

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：37111

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14768

研究課題名(和文) 鋼構造オフィスビル床の木質化に関する研究

研究課題名(英文) Development of the structural system with steel frame and wooden floor

研究代表者

倉富 洋 (Kuratomi, Yo)

福岡大学・工学部・助教

研究者番号：50709623

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：鋼構造オフィスビルなどの鉄骨造における鉄筋コンクリートで造られている床をクロス・ラミネイティド・ティンバー(CLT)に置換する構法について検討を行なった。鉄骨梁とCLT床を、頭無しスタッドとエポキシ樹脂によって接合する方法を提案し、押抜きせん断実験および四点曲げ載荷実験を実施することで構造性能について検討した。実験結果より、上述した接合方法で鉄骨梁とCLT床間でせん断力が伝達できることを示した。また、鉄骨梁に対してCLT床を用いた合成梁は、初期剛性および最大曲げ耐力ともに1.2倍ほど上昇することを明らかとした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、鉄骨梁とCLT床の接合部におけるせん断性状および合成梁効果を示すことができた。頭無しスタッド一本あたりの降伏せん断耐力を把握することは重要であり、構造計算ではこの数値を用いて頭無しスタッドの必要本数が設計される。本研究成果では実験的に降伏せん断耐力を示すと同時に、汎用性のある計算式を用いて本降伏せん断耐力を評価できることを明らかとした。また、CLT床を使用した場合でも合成梁効果が発揮されることを実験的に実証した。これらの知見は本構法を適用する際に有益な情報として活用されるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：The author proposed to replace reinforced concrete slabs with cross-laminated timber (CLT) floor panels to increase the use of timber in moderate- or large-scale buildings. Structural performance is also an important problem that must be dynamically solved because floors affect the flexural stiffness and strength of steel beams. Push-out shear tests and pure bending tests were conducted to investigate the structural performance of CLT and composite steel beams. Based on the test results, the concluding remarks are drawn as follows: 1) From the push-out shear test results, it was ensured that the shear force transferred from the H-shaped steel beam to the CLT panel. 2) From the bending test results, the composite beam specimens exhibit higher initial stiffness and flexural strength than those of steel beam alone. The initial stiffness and maximum flexural strength of composite beam specimens was 1.2 times larger than that of the steel beam alone.

研究分野：建築構造

キーワード：鉄骨梁 クロス・ラミネイティド・ティンバー スタッド エポキシ樹脂 合成梁効果 木質複合構造  
異種接合 構造実験

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。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

現在のわが国では、戦後植林された人工林が木質材料として使用可能となり、これらを消費し国産木材の需要を拡大していくことが求められている。国産木材の利用促進を図るためには、国内に新たな木材市場を開拓する必要があり、非住宅分野における中高層建築物の構造材料にも木質材料を適用し、広く普及させる必要がある。その解決策の一つとして、著者らは、鋼構造オフィスビルなどの柱梁鉄骨造において鉄筋コンクリートで造られている床（以下、RC床と略記）を、クロス・ラミネイティド・ティンバー（以下、CLTと略記）と呼ばれる木質材料に置き換える試みを行なっている。RC床をCLT床へ置換することにより、建物重量の軽量化や、配筋作業および型枠工事の省略に伴う施工の簡素化、森林資源の有効活用につながるなど、利点は大きいものと考えられる。一方で、柱梁鉄骨造の床を木質化するにあたり、鉄骨梁とCLT床における接合方法の検討や、可燃物であるCLT床の耐火性能を確保する必要があるなど、課題も存在する。国内では依然として戸建住宅への利活用が主であり、3階建て以下の小規模なものが多いようである。こうした現状を踏まえると、国内においても本研究課題のように中高層建築物に積極的に木質材料を適用する方法を探り、国産木材の新たな市場を開拓することで消費拡大の道筋を早急につけるべきだと考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、鉄骨梁とCLT床の接合方法を提案し、力学的性能を把握することにある。まず、鉄骨梁とCLT床の接合方法について概略説明する。本研究で提案する鉄骨梁とCLT床の接合方法を図1に示す。鉄骨梁には上フランジに頭無しスタッドを溶接しておき、CLT床には所定の位置にスタッド径の二倍に相当する貫通孔を設けておく（図1(a)参照）。その後、現場にてCLT床を鉄骨梁フランジに落とし込み、頭無しスタッドと貫通孔の隙間をエポキシ樹脂にて充填することで一体化を図る（図1(b)参照）。通常、RC床では頭付きスタッドが使用されるが、本構法ではCLTを設置する際において頭部分の干渉を避けることを意図し、施工性を考慮して頭無しスタッドを使用することとしている。本研究課題で明らかとすべき点は、1) 頭無しスタッドの軸径および長さが本接合部のせん断耐力に及ぼす影響を調べること、2) 鉄骨梁とCLT床で構成された合成梁が純鉄骨梁に対してどの程度曲げ剛性と曲げ耐力の向上が期待できるか（いわゆる合成梁効果）を調べること、である。

