

北海道産人工林材を用いた木質 I 形梁の材料特性と 構造設計に関する研究

学位論文内容の要旨

1. 緒論

トドマツ (*Abies sachalinensis*) とカラマツ (*Larix kaempferi*) を主体とする北海道の人工林資源は本格的な利用期を迎えつつある。国産人工林材のなかで比較的強度が高く、資源量の多いトドマツやカラマツは、近年の国際的な木材需給の激変により、国内林産業において極めて重要な木材資源となりつつある。しかし、その利用実態はパルプ材や梱包材などの低次利用が中心であり、人工林資源の有効活用のためには付加価値の高い建築用材としての需要拡大が急務とされている。一方、近年の木造住宅では、高断熱高気密化により室内空気が過乾燥状態となり、寸法安定性の高い構造材料が求められている。軸材料と面材料を複合化した木質 I 形梁は、梁せい方向の寸法変化が極めて小さな材料であり、さらに軽量で施工性に優れることから、新しい構造材料としてニーズが高まっている。しかし、国内では木質 I 形梁の研究例は少なく、製造技術、材料特性、利用法に関する研究蓄積が乏しい。海外においても製造条件や様々な使用環境下の特性、クリープ特性などのデータが少ない。実用化のためには、原料の材質、製造工程、構造設計、住宅施工、使用環境などの様々な日本の諸条件を考慮しながら製造・評価・設計までの総合的な技術開発が必要である。

そこで、本論文では、北海道産人工林材を用いた木質 I 形梁 (道産 I 形梁) の実用化技術の確立を目的として、製造技術の開発、曲げ性能予測法の検証、様々な力学特性と環境条件による影響、クリープ特性の評価、曲げ部材としての構造設計と実用性の評価を行った。以下に得られた結果を示す。

2. 製造技術の開発

道産 I 形梁に適した製造方法と適正条件を検討した。その結果、フランジ溝に接着剤を簡便かつ確実に塗布できる接着治具と塗布方法を発明するとともに、効率的な圧縮装置を開発した。それらを用いた製造方法の圧縮圧、圧縮時間などの最適条件を明らかにした。また、量産時に切削長さとともに刃物の摩耗によりかん合度が大きくなること、切削幅を調整すれば高い寸法精度を確保できることなど、品質管理で重要となる知見が得られた。

3. 曲げ性能の予測法の検証

道産 I 形梁の曲げ性能の予測可能性を検証するために、実大曲げ試験と各構成要素の強度実験を行った。その結果、曲げ剛性と全たわみについては、実測値が計算値とよく一致し、曲げ成分とせん断成分が精度良く計算可能であることが示された。耐力については、フランジの圧縮破壊と引張破壊、ウェブせん断破壊の最大荷重は構成要素の破壊強さから予測可能であった。しかし、接合部せん断破壊の最大荷重の計算値は過大評価となり、ウェブ継ぎ手を考慮したせん断応力計算法の誘導が課題となった。

4. 曲げ、せん断、めり込み特性

構造設計で必要となる力学特性を求めるために、実用生産設備で量産した3種類の梁幅を有する道産I形梁について曲げ、せん断、めり込み実験を行った。その結果、各試験における破壊性状と耐力の関係、各力学特性の分布特性と梁幅との関係、種々の算出方法による統計的下限值が明らかとなった。また、統計解析による道産I形梁の特性値は、同形状の北米産I形梁に比べて低かったが、同じ梁せいの枠組壁工法用製材と比べるとせん断性能以外の曲げ性能とめり込み性能は同等以上であることが明らかとなった。

5. 種々の環境条件における力学特性

使用環境が道産I形梁の力学特性に及ぼす影響を把握するために、種々の処理（高湿度処理、浸せき処理、防腐処理、煮沸処理、減圧加圧処理）を施した試験体と常態試験体の各種強度試験を行った。その結果、高湿度処理では、せん断剛性の低下が顕著であった。浸せき処理と防腐処理では、いずれの特性値もあまり低下せず、乾燥状態に戻れば吸水や薬剤塗布による影響は小さいことが示された。煮沸と減圧加圧処理では、曲げ耐力よりせん断耐力のほうが大きく低下する傾向が示された。せん断性能の比較では、防腐、浸せき、高湿度、減圧加圧、煮沸処理の順に残存率が小さくなり、I形梁の梁幅が大きいほど、劣化処理の影響が大きいことが明らかとなった。

