

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：14301

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2019～2022

課題番号：19KK0113

研究課題名（和文）東アジアの伝統木造建築に見られる柔構造メカニズムの解明

研究課題名（英文）Elucidation of Flexible Structural Mechanisms in Traditional Wooden Architecture in East Asia

研究代表者

中川 貴文（Nakagawa, Takafumi）

京都大学・生存圏研究所・准教授

研究者番号：60414968

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,100,000円

研究成果の概要（和文）：東アジアの伝統木造建築に共通する柱上の斗組は、多数の肘木の組み合わせによって構成され、屋根荷重を下階に伝えるための重要な構造要素である。既往の研究から制震効果があることが報告されているが、その学術的解明は十分ではない。本研究では屋根・斗組・柱・横架材・礎石等が緩やかに結合された伝統構法特有の柔構造のモデルが鉛直荷重を利用して水平荷重に抵抗するメカニズムを定量的・定性的に解明することも目的とする。静的加力実験と振動台実験による検証の結果、頭貫仕様の違いによる変形と傾斜復元力の関係を明らかにすることができた。また理論式や数値解析によって、実験結果を概ね追跡できることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

東アジアの古代建築を対象とした構造力学的研究に関しては、近年東アジアで徐々に研究事例が増えてきている。その動機は大工技術等の木づかいの文化を理解し、自国の歴史的建築物を保護することにある。日本でも、五重塔など伝統構法に見られる柔構造の性質を再評価し、現代の構造へ取り入れる試みが為されている。このように、伝統建築における技術を再評価することは木づかいの文化の継承において意義深い。日本の伝統建築のルーツとも言える中国や台湾の伝統構法を現地の研究者と連携して本研究を進められたことは構造的観点だけでなく、東アジアにおける伝統建築の構法学的観点からも学術的意義は深い。

研究成果の概要（英文）：The tie-beam on the columns, common in traditional East Asian wooden architecture, is composed of a number of elbows, and is an important structural element for transferring roof loads to the lower floors. Although previous studies have reported that it has a seismic damping effect, its academic elucidation is not sufficient. This study also aims to quantitatively and qualitatively elucidate the mechanism by which a model of a flexible structure unique to traditional construction methods, in which the roof - toe frames - columns and cross members - foundation stones, etc. are loosely connected, resists horizontal loads by utilizing vertical loads. The results of static force tests and shaking table tests have clarified the relationship between deformation and tilt resilience due to the different head-through specifications. It was also found that theoretical equations and numerical analysis could generally follow the experimental results.

研究分野：木質構造、木質材料

キーワード：伝統建築 斗組 柔構造

様式 F-19-1

1. 研究開始当初の背景

中国、韓国、日本、台湾等の国々に現存する伝統木造建築においては、斗組、あるいは、組み物と呼ばれる木材を様々に組み合わせた構造要素を柱の直上あるいは柱と柱の間の横架材の上に置き、重たい屋根荷重を柱に集めて礎石に流す形式の軸組構造が数多く見られる(図1参照)。本研究で最も注目する点は、鉛直固定荷重下で水平変動荷重を受ける斗組の力学的役割である。前野ら 1)の実施した柱頭に斗組を置いた日本型 4 本脚伝統木造架構試験体を用いた振動実験の結果(図2参照)は、その意味から注目に値する。