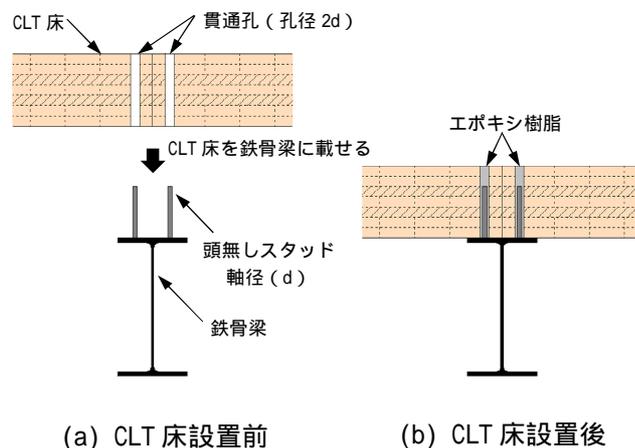


図1 頭無しスタッドによる接合方法

### 3. 研究の方法

#### (1) 2017年度における研究方法

当該年度では、本研究課題で提案している鉄骨梁とCLT床の接合方法におけるせん断耐力を調べるために、標準的な押抜き実験を実施した。試験体詳細を図2(a)に示す。H形鋼フランジには頭無しスタッドが所定の位置にアーク溶接され、CLTには頭無しスタッド軸径の二倍に相当する貫通孔が設けられている。実際の施工方法と同様の手順で製作するため、横に寝かせた状態で片側ずつH形鋼とCLTをエポキシ系接着剤にて一体化させた。なお、エポキシ系接着剤を充填する直前に、頭無しスタッド溶接部付近のフランジ面にグリスを塗布した。H形鋼にはH-200×200×8×12(SS400鋼材)を、CLTにはスギMx60-5-7(ラミナ厚30mm、パネル厚210mm)を、接着剤には二液常温硬化型エポキシ樹脂を、それぞれ使用した。同図中のCLTには、荷重に対して弱軸方向となるラミナに斜線を記入している。実験変数には頭無しスタッドの軸径および長さを選定した。軸径には13mm(SWRCH10A)と19mm(SS400)の二種類、長さには70mmと150mmの二種類を選んだ。これらの変数を組み合わせた4つの実験条件とした試験体を6体ずつ準備し、計24体の実験を行なった。なお、CLTに設ける貫通孔は頭無しスタッド軸径の二倍であるが、製作上の都合により軸径19mmの試験体のみ、CLTに設ける貫通孔径は36mmとしている。

載荷装置を図2(b)に示す。試験機には1000kN万能試験機を用い、載荷形式は一方向単調載荷とした。変形は、H形鋼とCLTの相対ずれ変位を計測するために、頭無しスタッド軸心と同じ高さに設置した変位計を四箇所設置して計測した。

