

令和元年6月3日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04450

研究課題名(和文) 中・高層建築への木材用途拡大を目指した木-RCハイブリッド床システムの開発

研究課題名(英文) Development of Timber-Concrete hybrid floor system toward promoting wood utilization in mid and high-rise buildings

研究代表者

五十田 博 (Isoda, Hiroshi)

京都大学・生存圏研究所・教授

研究者番号：40242664

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：国産木材の需要拡大に向けて、木とRCのスラブをせん断接合具で連結した合成床(TCC)について、既存技術より高性能が期待される鋼板接着接合具を用いた開発を行った。まず接合要素せん断試験により接合具形状を決定し、続いて実大床曲げ試験によって十分な短期性能を確認し、最適な接合具配置に関する知見を得た。また従来の手法を改良した曲げ性能評価式を提案した。さらに接合部せん断と実大床曲げのクリープ試験を実施して長期性能を把握した。接合具自体のクリープは非常に小さかったが、実大床はRCと木材のクリープに依存する性質を示した。それぞれの部材の変形増大係数を用いることで床板の長期設計を可能とする手法を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

環境問題を背景とする都市部での木造建築の増加を目指して、本研究では木質混構造に注目し、わが国では未だ実用化が遅れている、中・高層建築の床板となるCLTとRCスラブを構造的に組み合わせた複合床の開発を行った。開発した鋼板接着接合具は高い剛性と十分な長期性能がある事を確認し、また複合床自体もCLT単体に比べ4倍以上の高い曲げ剛性を持ち、提案式と組み合わせることで十分な実用性があると判断できた。本研究では既往研究の少ないクリープ性能についても検討を進め、部材の変形増大係数の組み合わせで全体性能を推定できることを明らかとした。以上の成果は今後の社会実装に向けて、重要な知見となると考える。

研究成果の概要(英文)：Toward further expansion of the utilization of domestic timber, Timber-Concrete composite floor (TCC) technology in which wooden beams or slabs and RC slabs are connected by shear keys was studied. Glued-in Steel plate joints were employed from expectation of higher performance. Firstly, the type of the shear key was chosen by the element shear test. Then, a full-scale floor bending test was conducted which resulted in confirming sufficient short-term performance and acquiring the knowledge about the optimal connector arrangement. Moreover, the estimation formula of bending performance which improved the conventional method was proposed. Furthermore, the long-term performance of joints and full-scale floor bending was evaluated. Although the joint creep was very small but the TCC floor creep showed dependent performance to creep properties of RC and wood materials. As a result, we proposed a long-term design method of TCC from deformation increase factor of each member.

研究分野：木質構造

キーワード：木質構造 混構造 合成床 TCC CLT クリープ性能

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

国産木材のさらなる需要拡大に向けて中層建築物における木造化技術の発展が期待されている。すなわち個人住宅・大空間ホール建築から、集合住宅・店舗・オフィスビル建築への用途の拡大である。特に床構面の構成技術にはこれまで以上に厳しい要求性能があり、これに対応すべく木-コンクリートハイブリッド床システム（TCC）が注目されている。これは梁もしくは下面スラブを木質材料で構成し、上面には鉄筋コンクリートスラブ（RCスラブ）を打設し、両者をせん断伝達要素によって一体化させるシステムであり、鉄骨デッキとRCスラブと同様のものである。床の面外曲げに対して力学的には、圧縮力をRCスラブが、引張力を木部が負担する合理的な配置であり、木材のみで構成した床に比べて剛性・強度性能が大幅に向上し、RCのみで構成した床と比べて軽く建物全体の重量の軽量化に繋がると考える。また、RCスラブとの併用により、これまで木造床の弱点であった床振動、遮音、気密、防火などの性能を格段に改善できると期待されている。

これまで、以上のTCCを我が国で導入するために、RCスラブと木床板をより効果的に一体化する鋼板接着接合の研究に着手していた。一方で、本接合で構成された床の曲げ性能の評価及びクリープ性能の評価など、実用化への課題を残していた。