図1 中国・台湾・日本における斗組・組み物の例

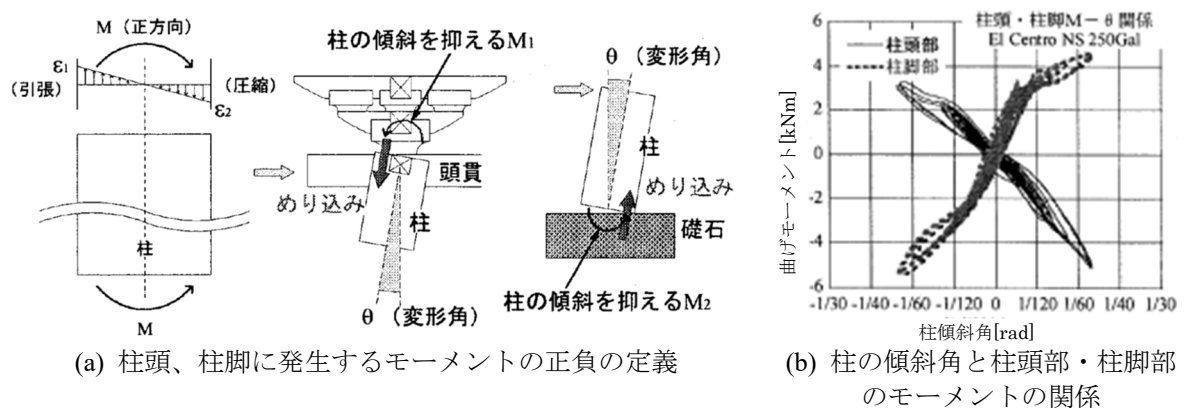


図2 伝統木造モデル架構における柱傾斜角と柱頭・柱脚部のモーメントの関係

図 2-(a)、(b)から、水平力を受けて柱が傾斜すると、柱頭の斗組は重たい屋根荷重によって水平を保つように挙動し、柱の傾斜方向と逆位相のめり込み回転を起こすことによって、柱の傾斜を抑制する方向のモーメントを生みだしていることが看取される。図 2-(b)から、一本の柱で最大 4kNm 程度のモーメントが発生し、建物全体として考えれば、相当規模の柱傾斜角の抑制効果が期待できる。さらに多数の部材の接触で構成される斗組は高い減衰性を持つことが知られ 2)、重い屋根荷重を活かした一種のマスダンパーとして働き、制振効果を持つことが推察される。このような斗組と下部構造が相互に作用し、鉛直力を緩く伝達しつつ水平耐力を発現する構成は、部材を下から順に組み上げる木造建築架構の帰結として成立し、大工の知恵として受け継がれてきたものと考えられる。しかし、学術的に非常に奥の深いこの斗組のダンパー的機能に関する定量的、定性的な研究は、その後殆ど進んでいない。

2. 研究の目的

本課題は東アジアの伝統木造建築物のもつ構法・構造上の特徴的技術を探求することで、木材の特性を踏まえつつ発展してきた木づかいの文化への理解を深めることを主目的とする。東アジアの伝統木造建築に共通する柱上の斗組は、多数の肘木の組み合わせによって構成され、屋根荷重を下階に伝えるための重要な構造要素である。既往の研究から水平力の作用によって斗組は柱の傾斜角を低減させようとする制震効果があることが報告されているが、その学術的説明は十分ではない。本研究では日本、台湾、中国に現存する伝統木造建築を対象に構造形式を現地調査で明らかにし、接合部の構造性能を要素実験等によって定量化したうえで、屋根一斗組一柱・横架材一礎石等が緩やかに結合された伝統構法特有の柔構造のモデルが鉛直荷重を利用して水平荷重に抵抗するメカニズムを倒壊まで追える構造解析法と実大部分静的・動的実験をリンクさせて定量的・定性的に解明する。

3. 研究の方法

(1) 大斗肘木・頭貫・三本の丸柱で構成された伝統的木造架構の静的加力実験

①実験の概要

大斗肘木・頭貫・3本の丸柱から構成される架構モデル試験体を作成して、鉛直油圧ジャッキによる固定荷重を斗拱に載せつつ静的正負繰り返し水平加力を水平油圧ジャッキで与えて架構の復元力特性を把握する実験を実施した。本研究で供試した試験体の寸法は法隆寺伝法堂、秋篠寺、新薬師寺の柱幅、高さ、柱間隔の比（平均値）を参考に、高さ／柱幅比を9.09、スパン／柱幅比を7.84と定め、実験装置の寸法制約から、試験体の柱間隔を1820mmとし、残りの柱幅（丸柱直径）、試験体高さを寸法比から決定した。図3に本研究で想定した伝統的木造架構を模したモデル試験体の概要を示す。柱底から頭貫芯までの距離は2057mmで、現存する伝統的木造架構のスケールと比べると凡そ1/2程度のスケールである。厚さ20mmの鋼板(7)を礎石と見立て、芯々1.82m間隔でこの丸柱を3本立て、2本の柱の間に断面92.8mm×106.7mmの頭貫(1)を配し、更に各柱頭には高さ150.8mm、幅248.2mmの大斗(3)を原則的に桁行方向に木口面を向ける様式で設置し、断面82.7mm×104.4mm×570.7mmの肘木(2)を張間方向及び桁行方向の2方向に直交配置した。本実験では、上載荷重のレベルをP=45kNとP=90kNの2段階に設定した。P=45kNの場合は、柱傾斜角R=±1/300、±1/200、±1/150、±1/100、±1/75、±1/50、±1/30、±1/15、±1/10の正負各1回繰り返しとしたが、P=90kNの場合は最後の-1/10は省略した。

