

論文審査の結果の要旨

氏名：大 木 文 明

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：Cross Laminated Timber と鉄筋コンクリートを機械的接合した複合床スラブに関する研究

審査委員：（主 査） 教授 師 橋 憲 貴

（副 査） 教授 小 松 博

教授 藤 本 利 昭

宇都宮大学教授 中 島 史 郎

我が国では、公共建築物等における木材の利用促進に関する法律が 2010 年に施行され、学校や老人ホームといった中・大規模の公共建築物の木造化が進められている。このような中、近年木造建築物の中・大規模化や、施工の簡易化に向けて新たな木質構造部材である直交集成板(Cross Laminated Timber, 以下 CLT と称する)の開発が行われており、注目を集めている。CLT は小・中径木や間伐材を用いて製造することが可能であることから、CLT の活用は地域林業、木材産業の活性化に寄与するものと期待されるものである。

しかしながら、CLT 等の木質材料を中・大規模建築物の床材として利用する場合、剛性不足によって設計時におけるスパンの制限または梁せいの増加や、床振動に加え、軽量であるための重量衝撃音、木材であるための耐火性能等が課題として挙げられる。よって、米国やヨーロッパ等の諸外国では、木材の上部に異形鉄筋または溶接金網を用いて鉄筋コンクリート(以下、RC と称する)を配し、これらをせん断キー等によって機械的に接合した複合部材(Timber-Concrete Composite systems, 以下 TCC と称する)とすることで課題の解決を図っている。TCC が面外方向からの外力を負担した際には、木材と RC の境界面に互いにずれようとする水平方向のせん断力が生じ、このせん断力をせん断キーによって伝達することで、RC は主に圧縮力を、木材は主に引張力を負担し、効率的に応力を負担させることが可能となることから効率的な剛性等の向上を期待している。

TCC の下部に木質軸材料を用い、上端に RC を配する場合、施工の際にコンクリートの型枠として木質軸材料の上部に面材を配する必要があることから施工が煩雑となるが、木質面材である CLT を用いることで耐力に寄与する型枠とすることが可能となり、簡易化を図ることが可能となる。なお、本論文においては、下端に木質軸材料である製材や集成材、LVL 等を用い、せん断キーによって RC と機械的に接合した梁または床部材を TCC、下端に木質面材である CLT を用い、せん断キーによって RC と機械的に接合した床部材を複合床スラブとして定義している。

諸外国における TCC に関する実験的研究は、欧米諸国を中心に報告されており、その多くはせん断キーによる接合方法が曲げ性能に与える影響や、よりせん断性能が高い接合部の開発が行われている。また、TCC に比べ報告数は少ないものの複合床スラブの曲げ性能に関する研究も行われている。しかしながらこれらの研究におけるせん断キーは接着や、CLT に切欠きを設けて接合が行われたものが多く、せん断性能は高いが、施工負荷が高いものを対象とした研究が報告されている。一方、我が国における TCC の研究は、2008 年以降に見られるようになったがその数は少なく、面外曲げを対象とした短期性能について梁断面内に生じるひずみを元にした応力分布や、剛性に関する考察が行われている。また、複合床スラブに関する研究は TCC に比べさらに少なく、諸外国同様に接合部のせん断性能は高いが、施工負荷が高いものが報告されている。しかしながら構法の普及の観点では、簡易な施工方法によって国産スギ CLT を接合した複合床スラブのひずみに着目し、荷重と応力の変化について検討を行った基礎的研究が必要とされているものと考えられるが、設計指針が確立している鉄骨梁と RC 床版をせん断キーによって接合した合成梁と比較すると少なく、更なる実験的研究が必要とされている。

そこで本研究では、木造の中・大規模建築物の床材を CLT によって構成する際の課題を複合床スラブによって解決するため、国産スギ CLT と RC をせん断キーによって簡易な施工方法で機械的に接合した複合床スラブの面外曲げ性能について実験的に検討を行っている。さらに各種評価方法によって変形初期の挙動を評価し、実験によりその妥当性の検証も行っている。

具体的には、はじめに複合床スラブの曲げ性能に大きな影響を与える接合部について検討を行っている。ここでは要素実験として、せん断キーにラグスクリューを用い、乾式施工した 1 面せん断実験を行い、せ

せん断キーに直接せん断力が作用する際のせん断性能を評価している。

次に乾式施工したせん断キーの施工方法および、湿式施工したせん断キーの種類が複合床スラブの面外曲げ性能に与える影響について検討するとともに、複合床スラブが降伏に至るまでの挙動について実験的に検討を行っている。