#### (2) 2018年度における研究方法

鉄骨梁とCLT床で構成された合成梁における合成梁効果について検討するため、四点曲げ載

荷実験を行なった。試験体の製作における鉄骨梁と CLT 床の一体化は、前年度と同様、頭無しスタッドとエポキシ樹脂にて接合した。図 3 に四点曲げ載荷実験の概要を示す。鉄骨梁には H-350×175×7×11 (SS400), CLT は 3 層 3 プライの 90mm 厚 (スギ Mx60-3-3), 接着剤には二液常温硬化型エポキシ樹脂を使用した。試験体の実験変数には頭無しスタッドの軸径およびピッチ (配置間隔) を選定した。頭無しスタッド軸径は 13mm と 19mm の二種類、長さは 70mm で統一した。また、軸径 13mm の試験体はピッチ 100mm と 200mm とし、軸径 19mm の試験体はピッチ 250mm とした。各試験体の合成率を設定し、合成率の違いが本合成梁の挙動に及ぼす影響を調べることにした。

載荷方法は、試験機には 5000kN 試験機を用い、一方向繰返し載荷とした。載荷履歴は、試験体中央たわみが 30mm までは 7.5mm 刻みで、その後は 15mm 刻みで最大 75mm まで各 1 回とした。載荷は、載荷梁を介した四点曲げ載荷試験とし、支点はローラー支承とした。変位計は載荷点と試験体中央の鉛直たわみと、H 形鋼と CLT 間のずれ変位を計測した。

### (3) 2019 年度における研究方法

前年度までの研究において、頭無しスタッドボルトとエポキシ系接着剤にて鉄骨梁と CLT 床を接合する方法を提案し、本接合方法でせん断応力を伝達することができることを明らかとした。これまで使用してきた CLT の層構成は 5 層 7 プライが主であったが、多様なニーズに応えるためには、様々な層構成における検討も必要であると考えられる。そこで本研究では、新たな層構成とした CLT を使用した際のせん断性能を調べることを目的とし、押抜きせん断実験を実施した。試験体寸法および製作方法は、2017 年度と同様である。実験変数には CLT の層構成を選定し、ラミナ厚には 30mm, 36mm, 45mm 厚を使用した。ここで、ラミナ厚 45mm および 3 層 5 プライの層構成は、CLT 関連告示等解説書 2) に規定されている範囲外の CLT にあたる。ラミナ 45mm 厚の CLT を使用する意図は、接着層数を減らして CLT 板そのもののコストダウンを図ることにある。また、CLT 床材を一方向板として使用する際には、強軸層が多い方が好ましく、3 層 5 プライの性能を把握するために試験体 CLT3-5-180 を用意した。頭無しスタッドは軸径 13mm および 19mm を用い、長さは CLT 厚の半分とした (CLT3-3-90 のみ 70mm)。各条件において試験体は 3 体ずつ製作した。なお、押抜きせん断実験の載荷方法は 2017 年度と同様である。

