

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：37111

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14878

研究課題名（和文）鋼構造オフィスビル床・壁の木質化へ向けた接合部開発に関する研究

研究課題名（英文）Study on the development of the wooden hybrid members in steel structural buildings

研究代表者

倉富 洋 (Yo, Kuratomi)

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）：現在のわが国では、国産木材の需要を拡大していくことが求められており、クロス・ラミネイテッド・ティンバー（CLT）の活用が注目を集めている。鋼構造オフィスビルなどの大規模建築物にCLTを構造材料として使用する際、接合部仕様の検討が重要である。本研究では、ラグスクリューボルト（LSB）を用いた機械式接合を提案することで、高剛性・高耐力を有する接合方法を提案した。接合方法は、工場でLSBをCLTに埋め込み、現場で六角ボルトにて鉄骨部材と緊結するため、簡便な方法で行える。本研究課題では、LSB接合におけるせん断耐力を調べ、本接合を適用した床・壁の木質化への適用可能性を実験的に提示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、LSBをせん断抵抗させた際の挙動を実験的に調べ、LSB一本当たりの降伏せん断耐力評価法を提案した。CLTは面材として床や壁への使用が効果的である。床への適用に際して、鉄骨梁との合成梁効果を調べるために曲げ実験を実施し、純鉄骨梁に対して曲げ耐力および曲げ剛性を向上できることを示した。また、間柱型せん断パネルの架台をCLTに置換することを検討し、その接合部にLSBを使用する構法を提案した。いずれも良好な実験結果が得られており、今後、鋼構造オフィスビルなどの床や壁を木質化する際に有益な研究成果となるものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Cross-laminated timber (CLT) is a solid wood panel commonly used as a structural material to construct moderate-to-large-sized buildings because of its high strength and stiffness. Hence, we proposed replacing reinforced concrete slabs with CLT floor panels in moderate-to-large-sized buildings.

We used a lag-screw-bolt (LSB) as a shear connector and hexagon head bolts to connect the steel members and CLT panels. LSBs were embedded in CLT panels at a factory before arrival at the construction site. On the construction site, workers simply connected steel beams to CLT panels using a hexagon head bolt. Herein, push-out shear test, cyclic shear test and bending test were conducted to investigate the structural performance of the proposed connection method between steel members and CLT panels. Based on the test results, the study indicated that the wooden hybrid structural system is an effective method to engage using forest resources.

研究分野：建築構造

キーワード：CLT ラグスクリューボルト 鉄骨造 せん断パネル ヨーロッパ型降伏理論式 混合構造 合成梁

様式 C-19、F-19-1、Z-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。こうした時代の流れを受け、筆者は、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換する試みを行ってきた。RC床をCLT床へ置換する利点として、仮に年間に建設されるすべての非住宅建築物の床をCLTに置換すると、年間1000万 m^3 の木材消費につながる試算がなされている¹⁾。この数値は、現在の国産木材の年間使用量が約2700万 m^3 であることを考慮すると、極めてインパクトのある数値であることがわかる。

筆者らは、柱梁鉄骨造の床を木質化するにあたり、主に、鉄骨梁と木質床の接合方法および、中高層建築物でも適用可能とするための二時間耐火性能を付与できる仕様について明らかとした。こうした実績をもとに、既に本構法を参考とした実物件が建設されており、今後も普及が期待されている構法である。

2. 研究の目的

鉄骨梁とCLT床の従来の接合方法は、頭無しスタッドとエポキシ系接着剤で一体化するものであった。しかし、実物件への適用を通して、エポキシ樹脂が高価であること、耐用年数や耐久性などの接着剤に対する課題が残っていることなどが挙げられた。そこで筆者は、エポキシ樹脂を使用せず、ラグスクリューボルト（以下、LSBと略記）を用いた機械式接合を提案することで、これらの課題を解決できるものと考えた。本研究で使用するLSBは、端部がメネジ加工されており、六角ボルトが接合できるようになっている。施工は、工場でLSBをCLTに埋め込み、現場で六角ボルトにて鉄骨部材と接合する簡便な方法で行える。本研究の主な目的は、LSB接合のせん断耐力の把握と、LSB接合による実構造物への適用例を提示することである。

