

抵抗機構と破壊過程を再現した集成材
曲げ強度の推定法とその検証

2001年3月

森 拓 郎

抵抗機構と破壊過程を再現した集成材
曲げ強度の推定法とその検証

2001 年 3 月

森 拓 郎

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 既往の研究	3
1.3 用語の説明	5
1.4 本論文の構成	8
第2章 集成材構成ラミナの強度特性	11
2.1 本章の目的	11
2.2 ラミナの各種実験概要	12
2.2.1 試験体概要	12
2.2.2 実験方法	14
2.3 ラミナの強度特性について	16
2.3.1 実験結果	16
2.3.2 ラミナの形状による比較	26
2.3.3 強度と破壊性状の関係	32
2.4 本章のまとめ	40
第3章 集成材が曲げ破壊に至る過程の分析	41
3.1 本章の目的	41
3.2 実大曲げ実験	42
3.2.1 試験体概要	42
3.2.2 実験方法	46
3.3 集成材の曲げ強度特性について	48
3.3.1 縁応力と変位の関係	48
3.3.2 破壊性状	51
3.3.3 ラミナ厚さおよび縦継ぎの有無	56
3.3.4 弾性係数	59
3.4 曲げ破壊に至る過程の分析	61
3.4.1 ひずみの分布	61
3.4.2 中立軸の移動	62
3.4.3 応力の再配分現象	65
3.4.4 単一ラミナとしての縦継ぎ部分の強度に関する検討	70
3.5 本章のまとめ	75

第4章 強度推定モデルの提案	77
4.1 本章の目的	77
4.2 破壊過程を再現するために取り入れる仮定	78
4.3 モデルの概要	81
4.3.1 モデルの概要	81
4.3.2 セルの破壊、作用応力、降伏点の評価方法	84
4.3.3 セル強度の与え方	85
4.3.4 割れの進展について	90
4.4 本章のまとめ	91
第5章 提案強度推定モデルの適合度	93
5.1 本章の目的	93
5.2 実験値と推定値の比較	94
5.2.1 本推定に必要な入力データについて	94
5.2.2 実験値と推定値の比較	98
5.3 本章のまとめ	103
第6章 結論	105
6.1 本論文のまとめ	105
6.2 今後の課題	107
参考文献	109
謝辞	

第 1 章

- 1.1 研究の背景と目的
- 1.2 既往の研究
- 1.3 用語の説明
- 1.4 本論文の構成

1.1 研究の背景と目的

1987年の建築基準法の改正以来、我が国の木質構造建築の発展は目覚ましいものがある。特に、大空間建築における木質材料の使用例は、年々増大している。このブームは、地方の自治体によって支えられており、長野オリンピックのエムウェーブ(スピードスケート会場)や大館樹海ドームなどに見られるような公共施設の大規模建築が多い。その木質材料の代表格は集成材である。集成材とは、挽き板(以下、構成材料としての挽き板をラミナと呼ぶ)の繊維方向を揃えて積層接着することにより製造されたものである。大規模木質構造の主要構造部材は大断面集成材を抜きには考えられず、加えて住宅の柱や梁のように小断面のものも多用されるようになってきた。また、1998年の建築基準法の性能規定化によって、強度特性に関する品質管理の徹底と品質表示が必要となる。そのため、木質材料である集成材において、一層のエンジニアードウッド化が進むであろうと考えられる。ここで「エンジニアードウッド」とは、強度性能が計算・評価・保証されていることであり、強度的に信頼性が高い木質材料を指す¹⁰¹⁾。

現在、住宅や商店などの大開口部に集成材の梁を用いる例などが増加しており、集成材の需要は旺盛である。これは、伸び悩む林業界において国産材の適当な利用方法のひとつであると考えられる。しかし、現実には輸入材で生産された集成材が市場の大半を占めている。この理由は、輸入材が国産材より安価であること、強度など規格がしっかりしていることが上げられる。今後、国産材を用いた集成材の使用例が増すためには、より高度なエンジニアード化が必要となる。現状では、ラミナに用いられる樹種や縦継ぎの形状の種類が多様であること、製作方法が規格化されていないこと、材価が高価なことなどから、多くの実験が行われたとは言い難く、性能についてのデータは乏しい状況にある。そのため、比較的容易で安価に実験できるラミナの強度を基に集成材の強度を推定する方法について、いくつか検討されている^{102)~109)}が、データ不足などもあり、なかなか実用化されていない。これらのことより、早急にラミナの実験データ及び集成材の実験データの蓄積が必要と考える。また、最も効率的であると考えられる推定法の確立が、林業の盛んな地域において急務となっている。

そこで、本研究では集成材の構成要素であるラミナの実験から集成材の曲げ実験までを体系的に行い、それらのデータを基に集成材の破壊過程を解明し、その過程を再現する推定モデルを提案することを最終の目的とする。加えて、推定値と実験値を比較し、推定法の検証も行う。

まず、ラミナの強度特性を明らかにすることが必要となる。それは集成材が、ラミナを積層接着することにより製造され、強度特性は構成材料であるラミナの構造特性に大きく影響されるからである。すなわち集成材の強度はラミナの強度特性や配置・構成方法によって決定されるからである。本論文では、大断面集成材の強度推定を目的としているため、外層ラミナに発生するとされる純粋な引張に近い応力を想定して、引張実験を行った。ま

た、曲げによる耐力低下が想定されるため、曲げ実験も加えて行った。これらの実験結果を基に、ラミナの強度特性を明らかにすることを目的とする。

次に、集成材の曲げ強度特性を明らかにする。そのため、様々にパラメータを変えた実大実験を行う。その結果、縦継ぎの有無やラミナ厚さの影響、弾性係数について検討する。また、その破壊過程を追跡することにより、集成材の強度発現機構について解明する。ここでいう強度発現機構とは、各ラミナへの応力分布、ラミナ破壊以後の応力再配分現象、積層状態にあるラミナの破壊強度である。加えて、積層接着することによってラミナ単体の場合とどのように異なるのかについても比較し、集成材の強度推定のために取り入れないとならない仮定について明らかにすることも目的とする。

これらの実験及び検討結果を基に、先に述べたように、抵抗機構と破壊過程を再現した集成材曲げ強度の推定法を提案する。この推定法では、樹種、応力状態、寸法に関わらず普遍的に成立する理論を用いることによって、樹種、応力状態、寸法毎に新たにモデルを構築する必要がないものとする。そのことを検証するために、樹種、応力状態、ラミナの構成、断面寸法などの異なる実験結果との比較を行い、その性能を明らかにする。

1.2 既往の研究

集成材の研究を行うに当たり、その変遷となる既往の研究について以下にまとめたものを示した。

許容応力度は、無欠点小試験体から得られる強度を統計的に処理し、節や繊維走行の傾斜、含水率などによる強度低下などを考慮して誘導されている¹¹⁰⁾。しかし、小試験体から誘導された許容応力度と実大材の結果は寸法効果などから必ずしも一致しないため、ラミナの実験が必要となった。このラミナの実験は、それぞれの地域で特産材について研究している例が多い。たとえば、信州ではカラマツ¹¹¹⁾、東北ではスギ¹¹²⁾のようである。このようにラミナの研究が進んでいくに従って、ヤング係数と強度の相関が高いことがより明確になってきた。そこで、ヤング係数測定の方法がいくつか提案されるようになった。とくに、よく用いられているものに連続送り式グレーディングマシン¹¹³⁾とFFTスペクトルアナライザを用いた打撃法によるヤング係数の測定^{114)、115)}が挙げられる。また、ラミナにおける大きな欠点となる節及び縦継ぎについての研究も同時に進んだ。節については、森¹¹⁶⁾や畑山¹¹⁷⁾による研究によって、ラミナの強度を推定する上で重要であること、また位置や大きさが大きな要因であることなどを明らかにした。これらの成果をふまえて、集成材の強度推定を目的としたラミナの引張強度推定が盛んに行われるようになった。井戸田ら^{118)、119)}は、有節材の強度を統計処理により、節の発生率及び位置を元に求める手法を示した。この方法により、節の長さ方向の発生が重要であることが示された。板垣ら^{120)、121)、122)}は、有限要素法を用いて引張破壊について考え、有限要素法の活用が有効であるとした。また、フィンガージョイントについての実験的研究は多くされている¹²³⁾。とくに、最近和田¹²⁴⁾によってスギラミナを用いたスカーフジョイントとフィンガージョイントの接合効率についての報告などがでている。また、橋爪¹²⁵⁾はフィンガージョイントの引張強度と曲げ強度は異なり、集成された状態では曲げ負荷を考慮した検討が必要であることを示した。

また、集成材の研究に関しては、飯塚五郎蔵によるもの¹²⁶⁾を始めとし、藤井^{127)、128)}によってストレスグレーディングシステムが提唱された。これによってラミナの強度等級区分の必要性が取り上げられるようになった。その基準因子としては、節径比、目切れ度、曲げヤング係数が有用であり、この等級区分したラミナを用いて任意配置させることによって、集成材の強度性能が上がるとした。その後、1980年代後半頃から研究が盛んになってきた。また、林^{129)、130)}は積層接着されることと縦継ぎで大きな節を除去することによって、集成材の強度信頼性が向上することを述べた。集成材の研究は、研究の背景で述べたように建築基準法の改正が大きく影響し、材料としての利用頻度が上がったことによって研究例が増えたと考えられる。そのため、1990年頃から集成材の強度推定が行われるようになってきた。加えて、農林水産省補助事業としてエンジニアリングウッド性能評価事業¹³¹⁾が始まり、より研究が盛んになってきた。

林が先駆けとなり、研究の背景で述べたように集成材の強度推定に関する研究もいくつ

が行われるようになった。林¹³²⁾は、等価断面法を用いて引張側2層の外縁部の応力より集成材全体の曲げ破壊係数を求め、最小値で破壊するとして曲げ破壊係数を計算するモデルを作成した。ラミナの強度には、曲げ強度と集中節径比とヤング係数の関係を用いた。小野ら¹³³⁾は、節位置のランダム性及び節強度のランダム性を用いて、母材破壊強度と節破壊強度を引張側外層2層について求め、ラミナの強度より弾性材として計算したモーメントの最小値で破壊するとしてモデルを提案した。ラミナの強度には、節の発生と強度の関係を用いた。平嶋ら¹³⁴⁾は、最終荷重時までひずみは弾性域内にあると仮定して、2次の複合応力式を用いて曲げ破壊係数を計算するモデルを作成した。ラミナの強度には引張実験におけるヤング係数と強度の回帰式を用いた。三橋ら¹³⁵⁾は、2次の複合応力式を用い、積層によるラミナの補強効果、圧縮応力による塑性化を加味した曲げ破壊係数を計算するモデルを作成した。ラミナの強度には引張、圧縮および曲げ実験におけるヤング係数と強度の回帰式を用いた。小松¹³⁶⁾は、最終荷重時までひずみは弾性域内にあると仮定して、1次の複合応力式を用いて各層ラミナの強度から曲げ破壊係数を計算するモデルを作成した。ラミナの引張および曲げ強度は実験値の平均値を用いた。しかし、これらすべてのモデルは、断面や応力状態が異なる場合には、それらに応じてモデルの変更が必要となることがわかった。

加えて、縦継ぎを持つ集成材の曲げ強度特性について研究したもので、その欠点により影響を受ける範囲について検討したものが丸山ら¹³⁷⁾によって示された。ここでは、最外層縦継ぎの接着が十分の場合、ラミナ厚の4倍までの影響があり、内側の層は外側の層との接着などによって、応力の負担をしてもらっていることを示した。

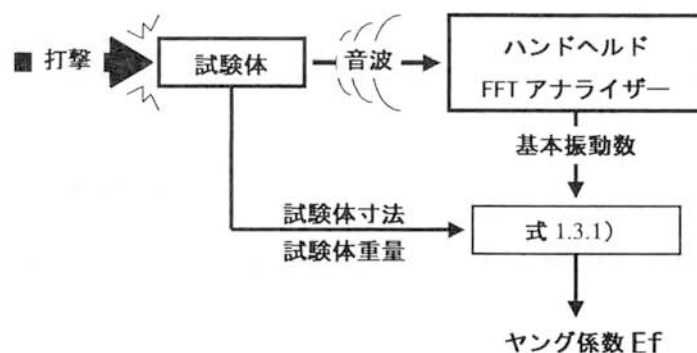
1.3 用語の説明

本論文で用いる用語を以下に説明する。

【打撃法によるヤング係数：Ef】¹³⁸⁾

本論文中では、Ef とは、打撃法によって求めたヤング係数を指す。打撃法とは、材に打撃等の衝撃的な荷重を加えたときに発生する共振現象や、微少な振動を利用してヤング係数を算定する方法である。打撃法の特徴としては、小荷重積載法等の静的測定法に比べ、荷重の負荷方法が簡単であり、大きな材や湾曲材、ねじれた材にも容易に適用できる点にある。

図 1.3.1 に、Ef の測定概要を示した。基本振動数の測定にはハンドヘルド FFT アナライザ CF-1200 (小野測器) を使用した。



$$Ef = \frac{4 \times l^2 \times f^2 \times \rho}{g} \quad 1.3.1)$$

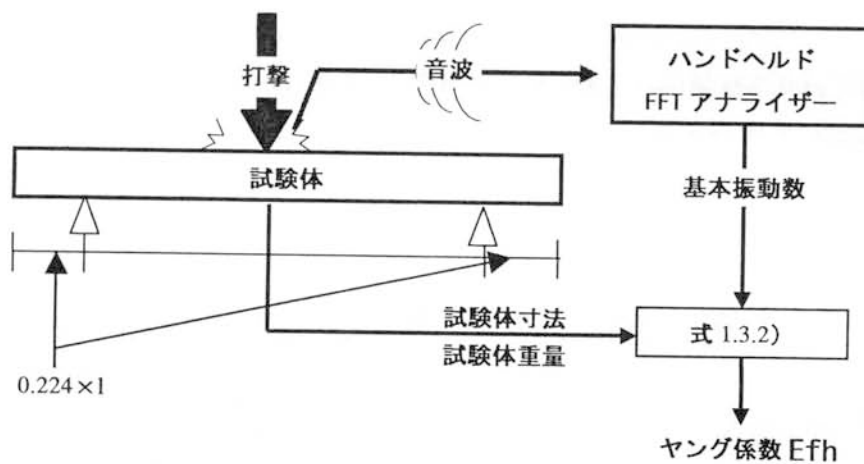
ただし

- Ef : ヤング係数(kgf/cm²)
- l : 材長(cm)
- ρ : 比重(kgf/cm³)
- f : 基本振動数(Hz)
- g : 重量加速度(980cm/sec.²)

図 1.3.1 Ef の測定概要

【たわみ振動によるヤング係数：Efh】¹³⁹⁾

材の中央部をたたいて、ハンドヘルド FFT アナライザーによってたわみ振動を計る。たわみ振動の測定は、図 1.3.2 に示すとおり、試験体の両端からの距離が試験体の全長の 0.224 倍となる 2 ヶ所で支持して両端自由端の状態で打撃することによって行う。また、たわみ振動法によるヤング係数は、両端自由支持条件における長方形断面棒の振動方程式 (1.3.2) から計算する。



$$Efh = \frac{4 \times \pi^2 \times l^4 \times \rho \times f^2}{m^4 \times i^2 \times g}$$

1.3.2)

ただし

Efh : ヤング係数(kgf/cm²)

l : 材長(cm)

ρ : 比重(kgf/cm³)

f : たわみ振動数(Hz)

g : 重量加速度(980cm/sec.²)

m^4 : =500.6

i^2 : = $h^2/12$

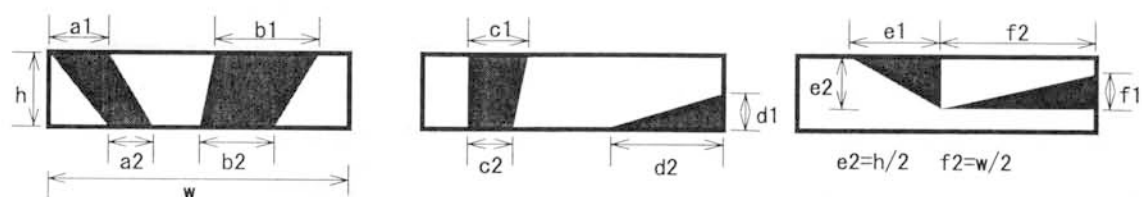
図 1.3.2 Efh の測定概要

【節径比】

【集中節径比】

節径比とは、材断面積に占める節及び孔の占める割合のことを指す。

集中節径比とは、150mm の長さの材面に存在する節及び穴に係る径比の合計をいう。最大集中節径比、または引張治具間集中節径比という場合、ラミナ引張試験における引張治具間に存在する集中節径比の最大値をいう。集中節径比の測定方法を図 1.3.3 に示した。



$$M_k = \frac{(a1 + a2) + (b1 + b2)}{2} \times h \quad M_k = \frac{(c1 + c2)}{2} \times h + \frac{d1 \times d2}{2} \quad M_k = \frac{e1 \times e2 + f1 \times f2}{2}$$

$$\text{集中節径比(\%)} = \frac{M_k}{M_l} \times 100$$

ただし

M_l : ラミナの断面積 , M_k : 節の断面積 , w : ラミナの幅 , h : ラミナの厚さ

$$e2 = \frac{1}{2} \times h \quad , \quad f2 = \frac{1}{2} \times w$$

図 1.3.3 集中節径比の測定方法

1.4 本論文の構成

本論文は、全 6 章によって構成されている。すべての章で「本章の目的」と題してその章の目的を示し、「まとめ」で目的のために行った実験または検討の結果得られた結論を述べている。以下に論文の構成と概要を示す。

まず、1 章では、集成材の利用されるようになった経緯とその材料としての特性について示した。また、集成材が利用用途を拡げるためにも強度特性を把握することが必要であること、集成材の特性を最大限生かすためにもラミナの配置による強度推定法の確立が望まれることについて述べた。

次に、2 章では、集成材の構成材であるラミナの強度特性について、ラミナの引張実験と曲げ実験の結果を基に検討した。ここで検討項目をして取り上げたものは、強度とヤング係数の関係、縦継ぎの有無による強度の違い、ラミナ厚さによる破壊及び強度の違い、破壊性状毎の強度の比較であり、それらについての結果を示した。

次に、3 章では、様々なパラメータの異なる集成材の実大曲げ実験の結果を報告した。その結果を用いて、集成材の曲げ強度特性として、縁応力と変位の関係、破壊性状、ラミナ厚さ及び縦継ぎの有無による強度の違い、弾性係数について検討した。また、破壊に至る過程の追跡として、ひずみの分布から見た中立軸の移動、応力の再配分現象、単一ラミナとしての縦継ぎ部分の強度に関して検討を行った。その結果、強度推定に取り入れるべき破壊過程を解明した。

次に、4 章では、強度推定モデルを提案するための検討として次のことを行った。集成材の実験及びラミナの実験の結果を比較して矛盾する点から、破壊過程を再現するために取り入れるべき仮定について示した。またモデルの概要として、モデルの考え方、破壊の評価方法、強度の与え方などについて示し、破壊過程を忠実に再現する強度推定モデルを提案した。

次に、5 章では、4 章で提案した強度推定モデルを用いて、3 章で行った試験体について強度を推定した。その結果と実験値を比較し、良く適合していることを示した。また、樹種や応力状態の異なる集成材の強度推定も行い、実験値との適合性を検証した。その結果、本推定法は、樹種や応力状態、断面構成などが異なる様々な集成材の強度推定が可能であることを示した。

最後に 6 章では、本論の総括として、本論文によって明らかにできたこと、また今後の研究課題とするべきことについて示した。

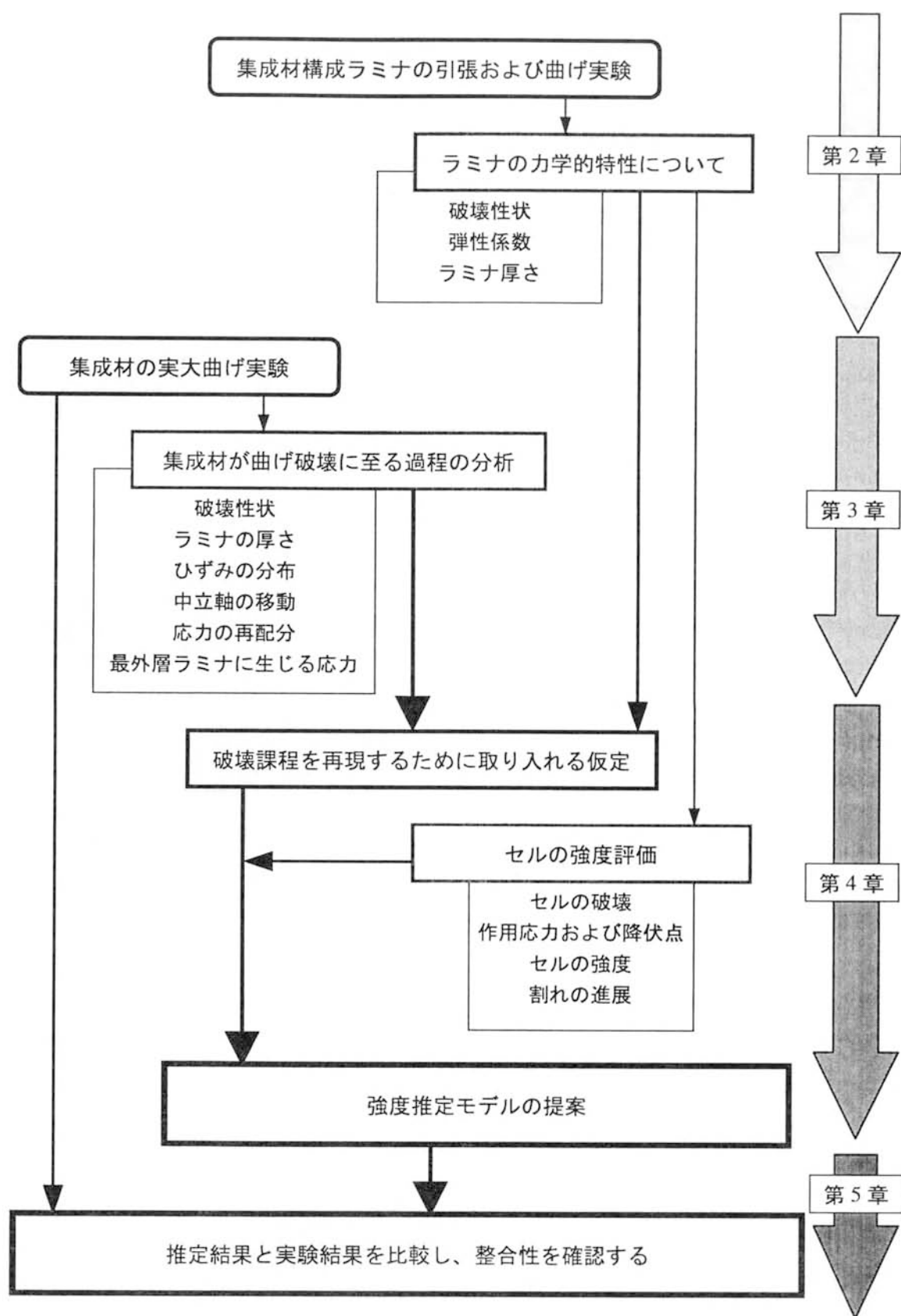


図 1.4.1 本論文の構成

第 2 章

- 2.1 本章の目的
- 2.2 ラミナの各種実験概要
- 2.3 ラミナの強度特性について
- 2.4 本章のまとめ

2.1 本章の目的

集成材は、ラミナを積層接着することにより製造され、その強度特性は構成材料であるラミナに大きく影響される。ゆえに集成材の強度はラミナの強度特性を元に再現できると考えられており、実際我が国でもラミナの強度特性から集成材の強度を推定するモデルが提案され、その適合性が論議されている。そのため、ラミナの強度特性をより詳しく把握することが集成材の強度推定における第一のステップであると考ええる。

そこで本章では、カラマツを対象に集成材用ラミナの引張および曲げ実験を行い、強度特性を明らかにすることを目的としている。また、強度推定に必要なパラメータを選考した。なお、パラメータの選考は他樹種への汎用性を持たすことを第一として、より得易い情報とした。

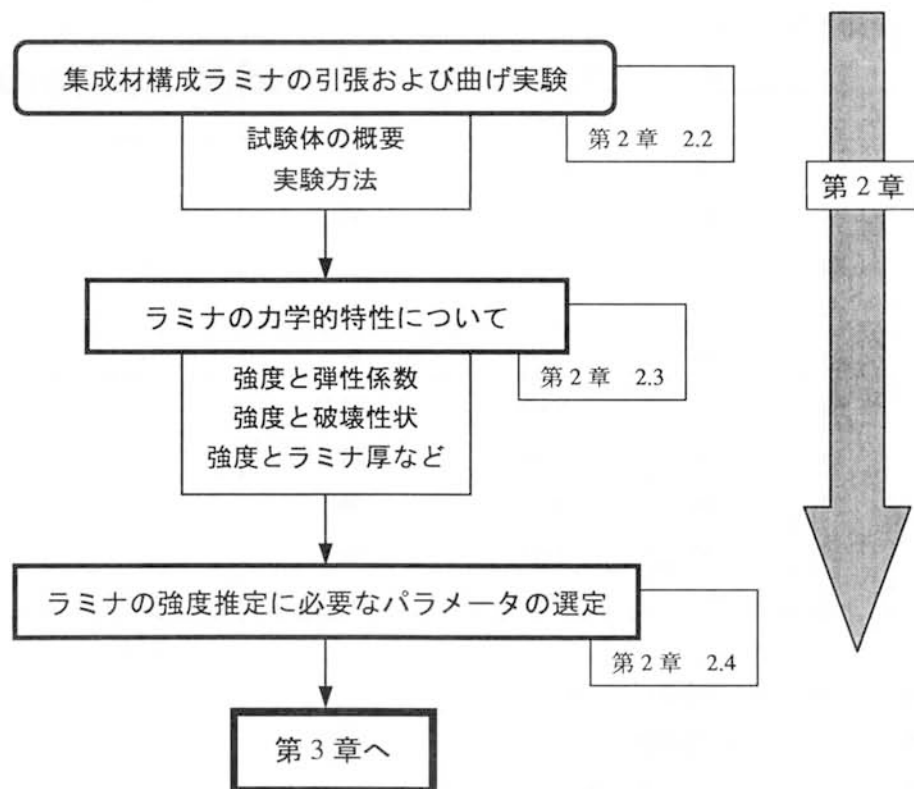


図 2.1.1 本章の流れ

2.2 ラミナの各種実験概要

2.2.1 試験体概要

I 引張実験

ラミナの引張強度特性を明らかにするために、ラミナの寸法、チャック間距離、縦継ぎの有無、ラミナ厚さなどを変えて実験を行った。それら試験体形状を表 2.2.1 に示す。また、非破壊における測定項目についても併せて同表に示す。縦継ぎ有り試験体については、縦継ぎは必ずチャック間の中央に来るように作成した。

表 2.2.1 引張実験用試験体概要

試験 No	厚さ	幅	チャック間距離	縦継ぎの有無	節径比の測定	試験体数
1 注 1)	25	150	1000	無し	○	200
2 注 1)	25	150	1000	有り	○	199
3	25	150	1000	有り	○	102
4	24	150	500	有り	×	87
5	18	150	500	有り	×	81
6	12	150	500	有り	×	80
7	24	75	1000	有り	○	28
8	24	75	1000	無し	○	31
9 注 2)	24	150	600	無し	○	85
10 注 3)	24	150	600	無し	○	99
11	24	150	1000	無し	○	206
合計						1198

注 1) 信州大学笹川研究室所有のデータ²⁰¹⁾

注 2) 節のないラミナの引張実験

注 3) 節が一つあるラミナの引張実験

以上の試験体数は、挟み込む治具内での破壊を除いたものである。それぞれの試験体についてヤング係数による等級区分別の試験体作成などは行っていない。

II 曲げ実験

ラミナの曲げ強度と引張強度の比較検討のために行った実験の試験体形状について、表 2.2.2 に示す。また、非破壊における測定項目についても併せて同表に示す。縦継ぎ有り試験体については、縦継ぎが必ずモーメント一定区間に来るように作成した。

どちらの試験体もヤング係数の大小による等級区分別の作成などは行っていない。

表 2.2.2 曲げ実験用試験体概要

試験 No	断面	加力点間距離	支点間距離	縦継ぎの有無	節径比の測定	試験体数
1	24×75	100	1100	無し	○	31
2	24×75	100	1100	有り	○	28

2.2.2 実験概要

I 引張実験

ラミナの引張強度特性を明らかにするため、様々なパラメータの異なる集成材用ラミナについて引張実験を 1198 体行った。実験概要を図 2.2.1 に示す。荷重はロードセルにより連続的に測定し、得られた最大荷重から引張強度を算出した。なお、試験機は引張強度試験機 NET-401E（齋藤木材工業所有、飯田工業製）、木材用引張試験機 NET-501（長野県林業総合センター所有、飯田工業製）を用いた。

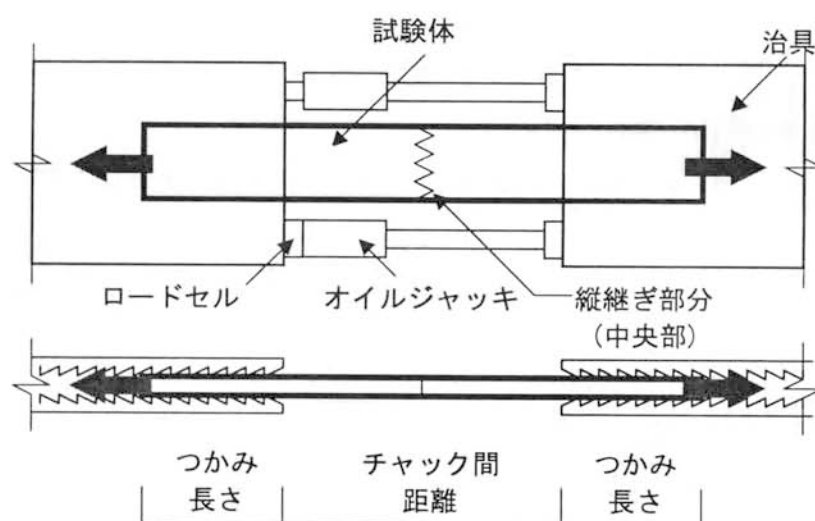


図 2.2.1 引張実験概要

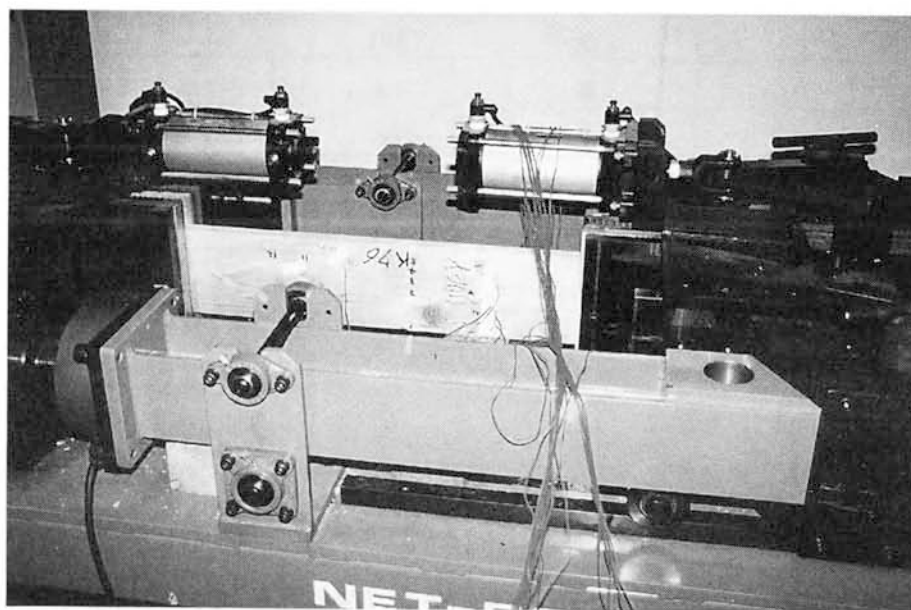


写真 2.2.1 引張実験

Ⅱ 曲げ実験

ラミナの曲げ強度と引張強度の関係を明らかにするために、59 体の曲げ実験を行った。実験概要を図 2.2.2 に示す。荷重はロードセルにより連続的に測定し、得られた最大荷重から破壊直前までを弾性と仮定して、曲げ強度を算出した。縦継ぎの有る場合は、縦継ぎが中央部になるように試験体を設置した。なお、試験機は万能試験機 TCM5000（長野県林業総合センター所有、ミネベア製）を用いた。

