別紙１－１

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※　　第　　号

氏　　名　河　　頻

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

論文審査担当者

主　査　名古屋大学准教授　山﨑　真理子
委　員　名古屋大学教授　土川　覚
委　員　名古屋大学教授　山本 浩之
委　員　名古屋大学教授　福島 和彦
委　員　名古屋大学助教　安藤 幸世

別紙１－２

論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

気候変動問題への対応策の一つとして，森林管理と一体となった木材利用，特に炭素貯蔵効果を有する木造建築への利用が推進されている．ここでは，森林管理と一体化した，すなわち人工林経営と連繋した木材利用が問われており，そのためには，木材生産という数十年から百年単位の生産体制の持続性を考える必要がある．人工林の育成は戦争の影響を強く受け，その齢級構成は著しく歪な状態となる．たとえば，日本や韓国では第二次世界大戦や朝鮮戦争の戦後に大規模な造林政策がなされており，現在はこの時代に植林された齢級を頂点とする釣鐘状の分布となっている．歪な齢級構成の人工林に対して生産と利用の持続性を考えるとき，生産される木材の質（強度，寸法）と量が百年近く変動することを視野に入れた計画的な木材利用が要求される．人工林の木材生産において，まず齢級構成が若い段階では小径木を中心とした間伐材利用が求められ，成長に応じて径が増加する．建築物で多く利用される木材寸法を超えると，次に大径木の歩留まりが課題となる．建築物における木材利用では，様々な径寸法に応じた用途開発と木質材料の開発が必要となる．

ここで，若齢級から高齢級まで常に生産される小径丸太に焦点を当てると，小径丸太では未成熟部の占める割合が大きく，また，節，割れ，曲がりを伴うことから，力学性能が低い特徴を有する．そのため，一般には構造用途への利用がなされず，チップ等のボード原料，パルプ，エネルギーなど，低付加価値の利用にとどまっている．このことは，小径丸太の生産価値を下げ，ひいては間伐作業の抑制に繋がる．したがって，人工林の経営や適切な森林管理のためには小径丸太の高付加価値化が必要であり，その一つとして力学的に競争力を有する構造用材の開発が考えられる．小径丸太の構造用材化について，これまで多くの研究がなされてきた．たとえば，小径丸太から得られる製材は断面寸法が小さく，それ自体の構造利用は難しい場合が多いため，小断面の製材を積層接着した重ね合わせ梁の開発が研究されている．

以上の背景のもと，本博士論文は，韓国の針葉樹人工林で生産される小径丸太に高付加価値化を付与するため，力学的競争力のある構造用材の開発を目的としている．樹種には，森林面積，蓄積量，生産量が韓国国内で第 2 位であり，かつ素材の力学性能に優れたカラマツを選定している．構造用材化にあたり，寸法を拡大させつつ，かつ力学的競争力を向上させるため，小径木由来のカラマツ正角材をベースに，生産量が希少なカラマツ大径材あるいは北米からの輸入ベイマツ材由来の正角材やラミナをハイブリッドした積層梁材および積層柱材を検討している．さらに，積層材の構造利用を実現するために，柱－梁接合部の力学性能を把握する必要があり，本博士論文では接合方法としてグルード・イン・スティール・ロッド（GISR）を採用し，その力学試験と力学解析を行っている．GISR は，木材に設けたドリル孔に異形棒鋼を差し込み，その隙間を接着剤で充填固化させることで部材同士を接合する方法である．力学試験では，積層梁材と積層柱材を GISR により接合し，そのモーメント抵抗性能を測定し

た．この実験結果に基づく力学解析により，接合部の回転剛性および最大モーメントを説明できる簡潔な理論を構築した．これにより，実験が容易な小試験体による要素データで実大接合部の力学性能が設計可能となる．さらに，これらの積層材および接合部の力学的な実用範囲を調べるために，3 次元骨組構造解析を行った．

論文は 5 章構成となっており，第 1 章では本研究の背景と目的，韓国と世界の森林資源や韓国の木材市場の現況を整理し，カラマツ小径木の構造利用が必要であることを提示している．続く第 2 章から第 4 章は本博士論文の中核となる部分であり，第 2 章では，小径丸太から得られる正角材を用いたハイブリッド積層梁材とハイブリッド積層柱材の力学性能を示している．第 3 章では，これらの積層材を部材とする GISR を用いた接合部のモーメント抵抗性能について，実験に基づく力学解析により理論構築を行っている．第 4 章では木質ラーメン構造をモデル化した 3 次元骨組構造解析により，積層材の構造利用の妥当性を力学的に検討している．第 5 章では，本研究で得られた知見を整理，総括している．以下に第 2 章から第 4 章までの知見をまとめる．

第 2 章 小径丸太を用いた積層材の力学性能

小径丸太から得られる正角材に，大径丸太から得られる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梁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）カラマツの小径丸太，ⅱ）カラマツおよびベイマツの大径丸太，ⅲ）カラマツおよびベイマツのラミナを供した．