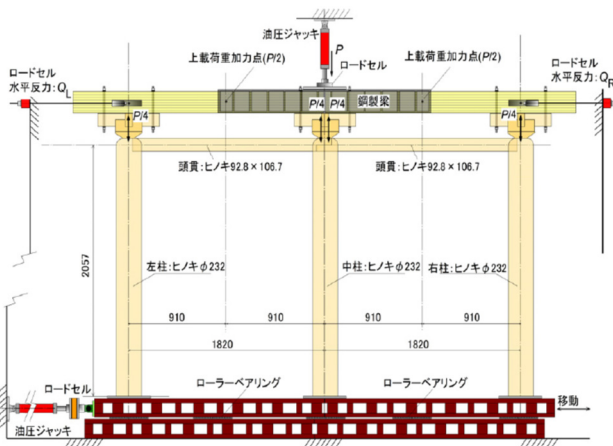


図3 試験体の概要

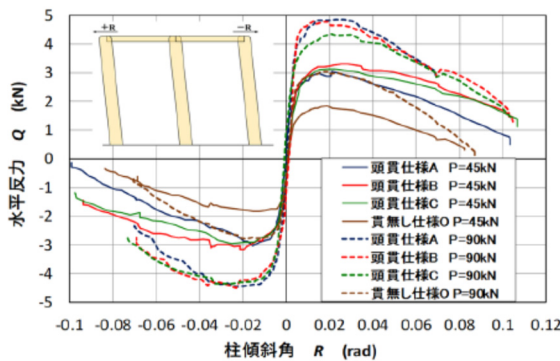


図4 荷重変形関係

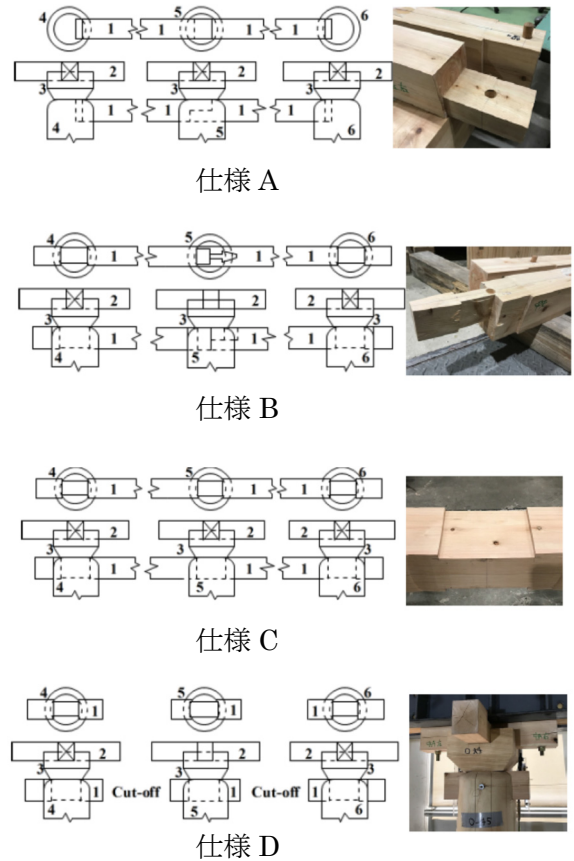


図5 頭貫の仕様

図4に水平反力(Q)－柱傾斜角(R)関係の包絡線を示す。上載荷重のレベルに関わらず、頭貫を切断した仕様Dの剛性、最大耐力は、頭貫の働いている仕様のそれらより明らかに低い事が図4より看取される。一方、頭貫が有効な仕様の場合、上載荷重がP=45kNの場合、古代形式の頭貫仕様Aは最大荷重経過後の柱傾斜復元力への寄与が他の2仕様に比べて小さいことが認められた。一方、近代仕様(仕様B)と通し貫仕様(仕様C)の耐力性能については、大きな違いは認められなかった。上載荷重P=90kNの場合、頭貫仕様の差違が柱傾斜復元力に殆ど影響しなかったのは、大斗底面に塑性変形痕が残る程拘束力が大きかった事が一因かもしれない