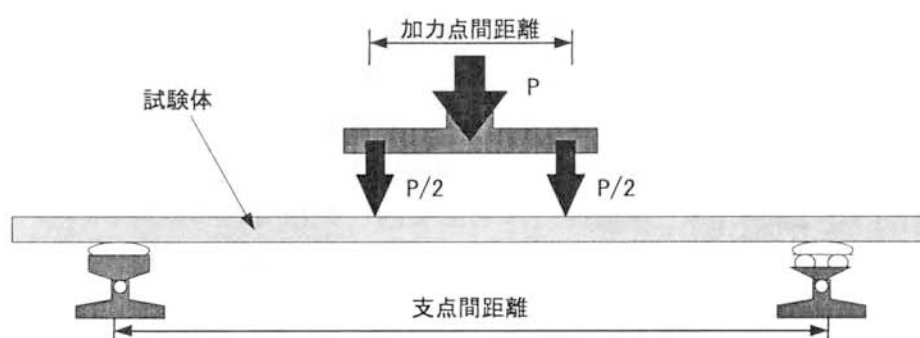


図 2.2.2 曲げ実験概要

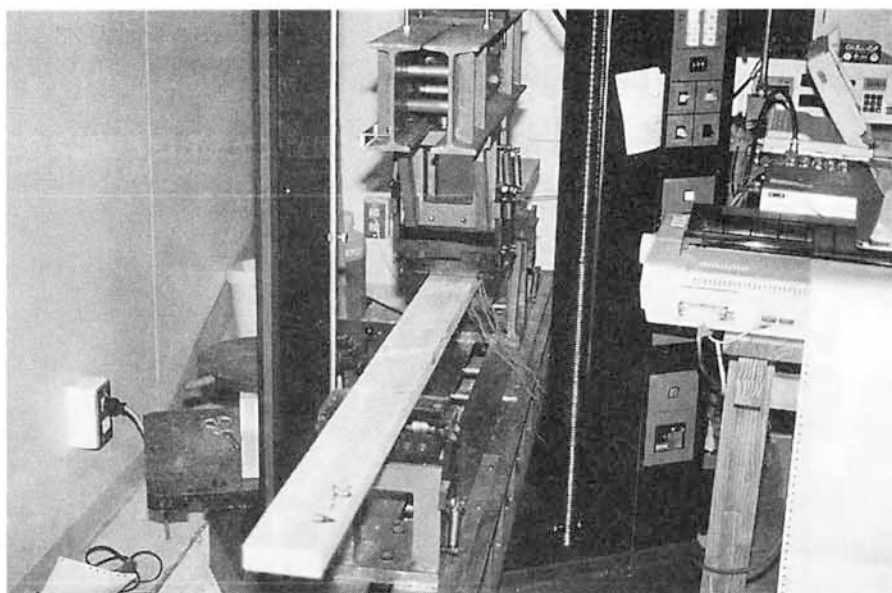


写真 2.2.2 曲げ実験

2.3 ラミナの強度特性について

2.3.1 実験結果

引張実験、曲げ実験の結果を試験体概要で示した試験 No.別にまとめた。ここでは強度とヤング係数の関係のみを示し、詳細な比較については後述することとする。ここで用いるヤング係数は、打撃法によって求めたものである。

I 引張実験

以下に、試験 No.別の引張強度とヤング係数の関係を図 2.3.1～2.3.11 に示した。引張強度はロードセルから得られた最大荷重をラミナの断面積で除したものである。また、試験体の寸法及びチャック間距離の等しい、試験 No.1 と試験 No.11、試験 No.2 と試験 No.3 について同様に扱えるかを比較するための図 2.3.12、2.3.13 も併せて示した。

すべての図において、ヤング係数の上昇に伴って引張強度が上がることを確認できる。多少のバラツキがあるものの引張強度とヤング係数には相関があることがわかる。

また、図 2.3.12、2.3.13 より、試験 No.1 と試験 No.11、試験 No.2 と試験 No.3 についてはほぼ同じバラツキを示していることから同様に扱えるものと判断する。

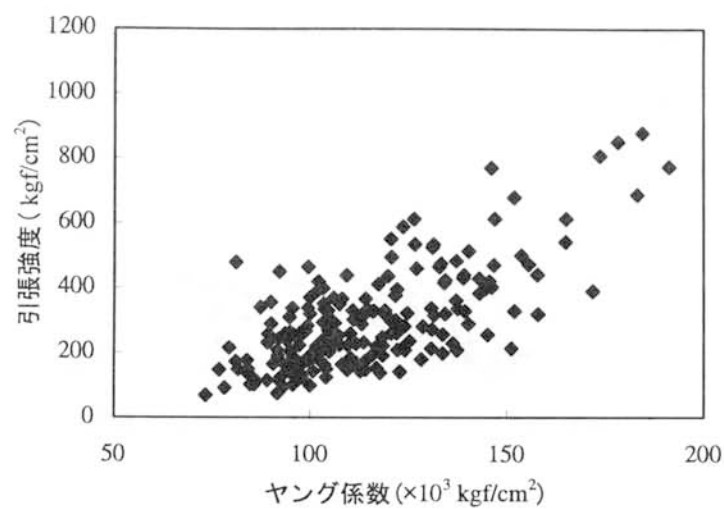


図 2.3.1 試験 NO.1 の引張強度とヤング係数の関係

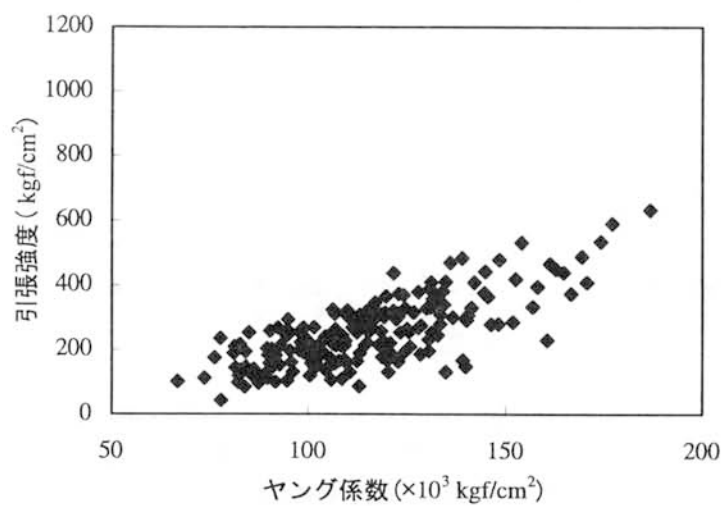


図 2.3.2 試験 NO.2 の引張強度とヤング係数の関係

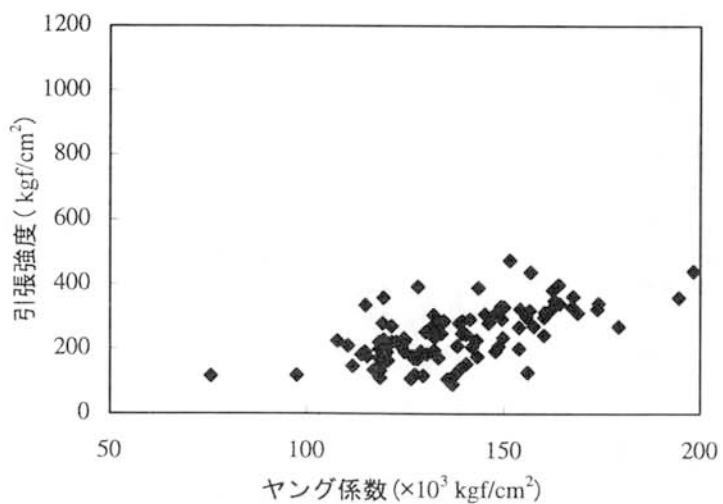


図 2.3.3 試験 NO.3 の引張強度とヤング係数の関係

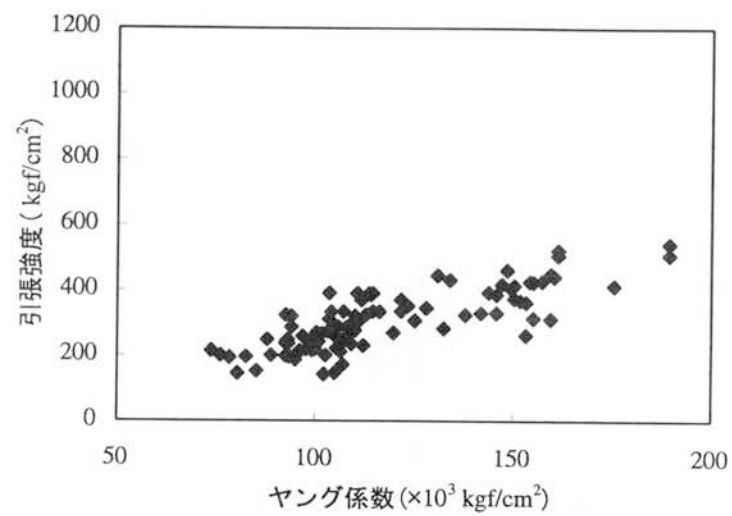


図 2.3.4 試験 NO.4 の引張強度とヤング係数の関係

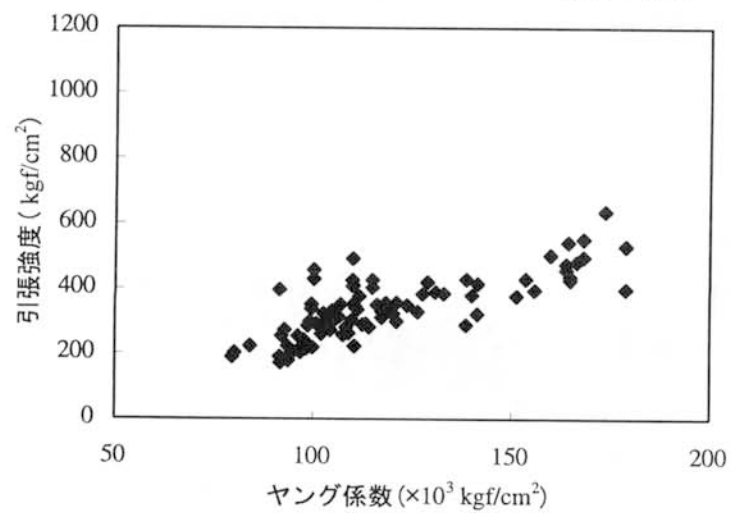


図 2.3.5 試験 NO.5 の引張強度とヤング係数の関係

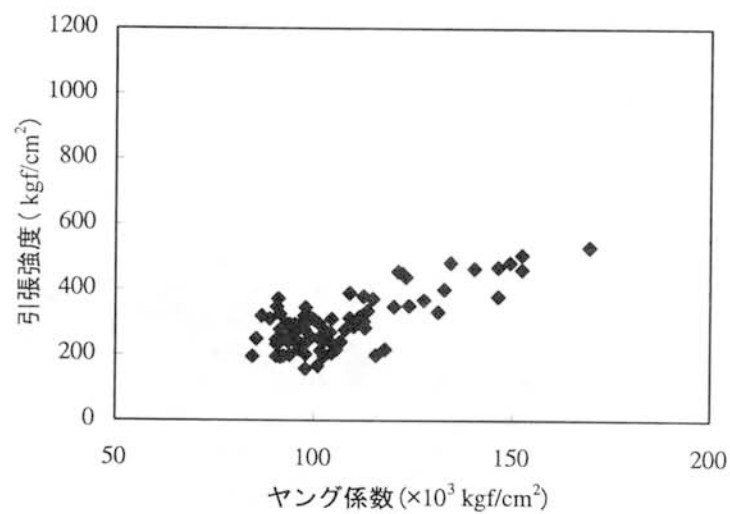


図 2.3.6 試験 NO.6 の引張強度とヤング係数の関係

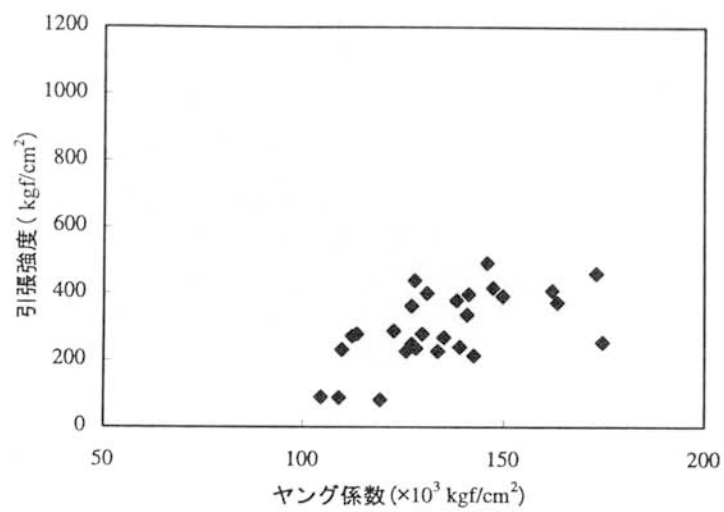


図 2.3.7 試験 NO.7 の引張強度とヤング係数の関係

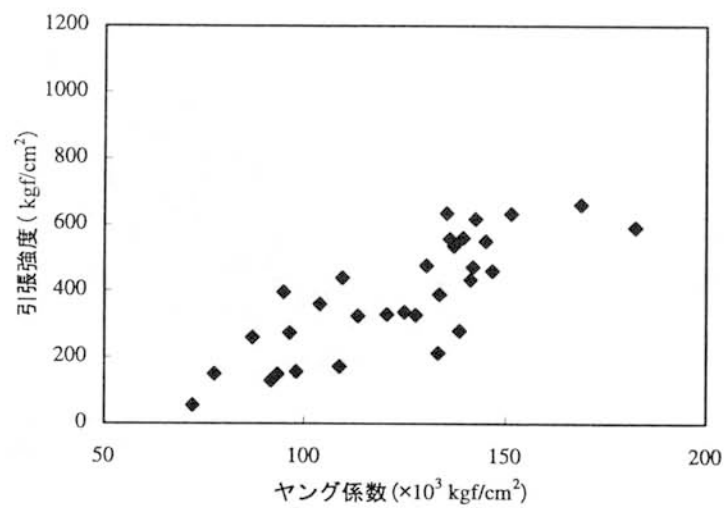


図 2.3.8 試験 NO.8 の引張強度とヤング係数の関係

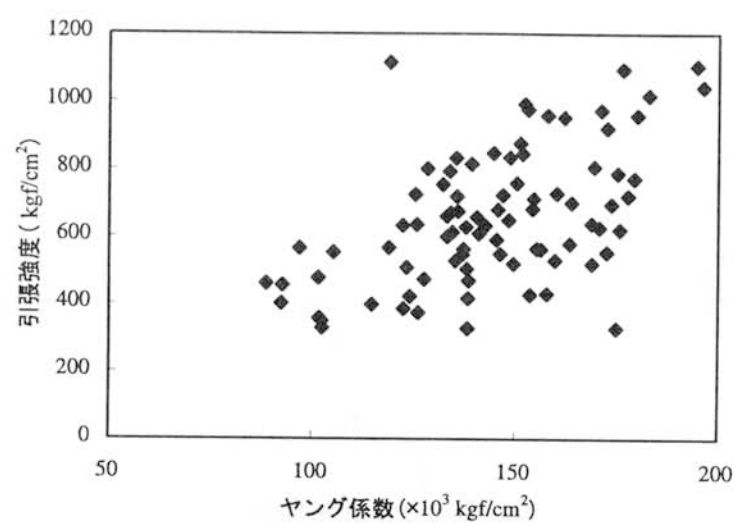


図 2.3.9 試験 NO.9 の引張強度とヤング係数の関係

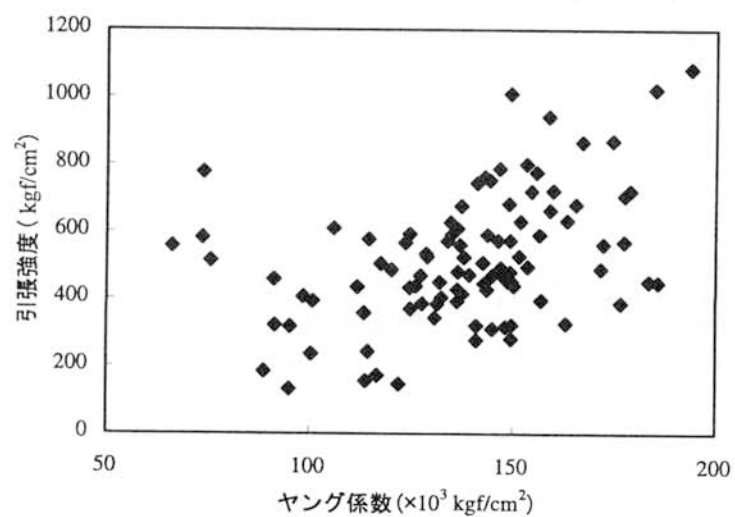


図 2.3.10 試験 NO.10 の引張強度とヤング係数の関係

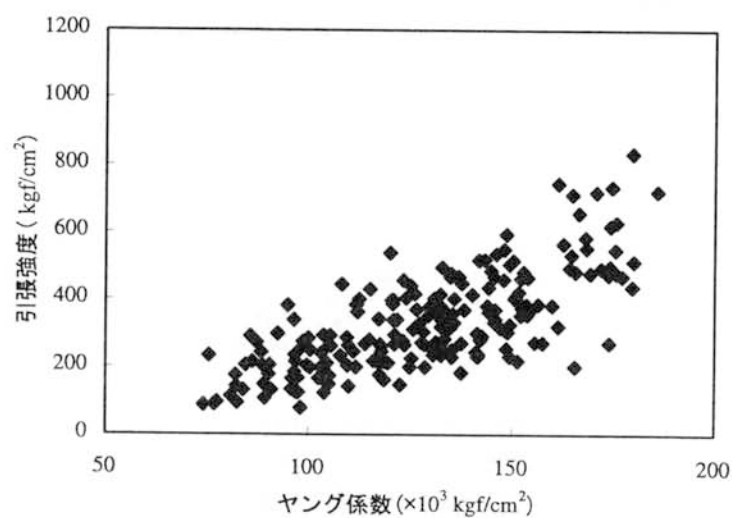


図 2.3.11 試験 NO.11 の引張強度とヤング係数の関係

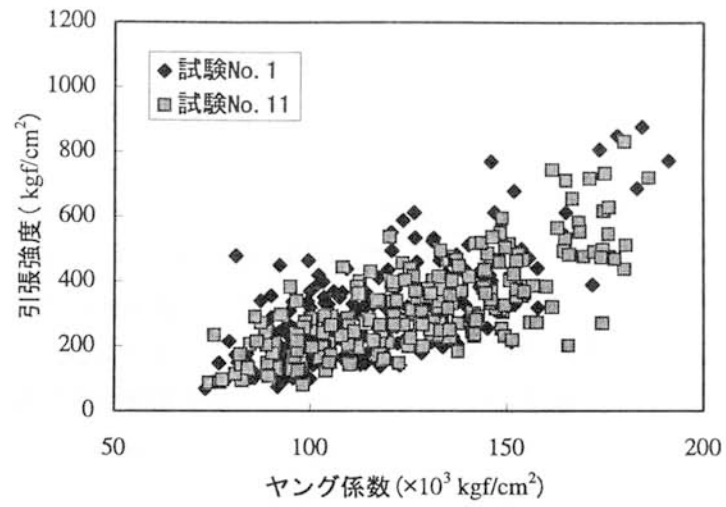


図 2.3.12 試験 NO.1 と試験 NO.11 の関係

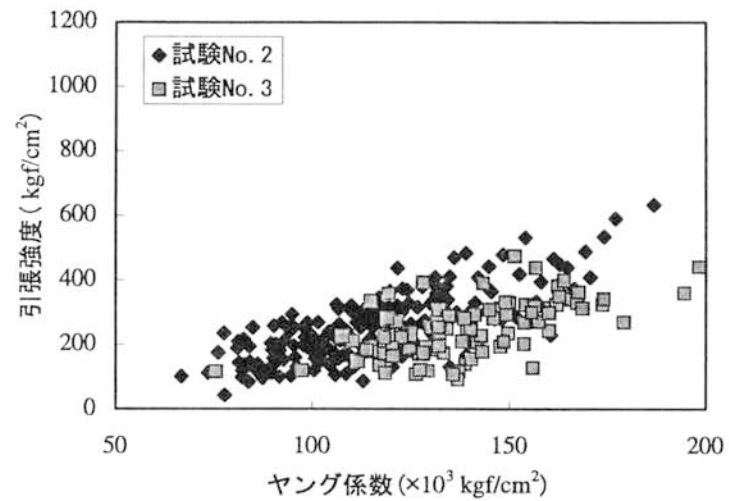


図 2.3.13 試験 NO.2 と試験 NO.3 の関係

ヤング係数の大小によって強度のバラツキに差があるかを判断することが推定に用いていく上で必要となる。そこで、ラミナの等級毎による比較が必要かを確認するため、次の方法を用いて検討した。

まず、ヤング係数によるラミナの等級分けを行う。ここで用いる等級は、「構造用集成材の適正製造基準」に基づくものであり、その等級の範囲を表 2.3.1 で示すように限定した。次に、その等級毎に強度のバラツキを比較し、その大小を明らかにする。ここで用いる試験体は、最も試験体数の多い試験 No.1 と 11、試験 No.2 と 3 である。

ラミナの等級毎における強度のバラツキについて、多少試験体数が異なるため変動係数を用いて比較し、表 2.3.2 に示した。その結果、等級による強度のバラツキは多少有るが L90 に関してはかなりヤング係数の低いものも含まれていることを考慮すると、変動係数はほぼ 0.3 になり、区分するほど大きな差でないことがわかった。よって、今後の検討においてはヤング係数による区分などを用いないこととする。また、推定においても等級による区分は設けずに一つの回帰式を用いることとする。

表 2.3.1 構造用集成材の適正製造基準に準ずる等級区分

等級	曲げヤング係数の平均 ($\times 10^3 \text{kgf/cm}^2$)
L160	160 以上
L140	140 以上
L125	125 以上
L110	110 以上
L100	100 以上
L90	100 未満

表 2.3.2 等級別の変動係数の比較

等級	縦継ぎ無し	縦継ぎ有り
L160	0.28	0.26
L140	0.28	0.30
L125	0.30	0.36
L110	0.35	0.30
L100	0.33	0.26
L90	0.45	0.34

II 曲げ実験

縦継ぎ無しと有りの 2 種類の曲げ実験を行い、その曲げ強度とヤング係数の関係を図 2.3.14、2.3.15 に示した。また、縦継ぎの有無による強度の違いについて図 2.3.16 にて比較した。

縦継ぎ有り無しでは、バラツキに多少の差があるものの、明らかに縦継ぎ有りの強度の方が低いことがわかった。フィンガージョイントによる縦継ぎは、一般に引張より曲げに弱いと言われており、それぞれの回帰式から求めたヤング係数 $130 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ における縦継ぎの効率は、0.56 であり、同様の検討を行った引張による効率の 0.67 よりも低い結果となった。このことからフィンガージョイントによる縦継ぎが曲げと引張に同様に効くわけではないことがわかった。

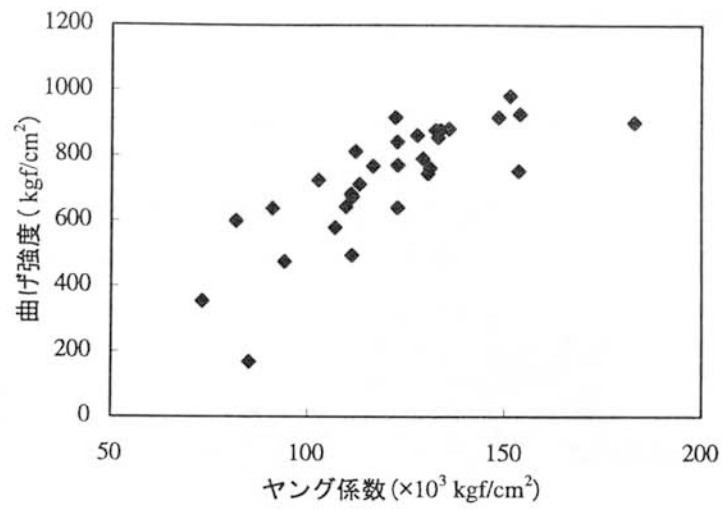


図 2.3.14 縦継ぎ無しラミナの曲げ強度とヤング係数の関係

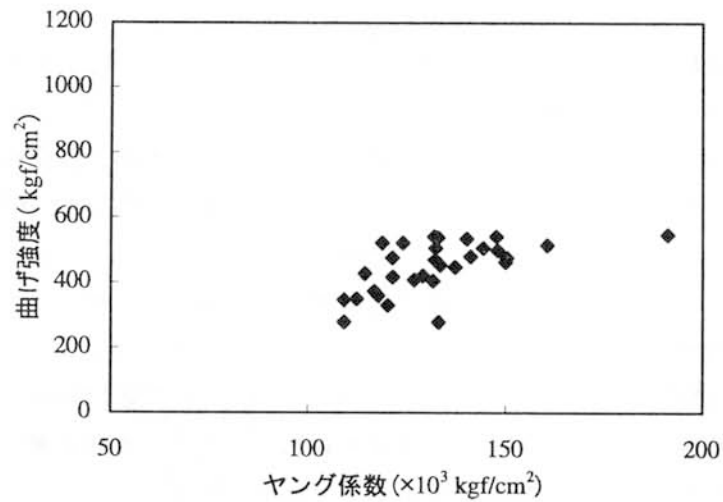


図 2.3.15 縦継ぎ有りラミナの曲げ強度とヤング係数の関係

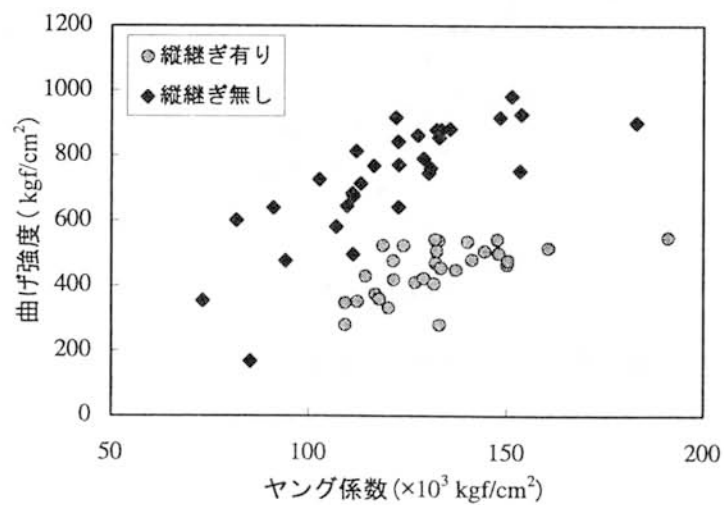


図 2.3.16 縦継ぎ有りと無しの比較

2.3.2 ラミナの形状による比較

引張実験の結果について詳細に検討する。ここでは、縦継ぎの有無、ラミナ厚さ、節の量及び大きさ、ラミナの幅をパラメータとし、強度におよぼす影響について考察する。それぞれ検討するための試験体が異なるため、随時、比較項目とそれに用いる試験体について示す。ここで用いるヤング係数は打撃法によって求めたものであり、節径比は「1.3 用語の定義」で述べた方法にて測定したものである。

縦継ぎの有無による強度の違い

本項では、ラミナの欠点の一つである縦継ぎの強度への影響を試験 No.1、2、3、11 及び 7、8 を用いて明らかにすることを目的とする。その結果を図 2.3.17、2.3.18 に示した。前述したように、試験 No.1 と 11、試験 No.2 と 3 はそれぞれ同等であると判断して比較する。縦継ぎの有無以外でラミナの形状は同じである。

この図より、縦継ぎがあることによる強度低下は明らかである。回帰式を元に本縦継ぎ形状における縦継ぎ効率を最外層ラミナに用いられるヤング係数 $130 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ で求めた。今回の縦継ぎ効率については、ラミナ幅 150mm では約 0.76、ラミナ幅 75mm では約 0.67 であることがわかった。これは純粋な縦継ぎ破壊と母材破壊の比較ではないが、縦継ぎによって約 3 割の強度低下が起こることの目安になると考える。また、ラミナ幅によって効率に違いが現れる結果となった。ラミナ幅 75mm の方がラミナ幅 150mm より高い強度を示したが、供試体の数に大きな差があるため単純比較はできず、今後試験体を増やすことによって幅の影響を明らかにしていくことが重要であると考ええる。

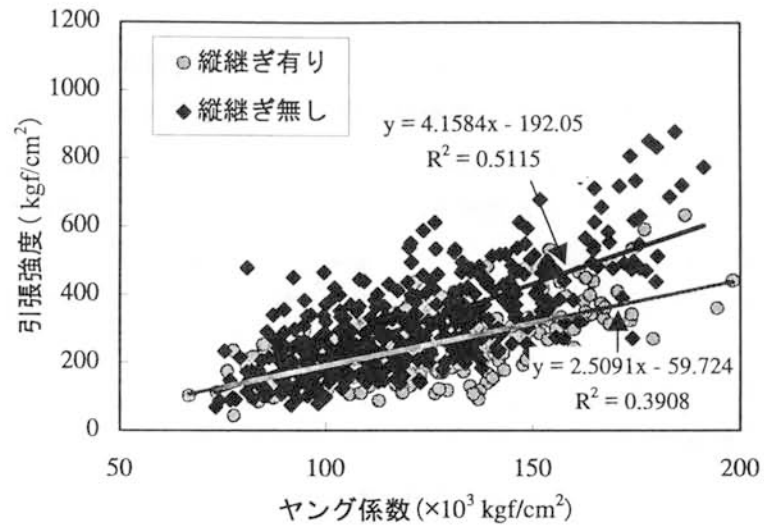


図 2.3.17 ラミナ幅 150mm の縦継ぎの有無による強度の違いについて

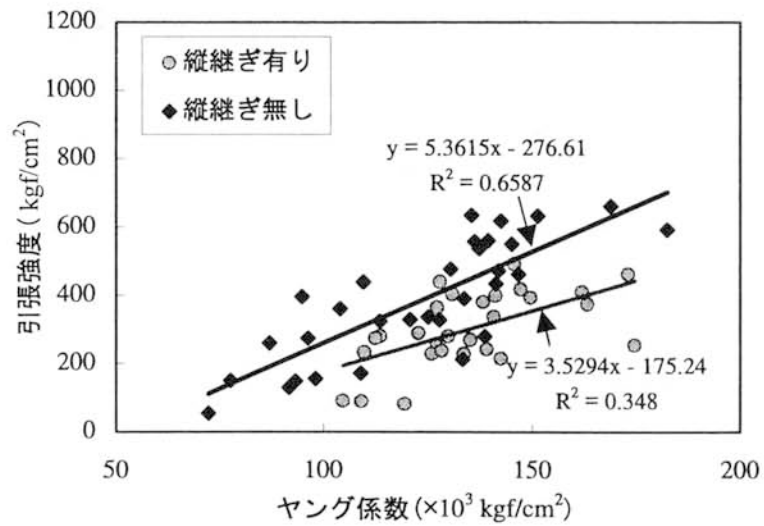


図 2.3.18 ラミナ幅 75mm の縦継ぎの有無による強度の違いについて

ラミナ厚さの違いによる比較

集成材の構成ラミナは、ラミナ厚さが異なることによって積層数も変わり、集成材としての性能も若干異なる。最弱リンクの理論から考えると積層数が多い方が欠点のバラツキが大きくなり、強度が上昇すると考えられる。そこで、ラミナ厚さの異なる引張実験を行い、ラミナ厚さが強度におよぼす影響について明らかにする。ここで用いる試験体は、試験 No.4、5、6 である。また、節径比については測定していない。

図 2.3.19 及び表 2.3.3 より次の 4 つのことがわかった。

ヤング係数の低い ($100 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$) ところでは、3 本の回帰線はかなり近い値をとっており、強度に大きな差がない。