3. 研究の方法

(1) 2020年度における研究方法

当該年度では、LSBをせん断抵抗させた際の挙動を調べることを目的として、LSBと六角ボルトによって接合した鋼材とCLTの押抜きせん断実験を実施した。試験体詳細を図1に示す。試験体は梁材を想定したH形鋼を中央に、床材を想定したCLTを両側に配置した。CLTには、予め谷径25mm（山径30mm）、長さ150mmのLSB（SNR490B）を打ち込んでおき、H形鋼フランジには所定の位置に直径20mmの孔を設けた。なお、LSBには首下長さ45mmの六角ボルトM16が接続できるようにメネジ加工が施されている。試験体の組み立ては、寝かせた状態で片側ずつCLTを取り付け、その後に直立させて水平面を確保した。H形鋼とCLTを六角ボルトで接合する際にはトルクレンチを用い、一次締め付けはトルク値100Nmで、本締めはトルク値230Nmで締め付けた。H形鋼にはH-200×200×8×12（SS400鋼材）を、CLTにはスギMx60-5-7を、それぞれ使用した。同図中のCLTには、荷重に対して繊維直交方向となるラミナに斜線を記入している。実験変数にはLSBの打ち込む方向を選定し、外力の作用する方向に対して繊維方向が主となる試験体（図1(a)参照）と、繊維直交方向が主となる試験体（図1(b)参照）の二種類とした。各条件において試験体は6体ずつ製作し、うち3体は試験体組み立て時に六角ボルト軸部に潤滑剤を塗布した。図2に載荷装置を示す。載荷時は両端フランジにピンを設置し、加圧板を介して一方向に単調に加力した。変位はH形鋼とCLTの相対ずれ変位を、四箇所設置した変位計により計測した。

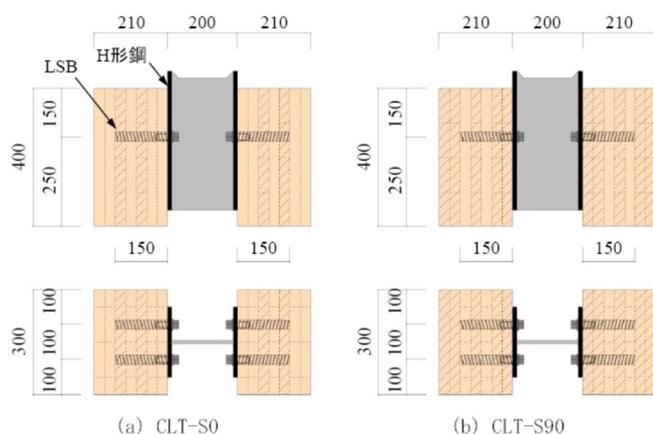


図1 押抜きせん断実験の試験体

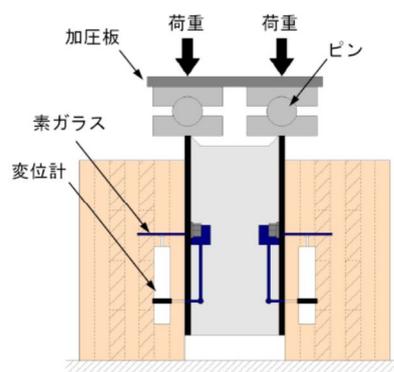


図2 載荷装置

(2) 2021年度における研究方法

当該年度では、架台をCLTとした際のせん断パネルの履歴性状について、接合部に使用するLSBの必要本数およびCLT架台の必要幅を調べるため、繰返しせん断実験を実施した。試験体詳細を図3に示す。本試験体は上下の架台とせん断パネルから構成される。架台には210mm厚の