## 4. 研究成果

### (1) 2017 年度における研究成果

押抜きせん断実験より、試験体の破壊形式および荷重 - 変形関係における実験値と計算値と

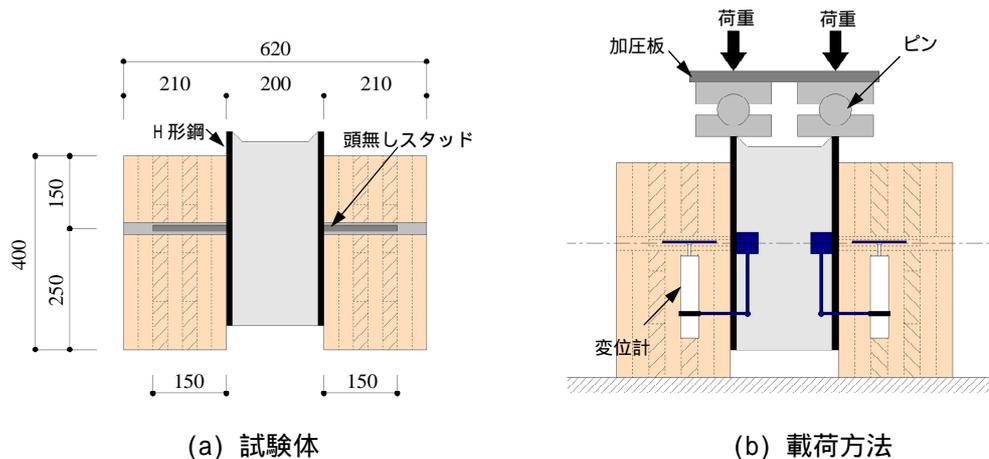


図 2 押抜きせん断実験

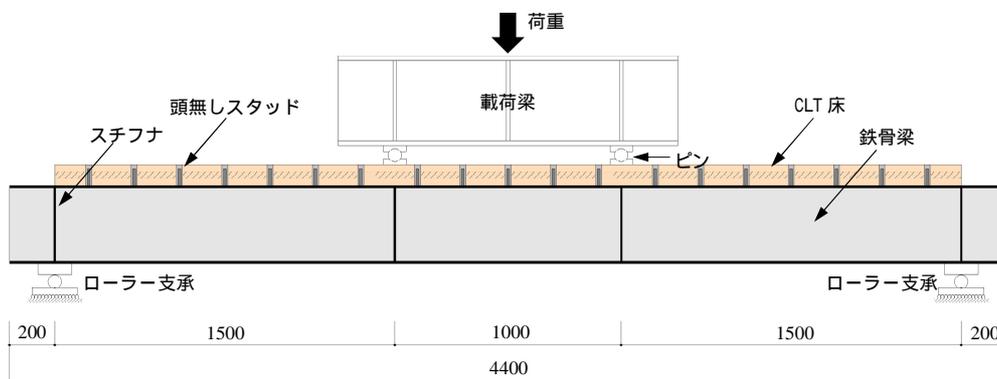


図 3 四点曲げ載荷実験

の比較検討を実施した。実験で得られた荷重 - 変形関係を図 4(a)に示す。荷重 - 変形関係には同試験体 6 体のうち、最も小さい挙動が見られた試験体を選定している。同図中の試験体名は、STD-[スタッドの軸径]-[スタッドの長さ]で区別している。なお、試験体名末尾の丸囲みの数字は試験体の通し番号である。同図より、頭無しスタッド軸径 19mm の試験体の方が、軸径 13mm の試験体より二倍ほどのせん断抵抗力を発揮する挙動を示していることがわかる。一方で、長さの違いを比較すると、長さ 150mm の試験体の方が、軸径 70mm の試験体より一割ほど大きな荷重を保持している。図 4(b), (c)に実験後の頭無しスタッドの変形の様子を示す。頭無しスタッドの長さが 70mm を使用した試験体 (STD13-70 および STD19-70) は、フランジ側端部に塑性ヒンジが一箇所生じる変形が観察された。また、頭無しスタッドの長さ 150mm の試験体 (STD13-150 および STD19-150) は、フランジ側端部と CLT 内の二箇所に塑性ヒンジが生じる降伏モードとなった。

当該年度の研究によって得られた知見を以下に記す。

- 1) スタッドボルトの径がせん断耐力に及ぼす影響は大きく、径 19mm の方が径 13mm に対して二倍の耐力を発揮した。一方で、長さの違いによる影響は余り見られなかった。
- 2) ずれ変位はスタッドが CLT にめり込むことで増大し、スタッド自体の変形も確認された。スタッドの変形は長さにより二種類の变形モードが観察された。