ヤング係数が高くなるに従って、その強度の差は少しずつ大きくなっている。

12mm と 18mm の差と比較して 24mm だけが若干下回っているが、その差は約一割と小さく、ヤング係数の極端に高いラミナを使用しない限りは、その差が顕著にでることがない。

ヤング係数の高い ($160 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 以上) ラミナを使わない限りはラミナ厚別の強度評価をしなくて良い。

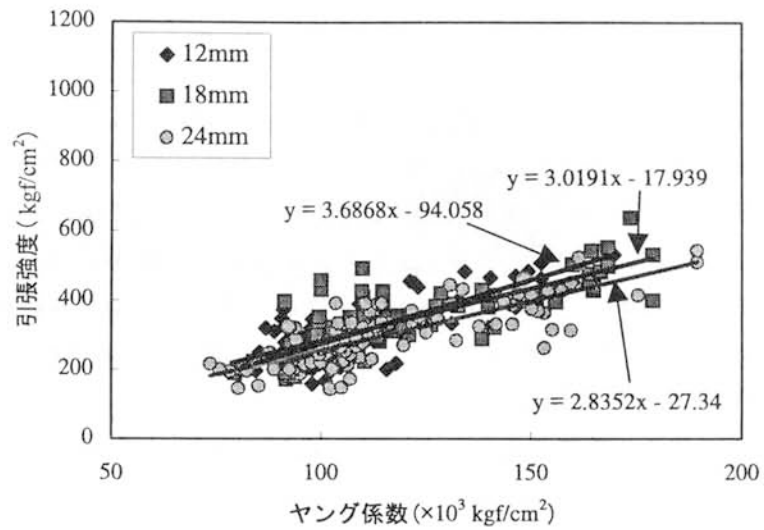


図 2.3.19 ラミナ厚さと強度の関係

表 2.3.3 任意ヤング係数におけるラミナ厚別の強度について

ヤング係数 (×10 ³ kgf/cm ²)	24mm	18mm	12mm
100	256.18	283.97	274.62
		1.11	1.07
140	369.59	404.75	422.09
		1.10	1.14

単位：kgf/cm²

注) 表中の下段はラミナ厚 24mm に対する比である

節の量及び大きさの違いによる比較

ラミナには、もちろん節が存在し、前述した縦継ぎと並ぶラミナの欠点である。そこで、節の大きさ及び量が、強度に及ぼす影響を確認することを目的として以下の考察を行う。ここで用いる試験体は、試験 No.9、10、11 である。本考察において、試験 No.9 を節がないラミナとして無節、試験 No.10 を一つだけ節を持つラミナとして単節、試験 No.11 を複数個の節を持つラミナとして有節と呼ぶこととする。なお、試験 No. 10、11 については節径比を測定している。まず、これらの試験体を別のものとして用いて良いかを判断するために、 t 検定による分散が等しいと仮定した 2 標本による検定を有意水準 5%で行った。その結果は表 2.3.4 に示すとおり異なる結果となった。

図 2.3.20 に節の有無による強度の比較を、図 2.3.21 に有節及び単節の節径比と強度の関係を示した。それぞれの節径比の平均は、単節で 0.093、有節で 0.168 であった。強度について図 2.3.20 を用いて比較すると、有節<単節<無節の順になっていることがわかる。これは、節の量が多くなると強度が低下することを示している。しかし、単節の節径比が有節より低かったことが原因であるとも考えられるため、有節と単節の節径比と強度の関係を図 2.3.21 で比較した。その結果、両者は似通った性状を示しているものの若干有節の方が低強度であることがわかる。これは、有節のラミナ内で節同士が相互に悪影響を及ぼしてより大きな強度低下につながっていると考えられる。そこで、慣用されている集中節径比を基に評価したものを図 2.3.22 に示した。その結果、傾きは大きく異なるものの節径比 0.1~0.3 の間では強度に対するバラツキの幅が同じようになり、節の評価には節径比より集中節径比が妥当と考える。

表 2.3.4 t 検定による検定結果

	無節－単節	無節－有節	単節－有節
t	4.416	13.665	8.518
t_0	1.960		

注1) 無節－単節は、無節ラミナと単節ラミナの比較を意味する
(無節－有節、単節－有節も同じ)

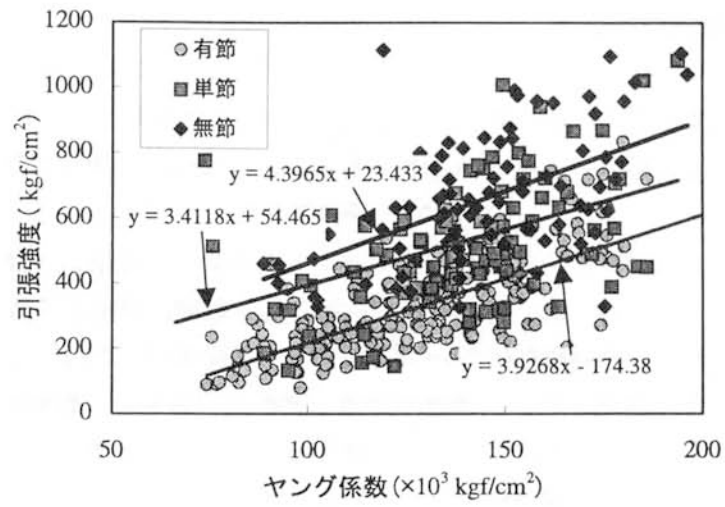


図 2.3.20 節の有無と強度の関係

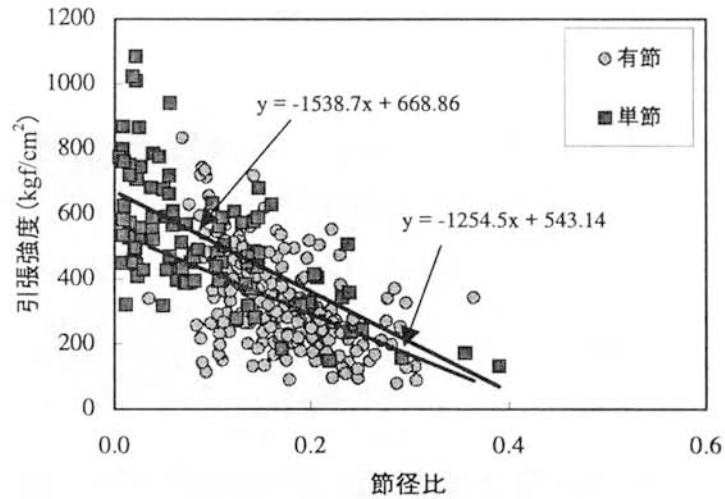


図 2.3.21 節径比と強度の関係

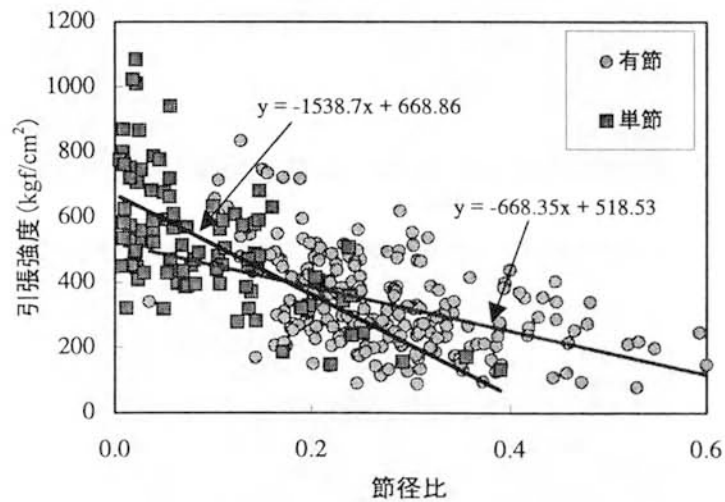


図 2.3.22 集中節径比と強度の関係

2.3.3 強度と破壊性状の関係

すべての試験結果を基に破壊性状と強度の関係を明らかにすることを目的とする。「2.3.2 ラミナの形状による比較」の結果からもわかるように、欠点の有無及び種類によって強度が大きく異なる。

そこで、本章では破壊性状に区分して強度とヤング係数及び節径比の関係を明らかにするために以下のことを検討した。まず、破壊性状を母材破壊、縦継ぎ破壊、節破壊の3つに分類する。それぞれの破壊性状について図 2.3.23 と写真 2.3.1、2.3.2、2.3.3 に一例を示した。その分類結果毎に強度とヤング係数の関係を調べた。加えて、集成材の強度推定に用いられるラミナ厚さの要素検討として厚さが異なることによる破壊性状の違いについても比較した。それぞれ用いた試験体については適宜示す。

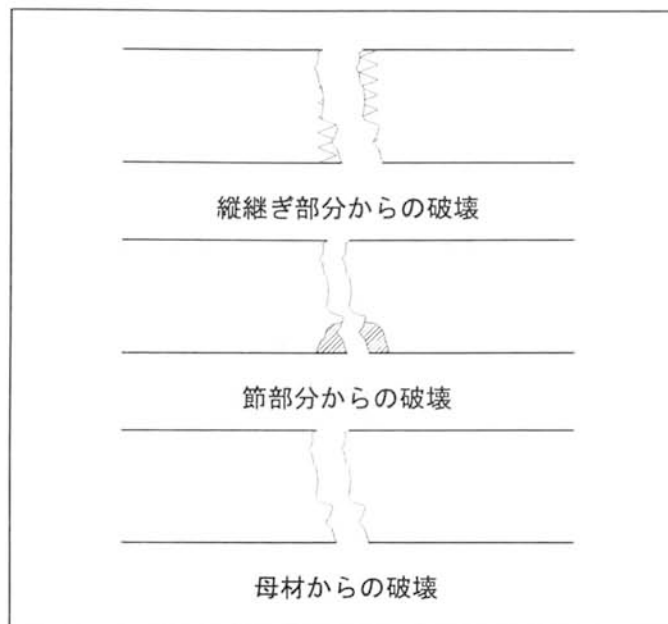


図 2.3.23 破壊性状について

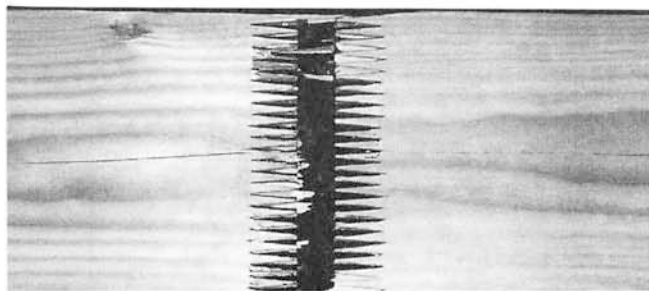


写真 2.3.1 縦継ぎ破壊

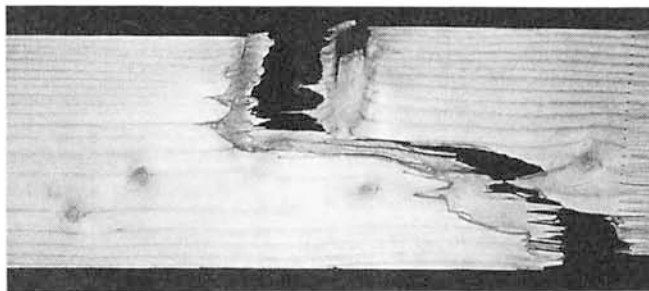


写真 2.3.2 節破壊

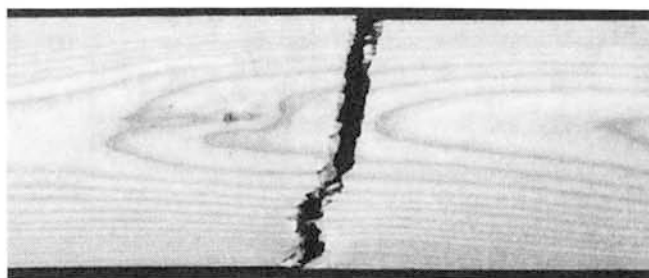


写真 2.3.3 母材破壊

I 引張実験

破壊性状別の強度の比較

試験 No.1、2、3、9、10、11 及び試験 No.7、8 を用いて破壊性状別の強度の比較を図 2.3.24、図 2.3.25 で行った。また、縦継ぎが有る場合と無い場合における破壊形式の頻度についても試験 No.1、2、3、11 を用いて表 2.3.4 で比較した。

破壊性状別に強度を比較すると縦継ぎ破壊と節破壊はほとんど差がないが、母材破壊は明らかに強い。また、縦継ぎ破壊<節破壊<母材破壊の順で、バラツキが大きくなっていることがわかる。すべての破壊性状についてラミナ幅の違いによる影響は見られない。しかし、節破壊した試験体の節径比の平均が 75mm 幅で 0.38 と 150mm 幅で 0.22 というように大きな差があるため、分けて評価する方がよいことがわかった。

縦継ぎ無しの場合については、ほとんどが節で破壊することがわかるが、節径比の小さいものに関しては、母材破壊することもわかった。また、縦継ぎ有りの場合は、縦継ぎ破壊と節破壊が同等数起きていることがわかる。この試験における節径比の平均は 0.22 であり、節径比の大小によってこの破壊性状の頻度が異なってくると考える。また、縦継ぎの効率に関しても同様のことが言えるため、新しい縦継ぎ方法を考えるたびに、その実験が必要であると言える。

表 2.3.4 破壊性状の頻度について

	縦継ぎ破壊	節破壊	母材破壊
縦継ぎ無し		0.85	0.15
縦継ぎ有り	0.48	0.44	0.08

注) 引張長さ 1000mm 試験体についてである

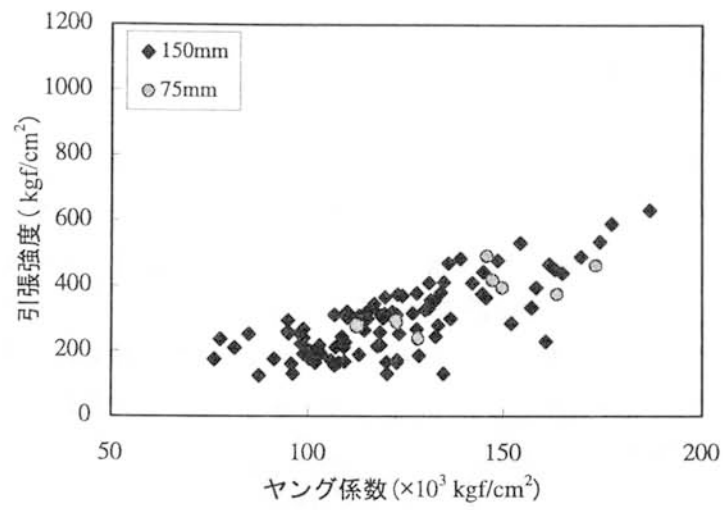


図 2.3.24 縦継ぎ破壊について

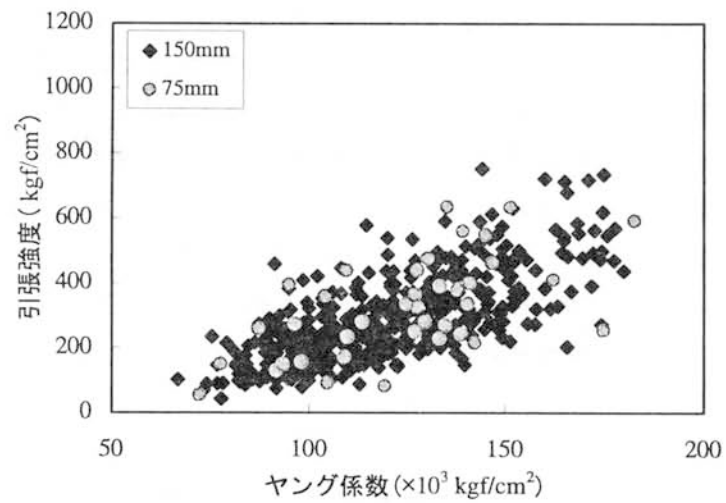


図 2.3.25 節破壊について

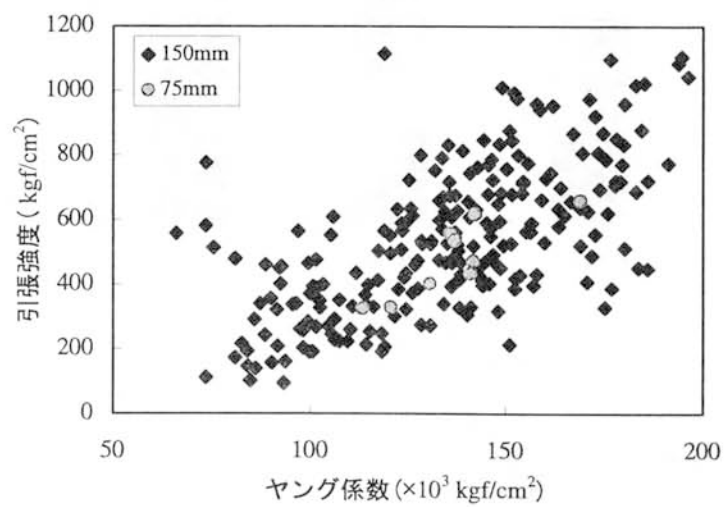


図 2.3.26 母材破壊について

ラミナ厚さと破壊性状の関係について

ラミナ厚さと破壊性状の関係を明らかにすることを目的として、ラミナ厚さの異なる試験 No.4、5、6 を用いて破壊性状別の強度、破壊性状の頻度について比較した。ここで比較に用いた試験体は、縦継ぎで破壊させることを目的として作成されているため、引張長さが 500mm と短く、母材破壊、節破壊の頻度が少なくなっている。

縦継ぎ破壊した試験体の強度をラミナ厚別に図 2.3.27 にて比較した。その結果、ラミナ厚の違いによる強度の差は見られず、ほぼ同様の強度を示すことがわかった。よって、ラミナ厚別の評価が必要でないこともわかった。

次に、破壊性状別の頻度について図 2.3.28 を用いて検討する。ここでは、①縦継ぎ破壊（引き抜かれる）、②縦継ぎ破壊（縦継ぎ部分が切れる）、③節破壊、④母材破壊（繊維を分断するような破壊）、⑤母材破壊（目切れ）の 5 種類に分類している。通常、ラミナの破壊には以上のような形が見られるが、わかりやすくするために①②の縦継ぎ破壊と③の節破壊と④⑤母材破壊の 3 分類を用いた。破壊性状別の強度について母材破壊を除いて比較した場合、①の破壊が最も破壊強度が高い結果となった。図より、ラミナ厚が薄くなるに従って、節破壊の頻度が増えていることがわかる。これは、ラミナが薄い方が一つの節による節径比（断面欠損率）が大きくなるためであると考えられる。

以上のことから、ラミナ厚の違いによる縦継ぎの強度差はないものの、破壊性状としてラミナが薄くなるに従って節破壊が増える傾向にあることがわかった。

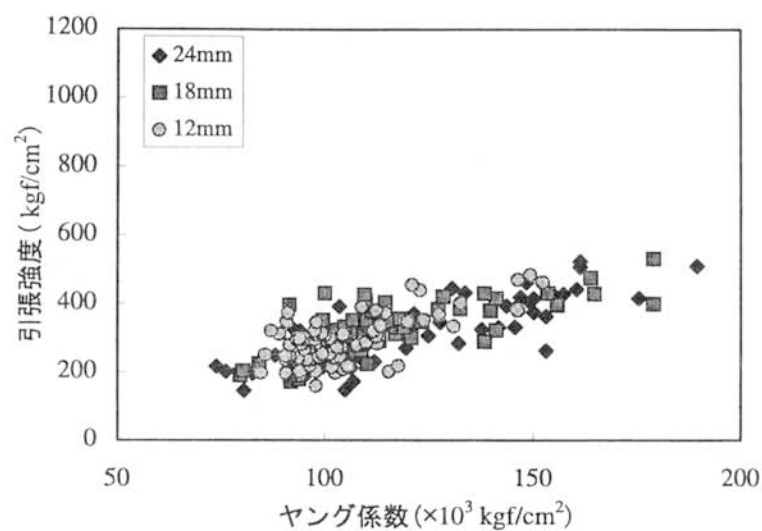


図 2.3.27 縦継ぎ破壊のラミナ厚の違いによる比較

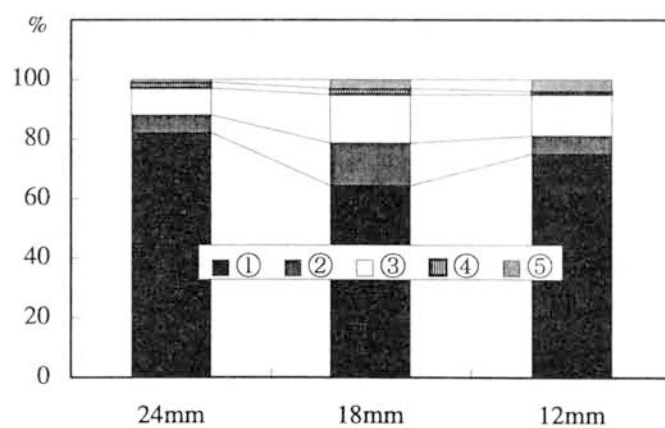


図 2.3.28 破壊性状別の頻度について

- ①縦継ぎ破壊（引き抜かれる）
- ②縦継ぎ破壊（縦継ぎ部分が切れる）
- ③節破壊
- ④母材破壊（繊維を分断するような破壊）
- ⑤母材破壊（目切れ）

II 曲げ実験

破壊性状別の強度の比較

破壊性状別の強度を図 2.3.29 に示した。また、破壊性状の頻度についても縦継ぎ有りと無しに区別して表 2.3.5 に示した。試験体数が少ないため、この比較ですべてを説明することは危険であるが、この実験よりわかった知見について述べる。

図 2.3.29 より、破壊強度は、引張実験と同様に母材破壊とその他の破壊という形態ではないことがわかった。また、縦継ぎの有無とヤング係数が大きな要因となっていることがわかった。これらの結果より、縦継ぎが有る場合は、強度が低下することがわかった。しかし、モーメント一定区間が極端に短い本試験方法の場合、一定区間内に必ず縦継ぎのくる縦継ぎ有りと、節が必ず一定区間に存在するとは限らない縦継ぎ無しでは、単純に比較することはできないと考える。

破壊性状別の頻度についてであるが、この検討も同様にモーメント一定区間が極端に短い本試験では単純比較は難しい。あえて比較をすると、縦継ぎがあることで母材破壊が起こりにくいことがわかった。また、縦継ぎがある場合は、かなり大きな節（節径比 0.37）でないと節破壊にならないことがわかった。縦継ぎが無くモーメント一定区間内に大きな節がない場合は、母材で破壊することがわかった。ただし、ある程度の大きさの節がある場合はそこが原因になることもわかった。

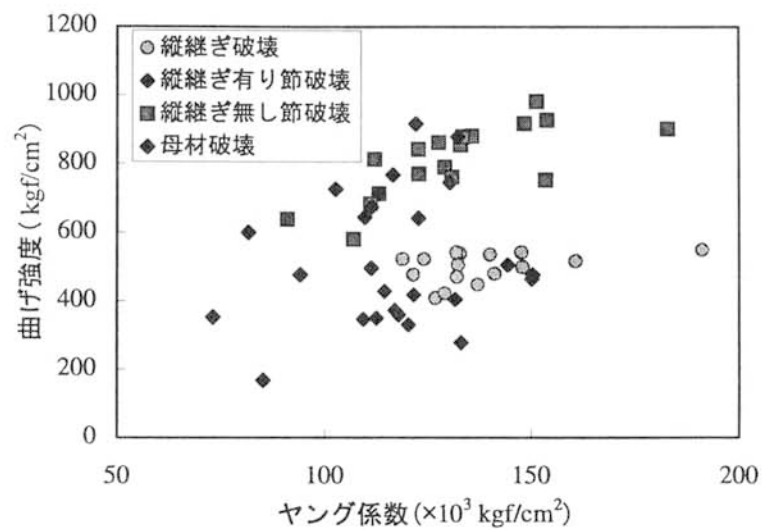


図 2.3.29 破壊性状別の強度の比較

表 2.3.5 破壊性状の頻度とその節径比の平均（下段：節径比）

	縦継ぎ破壊	節破壊	母材破壊
縦継ぎ無し		0.45	0.55
		0.29	0.20
縦継ぎ有り	0.57	0.43	0.00
		0.37	

注) 加力点間距離 100mm 試験体についてである

2.4 本章のまとめ

本章では、集成材用ラミナの引張実験及び曲げ実験を行い、その力学的特性について検討した。以下に、得られた結論を示す。

- ①引張実験、曲げ実験とも、強度とヤング係数及び強度と節径比に相関があることが確認された。また、節と同様に縦継ぎ部分も重要な欠点要素であることが確認された。よって、ラミナの強度を推定するのに必要なパラメータであることがわかった。
- ②引張実験の結果をヤング係数によって区分した等級毎に強度のバラツキがあるかを比較したが、バラツキに差はなく、一つの回帰式で強度を説明できることがわかった。
- ③縦継ぎ有りの強度は縦継ぎ無しに対して、引張実験では約 70%、曲げ実験では約 55%であった。
- ④ラミナ厚さの違いによる引張強度の比較をした結果、ヤング係数が高い範囲でない限り、大きな差が見られず、ラミナ毎の評価が必要でないことがわかった。また、破壊性状についてみるとラミナが薄くなるに従って、節破壊の確率が高くなることがわかった。
- ⑤節の量が異なるラミナの引張実験より、節が増えることによって強度が低下することがわかった。また、節のない試験体が高強度であることが確認できた。節の評価には、節径比より集中節径比が妥当であることがわかった。
- ⑥縦継ぎ破壊、節破壊、母材破壊と破壊性状を分類して比較したところ、引張実験では、母材破壊は高強度であり、縦継ぎと節で破壊した試験体に強度の差は見られなかった。しかし、曲げ実験では縦継ぎのあるラミナかどうか大きな要因となることがわかった。
- ⑦破壊性状について、節破壊では繊維に沿って破壊するものがあり、断面全体が破壊に至らないことがわかった。

第 3 章

- 3.1 本章の目的
- 3.2 実大曲げ実験
- 3.3 集成材の曲げ強度特性について
- 3.4 曲げ破壊に至る過程の分析
- 3.5 本章のまとめ

3.1 本章の目的

前章で集成材を構成するラミナの強度特性を明らかにした。しかし、集成材はラミナの特性をそのまま踏襲するとは限らないため、様々な集成材の実大実験を行い、それぞれのパラメータの影響をみる必要がある。

そこで本章では、集成材の曲げ強度特性を明らかにすることを目的に、様々なパラメータの異なる実大曲げ実験の結果を示す。実験結果の考察として破壊性状・弾性係数・ラミナの厚さの影響を調べる。また、集成材が曲げ破壊に至る過程の分析を行う。ここで述べる分析対象は、ひずみの分布・中立軸の移動・応力の再配分現象・最外層ラミナに生じる応力である。

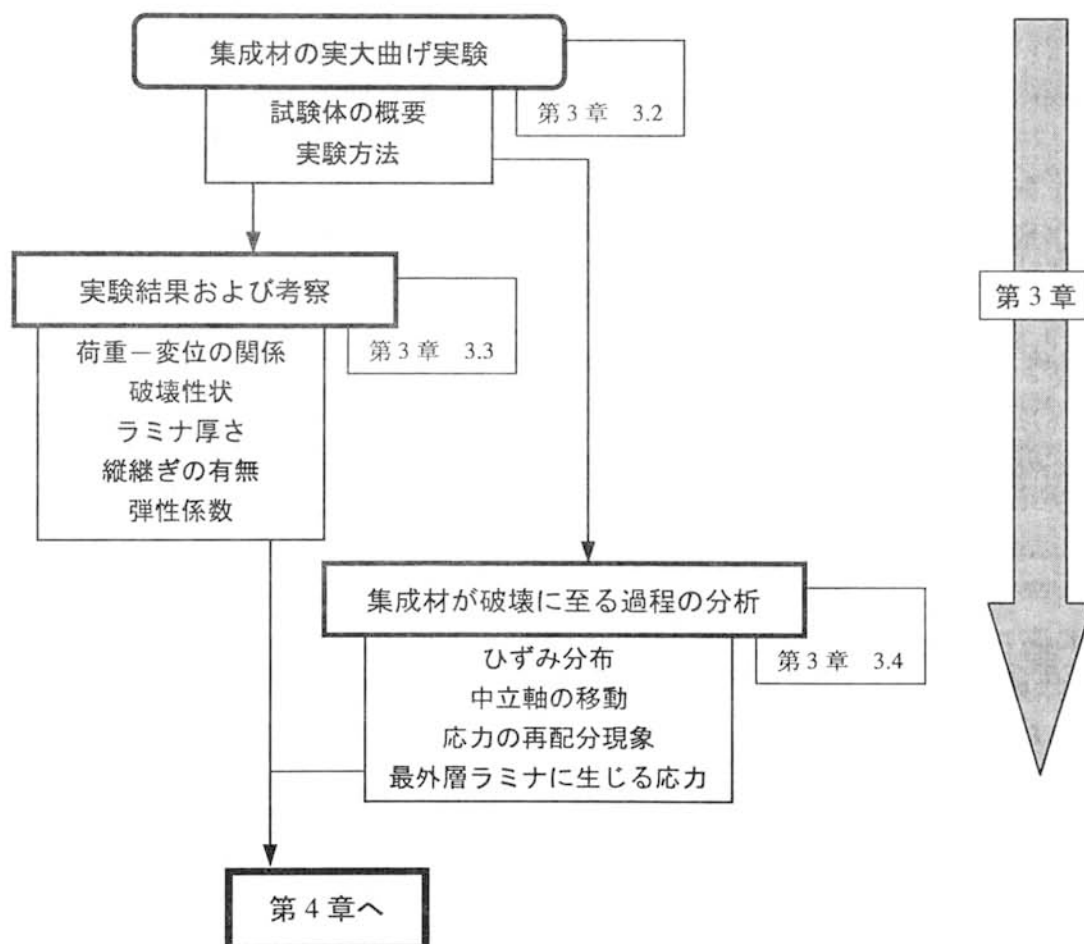


図 3.1.1 本章の流れ

3.2 実大曲げ実験

3.2.1 試験体概要

分析対象集成材は、はりせい、ラミナ厚、構成方法、縦継ぎの有無などをパラメータとした表 3.2.1 に示す合計 118 体である。図 3.2.1 には断面と構成方法を示す。はり幅は 75mm と 150mm の 2 種類、はりせいは 144～600mm の範囲で 5 種類、ラミナ厚さは 12～25mm の範囲で 4 種類、構成方法はラミナのヤング係数の差が外層と内層で $10 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 以下の同等級ラミナから構成されるものと、外層、中間層、内層と異なる等級のラミナから構成される異等級構成の 2 種類で、同等級ラミナから構成される場合でもその等級が異なるなど、様々なラミナ構成が混在している。しかしながら、同一断面、同一ラミナ厚、同一構成方法の集成材は、以下の式 3.2.1) で計算される集成材の曲げヤング係数³⁰¹⁾がほぼ一致するようにラミナの配置を操作している。なお、ラミナの等級は打撃法³⁰²⁾あるいはグレーディングマシンによって測定したヤング係数³⁰³⁾で管理し、目視による等級区分は基本的に実施していない。しかし、最外層の見える部分だけではあるが、節径比の最大値、平均値、最小値にほとんど差がないことを確認している。含水率はすべてのラミナとも積層前の段階で 15%以下に管理した。さらにラミナに縦継ぎがあるものはすべて図 3.2.2 に示す縦継ぎ形状であり、縦継ぎの位置は 3 点曲げの試験体を除きすべてモーメント一定区間に存在し、幅、梁せい、ラミナ厚の同じものは基本的に最外層で同位置になるように配置した。

$$E_{//x-x} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i I_i}{I} \quad 3.2.1)$$

$E_{//x-x}$: 集成材のヤング係数 (kgf/cm^2)

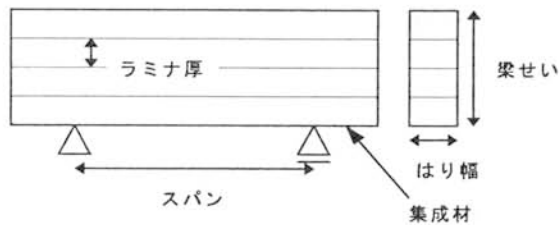
E_i : i 層ラミナのヤング係数 (kgf/cm^2)

