

令和 5 年 6 月 11 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H00794

研究課題名（和文）大判木質パネルの特性を最大限に活かした高可用型木質混構造の性能把握と評価

研究課題名（英文）Seismic performance evaluation of timber structure using large-sized panels

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） 35,000,000円

研究成果の概要（和文）：木材を建築物に利用促進する研究開発は国内外で進められている。本研究は木材を用いた建築物の新たな構造を提案するものである。CLTというヨーロッパで開発された材料を用いて、地震国であるわが国でも耐震安全性を確保した連層耐力壁構造を提案した。この構造は伝統的な木造建築物の構造安全性の考え方にも通じるもので、伝統的な考え方をベースにさらにエネルギー吸収部材を用いて高度化をはかっている。林野庁ほかのプロジェクトと協同しつつ、5階建ての静加力実験と3階建ての振動台実験を実施し、過去最大級の地震に対して安全であることを確認しつつ、設計方法について一考した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

連層耐力壁構造は地震国である、米国、ニュージーランド、日本で時期を同じくして提案された、大きな版を用いた建築構造手法である。これまで日本では伝統的な工法に用いられてきた転倒復元力という抵抗機構を経験とか感ではなく学術的な観点から解明し、さらに実験によってその安全性を確認した点は大きい。本研究は3階建て、5階建てが多少ではあったが、米国では同様の手法によって10階建ての木質構造の実験が実施され、更なる高層木造が可能であることが証明された。CO2削減の観点から木材利用が進められており、木造建築の適用範囲を広げ、かつ安全性を確認した点で極めて意義深いものである。

研究成果の概要（英文）：Research and development to promote the use of wood in buildings is underway both in Japan and abroad. This study proposes a new structure for buildings using wood, using CLT, a material developed in Europe, and proposes a continuous-layer bearing wall structure that ensures seismic safety in Japan, an earthquake-prone country. This structure is also in line with the structural safety concept of traditional wooden buildings, and is based on the traditional concept and further advanced by using energy-absorbing members. In cooperation with the Forestry Agency and other projects, we conducted static force tests on a five-story building and shaking table tests on a three-story building to confirm that the structure is safe against the largest earthquake ever recorded and to consider design method.

研究分野：建築構造

キーワード：建築構造 木質構造 耐震安全性 耐震設計 環境問題

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、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

近年、建築物における新たな分野での木材利用が進んでいる。現在木材需要の4割、国産材需要の過半数を占めるのが建築用材である。そのうち、住宅分野(戸建て住宅)では従来から木材が多く使用されており、木造率も高い。しかし、公共建築物や集合住宅など中高層・中大規模の建築物における木材利用は十分でないことから、新たな木材利用の対象としてそれらの用途が期待されている。ではなぜ木材利用が促進されているのか。まずは地球温暖化緩和・林業再生・持続可能な建設産業の構築といった点も木材利用を推進する理由がある。木材はまず、立木の時点で炭素を固定している。伐採されることで、その結果、空气中に放出する二酸化炭素を他の建材を利用する場合に比べて少なくすることが可能である。そのほかに、木材を内装材や構造材に採用させるだけの、人々に好まれる木材の材料としての特徴がある。木材には調湿作用、肌さわりの良さ、見た目の良さといった利点がある。これらは内装材に使用されることで、効果を発揮する。また、構造材として利用する際には、軽量で強度があることも利点としてあげられる。

このような木材利用の促進の運動の高まりの中で、中高層・中大規模の建築物における木材利用が期待されているのである。これらの建築物の建築には戸建住宅以上に木材を使用するため、国産材利用の需要が高まり、地球温暖化緩和・林業再生・持続可能な建設産業の構築などに大きく寄与すること期待されている。そのための法整備として、2010年に「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」が施行された。この法律の中で「公共建築物等における木材の利用の促進に関する基本方針」が策定された。これにより、過去の「非木造化」の歴史から大きく転換し、国が整備する公共建築物のうち、耐火建築物または主要構造部に耐火構造とされていない低層の公共建築物について「原則としてすべて木造化を図る」等の目標が掲げられた。2015年の建築基準法の改正により3階建て校舎の耐火について見直しもなされた。一定の延焼防止措置を講じた「1時間準耐火構造の構造物」とすることが可能となった。つまり、中大規模の建築物において木質化・木造化が推進されている。