2. 研究の目的

本研究では、木部とRCのせん断伝達要素として鋼板接合具を接着して用いることを検討する。まず、せん断滑りを減らすために、鋼板と木材またはRCとの取り合いを検討し、より一体化率の高いハイブリッド接合を開発する。すなわち、木床の上面にスリットを設け、そこに鋼板を挿入接着することで高剛性のせん断抵抗性能を発生させ、またその木梁より突き出た鋼板上部にRCスラブを打設することでコンクリートに高い付着性能を発生させ、木-RCのせん断力伝達をさせる機構である。接着を用いることで極めて高効率の接合が可能となり、これまでのスタッドを用いた接合より接合効率を上げることを目的とする。また木部-RCスラブ界面のせん断力が木-鋼板接着面で広く分散するため、応力集中が少なくなりクリープ変形も抑えられると考えるが、これを実験的に明らかとする。これらを評価する方法として、以下に示すような項目を検討する。

○木-鋼板-RC接合部の性能評価とモデル化

直列バネ機構としての木材-接合具-RC間の接合部荷重伝達性能を評価すると同時に、より高性能な接合具形状を探る検討をおこなう。

○木-鋼板-RC接合部の長期性能評価

上記のうち効率の良い接合方法について、単位接合部での長期的なクリープ変形挙動を評価し、後の解析モデルのための資料を得る。

○TCC実大曲げ性能評価

TCCの主桁方向における曲げ性能に関して、スパン・各種断面寸法・材質等をパラメータとして短期曲げ挙動を評価可能な力学モデルを構築する。また、実大のTCCを製作して性能評価試験を実施し、同時に力学モデルの検証をおこなう。

○TCC実大床試験体を用いた長期性能評価

長期的実大実験を実施し、長期における性能検証をおこなう。また、接合実験などの結果をもとに、数値計算によりクリープ性能に関する性能予測をおこなう。

3. 研究の方法

具体的な内容として、以下に示す4項目を検討した。

検討1 コンクリート-鋼板-木接合部の圧縮せん断試験

接合部仕様を各種提案し、鋼板を介したコンクリートと木材の接合部試験体を製作し、せん断試験をおこなう。この実験より、接合具一つあたりの接合剛性、接合耐力がわかり、より有効な接合具形状を把握し、実大床に向けた資料とする。接着接合における鋼板の表面処理法や表面形状、接着剤の厚みなどが強度性能に影響すると考えられるため、これらもパラメータとして加える。また、コンクリートと鋼板接合具との接合は付着および機械抵抗挙動を考える。同様に、接合具の形状が強度性能に影響すると考えられ、有効な荷重伝達を行うための接合具の仕様について検討を行う。

検討2 接合部単位のクリープ試験

上記の接合部試験体において、実用化できると判断したものについて、長期的に一定荷重を与えたクリープ実験を実施、その性状を把握する。また、試験体として既往の接合方法であるスタッドとの比較もおこなう。試験を実施する環境条件は2条件とし、一つは大気下とし、もう一つは恒温恒湿チャンバー内とする。荷重条件においては、接合部の実大実験における結果をもとにバラツキを考慮せずに検討した長期許容耐力、または中短期荷重とした。

検討3 実大床の曲げ試験及び曲げ性能計算方法の提案

上記接合部試験体において良い性能を示したものについて、実大のCLT木床とRC床版から構成されるハイブリッド床システム試験体を製作し、曲げ試験を実施する。実大床試験結果と接合部実験の結果を分析し、力学モデルを構築し設計方法を提案すると共にその妥当性を検証す

る。また、剛性評価については、木材と木材の重ね梁に関して接合部の変形を考慮した評価式が提案されており、本工法でも応用が可能であるか確認する。また、解析的な検討により適切な配置による剛性の増大が図れるかについても検討する。同様に、強度評価についても、解析的な検討により評価が可能かについても検討する。

検討4 実大床のクリープ試験

実大のCLT木床とRC床版から構成される試験体を製作し、実大クリープ試験を実施する。すなわち、実大の主桁方向の単位ハイブリッド床試験体を作製し、長期荷重に相当する荷重を作用させて継続的にたわみや部材毎の変形を計測する。試験は数年程度を目処に実施する（本研究期間を過ぎたのちも継続）予定とする。得られた結果より、各所の変形割合などを確認すると共に、50年後の変形挙動を予測し、設計に用いるための変形増大係数を提案する。