I_i : i 層ラミナの断面 2 次モーメント (cm^4)

I : 集成材の断面 2 次モーメント (cm^4)

表 3.2.1 分析対象集成材

梁せい (mm)	梁幅 (mm)	ラミナ厚 (mm)	スパン (mm)	構成方法 ^{注1)}	縦継ぎの有無	加力点間距離 (mm)	試験体数 ^{注2)}
600	150	25	8,000	1、2、3	有	2,000	1、1、1
450			7,000				1、1、1
300			6,000				2
		12、18、24		4			2、2、2
				1、1、1			
162	75	18	3,000	5	0 ^{注3)}	12	
144		12、18、24		6		1,000	4
							12、12、12
				無			



注1) 構成方法はラミナのヤング係数を元になっている。数値は以下の通り (単位×10³kgf/cm²)

構成方法1 : 外層 125 以上 中間層 120~125 内層 115~120
 構成方法2 : 外層 125 以上 中間層 90~105 内層 70~90
 構成方法3 : 外層 90~105 中間層 80~90 内層 65~80
 構成方法4 : 外層 110~125 中間層 105~110 内層 100~105
 構成方法5 : JAS E95-F315
 構成方法6 : JAS E105-F345

注2) 試験体数は、構成方法順およびラミナ厚さ順に示している

注3) 加力点間距離 0mm とは、中央載荷 3 点曲げを指す

F.J.の位置は中央部より 500mm 以内とした

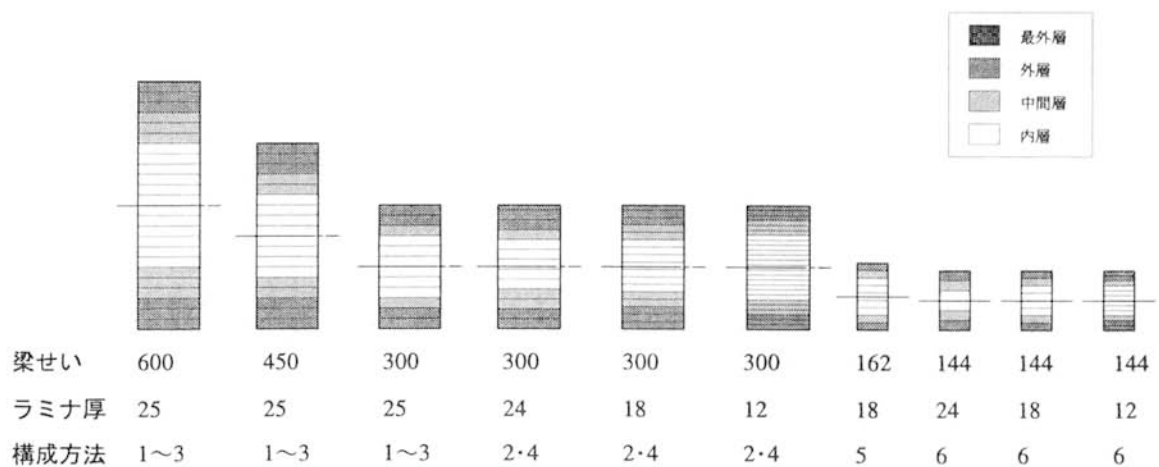


図 3.2.1 集成材の構成方法単位 (mm)

集成材の縦継ぎについて

集成材のラミナの縦継ぎは、図 3.2.2 に示す縦継ぎ形状（フィンガージョイント）を用いている。接着剤は、主剤（DF-1200）・硬化剤（DL-200）を使用し、圧縮圧は 50 kgf/cm² で高周波加熱を行っている。

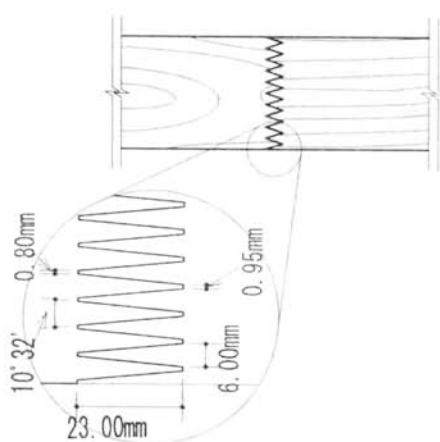


図 3.2.2 縦継ぎ形状

試験体名について

それぞれの試験体について以下のように試験体名を付け、以降の結果および考察において用いる。

表 3.2.2 試験体名

構成方法	はり幅 (mm)	梁せい (mm)	ラミナ厚 (mm)	スパン (mm)	縦継ぎの 有無	試験体名
1	150	600	25	8000	有	8-1
2						8-2
3						8-3
1		450		7000		7-1
2						7-2
3						7-3
1		300	6000	6-1		
2				6-2		
3				6-3		
2				12-1,2		
4				12-3		
2				18-1,2		
4			18-3			
2			24-1,2			
4			24-3			
5	75	162	18	3000	無	T-1～T-12
5						F-1～F-4
6		144	12	FJ12-1～FJ12-6A,B		
6			18	FJ18-1～FJ18-6A,B		
6			24	FJ24-1～FJ24-6A,B		
6			12	NO12-1～NO12-6A,B		
6			18	NO18-1～NO18-6A,B		
6			24	NO24-1～NO24-6A,B		

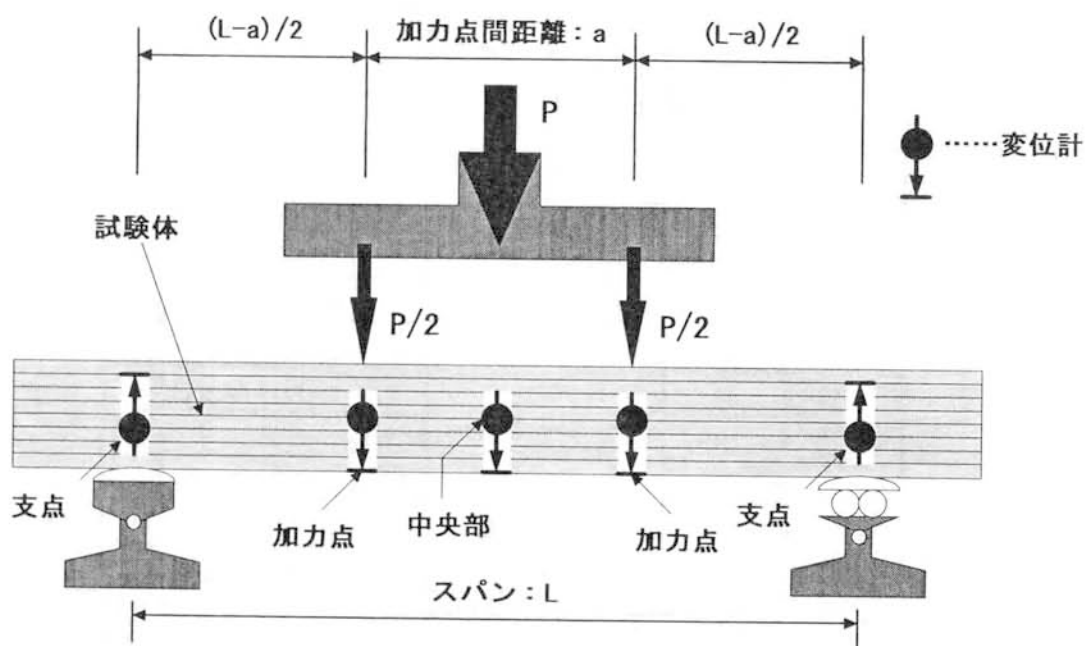
注1) この部分の集成材については、始めからはり幅75mmにしたのではなく、はり幅を150mmで8体ずつ作成して、幅を半分に切って75mmとした。また、Tは3点曲げを指し、Fは4点曲げを指す。

注2) この部分の集成材については、始めからはり幅75mmにしたのではなく、はり幅を150mmで6体ずつ作成して、幅を半分に切って75mmとし、それぞれをA、Bとした。そのため、各種12体ずつある。

3.2.2 実験方法

実験は、はりせい 300mm 以下ではスパンをはりせいの約 21 倍とした 3 等分点 4 点曲げで、はりせい 300mm 超では加力点間距離を一定の 2m、加力点と支点間距離をはりせいの 5 倍以上とした 4 点曲げで実施した。この実験方法は集成材を曲げ破壊に至らしめ、曲げ強度を求めるためのものであり、実際にはこれに先駆けて、せん断弾性係数を求めるために、スパン、加力点間距離を違えて長期許容応力度の 1/3 程度を目安とした加力試験を数回実施している試験体もある。また、モーメント一定区間以外での破壊性状をみるために 3 点曲げ実験も行った。しかし、3 点曲げ実験に関してはせん断弾性係数を求めている。

実験中、荷重と中央点、加力点、支点などの変位、並びに、縦継ぎ位置、その周辺、節周辺、材軸中央部など 20～50 点で集成材表面のひずみを測定した。なお、ひずみの測定には室温状態で $20,000 \times 10^{-6}$ をひずみ限界（ひずみゲージが破損することなく動作し得るひずみの最大値）とするペーパーゲージを用いた。加力速度は荷重 1tf あたり 3 分から 4 分程度とし、測定は 1 測定点あたり 0.05 秒の測定時間で、破壊直前までほぼ連続的に測定した。実験方法の概要、試験機、実験風景を図 3.2.3、写真 3.2.1、写真 3.2.2 に示す。



* 試験体中央部の変位(δ_c)は、支点と中央部で測定された変位より、算出される。

$$\delta_c = \text{中央部で測定された変位} - \text{支点で測定された変位}$$

図 3.2.3 実験方法の概要

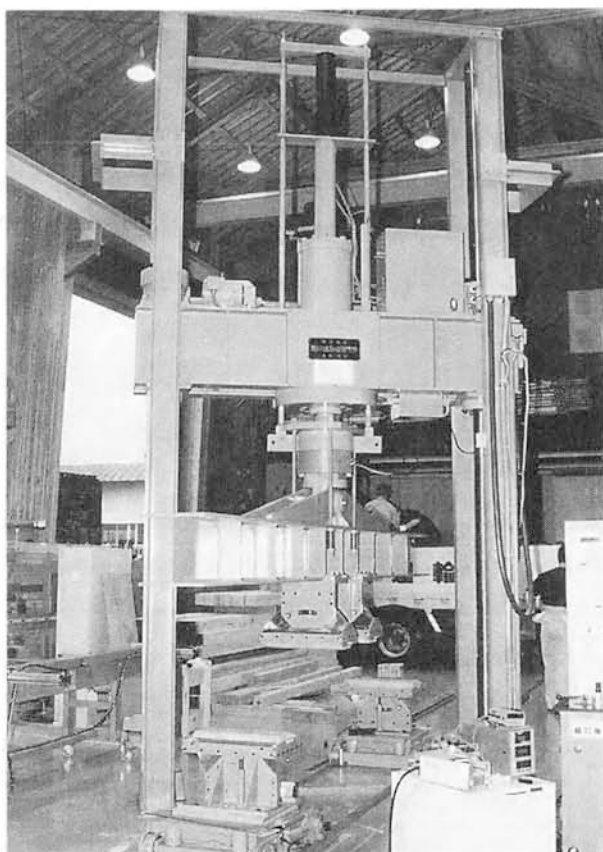


写真 3.2.1 実大曲げ試験機

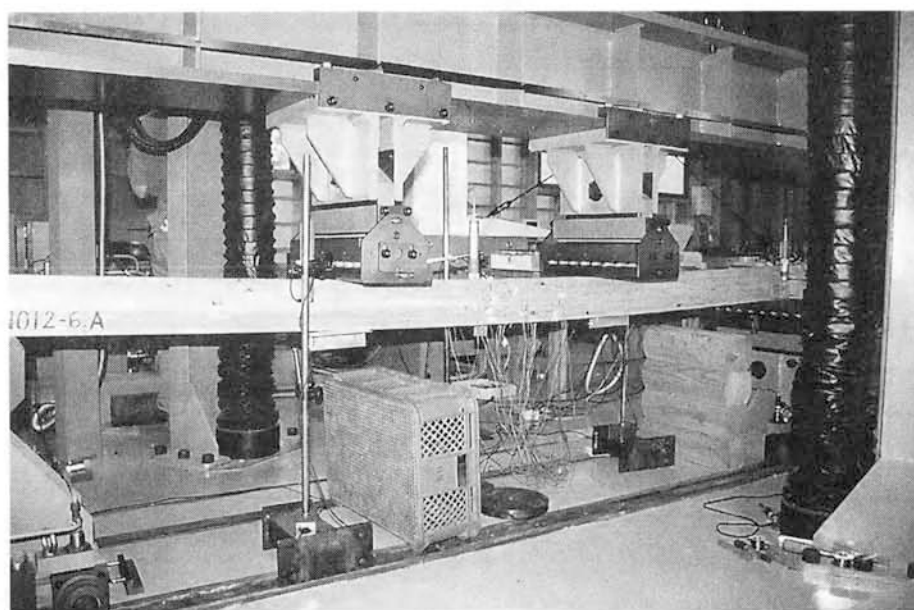


写真 3.2.2 実験風景

3.3 集成材の曲げ強度特性について

3.3.1 実験結果

すべての実験結果について、表 3.3.1 に示す。破壊強度（縁応力度）は、最大曲げモーメントを断面係数で除したものであり、断面の変形は考慮していない。なお、試験体数の多いものについては平均値で示している。また、試験体数が 12 体のものに関しては、変動係数についても併せて示している。

表 3.3.1 実験結果一覧

試験体名	破壊強度 (kgf/cm ²)	曲げヤング係数 ($\times 10^3$ kgf/cm ²)	変動係数	
			破壊強度	曲げヤング係数
6-1	510.2	129.3		
6-2	285.7	120.0		
6-3	292.5	93.4		
7-1	398.1	110.9		
7-2	270.9	116.9		
7-3	239.4	89.9		
8-1	337.6	126.4		
8-2	284.9	113.3		
8-3	284.9	88.6		
12-1、2	319.7	122.3		
12-3	345.2	110.5		
18-1、2	304.6	120.5		
18-3	349.2	112.6		
24-1、2	266.1	122.3		
24-3	299.7	117.5		
F.J.12	374.4	104.0	0.155	0.054
F.J.18	373.8	102.8	0.147	0.041
F.J.24	323.2	95.6	0.169	0.045
NO12	418.3	104.2	0.127	0.048
NO18	439.7	104.5	0.154	0.031
NO24	412.4	99.8	0.169	0.056
T	409.1	100.6	0.200	0.042
F	358.0	101.1		

縁応力－変位の関係を梁せい・ラミナ厚・構成別に試験体数の多いものについては一例を図 3.3.1、図 3.3.2 に示す。図のように、縁応力－変位の関係から見られる破壊の形式は、弾性域で破壊するもの・塑性域に達して破壊するもの・一部が破壊したために荷重が下がってその後破壊するものという 3 つであった。弾性域で破壊した試験体が他の破壊状態の試験体よりも多かった。ここで述べる弾性域とは、縁応力－変位曲線が比例限にある状態のことを指す。

構成方法別に縁応力－変位の関係を見ると傾きの差は歴然としており、構成方法によって曲げヤング係数に違いが現れることがわかった。とくに、せいが等しく構成方法の異なるせい 600、450、300 の実験結果で見るとその傾向が明らかであることがわかる。しかし、せい 300 のラミナ厚の異なる集成材の実験結果よりラミナ厚の違いに曲げヤング係数への影響はないと言える。また、縦継ぎの有無による曲げヤング係数の差がないことも明らかである。

構成方法別に強度を比較すると、構成方法 1・4・5・6 の同等級に相当するものが比較的高強度であった。また、構成方法 5 の 3 点曲げおよび構成方法 6 の縦継ぎの無いものは特に高強度であった。3 点曲げに関しては、モーメント一定区間がないため、最大モーメント位置で破壊せずほかの位置で破壊するので高強度となり、縦継ぎの無いものは、縦継ぎという欠点要素がなくなるため高強度になった。ラミナ厚と強度の関係については若干の関係が見られ、ラミナ厚が薄くなった方が高い強度を示す傾向が見られた。しかし、縦継ぎの無い 24mm と 18・12mm を比較するとラミナ厚の薄いものの方が高強度となったが、12mm と 18mm で比較すると強度に逆転が起こり、ラミナ厚が薄くなると高強度になる傾向は見られず、欠点がない場合にはこの厚さの範囲では大きな影響がないことがわかった。また、縦継ぎの有無と強度の関係については平均で約 1.2 倍で縦継ぎの無いものの方が高強度になるという結果となった。この結果、縦継ぎは集成材のなかで強度に影響を与える大きな要因であると言える。

ここで、曲げヤング係数・ラミナ厚さと強度の関係を構成方法の違いから検討したが、より詳しい検討は次項以降で行う。

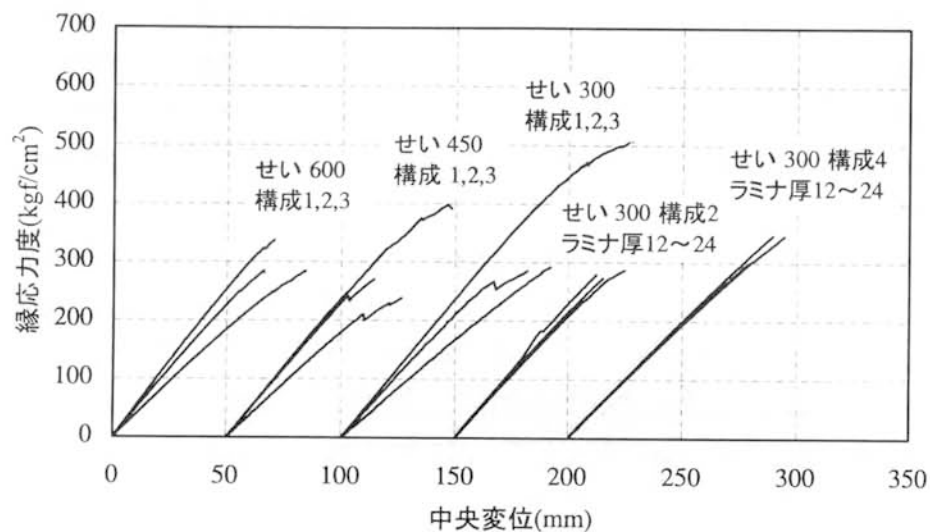


図 3.3.1 縁応力-中央変位曲線

注) せい 600 構成 1、2、3 以外は原点をオフセットした
せい 600、450、300 の試験体についてグラフ上の左側から
構成方法の 1、2、3 となっている

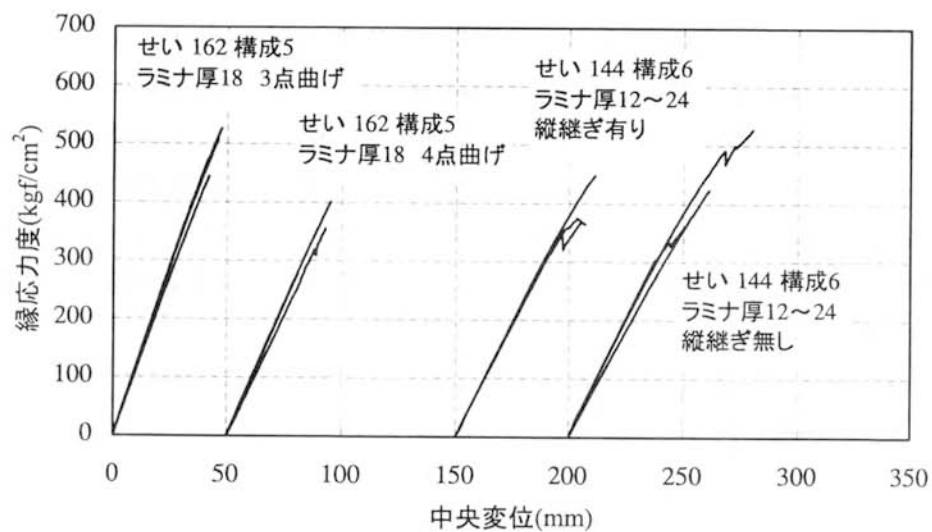


図 3.3.2 縁応力-中央変位曲線

注) せい 162 構成 5 ラミナ厚 18 3 点曲げ以外は原点をオ
フセットした

3.3.2 破壊性状

縦継ぎのある試験体の破壊性状は、大きく 2 つに分類される。それは、節が原因の破壊か、縦継ぎが原因の破壊である。それぞれの破壊形式について写真 3.3.1、写真 3.3.2 に示す。

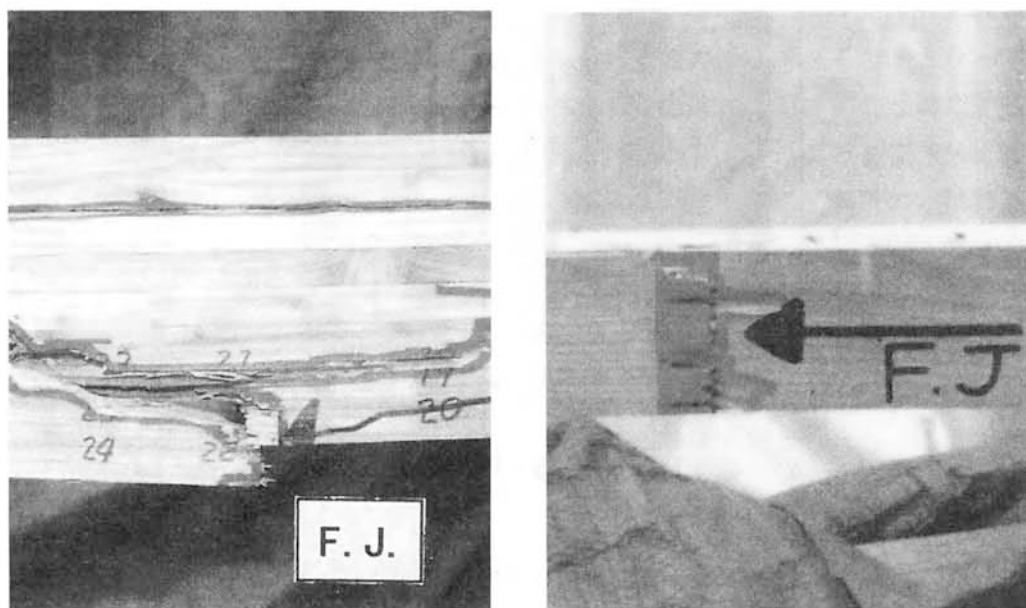


写真 3.3.1 縦継ぎ破壊

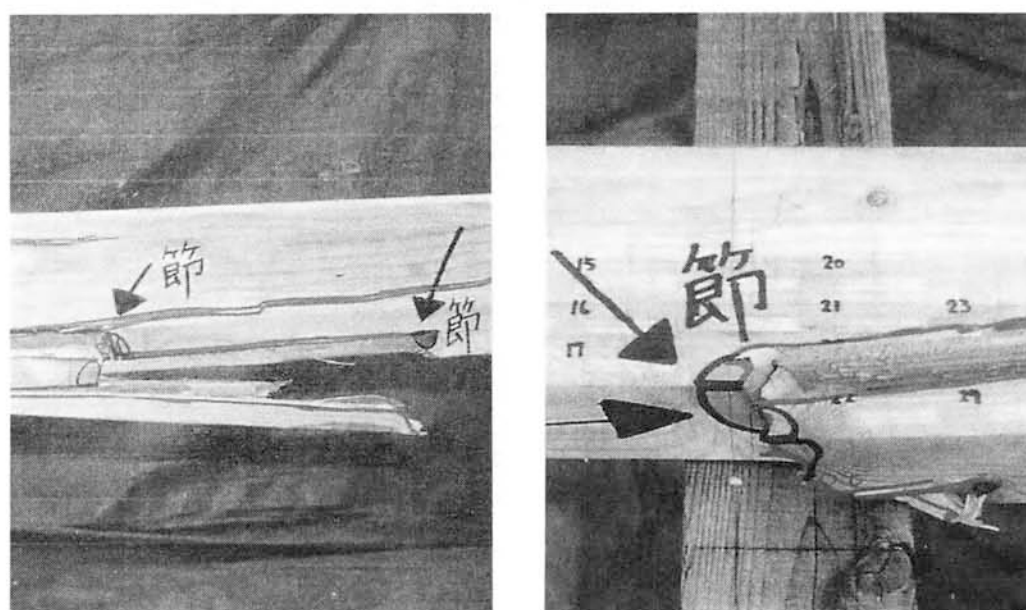


写真 3.3.2 節破壊

破壊形式の頻度について、縦継ぎ有り試験体の梁せい別の比較を行い、その結果を図 3.3.3 に示す。

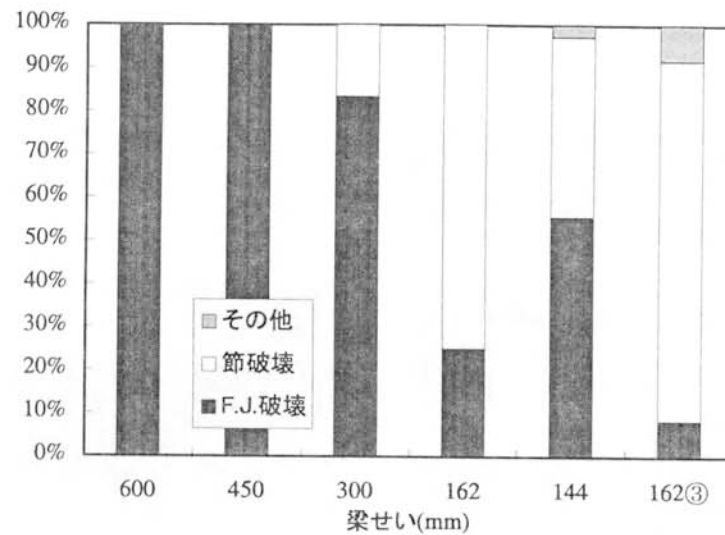


図 3.3.3 梁せい別の破壊形式の頻度

縦継ぎ有りでは、梁せいが異なることによる破壊形式の違いが見られる。梁せいが小さくなるに従って、節からの破壊の確率が高くなった。また、梁せい 162mm の試験体は、節破壊が多く、試験体の材料の違いおよび縦継ぎ効率の善し悪しにより多少の差があると考えられる。加えて、梁せいの大きな試験体は試験体数が 3 体と少ないため、この比較のみで断言することは出来ない。

次に、構成方法 6 の試験体についての破壊形式の違いを図 3.3.4 に示す。また、構成方法 6 の破壊形式別に強度を比較したものを表 3.3.2 と表 3.3.3 に示す。

同じ構成方法の試験体では、縦継ぎの有無に関係なくラミナ厚が厚くなるに従って節が破壊原因になる確率が高くなっている。そして、ラミナ厚 18mm ・ 24mm の縦継ぎ有りについては、縦継ぎ部分と節部分の破壊確率がほぼ等しくなった。これは、「第 2 章 集成材構成ラミナの強度」のラミナ厚が薄い方が節からの破壊の確率が高くなるとなっているという結果と逆になっている。この結果から、ラミナ厚の薄い方が、節の強度に対して積層されることによる補強の効果があつたと思われる。しかし、このことを定数的に評価することは、本研究からは困難であつた。また、破壊形式の違いによる強度の差はほとんど見られず、破壊形式から強度の高低を判断することはできない。

また、縦継ぎ無しの破壊性状は、ほとんどが唯一の表面にでている欠点である節からの破壊であつた。しかし、ラミナ厚の薄いものでは、破壊形式を特定できない破壊が見られた。これらは、母材で破壊している。最も高強度の破壊形式のはずであるのに強度が低く、目切れやくされなどの強度を下げる要因があつたのではないのかと考えているが特定できていない。

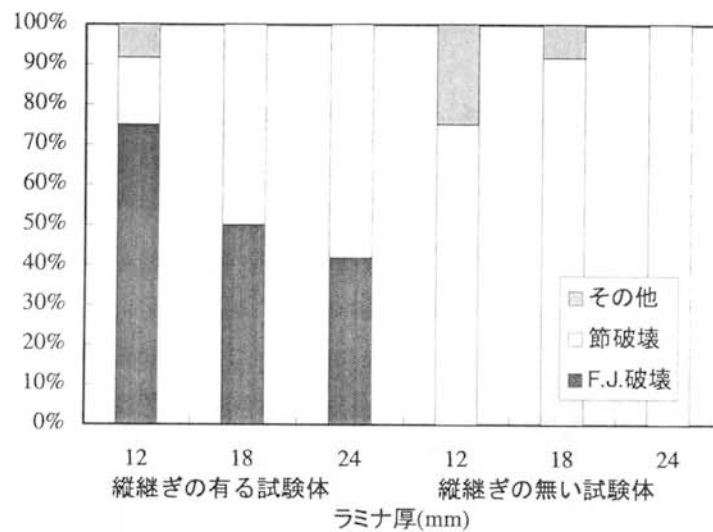


図 3.3.4 構成方法 6 のラミナ厚別と縦継ぎの有無による比較

表 3.3.2 縦継ぎの有る試験体の破壊形式別の試験体数とその平均強度(kgf/cm²)

ラミナ厚	縦継ぎ破壊		節破壊		その他	
	試験体数	強度	試験体数	強度	試験体数	強度
12mm	9	365.01	2	429.73	1	408.81
18mm	6	376.94	6	380.85	0	
24mm	5	326.30	7	328.45	0	
平均		358.91		362.91		408.81

表 3.3.3 縦継ぎの無い試験体の破壊形式別の試験体数とその平均強度(kgf/cm²)

ラミナ厚	節破壊		その他	
	試験体数	強度	試験体数	強度
12mm	9	429.73	3	404.70
18mm	11	380.85	1	342.53
24mm	12	328.45	0	
平均		374.95		389.16

次に載荷方法の違いによる破壊形式の違いについて表 3.3.4 に示す。前述したが、この試験体は、節破壊の率が高く単純比較は難しいが、この実験結果のみを見ると載荷方法の違いによる破壊形式の違いはないものと考えられる。

表 3.3.4 載荷方法の違いによる破壊形式別の試験体数とその平均強度(kgf/cm²)

載荷方法	縦継ぎ破壊		節破壊		その他	
	試験体数	強度	試験体数	強度	試験体数	強度
3点曲げ	1	443.96	10	401.81	1	447.44
4点曲げ	1	448.91	3	327.69	0	
平均	446.44		384.71		447.44	

3.3.3 ラミナ厚および縦継ぎの有無

実験から得られた曲げを受ける集成材はりの強度に関してラミナ厚と縦継ぎの有無の影響について興味深いいくつかの知見を以下に示す。特に、①、②は後述する強度推定モデルと関係するところである。

① 図 3.3.5 はラミナ厚と強度の関係を縦継ぎの有無について示したものである。また、図 3.3.6 は梁せい 300mm についてラミナ厚と強度の関係を示したものである。二つの図の縦継ぎ有り集成材では、明らかにラミナ厚の増加による強度低下が伺える。それに対して縦継ぎなし集成材では、その傾向は看取できないか、わずかである。この傾向を確実に把握するために、試験体数が多いはりせい 144mm に対するラミナ厚 12mm と 18mm、並びに 12mm と 24mm について、母平均が等しいと帰無仮説をおいて t 検定を行い、その結果を表 3.3.5 に示した。縦継ぎ有り集成材では、ラミナ厚 12mm と 24mm の強度に有意な差がみられるが、縦継ぎなし集成材ではラミナ厚が増加することによる有意な強度差はみられなかった。なお、各ラミナ厚の母分散について F 検定をしたところ、有意水準 5% では棄却域には至らず、等母分散を仮定した。母分散に有意な差はみられなかったが、表 3.3.6 に示す変動係数のとおり、ラミナが薄くなるとバラツキが小さくなる傾向がある。特に縦継ぎ無し集成材で顕著である。

表 3.3.5 ラミナ厚と強度低下に関する t 検定の結果

	縦継ぎ有り	縦継ぎなし
12-18	0.022	0.861
12-24	2.223	0.249

注 1) 有意水準 5% の棄却域は $t(22;0.05) = 2.074$

注 2) 12-18 は、ラミナ厚 12mm と 18mm の比較を意味する (12-24 も同じ)