## (2) 2018 年度における研究成果

図 5 に合成梁の四点曲げ載荷実験で得られた結果を示す。いずれの試験体も変形能力に優れた挙動を示しており、純鉄骨梁とした試験体 S では載荷点付近における上フランジの局部座屈が生じた。CLT を一体化させた合成梁では、載荷点における CLT の局部的なめり込みが観察されたものの、実験終了までひび割れや割裂などの目立った損傷は見られなかった。同図(c)に示す荷重 - 変形関係より、合成梁および純鉄骨の試験体いずれも変形能力に優れた挙動を示していることがわかる。純鉄骨梁と比較して、合成梁とした試験体は、いずれも初期剛性および最大耐力の上昇が確認され、合成梁効果が発揮されていることがわかる。合成率の違いによる明確な差異は見られなかったが、およそ初期剛性で 1.22 倍、最大耐力で 1.23 倍の上昇となった。また、同図中には純鉄骨梁の降伏耐力  $P_y$  と全塑性耐力  $P_p$  を記載している。合成梁とした試験体では、変形角 1.0% から 1.5% の間で純鉄骨梁の全塑性耐力を発揮しており、鉄骨梁と CLT 床でも合成梁効果が期待できることがわかる。

図 5(a)に合成梁試験体に貼付したひずみゲージ位置を、同図(b)に合成梁試験体のひずみ分布を示す。各除荷点におけるひずみの値は、高さ方向における同一直線上に貼付したゲージの平均値で示している。合成梁試験体は、変形角 1.5% までは直線的に分布しており、平面保持の仮定が成立しているものと考えられる。いずれの試験体においても変形角 4.0% 時には大きなひずみの差が生じているが、荷重 - 変形関係上では耐力低下等は見られず、靱性に富んだ挙動を示した。