6. 曲げクリープ特性

道産I形梁の曲げクリープ特性を把握するために、調湿条件の異なる道産I形梁を用いて曲げクリープ試験を行った。その結果、85%RHで調湿した試験体では、載荷直後の脱湿によりたわみが著しく増加した。その後もすべての試験体の変形は含水率変動に呼応し、低湿度の冬季で増加、高湿度の夏季で減少する傾向を周期的に繰り返した。85%RHで調湿した試験体では65%RHで調湿した試験体よりもたわみと含水率の変動幅、荷重除去後の残留たわみも大きく、試験前の調湿条件が長時間経過後もたわみと含水率の挙動、さらには荷重除去後の回復挙動にも影響を及ぼした。道産I形梁のクリープを抑えるためには、工場出荷から施工までの間に余分な水分を吸着させないように養生や保管に留意すべきことが示された。

7. せん断クリープ特性

道産I形梁のせん断クリープ特性を把握するために、荷重条件の異なる2種類の曲げクリープ試験を行った。その結果、50年後の見かけの曲げクリープ係数は、曲げ成分の多い条件より、せん断成分の多い条件のほうが大きかった。それらの係数から本報で考案したクリープ係数分離法により求めた純曲げクリープ係数は約1.3、せん断クリープ係数は約2.0となった。分離したクリープ係数を用いた長期たわみ計算法ではスパンや荷重条件に関わらず常に合理的な剛性設計が可能となることが明らかとなった。

8. 実用スパンの検討

道産I形梁の実用スパンを明らかにするために、得られた力学特性値と調整係数、分離したクリープ係数と長期たわみ計算法を用いて構造計算を行った。その結果、道産I形梁は床根太とたるきとともに枠組壁工法用製材と同等以上のスパンで利用できること、施工条件によって実務上で十分なスパンで利用できることが示された。また、環境条件（高湿度処理、浸せき処理、防腐処理）による力学特性の低下が床根太スパンに及ぼす影響は小さいことが示された。

9. 総括

本論文では、道産I形梁の新たな製造方法と適正条件、曲げ性能予測法の精度、横架材として重要な曲げ、せん断、めり込み特性、種々の環境条件における力学特性、曲げクリープ特性、せん断クリープ特性、横架材としての実用性を検討した。そして、新しい接着剤の塗布方法、実大材の様々な力学特性の評価法、せん断クリープの分離法、長期たわみ計算法などを提案しながら、道産I形梁が床根太やたるきとして実用上十分な性能を有することを明らかにした。また、道産I形梁の今後の可能性と方向性として、ばらつきの小さなフランジ材や性能の高いウェブ材の選択、フランジ断面や梁せいの増加などの改良により性能向上が可能であることを

示した。また、本論文のように様々な性能評価によりデータを充実すれば、ばらつきの大きな人工林材でも、高度な設計要求や厳しい使用環境にも対応可能となり、信頼性の向上と適用範囲の拡大が可能となることを示した。そして、人工林材を用いた木質 I 形梁により、施工性の向上、構造体の軽量化、床組の品質向上、人工林資源の有効活用、中小径材の高度利用につながることを示した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 平 井 卓 郎
副 査 准教授 小 泉 章 夫
副 査 助 教 澤 田 圭
副 査 教 授 後 藤 康 明 (工学研究科)

学 位 論 文 題 名

北海道産人工林材を用いた木質 I 形梁の材料特性と 構造設計に関する研究

本論文は総ページ数 165 の和文論文で他に参考論文 7 編が添えられている。

現在、北海道内ではトドマツ (*Abies sachalinensis*)、カラマツ (*Larix kaempferi*) を主体とする人工林資源が本格的な利用期を迎えようとしているが、その利用実態はパルプ材や梱包材などが中心であり、より付加価値の高い建築用材としての需要拡大が急務となっている。

一方、近年の寒冷地住宅では、高断熱高気密化により、室内空気が過乾燥状態になりやすく、寸法安定性の高い構造材料が求められており、その新たな選択肢として木質 I 形梁への期待が高まっている。木質系の軸材料と面材料を複合化した木質 I 形梁は、軽量で、施工性に優れ、寸法安定性が高く、中小径材を主体とする人工林材でも、長尺で強度信頼性の高い構造材料が効率的に製造可能である。