表 3.3.6 変動係数の整理

	縦継ぎ有り	縦継ぎなし
12mm	0.155	0.127
18mm	0.147	0.154
24mm	0.169	0.169

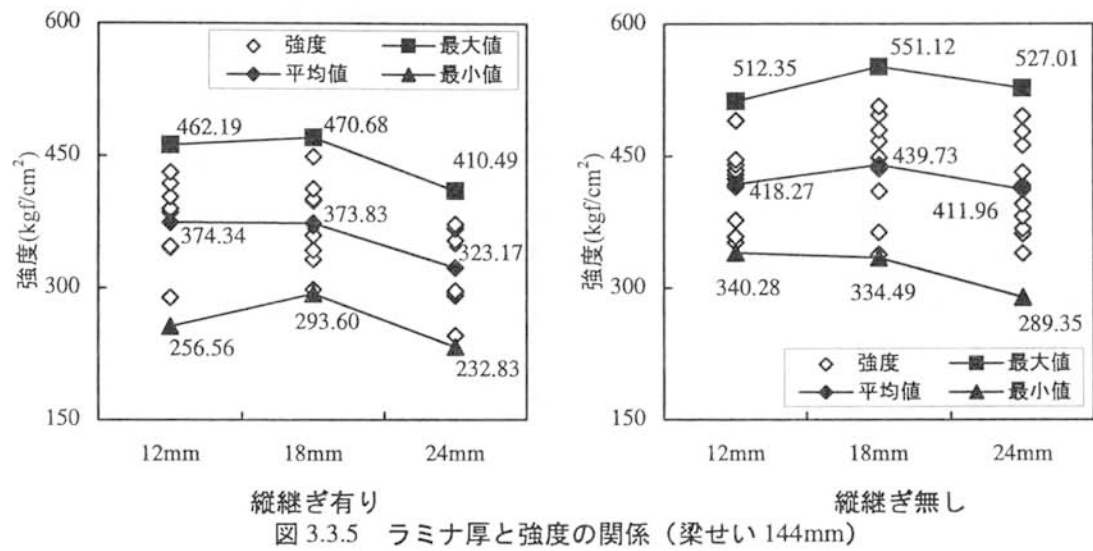


図 3.3.5 ラミナ厚と強度の関係 (梁せい 144mm)

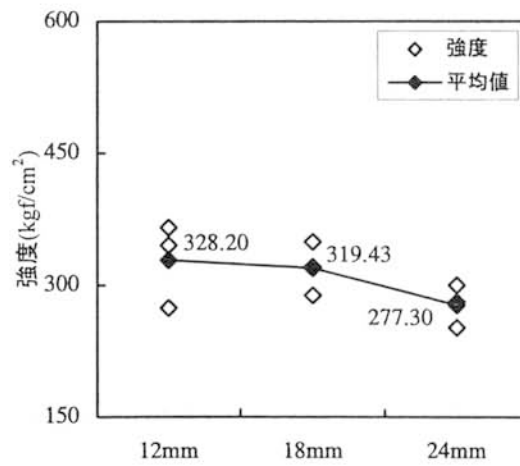


図 3.3.6 ラミナ厚と強度の関係 (梁せい 300mm)

② 今回用いた縦継ぎ形状における強度差を図 3.3.5 で比較すると、縦継ぎ有りの強度は、縦継ぎなしに比べて 78%～89%に低下した。この傾向はラミナ厚が増加するほど顕著にみられる。表 3.3.7 には縦継ぎの有無に関係なく母平均が等しいと帰無仮説をおいた t 検定値を示したが、ラミナが厚いと低下率が大きくなる傾向が統計的にも明らかである。

表 3.3.7 縦継ぎの有無に対する t 検定の結果

	12mm	18mm	24mm
t_0	1.932	2.613	3.467
t	2.074		

3.3.4 弾性係数

弾性係数を比較するため、表 3.3.8 と表 3.3.9 に実験結果を示す。なお、表 3.3.8 については、試験体数が多いため、平均値のみを示す。また、断面の大きな試験体についてはせん断弾性係数も求めたので、併せて示す。これらの結果より以下のことがわかった。

① 打撃法およびグレーディングマシンにより求めたラミナのヤング係数を用い、式 3.3.1) によって算出した集成材のヤング係数は、実験で得られたヤング係数の 0.94～1.02 倍であり、良好な一致がみられた（表 3.3.8、表 3.3.9）。つまり、ラミナのヤング係数から集成材の曲げヤング係数を算出することが可能である。なお、表 3.3.9 におけるせん断弾性係数とも関係するが、せん断たわみ分も付加された見かけの曲げヤング係数は、実際の曲げヤング係数より 10%ほど小さい。

また、集成材自体を打撃する事により得られた固有振動数から求めた 2 種類のヤング係数^{304), 305)}の比較を表 3.3.8 に示す。それぞれのヤング係数の求め方については、「1.3 用語の説明」を参考にされたい。この結果、式 3.3.1) で求めたものが最も適合度が高いことがわかる。しかし、打撃法で求めたそれぞれのヤング係数については若干大きくでているものの安全率を見ることにより、ヤング係数を算定可能であることが確認された。

② 積層ラミナのヤング係数の平均値を、荷重方向と平行する集成材のヤング係数 $E_{//y-y}$ として $G/E_{//y-y}$ を求めたところ、1/14.1～1/56.0 の範囲にあり、平均は 1/28.3 であった。木質構造設計規準⁶⁾の値 1/15 はほぼ上限値であり、実験結果の平均値はほぼ半分であることがわかった（表 3.3.9）。

表 3.3.8 ヤング係数

試験体名	実験 E	計算 E	Ef	Efh	実験 E/計算 E
F.J.12	104.0	104.9	107.2	105.3	0.99
F.J.18	102.8	103.7	106.6	105.7	0.99
F.J.24	95.6	101.9	101.8	100.0	0.94
NO12	104.2	104.5	106.9	105.3	1.00
NO18	104.5	104.9	106.4	105.0	1.00
NO24	99.8	102.9	104.2	103.2	0.97
T	100.6	106.6	112.3	108.8	0.94
F	101.1	106.5	112.4	109.5	0.95

(単位： $\times 10^3 \text{kgf/cm}^2$)

表 3.3.9 ヤング係数とせん断弾性係数

はり幅	はりせい	構成方法	ラミナ厚	実験 E	実験 G	見かけ E	計算 E	実験E/計算E	G/E _{y-y}
150	600	1	25	126.4	7.7	115.8	130.4	0.97	1/16.6
150	600	2	25	113.3	2.3	88.6	115.2	0.98	1/46.0
150	600	3	25	88.6	5.3	81.1	91.1	0.97	1/16.3
150	450	2	25	116.9	5.3	107.4	117.4	1.00	1/20.1
150	450	3	25	89.9	5.0	83.9	92.8	0.97	1/18.1
150	300	1	25	129.3	4.7	121.4	132.0	0.98	1/28.1
150	300	2	25	120.0	3.6	111.2	120.1	1.00	1/30.8
150	300	3	25	93.4	2.7	86.5	93.3	1.00	1/33.8
150	300	2	12	122.2	3.4	112.6	123.9	0.99	1/32.4
150	300	2	12	122.3	3.6	113.4	120.9	1.01	1/29.5
150	300	4	12	110.5	2.8	101.2	108.3	1.02	1/38.8
150	300	2	18	124.0	2.7	111.8	123.1	1.01	1/40.0
150	300	2	18	117.0	4.4	110.2	122.7	0.95	1/23.6
150	300	4	18	112.6	5.3	107.2	115.4	0.98	1/21.2
150	300	2	24	122.6	7.1	117.8	129.1	0.95	1/15.9
150	300	2	24	122.1	7.9	117.8	129.5	0.94	1/14.1
150	300	4	24	117.5	2.1	103.7	117.8	1.00	1/56.0
平均								0.98	1/28.3

注 1) はり幅、はりせい、ラミナ厚 mm E、G $\times 10^3 \text{kgf/cm}^2$

注 2) ヤング係数、せん断弾性係数などについて正確な値があるもののみ

3.4 曲げ破壊に至る過程の分析

3.4.1 ひずみ分布

モーメント一定区間中央部の両側面に配付したひずみゲージの値より、測定された各層のラミナのひずみ分布を図 3.4.1(6-1)と図 3.4.2(8-1)に異なる 2 例として示す。縦軸は、上側が梁の圧縮側であり、下側が梁の引張側である。ひずみ分布の図は、総荷重が長期許容荷重および最大荷重に達した時点のものである。この長期許容荷重は、「木質構造設計基準・同解説」³⁰⁶⁾に記載されている構造用集成材の長期許容応力度より算定した。

ほとんどの試験体におけるひずみの分布は、図に示すような最大荷重時にわずかに圧縮側が非線形になった後破壊する 6-1 と、ほぼ直線域のまま破壊に至る 8-1 のような試験体の 2 タイプと引張側のひずみゲージが切れてしまうタイプである。このことより、ひずみは破壊直前まではほぼ直線であるが、非線形領域に達するものがあることがわかった。そこで、非線形領域に達すると中立軸の移動があるので、次項で中立軸の移動について検証した。

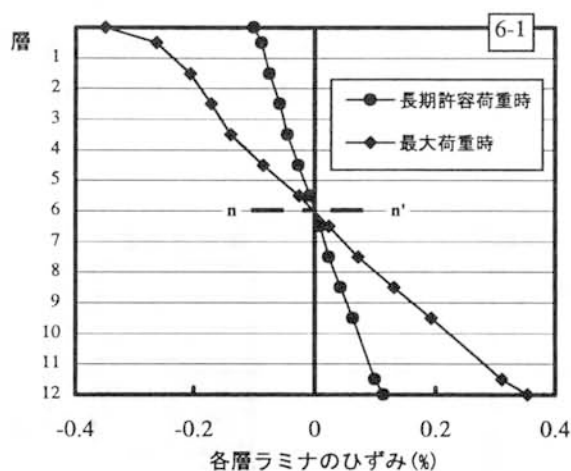


図 3.4.1 試験体断面内のひずみ分布 (6-1)

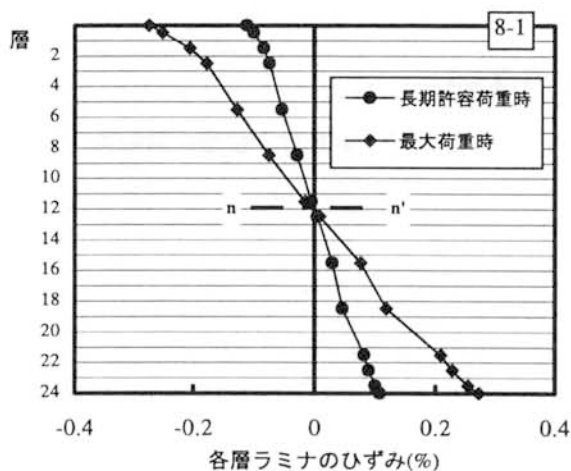


図 3.4.2 試験体断面内のひずみ分布 (8-1)

3.4.2 中立軸の移動

前項で考察したひずみの分布において、非線形を示すものがあつた。非線形領域に達していることから、中立軸の移動があつたと考えられる。ここで、梁せい $600 \cdot 450 \cdot 300\text{mm}$ の試験体について、ひずみゲージの値から、中立軸の移動について検討した。

中立軸の位置の求め方

中立軸の位置の計算には、モーメント一定区間の中央部両側面の積層ラミナごとに貼ったひずみゲージの値を用いた。ここでは、図 3.4.3 に示すようなラミナの局所的な破壊が生じていないと考えられる内層ラミナのひずみの値($\varepsilon_1 \sim \varepsilon_7$)を対象として最小二乗法による回帰直線の ± 0 点位置を元に算出した。 ± 0 点位置となる切片を集成材断面の下面からの距離 y を中立軸の位置とした。

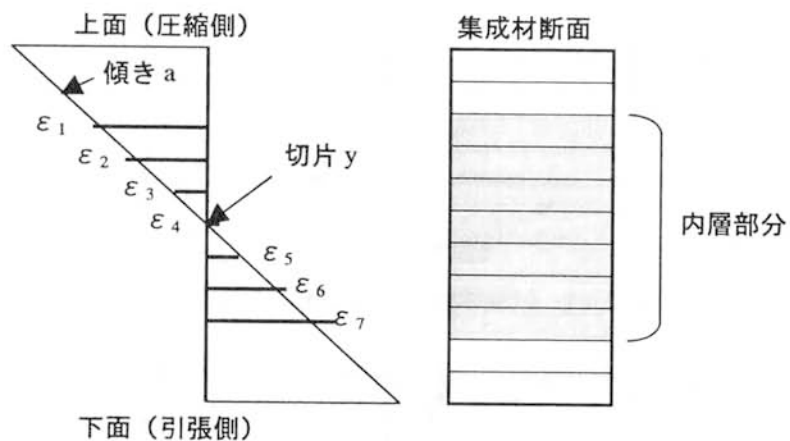


図 3.4.3 中立軸の位置の求め方

中立軸の移動の性状について

ここで、求めた中立軸の移動の性状についてまとめた結果、すべての実験結果を図 3.4.4 および図 3.4.5 のように分類することができた。なお、ここでいう縁応力とは、中央部の曲げモーメントを初期の断面係数で除したものである。

いずれも曲げ応力度が小さい範囲では安定に欠け、 50kgf/cm^2 を越えたあたりで安定し、その後それぞれ特徴的な進行を示した。a)は移動せずほぼ一定位置にとどまっているもの、b)は徐々に引張側へ移動したもの、c)は徐々に圧縮側へ移動したもの、d)は突然圧縮側へ移動し、その後も急勾配で圧縮側へ向かったものである。これらの現象は、a)圧縮側の塑性化や引張側の破壊による応力の再配分が起こる前に破壊した、b)圧縮側の塑性化が起こった、c)、d)引張側の破壊によって応力の再配分が起こった、とそれぞれ説明できる。c)と d)の違いは、ラミナの割れが徐々に進行したものと瞬間的に割れが入ったものの違いと考えられる。また、d)の中立軸の移動は最大でラミナ厚の半分であった。中立軸がラミナ厚の半分の移動をした場合は、材軸中央部付近でラミナが破壊に至り、その付近の最外層ラミナが完全に応力を負担できなくなったことを示している。

検討した梁せい $600 \cdot 450 \cdot 300\text{mm}$ の試験体については、梁せいおよびラミナ厚に関係する傾向はなかった。

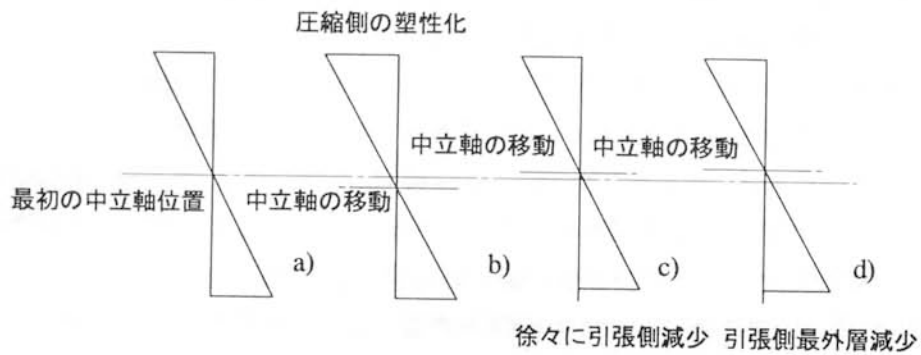


図 3.4.4 モーメント一定区間の断面のひずみの分布

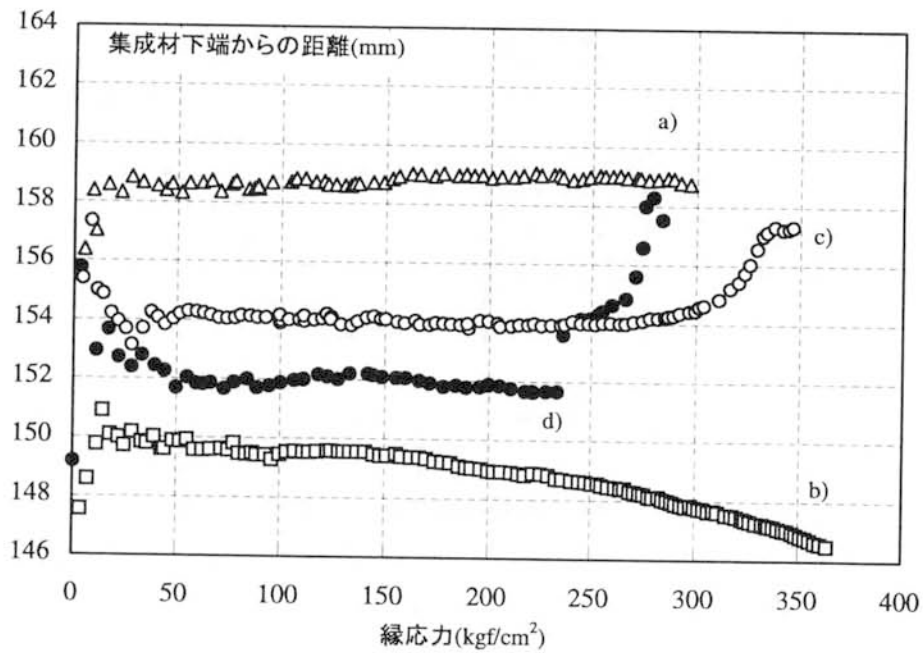


図 3.4.5 中立軸の移動

注) この図に示した試験体はすべて梁せい 300mm のものである

3.4.3 応力の再配分現象

曲げを受ける集成材の破壊は、引張側からの破壊を発端として起こることが一般的である。その引張側では、最外層あるいはそれに近いラミナが強度に至り破壊、そして残存するラミナに応力が再配分されるといった過程を繰り返えすと考えられている。すなわち、曲げ破壊は残存ラミナで応力を支えきれなくなった時点で起こる。しかし、この応力が再配分される破壊過程は、引張荷重³⁰⁷⁾あるいはせん断荷重³⁰⁸⁾に対してシミュレーション的に検証した例はあるものの、実体は全く明らかではない。そこで、ラミナの主たる破壊要因である縦継ぎや節のような欠点と、その周辺に貼付したひずみゲージにより、応力の再配分現象の把握を試みた。

図 3.4.6 は、応力の再配分現象の把握に用いた載荷荷重－ひずみ関係の一例を示したものである。なお、番号は集成材側面に貼付したひずみゲージに記した通し番号であり、それらの位置を図 3.4.8 中に示した。ここで、ゲージ 11 番が限界値を超えた直後のゲージ 8、18、19 番の状態変化をみると、荷重が減少したにもかかわらず、18、19 番のひずみの値が増加していることがわかる。塑性化することなくほとんど脆性的に破壊するラミナの引張破壊を勘案するに、これは、11 番のゲージを貼付した部分が切れ、相応の応力が他の部分に分配され、それがひずみの伸張として現れたものと考えられる。これとは逆に 8 番のゲージの値は、荷重が減少した際に元の直線に戻らず、元よりも小さいひずみとなった。これは、積層面ではがれたために、はがれた部分が一体性を失い応力を負担しなくなったと考えられる。このように荷重の変化とひずみの伸縮より、応力の再配分現象を判断した。例示する二つの試験体の荷重－中央部変位関係を図 3.4.7 に示した。●は図 3.4.8 および図 3.4.9 に示した状態の点である。応力の再配分は破壊直前のわずかな間に生じているわけではなく、最大荷重の 70%～80%が開始時期であった。

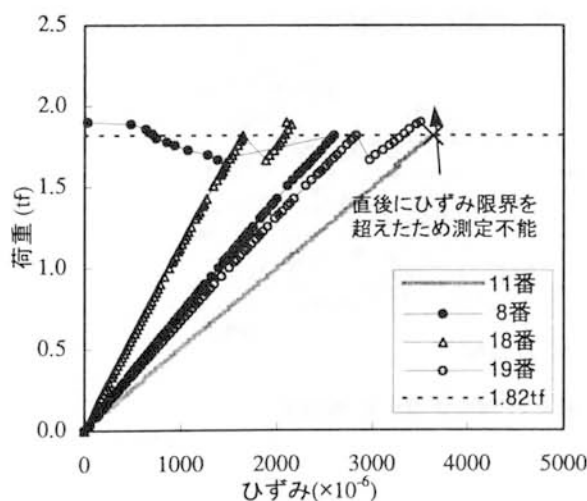


図 3.4.6 荷重－ひずみ関係の一例
(はりせい 144mm ラミナ厚 24mm)

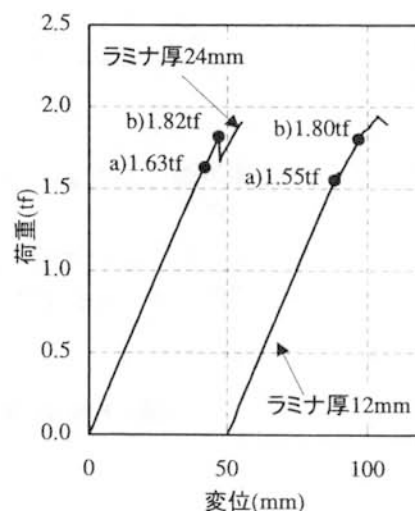


図 3.4.7 荷重－変位関係

図 3.4.8 は、はりせい 144mm、ラミナ厚さ 24mm の応力の再配分現象を示したものである。まず、1.63tf で最外層節部に近いおもて面のひずみゲージが限界を超え、同時にこれに隣接する同じ層のひずみが減少し、そして内層とうら面のひずみが増加した。この状態は、最外層ラミナの節を発端として断面の破壊と積層面のはがれが始まり、相応の応力が内層並びにうら面に分配され、曲率に変化したと考えられる。次に 1.82tf で節部に近いうら面のひずみゲージが限界値を超えた。この時点で、節を発端とした割れが全断面にわたって広がり、このラミナが切断されたと考えられる。このとき同じラミナでうら面の縦継ぎ位置ではひずみがほぼゼロとなり、おもて面では増加した。そして、内側の層も増加した。これは最外層ラミナの断面が破壊すると同時に積層接着層に割れが広がり、うら面では部分的に一体性を失った。そして、依然として部材と一体化しているおもて面や内層に応力の再配分がなされ、以前とは異なる曲率で抵抗する形態となったと考えられる。なお、この集成材の最終的な破壊は縦継ぎからであった。

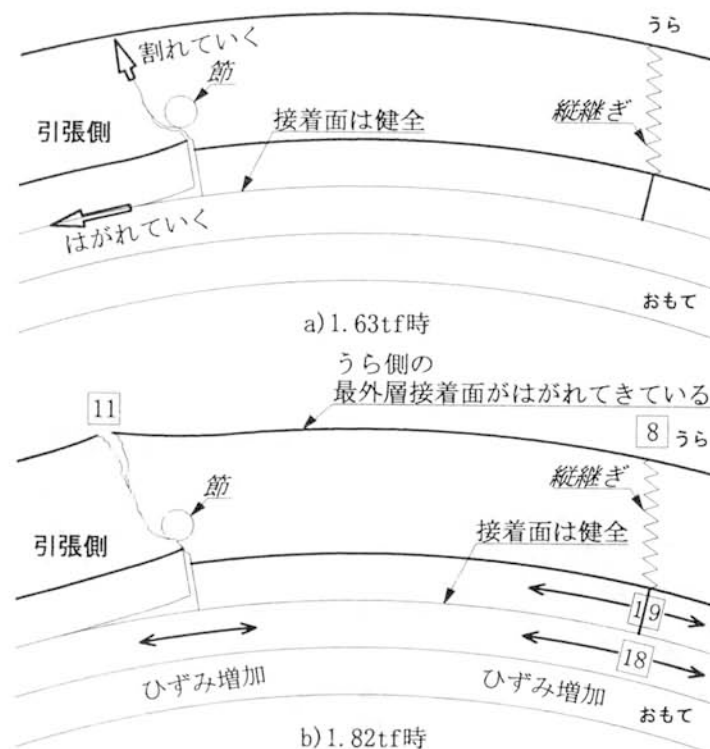


図 3.4.8 はりせい 144mm ラミナ厚 24mm

図 3.4.9 には縦継ぎを発端とする破壊の例として、はりせい 144mm、ラミナ厚 12mm の現象を示した。まず、1.55tf で最外層の縦継ぎに貼付したひずみゲージが限界値を超えた。このとき縦継ぎの両端のひずみはほとんどゼロまで減少し、内側のラミナはおもて面が増加、うら面が減少した。1.80tf では内層の縦継ぎ位置でおもて面が減少、うら面が増加した。これはおもて面より縦継ぎが割れ、応力が配分された結果と解釈することができる。この集成材では最終的に 1.90tf で最外層の縦継ぎを発端とする破壊が起きた。つまりこの試験体は、最外層の縦継ぎを発端として破壊が始まり、内側の層では表面の部分が一体性を失い、うら面は断面と一体のままで抵抗した後、破壊に至った。

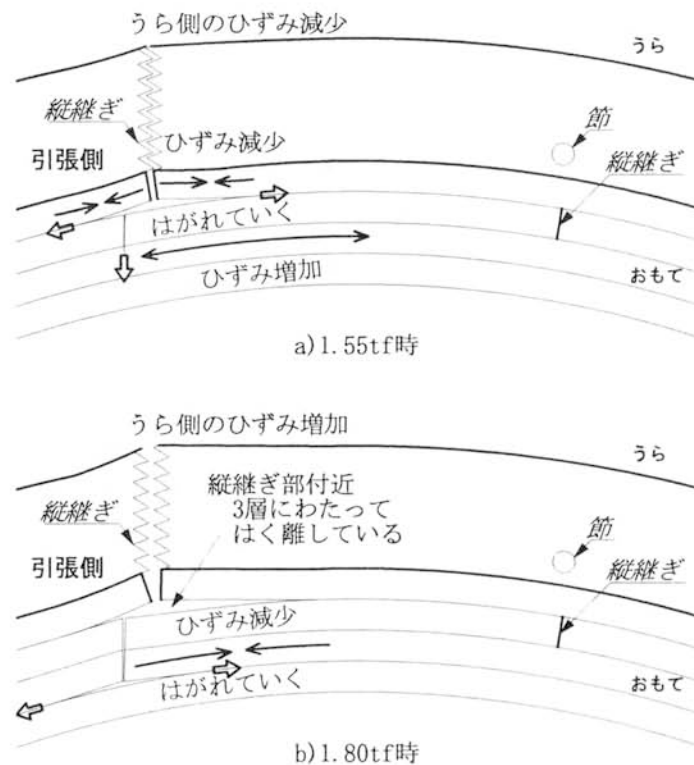


図 3.4.9 はりせい 144mm ラミナ厚 12mm

上記の分析を全試験体に試みた結果、現象として確実に把握でき、強度推定モデルに関連する事項として、以下があげられる。

- ① 最外層あるいはそれに近い層の欠点部分を発端として起こった割れは、発端部分から常に材軸方向に直交して進み、ラミナ全断面の切断につながるわけではない。繊維あるいは積層面に沿って進む、場合によっては隣接層へ割れが進む場合もある。
- ② 欠点を発端とした割れとほぼ同時に積層接着部分が剥がれ、内層部分と一体性を失う部分もあれば、積層接着部分が健全で、割れた一部を除いて一体性を保ったまま応力を負担する部分もある。材軸に沿って割れが進んで、同一ラミナの“おもて”と“うら”でこの現象が見られることもある。
- ③ 最初に割れが生じた場所から最終的な破壊現象が起こる場合もあれば、そうでない場合もある。例えば、縦継ぎでラミナの全断面にわたる破断が見られた後、続いて節部分を発端として割れが生じ、そこで最終的な破壊現象が起こる場合もある。また、逆に節部分が最初で、縦継ぎで最終的な破壊に至る場合もある。

以上のように、破壊過程を正確に再現する強度推定モデルでは、これまで提案されてきたモデルと異なり、材軸方向に分布する欠点すべてに対する破壊の考慮、割れの進展への考慮が必要である。しかし、割れの範囲についての特定には至らなかった。

次に、梁せい 144mm の試験体を対象に引張側の欠点で応力の再配分現象が生じているか否かを調査した結果を表 3.4.1 に示した。なお、母集団である同一条件の試験体数は 12 であり、それぞれの試験体数を示している。ここで、応力の再配分現象は、欠点部分とその周辺のひずみの増減より判断した。また、ここで取り上げた欠点は縦継ぎと節であり、縦継ぎについては最外層とその内側の層で調査したが、内側の層では 1 カ所で再配分がみられただけであったので、最外層のみを対象としている。各試験体においてモーメント一定区間における最外層の縦継ぎは 1 カ所である。節については最外層を対象に極めて小さいものを除いて調査した。

結果をみると、縦継ぎ有りでは、ラミナが薄くなると縦継ぎで再配分現象が起こりやすく、破壊の発端は縦継ぎとなる場合が多い。ラミナが厚くなると、節での再配分現象が増え、節での破壊も多く起こる。縦継ぎ無しでは、ラミナが薄いと再配分現象はみられなくなり、破壊も大きな節からではないものが増えている。加えて、縦継ぎ無しでは、ラミナ厚による有意な強度差がみられなかったが、その破壊現象はこのように異なる。

表 3.4.1 応力の再配分と測定個所からの破壊の数

ラミナ厚 (mm)	縦継ぎ有り			縦継ぎ無し	
	縦継ぎ	節	破壊	再配分	破壊
12	7	1	11(2)	2	4
18	5	1	12(6)	7	6
24	2	3	12(7)	8	10

縦継ぎ有りの“縦継ぎ”は縦継ぎでの再配分を指す。“節”は節での再配分を指す。

破壊は調査した欠点から破壊した数。破壊の()の数値は節を発端とする破壊の数を指す。

3.4.4 単一ラミナとしての縦継ぎ部分の強度に関する検討

これまで曲げを受ける集成材の強度推定において、ラミナの強度は、引張応力と曲げ応力が同時に作用する複合応力の影響と、積層接着による補強効果を加味し、単一ラミナの引張強度と曲げ強度の実験結果をもとに決定されていた。ここでは、縦継ぎについてだけではあるが、集成材中の単一ラミナの縦継ぎで応力の再配分現象が起こった時点の作用応力から曲げ応力の影響を差し引いた応力を、縦継ぎを持つラミナの単純引張実験の強度と比較することにより、補強効果について検討した。

式 3.4.1)は集成材が曲げモーメントを受けた際の、任意ラミナの材厚中心におけるひずみと曲げモーメントの関係を表したものである。

$$\varepsilon_i = \frac{x_i}{E_i I_{i-NN}} M \quad 3.4.1)$$

ε_i : i 層ラミナのひずみ
 M : 作用曲げモーメント
 E_i : i 層ラミナのヤング係数
 I_{i-NN} : 中立軸に対する断面 2 次モーメント
 x_i : i 層ラミナの材厚中心から中立軸までの距離

任意のラミナの曲げ応力成分に相当するひずみ ${}_b\varepsilon_i$ は、ラミナ厚さ分のひずみの差であり、式 3.4.2)で表される。

$${}_b\varepsilon_i = \frac{t_i/2}{E_i I_{i-NN}} M \quad 3.4.2)$$

t_i : i 層ラミナの材厚

また、ひずみと応力の関係は説明するまでもなく初等の材料力学より式 3.4.3)のとおりである。

$$\sigma_i = E_i \varepsilon_i \quad 3.4.3)$$

σ_i : i 層ラミナの応力

単一ラミナの材厚中心の応力を引張応力とみなし、式 3.4.1)～3.4.3)を整理することにより、集成材中の単一ラミナに作用する曲げ応力と引張応力の関係式、式 3.4.4)が得られる。

$$\sigma_b = \frac{t_i}{2x_i} \cdot \sigma_t \quad 3.4.4)$$

σ_b : ラミナの曲げ応力

σ_t : ラミナの引張応力

引張応力と曲げ応力が同時に作用する複合応力場の破壊条件式としては、式 3.4.5)、あるいは 3.4.6) が用いられる。

$$\frac{\sigma_b}{f_b} + \frac{\sigma_t}{f_t} = 1 \quad 3.4.5)$$

$$\left(\frac{\sigma_b}{f_b} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{f_t} \right)^2 = 1 \quad 3.4.6)$$

f_b : ラミナの曲げ破壊係数

f_t : ラミナの引張強度

式 3.4.4) を式 3.4.5)、あるいは 3.4.6) に代入し、式 3.4.7)、3.4.8) が得られる。

$${}_1\sigma_t = 1 / \left\{ \left(\frac{t}{2f_b x_i} \right) + \left(\frac{1}{f_t} \right) \right\} \quad 3.4.7)$$

$${}_2\sigma_t = \sqrt{1 / \left\{ \left(\frac{t}{2f_b x_i} \right)^2 + \left(\frac{1}{f_t} \right)^2 \right\}} \quad 3.4.8)$$