当該年度の研究によって得られた知見を以下に記す。

- 1) 合成率の違いに拘らず、いずれの試験体も同様な荷重 - 変形関係を示した。純鉄骨梁に対す

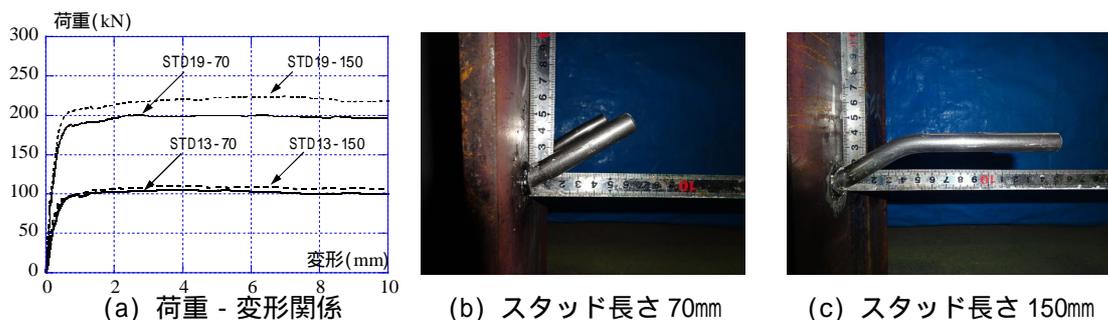


図 4 押抜きせん断実験の実験結果および実験後の様子

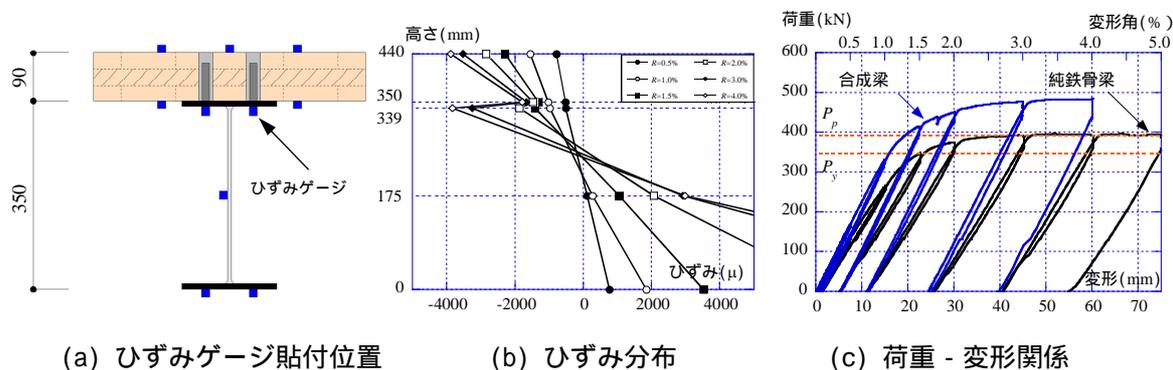


図 5 合成梁の実験結果

る初期剛性および最大曲げ耐力の上昇はおよそ 1.2 倍程度であった。

- 2) 合成梁のひずみ分布において、合成率の値が小さくなるほど、鉄骨梁上フランジと CLT 床下面でのずれが大きく見られた。荷重 - 変形関係においては明瞭な違いは見られなかった。

(3) 2019 年度における研究成果

当該年度の実験により得られた荷重 - 変形関係を図 6 に示す。同図中に記載した試験体名は、CLT[層数]-[プライ数]-[床厚]として区別している。このうち、45mm 厚ラミナを使用した試験体は、CLT3-4-150 と CLT3-4-180 である。本研究では降伏時の荷重を、0.1Pmax と 0.4Pmax 発揮時の荷重変形点を結んだ直線と、0.4Pmax と 0.9Pmax 発揮時の実験データを結んだ勾配で荷重 - 変形曲線に接する直線との交点として算出した。ここで、Pmax は実験で得られた最大耐力である。実験の荷重 - 変形関係から読み取った降伏点を図 6 中に印で表記した。層構成の違いについて比較すると、試験体 CLT3-4-144, CLT3-4-150 の比較では降伏後の挙動は CLT3-4-144 の方が大きい、降伏耐力は CLT3-4-150 の方がやや大きかった。また、試験体 CLT3-4-180, CLT3-5-180, CLT5-5-180 の比較では、降伏耐力および最大耐力に着目すると、CLT3-4-180 が最も小さくなっている。一方で、CLT3-5-180, CLT5-5-180 のように頭無しスタッドにかかる強軸層の割合を大きくすると、降伏耐力と最大耐力が向上することがわかる。

本接合方法における降伏せん断耐力を評価するため、ヨーロッパ型降伏理論（以下、EYT 式と略記）により検討を行なった。本実験では木質材料に CLT を使用しているため、簡易 EYT として検証された研究例も踏まえ、既存の EYT 式を用いて実験値を評価することとした。鉄骨フランジに溶接された頭無しスタッド接合を、木材の主材と鋼板添え板からなる一面せん断接合とし、式(1)で降伏せん断耐力  $P_y$  を算定する。

$$P_y = C \cdot F_e \cdot d \cdot l \quad (1)$$

ここで、 $C$ : 接合係数、 $F_e$ : 主材の基準支圧強度、 $d$ : 頭無しスタッド軸径、 $l$ : 頭無しスタッドの長さである。

荷重 - 変形関係から読み取った降伏耐力  $expP_y$  と計算により求めた  $calP_y$  を比較する。ここで、試験体によるばらつきを考慮して、CLT 関連告示等解説書に記載されている式(2)を用いて実験値を評価する。

$$TL = x - Ks \quad (2)$$

ここで、 $TL$ : 信頼水準 75% の 95% 下限許容限界値、 $x$ : 実験から得られた平均値、 $K$ : 試験体数に依存する係数 ( $= 3.152$ )、 $s$ : 標準偏差である。

