

主論文の要約

論文題目：カラマツ小径丸太を用いた積層材および接合部の力学解析

研究科：生命農学研究科

専攻：生物圏資源学専攻

講座：生物材料科学講座

研究室：木材工学研究室

氏名：HA Been

小径丸太は未成熟部が占める割合が高く、多くの節、割れ、曲がりを伴い、強度は低いので、製材等の構造用材料としての活用は進められていなかった。小径丸太のほとんどその用途はボード、パルプやエネルギーなど、価値の低い製品である。そのため、伐採された小径丸太の多くは収穫されない。このような小径丸太を原材料とする生産品に高い付加価値を付与し、競争力のある製品を開発することは、小径丸太を有効利用する上で意義あることである。小径丸太の構造用材料としての利用は、韓国以外の国々でも課題となっており、これまでも関連する研究が多くなされが、小径丸太から得られる製材は、一般的に断面寸法が小さいことから、構造用材料としての利用は容易ではない。そこで、小断面の製材を積層接着した、重ね梁の研究が試みられている。これらの梁は、小径の丸太から得られた角材の垂直方向に積層された接着に制限されている。

そこで、本研究は、未成熟部を含む小径材を有効利用するため集成加工し、競争力のある構造用材としての可能性を確認することを目的とした。小径丸太から得られた正角材から積層梁材と積層柱材を開発する。これらの部材は、建設部材として大きな寸法を得るために、垂直および水平の積層によって製造されている。これらの部材は、強度と剛性を強化するために、小径丸太だけでなく大径丸太も使用した。

これら積層材の構造利用を実現するためには、接合した際の力学性能を把握する必要がある。積層材による柱-梁の接合方法として、グルード・イン・スチール・ロッドがある。これは、部材にドリル穴を設けて、そこに異形棒鋼を差し込み、さらには異形棒鋼とドリル穴の隙間に接着剤を充填させることで部材を接合するものである。これまで集成柱材-梁材にこの接合部の力学性能は実験的に調べており、異形棒鋼のすべり性能が実験的に調べられており、この結果を踏まえて、柱-梁接合部のモーメント-変形角関係の理論的推定を試みている。

そこで、本研究では、これらの積層材を構成部材とするグルード・イン・スチール・ロッドを用いた接合部のモーメント抵抗性能を調べた。加えて、力学解析により、この接合部の回転剛性および最大モーメントを理論的に計算することを試みた。

まず、小径丸太から得られる正角材に、大径丸太からの正角材やラミナを併せることで、力学的な補強を施した集成はり材および集成柱材を開発し、これらの強度性能を実験的に検証した。積層材の試験体作成には、韓国産の i) カラマツ (*Larix kaemperi* Carr.) の小径丸太、ii) カラマツおよびベイマツ (*Pseudotsuga menziesii* Taxifolia) の大径丸太、iii) カラマツおよびベイマツのラミナを供した。

上記の供試材を用いて、積層梁試験体 8 タイプを用意した。曲げ試験は実大材スケールの曲げ試験機を用いて三等分点四点曲げ試験を実施した。積層梁試験体による曲げ試験を行うことで、MOE と MOR を求めた。MOE を求めたところ、小径丸太から得られる正角材のみを用いた試験体では、9.0 GPa となり、これは従来のラミナ積層による集成はり材の 10.7 GPa よりも下回った。一方、大径丸太からの正角材やラミナによって補強した試験体では、10.3~14.7 GPa となり、ラミナ積層集成はり材と同等、あるいは上回る値を示した。MOR に関すると、小径丸太からの正角材のみの試験体では 27.6 MPa であり、これはラミナ積層集成はり材の 51.7 MPa を大きく下回った。一方、大径丸太からの正角材やラミナによって補強した試験体では、一部では 30.8 MPa と低い値を示したものの、その他は 39.2~48.8 MPa となり、ラミナ積層集成はり材より下回るが、大きくは劣らない結果となった。