式 3.4.7)、3.4.8) に f_t 、 f_b を代入し得られる σ_t は、曲げ応力による強度低下を加味したラミナの引張強度である。今回分析対象とした集成材の最外層について、曲げ応力付加による強度低下の割合 σ_t / f_t を求め、表 3.4.2 に示した。なお、 f_t 、 f_b は第 2 章で行ったラミナ単体の実験結果を基に打撃法で求めたヤング係数 E_f を説明変数として定義した回帰式に、分析対象の最外層ラミナのヤング係数 E_f を代入して求めた。さらに、これら f_t 、 f_b がヤング係数の変化に対してさほど敏感には反応しなかったため、同一条件下の試験体のヤング係数として、最外層ラミナの平均的な値を代入した。

表 3.4.2 曲げ応力付加によるラミナの引張強度低下

はりせい (mm)	ラミナ厚 (mm)	ヤング係数 ($\times 10^3 \text{kgf/cm}^2$)	$^1\sigma_t/f_t$	$^2\sigma_t/f_t$
600	25	140.6	0.97	1.00
450	25	138.1	0.96	1.00
300	25	135.9	0.94	1.00
300	12	164.8	0.97	1.00
300	18	150.3	0.95	1.00
300	24	162.5	0.93	1.00
144	12	113.3	0.95	1.00
144	18	113.7	0.92	1.00
144	24	110.6	0.89	0.99

注) ひずみゲージを配布した試験体についてのみである

結果、曲げの影響を過大に評価する式 3.4.7) の 1 次式で曲げによる引張強度の低下は最大 10% 見込まれ、2 次式ではほとんど低下はみられない。ラミナの破壊直前にかかっていた引張応力を計算するため、この低下率の逆数を乗じ、曲げ応力の影響を差し引いた。具体的には、応力の再配分が明らかに生じた時点あるいは中立軸が移動した時点のひずみを基に式 3.4.3) で作用応力を求めた。これに曲げ応力による強度低下の影響の大きい 1 次式の低下率の逆数を乗じ、これを積層ラミナの引張強度とみなした。図 3.4.10 はその結果をラミナ単体の引張実験において縦継ぎで破壊したラミナの引張強度とヤング係数の関係の中にプロットしたものである。ヤング係数の高い範囲では若干大きめの結果もあるが、ほとんど違いはみられない。また、ラミナ厚の違いによる強度差も見られないことから、次にラミナ厚が異なることによって縦継ぎ部分に補強効果があるかについて統計的に検証した。

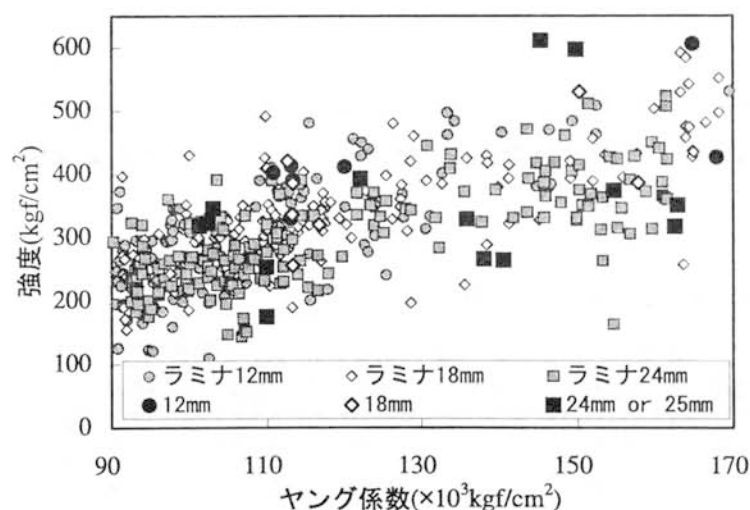


図 3.4.10 積層状態にあるラミナの引張強度と単純引張強度の比較

統計的な検証方法として、回帰曲線の傾きと切片が等しいとし帰無仮説をおいて、 t 検定を用いる。なお、これまで実施したラミナ厚の異なる引張実験において、ヤング係数が $160 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ を越えるような高い範囲では、ラミナが厚くなると強度低下する現象がみられた。そこで、比較は厚さ別におこなった。 t_0 は、

傾きについて

$$t_0 = \frac{\beta_1 - \beta_{10}}{\sqrt{V_e / S_{xx}}} \quad (3.4.9)$$

切片について

$$t_0 = \frac{\beta_0 - \beta_{00}}{\sqrt{\left(\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{S_{xx}}\right) V_e}} \quad (3.4.10)$$

- β_1 : 集成材内のラミナに関する回帰直線の傾き
- β_{10} : ラミナの単純引張実験の回帰直線の傾き
- β_0 : 集成材内のラミナに関する回帰直線の切片
- β_{00} : ラミナの単純引張実験の回帰直線の切片
- V_e : 積層材の残差分散推定値
- S_{xx} : 積層材ヤング係数の平方和
- n : 積層材のデータ数
- \bar{x} : 積層材ヤング係数の平均

で与えられる。結果をまとめたものが表 3.4.3 である。傾き、切片ともに仮説は棄却されない。つまり最外層の縦継ぎの引張強度に、積層による有意な補強効果を見いだすことはできなかった。

表 3.4.3 縦継ぎの補強効果に関する t 検定

		12mm		18mm		24mm	
		傾き	切片	傾き	切片	傾き	切片
t	1 次	0.443	0.912	0.384	0.504	0.330	0.443
	2 次	0.425	0.759	0.340	0.335	0.443	0.450
t_0		2.447		2.571		2.179	

注) 1 次は曲げの影響を 1 次式により評価したもの、2 次は 2 次式により評価したもの。

3.5 本章のまとめ

本章では、集成材の曲げ強度特性を明らかにすることと破壊に至る過程を解明することを目的として実大曲げ実験を行い、検討した。以下に、得られた結論を示す。

集成材の強度特性について

- ①構成方法によって強度が大きく異なり、同等級集成材が高強度になることがわかった。
また、縦継ぎ無しは有りの1.2倍の強度を持つことがわかった。
- ②破壊性状については、縦継ぎ破壊と節破壊があり、まれに母材破壊するものがあった。
梁せいが小さくなるに従って節破壊の頻度が増え、ラミナが薄くなるに従って縦継ぎ破壊の頻度が増えることがわかった。
- ③縦継ぎ有無を問わず、ラミナが薄くなることによって変動係数が小さくなる傾向が見られる。また、強度に関しては、縦継ぎ有りについてはラミナが薄くなるに従って高くなる傾向にあるが、縦継ぎ無しにはそのような傾向が見られない。
- ④集成材のヤング係数は、ラミナの曲げヤング係数より計算可能であることがわかった。

破壊に至る過程の分析について

- ⑤集成材は強度の7~8割の応力で破壊を始め、中立軸の移動を伴いながら、応力の再配分をすることがわかった。この中立軸の移動には、変化しないもの、圧縮塑性によって引張側に下がってくるもの、徐々に引張側が破壊していき圧縮側にあがっていくもの、最外層ラミナが完全に破断し一挙に圧縮側にあがっていくものの4種類が見られた。
- ⑥応力の再配分現象の検討より、最初に割れが生じた場所から最終的な破壊現象が起こる場合もあれば、そうでない場合もあることなどがわかった。
- ⑦縦継ぎ有りでは、ラミナが薄くなると縦継ぎで再配分現象が起こりやすく、破壊の発端は縦継ぎとなる場合が多い。ラミナが厚くなると、節での再配分現象が増え、節での破壊も多く起こる。
- ⑧縦継ぎ無しでは、ラミナが薄いと再配分現象はみられなくなり、破壊も大きな節からではないものが増えている。
- ⑨積層状態にあるラミナの縦継ぎ部分の補強効果について検討した結果、補強効果がほとんど見られないことがわかった。

第 4 章

- 4.1 本章の目的
- 4.2 破壊過程を再現するために取り入れる仮定
- 4.3 モデルの概要
- 4.4 本章のまとめ

4.1 本章の目的

前章までの実験結果の整理により、集成材を構成するラミナの強度特性、集成材の曲げ強度特性および破壊に至る過程の分析を行った。その結果、集成材の曲げ強度推定に必要なであると思われる因子を見つけた。

そこで本章では、集成材の曲げ破壊に至る過程をより忠実に再現しながら曲げ強度を推定する、汎用性のあるモデルの提案を行うことを目的とする。まず、破壊課程を再現するために取り入れなければならない仮定を示す。次に、モデルの概要について説明する。ここでいうモデルの概要とは、破壊や作用応力や降伏点の評価方法、強度の与え方、集成材の割れの進展についてである。このモデルを用いて第5章で曲げ強度の推定を行う。また、汎用性を明らかにするために「エンジニアリングウッド性能評価事業」のスギ材⁴⁰⁾にお蔵る実験についても第5章で検討を行うため、そのデータも本章で併せて示した。

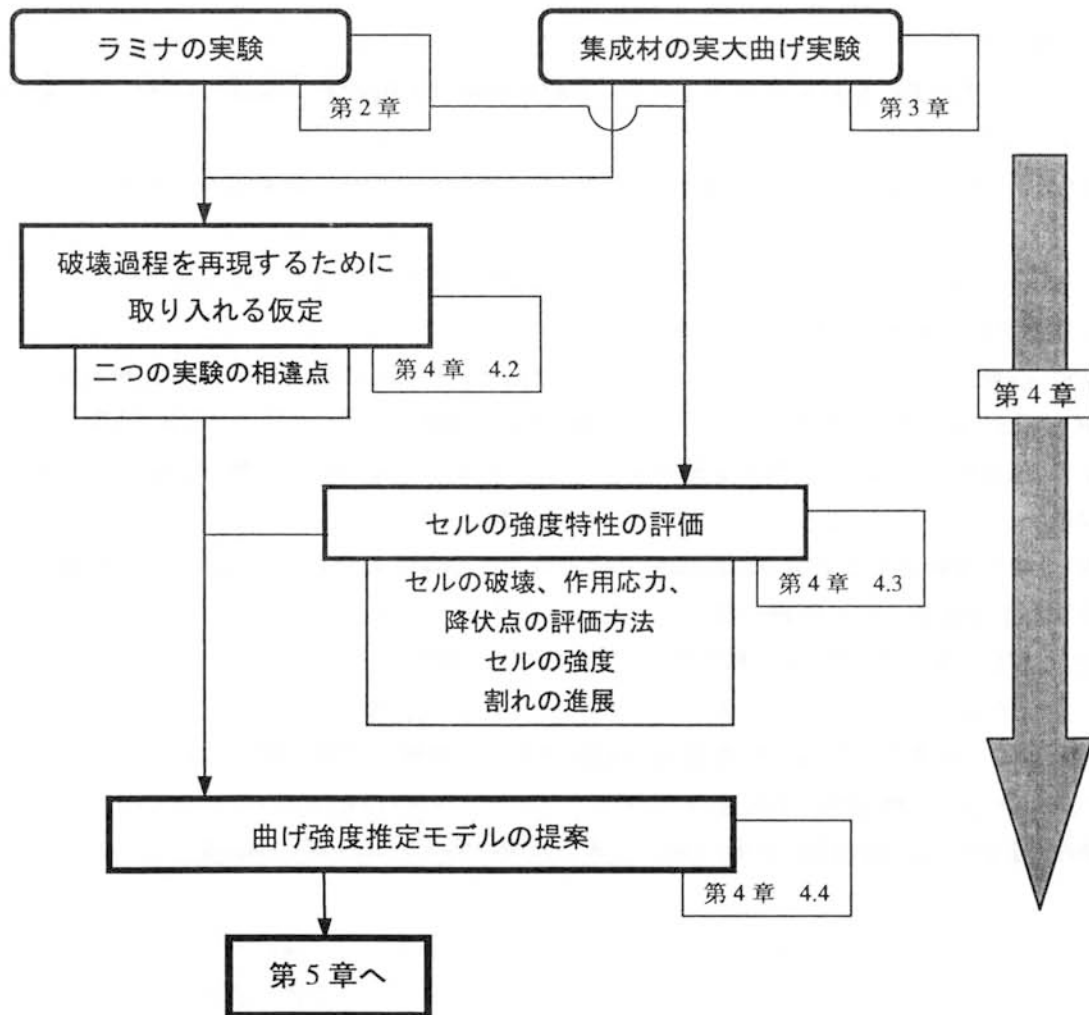


図 4.1.1 本章の流れ

4.2 破壊過程を再現するために取り入れる仮定

ここでは、前述した集成材の実大曲げ実験結果とラミナの引張実験の結果を総合的に判断し、破壊過程を忠実に再現する集成材の曲げ強度推定モデルについて論じる。

まず、これまでに第3章で述べた集成材の破壊に関する結果を再整理し、以下に記す。

A-1：縦継ぎ有り無し集成材の曲げ強度の差は、ラミナが薄いときには小さいが、ラミナが厚くなると顕著に現れる。これは、縦継ぎ有り集成材が、ラミナが厚くなると強度低下を起こすのに対し、無し集成材は強度低下を起こさないことによる。

A-2：ラミナが薄くなると変動係数が小さくなる傾向がある。

A-3：ラミナが薄い縦継ぎ有り集成材は、縦継ぎで応力の再配分がみられ、そこで破壊するものが増える。節を発端とする破壊はほとんどみられない。

A-4：ラミナが厚い縦継ぎ有り集成材は、縦継ぎで応力の再配分現象が少なくなり、節の破壊が増える。

A-5：ラミナが薄い縦継ぎ無し集成材は、大きな節にもかかわらず破壊の発端にならない場合がある。

A-6：ラミナが厚い縦継ぎ無し集成材では、大きな節で応力の再配分が見られる。

さらに、第2章で述べたラミナ単体の引張実験の結果で、上記の結果並びに推定モデルと関連深い結果を以下に述べる。

B-1：縦継ぎ有りのラミナは、ラミナが薄くなると節からの破壊が多くなる。

B-2：節径比が大きくなるほど、ラミナの引張強度は低下する。

B-3：縦継ぎの破壊は、一般に縦継ぎが引き抜かれるような破壊か、縦継ぎを分断するような破壊を示す。

B-4：節を発端とする破壊は、繊維を分断するように破壊をすることもあるが、繊維に沿って割れが進行していく破壊が多い。

B-5：縦継ぎ有りの強度は縦継ぎ無しの80%程度である。

加えて、本研究で実施した集成材の実験とラミナ単体の実験結果の比較により得られたラミナ単体の強度特性として以下がある。

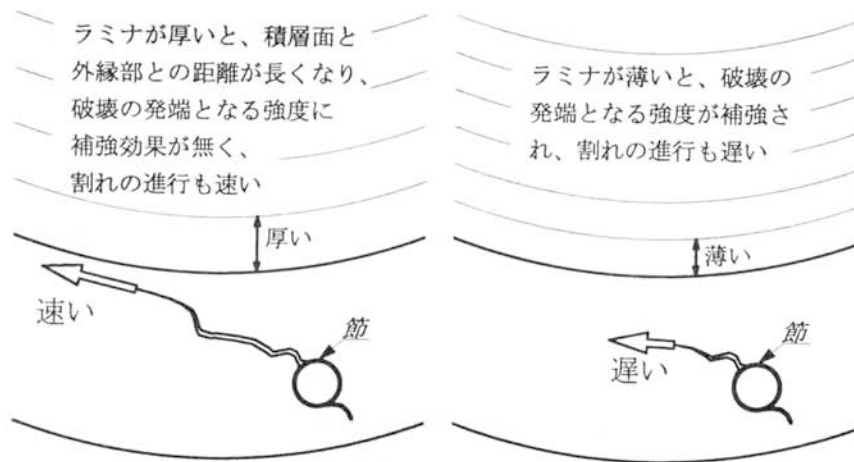
B-6：積層しても縦継ぎの破壊が始まる応力は変わらず、単一材の強度に等しい。

強度推定モデルはラミナ単体の強度特性をもとに表現することになるが、現在得られているラミナ単体の強度特性である B 項目は、集成材の強度特性 A 項目を、完全に表現しきれていない、矛盾している点がみられる。そこで、この矛盾を解決するための仮定を以下に述べる。この仮定は、強度推定モデルに取り入れる。

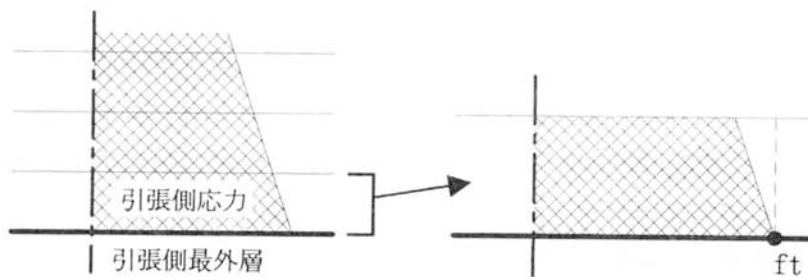
A-3「ラミナが薄い縦継ぎ有り集成材は、縦継ぎで応力の再配分がみられ、そこで破壊するものが増える。節を発端とする破壊はほとんどみられない。」と B-1「縦継ぎ有りのラミナは、ラミナが薄くなると節からの破壊が多くなる。」に示したとおり、ラミナが薄いときに、集成材では節の破壊が少なくなり、ラミナ単体では節からの破壊が増えるという相反する現象が生じている。これを説明するために積層によって最外層ラミナの節部が補強されると仮定する（仮定 1）。ついで、A-5 と A-6 の違いを説明するために、はりが曲げを受けた際に、最も応力が大きくなるのは、最外層の外縁であり、ラミナが厚くなると積層間の距離が長く、補強効果が期待できないと仮定する（仮定 2）。さらに、B-5 を考慮した上で、A-4 を説明するためには、節ではラミナが厚くなると、ラミナの材厚中心で考えた引張強度では破壊の発端となる強度を過大評価するとし、材縁で評価されるものと仮定する（仮定 3）。これは、A-5、A-6 にも関係し、仮定 1 と合わせ、両者の関係を導く。そして、節から始まった破壊が縦継ぎへ到達することにより破壊が急激に促進されることを仮定する（仮定 4）。仮定 4 はラミナが厚い集成材では縦継ぎがあると大きな強度低下を起こすという A-1 を説明するためのものである。

以上をまとめると図 4.2.1 のようになる。縦継ぎ有り集成材は、ラミナが薄い場合には、最初に縦継ぎが破壊の発端になりやすい。しかし、ラミナが破壊したとしても残存断面が大きく、再配分を繰り返しながら破壊に至る。ラミナが厚い場合には、破壊の発端は、材厚中央の引張応力で破壊判定をする縦継ぎより、材縁で破壊判定をする節が弱くなることも多々あり、ラミナが薄い場合より節で破壊が始まりやすい。節の破壊は、割れが縦継ぎに達すると急激に広がる。そして縦継ぎで破壊するときは全断面にわたって破壊するため、強度は全体的に低下する。縦継ぎなし集成材は、ラミナが薄い場合には、積層によって節部の欠点が補強され、集成材は接着により一体となって抵抗するため一部の割れが全体破壊に通じ、再配分することなく破壊に至る。ラミナが厚い場合には、節部で破壊が始まりやすく、繊維に沿った割れが進むが、内側への進行は積層位置に達した時点でとまる。材軸方向への割れの進展は材の縁端部まで進行し、その部分は剥離した状態になるものの、他の部分は積層接着された一体の状態のままである。そのため、再配分を繰り返しながら破壊に至る。

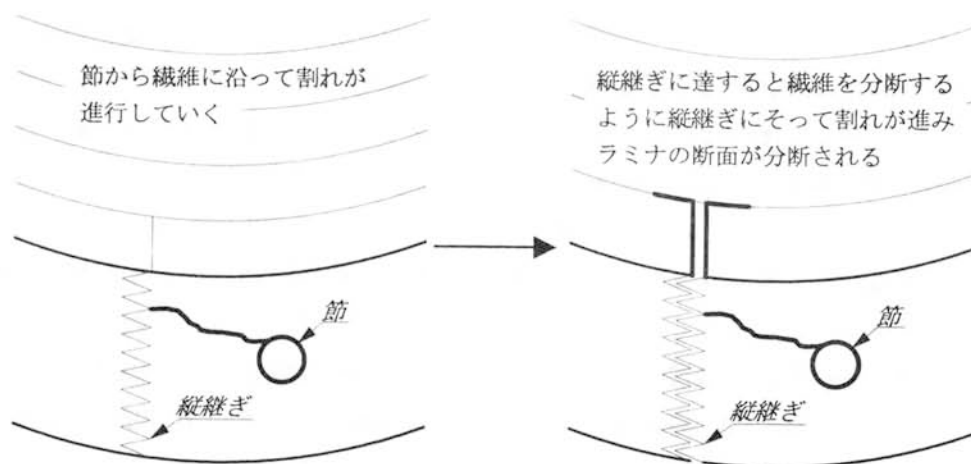
このように、本実験結果は、これまで得られたラミナ単体の強度特性と今回提案する 4 つの仮定より説明可能である。



仮定 1、2 の模式図



仮定 3 の模式図



仮定 4 の模式図

図 4.2.1 集成材の破壊における仮定

4.3 モデルの概要

4.3.1 モデルの概要

図 4.3.1 に示すように集成材を有限要素に分割し、各々に強度を与えるモデルを考えた。分割方法は、材厚方向ではラミナ毎に強度を考えるためラミナ厚で分割し、長さ方向には応力の集中をラミナ厚さによって評価している既往の研究⁴⁰²⁾を踏襲し、ラミナ厚さを単位として考えた。さらに節近傍については節の破壊による幅方向の応力の集中を考えるため、節の大きさにより割れる範囲が異なることを考慮し節径を単位として分割した。説明のため、上記のように分割した各部分をセルと名付ける。

本モデルにおける破壊と強度推定の仮定について説明する。ここで破壊は引張側で起こると仮定し、外力に対する任意セルの存在応力が、そのセルの強度に達した時点で当該セルは消滅すると考える。さらに割れの進展と応力の集中を考慮するため近傍のセルも同時に消滅させる。強度は順次外力を増加させながらセルを消滅させ、残ったセルで外力を支えられなくなった時点のモーメントとした。なお、引張側は弾性を仮定し、圧縮側は完全弾塑性を仮定する。圧縮側の塑性化は中立軸の移動として強度に反映される。もちろんではあるが、引張側の破壊によっても中立軸は移動する。

ここで、任意セルを構成する断面で 1 つのセルが破壊したときの i 層ラミナで負担している応力 f_i は式 4.3.1) で計算され、負担できる曲げモーメントは式 4.3.2) で計算される。そして、当該断面が負担していた曲げモーメントは各層セルの負担していたモーメントの総和として式 4.3.3) で表される。なお、圧縮側では式 4.3.1) で計算される応力の上限は降伏応力である。

$$f_i = f_{ut} \frac{E_i}{E_u} \cdot \frac{g_i}{g_u} \quad 4.3.1)$$

f_i : i 層ラミナの負担応力

f_{ut} : 破壊した層のあるセルの破壊応力

E_i : i 層ラミナのヤング係数

E_u : 破壊したラミナのヤング係数

g_i : 中立軸から i 層ラミナの図心までの距離

g_u : 中立軸から破壊した層の図心までの距離

$$M_i = f_i \cdot A \cdot g_i \quad 4.3.2)$$

M_i : i 層ラミナのあるセルの曲げモーメント

A : ラミナの断面積

$$M = \sum_{i=1}^n M_i \quad 4.3.3)$$

n : 任意断面の積層数

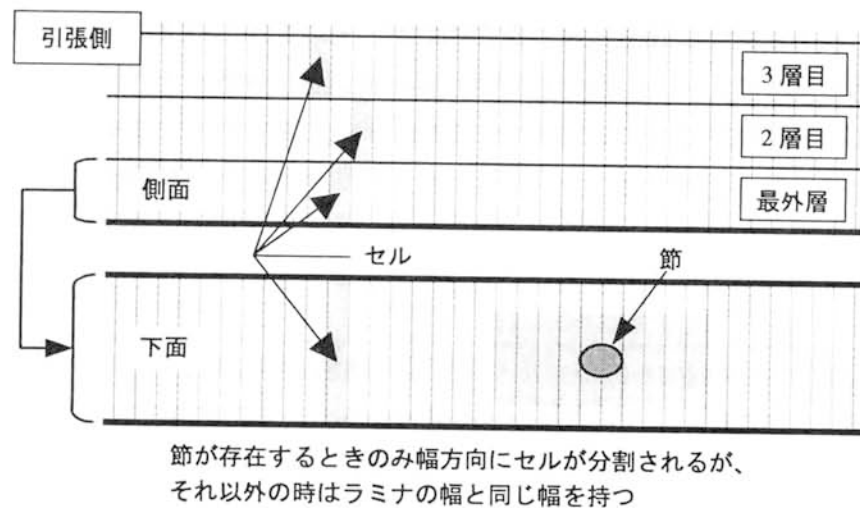


図 4.3.1 セルの定義について

圧縮側の塑性化が起こるまでの初期および引張側破壊時の中立軸は、材厚が等しい条件下では式 4.3.4) で計算される。さらに、圧縮側の塑性化が起こった後の中立軸は、式 4.3.5) を x について解くことにより得られる。

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i \cdot x'_i)}{\sum_{i=1}^n E_i} \quad 4.3.4)$$

x' : 材縁から i 層ラミナの材厚中央までの距離

$$\begin{aligned} & 2 \left\{ E' \sum_{i=2}^n E_i t_i + \sigma_y t' \right\} x^2 \\ & + \left[\sigma_y (t'^2 - 1) - E' \left\{ 2t' \sum_{i=2}^n E_i t_i + \sum_{i=2}^n E_i (h_i^2 - h_{i-1}^2) \right\} \right] x \\ & - t' \left\{ \frac{1}{2} \sigma_y - \sum_{i=2}^n E_i (h_i^2 - h_{i-1}^2) \right\} = 0 \end{aligned} \quad 4.3.5)$$

ただし、

$$h_i = \sum_{k=1}^i t_k$$

E' : 塑性化したラミナの元のヤング係数

σ_y : 降伏応力

t_i : i 層ラミナの厚さ

t' : ラミナの圧縮塑性化した部分の厚さ

この強度推定モデルの特徴は、材軸方向に分布するすべての欠点に対する破壊、さらに割れの進展と応力の集中を考慮できる点である。ここで推定する強度に影響を与えるのは、セルの破壊条件、セルの強度、降伏点、並びに割れの進展と応力の集中を考慮するためにセルを消滅させる範囲などがあり、それらの扱いについては後述する。なお、セルの強度に対する積層による補強効果の数値、割れの進展と応力の集中を考える数値は、実験結果を再現できるように、矛盾のない範囲で決めたものであり、推定の汎用性を持たせるためには今後さらなる検討が必要である。

4.3.2 セルの破壊、作用応力、降伏点の評価方法

曲げを受ける集成材においてラミナの破壊条件は、軸方向と曲げの複合応力場で評価される。第3章で縦継ぎの破壊を1次形式で検討しており、本モデルにおいても式4.3.6)で表される1次形式の破壊条件を用いる。破壊のクライテリアは引張を考えているので、せん断破壊は考えない。

$$\left(\frac{\sigma_b}{f_b}\right) + \left(\frac{\sigma_t}{f_t}\right) = 1 \quad 4.3.6)$$

σ_b : 曲げ応力成分

f_b : 曲げ強度

σ_t : 引張応力成分

f_t : 引張強度

この複合応力場でかかっている曲げ応力および引張応力成分を作用応力として曲げモーメントの計算に用いる。また、セルの圧縮側の降伏点は、無欠点小試験体の引張と圧縮の実験結果より引張強度の58%とした。ただし、降伏後は十分な靱性を持っているものとして破壊については考えない。また、ほかの樹種についてのデータを保有していないため、すべての樹種における推定にこの値を用いることとする。今後、様々な樹種についてのデータの蓄積が必要であるとする。

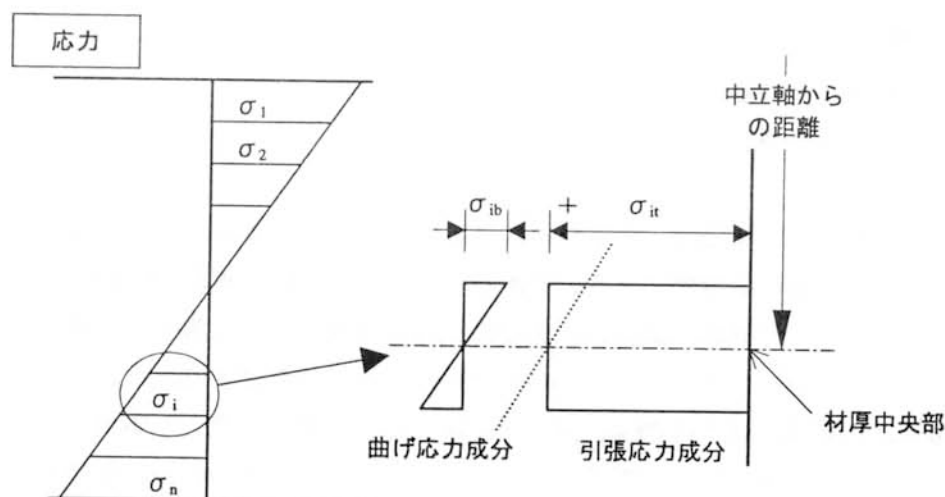


図 4.3.2 集成材内における応力の配分について

4.3.3 セル強度の与え方

セルの引張強度並びに曲げ強度は、引張側の母材部、縦継ぎ部、節部に各々与えられる。各セルの強度は第2章で示したラミナの引張および曲げ実験の結果より求めた。

まず、母材部、縦継ぎ部に対応するセルの引張強度は、ヤング係数を説明変数にした単回帰分析より得る。なお、単回帰分析からの誤差を正規分布に従う乱数と考える。ここでヤング係数は打撃を加え、縦振動⁴⁰³⁾より求めた値である。節部に対応するセルの引張強度は、ヤング係数と節径比を説明変数とした重回帰分析を元を得る。同様に誤差を正規分布に従う乱数と考える。なお、節が材端にある場合とそうでない場合で節径比と強度の分布に有意な差があるかを図4.3.3に示したデータを元に有意な差があるとして t 検定を用いて検討した。結果は表4.3.1に示したとおり、仮説は棄却され有意な差が見られなかった。そのため、位置情報を考慮せず全ての節を同列に扱い節径比のみで評価することにより位置の影響も加味しているものとして判断することとした。このデータを用いて強度推定をおこなう。

次に各々の曲げ強度を求める。曲げ強度は引張強度の大小に連動すると考え、誤差を考慮しない回帰式に基づき、該当するヤング係数あるいは節径比に対する引張強度と曲げ強度を求め、その比を計算する。そして、その比を引張強度に乗ずることにより求める。表4.3.2には計算された回帰式を示す。また、図4.3.4～4.3.10には回帰式を求めるのに用いた実験データとして、ヤング係数と引張強度、曲げ強度の関係および節径比と引張強度の関係を示す。なお、カラマツについては幅が75mmと150mmで節の発生率や引張強度特性が若干異なるため、別々に評価することとした。今後、ラミナの幅を因子として検討を進めることにより、別の式を用いることなく強度推定ができるようになると考えている。

また、積層による欠点の補強効果が三橋ら⁴⁰⁴⁾により明らかにされている。本論文においても第3章における曲げ実験結果の検討より、ラミナが薄くなると節部では補強効果が大きくなると考えられる。そこで、節部の補強効果について定量化を図ったが、本実験データより得ることができず、仮定として次の12mmで1.25倍、18mmで1.2倍の補強効果を認めることにした。