しかし、国産材を用いた木質 I 形梁の製造技術や材料特性については研究蓄積が乏しい。また、水分依存性の強いクリープ特性や、原材料の材質、構造・施工方式に依存する性能特性など、地域によって要求内容、要求水準の異なる性能因子に関しては、海外の研究事例が参考とならず、使用地域の実状に合ったデータ蓄積が必要となる。

以上の背景から、本論文では北海道産人工林材を用いた木質 I 形梁の実用化技術の確立に必要な製造技術の開発、構造設計資料として不可欠な各種力学特性の把握、それに基づく住宅用曲げ部材としての設計資料整備を行っている。その概要は以下の通りである。

1. 北海道の木材資源と木材加工業の現状に即した I 形梁の製造方法を検討し、フランジ材とウェブ材の接合に用いる簡便な接着剤塗布技術 (特許第 3997360 号 : 2007) を開発した。

2. I形梁の曲げ性能の予測精度を検証するため、実大曲げ試験と構成要素の強度実験を行い、曲げ剛性・せん断剛性やフランジ、ウェブの破壊による最大耐力については、構成要素実験から精度良く推定可能であるが、フランジ-ウェブ間の接合部せん断破壊については、ウェブ継ぎ手を考慮したせん断応力計算法の誘導が必要であることを示した。

3. 実用生産設備で量産した道産I形梁3種類の曲げ、せん断、めり込み実験を行って実験結果の詳細な統計解析を行い、製造されたI形梁が通常の荷重条件では、枠組壁工法用製材に代替可能な十分な性能を有すること、しかし大きなせん断力が生じる荷重条件では設計上の留意が必要であることを示した。

4. 水分条件等による強度低下を把握するため、種々の処理（高湿度処理、浸せき処理、防腐処理、煮沸処理、減圧加圧処理）を施した試験体と常態試験体の各種強度試験を行い、(1)高湿度処理ではせん断剛性の低下が顕著であること、(2)浸せき処理と防腐処理では、強度性能があまり低下せず、乾燥状態に戻れば吸水や薬剤塗布による影響は小さいこと、(3)煮沸と減圧加圧処理では、曲げ耐力よりせん断耐力のほうが大きく低下すること、(4)せん断性能の比較では、防腐、浸せき、高湿度、減圧加圧、煮沸処理の順に残存率が小さく、I形梁の梁幅が大きいほど、劣化処理の影響が大きいことを示した。

5. 初期調湿条件の異なるI形梁を用いて、6年間の長期曲げクリープ試験を行い、使用前に高湿度状態（関係湿度85%）に置かれた試験体は、標準的な湿度状態（関係湿度65%）に置かれた試験体に比べ、載荷直後の脱湿によりたわみが著しく増加すること、またその後もたわみと含水率の変動幅、荷重除去後の残留たわみも大きいことを示した。これにより、I形梁のクリープ変形抑制には、工場出荷から施工までの間の適切な水分管理が重要であることが明らかとなった。

6. 長期間使用後のクリープたわみに対する曲げクリープとせん断クリープの影響を把握するため、それらの影響度の異なる2種類の曲げクリープ試験を行い、長期間（設計上50年）使用後の変形増大は、曲げ成分の支配的な条件より、せん断成分の支配的な条件のほうが大きいことを示した。この現象を構造設計に反映させるため、曲げクリープ係数とせん断クリープ係数の分離計算法を誘導し、実験結果から純曲げクリープ係数を約1.3、せん断クリープ係数を約2.0と評価した。分離したクリープ係数を用いた長期たわみ計算法を用いることにより、横架材のスパンや荷重条件に関わらず合理的な剛性計算が可能となった。

7. 上記の成果に基づき、木造住宅設計用のI形梁のスパン表（実務設計用部材選択表）を作成し、技術資料として公表した。

これらの研究成果は、今後の木材利用における地産地消を推進するための木質材料の製造技術、木質構造の設計・施工技術に関して学術的、実用的に高い価値を持つと判断される。

よって、審査員一同は、北大農が博士（農学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと認めた。