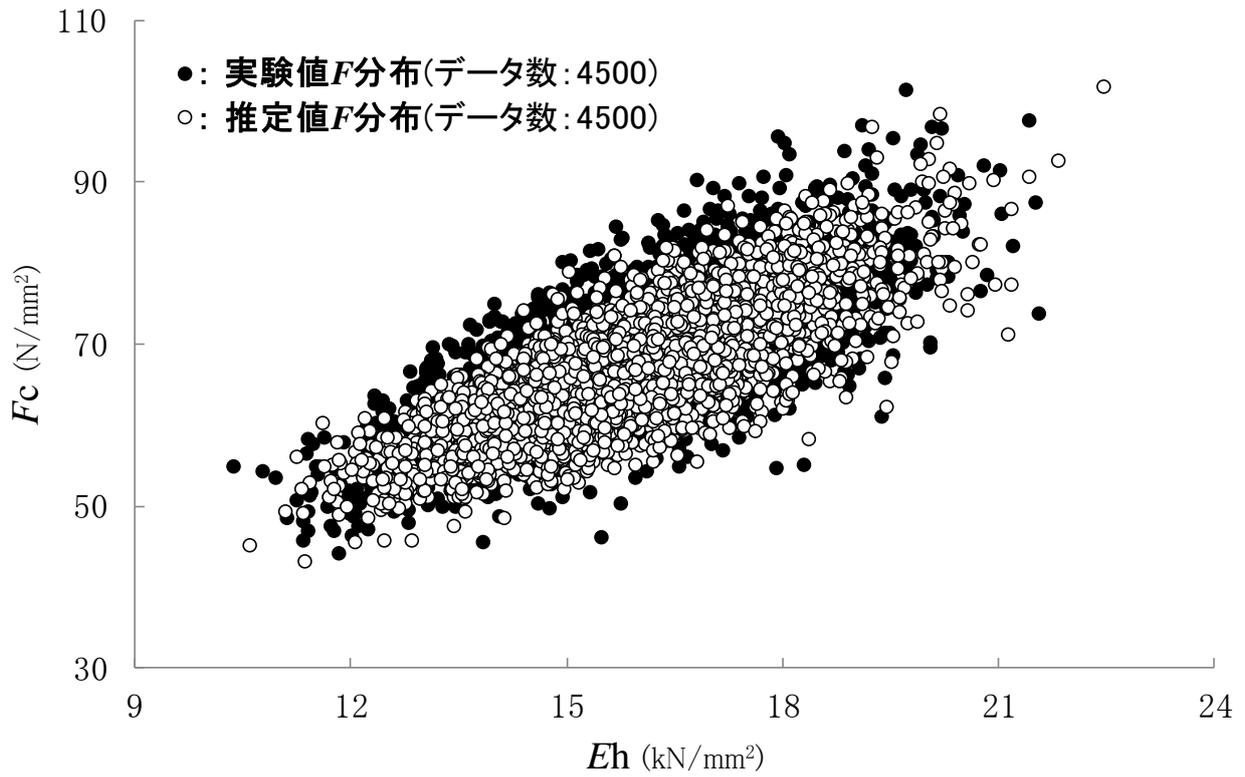


図6.13 F_c における実験値 F 分布と推定値 F 分布の比較

—LVLの圧縮試験—

注: E_h, F_c , 実験値 F 分布, 推定値 F 分布: 表6.1を参照。

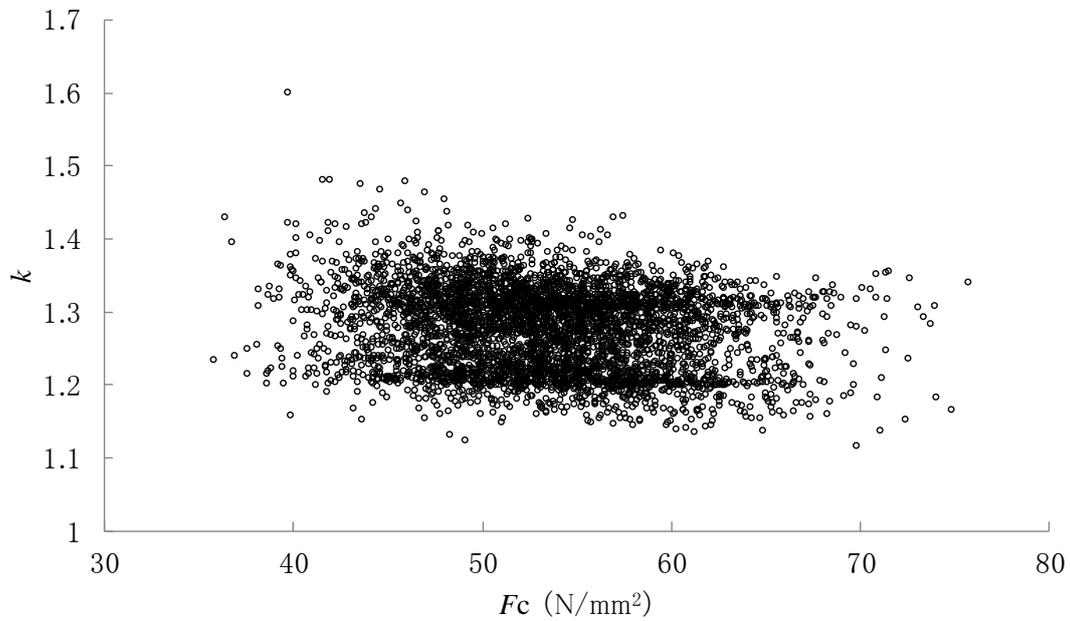


図6.14 実験値の F_c と k との関係

—LVLの圧縮試験—

注: F_c, k , : F_v を F_c に読み換えて図6.6を参照。

分布と推定値 F 分布がほぼ一致した。したがって、 F_c 分布の推定に対し NLM は有効であると考えられ、 E_c と F_c の相関係数の推定に対しても同様と考えられる。

6.6 まとめ

本章では、**第五章**の結果を踏まえ、最初に**第三章**の非線形最小二乗法によるエレメントの強度分布推定で用いた LVL の各強度に、積層効果の影響が存在するか確認を行った。その方法は**第五章**の 2ply または 3ply に対して用いた手法を踏襲し、1ply の実験値の強度分布を用いて LVL 強度の計算値の分布を求め、最尤法^{53,54)}により推定した LVL 強度の実験値の母集団分布と比較するというものであった。その結果、LVL の各強度の積層数においても、強度の母集団分布の方がシミュレーションによる計算値の分布よりも大きくなり、積層効果の影響が存在することが確認された。このことから、**第三章**の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には、積層効果の影響が存在すると考えられた。