4. 研究成果

それぞれの検討結果について、以下に示す。

検討1について

木材に集成材またはCLTを用い、RCとの接合には鋼板を用いた接合部せん断実験を実施し、鋼板に鉄筋を溶接したタイプの接合効率が良いことを確認した。また、木部との接着接合の性能向上のために、鋼板に穴をあけて機械的な接合を付与することを検討した結果、性能が向上することを確認した（図1）。加えて、繰り返し載荷試験を実施し、10万回の繰り返し載荷による変形の伸びも0.1mmほど小さく、長期信頼性の高いことを確認した（図2）。

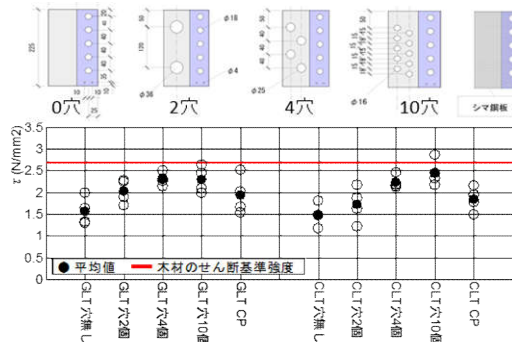


図1 接着せん断における鋼板穴の効果
(上：鋼板の穴の概要、下：実験結果)

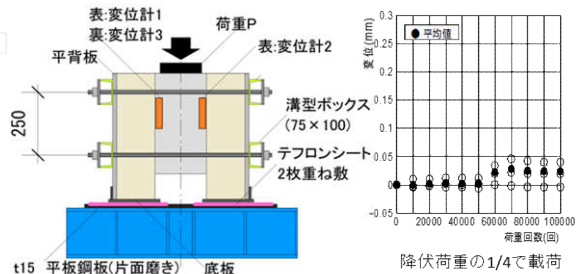


図2 繰り返し加力による変形の増大
(左：試験概要、右：実験結果)

検討2について

検討1の結果より、図3に示す異形鉄筋を溶接した穴あき鋼板及び穴あきチェッカープレートを折り曲げた物、また一般に用いられているスタッドタイプの接合部を用いた接合部せん断クリープ試験を実施している。現在、試験は、広島にて約1年8か月間の大気下の実験を実施し、建築研究所にて約10か月間の恒温恒湿下での実験を継続中である。図4に大気下のクリープ変形結果（上）と異形鉄筋を溶接した試験体の温湿度管理の有無による比較（下）をそれぞれ示す。まず、大気下の結果グラフよりスタッドタイプのクリープ変形と比べて、鋼板接着型の両タイプの変形はかなり抑えられており、現時点で0.1mmに満たない変形であることがわかる。また大気下のグラフでは温湿度の変化に伴い、変形が回復することも確認された。これらより、提案している鋼板接着接合法の高い長期性能が示された。また、図4下のグラフより大気下にある試験体は、恒温恒湿下の試験体よりも変形の変動に加えて総量が若干大きくなる傾向が確認でき、温湿度変化のクリープ変形への影響については今後の検討課題としたい。