CLT (スギ S60-7-7) を用いた。高さは 450mm で統一し、幅のみ 1000mm と 750mm の二種類用意した。せん断パネルは、パネル部 (SUS304)、枠フランジ (SM400A)、エンドプレート (SM400A) を溶接して製作している。寸法は全試験体において共通である。せん断パネルと CLT 架台は、予め CLT に埋め込んだ LSB と六角ボルトによって接合される。使用した LSB (SNR490B) は谷径 25mm、直径 150mm である。試験体名は、CLT [幅] - [LSB 本数] で区別している。CLT1000-16 では、せん断パネルの終局せん断耐力の 2 倍に相当する降伏せん断耐力を確保することで、確実にパネル部にせん断力を伝達させることを意図した試験体である。一方、CLT1000-8 は LSB 本数を半分に減らし、パネルの終局せん断耐力と概ね同等の降伏せん断耐力を持たせている。また、LSB の総降伏せん断耐力がパネルの終局せん断耐力を下回るような挙動を把握しておくために、CLT1000-4 を用意した。CLT の幅を狭めた際の挙動を検討することを目的として CLT 幅を 750mm とした CLT750-8 の試験体も実施した。本 LSB 接合の特徴は、接続ボルトの取り外しが可能であることから、地震力等によってせん断パネルが損傷しても交換が容易に行えるものと推察される。そこで試験体 CLT1000-16R では、CLT1000-16 の実験終了後、架台はそのままに、せん断パネルのみを新たに取り換えて実験を実施した。なお、比較用にせん断パネルのみの試験体 P を用意した。試験体の上下架台と鉄骨土台を LSB と高力ボルトにて緊結し、鉄骨土台は各々載荷梁に接合した。載荷プログラムは間柱全体の水平変位量で制御し、変形角 (試験体上部の水平変位を材長で除した値) 0.10%、0.20%、0.35%、0.50% まで載荷したのち、2.0% まで 0.25% 刻みで載荷した。