なお、当然のことながら、一枚のラミナに対し、母材は一つの強度が与えられ、縦継ぎ部、節部にもそれぞれ強度が与えられる。

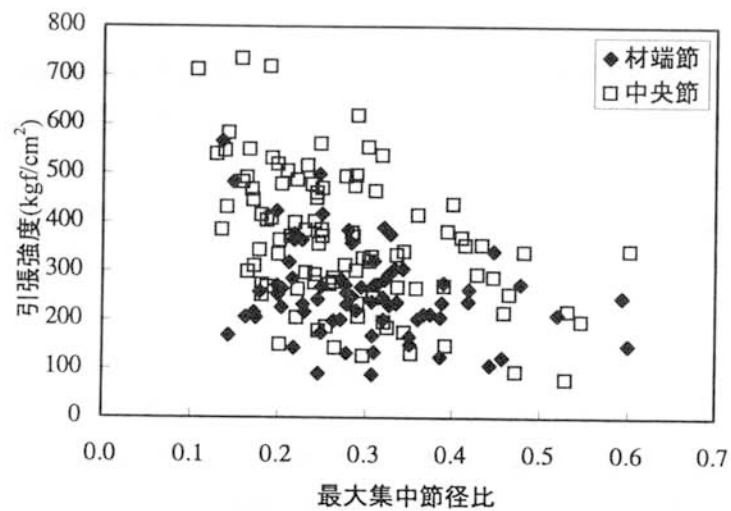


図 4.3.3 引張強度と節径比の節位置における関係（カラマツ）

表 4.3.1 材中央と材端の強度と節径比に関する t 検定

		材中央	材端
t	切片	0.104	0.558
	傾き	0.047	0.311
t_0		2.662	3.399

表 4.3.2 強度計算に用いた回帰式の一覧

	セル	樹種	回帰式	誤差
引張	母材	スギ	強度=5.80×E−165.48+誤差	71.84
		カラマツ	強度=3.29×E+103.14+誤差	112.23
	縦継ぎ	スギ	強度=3.27×E−22.46+誤差	43.24
		カラマツ	強度=2.67×E−4.95+誤差	57.89
	節	スギ	強度=3.90×E−2.64×K−27.87+誤差	55.09
		カラマツ(75)	強度=2.55×E−4.54×K+171.05+誤差	53.34
		カラマツ(150)	強度=3.51×E−5.65×K+30.39+誤差	41.37
曲げ	母材	スギ	強度=2.50×E+317.76	
		カラマツ	強度=3.53×E+334.10	
	縦継ぎ	スギ	強度=2.31×E+120.45	
		カラマツ	強度=0.93×E+362.73	
	節	スギ	強度=3.00×E−10.43×K+383.16	
		カラマツ	強度=1.46×E−5.16×K+509.64	

注) E: ヤング係数($\times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$) K: 節径比(%) ()はラミナ幅を示す

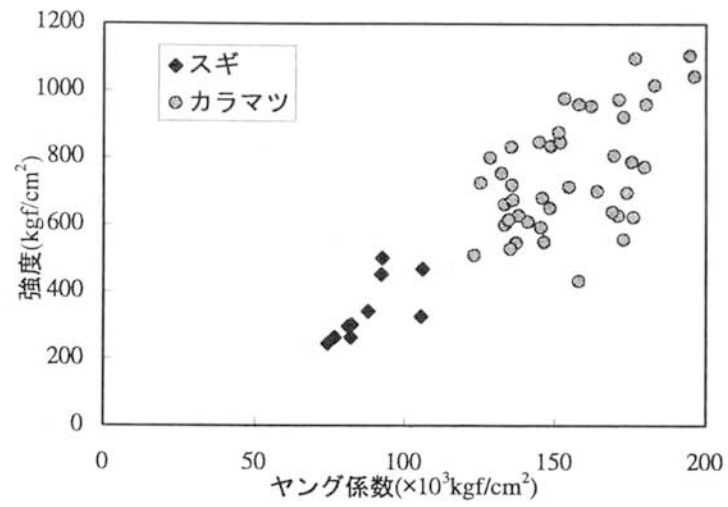


図 4.3.4 母材破壊の引張強度

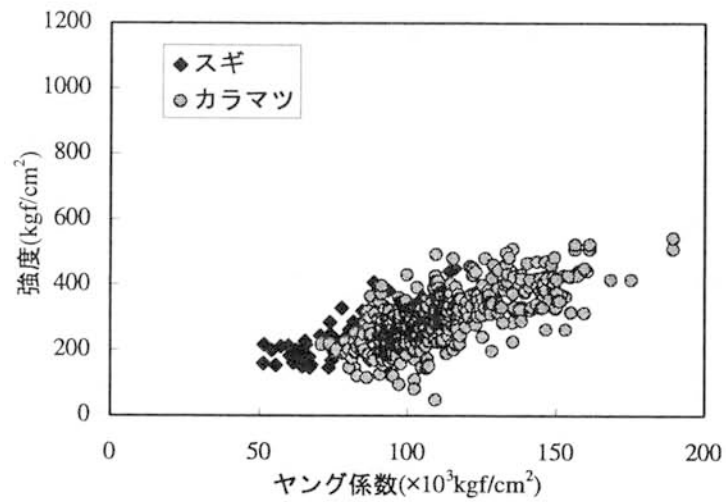


図 4.3.5 縦継ぎ破壊の引張強度

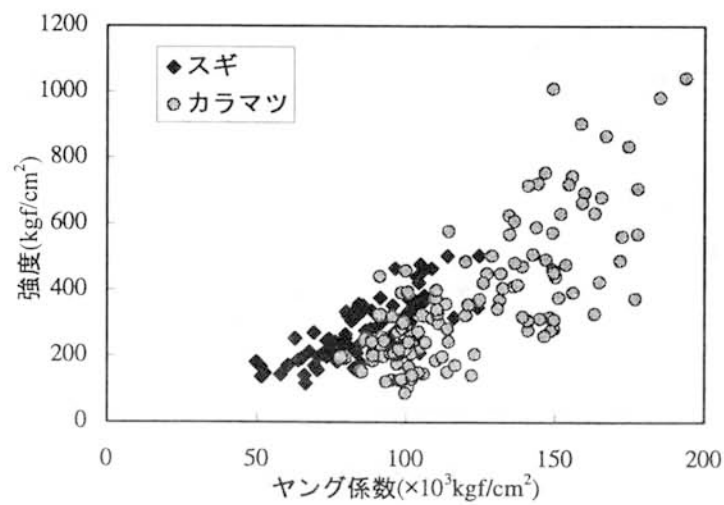


図 4.3.6 節破壊の引張強度

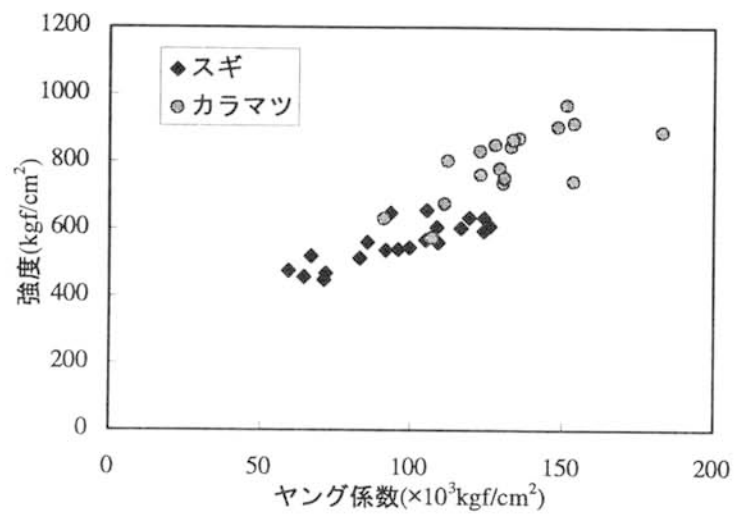


図 4.3.7 母材破壊の曲げ強度

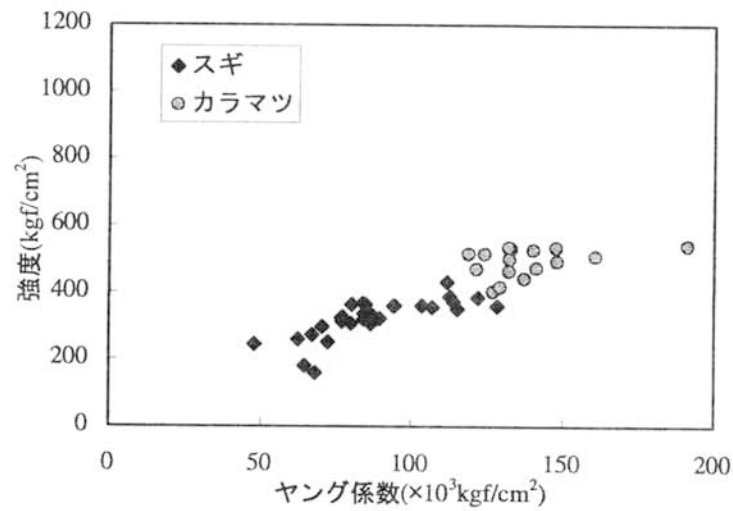


図 4.3.8 縦継ぎ破壊の曲げ強度

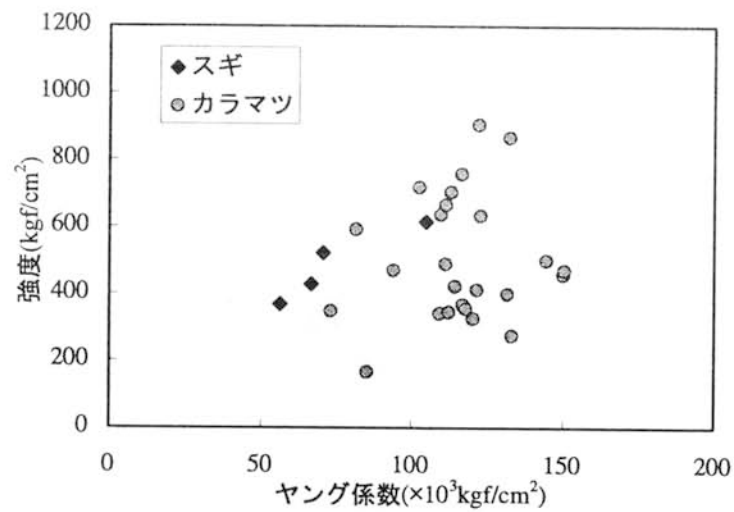


図 4.3.9 節破壊の曲げ強度

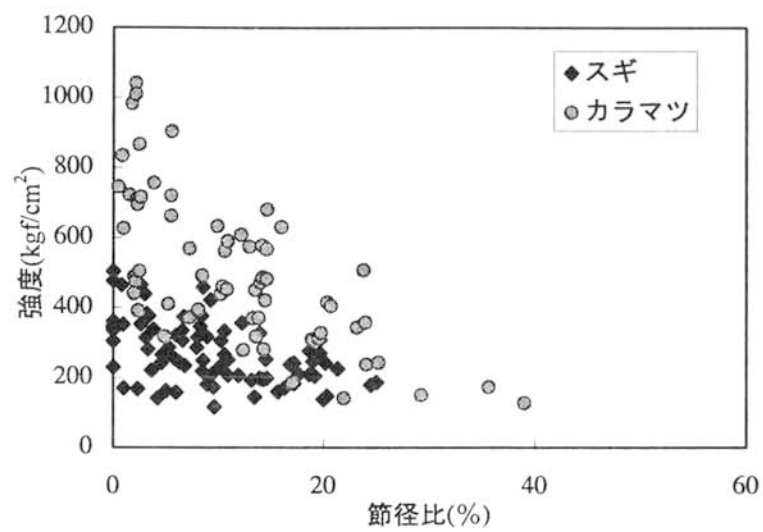


図 4.3.10 節径比と引張強度の関係

4.3.4 割れの進展について

周知の事実でもあるが、縦継ぎ破壊と節破壊では割れの進展は異なる。そこで破壊過程を正確に再現するために破壊別に割れを評価する。

縦継ぎ破壊の場合は、縦継ぎ部の接着部分の全断面が破壊するとし、材軸方向の割れの進展は考えない。しかし、割れの進展はないものの、割れによる応力の集中を考える。本論ではこの応力集中の範囲について、様々な集成材の曲げ実験結果より定量化を測ったがバラツキが大きく、良好な結果が得られなかった。そこで、丸山ら⁴⁰⁵⁾が実施したバットジョイントがある集成材の曲げ実験の結果より、最外層で材軸方向にラミナ厚の4倍、内側の層で2倍の範囲で破壊し、近傍のセルを消滅させるとした。

節破壊の場合は、節に破壊が起こり、つまり、部材の一部分が断面欠損する。節破壊と同時に繊維に沿って割れが起こる。ここで、幅方向の残存部分で応力を負担できる場合には、しばらくは残存部分が応力を負担することになる。この現象を再現するため、消滅させるセルの範囲は、材長方向では応力の集中分としてラミナ厚の4倍、さらに繊維方向の割れの進展として4倍を加算したものとした。幅方向では節径の4倍を考えた。

4.4 本章のまとめ

本章では、前章までの実験結果を基に、集成材の曲げ破壊に至る過程をより忠実に再現しながら、曲げ強度を推定するモデルの提案を行った。以下に、本モデルの特徴を示す。

- ①集成材の強度特性とラミナの強度特性で矛盾が生じているところがあり、この矛盾を解消するために継ぎの仮定をおくこととした。
 - (仮定 1) 積層によって最外層ラミナの節部が補強されると仮定する。
 - (仮定 2) はりが曲げを受けた際に、最も応力が大きくなるのは、最外層の外縁であり、ラミナが厚くなると積層間の距離が長く、補強効果が期待できないと仮定する。
 - (仮定 3) 節ではラミナが厚くなると、ラミナの材厚中心で考えた引張強度では破壊の発端となる強度を過大評価するとし、材縁で評価されるものと仮定する。
 - (仮定 4) 節から始まった破壊が縦継ぎへ到達することにより破壊が急激に促進されることを仮定する。
- ②材軸方向にある欠点をすべて考慮するため、集成材を長さ方向に有限要素分割し、各々に強度を与えるモデルとした。この最小単位をセルと名付け、外力に対する任意セルの存在応力が強度に達したらその部分が破壊するとした。
- ③引張側は弾性を、圧縮側は完全弾塑性を仮定した。圧縮側の降伏点はラミナの強度の 58% とした。
- ④セルの破壊は、1 次形式の複合応力場で評価した。
- ⑤母材部、縦継ぎ部に対応するセルの強度は、ラミナの引張実験を基にしたヤング係数との回帰式を用いて求めた。また、節部に関しては節径比とヤング係数の重回帰式を用いて求めた。仮定 1、2、3 より、ラミナの強度に対する補強効果は、ラミナ厚さが 24mm 以上の場合を考えず、実験の結果を再現できるように矛盾のない範囲として 18mm で 1.2 倍、12mm で 1.25 倍とした。
- ⑥割れの進展に関しては破壊別に評価することとし、縦継ぎ破壊に関してはラミナ厚の 4 倍の範囲にあるセルを消滅させることとした。節破壊に関しては、仮定 4 より、割れの進展を考慮して、ラミナ厚の 8 倍の範囲にあるセルを消滅させることとした。

第 5 章

- 5.1 本章の目的
- 5.2 実験値と推定値の比較
- 5.3 本章のまとめ

5.1 本章の目的

本章の目的は、前章で提案したモデルを用いて本論文で実施した実大曲げ試験体について強度を推定し、その整合性を確認することである。また、応力状態の異なる場合や他の樹種への汎用性の確認を行う。

そこで本章では、まず、入力データについて説明を行う。ここでは節の発生方法についても説明する。つぎに、様々な集成材についての推定を行い、その整合性を確認する。また、汎用性の確認のため、スギ材における推定を行い、その整合性も確認する。

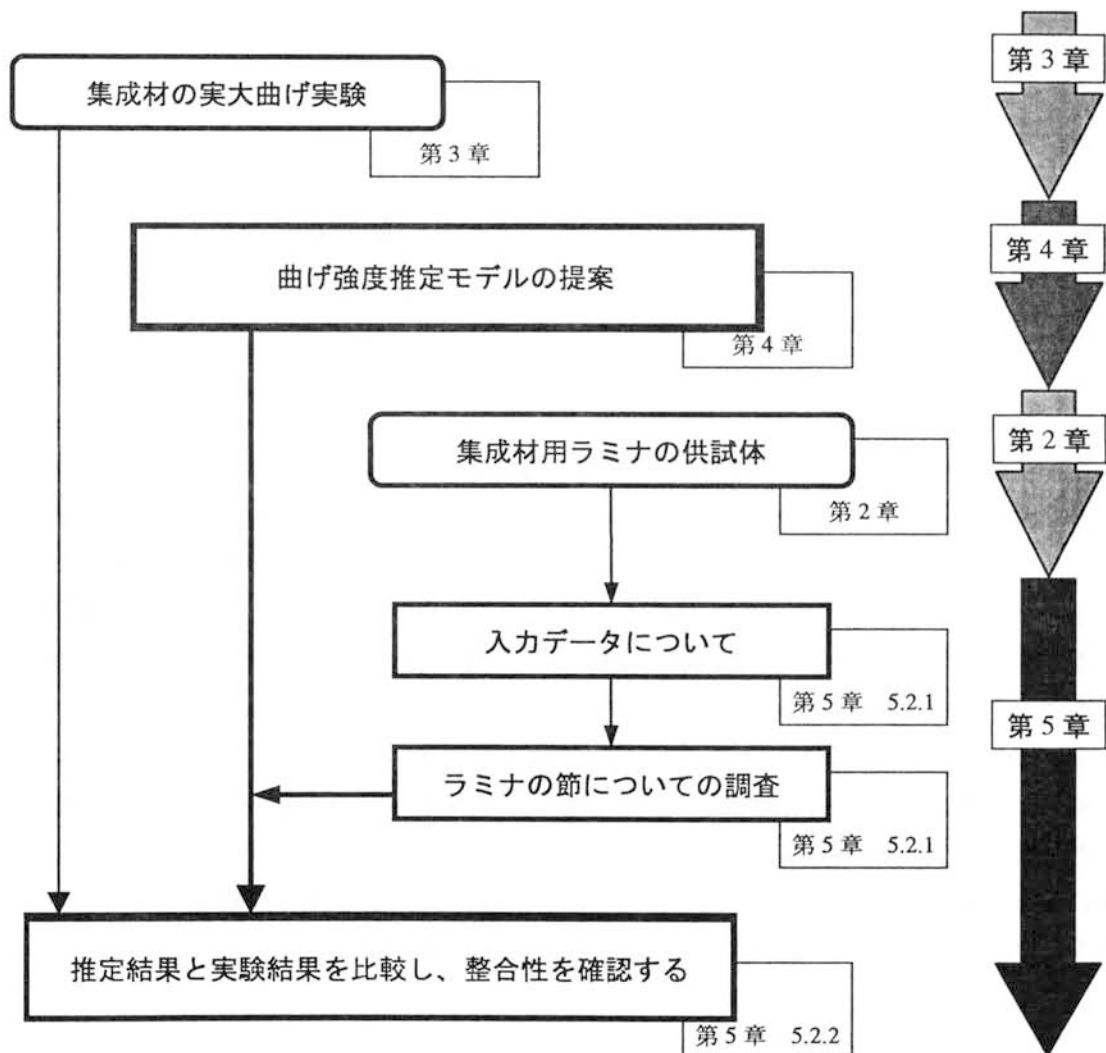


図 5.1.1 本章の流れ

5.2 実験値と推定値の比較

5.2.1 本推定に必要な入力データについて

集成材の強度推定を行う場合に本来は、次に示すような入力データが必要となる。

集成材の等級、集成材の断面形状（ラミナ幅、ラミナ厚さ）となり、縦継ぎ位置に関しては、用いたラミナの長さから割り出すこととなる。しかし、節の位置および大きさに関しては測定が困難であるため、ランダムに発生させることが必要となる。よって、分布形式を基に発生する方法が数例用いられており、本論文で用いた方法については後述する。

今回、後述する 5.2.2 で行った推定で用いた入力データはより精度を増すために、実施した試験体の断面、ラミナ厚さのほかにラミナのヤング係数、縦継ぎ位置を集成材の状況を基に事前情報として与えた。ただし、中央載荷 3 点曲げでは、全試験体の最外層ラミナの縦継ぎ位置が同じでないため、試験体の状況に応じて材軸中央部から 500mm 以内に縦継ぎがランダムに存在するよう一様分布として与えた。ここで述べるヤング係数とは、打撃法により求めたものである。また、節の発生に関しては調査していないため、後述する方法で発生させることとした。

ここで確認のために比較対象としたカラマツ集成材の 106 体について寸法および構成方法など表 5.2.1 に示す。また、他の樹種への汎用性確認に用いるスギ材の 12 体についても示した。若干の説明を加えておく。樹種はカラマツとスギである。梁せいは 144~600mm の範囲で 5 種類、梁幅は 75mm と 150mm の 2 種類、ラミナ厚さは 12mm~30mm の範囲で 5 種類である。加力方法は 4 点曲げと 3 点曲げの 2 種類で、4 点曲げでは加力点間距離を 3 種類としている。構成方法は、ラミナのヤング係数の差が外層と内層で $10 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 以下の同等級ラミナから構成されるものと、外層、中間層、内層と異なる等級のラミナから構成される異等級構成の 2 種類で、同等級ラミナで構成される場合でもその等級が異なるなど、様々なラミナ構成が混在している。しかしながら、同一断面、同一ラミナ厚、同一構成方法の集成材は、式 3.2.1) にて計算される集成材のヤング係数がほぼ等しくなるようにラミナを配置している。強度については、推定結果との比較を表にて示す。

表 5.2.1 比較対象集成材

樹種	梁せい (mm)	梁幅 (mm)	ラミナ厚 (mm)	スパン (mm)	構成方法 ^{注1)}	縦継ぎ の有無	加力点間 距離(mm)	試験体数 ^{注2)}
スギ	600	150	30	12,000	1、2、3、4	有	5,400	8、1、2、1
カラマツ	600	150	25	8,000	5、6、7		2,000	1、1、1
	450			7,000				1、1、1
	300			12、18、24				6,000
			2、2、2					
	300	12、18、24	6,000	8	1、1、1			
	162	75	18	3,000	9		0 ^{注3)}	12
	144				12、18、24		10	1,000
					無			12、12、12

注 1) 構成方法はラミナのヤング係数を元になっている。数値は以下の通り (単位 $\times 10^3 \text{kgf/cm}^2$)

構成方法 1 : JAS E75-F240

構成方法 2 : JAS E65-F225

構成方法 3 : 外層 100 以上 中間層 90~100 内層 50~90

構成方法 4 : 外層 85 以上 中間層 75~85 内層 50~75

構成方法 5 : 外層 125 以上 中間層 120~125 内層 115~120

構成方法 6 : 外層 125 以上 中間層 90~105 内層 70~90

構成方法 7 : 外層 90~105 中間層 80~90 内層 65~80

構成方法 8 : 外層 110~125 中間層 105~110 内層 100~105

構成方法 9 : JAS E95-F315

構成方法 10 : JAS E105-F345

注 2) 試験体数は、構成方法順およびラミナ厚さ順に示している

注 3) 加力点間距離 0mm とは、中央載荷 3 点曲げを指す

また、節の存在位置と大きさに関してはすべての試験体について事前に記録を取っていない。そこで、節の分布について、信州産カラマツとスギのラミナを対象に調査し、確率変数として与えることとした。調査数はカラマツについては長さ 2000mm、幅 75mm および 150mm、厚さ 25mm のラミナについてそれぞれ 152 体、70 体、スギについては長さ 2000mm、幅 150mm、厚さ 30mm のラミナについて 150 体である。節の大きさの評価には節径比を用いた。また、節の出現頻度については節間隔を用いた。節径比、節間隔の各分布は材種、ラミナの幅毎に求めた。それぞれの調査結果を図 5.2.1、5.2.2 に示した。既存のソフト⁵⁰⁾による Kolmogorov-Smirnov 検定（以下、K-S 検定）の結果では、樹種および幅の違いに関係なく節径比、出現頻度ともに対数正規分布が最も適合度が高い結果を得た。表 5.2.2 に検定値として得られる dn 値の結果を示す。表より dn 値が小さく検出された対数正規分布の適合度が高いことがわかる。本推定における節の位置は、ラミナ幅に応じた節間隔の分布を元に、材長ゼロより対数正規分布に従う乱数として与え、順次間隔を乱数として発生させ、母材長さを越えるまで繰り返し、決定した。節径比も対数正規分布に従う乱数を用いて与えた。また、二つの乱数には全く相関性を持たせていない。

今後、節の発生方法について他の樹種におけるデータの蓄積およびラミナ幅の変わることによる変化の割合を導き出すことが重要であると考ええる。

表 5.2.2 K-S 検定による結果 (dn 値)

節径比

	正規分布	対数正規分布	2P ワイブル分布
カラマツ (75)	0.1989	0.0375	0.1712
カラマツ (150)	0.1281	0.0647	0.1245
スギ (150)	0.1801	0.0966	0.1548

節間隔

	正規分布	対数正規分布	2P ワイブル分布
カラマツ (75)	0.2618	0.0517	0.1006
カラマツ (150)	0.1570	0.0783	0.0873
スギ (150)	0.1804	0.0715	0.1670

注) かっこ内はラミナ幅を指す

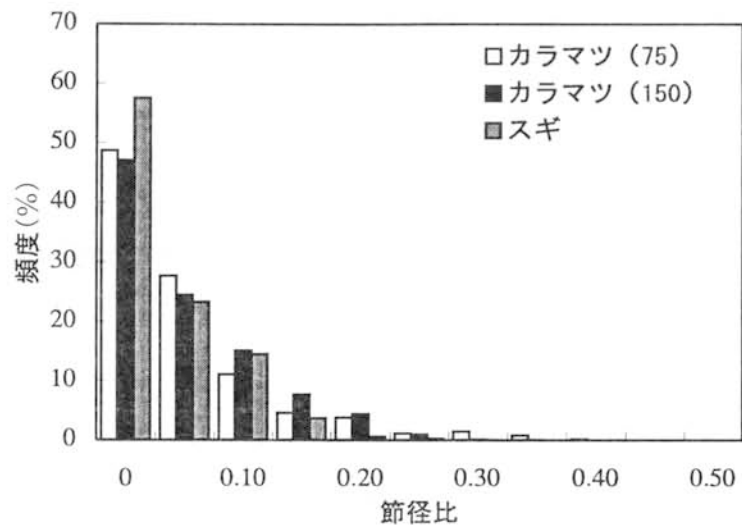


図 5.2.1 節径比のヒストグラム

注) カッコ内はラミナ幅を指す

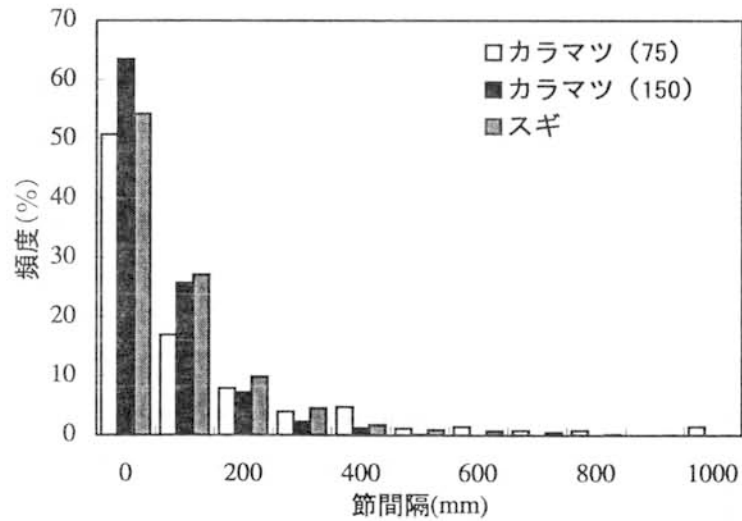


図 5.2.2 節間隔のヒストグラム

注) カッコ内はラミナ幅を指す

5.2.2 実験値と推定値の比較

5.2.1 に示した入力データを基に、すべての対象集成材についてモンテカルロ法を用いて、1000 体ずつ推定をおこなった。対象集成材における推定結果の平均値と実験値の比較について表 5.2.3 に示した。そのうち、同一断面構成で加力方法の等しい集成材の実験結果が 12 体あるものについて、実験値と推定値を累積度数分布で図 5.2.3～5.2.6 に示した。対象集成材は、E95-F315 の 3 点曲げと E105-F345 の 4 点曲げで縦継ぎの有るものと無いものについてであり、全部で計 7 種類である。加えて、変動係数についての比較を表 5.2.4 に示した。また、図 5.2.7 は表 5.2.3 に示した全試験体の最大モーメントと推定値の平均値モーメントとの比較である。ただし、多数試験体のあるものについてはその平均値を実験値の最大モーメントとしている。その結果は、累積度数分布で比較したもの、平均値で比較したものともによい適合を示していることがわかる。このうち、既往のモデル⁵⁰²⁾では材軸方向に多数存在する欠点を考慮していないため推定精度が落ちると考えられる 3 点曲げや、強度低減係数が適用されるような断面の大きなものについても、良く適合していることがわかる。

表 5.2.4 より、変動係数についても、良く適合していることがわかる。バラツキが増すと考えられる 3 点曲げにおいても追求できており、良く推定できていると言える。また、バラツキを減らすために必要な因子の検討についても本推定モデルは有効であると考え。樹種による適合を確認するため、比較したスギ集成材においてもよく適合しており、本推定法が樹種に関係なく活用できると考える。今後、様々な樹種のデータを集め、推定を行い、より汎用性を広げていくことが重要である。加えて、すべての実験最大モーメントと推定モーメントをプロットした結果、回帰直線傾きがほぼ 1 に近い値となり、実験値と推定値は全体的によく一致した。

ここで実験値はシミュレーションで求めた分布からランダムに得られたものであるかどうかを K-S 検定で検討してみる。この検定は、「実験値はシミュレーションで予測した母集団からランダムに得られたものである」という帰無仮説について検定するものである。棄却レベルが高ければ検定結果が良好であることになる^{503)、504)、505)}。本モデルによる推定結果の棄却レベルは、縦継ぎ有りのラミナ厚 12mm が 10%、縦継ぎ無しのラミナ厚 18mm が 20%で、その他については 20%以上であり、検定結果も良好であった。よって、統計的にも推定精度が高いことが確認された。

これらの検討の結果より、本モデルは様々な集成材の曲げ強度推定が可能であることが確認できた。

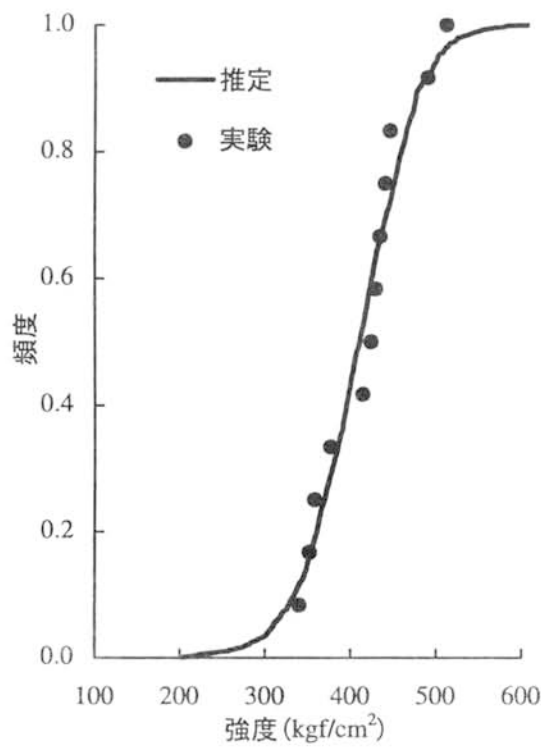
表 5.2.3 推定値と実験値の比較

樹種	構成 方法 ¹⁾	梁せい	梁幅	ラミナ厚	スパン	縦継ぎ の有無	加力点 間距離	推定値 M _{cal}	実験値 M _{obs}	$\frac{M_{obs}}{M_{cal}}$
スギ	1	600	150	30	12000	有	5400	2465055	2340000	0.949
	2							2028780	2520000	1.242
	3							2789100	3118500	1.118
	4							2414700	2610000	1.081
カラ マツ	5	600	150	25	8000	有	2000	3209220	3038310	0.947
	6							2771010	2563740	0.925
	7							1892340	2563740	1.355
	5	450			7000			1745955	2015280	1.154
	6							1530090	1371178	0.896
	7							1092893	1211760	1.109
	5	300			6000			775980	1147950	1.479
	6							688433	642848	0.934
	7							481793	658170	1.366
	6			24				757283	598725	0.791
	6			18				813263	685238	0.843
	6			12				866813	719325	0.830
	8			24				639428	674325	1.055
	8			18				713858	785700	1.101
	8			12				835245	776700	0.930
	9	162		3000	有	0	129354	132426	1.024	
	9						115866	115876	1.000	
	10	144				1000	86303	82649	0.958	
	10						90324	95605	1.058	
	10						89152	95758	1.074	
	10						96221	105354	1.095	
	10				105714		112458	1.064		
	10				104581		106975	1.023		
10										
								Ave.(M _{obs} /M _{cal})		1.052

