

氏名	いた がき なお ゆき 板 垣 直 行
授与学位	博士（工学）
学位授与年月日	平成 11 年 3 月 10 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 2 項
最終学歴	平成 6 年 3 月 東北大学大学院工学研究科建築学専攻前期課程 修了
学位論文題目	建築構造用スギ集成材の性能設計及び信頼性の向上に関する研究
論文審査委員	主査 東北大学教授 三橋 博三 東北大学教授 杉村 義広 東北大学教授 小川 淳二 名古屋大学教授 平嶋 義彦

論文内容要旨

近年、世界的森林資源は、熱帯林をはじめとする特定の地域での集中的な伐採や、ヨーロッパを中心とする酸性雨汚染等によってその蓄積量を減少させつつあり、またこのことが地球温暖化現象とも深く関係する問題であるため、これらの森林の保護が緊急の課題として検討されている。一方、我が国では、産業構造及び経済性の変化に伴う林産業の低迷により、大量のスギ材が供給可能な状態にあるにも関わらず、木材供給の多くを海外からの輸入に依存しており、その結果荒廃した人工林が治山治水や生態系に対し様々な悪影響を及ぼしている。これらの問題の根本にあるのは、急激な消費拡大による木材需給のアンバランス化であり、地球全体として森林資源が永久に維持され続けていくためには、森林の植樹・伐採サイクルに応じた適正な森林資源の利用を図っていくことが重要である。そのためにもわが国では現在の輸入材への依存体制を見直し、国産材の消費を拡大していく必要がある。

現在これらのことを背景に、スギ材の建築構造用材としての利用拡大を目指した集成加工技術の開発が試みられている。集成加工は、力学的性能の向上と安定化を図る技術として注目されており、そのままでは必ずしも優れていないスギ材の利用価値を高める方法として有効であると考えられる。しかし、このような集成加工による効果は必ずしも十分には明らかにされておらず、スギ材の性能を最大限に有効に用いるためには、その性能設計方法を確立する必要がある。

集成材の性能評価及び性能設計に関する研究は、近年様々な研究者等によって取り組まれており、その基礎概念は形成されつつある。しかしそれらの実大実験データの蓄積量は信頼性を評価するには未だ十分であるとはいえず、今後一層のデータの蓄積が必要である。その一方で、建築物の設計手法を取り巻く情勢は、建築基準法の性能規定への改定、限界状態設計法への移行といった大きな変革の時期を迎えており、木質材料についても、早急にその性能の明確化及び信頼性の保証が求められている。そのため、実験に基づく性能評価の代わりに、シミュレーションにより仮想データを作成し、材料性能を評価する方法の開発が進められている。

この方法は集成材の構成要素であるラミナの基礎データに基づき、材料性能のばらつきを確率モデルを用いて考慮した仮想の集成材を作製し、それらの性能を破壊モデルによりシミュレートして予測するものである。これにより、少ない実験データを基に、様々なタイプの集成材の性能試験データを仮想的に

作成し、それらのデータを統計処理して性能及びその信頼性を評価することが可能となる。しかし既往の報告で提案されているシミュレーションモデルは、積層数の少ない比較的小断面の集成材に対応するモデルであり、一般的な大断面あるいは中断面の集成材に適用できるかどうかは明らかではない。また既往のシミュレーションモデルでは、集成材の破壊条件をラミナ単体の強度性能により決定しているが、実際にはラミナにおける節等の欠点が集成加工により補強される、いわゆる“積層効果”が指摘されており、これらをモデルに考慮することが必要であると考えられている。

以上のことを踏まえ、本研究では、スギ材を用いてラミナから集成材までの一貫した力学的性能実験を行い、ラミナの性能特性と集成材の性能特性との関係をより合理的に表した新たなシミュレーションモデルを作成し、構造用スギ集成材の性能の明確化及び信頼性の評価を試みた。また作成されたシミュレーションモデルを用い、データの標準化や製造の合理化の方法についても提案した。

本論文は全編 10 章で構成されており、各章の内容は以下に示す通りである。

1 章 序 論

本研究の背景となる木材資源の問題、建築設計において木質材料に要求されている問題を明確化すると共に、その対策としての集成加工技術の意義及び既往の研究を概説し、本研究の目的と論文の構成について述べている。