EYT 式により降伏せん断耐力を計算した結果を表 1 に示す。同表中の  $calP_y$  は式(1)で算出した  $P_y$  をスタッド本数分として四倍した値である。計算耐力の算出より、降伏モードはいずれの試験体もモード と判別された。図 5 に実験後の頭無しスタッドの様子を示す。同図より、試験体 CLT3-3-90、CLT3-3-90\*、CLT3-4-144、CLT3-4-150 は計算値による評価に沿った降伏モード

の変形を示している（同図(a)~(d)参照）。一方、試験体 CLT3-4-180、CLT3-5-180、CLT5-5-180 は頭無しスタッドの破壊性状としてモード とモード が混在した結果となった（同図(e)~(g)参照）。これは計算値において C3 と C4 が近い値を示したためだと考えられ、降伏耐力の評価手法は妥当であるといえる。ばらつきを考慮した実験値と計算値との比較では、やや危険側に評価された試験体も見られたものの、概ね実験値をよく評価できているものと考えられる。

当該年度の研究で得られた知見を以下に記す。

- 1) 頭無しスタッドにかかる CLT の強軸層の割合が大きくなるほど、降伏点は大きくなる。
- 2) 本接合の降伏せん断耐力評価式として既存の EYT 式を適用して実験値との比較を行なったところ、降伏モードは実験挙動とよく対応し、概ね実験値に近い評価をした。

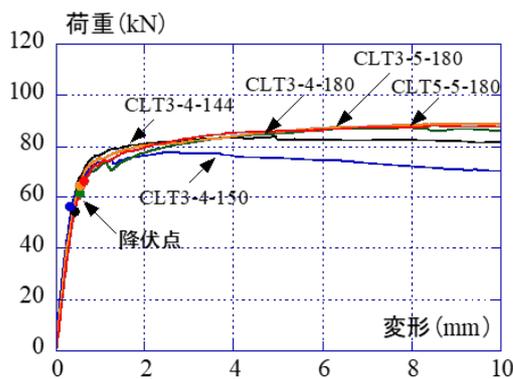


図 6 荷重 - 変形関係

表 1 実験結果と計算値の比較

試験体	$calP_y$ (kN)	$TL$ (kN)	$TL/calP_y$
CLT3-4-144	36.9	43.4	1.18
CLT3-4-150	42.7	47.7	1.12
CLT3-4-180	41.8	45.6	1.09
CLT3-5-180	58.6	53.6	0.91
CLT5-5-180	47.4	52.6	1.11

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 倉富洋, 松山礼佳, 堺純一, 稲田達夫	4. 巻 13
2. 論文標題 柱梁鉄骨造 - 床木質化システムの開発に関する実験的研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム	6. 最初と最後の頁 pp.386-393
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 倉富洋	4. 巻 Vo.32, No.378
2. 論文標題 鋼構造オフィスビル床の木質化 - 課題解決へ向けた実験的検討 -	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 鉄構技術	6. 最初と最後の頁 pp.52-59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 倉富洋
2. 発表標題 新たな層構成としたCLT床と鉄骨梁の接合性能に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 倉富洋
2. 発表標題 層構成の違いによる影響を考慮したCLT床と鉄骨梁との接合部性能に関する実験的研究
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 倉富洋
2. 発表標題 鉄骨梁と木質床の合成梁効果に関する実験的研究
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 倉富洋
2. 発表標題 鉄骨梁と木質床の合成梁効果に関する実験的研究
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 倉富洋
2. 発表標題 CLT床の接合方法の改良について
3. 学会等名 超高層ビルに木材を使用する研究会 第6回定時総会記念シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 倉富洋
2. 発表標題 鉄骨梁と木質床間の接合部せん断性状に関する実験的研究
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 倉富洋
2. 発表標題 木質床と天井吊り材の引抜き性状に関する実験的研究, 日本建築学会九州支部研究報告
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 倉富洋
2. 発表標題 鉄骨梁と木質床の接合方法に関する実験的研究
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究発表会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考