また、中高層・中大規模の建築物における木材利用が促進される状況で注目されている木質材料が、直交集成板 - Cross Laminated Timber (以下 CLT) である。欧州で開発され北米でも中高層木造建築をはじめ様々な建築物で利用が進んでいる CLT は、日本においても合板、集成材、LVL に次ぐ新たな木質材料として期待されている。CLT はラミナを張り合わせた板を繊維が直交するように交互に積層して作成した大断面木質材料の一種である。CLT の特徴として挙げられるのが、高断熱性・難燃性・高耐力・高い寸法安定性である。CLT は層数により厚さを調節し、高断熱性・難燃性を実現できる。また、強度区分されたラミナを組み合わせて、積層接着しているため面内の剛性・耐力が高い。そして、繊維方向を交互に接着しているため高い寸法安定性ができている。本研究の耐震システムにはこのような特徴を持つ CLT を主要構造材として利用している。

木造で中高層・中大規模の建築物を実現できる構法には、木造ラーメン構法である SE 構法や大断面集成材工法やツーバイフォー工法や CLT パネル工法などが挙げられる。これらの従来の構法については、構法の耐震性能についての研究が深まってきており、実際に構法を採用した建築物が実現してきている。

## 2. 研究の目的

本研究では中層建物の木造化技術において、大判木質パネルを複数層にまたがる連層壁とすることで、そのせん断性能を最大限に発揮しうる高耐震性能を持つ構法を提案する。同時に、このような連層壁には様々な機能を付加することが可能である。例えば、大きな鉛直荷重が作用する連層壁のロッキングの効果による地震時の変形を初期位置に戻す自己復元機構や、変形を柱脚部や連続配置した鉛直構面間に集中させることで建物全体の破壊を抑制する損傷制御機構などが考えられ、うまく利用することでレジリエントな建築とすることが出来る。まず、大判木質パネルを連層壁とする際の接合や施工などの問題解決を図り、次に付加技術の導入における課題解決を図る。さらにより広汎な適用を目指し、本構法は他材料との混構造への展開を意図する。鉛直力を他構造に負担させる場合に連層壁に導入される荷重のコントロール手法などを検討する。以上のように、本課題では高可用型大版木質パネル連層壁構法の耐震性能に関する技術基盤整備のための知見を得るものである。

法令による CLT を用いた代表的な工法は CLT パネル工法と呼ばれるものである。小幅パネル構法は金物に靱性を期待するため耐震性で有効であるが施工性やコストに難があり、また接合耐力による制限から、CLT は大型面材として活用する形式が有利であると認められた。小幅大版パネル工法双方の有利不利点を比較し、水平方向単一層に面材を使用するのでは無く、層をまたいだ連層パネルの着想を得た。

さらに、これまで、伝統構法建物の耐力評価に係わる研究も行ってきた。伝統構法における傾斜復元力は、中小地震に対して損傷を生じずに常に初期位置に復元させる機能を持つ優れた機構である。一方で大地震には土壁のせん断抵抗等に対応される。柱径の小さな建物ではあまり有効に働かない傾斜復元力だが、壁高さ/幅比を小さくできる大版パネル工法では有効に性能を発揮するだろうと考えられた。連層パネルにおいて大変形時に高耐力を負担する壁中間層接合

の機構は、伝統構法における傾斜復元力と土壁の相互の役割分担に近いものとなる。すなわち、本課題の提案は、本研究にかかわる研究者らがこれまで行ってきた知見に基づき、伝統構法におけるメカニズムを現代の手法で積極的に解釈し再評価したものと位置づけることができる。

近年、建築における省人化や、大地震後の早期復旧可能性(レジリエンス)が注目されている。木造建築に対してこれらの機能を組み込む手法を検討する中で、ロッキング機能を活用した大版木質パネル連層壁構法はそれらを同時に満足する事が可能との見通しを得た。また、地震応答特性の研究を行う中で、制振機能の有効性についても深く認識している。本構法はそれをも取り込んだ、高可用な形式として提案できるものとして取り組んだ。

### 3. 研究の方法

まず、大判木質パネルを通し壁として用いた連層壁を並列させた 5 階建ての静加力実験を実施した。本実験は連層壁システムの基本的な挙動を確認する目的で実施したものである。その後さらに効率的に連層壁を用いることを目的に 3 階建ての振動台実験を実施した。いずれも境界壁と境界柱の間にダンパーを設けて、本システムのエネルギー吸収性能をさらに高めた試験体とした。後者の実験は設計方法を確認することも目的としている。また、解析的に挙動追跡をすることも目的としている。