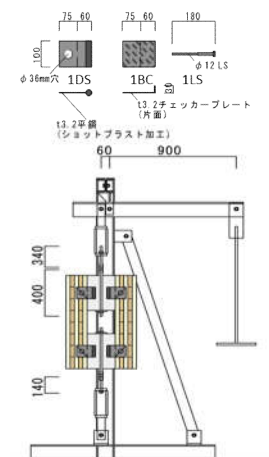


図3 接合部クリープ試験概要

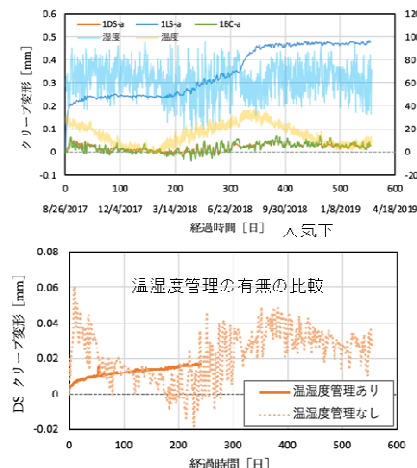


図4 接合部クリープ変形

検討3について

接合性能が良いと判断した異形鉄筋付き穴あき鋼板を接合具に用いて実大床実験を実施した。実大床としては、せん断接合具を均等に配置したもの（以下、均等配置）と、最適と考える配置としたもの（以下、最適配置）を用いた（図5）。ここでいう最適配置は、これまでの実験データを用いて解析的に検討した結果、得られたものであり、剛性、耐力ともに約1-2割程度性能の向上が望める配置とした。曲げ実験の結果である荷重-たわみ関係を図6に示すが、最適配置の方が剛性で1.1倍、1次破壊時の耐力で1.3倍ほど性能が高くなった。また、剛性における解析結果との比較においても、ほぼ等しい値が得られ、良い対応が示せることがわかった。このことから、接合部のせん断性能があれば、本TCC床の短期性能の推定が可能であることが確認できた。なお、破壊性状においては最適配置ではRC接合具位置に曲げひび割れ及び一部のせん断接合部でRC側に付着破壊が生じたが、終局状態は写真で示されているようにCLT下面を起点とする曲げ破壊となり、大きな違いはみられなかった。