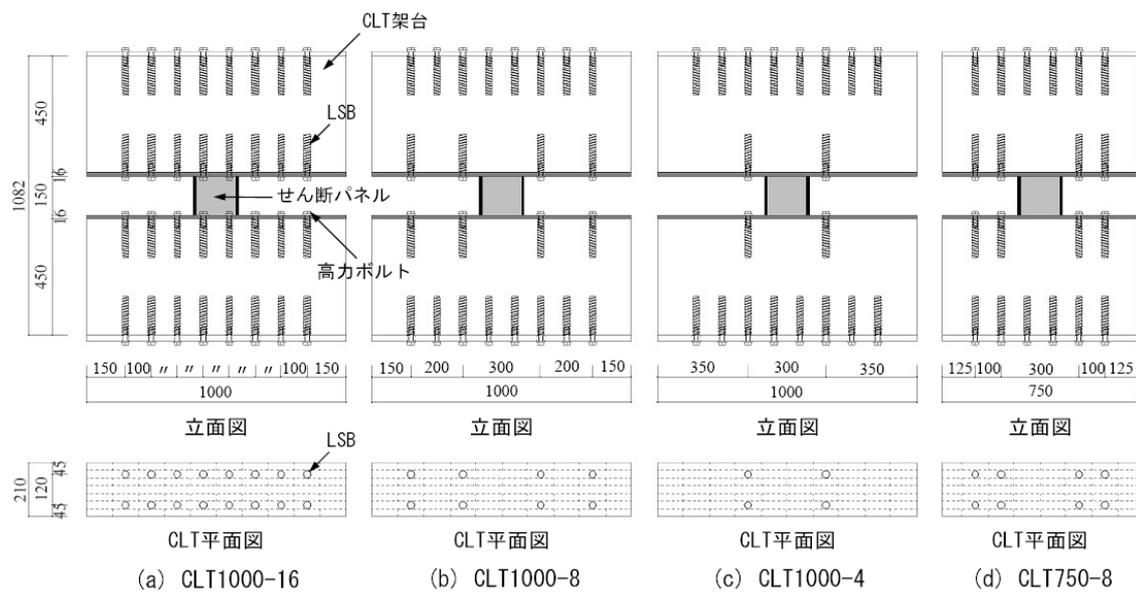


図 3 CLT を架台とした制振パネルの試験体

(3) 2022 年度における研究方法

当該年度では、LSB を使用して一体化した鉄骨梁と CLT 床の合成梁効果を実験的に検討することを目的として、曲げ載荷実験を実施した。H 形鋼には H-350 × 175 × 7 × 11 (SS400) を、CLT には 5 層 7 プライの 210mm 厚 (スギ Mx60-5-7) をそれぞれ使用した。CLT には予め谷径 25mm (山径 30mm)、長さ 150mm の LSB (SNR490B) を打ち込んでおき、梁上フランジには所定の位置にボルト貫通用の孔を設けた。実験変数には CLT の方向 (強軸と弱軸) と LSB の配置間隔 (125mm と 250mm) を選定した。荷重方向に対して繊維方向が多くなる試験体を CLTS-S、繊維直交方向が多くなる試験体を CLTS-W とした。図 4 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し

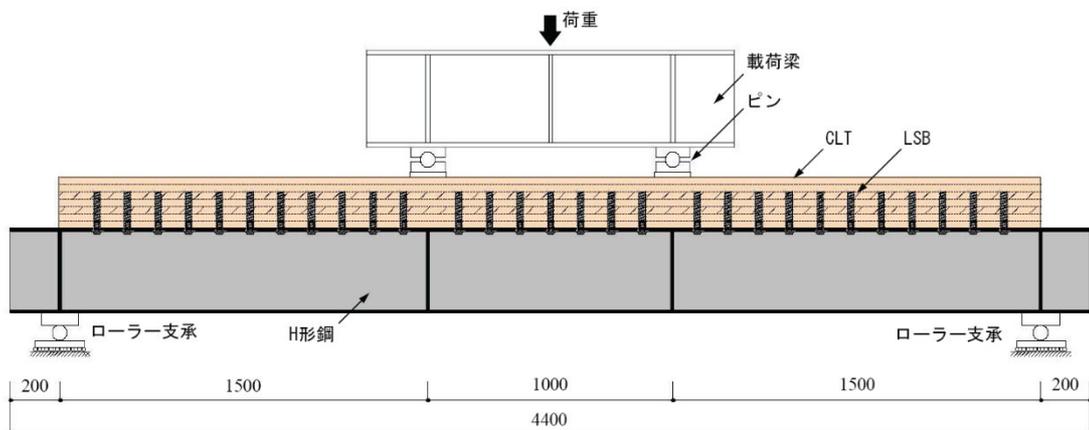


図 4 合成梁の曲げ試験の載荷装置

ている。比較用の純鉄骨梁を含め、合計4体の試験体を製作した。載荷装置を図4に示す。試験機には5000kN試験機を用い、載荷梁を介した四点曲げ載荷実験を行なった。支点はローラー支承とし、一方向繰返し載荷とした。載荷履歴は試験体中央部のたわみにおける変位制御とし、このたわみ量が30mmまでは7.5mm刻みで、その後は15mm刻みで最大60mmまで載荷した。

4. 研究成果

(1) 2020年度における研究成果

実験から得られた荷重 - 変形関係を図5に示す。横軸は設置した四本の変位計の平均値である。実線は潤滑剤を塗布した試験体、点線は塗布していない試験体である。潤滑剤の有無による違いは変形5mmまでの領域で顕著に見られ、潤滑剤有りの試験体の方が大きな剛性を発揮している。これは、潤滑剤を六角ボルトに塗布することでトルク係数値のばらつきが小さくなり、安定して所定の張力を与えることができたためだと考えられる。図5(a), (b)より、試験体 CLT-S0 と CLT-S90 を比較すると、最大耐力は試験体 CLT-S0 の方が大きく発揮されている。使用する CLT の繊維方向層の多寡によって挙動が異なることは LSB を用いた本接合方法でも同様である。なお、本実験では載荷装置との関係から変形量30mmを目安に実験を終了したが、荷重は実験終了時でも上昇を続けていた。