更に各種評価方法によって複合床スラブの変形初期の挙動を評価し、実験によりその妥当性を検証している。

本論文は全6章より構成されており、各章の内容は以下の通りである。

第1章では、本研究の背景と既往の研究について概説し、本研究の目的を示すとともに、本論文を構成する各章の概要を述べている。

第2章では、乾式施工したせん断キーの打込み深さが、接合部のせん断性能に与える影響について検討を行っている。

第3章では、第2章に続き、乾式施工したせん断キーの施工方法である配置ピッチおよび打込み深さが複合床スラブの面外曲げ性能に与える影響について検討を行っている。また、複合床スラブの力学的挙動として重要となる降伏に至るまでの挙動について検討を行っている。

第4章では、湿式施工したせん断キーの種類が複合床スラブの面外曲げ性能に与える影響について、層構成の異なる2種類の国産スギCLTを用いた複合床スラブを対象として検討を行っている。なお、せん断キーには、我が国で一般的に調達可能な建築材料であるD10異形鉄筋およびM12全ねじボルトを接着剤によって湿式施工したものに加え、比較として諸外国において利用実績のあるVBコネクタを用いている。

第5章では、第3章で検討を行ったせん断キーを乾式施工した複合床スラブおよび第4章で検討を行ったせん断キーを湿式施工した複合床スラブを対象に、面外曲げ性能について各種評価方法を用いて変形初期における曲げ性能の評価を行っている。

第6章では、本研究を総括し、各章の結果と考察に基づき、得られた成果を示すとともに、今後の課題および展望を示している。

以上、本研究では国産スギCLTとRCをせん断キーによって簡易な施工方法で機械的に接合した複合床スラブの構造特性について明らかにするとともに、各種評価方法によって変形初期の挙動を評価し、実験によりその妥当性を検証している。これらによって木造による中・大規模建築物の床材における課題解決を目的とした新たな構造部材の可能性を示している。今後は、この方法を複合床スラブに適用する際の算定式についてさらなる精査を行うとともに、新たな接合方法について検討を行うことにより、社会に普及することが可能となるものと結論づけている。この成果は、生産工学、特に建築構造工学に寄与するものと評価できる。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令 和 3年 3月 4日

論文審査の結果の要旨

氏名：大 木 文 明

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：Cross Laminated Timber と鉄筋コンクリートを機械的接合した複合床スラブに関する研究

審査委員：(主 査) 教授 師 橋 憲 貴

(副 査) 教授 小 松 博

教授 藤 本 利 昭

宇都宮大学教授 中 島 史 郎

我が国では、公共建築物等における木材の利用促進に関する法律が 2010 年に施行され、学校や老人ホームといった中・大規模の公共建築物の木造化が進められている。このような中、近年木造建築物の中・大規模化や、施工の簡易化に向けて新たな木質構造部材である直交集成板(Cross Laminated Timber, 以下 CLT と称する)の開発が行われており、注目を集めている。CLT は小・中径木や間伐材を用いて製造することが可能であることから、CLT の活用は地域林業、木材産業の活性化に寄与するものと期待されるものである。

しかしながら、CLT 等の木質材料を中・大規模建築物の床材として利用する場合、剛性不足によって設計時におけるスパンの制限または梁せいの増加や、床振動に加え、軽量であるための重量衝撃音、木材であるための耐火性能等が課題として挙げられる。よって、米国やヨーロッパ等の諸外国では、木材の上部に異形鉄筋または溶接金網を用いて鉄筋コンクリート(以下、RC と称する)を配し、これらをせん断キープ等によって機械的に接合した複合部材(Timber-Concrete Composite systems, 以下 TCC と称する)とすることで課題の解決を図っている。TCC が面外方向からの外力を負担した際には、木材と RC の境界面に互いにずれようとする水平方向のせん断力が生じ、このせん断力をせん断キープによって伝達することで、RC は主に圧縮力を、木材は主に引張力を負担し、効率的に応力を負担させることが可能となることから効率的な剛性等の向上を期待している。

TCC の下部に木質軸材料を用い、上端に RC を配する場合、施工の際にコンクリートの型枠として木質軸材料の上部に面材を配する必要があることから施工が煩雑となるが、木質面材である CLT を用いることで耐力に寄与する型枠とすることが可能となり、簡易化を図ることが可能となる。なお、本論文においては、下端に木質軸材料である製材や集成材、LVL 等を用い、せん断キープによって RC と機械的に接合した梁または床部材を TCC、下端に木質面材である CLT を用い、せん断キープによって RC と機械的に接合した床部材を複合床スラブとして定義している。