以上より、非線形最小二乗法によるエレメントの強度分布推定手法の有効性を検討するには、積層効果の影響が存在する 1ply の実験値の強度分布を求め、非線形最小二乗法によるエレメントの強度分布と比較する必要がある。そこで、積層効果を定量的に表すために積層効果係数 k を導入し、 k を LVL 強度の実験値に対する計算値の比として定義した。ここで、LVL 強度の実験値は最尤法^{53,54)}により推定した母集団分布に従う値であり、LVL 強度の計算値は 1ply の実験値の強度分布を用いたシミュレーションによる仮想 LVL の強度の値である。ただし、LVL 強度の実験値と計算値は同一の LVL を対象とすることから、お互いを 1 対 1 で対応させるために、同一の Seed から変換^{35,49,50)}してそれぞれを表すこととした。

以上より、 k を求めるアルゴリズムは、次のとおり構築した。1ply の実験値の強度分布を用いたシミュレーションによる仮想 LVL の強度を計算値とし、この計算値の Seed を逆変換により求め、更に Seed を最尤法^{53,54)}による母集団分布に従うよう変換^{35,49,50)}して実験値を求める。以上の操作により LVL 強度の実験値と計算値はお互い 1 対 1 で対応することから、最後に実験値を計算値で除して k を求める。

ところが、以上のアルゴリズムは 1 体の仮想 LVL に対し 1 個の k しか求めることができず、積層効果の影響を受けた 1ply の実験値は、仮想 LVL の破壊した層の強度に k を乗じて表すしかなかった。したがって、積層効果の影響を受けた 1ply の実験値の強度分布は、LVL を構築する全ての層を対象とした分布ではなく、あくまでもそれぞれの LVL の破壊した層を対象とした部分集合による分布である。

