

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04352

研究課題名（和文）中国宋代遺構木造寺院建築に見られる重層組み物の耐震機構の解明

研究課題名（英文）Elucidation of the seismic mechanism of the multi-dougong structures found in wooden temples built in the Song dynasty

研究代表者

小松 幸平（KOMATSU, Kohei）

京都大学・生存圏研究所・特任教授

研究者番号：20283674

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：中国に現存する古代木造寺院建築物に見られる斗きょうを多重配置した畳斗構造と、梁と斗きょうだけで壁を構成した扶壁きょう構造に注目し、畳斗については、1層～5層のモデル試験体を用いた静的実験並びに正弦波掃引実験を行い、木質ダンパーとして期待できる高減衰性能を確認した。扶壁きょうについては、斗きょうの配置形式、数、上載荷重の大小等を変化させたモデル試験体を用いて上載荷重を加えた静的繰返し実験を行い、その復元力特性は桁と巻斗間のクーロン摩擦が主で、木ダボの剪断抵抗が若干加算されたものであると推定した。本研究で取り上げた重層斗きょうは地震動に対し木質ダンパー的な役割を担っていたのではないかと推定された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

木材と鉄そして石を利用して驚異的な木造寺院建築物を造り上げていた古代において、建築を主導していた大工頭領などの技術者は、木材がその長軸方向に対して直交する方向に力を受けた場合にその細胞構造が柔軟に変形して大きな荷重に耐えられることを良く知っていた。屋根を大きく張り出すために生み出された斗と肘木を組み合わせた斗きょう構造はこの木材組織構造の柔軟な変形特性を巧みに活用して大きな屋根荷重を各所に分散配置させ、さらにその重さを再利用して地震による横揺れを減らすダンパー的な役割も演じていたのではないだろうか。本研究の成果は以上の推論のごく一部をモデル的に確認したのものとして意義があると考えられる。

研究成果の概要（英文）：We focused on the "Jyouto" structure composed of multi-bearing blocks and bracket arms and the "Fuhekikyou" structure in which the walls were made of beams and bracket complexes, which can be seen in ancient wooden temple buildings existing in China. Static experiments and sinusoidal sweep experiments using layered model specimens were conducted for the "Jyouto" model specimens, and the high damping performance expected as the wood damper was confirmed. Regarding the "Fuhekikyou" structure, static cyclic loadings were conducted using model specimens in which the location, number of bracket complexes, and magnitude of dead load were varied, and the restoring force characteristics were estimated to be caused mainly by the Coulomb friction between the bearing block and beam with some addition of the shear resistance of the wooden dowels. It was presumed that the multi-layered bracket complex system discussed in this study played a role similar to a wood damper against seismic motion.

研究分野：木質構造科学分野

キーワード：繊維直交方向 めり込み 斗 肘木 減衰定数 上載荷重 摩擦 ダボ

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

日本の寺院建築は、中国の寺院建築を手本として発展してきたので、両者に共通した技法は数多く見受けられるが、日本では殆ど知られていない技法が中国の築 1000 年近い現存する伝統木造建築において幾つか見受けられる場合がある。

その一つは、「疊斗:じょうと」と呼ばれる技法で、斗(ます)を何重にも「疊み込んで」屋根を支える技法を言う。図1は中国潮州市に現存する開元寺天王殿(築 979 年、1980 年に大改修)の「明間」に使われている「疊斗」で、石柱の上部が、最大 12 層の「疊斗」で構成されており、このような構造形式は中国でも他に例を見ない珍しい技法である^{1),2)}。もう一つの例としては、斗きょう(ときょう=組み物)を横架材の間に何重にも積重ねて壁体空間を構成する「扶壁きょう:ふへききょう」と呼ばれる技法で、図 2 に示す例は寧波市保国寺大殿(築 1007 年)の例で、この技法は唐代に開発された技法ではないかと言われている³⁾。

本研究課題で取り上げる 2 例は、いずれも水平力を受けると、斗が角度変化を起し水平部材(肘木等)と接触して左右交互に局所的なめり込み変形を繰り返し受ける事が想像される。既往の研究から、局所めり込み変形は木造建築に脆性破壊を伴わない良好な大変形機能を付与することが知られており、これら 2 種類の構造要素はめり込み変形による良好な大変形機能を多数の箇所分散配置した一種の「木質ダンパー」とも解釈でき、これらの構造的な性能発現機構を実験的・解析的に明らかにすることによって、現在の木造建築の耐震性能向上にも応用できる重要なヒントが得られる可能性が高い。