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、ラミナ構成に応じて繊維方向および繊維直交方向の影響を考慮して算定する必要がある。木質構造設計基準・同解説²⁾では、木材の主材と鋼板添え板からなる一面せん断接合において降伏モードを三つに分類している。本論における CLT は5層7プライを使用しており、その内の5プライ目まで LSB が埋め込まれている。接合具端部に一箇所の塑性ヒンジが生じる降伏 Mode 3 では、回転中心の位置によって5種類 (Mode 3a ~ 3e) に場合分けすることができる。同様に、接合具に二箇所の塑性ヒンジが生じる降伏 Mode 4 では、塑性ヒンジの位置に応じて5種類 (Mode 4a ~ 4e) に場合分けを行なった。

潤滑剤を塗布した試験体 CLT-S0 の、計算耐力を発揮するときの変形量は0.66mm ~ 0.87mm である。一方、潤滑剤を塗布しないと変形量は1.29mm ~ 1.72mm となり、およそ二倍の変形量で計算耐力を発揮することになる。試験体 CLT-S90 でも同様な傾向が見られた。加力方向において繊維直交層が主となる試験体 CLT-S90 では、試験体 CLT-S0 に対して計算耐力発揮時の変形量が大きくなるため、接合部位に要求される性能と照合して変形量を定めることが重要であると考えられる。

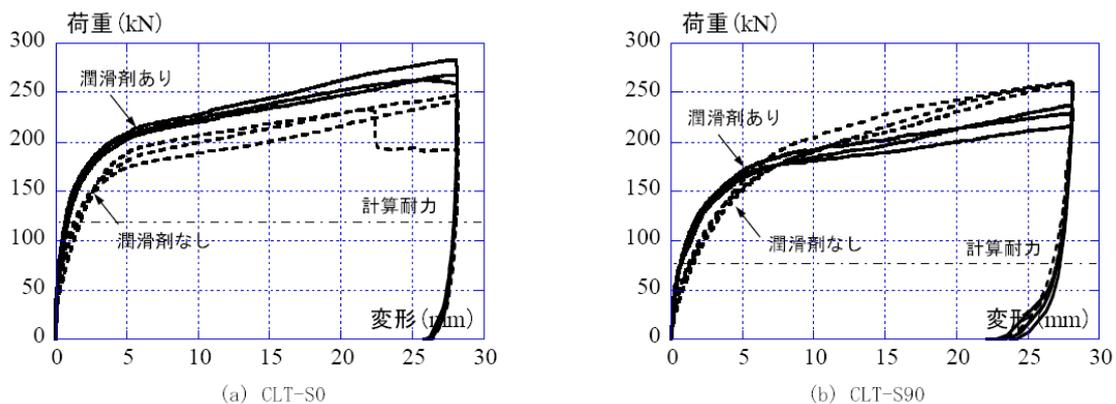


図5 押抜きせん断実験の荷重 - 変形関係

(2) 2021年度における研究成果

実験で得られた水平力 - 変形角関係を図6に示す。図中の赤で示した点線はパネルの終局せん断耐力を、青の点線はパネルの降伏せん断耐力を、それぞれ示している。同図(a)より、試験体 CLT1000-16 では、エネルギー吸収能力に優れた紡錘形の履歴曲線を描いていることがわかる。変形角 $R=0.75\%$ でパネルの座屈が見られ、 $R=1.0\%$ で皺の反転に伴う局所的な耐力低下が観察された。変形角 $R=1.25\%$ 以降の耐力低下はパネル中央部に亀裂が生じたことに起因する。本試験体の履歴曲線の形状は、パネルのみの試験体 P と類似しており、架台を CLT としてもパネル部にせん断力が伝達されていることが窺える。LSB 本数を半分に減らした試験体 CLT1000-8 は、CLT1000-16 と同様の履歴曲線を描いており、いずれも最大耐力は計算耐力に達していることがわかる。また、これらの試験体は変形角 $R=0.25\%$ と比較的小さな変形量で降伏せん断耐力を発揮している。一方、LSB 本数を4本とした CLT1000-4 では紡錘形の履歴曲線を描かず、逆 S 字型の曲線となった。これらのことから、せん断パネルのエネルギー吸収能力を発揮させるために必要な LSB 本数は、LSB の総降伏せん断耐力がせん断パネルの終局せん断耐力以上となるようにしておけばよく、LSB 本数がそれ以下(本実験でいえば半分)であるとパネル部と CLT 架台の間でずれ変形が生じ、パネル部にせん断力が十分に伝達されないことになる。試験体 CLT1000-16 の実験後にパネルの