2 章 スギ原木の性能とラミナの性能との関連性

スギ原木の持つ力学的特性と、それから得られるラミナの性能の関連性を実験的に調べている。まず原木の樹幹内性能分布を実験的に測定した結果より、ヤング係数は髄からの年輪数が大凡 10~15 年輪目まで増加した後安定するが、強度については明確な変化傾向がなく、随付近と外周部付近との間にあまり差がないという分布傾向を把握した。また強度とヤング係数の相関は、10~15 年輪目までの未成熟部においてはあまり良い相関を示さないが、成熟材部においてはかなり良い相関性を持つことを明らかにした。さらに得られた樹幹内の性能分布を基に、原木からラミナが木取りされる際に、どのように性能が与えられるかについて考察し、より合理的な集成材の生産を行うために、原木段階でのヤング係数による選別が有効であることを示した。

3 章 スギラミナの性能評価

集成材の構成要素であるラミナについて、その基本的な力学的特性を実験的に調べている。特に 5 章で検討するシミュレーションモデルにおけるラミナ性能のモデル化を念頭に置き、各強度への影響因子を調べ、ヤング係数が各強度に対して最も相関が高く、強度を評価する際のパラメータとなり得ることを明らかにした。さらにヤング係数と強度との間には一次の相関が認められるものの、引張強度は回帰式からのばらつきが大きく、特にヤング係数の高い領域では誤差が大きいため、それらを考慮した回帰モデルを検討する必要があることを示した。またフィンガージョイントラミナは、ノンジョイントラミナに比べ、引張強度で 70%、曲げ強度で 65% くらいに強度が低下するものの、回帰からのばらつきも低下し、ヤング係数との相関性が向上することを示した。

4 章 スギ集成材の力学的特性

3 章で性能を調査したラミナを用いて製造された集成材について実大曲げ試験を行い、その力学的特性について考察している。5 章で検討するシミュレーションモデルにおける集成材の破壊メカニズムのモデル化を念頭に置き、ラミナの性能と集成材の性能との関係について検討し、等価曲げ剛性の関係式を用いて、ラミナのヤング係数から集成材のヤング係数を大凡設計することが可能であることを示した。また曲げ試験における載荷過程での歪分布性状及び破壊の性状を観察し、曲げ載荷を受ける集成材

は初期の荷重段階においては平面保持が成立しているものの、圧縮側外層から塑性化が進むことにより中立軸が引張側に移動し、最終的に引張側外層で破壊する様子を明らかにした。

5章 シミュレーションによる集成材の性能予測方法の提案

本研究の中心となる部分であり、シミュレーションによるスギ集成材の性能予測方法について論じている。既往のモデルを踏まえ、まず3章で得られた知見を基にラミナの性能モデルについて検討し、ヤング係数と強度の回帰モデルにおいて、回帰からの誤差を多次元正規乱数を用いて与えることにより仮想ラミナの強度性能を決定する方法を提案した。次に4章で得た知見を基に、曲げを受ける集成材の力学的メカニズムモデルについて検討し、特に集成加工における積層効果について有限要素法及び破壊の確率過程理論により定量的に評価する方法を示した。最後にこれらの検討に基づいた新たなシミュレーションモデルに一連の実験データを適用し、モデルの妥当性を検証した。その結果、シミュレーションによる予測結果は実験結果とかなり良い適合性を示し、モデルの有効性が示された。

6章 シミュレーションによるラミナ及び集成材の標準データの検討

5章で提案されたシミュレーションモデルを応用し、既往のラミナ実験データを総合化した標準回帰データを作成する方法を提案している。このような手法により、各樹種群、あるいは樹種ごとの標準的な性能を設定することが可能であることを示した。またこの標準データを用いて集成材の性能予測を行い、これらの集成材のJAS強度等級基準への適合性を検討した。

7章 スギ集成材の合理的製造方法の検討

秋田県産スギ材を用い、2章から4章までに得られた知見を再検討すると共に、地域の材料特性に応じた合理的な集成材の製造方法を提案している。秋田県産スギ材のヤング係数分布にしたがった合理的ラミナの構成方法を提案し、それらの性能を実大実験及び5章で提案したシミュレーションモデルを用いて評価し、その構成方法の実用性を示した。またシミュレーションにより、プルーフローディングを行った場合の不良ラミナの出現確率と集成材の性能向上効果を明らかにした。