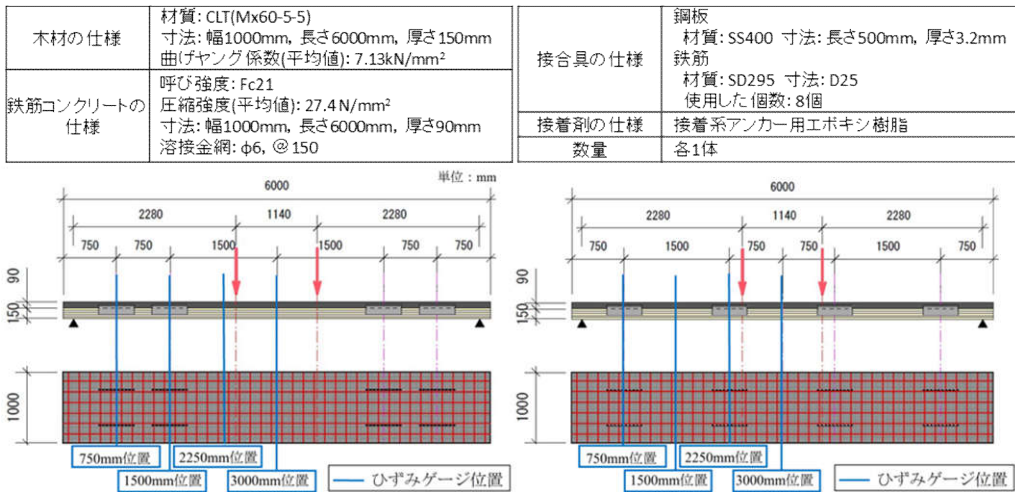


図5 実大床試験体の概要

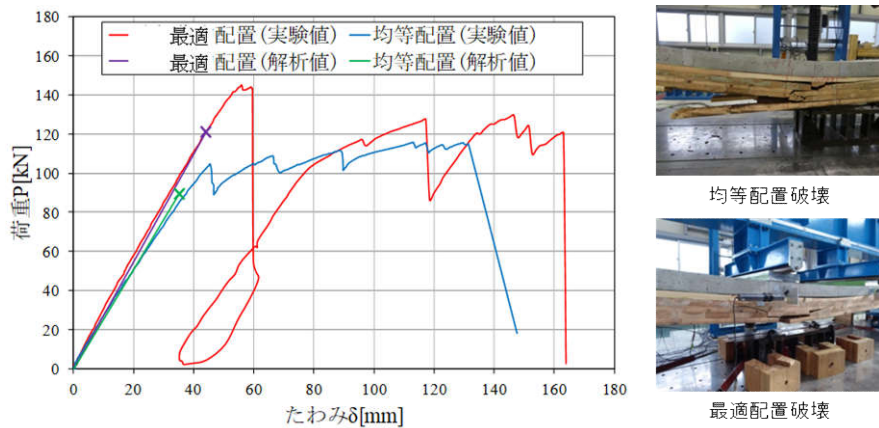


図6 曲げ実験結果

検討4について

検討3で用いた最適配置の試験体と同仕様の試験体を作成し、長期荷重試験であるクリープ試験を実施した。最適配置の曲げ破壊強度を用いてばらつきを考慮した長期許容耐力を算出し、相当荷重として42.5kNを長期的に与えた。なお、この荷重は一般的な事務所の設計用床荷重に比べ1.5倍程度である。試験体の概要は図5に、試験の様子は図7に示すとおりである。試験開始時1時間後の変形を初期変形と定義して計算したクリープ変形の推移を図8に示す。なお、試験開始後約1年間のデータである。現時点までのクリープ変形増大係数は、二次クリープ区間を用いたPower則の計算（図9）により6.8倍程度であり、RC材料と木材の変形増大係数それぞれ16倍と2倍の中間的な数値で、若干木材に近い値を示すことを確認した。試験期間の増加に伴い変形増大係数が減少する傾向を示しているため、試験期間の延長によって、値は多少変更されるものと考えている。また、50年後の変形を勘案すると実用上過大な変形が出ることが予測され、実使用にあたっては全体剛性を上げる仕様を検討することが望ましいと考える。

さらに変形予測について、上記で議論したPower則による長期予測の実験的取り扱いのみではなく、接合部のクリープ変形から得られた変形増大係数と、RCと木の設計で用いられている変形増大係数を用いた、計算に基づく推定手法について検討した。(1)式に合成床の曲げ剛性の基本推定式を示す。これらの変数値に、クリープ変形増大を考慮した値を代入することによって長期性能を予測しようと仮定した。

$$EI_{cal} = \sum EI \left[1 + \frac{1}{\sum EI \left\{ \frac{1}{EI} + \frac{1}{G_p \left(\frac{1}{16s^2} + \frac{1}{8s^2} \right)} \right\}} \right] \dots (1)$$

$$\sum EI : EI_w + EI_c$$

$$\sum \frac{1}{EI} : \frac{1}{EI_w} + \frac{1}{EI_c}$$

EI_w : CLT の曲げ剛性 (N/mm²)

EI_c : RC スラブの曲げ剛性 (N/mm²)

EA_w : CLT の軸方向特性 (N)

EA_c : RC スラブの軸方向特性 (N)

G_p : ウェブのせん断剛性 (N/mm)

$$G_p = \frac{Ks}{s}$$

K : 接合部のせん断剛性 (N/mm)

s : 接合部のピッチ (mm)

その結果、たわみ式を用いて計算した剛性は実験でのばらつきを考慮することで、若干危険側ではあるが、計算できる可能性を得た (図 10)。今後さらに検討することで、接合部のクリープ試験の結果を用いることで全体のクリープ変形や増大係数の計算が可能になり、設計に資することが可能になると考える。