みを取り換えた試験体 CLT-100016R では、変形角 1.75%に向かう途中でパネル中央部の割れに伴う急激な耐力低下が生じたために実験を終了したが、エネルギー吸収量の観点からも CLT1000-16 と同等の性能を有していると考えられる。CLT 架台および LSB を用いた接合部を弾性に留めておくことにより、パネルを交換しても再度利用できる可能性が示唆された。図 6(e)に示すように、CLT 幅を狭めた試験体 CLT750-8 では剛性およびエネルギー吸収量は低下するものの、履歴性状は CLT1000-8 と似通っており、破壊性状も同様であった。

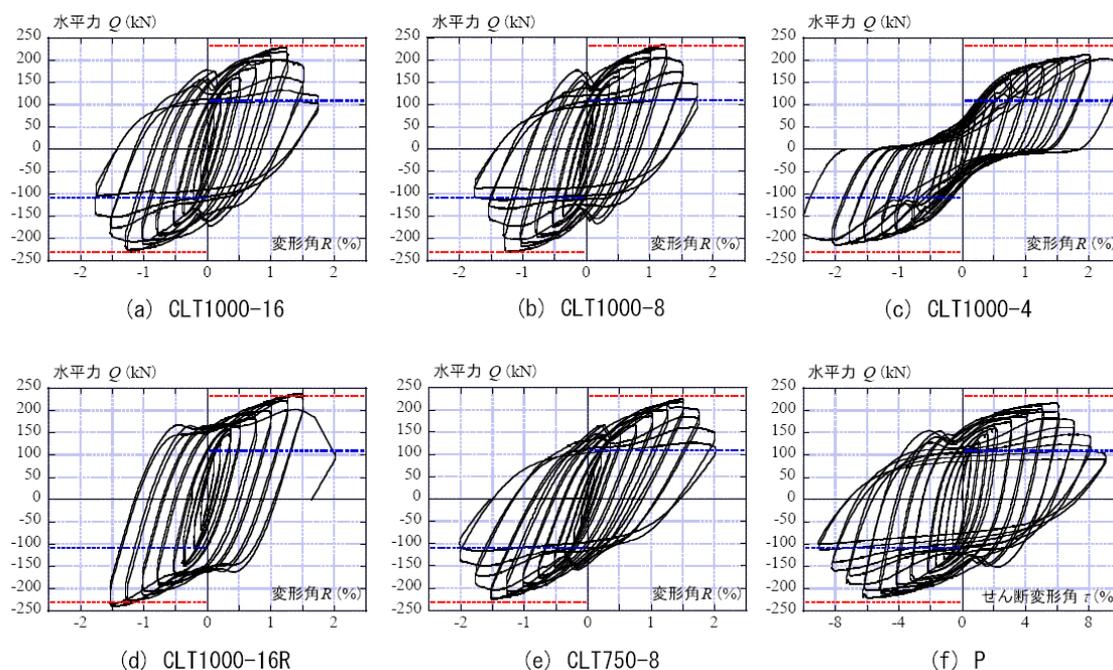


図 6 CLT を架台とした制振パネルの水平力 - 変形角関係

(3) 2022 年度における研究成果

実験で得られた荷重 - 変形関係を図 7 に示す。同図中の横軸は試験体中央部の鉛直たわみと、鉛直たわみを支点から載荷点までの距離で除した変形角をそれぞれ示している。純鉄骨梁である試験体 S は、変形角 1.5%あたりで載荷点の上フランジで僅かな局部座屈が観察された。一方、合成梁とした試験体では、CLT から軋むような音がしたものの、載荷終了まで目立った損傷は見られず、荷重 - 変形関係上でも実験終了時まで耐力が上昇し続けていた。純鉄骨梁に対する合成梁試験体の初期剛性と曲げ耐力の上昇率と比較すると、試験体 CLTS-S125 では、純鉄骨梁に対して初期剛性および曲げ耐力ともに約 1.89 倍ほど上昇しており、合成梁効果が発揮されていることがわかる。加力方向に対して弱軸方向とした試験体 CLTS-W125 でも約 1.44 倍の上昇が確認できた。LSB の間隔による影響を比較すると、間隔を 250mm とした試験体 CLTS-S250 では、試験体 CLTS-S125 に対して初期剛性と曲げ耐力の上昇率は小さくなっている。実験終了時における H 形鋼と CLT のずれ変形量は、CLTS-S250 の方が大きかったことから、LSB 本数を減らしたことで H 形鋼と CLT の一体性が損なわれたものと推察される。いずれの合成梁試験体も変形角 4.0%まで変形させたが、実験後に H 形鋼と CLT を解体したところ、電動工具にて円滑に六角ボルトを外すことができ、H 形鋼と CLT を分離することが可能であった。

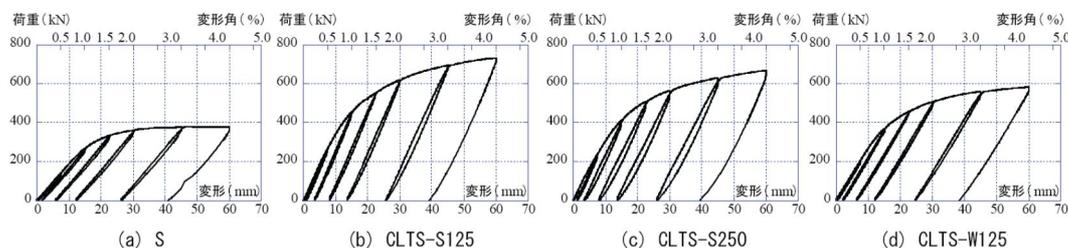


図 7 合成梁の曲げ実験の荷重 - 変形関係

参考文献

- 1) 稲田達夫，倉富洋：床構造体に直交集成材（CLT）を使用した超高層オフィスの開発，第 11 回日中建築構造技術交流会論文集，pp.81-89，2015.10
- 2) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説 - 許容応力度・許容耐力設計法 - ，2006.12

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6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 4件）

1. 著者名 倉富洋, 堺純一, 稲田達夫	4. 巻 -
2. 論文標題 CLTを架台とした制振壁の履歴性状に関する研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 pp.415-416
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 恒富春香, 倉富洋, 稲田達夫	4. 巻 第62号