8章 スギ集成材の性能向上のための検討

3章及び5章で得られた考察に基づいて、集成材の強度に影響を及ぼす節及び縦継ぎ部の問題を取りあげ、集成材の性能向上のためのこれらの影響の評価方法について検討している。節の問題については実験及び有限要素法による解析を行い、節の大きさ及び位置が強度に与えている影響を明らかにした。また縦継ぎ部の繊維補強について有限要素法を用いて解析し、コスト削減のための部分的補強法について基礎的な検討を行った。その結果、最大剪断応力は縦継ぎ部分（木口の接合点）で生じ、ある長さ以上ではほぼ一定となることを明らかにした。

9章 スギ中断面集成材を用いた住宅構法の検討

スギ中断面集成材の住宅部材としての具体的な利用方法を検討し、中断面集成材の性能を生かした新たな架構モデルとして、 $240 \times 120\text{mm}$ 及び $300 \times 120\text{mm}$ の2種類のみ断面の中断面集成材を部材とし、 $3.6 \sim 5.4\text{m}$ のグリッドを基本とする住宅架構を提案した。またより広いスパンに対応する部材として、中断面集成材を上弦材とした張弦梁が有効であることを示した。

10章 結論

原木及びラミナの性能との関連を含め、スギ集成材の性能特性及びそれに基づいたシミュレーションモデルを総括し、シミュレーションを用いた集成材の性能設計方法についてまとめている。また本研究で得られた知見を基に、建築構造材としてのスギ集成材の可能性を述べると共に、今後の検討課題を提起している。

審査結果の要旨

建築基準法の性能規定化への抜本的改定が進められている現在、建築材料における材料性能の明確化及び信頼性の保証は必須の条件となりつつある。また一方で、国産スギ材の用途開発は、国内林産業における最重要課題となっている。著者は集成加工による性能向上効果に注目し、これを確率モデルを用いたシミュレーションにより評価することによって、このような建築サイドと林学サイドのそれぞれの問題を同時に解決する方法を提案している。本論文は、この研究成果についてまとめたもので、全文10章よりなる。

第1章は序論であり、前述の問題を背景に挙げ、研究の目的について述べている。

第2章では、原材料となるスギ原木の力学的特性を調べ、集成材の構成要素であるラミナの性能との関係を明らかにしている。

第3章及び第4章では、集成材の性能シミュレーションモデル構築のための基礎実験について述べている。まず第3章では、ラミナの力学的特性を調べ、ヤング係数をパラメータとした強度性能評価の有効性を示している。またラミナのジョイントの有無による性能の違いについて明らかにしている。続く第4章では、実大集成材について実験し、断面のひずみ分布の測定結果及び破壊状況より、集成材が破壊に至る過程のメカニズムを明らかにしている。また等価曲げ剛性の関係式よりヤング係数を算定出来ることを検証している。

第5章では、第3章及び第4章の検討を基に仮想集成材を作製し、破壊過程をシミュレートする方法について述べている。まずラミナの性能をシミュレートする方法として、各強度の相関を考慮した多次元正規乱数によるモンテカルロ法の適用を提案している。さらに積層による補強効果を、有限要素法及び破壊の確率過程理論を用いて定量的に評価し、集成材の破壊のメカニズムモデル中に考慮することを提案している。これらは集成材の性能シミュレーションモデルをより現実的なものとし、予測結果の適合性を高めるために重要な成果である。

第6章では、第5章で提案した集成材の性能シミュレーション手法を改良し、既存実験データの再現・総合化を行い、材料の標準性能を評価する方法を提案している。これは材料定数の基準値等を規定する際に非常に有用な成果である。

第7章では、断面構成の異なる集成材の性能の差をシミュレーションにより評価し、製造の効率性を検討している。またプルーフローディングの実施を仮定したシミュレーションでは、不良ラミナの発生率と集成材の性能向上効果を明らかにしており、製造の合理化に極めて有効である。

第8章では、集成材の更なる性能向上のために、破壊に悪い影響を及ぼすラミナの欠点について有限要素法により解析し、有効な評価及び補強方法を提案している。

第9章では、スギ中断面集成材を活用した住宅構法について提案している。

第10章は結論である。

以上要するに本論文は、スギ集成材の性能を予測するために確率モデルを用いた新たなシミュレーションモデルを開発し、それを応用した性能設計により、高い信頼性を有する木質材料の開発に成功したものであり、建築材料学及び林産学の発展に寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。