②理論式による柱脚モーメントの検証

柱中央部の軸力実測値とモーメントの実測値、そして水平荷重の実測値等の相対的に信頼性が高いと考えられる実測値と力の釣り合い式を組み合わせる半実験的に推定した修正柱脚モーメントの妥当性については、ロッキングを受ける円柱単独の復元モーメントに関する He & Wang の理論式¹⁾を用いて検証する。He & Wang は底面が持ち上る限界時の柱の傾斜角と対応するモーメントを式(22)で、また底面が持ち上がった後については柱の傾斜角 R を変数とする式(23)のモーメント算定式を与えている。

$$\tan R = \frac{N \cdot h}{E \cdot \pi \cdot r^3} \quad M = \frac{N \cdot r}{4}$$

$$M = N \left(r - \frac{1}{3} \sqrt{\frac{2N \cdot h}{\tan R \cdot E \sqrt{\pi} \cdot r}} \right)$$

ここで、 h : 柱の長さ、 r : 円柱の半径、 N : 柱に掛かる鉛直荷重

図 6 に上述した方法によって推定した $P=45\text{kN}$ 裁荷時の柱脚部の $M\theta$ 関係 (半実測値) と He & Wang の理論式による推定値との比較を示す。部分的に一致していない箇所も散見されるが、俯瞰的に見ると実測値と力の釣り合い式を組み合わせる半実験的に推定した修正柱脚モーメントは He & Wang の理論式(16)による推定値と概ね良く一致している。