一方、**第三章**の非線形最小二乗法によるエレメントの強度分布は、LVL のエレメント全体の分布となる。したがって、上述の積層効果の影響を受けた 1ply の実験値の強度分布と単純に比較することはできない。そこで、非線形最小二乗法によるエレメントの強度分布の推定値についても、これを用いたシミュレーションにより仮想 LVL を作り、破壊された層のヤング係数と強度をプールする操作を繰り返して強度分布を求めた。

以上より、非線形最小二乗法の有効性の検討は、LVL の破壊した層のみを対象に、積層効果の影響を受けた 1ply の実験値の強度分布と非線形最小二乗法により推定したエレメ

ントの強度分布を比較することにより行った。ただし、何れの分布も破壊クライテリアにより恣意的に選別された部分集合による分布であるので、統計的検定手法は用いずに、両方の強度分布を同一の散布図上にプロットし、お互いの強度の分布が一致しているかどうか確認することで有効性を検討した。その結果、縦使い方向の曲げ強度(F_v)、LVLの平使い方向の曲げ試験における引張強度(F_t)、LVLの引張試験における引張強度(F_t)及び圧縮強度(F_c)の何れについても、積層効果を含むエレメント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ることが認められた。以上より、**第三章**で提示した非線形最小二乗法は、LVLの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。

第七章 総括

本研究は集成材と同様に LVL の強度設計を行うことを目的に、非線形最小二乗法(NLM)により LVL のエレメントのヤング係数分布及び強度分布を推定し、更に、LVL のエレメントを接着層付きの単板と仮定し、NLM の推定手法としての有効性について検討を行った。まず、**第二章**では、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 大板から曲げ試験用と引張試験用の試験体を積層数毎に作成し、それぞれ強度試験を行い縦使い方向及び平使い方向の曲げヤング係数と曲げ強度の実験値、引張強度の実験値を収集した。更に、曲げ試験と引張試験の試験体の破壊されていない部分から圧縮試験用の試験体を作成し、それぞれ圧縮試験を行い圧縮強度の実験値を収集した。

第三章では、**第二章**の LVL の強度実験値を用いて NLM を適用することにより、エレメントの縦使い方向の曲げヤング係数及び曲げ強度、LVL の引張試験における引張強さ、圧縮強さの各分布を推定した。LVL の平使い方向の曲げ強度の破壊クライテリアとして最外縁応力破壊または最外層応力破壊を仮定し、LVL の平使い方向の曲げ試験における引張強度分布を推定した。また、LVL の平使い方向の曲げ強度のクライテリアとして複合応力一次形式及び複合応力二次形式による破壊を仮定し、エレメントの平使い方向の曲げ強度分布を推定した。以上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げばならなかった。

そこで、**第四章**では、**第二章**の強度実験で用いた LVL 試験体の残部から 1ply~3ply の試験体を切り取り、**第二章**と同様の強度実験を行い、1ply~3ply の縦使い方向の曲げ強度、平使い方向の曲げヤング係数と曲げ強度、引張強度及び圧縮強度の実験値を収集した。更に、エレメントと考えられる 1ply の実験値については、平使い方向の曲げヤング係数と強度毎に、**第三章**の NLM による推定値との比較を行った。その結果、平使い方向のヤング係数は実験値と推定値でほぼ等しくなったが、縦使い方向の曲げ強度、LVL の引張試験における引張強度、LVL の平使い方向の曲げ試験による引張強度及び圧縮強度は、実験値より推定値の方が大きくなった。また、平使い方向の曲げ強度は、推定値の方が実験値より若干大きくなった。このような結果となった理由については、LVL の各強度における積層効果の存在が考えられた。

第五章では、LVL の各強度に積層効果が存在する確認するために、2・3ply の強度分布を対象に、1ply のヤング係数分布及び強度分布のパラメータを用いてシミュレーションした強度分布(A)と、最尤法を用いて推定した母集団強度分布(B)をそれぞれ求め比較を行った。その結果、縦使い方向の曲げ強度、引張試験における引張強度、平使い方向の曲げ試験における引張強度、圧縮強度については、B が A より上に位置しており積層効果が含まれていることが確認された。一方、2・3ply の平使い方向の曲げ強度については、破壊クライテリアを複合応力一次形式による破壊と仮定する場合、曲げ強度に積層効果が含まれるかどうかは判断できない。したがって、8ply~17ply の縦使い方向の曲げ強度、引張試験における引張強度、平使い方向の曲げ試験における引張強度及び圧縮強度については、積層効果の存在が示唆された。