#### 3.1 5 階建て連層壁の実験

実大実験の試験体の全景を図 3.1 に示す。試験体は 8.0×2.5mの平面を有する各階高 3m の 5 階建ての試験体である。2 構面で構成され、1 構面には高さ 15m の CLT の連層耐震壁が 2 つ並列している。連層耐震壁は 4 階の途中で鋼板挿入ドリフトピン接合と鋼板添え板ビス接合を組み合わせた継ぎ手を設けた。連層耐震壁の外側には集成材柱を配置し、軸力の一部を負担させた。この耐震構面を 2 面配置し、長手と直交する方向に集成材梁を渡し CLT 床をかけた。CLT 床と同レベルの高さで、CLT 壁と集成材柱の間に集成材の梁を長手平行方向に懸けた。CLT 壁脚接合部は鋼板挿入ドリフトピン接合であり、基礎とは CT 鋼、ボックス金物を介してアンカーボルトで接合した。CLT 壁間にはせん断パネルダンパーを配置した。せん断パネルダンパーは低降伏点鋼 (LY225) を使用し、面外座屈を防止するためにスチフナで補剛した。

試験体仕様パターンを計 8 パターンとした。CLT 壁脚部のアンカーボルトの本数と境界梁として壁間に挿入するせん断パネルダンパーの個数をパラメータとした。それぞれの仕様パターンについて加力方法の異なる試験を計 10 通り実施した。