供試材を用いて、積層柱試験体は 8 タイプを用意した。圧縮試験は実大材スケールの圧縮試験機を用いて試験を実施した。圧縮試験により、圧縮ヤング率 E_c 、比例限度応力 σ_{cy} 、圧縮強度 σ_{cmax} の 3 つの特性値を求めた。集成柱の圧縮試験によれば、小径丸太から得られる正角材のみを用いた試験体は 2 タイプあり、圧縮ヤング率はそれぞれ 9.4, 8.1 GPa であった。一方、大径丸太からの正角材やラミナによって補強した試験体では 10.5~16.5 GPa であり、十分な補強効果を確認することができた。また、比例限度強度と圧縮強度に関しても、同傾向の補強効果を確認できた。Euler 式による圧縮限界応力を計算値は、いずれのタイプにおいても圧縮強度を大きく上回った。特に柱の断面が大きくなるにつれて大きく外れる傾向を示した。Euler 式は細長比が小さくなる適用できないと言われている。Johnson 式による圧縮限界応力を計算したところ、14.3~23.8 MPa と算出された。この値は全てのタイプにおいて比例限度強度と圧縮強度の間に位置しており、したがって、本研究で試作した集成柱材の限界応力は、Johnson 式による予測が可能であることが示された。

以上のように、小径丸太から得られる正角材のみで構成される集成はり材および集成柱材の強度性能はそれほど高くなかったが、大径丸太からの正角材やラミナによって補強を施すことにより、強度性能の向上を確認することができた。また、補強した試験体の特性値は、構造用材料としての利用可能性が十分にうかがえるものであった。このことから、韓国で大量に産出される小径丸太を、構造用材料として活用できることが示唆された。

次に、小径丸太の構造利用を促すことを目的として、カラマツ (*Larix kaemperi* Carr.) 小径丸太より得た正角材をエレメントに持つ積層材を用いて柱-梁接合部を作成し、そのモーメント抵抗性能を調べた。積層柱材は、4 本の正角材を接着して断面を構成した。積層梁

材は、4本の正角材接着し、カラマツ大径丸太を供して作成したラミナを上下面から3枚ずつ、計6枚を接着して断面を構成した。積層梁材と積層柱材の接合には、グルード・イン・スチール・ロッドを採用した。グルード・イン・スチール・ロッドの接合には、異形棒鋼を使用した。異形棒鋼の積層梁材への埋め込み深さは400 mmと450 mmの2種類とした。また、このときの接着剤の充填にはエポキシ樹脂接着剤を用い、E1とE2の2種類とした。積層梁材への埋め込み深さと接着剤の種類を組み合わせることで、4シリーズの接合部試験体を用意した。接合部の力学試験を積層柱材と積層梁材を試験機の鉄製フレームとピン接合した。積層柱材上部を加力点として、アクチュエータから水平力を与えることで、接合部にモーメントを作用させた。負荷は変位制御で行い、正負交番载荷を採用した。加力の折返しは、変形角10段階を設定し、各段階で3回の正負载荷を繰返した。その後、接合部が破壊するまで単調加力した。

力学試験によりモーメントー変形角関係を調べた結果、加力初期から破壊に至るまではほぼ線形の挙動が現れた。また、回転剛性は879.2～965.6 kNm/rad、最大モーメントは26.7～32.8 kNmとなった。接着剤の種類による若干の性能差は見られたが、異形棒鋼の埋め込み深さの違いによる性能差は、今回の場合には見られなかった。また、接合効率は0.78～0.93となり、今回の試験体の変形は集成柱材の曲げたわみが支配的であることがわかった。破壊性状の観察によれば、今回の試験体の破壊は積層柱材の曲げ破壊により決定されていた。接着剤性能だけでなく、柱の強度によっても決定されるように見えたため、接合部に最適な接着剤を選択することは困難である。接着剤の評価についてはさらに議論が必要である。

このような結果をもとに、理論的な考察により線形解析を行なった。これは異形棒鋼のすべり特性と集成柱材の横圧縮特性から接合部の回転変形を求め、加えて積層柱材の曲げ特性から柱材の曲げ変形を考慮することで、接合部試験体の回転剛性と最大モーメントを計算するものである。これによる計算結果は実験結果と概ね良い一致を示した。したがって、提案した計算方法の妥当性を確認することができ、すなわち、今回の接合部試験体のモーメント抵抗性能は、異形棒鋼のすべり特性と積層柱材の横圧縮特性、および曲げ特性で表現できることがわかった。この過程で計算された接合部での回転剛性は3315.8～3834.2 kNm/radとなっており、積層柱材の曲げ性能を補強することで、回転剛性を計算値に近づけることができる可能性が示唆された。このような接合部のモーメント抵抗性能を簡便に把握する方法として、ここで提示した解析法は有効であろう。