第五章の結果を踏まえ、第六章では、最初に 8ply~17ply の縦使い方向の曲げ強度、引張試験における引張強度、平使い方向の曲げ試験における引張強度及び圧縮強度を対象に、第五章と同様に A と B をそれぞれ求め比較を行った。その結果、何れの強度の何れの積層数も、B が A より上に位置しており積層効果の存在が確認された。したがって、NLM の有効性を検討するには、積層効果を含む 1ply の実験値の強度分布を求め、非線形最小二乗法によるエレメントの強度分布と比較しなければならなかった。そこで、積層効果を定量的に表すために積層効果係数 k を導入し、 k を LVL 強度の実験値に対する計算値の比として定義した。ここで、LVL 強度の実験値は B の要素であり、LVL 強度の計算値は A の要素である。ただし、お互いが 1 対 1 で対応することから、同一の乱数を用いて変換しそれぞれを表すこととした。ところが、LVL の破壊した層からしか k は算出できないことから、1 体の LVL から求められる k は 1 個のみであり、積層効果を含む 1ply の強度は LVL の破壊した層の強度に k を乗じて表すしかない。したがって、積層効果を含む 1ply の強度分布は、LVL の破壊した層からなる部分集合である。一方、NLM により推定したエレメントの強度分布は、LVL を構成するエレメント全体の分布となる。そこで、NLM により推定したエレメントの強度分布についても、LVL の破壊された層のみを対象とした強度分布を求めた。したがって、NLM の有効性については、LVL の破壊された層のみを対象に、積層効果を含む 1ply の強度分布と NLM により推定したエレメントの強度分布を同一の散布図上にプロットし、お互いの強度分布が一致しているかどうか検討を行なった。その結果、何れのエレメントの強度(縦使い方向の曲げ強度、LVL の引張試験における引張強度、LVL の平使い方向の曲げ試験における引張強度及び圧縮強度)とも、積層効果を含む 1ply の強度分布と NLM により推定したエレメントの強度分布が一致する分布の組合せがあることが確認された。したがって、非線形最小二乗法(NLM)は、LVL のエレメントの強度設計分布推定手法として有効であると考えられる。

以上より、NLM 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 NLM 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、断面の単板の構成を変更しながら LVL の強度分布の推定を繰り返すことにより、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 NLM 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。このような LVL の強度設計を行うことができれば、過剰品質を解消でき、第一章で指摘した余分なコストをユーザーに強いることも解消されることが期待できるものと考えられる。現在(2015 年 1 月)、全国 LVL 協会の技術部会において、本研究の成果を実用化すべく国内 3 メーカーと共同研究を実施中である。

参考文献

- 1) “単板積層材の日本農林規格”，農林水産省告示第 2773 号（2013）.
- 2) 一般社団法人 全国 LVL 協会ホームページより (<http://lvl.ne.jp/lvl/use.html>)（2014）.
- 3) “単板積層材の日本農林規格”，農林水産省告示第 106 号（1978）.
- 4) “構造用単板積層材の日本農林規格”，農林水産省告示第 1443 号（1988）.
- 5) “単板積層材の日本農林規格”，農林水産省告示第 701 号（2008）.
- 6) “特殊な許容応力度及び特殊な材料強度を定める件”，国土交通省告示第 1024 号（2001）.
- 7) “集成材の日本農林規格”，農林水産省告示第 1587 号（2013）.
- 8) 森田秀樹，松元明弘，荒武志朗，藤元嘉安，吉田利生，野辺寛成，柏崎健治：スギおよびヒノキを用いた異樹種構造用集成材の開発，*木材工業* 64(9), 411-415 (2009).
- 9) ”木質建材入門”，(株)日刊木材新聞社，東京，1987, pp. 235-238.
- 10) P. Koch : Super-Strength Beams Laminated from Rotary-Cut Southern Pine Veneer, *Forest Products Journal* 17(6), 42-48 (1966).
- 11) E. L. Schaffer, R. W. Jokerst, R. C. Moody, C. C. Perter, J. L. Tschernitz, J. J. Zahn : Feasibility of Production A High-Yield Laminated Structural Product: General Summary, *U. S. D. A. Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI., U. S. D. A. Forest Service Research Paper FPL 175*, (1972).
- 12) R. C. Moody : Tensile Strength of Lumber Laminated from 1/8-Inch-Thick, *U. S. D. A. Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI., U. S. D. A. Forest Service Research Paper FPL 181*, (1972).
- 13) W. Jokerst : Feasibility of Production A High-Yield Laminated Structural Product: Residual Heat of Drying Accelerated Adhesives Cure, *U. S. D. A. Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI., U. S. D. A. Forest Service Research Paper FPL 179*, (1972).
- 14) S. A. Nelson : Structural Application of MICRO=LAM Lumber, *Civ. Eng.* 42(7), 41, (1972).
- 15) T. M. Maloney : The Family of Wood Composite Materials, *Forest Products Journal* 46(2), 19-26 (1996).
- 16) R. H. Kunesh : MICRO=LAM: Structural Veneer Lumber, *Forest Products Journal* 28(7), 57, (1978).
- 17) J. A. Yougquist, T. L. Laufenberg, B. S. Bryant : End Joint of Laminated Veneer Lumber for Structural Use, *Forest Products Journal* 34(11/12), 25-32 (1984).
- 18) 有馬孝礼，大熊幹章：単板積層材の材質に関する研究(第 1 報) -2, 3 の機械的性質について-，*木材工業* 28, 254-256 (1973).
- 19) 大熊幹章：構造用単板積層材(LVL)について，*木材工業* 29, 373-377 (1974).
- 20) 森泉周，真田康弘，前田典昭，小倉高規：カラマツ LVL の強度性能(第 2 報) -曲げ強度性能-，*林産試験場月報* 388(5), (1984).
- 21) 小倉高規：カラマツ小径材による LVL の製造システムについて(I)，*木材工業* 36, 589-595 (1981).