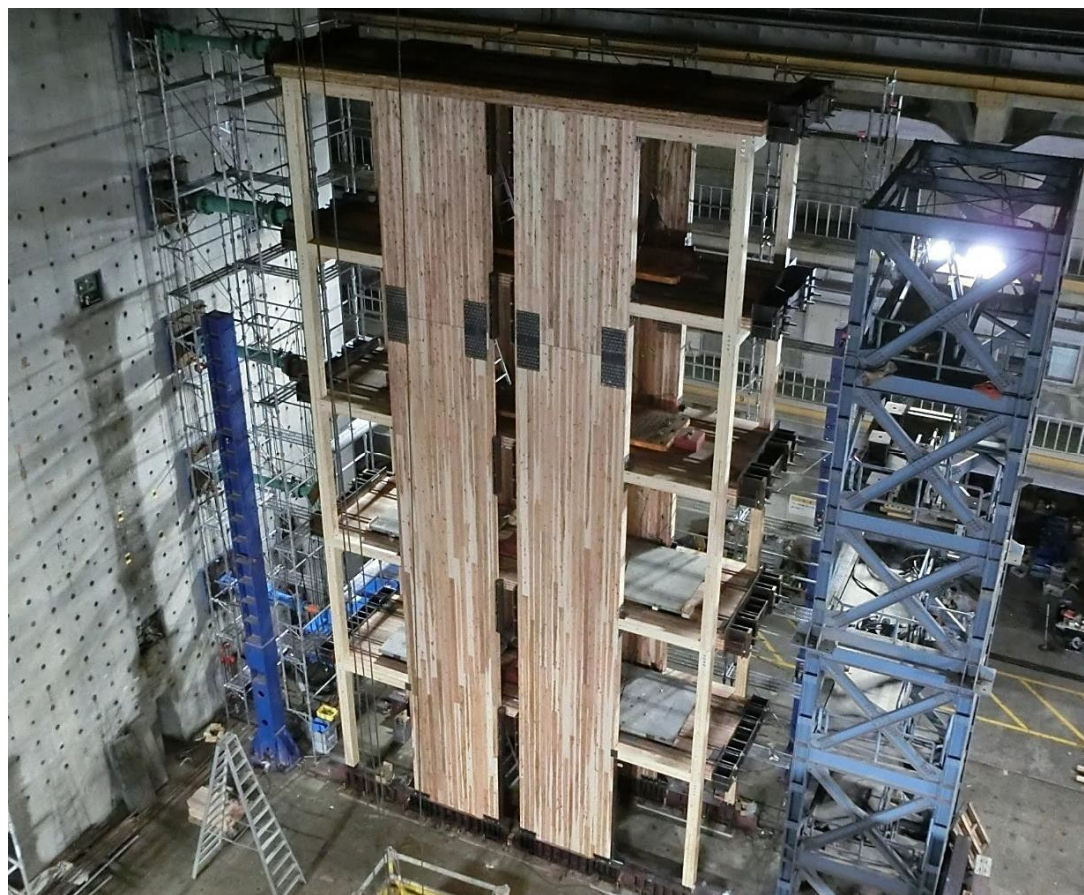


図 3.1 試験体全景

#### 3.2 3 階建て振動台実験

片持ち壁構造は、力学的には極めて明快で初等力学で基本設計が可能と考えられる。ここではまず、本構造の設計の流れについて、のちに振動台実験を実施する 3 階建て建物を対象に示すこととする。

図 3.2 に試験体の全景と平面図を示す。試験体は階高 3m、最高高さ 9.35m の木造 3 階建てである。平面は 5.46m×5.46m であるが、7.28m×7.28m の平面規模に相当する地震力となるよう鋼製の錘で層重量を調整した。

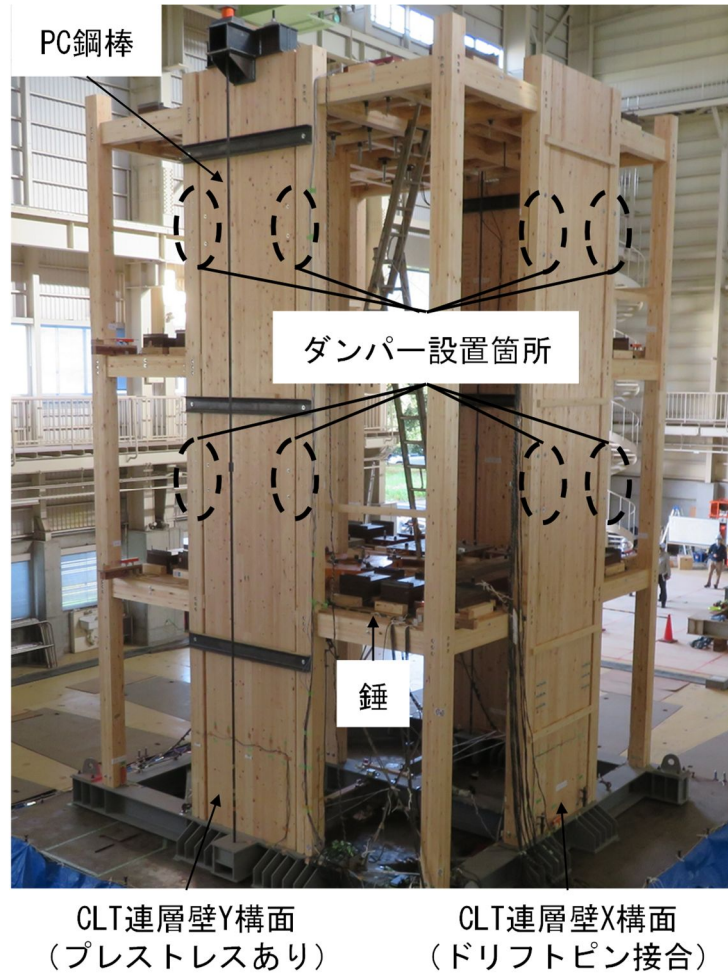


図 3.2 試験体の全景写真

#### 4. 研究成果

##### 4.1 5階建て連層耐震壁の実験

各試験結果について 1 階層間変形-1 階層せん断力 (ベースシア) 関係の骨格曲線を図 4.1 に示す。押しと引きの比較ではいずれの試験でも引きのほうが、層せん断力が小さかった。これは引きの加力でアンカーボルトやせん断パネルダンパーが降伏したあとに、押しの加力を行うためアンカーボルトやせん断パネルダンパーのひずみ硬化により耐力が上昇していたことが原因として考えられる。