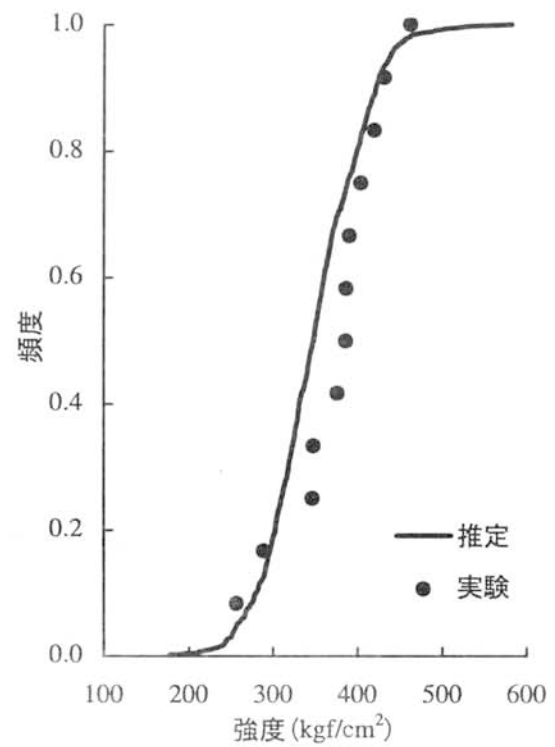
注 1) 構成方法は、表 5.2.1 と同じである

注) 梁せい、梁幅、ラミナ厚、スパン、加力点間距離の単位は、mm である

注) M_{cal} 、 M_{obs} の単位は、kgf・cm である

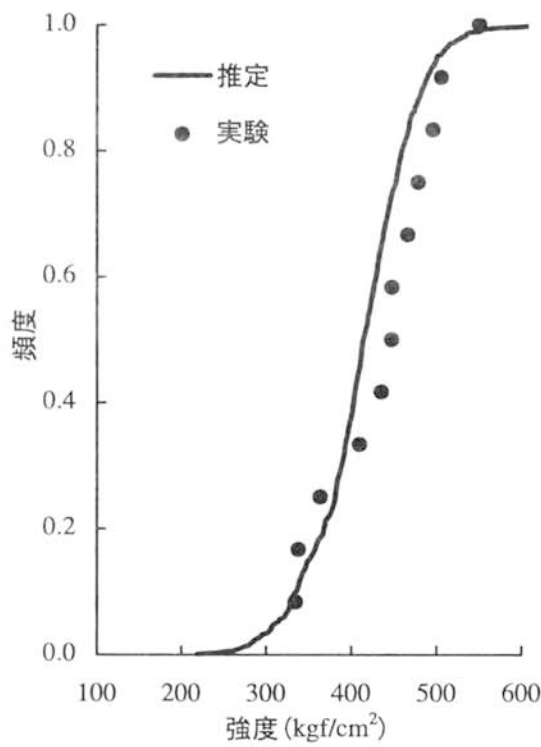


縦継ぎ無し

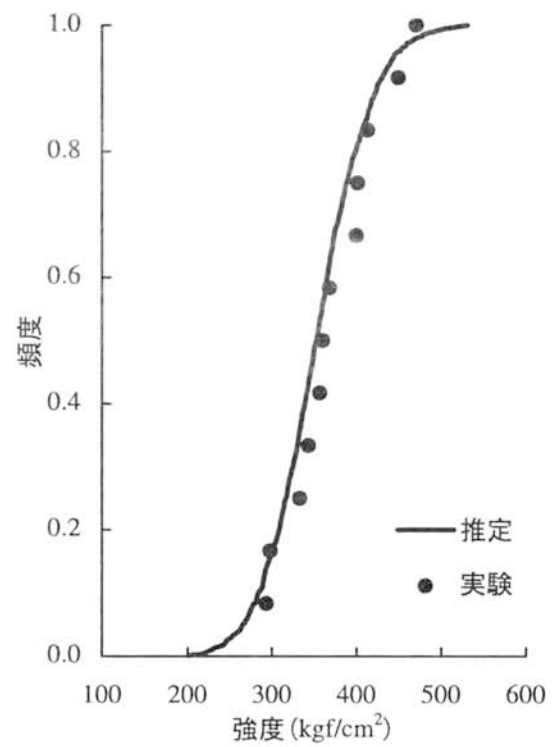


縦継ぎ有り

図 5.2.3 ラミナ厚 12mm 集成材の推定について



縦継ぎ無し



縦継ぎ有り

図 5.2.4 ラミナ厚 18mm 集成材の推定について

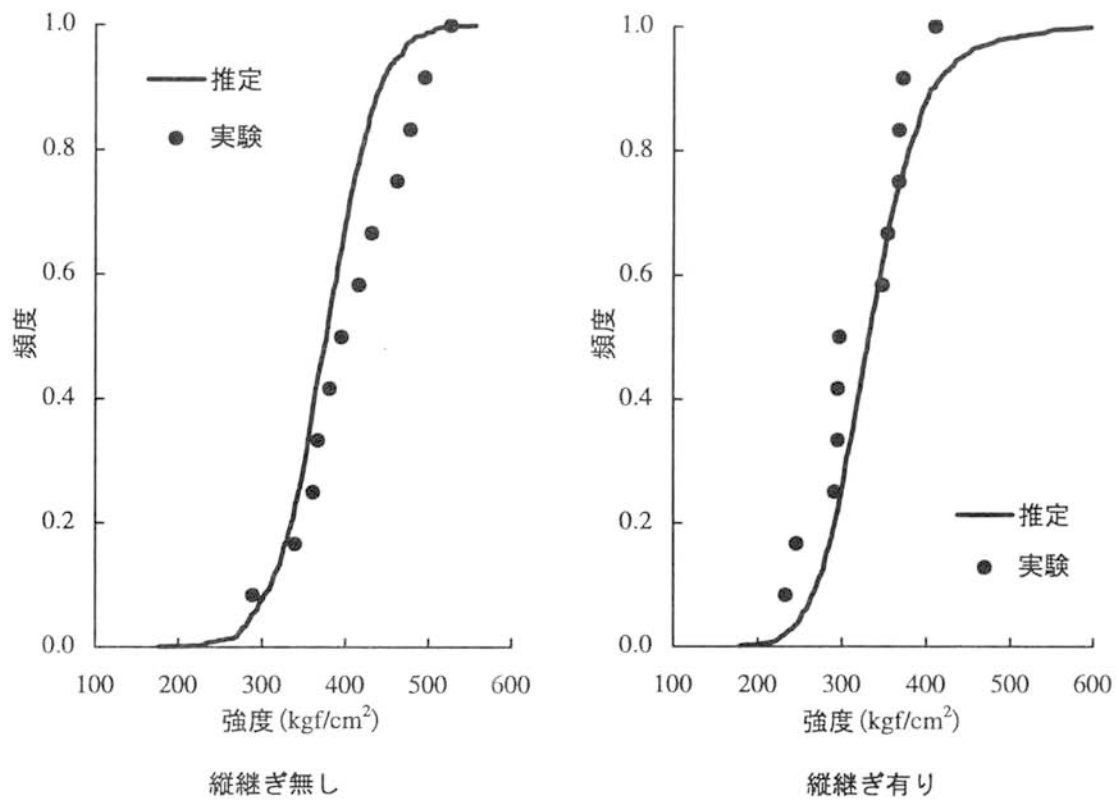


図 5.2.5 ラミナ厚 24mm 集成材の推定について

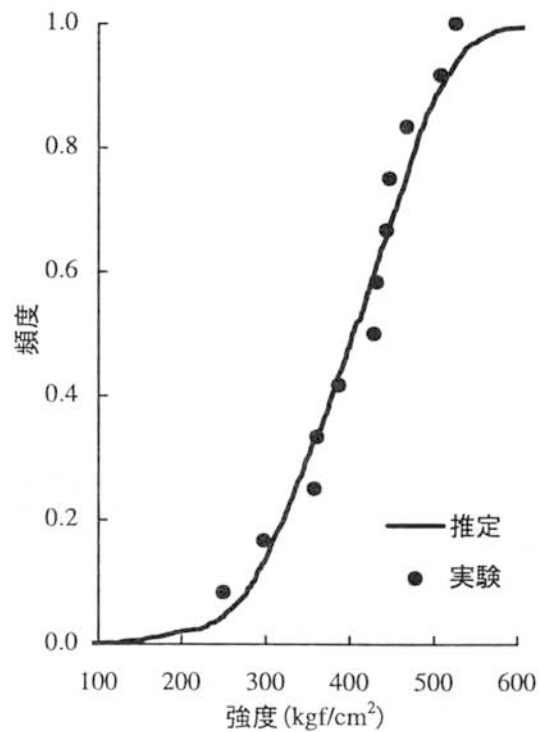


図 5.2.6 ラミナ厚 18mm 3 点曲げ集成材の推定について

表 5.2.4 変動係数の比較

試験体名	実験値	推定値
FJ12	15.49	16.05
FJ18	14.72	15.43
FJ24	16.96	17.49
NO12	12.76	14.54
NO18	15.43	14.14
NO24	16.93	13.77
T	19.99	22.35

単位：(%)

注) 試験体名については表 3.2.2 を参照

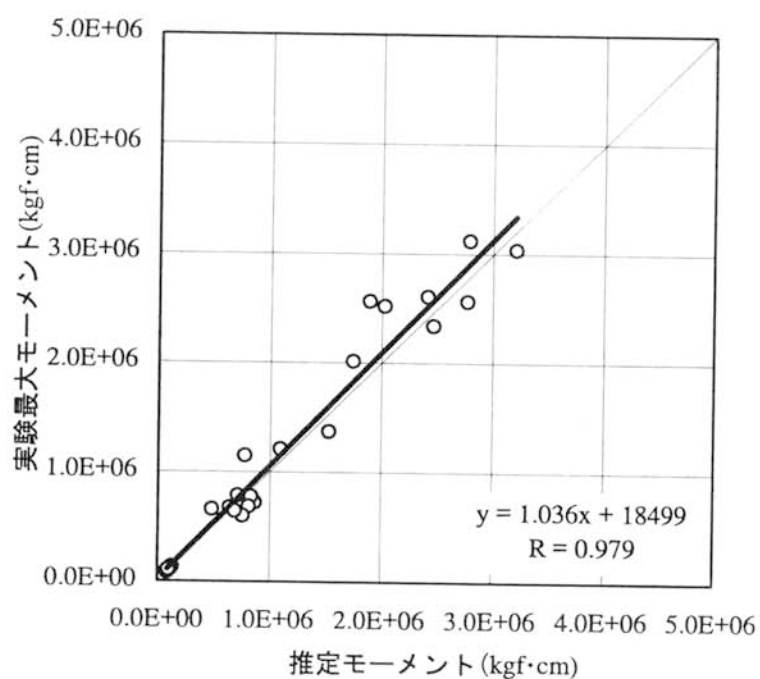


図 5.2.7 全推定モーメントと実験最大モーメントの比較

5.3 本章のまとめ

本章では、提案した強度推定モデルの適合性を実験結果との比較により検証した。以下に、得られた結論を示す。

- ①試験体数の多かったものについて、累積度数分布で比較したが、良好な適合が得られた。
- ②既往の提案モデルでは長さ方向に欠点を考慮していないため、精度が落ちると思われる応力状態の異なる3点曲げの推定についても、良好な適合が得られた。
- ③他樹種への適応性を確認するために行ったスギ集成材の推定についても、良い適合が得られた。
- ④すべての実験最大モーメントと推定モーメントをプロットした結果、回帰直線の傾きがほぼ1に近い値となり、実験値と推定値は全体的によく一致した。

①～④より、提案したモデルは様々な集成材の曲げ強度推定が可能であると言える。

第 6 章

- 6.1 本論のまとめ
- 6.2 今後の課題

6.1 本論のまとめ

本研究では、集成材の強度推定法の提案とその検証を目的として、体系的に実験及び考察を行った。まず、第2章ではラミナ強度特性について、第3章では集成材の曲げ強度特性と曲げ破壊に至る過程について、第4章では推定モデルの提案、第5章ではその検証を行った。ここで、各章での「まとめ」を用いて、汎用性のある強度推定法を提案するに当たり必要となった実験結果及び考察結果を以下に示す。加えて、推定法の整合性についても述べる。

ラミナの実験より明らかになったことを以下に示す。

引張実験、曲げ実験とも、強度とヤング係数及び強度と節径比に相関があることが確認された。より詳しく検討した結果、節の評価には節径比より集中節径比がより妥当であることがわかった。また、縦継ぎ部分も強度低下の重要な要素である。ラミナの強度を推定するためには、節とヤング係数と強度、縦継ぎと強度の関係が必要であることがわかった。

集成材の曲げ実験より明らかになったことを以下に示す。

構成方法によって強度が大きく異なり、同等級集成材が高強度になることがわかった。また、縦継ぎ無しは有りの1.2倍の強度を持つことがわかった。縦継ぎ有りの強度はラミナが薄くなるに従って高くなる傾向にあるが、縦継ぎ無しにはそのような傾向が見られない。破壊性状については、縦継ぎ破壊と節破壊があり、まれに母材破壊するものがあり、それぞれで強度に大きな差は見られなかった。

集成材のヤング係数は、ラミナの曲げヤング係数より計算可能であることがわかった。

二つの実験結果において矛盾が生じているため、解消するために用いた強度推定に必要な仮定を以下に示す。

(仮定1) 積層によって最外層ラミナの節部が補強されると仮定する。

(仮定2) はりが曲げを受けた際に、最も応力が大きくなるのは、最外層の外縁であり、ラミナが厚くなると積層間の距離が長く、補強効果が期待できないと仮定する。

(仮定3) 節ではラミナが厚くなると、ラミナの材厚中心で考えた引張強度では破壊の発端となる強度を過大評価するとし、材縁で評価されるものと仮定する。

(仮定4) 節から始まった破壊が縦継ぎへ到達することにより破壊が急激に促進されることを仮定する。

集成材の曲げ破壊に至る過程として明らかになったことを以下に示す。

集成材は強度の7~8割の応力で破壊を始め、中立軸の移動を伴いながら、応力の再配分をすることがわかった。この中立軸の移動には、変化しないもの、圧縮塑性によって引張

側に下がってくるもの、徐々に引張側が破壊していき圧縮側にあがっていくもの、最外層ラミナが完全に破断し一挙に圧縮側にあがっていくものの4種類が見られた。

応力の再配分現象についての検討より、縦継ぎ有りでは、ラミナが薄くなると縦継ぎで再配分現象が起こりやすく、破壊の発端は縦継ぎとなる場合が多い。ラミナが厚くなると、節での再配分現象が増え、節での破壊も多く起こる。縦継ぎ無しでは、ラミナが薄いと再配分現象は少なくなり、節以外からの破壊が増える。積層状態にあるラミナの縦継ぎ部分の補強効果について検討した結果、補強効果がほとんど見られないことがわかった。

集成材の曲げ強度推定モデルの概要を以下に示す。

材軸方向にある欠点をすべて考慮するため、集成材を長さ方向に有限要素分割し、各々に強度を与えるモデルとした。この最小単位をセルと名付け、外力に対する任意セルの存在応力が強度に達したらその部分が破壊するとした。順次外力を増やしていき、その外力が支えられなくなった時点のモーメントを最大モーメントとした。

引張側のセルは弾性を、圧縮側のセルは完全弾塑性を仮定した。圧縮側の降伏点はラミナの引張強度の58%とした。セルの破壊は、1次形式の複合応力場で評価した。母材部、縦継ぎ部に対応するセルの強度は、ラミナの引張実験を基したヤング係数との回帰式を用いて求めた。また、節部に関しては節径比とヤング係数の重回帰式を用いて求めた。ラミナの強度に対する補強効果は、ラミナ厚さが24mm以上の場合は考えず、実験の結果を再現できるように矛盾のない範囲として18mmで1.2倍、12mmで1.25倍とした。

割れの進展に関しては破壊別に評価することとし、縦継ぎ破壊に関してはラミナ厚の4倍の範囲にあるセルを消滅させることとした。節破壊に関しては、仮定4より、割れの進展を考慮して、ラミナ厚の8倍の範囲にあるセルを消滅させることとした。

提案した強度推定法の適合性を実験結果との比較により検証し、以下の結論を得た。

- ①試験体数の多いものについて累積度数分布で比較したが、良好な適合が得られた。
- ②既往の提案モデルでは長さ方向に欠点を考慮していないため、精度が落ちるとされる応力状態の異なる3点曲げの推定についても、良好な適合が得られた。
- ③他樹種への適応性を確認するために行ったスギ集成材の推定についても、良い適合が得られた。
- ④すべての実験最大モーメントと推定モーメントをプロットした結果、回帰直線の傾きがほぼ1に近い値となり、実験値と推定値は全体的によく一致した。

本研究で提案した集成材の強度推定法が、様々な集成材の曲げ強度を精度よく推定可能であることを明らかにした。

6.2 今後の課題

より汎用性のある推定法に拡張するために、今後明らかにしていかなければならない課題を以下に列記した。

①ラミナの強度における幅の影響についての定量化。

理由：本研究においてはそのパラメータが少なく定量化が困難であった。しかし、今後ラミナの幅が異なる毎に評価式を作ることは多種であるため困難を考えられ、検討が必要である。

②集成材の割れの進展長さ及び応力集中範囲についての定量化。

理由：本研究において応力集中の範囲について検討を行ったが、バラツキが大きいため定量化が困難であった。しかし、今後ラミナ厚さが最小単位でよいのか、幅の影響はないのかなど検討が必要である。

③ラミナの積層効果について。

理由：本研究においては、節部分については検討できなかったため矛盾が生じない範囲でその効果を認めた。しかし、ラミナの厚さや積層数によって与えられる積層効果の値は実験などによって明らかにすることが必要である。

最後になったが、本研究ではスギ及びカラマツでのみ推定しているため、今後新たな樹種での検証が必要であると考え。また、汎用性を高めることにより、集成材メーカーなどにこの成果が用いられるようになることが望ましい。

参考文献

謝辭

参考文献

- 101) 林 知行：高信頼性木質建材「エンジニアードウッド」、日刊木材新聞社、1998
- 102) 林 知行：確率モデルによる集成加工材料の性能予測（第 3 報）—5 プライ集成材の曲げ強度予測確率モデル—、材料、Vol.39、No.444、pp.1197-1202、1990
- 103) 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、Vol.36、No.10、pp.812-818、1990
- 104) 小野徹郎、井戸田秀樹、陳 建宏：集成材の曲げ耐力に関する確率論的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）C-1、pp.2797-2798、1991
- 105) 岩田佳子、小野徹郎、井戸田秀樹：集成材の曲げ耐力に関する確率論的研究その 2、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）C-1、pp.2922-2923、1992
- 106) 平嶋義彦、山本幸雄、鈴木滋彦：集成材の強度計算モデルおよび確率モデル、木材学会誌、Vol.40、No.11、pp.1172-1179、1994
- 107) 飯島泰男、岡崎泰男：スギによる構造用大断面集成材の性能予測、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）C-1、pp.11-12、1994
- 108) 三橋博三、板垣直行、伊東彦紀、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 1 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、Vol.42、No.2、pp.122-129、1996
- 109) 小松幸平：任意断面構成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、Vol.43、No.11、pp.934-939、1997
- 110) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説、丸善、1995
- 111) たとえば、橋爪丈夫、吉田孝久、武田孝志、石原茂久：カラマツラミナの性質と集成材の強度性能（第 4 報）ラミナの曲げ・引張強度特性、木材学会誌、Vol.44、No.1、pp.49-58、1998
- 112) たとえば、小泉章夫、飯島泰男、佐々木貴信、岡崎泰男：秋田県産スギ材の強度特性（第 2 報）挽板の強度、木材学会誌、Vol.44、No.2、pp.210-214、1997
- 113) 橋爪丈夫、齋藤 健、野田道雄、石原茂久：連続送り式グレーディングマシンの特性とその調整、木材学会誌、Vol.43、No.2、pp.141-148、1997
- 114) 祖父江信夫：FFT スペクトルアナライザを用いた木材の過渡的縦振動によるヤング率測定、木材学会誌、Vol.32、No.9、pp.744-747、1986
- 115) 武田孝志、橋爪丈夫：カラマツ同一等級ラミナ構成集成材の動的ヤング係数に及ぼす積層数の影響、材料、Vol.46、No.7、pp.839-844、1997
- 116) 森 徹：木材の引張強度に及ぼす節の影響に関する研究、建築学会論文集、第 5 号、pp.1-10、1937
- 117) 畑山蟻男：有節材の強度推定に関する研究、林業試験場研究報告、第 326 号、pp.69-

167、1984

- 118) 田中 学、井戸田秀樹、塩沢和訓：有節ラミナの縦引張強度に関する統計的考察、日本建築学会学術講演梗概集（近畿）C-1、pp.11-12、1996
- 119) 井戸田秀樹：有節ラミナの縦引張強度に関する統計的研究、日本建築学会構造系論文集、第 509 号、pp.113-118、1998
- 120) 板垣直行、三橋博三、二宮佐知子、吉田暢子、江刺拓司：スギラミナの引張破壊特性に及ぼす節の影響、木材学会誌、Vol.45、No.5、pp.367-374、1999
- 121) 二宮佐知子、板垣直行、三橋博三：集成材ラミナの引張破壊における欠点の影響に関する研究（2）、日本建築学会学術講演梗概集（関東）C-1、pp.9-10、1997
- 122) 吉田暢子、板垣直行、三橋博三：集成材ラミナの応力分布性状に及ぼす欠点の影響に関する研究（2）、日本建築学会学術講演梗概集（九州）C-1、pp.23-24、1998
- 123) 星 通、林 知行：構造用たてつぎ材の強度特性（第 1 報）スギたてつぎ材の曲げ・引張強度特性、木材学会誌、Vol.37、No.3、pp.194-199、1991
- 124) 和田 博：スカーフジョイントおよびフィンガージョイントしたスギラミナの引張強さ、木材工業、Vol.51、No.12、pp.587-590、1996
- 125) 橋爪丈夫：長野県産カラマツ材の強度特性Ⅱ ラミナの強度、木材工業、Vol.54、No.2、pp.54-59、1999
- 126) 飯塚五郎蔵：建築用集成木材とその構造法の研究、横浜国立大学博士論文、1959
- 127) 藤井 毅：集成材のストレスグレーディングシステム（1）、木材工業、Vol.35、No.1、pp.8-14、1979
- 128) 藤井 毅：集成材のストレスグレーディングシステム（1）、木材工業、Vol.35、No.2、pp.65-70、1979
- 129) 林 知行：構造信頼性向上技術としての集成加工（Ⅰ）、木材工業、Vol.47、No.4、pp.152-156、1992
- 130) 林 知行：構造信頼性向上技術としての集成加工（Ⅱ）、木材工業、Vol.47、No.5、pp.207-212、1992
- 131) たとえば、財団法人日本住宅・木材技術センター：エンジニアリングウッド性能評価事業報告書、平成 10 年度農林水産省補助事業、1999
- 132) 102)、103) と同じ
- 133) 104)、105) と同じ
- 134) 106) と同じ
- 135) 108) と同じ
- 136) 109) と同じ
- 137) 丸山則義、有馬孝禮：フィンガー・ジョイントにより縦継ぎされた構造用集成材の曲げ性能、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）C-1、pp.2683～2684、1984
- 138) 114) と同じ

- 139) 115) と同じ
- 201) 安達訓士、笹川 明、磯崎 浩、橋爪丈夫、五十田博：信州産カラマツラミナの引張特性に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）C-1、pp.81～82、1995
- 202) 財団法人日本合板検査会：構造用集成材の適正製造基準、1996
- 203) 125) と同じ
- 301) 110) と同じ
- 302) 114) と同じ
- 303) 113) と同じ
- 304) 114) と同じ
- 305) 115) と同じ
- 306) 110) と同じ
- 307) 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、Vol.37、No.10、pp.904-911、1991
- 308) 王 潜、林 知行、佐々木光、長谷泰弘：サバ産植林材木 LVL の複合梁フランジとしての利用（第 1 報）LVL 化による材質の信頼性向上、木材学会誌、Vol.36、No.8、pp.624-631、1990
- 401) 131) と同じ
- 402) 137) と同じ
- 403) 114) と同じ
- 404) 108) と同じ
- 405) 137) と同じ
- 501) 堀江和美：木材強度データの確率・統計手法、（有）木質構造研究所、1997
- 502) 102) ～109) と同じ
- 503) 柳川 堯：ノンパラメトリック法、培風館
- 504) 池田 央：統計的方法Ⅰ、新曜社
- 505) 芝 祐順：統計的方法Ⅱ、新曜社

本論文に関連する研究業績

研究論文

- 1) Hiroshi.Isoda, Takuro.Mori, Akira.Sasagawa : Destructive mechanism of glulam beam subjected to bending moment, Pacific Timber Engineering Conference'99, Forest Research Bulletin, No.212, pp.135~141, 1999
- 2) 五十田博、森 拓郎、笹川 明：曲げを受ける集成材はりの抵抗形態と破壊過程の解明、日本建築学会構造系論文集、第 529 号、pp.13~20、2000.3
- 3) 森 拓郎、五十田博、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、日本建築学会構造系論文集、第 541 号、2001.3

学会発表

- 1) 森 拓郎、笹川 明、五十田博：無欠点小試験体を対象としたべいまつの力学的特性、日本建築学会北陸支部研究報告集、第 39 号、pp.42~45、1996.7
- 2) 森 拓郎、笹川 明、五十田博、白須万寛：無欠点小試験体を対象としたべいまつの力学的特性(その 1：研究概要及び試験結果)、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿) C-1、pp. 1~2、1996.9
- 3) 白須万寛、笹川 明、五十田博、森 拓郎：無欠点小試験体を対象としたべいまつの力学的特性(その 2：試験結果についての考察)、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿) C-1、pp.3~4、1996.9
- 4) 森 拓郎、笹川 明、五十田博：ラミナ厚の異なる信州産からまつ集成材の曲げ強度実験、日本建築学会北陸支部研究報告集、第 40 号、pp.70~80、1997.7
- 5) 森 拓郎、笹川 明、五十田博：ラミナ厚の異なる信州産からまつラミナの引張強度実験、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) C-1、pp. 1~2、1997.9
- 6) 五十田博、笹川 明、森 拓郎：ラミナ厚の異なる信州産からまつ集成材の曲げ強度実験、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) C-1、pp. 3~4、1997.9
- 7) 森 拓郎、笹川 明、五十田博、伊熊清朗：集成材の曲げ強度推定モデルの提案、日本建築学会北陸支部研究報告集、第 41 号、pp. 51~54、1998.8
- 8) 伊熊清朗、笹川 明、五十田博、森 拓郎：ラミナ厚の異なる信州産からまつ集成材の曲げ強度実験(その 2)、日本建築学会北陸支部研究報告集、第 41 号、pp. 47~50、1998.8
- 9) 伊熊清朗、笹川 明、五十田博、森 拓郎：ラミナ厚の異なる信州産からまつ集成材の曲げ強度実験(その 2 実験の概要)、日本建築学会大会学術講演梗概集(九州) C-1、pp. 17~18、1998.9
- 10) 森 拓郎、笹川 明、五十田博、伊熊清朗：ラミナ厚の異なる信州産カラマツ集成材の曲げ強度実験(その 3 強度に関する結果の考察)、日本建築学会大会学術講演梗概集(九州) C-1、pp. 19~20、1998.9

- 11) 五十田博、笹川 明、森 拓郎：ラミナ厚の異なる信州産からまつ集成材の曲げ強度実験（その 4 シミュレーションによる検討）、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）C-1、pp. 21～22、1998.9
- 12) 杉森美由紀、笹川 明、五十田博、森 拓郎：曲げ応力を付加したラミナの引張強度、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）C-1、pp. 25～26、1998.9
- 13) 杉森美由紀、笹川 明、五十田博、森 拓郎：単節ラミナの引張強度特性に関する実験的研究、日本建築学会北陸支部研究報告集、第 42 号、pp. 21～24、1999.7
- 14) 杉森美由紀、笹川 明、五十田博、森 拓郎：単節ラミナの引張強度特性に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集（広島）C-1、pp. 3～4、1999.9
- 15) 飯島泰男、板垣直行、森 拓郎、林 知行：スギ材による大断面構造用集成材の性能とその予測（1）製造条件と実大実験結果、日本建築学会大会学術講演梗概集（広島）C-1、pp. 13～14、1999.9
- 16) 森 拓郎、笹川 明、五十田博、板垣直行、飯島泰男：スギ材による大断面構造用集成材の性能とその予測（3）長さ方向の強度分布を考慮したシミュレーション法、日本建築学会大会学術講演梗概集（広島）C-1、pp. 17～18、1999.9
- 17) 森 拓郎、笹川 明、五十田博：信州産からまつ集成材の曲げ強度実験とその推定、日本建築学会北陸支部研究報告集、第 43 号、pp. 149～152、2000.7
- 18) 杉森美由紀、笹川 明、五十田博、森 拓郎、熊谷 優：複数個節を有するラミナの引張強度特性に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）C-1、pp. 215～216、2000.9
- 19) 森 拓郎、笹川 明、五十田博：信州産からまつ集成材の曲げ強度実験とその強度推定、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）C-1、pp. 217～218、2000.9

謝辞

私が信州大学に入学し、早 9 年の月日が流れました。わがままもたくさん言わせてもらい、今までで最も充実した日々を送ることができました。これも今までお世話して下さい、ともに学んだ仲間、これら私に携わって下さった方々のお陰だと思っています。

この博士論文は、筆者の大学生活の集大成であり、これからのスタートであると考えています。この研究を進めるに当たり、いつも寛大に見守って下さったのは恩師の信州大学工学部社会開発工学科教授 笹川明博士でした。ものわकारの悪い私を終始暖かくご助言、ご教授して下さいました。ここに深甚なる謝意を表します。また、信州大学工学部社会開発工学科の諸先生方には暖かく御指導を賜りました。ここに深く感謝いたします。

現在、国土交通省建築研究所におられる五十田博博士には、大学におられた 2 年間だけでなく、建築研究所に移られてからも、勉強だけでなく、たくさんのご御指導、御助力して頂きました。すごく近い存在でいて下さり、何でも相談に乗って下さいました。ここに深く感謝いたします。

磯崎浩先生には、ご多忙のなか厳しく御指導して頂きました。鋭い御指摘が多く、いつも打ち合わせの後には課題がたくさんでき、この課題をこなすことによって展望が開けることが多々ありました。ここに深く感謝いたします。

橋爪丈夫博士をはじめ長野県林業センターの皆様には、試験機の使用など様々なご指導、ご助言を頂きました。また、こちらの急な頼み事にも暖かく対応して頂きました。斎藤木材工業株式会社の皆様には、試験体の提供および作成などにあたって、たびたびの厄介な申し出にも笑顔で対応して下さいました。ここに深く感謝いたします。

また、秋田県立大学教授 飯島泰男博士、京都大学木質科学研究所教授 小松幸平博士、森林総合研究所接合研究室長 林知行博士、信州大学農学部助教授 武田孝志博士、秋田県立大学講師 板垣直行博士に研究についての多数のご助言を頂きました。ここに深くお礼を申し上げます。

スギの実験に関しては（財）日本住宅・木材技術センターの「エンジニアリングウッド性能評価事業」のものであり、貴重なデータを提供していただいた関係者の方々に深く感謝いたします。

岐阜県林業センターの方々の御協力によって実験を行うことができました。ここに深く感謝いたします。

最後になりましたが、本論文における多数の実験は信州大学工学部社会開発工学科笹川研究室の研究の一環として行いました。本研究は、筆者独りではなく、笹川研究室とともに過ごした諸兄諸氏とともに行ったものであります。ここに深く感謝いたします。

本当にありがとうございました。

2001 年 3 月

森 拓郎