図 7 実大床試験の様子

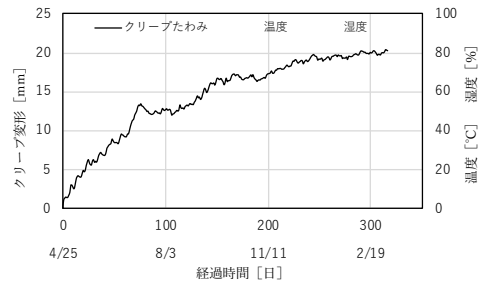


図 8 実大床試験のクリープ変形

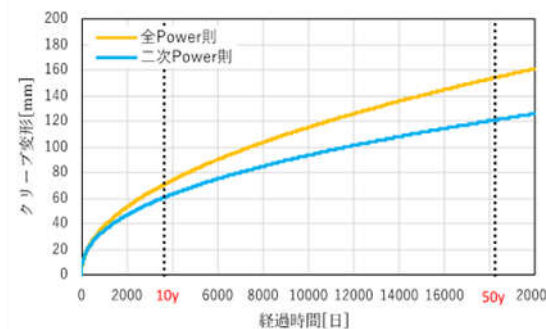


図 9 Power 則を用いた 50 年後の推定

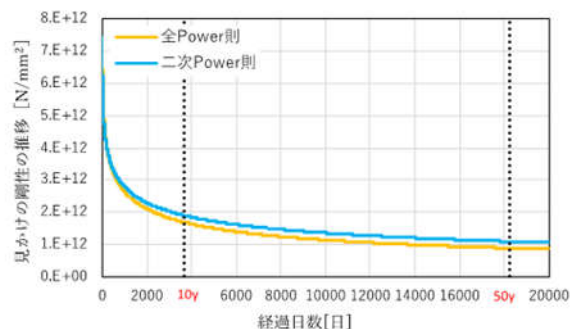


図 10 たわみ計算式を用いた剛性低下の計算値

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 0 件)

〔学会発表〕 (計 11 件)

- ① Takuro Mori, Masakazu Ikeda, Akihisa Kitamori, Hiroshi Isoda, Yasuhiro Araki and Yoichi Hayasaki: Study on creep behavior of Timber-Concrete Composite Floor, Proceedings of the 5th Pacific Timber Engineering Conference (PTEC 2019), 10-12 July 2019, Brisbane, Australia.
- ② 池田将和、森 拓郎、北守顕久、五十田博、荒木康弘、早崎洋一、藤田和彦: RC 床版と CLT の合成床のクリープ性能に関する実験的研究 その 2 実大床曲げクリープについて、日本建築学会中国支部研究報告集、42 巻、pp. 183-186、2019
- ③ 北守顕久、池田将和、吉岡祐美、森 拓郎、早崎洋一、荒木康弘、藤田和彦、五十田博: 木材とコンクリートのハイブリッド床システムの開発、京大大学生存圏研究所、全国共同利用研究報告木質材料実験棟、pp. 69-76、2019
- ④ 森田洋介、早崎洋一、北守顕久、森 拓郎、五十田博: RC 床版と CLT の合成床システムの開発 その 1 鋼板接着接合具を用いた RC-CLT 合成床の実大曲げ試験、日本建築学会学術講演梗概集構造Ⅲ、pp. 107-108、2018
- ⑤ Satoshi Tanaka, Yusuke Otsubo, Takuro Mori, Yasuhiro Araki, Hayato Furusawa, Akihisa Kitamori and Hiroshi Isoda, Study on creep behavior of joint part of timber-concrete composite floor system, Proceedings of 12th China Korea Japan Seminar, Kyoto, Japan,

2017

- ⑥ Hayato Furusawa, Akihisa Kitamori, Takuro Mori, Shinichiro Tamori, and Hiroshi Isoda, Development of Timber-Concrete Composite Floor System, Proceedings of The 2nd Asia Research Node Symposium, Kyoto, Japan, 2017
- ⑦ 古澤隼人、北守顕久、森 拓郎、田守伸一郎、五十田博：RC床板と木梁を併用したハイブリッド床システムの開発 その3 繰り返し試験及び木・鋼板一面せん断試験、日本建築学会学術講演梗概集構造Ⅲ、pp. 623-624、2017

〔その他〕

本研究内容を報告した池田将和くんの学会発表②が、2019年3月3日に日本建築学会中国支部において、優秀口頭発表賞を受賞した。

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：北守 顕久
ローマ字氏名：Akihisa Kitamori
所属研究機関名：京都大学
部局名：生存圏研究所
職名：助教
研究者番号（8桁）：10551400

研究分担者氏名：稲山 正弘
ローマ字氏名：Masahiro Inayama
所属研究機関名：東京大学
部局名：農学生命科学研究科
職名：教授
研究者番号（8桁）：70337682

研究分担者氏名：楠 浩一
ローマ字氏名：Koichi Kusunoki
所属研究機関名：東京大学
部局名：地震研究所
職名：教授
研究者番号（8桁）：00292748

研究分担者氏名：荒木 康弘
ローマ字氏名：Yasuhiro Araki
所属研究機関名：国土交通省 国土技術政策総合研究所
部局名：建築研究部 基準認証システム研究室
職名：主任研究官
研究者番号（8桁）：40435582

研究分担者氏名：森 拓郎
ローマ字氏名：Takuro Mori
所属研究機関名：広島大学
部局名：工学研究科
職名：准教授
研究者番号（8桁）：00335225

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。