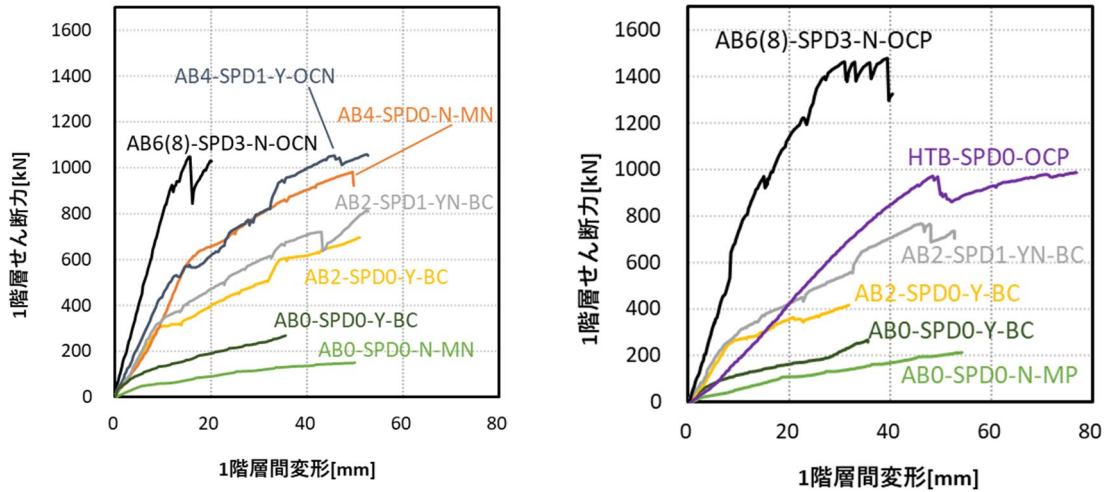
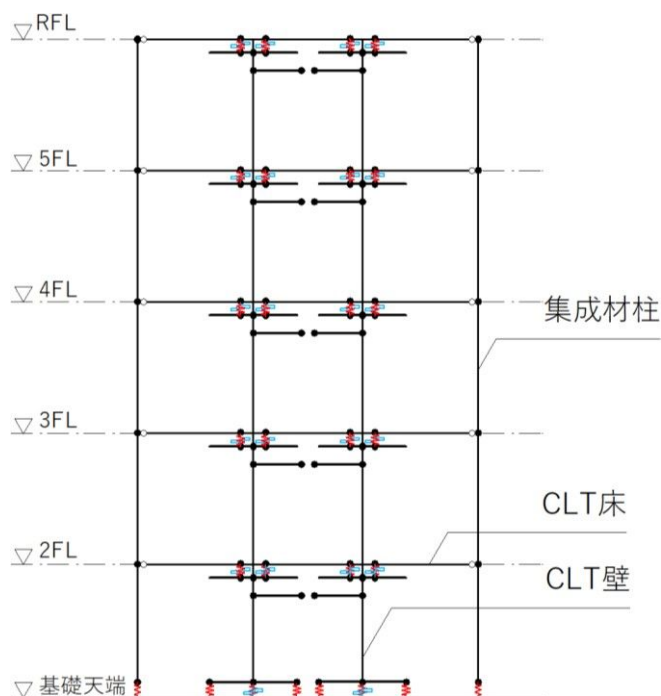


図 4.1 押しの各試験の比較 (左) 引きの各試験の比較 (右)

次に実大実験の結果を追跡する目的で行った事後解析について述べる。解析には構造解析ソフトとして、京大生存圏研究所が公開している wallstat ver.5.0 (以下 wallstat) を用いた。実施した実大実験の各試験を対象とし、荷重制御による解析と  $A_i$  分布に基づく外力分布での静的増分解析を実施した。荷重制御による解析では、試験 AB0-SPD0-Y-BC、AB2-SPD0-Y-BC、AB4-SPD0-N-MN について解析を実施した。 $A_i$  分布に基づく外力分布での静的増分解析では AB0-SPD0-Y-BC、AB2-SPD0-Y-BC、AB4-SPD0-N-MN に加えてダンパーを挿入した試験 AB2-SPD1-Y-BC、AB4-SPD1-N-OCN、AB6(8)-SPD3-N-OCN (AB6(8)-SPD3-N-OCP) について解析を実施した。試験体のモデル化の際は要素実験で得られた結果を用いた。