諸外国における TCC に関する実験的研究は、欧米諸国を中心に報告されており、その多くはせん断キープによる接合方法が曲げ性能に与える影響や、よりせん断性能が高い接合部の開発が行われている。また、TCC に比べ報告数は少ないものの複合床スラブの曲げ性能に関する研究も行われている。しかしながらこれらの研究におけるせん断キープは接着や、CLT に切欠きを設けて接合が行われたものが多く、せん断性能は高いが、施工負荷が高いものを対象とした研究が報告されている。一方、我が国における TCC の研究は、2008 年以降に見られるようになったがその数は少なく、面外曲げを対象とした短期性能について梁断面内に生じるひずみを元にした応力分布や、剛性に関する考察が行われている。また、複合床スラブに関する研究は TCC に比べさらに少なく、諸外国同様に接合部のせん断性能は高いが、施工負荷が高いものが報告されている。しかしながら構法の普及の観点では、簡易な施工方法によって国産スギ CLT を接合した複合床スラブのひずみに着目し、荷重と応力の変化について検討を行った基礎的研究が必要とされているものと考えられるが、設計指針が確立している鉄骨梁と RC 床版をせん断キープによって接合した合成梁と比較すると少なく、更なる実験的研究が必要とされている。

そこで本研究では、木造の中・大規模建築物の床材を CLT によって構成する際の課題を複合床スラブによって解決するため、国産スギ CLT と RC をせん断キープによって簡易な施工方法で機械的に接合した複合床スラブの面外曲げ性能について実験的に検討を行っている。さらに各種評価方法によって変形初期の挙動を評価し、実験によりその妥当性の検証も行っている。

具体的には、はじめに複合床スラブの曲げ性能に大きな影響を与える接合部について検討を行っている。ここでは要素実験として、せん断キープにラグスクリューを用い、乾式施工した 1 面せん断実験を行い、せ

せん断キーに直接せん断力が作用する際のせん断性能を評価している。

次に乾式施工したせん断キーの施工方法および、湿式施工したせん断キーの種類が複合床スラブの面外曲げ性能に与える影響について検討するとともに、複合床スラブが降伏に至るまでの挙動について実験的に検討を行っている。

更に各種評価方法によって複合床スラブの変形初期の挙動を評価し、実験によりその妥当性を検証している。

本論文は全6章より構成されており、各章の内容は以下の通りである。

第1章では、本研究の背景と既往の研究について概説し、本研究の目的を示すとともに、本論文を構成する各章の概要を述べている。

第2章では、乾式施工したせん断キーの打込み深さが、接合部のせん断性能に与える影響について検討を行っている。

第3章では、第2章に続き、乾式施工したせん断キーの施工方法である配置ピッチおよび打込み深さが複合床スラブの面外曲げ性能に与える影響について検討を行っている。また、複合床スラブの力学的挙動として重要となる降伏に至るまでの挙動について検討を行っている。

第4章では、湿式施工したせん断キーの種類が複合床スラブの面外曲げ性能に与える影響について、層構成の異なる2種類の国産スギCLTを用いた複合床スラブを対象として検討を行っている。なお、せん断キーには、我が国で一般的に調達可能な建築材料であるD10異形鉄筋およびM12全ねじボルトを接着剤によって湿式施工したものに加え、比較として諸外国において利用実績のあるVBコネクタを用いている。

第5章では、第3章で検討を行ったせん断キーを乾式施工した複合床スラブおよび第4章で検討を行ったせん断キーを湿式施工した複合床スラブを対象に、面外曲げ性能について各種評価方法を用いて変形初期における曲げ性能の評価を行っている。

第6章では、本研究を総括し、各章の結果と考察に基づき、得られた成果を示すとともに、今後の課題および展望を示している。

以上、本研究では国産スギCLTとRCをせん断キーによって簡易な施工方法で機械的に接合した複合床スラブの構造特性について明らかにするとともに、各種評価方法によって変形初期の挙動を評価し、実験によりその妥当性を検証している。これらによって木造による中・大規模建築物の床材における課題解決を目的とした新たな構造部材の可能性を示している。今後は、この方法を複合床スラブに適用する際の算定式についてさらなる精査を行うとともに、新たな接合方法について検討を行うことにより、社会に普及することが可能となるものと結論づけている。この成果は、生産工学、特に建築構造工学に寄与するものと評価できる。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令 和 年 月 日