2. 論文標題 鋼構造オフィスビルの床木質化におけるCO2 排出量に関する研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本建築学会九州支部研究報告	6. 最初と最後の頁 pp.477-480
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 倉富洋, 稲田達夫	4. 巻 -
2. 論文標題 ラグスクリーボルトで接合した鉄骨梁とCLT床の合成梁効果に関する研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 -
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 倉富洋, 堺純一, 稲田達夫	4. 巻 14
2. 論文標題 鋼構造オフィスビル床・壁の木質化へ向けた接合部開発に関する研究	5. 発行年 2021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 (48)1-(48)-7
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, 堺純一, 稲田達夫	4. 巻 61
2. 論文標題 木質制振壁の履歴性状に関する実験的研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本建築学会九州支部研究報告	6. 最初と最後の頁 473-476
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, 堺純一, 稲田達夫	4. 巻 60号
2. 論文標題 メネジ加工したL S B で接合した鉄骨梁とC L T 床のせん断性能	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会九州支部研究報告	6. 最初と最後の頁 533-536
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計6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 CLTを架台とした制振壁の履歴性状に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 恒富春香
2. 発表標題 鋼構造オフィスビルの床木質化におけるCO2 排出量に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 倉富洋
2. 発表標題 鋼構造オフィスビルの床木質化におけるCO2 排出量に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 倉富洋
2. 発表標題 鋼構造オフィスビル床・壁の木質化へ向けた接合部開発に関する研究
3. 学会等名 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 倉富洋
2. 発表標題 木質制振壁の履歴性状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報告
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 倉富洋
2. 発表標題 メネジ加工したL S B で接合した鉄骨梁とC L T 床のせん断性能
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告
4. 発表年 2021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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------