- 22) 小倉高規：カラマツ小径材による LVL の製造システムについて(Ⅱ)(完), 木材工業 37, 9-15 (1982).
- 23) 森泉周：カラマツ LVL の強度性能に関する研究, 林産試験場研究報告 77, 1-70 (1987).
- 24) 李銓濟, 大熊幹章：国産針葉樹 LVL の曲げ性能, 木材工業 39, 221-226 (1984).
- 25) 大熊幹章：構造用 LVL の曲げ性能に及ぼす縦継ぎ方法の影響に関する一考察, 木材工業 44, 269-272 (1989).
- 26) 林知行, 鴛海四郎：構造用 LVL の曲げ強度分布, 木材学会誌 39, 985-992 (1993).
- 27) 岡崎泰男, 有馬孝禮, 中村昇：確率モデルによる接着積層材の強度予測 (第 1 報) 接着層重なり長さの影響, 木材学会誌 40, 341-346 (1994).
- 28) 林知行：構造用 LVL の確率的性質, 木材工業 51, 96-101 (1996).
- 29) 徳田迪夫：Ⅲ. エンジニアリングウッド各論 4. LVL, 木材工業 47, 552-556 (1992).
- 30) R.O.Foschi, J.D.Barrett : Glued-Laminated Beam Strength: A Model. *Journal of the Structural Division* 106(8), 1735-1754 (1980).
- 31) J. Ehlbeck, F. Colling and R. Gorklacher : Influence of Finger-Jointed Lamellae on The Bending Strength of Glulam beams: Development of a Computer Model. *Holz Roh-Werkst* 43(8), 333-337 (1985).
- 32) J. Ehlbeck, F. Colling and R. Gorklacher : Influence of Finger-Jointed Lamellae on The Bending Strength of Glulam beams: Input Data for Computer Model. *Holz Roh-Werkst* 43(9), 369-373 (1985).
- 33) J. Ehlbeck, F. Colling and R. Gorklacher : Influence of Finger-Jointed Lamellae on The Bending Strength of Glulam beams: Verification of The Computer Model by Bending Tests. *Holz Roh-Werkst* 43(9), 439-442 (1985).
- 34) A.G.Burk, D.A.Bender : Simulating Finger-joint Performance Based on Localized Constituent Lumber Properties, *Forest Products Journal* 39(3), 45-50 (1989).
- 35) S.E.Taylor, D.A.Bender : A Method for Simulating Multiple Correlated Lumber Properties, *Forest Products Journal* 39(7/8), 71-74 (1989).
- 36) S.E.Taylor, D.A.Bender : Stochastic Model for Localized Tensile Strength and Modulus Elasticity in Lumber, *Wood and Fiber Science* 23(4), 501-519 (1991).
- 37) R.Hernandez, D.A.Bender, B.A.Richburg, K.S.Kline : Probabilistic Modeling of Glued-Laminated Timber Beams. *Wood and Fiber Science* 24(3), 294-306 (1992).
- 38) R.H.Falk, F.Cooling : Laminating Effects in Glued-Laminated Timber Beams. *Journal of Structural Engineering* 121(12), 1857-1863 (1995).
- 39) 林知行：確率モデルによる集成加工材料の性能予測 (第 1 報) MOE の分布, 木材学会誌 35, 1048-1057 (1989).
- 40) 林知行：確率モデルによる集成加工材料の性能予測 (第 4 報) 視覚等級区分されたラミナを用いて製造された 5 プライ集成材の曲げ強度予測確率モデル, 木材学会誌 36, 812-818 (1990).
- 41) 林知行, 宮武敦：確率モデルによる集成加工材料の性能予測 (第 5 報) 5 プライ集成材