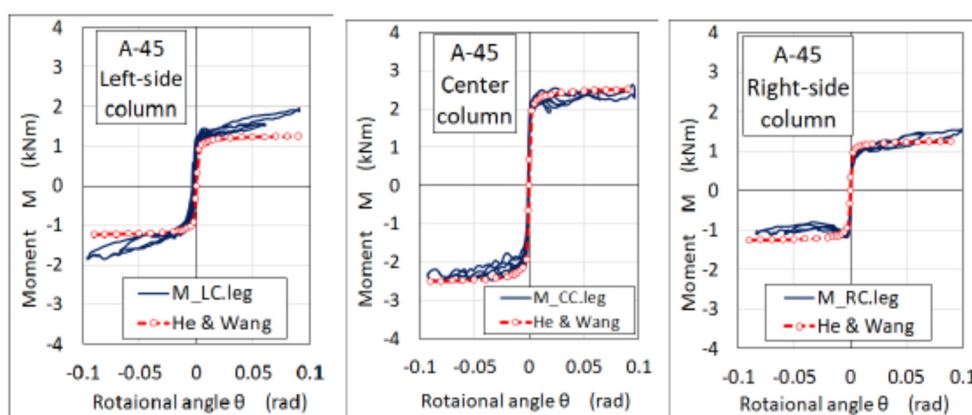


図 6 理論式と実測値の比較

(2) 振動台実験による検証

3本柱試験体の耐震性能の一端を調べる目的で、富山県木材研究所の振動台施設において、前回と同一仕様の試験体 1) を用いて一方向振動台実験を実施した。

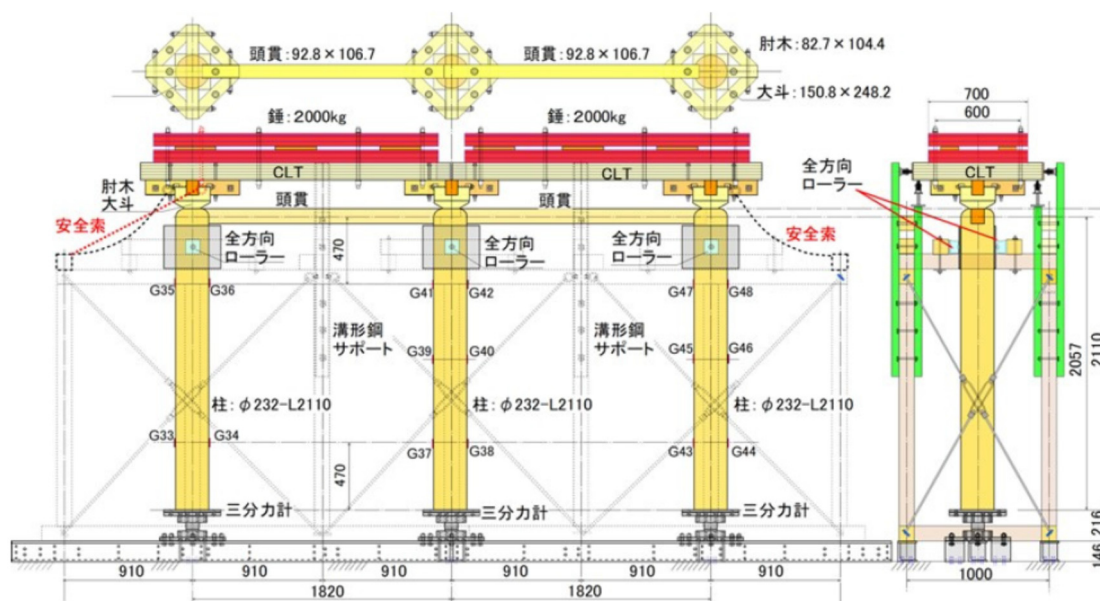


図 7 振動台実験試験体

供試体の頭貫は古代仕様と中世・近世仕様の2種類である。付加荷重は4トンで、大斗肘木上にCLT板(201kg)を設置し、その上にボルト締めした。柱頭・柱脚から柱径の2倍以上離れた位置(470mm)にSGを貼ってモーメント・軸力を計測した。最初に、試験体の動的なせん断力(Q)-変位(δ)関係の把握と、静的加力実験における柱脚モーメントの推定法を検証する目的で、振動数1Hz、及び0.75Hzのsin波を30秒入力した。続いて、3本柱試験体の耐震性能を調べる目的で、事前FEM解析に基づいて、BSL波を、試験体Aで15~40%、試験体Bで15~50%まで、更にJMA神戸波NS成分を、試験体Aで20~60%まで、試験体Bで20~80%まで入力した。なお、各入力波の前後において20galのステップ波を入力し試験体の動的性能を同定した。

図8にsin波1Hz100galを入力した場合のQ- δ 関係とSGで計測した柱脚モーメントの算定値とHe-Wangの理論値との比較の一例を示す。FEMによるQ- δ 関係の事前予測は概ね妥当であったが、柱脚モーメントの比較は妥当な場合とそうでない場合の相反する結果が見られた。図9にJMA神戸波NS成分入力時の応答関係を示す。地震波の場合、入力レベルが大きくなると、Qmax以降の下り勾配の計算予測が実測値と乖離する傾向が見られた。なおFEMは各部材の実測M- θ 関係1)を用いた柱・非線形単軸バネ・梁から成る2Dモデルである。