積層梁については，上記の供試材を用いて 8 タイプの試験体を用意した．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．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梁材の 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 となった．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，これは集成梁材の 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，その他は 39.2～48.8 MPa となり，大きくは劣らない結果が示された．

積層柱については，上記の供試材を用いて 8 タイプの試験体を用意し，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．集成柱の圧縮試験において，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，十分な補強効果を示した．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示した．Euler 式による圧縮限界応力の計算値は，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，計算値から大きく外れる傾向を示した．Euler 式は細長比が小さくな

ると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によると，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いた．すなわち，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を明らかにした．

第 3 章 カラマツ小径丸太から製造した積層材の接合特性

カラマツ小径丸太の正角材を用いた積層材により柱－梁接合部を作成し，そのモーメント抵抗性能を調べた．積層梁材と積層柱材の接合には，グルード・イン・スティール・ロッド（GISR）を採用した．GISR 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．接合部の力学試験では，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．加力の折返しは，変形角として 10 段階設定し，各段階で 3 回の正負載荷を繰り返した．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－変形角関係を調べた結果，加力初期から破壊に至るまでほぼ線形の挙動が示された．また，回転剛性は 879.2～965.6 kN･m/rad，最大モーメントは 26.7～32.8 kN･m となった．接着剤の種類による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積層柱材の曲げたわみに支配されたことが示された．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．

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合致した．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，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示された．この過程で計算された接合部での回転剛性は 3315.8～3834.2 kN･m/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を示唆した．

第 4 章 カラマツ小径丸太から製造した積層材の構造利用検討

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結果を実建築物に適用して弾性応力解析を実施し，構造利用の検討を行った．構造利用検討には，弾性応力解析プログラムである FAP-3 Ver.5 を用いて，実建築物の応力解析と研究データの応力解

析を比較した．CRP は実建築物の応力解析，CRP_{E1}，CRP_{E2}，CRP_T は実建築物に小径丸太を用いた積層材の力学試験結果を適用した応力解析である．解析モデルは柱と梁からなるラーメン構造であり，その接点は CRP，CRP_{E1} では剛接合（固定）を，CRP_{E2} では接合部試験体の力学特性値の回転剛性を適用した．また，CRP_T には接合部の理論値での接合部の回転剛性を適用した．荷重ケースと部材荷重間の組合せ係数による等分布荷重を適用し，自重計算を適用した．

すべての荷重ケースに応じた部材応力を求めた結果，カラマツ小径丸太を用いた積層材および接合部の力学的性能より低い値であり，柱と梁からなるラーメン構造にこれらの積層材および接合部が使用可能であると示唆した．荷重ケースによる節点変位を比較した結果，柱と梁の接合部に剛接合を適用した CRP_{E1} の節点変位が最も小さかったが，CRP_{E2}，CRP_T の節点変位も，カラマツ小径丸太を用いた積層材および接合部の最大変位より低い値を示し，本研究の結果を建築物に適用可能と結論付けた．

本博士論文は，柱部材は小径木のみを使用した積層材を使用可能と示し，韓国の構造用集成材標準である KSF3021 の内容の改訂に貢献した．また，梁部材は内層材に小径木を使用した積層材を使用できることが示し，韓国構造用集成材標準である KSF3021 の内容の改訂に貢献した．GISR 接合部の力学試験結果と簡単な理論的解析方法を活用することで木造建築の競争力向上に役立つと示唆した．柱－梁構造の設計と施工に多くの利点を提供できることを示唆した．

以上のように，本博士論文は，未成熟部を含むカラマツ小径材の有効利用のため，積層加工された構造用材としての利用可能性を確認することを目的したものである．本研究により得られた成果は次のように集約される．

１．小径丸太から得られる正角材のみで構成される積層梁材および積層柱材の強度性能はそれほど高くないと示した．

２．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，構造用材料としての利用可能性を示唆した．

３．低付加価値な用途で主に利用されている小径丸太を，構造用材料として活用できることを示唆した．

４．GISR を用いた接合部のモーメント抵抗性能は，接合部だけでも，水平荷重を支持するのに十分な抵抗性能の可能性を示した．

５．接合部のモーメント抵抗性能は簡潔なモデルで表されることを示した．

６．これらの積層材および接合部の力学解析結果を用いた実物件における弾性応力解析を実施した。すべての荷重ケースにおける部材応力と節点変位のシミュレーション値は，実大試験の結果を下回っていたことから，本研究で開発したものは実建築物におけるラーメン構造に使用可能であると結論付けた．

これらの研究成果について，報文として国際学術誌に 2 報が既に発表された．

以上のことから，本博士論文は，実験及び解析のいずれにおいても新規性と独自性が認められるとともに，高度の学術的価値を有していると判断された．

よって，本審査委員会は本論文の内容が博士（農学）の学位を授与するに十分な価値を有するものと認め，合格と判定した．