- の引張強度予測確率モデル, 木材学会誌 37, 904-911 (1991).
- 42) 平嶋義彦, 山本幸雄, 鈴木滋彦: 集成材の強度計算および確率モデル, 木材学会誌 40, 1172-1179 (1994).
 - 43) 三橋博三, 板垣直行, 伊藤彦紀, 鈴木登: スギ集成材の力学的性能設計のための解析モデル (第 5 報) 積層による補強効果及び塑性領域を考慮した集成材の曲げ破壊予測モデル, 木材学会誌 42, 122-129 (1996).
 - 44) 小松幸平: 任意断面構成校正集成材の最大モーメントの推定と実験結果による検証, 木材学会誌 43, 934-936 (1997).
 - 45) 森拓郎, 五十嵐博, 笹川明: 破壊過程を再現した集成材の曲げ強度推定モデルの提案と実験による検証, 本建築学会構造系論文集 (541), 51-57 (2001).
 - 46) J. J. Lee, J. S. Park, K. M. Kim, J. K. Oh: Prediction of Bending Properties for Structural Glulam Using Optimized Distributions of Knot Characteristics and Laminar MOE, *Journal of Wood Science* 51, 640-647 (2005).
 - 47) 土方和巳, 井戸田秀樹, 小野徹郎: 節の位置, 大きさを考慮した集成材梁の曲げ耐力評価, 日本建築学会構造系論文集 (653), 1309-1315 (2010).
 - 48) ”住宅資材性能規定化対策事業地域材性能評価事業・報告書<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.
 - 49) 林知行: 確率モデルによる集成加工材料の性能予測 (第 2 報) ラミナ MOR の疑似乱数発生法, 木材学会誌 35, 1144-1153 (1989).
 - 50) 中村昇: 木質構造のここが分からない: 第 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—, *Journal of Timber Engineering* 19(2), 53-58 (2006).
 - 51) 金谷健一: ”これなら分かる最適化数学 基礎原理から計算手法まで”, 共立出版, 東京, 2005, pp110-111, pp.130-134.
 - 52) ”木材工業ハンドブック改訂 4 版”, 森林総合研究所監修, 丸善, 東京, 2004, p.199.
 - 53) 星通, 森稔: ミズナラの縦接ぎ接着有効率, 農林省林業試験場研究報告 153, 73-93 (1963).
 - 54) 景山三平(監修), 宿久洋, 村上享, 原恭彦: ”確率と統計の基礎 II”, ミネルヴァ書房, 京都, 2009, pp36-42.
 - 55) 中村昇, 堀江和美, 飯島泰男: 非正規確率変数の同時確率密度関数を用いた基準強度の算定, 日本建築学会構造系論文集 (615), 169-172 (2007).
 - 56) 林知行, 宮武敦: バットジョイントを有する集成材および単板積層材の引張強度特性, 材料 52, 341-346 (2003).

謝 辞

まず、本研究の機会を与えて頂きました公益財団法人日本合板検査会元理事長の玉田恭三氏に、多大な感謝を申し上げます。更に、研究と仕事の両立に関し、格別のご配慮いただきました公益財団法人日本合板検査会の河野元信理事長、中野敏夫専務並びに高田光明常務に、心から感謝の意を表します。また、仕事のサポートのみならず、精神的な面で支えて頂きました公益財団法人日本合板検査会元調査研究部長の田村彰氏には、一方ならぬご苦勞をおかけしましたことをお詫び申し上げますと共に、謹んで感謝の意を申し上げます。