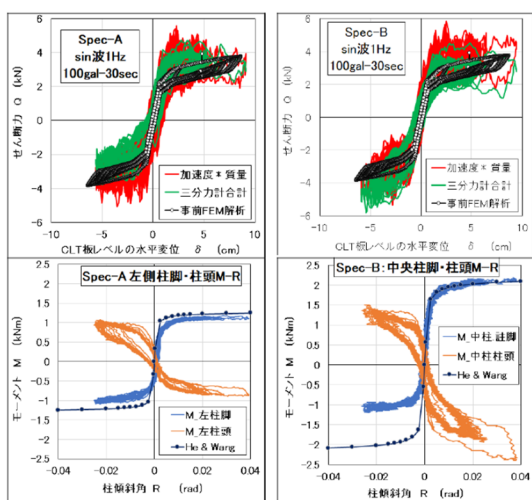


図8 Sin波入力時の荷重変形関係

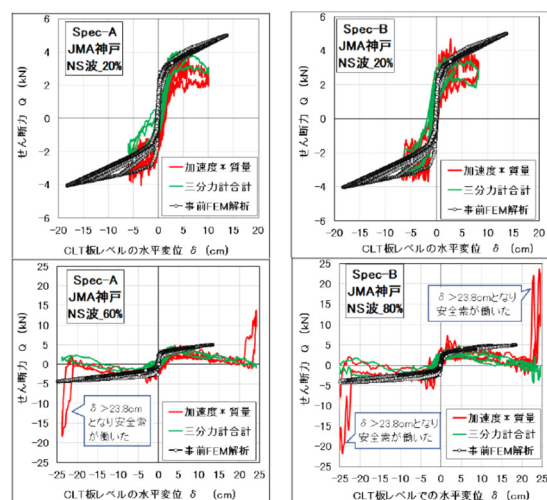


図9 JMA神戸波入力時の荷重変形関係

4. 研究成果

本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- ・静的加力実験の試験体の初期剛性は直線的に立ち上がり、最大荷重の70%~80%で非線形挙動を呈し、最大荷重到達後は緩やかな曲線を描きながら安定した負勾配で最大変位まで変位する。
- ・供試モデル試験体において設定した実験条件の範囲内で確認された事実として、頭貫の存在自体が試験体の剛性と復元力に大きな影響を及ぼし、頭貫の無い場合に比べて剛性と復元力はおよそ30~80%向上した。
- ・古代仕様(仕様A)の頭貫接合部のモーメント抵抗能力は接合部が開く状態の時性能が低く、接合部が閉じる状態の時性能が向上した。
- ・中央柱接合部で鎌継ぎ接合された顎付き輪雑込仕口の中・近世仕様の頭貫(仕様B)と継ぎ手のない顎付き輪雑込仕口の通し貫仕様の頭貫(仕様C)のモーメント抵抗性能はほぼ同じで仕様Aを上回ったが、仕様Cは最大荷重以降性能が低下する場合もあった。
- ・柱脚のモーメントは柱中央部の実測軸力、実測モーメント、および実測水平荷重等を用い、かつ水平方向の釣り合い式を組み合わせる半実験的に推定した。推定結果はHe & Wangの理論式を用いて検証し、概ね妥当であることが確認できた。
- ・振動台実験では大斗肘木と頭貫で構成された3本柱試験体はいずれの地震波でも50%レベルの入力で1/10rad以上変形し、倒壊と見なされた。SGの貼付け位置を柱底から柱径の2倍以上離すことで柱脚モーメントを合理的に実測できた。

参考文献:

- 1) Junxiao He, Juan Wang: Theoretical model and finite element for restoring moment at column foot during rocking, Journal of Wood Science, 64, 97-111, 2018.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 KOMATSU Kohei, KITAMORI Akihisa, NAKAGAWA Takafumi, NAKASHIMA Shoichi, ISODA Hiroshi	4. 巻 88
2. 論文標題 大斗肘木・頭貫・三本の丸柱で構成された伝統的木造架構の復元力特性と各構造要素で評価されたモーメント抵抗性能に関する実験的研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 609 ~ 620
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.88.609	査読の有無 有
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3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小松幸平、北守顕久、中川貴文、中島昌一、五十田 博
2. 発表標題 東アジアの伝統木造建築に見られる柔構造メカニズムの解明 その2- ストレインゲージによる部材応力の実測と評価結果の予備的考察
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小松幸平、北守顕久、中川貴文、中島昌一、五十田 博
2. 発表標題 東アジアの伝統木造建築に見られる柔構造メカニズムの解明 その1 柱の傾斜復元力に及ぼす頭貫の影響
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小松幸平、北守顕久、中川貴文、中島昌一、五十田 博
2. 発表標題 東アジアの伝統木造建築に見られる柔構造メカニズムの解明 その2 振動台実験による耐震性能の評価
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023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	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	小松 幸平 (Komatsu Kohei) (20283674)	京都大学・生存圏研究所・研究員 (14301)	
研究分担者	五十田 博 (Isoda Hiroshi) (40242664)	京都大学・生存圏研究所・教授 (14301)	
研究分担者	中島 昌一 (Nakashima Shoichi) (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
---------	---------