試験体は図 4.2 のように 2 次元モデルで 1 構面についてモデル化した。重量については試験体重量の半分の値を入力した。



- ・ 節点                      引張・圧縮バネ
- ピン                      せん断バネ

図 4.2 試験体のモデル化

#### 4.2.3 3階建て振動台実験

実験結果の一例を図 4.3 に示す。ダンパーの効果が見えてくる。

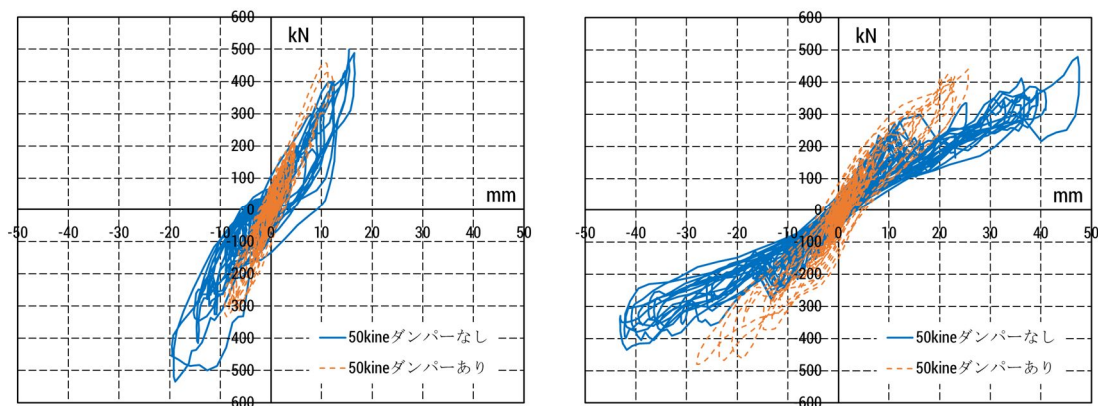


図 4.3 実験結果の一例

#### 5. まとめ

以上より、ロッキングシステムの有用性を確認することができるが、ダンパーの性能決定や CLT 脚部圧縮ばねのモデル化については、実験後の要素試験も踏まえ詳細に検討を進める必要があると考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔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 衣笠大樹, 角田功太郎, 森拓郎, 中川貴文, 荒木康弘, 中島昌一, 北守顯久, 五十田博
2. 発表標題 CLT連層耐震壁とダンパーで構成される耐震システムの静加力実験 その2 各部設計および事前解析と実験結果の比較
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 角田功太郎, 衣笠大樹, 森拓郎, 中川貴文, 荒木康弘, 中島昌一, 北守顯久, 五十田博
2. 発表標題 CLT連層耐震壁とダンパーで構成される耐震システムの静加力実験 その1 実験概要と破壊性状
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 衣笠大樹, 五十田博, 中川貴文, 北守顯久, 森拓郎, 荒木康弘, 秋山信彦, 中島昌一
2. 発表標題 CLT連層耐震壁とダンパーで構成される耐震システムの静加力実験
3. 学会等名 日本木材学会大会研究発表要旨集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀江優一, 五十田博, 中川貴文, 辻拓也, 森拓郎, 松田昌洋, 荒木康弘, 中島昌一
2. 発表標題 CLT 連層壁を用い損傷制御を可能とする構造システムの振動台実験
3. 学会等名 日本木材学会大会研究発表要旨集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 角田功太郎・衣笠大樹・森拓郎・中川貴文・荒木康弘・中島昌一・北守顕久・五十田博
2. 発表標題 CLT連層耐震壁とダンパーで構成される耐震システムの静加力実験 その1 実験概要と破壊性状
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 衣笠大樹・角田功太郎・森拓郎・中川貴文・荒木康弘・中島昌一・北守顕久・五十田博
2. 発表標題 CLT連層耐震壁とダンパーで構成される耐震システムの静加力実験 その2 各部設計および事前解析と実験結果の比較
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演
4. 発表年 2020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
研究分担者	森 拓郎  (Mori Takuro)  (00335225)	広島大学・先進理工系科学研究科(工)・准教授   (15401)	
研究分担者	北守 顕久  (Kitamori Akihisa)  (10551400)	大阪産業大学・工学部・准教授   (34407)	
研究分担者	荒木 康弘  (Araki Yasuhiro)  (40435582)	国土技術政策総合研究所・建築研究部・主任研究官   (82115)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	中川 貴文  (Nakagawa Takafumi)  (60414968)	京都大学・生存圏研究所・准教授    (14301)	
研究分担者	中島 昌一  (Nakashima Shoich)  (90734210)	国立研究開発法人建築研究所・構造研究グループ・主任研究員    (82113)	

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