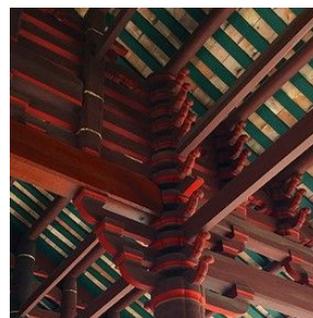


図 1 開元寺天王殿の疊斗



図 2 保国寺大殿の扶壁きょう

2. 研究の目的

「疊斗」の場合は、斗の積層数と上載荷重の大きさを実験変数として、動的実験や静的実験を実施して、実験変数と減衰定数、固有振動数等の耐震性能に關係する能力との關係を明らかにし、それらの結果を活用して「疊斗」を有する構造の耐震機能を明らかにすることが目的である。

一方、「扶壁きょう」の場合は、寧波保国寺大殿の事例をスケールダウンした扶壁きょう試験体を作成し、斗きょうの垂直方向積層数および水平方向設置数、上載荷重の大きさ等を実験変数として静的正負繰り返し水平加力実験を行い、積層斗きょうで構成された壁の変形機構の解明を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 「疊斗」の場合

重層斗きょうの層数の影響を明らかにするために、最も単純な大斗肘木から成る斗きょうを 1 層～ 5 層まで変化させたモデル試験体を作成し、250kg の錘を載せた小型起震機実験と、2 種類の上載荷重 (5kN、10kN) を載荷した静的正負繰り返し加力実験の 2 種類を実施した(図 3)。



a)起震機実験 b)静的正負繰り返し加力実験

図 3 疊斗の実験法

(2) 「扶壁きょう」の場合

扶壁きょう壁の水平せん断性能発現機構の解明を目的に、木製横架材の間に斗きょうを配した壁構造の両側を実際の構造のような木製柱で結合せず、溝形鋼製柱の長孔ピン接合とした試験体を作成し、可能な限り重層斗きょう構造だけの純粋なせん断変形性能を抽出できるように留意して、一定上載荷重を与えた静的正負繰り返し加力実験を実施した(図 4)



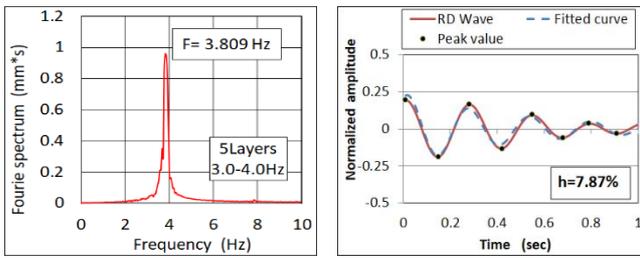
上載荷重載荷用可動式オイルジャッキのセッティング。ローラー滑り台で滑らかに横移動可能。

図 4 扶壁きょうモデル試験体の実験法

4. 研究成果

(1) 「畳斗」の場合^{4),5),6)}

小型起震機実験のデータから、各試験体の固有振動数(f)と減衰係数(h)を評価した。固有振動数(f)は、フーリエスペクトル解析法を適用したが、実際の評価には鎌田輝夫博士が作成・提供されたプログラム SPCANA-Ver4.92 を使用した。減衰係数(h)の同定には、ランダムデクレメント(RD)法を適用したが、実際の評価には脇田健裕博士が作成・提供された「ランダム応答同定プログラム」を使用した。図5に固有振動数(f)と減衰係数(h)の評価結果の一例を示す。図6は、等価剛性(K)、固有振動数(f)、減衰係数(h)と各試験体における斗きょうの積層数の関係を示す。フーリエスペクトル解析法とランダムデクレメント(RD)法の両方で評価された固有振動数(f)はいずれもほぼ同じ値が得られたため、これらの値の信頼性は高いと考えられた。等価剛性(K)は、重層斗きょうの層数が減少するにつれて徐々に増加する傾向を示したが、この傾向は積層構造の原則から判断すると妥当であると思われた。図7に斗きょうの積層数が更に増加した場合の減衰係数(h)の増加を線形予測した結果を示す。積層数の増加に伴って減衰係数(h)は14%を超える可能性を示した。勿論、安易な予想は避けるべきであるが、重層ときょうの木質ダンパーとしての一つの可能性が示唆された。



フーリスぺクトル解析 ランダムデクレメント(RD)法
図5 固有振動数(f)と減衰係数(h)の評価結果の一例

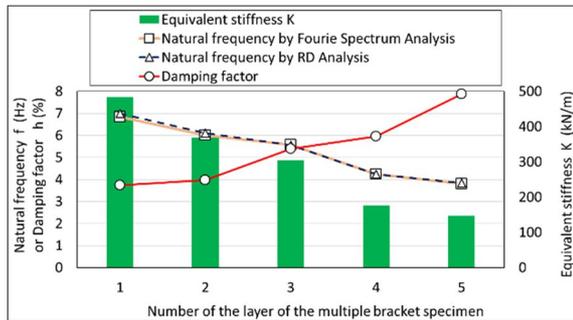


図6 固有振動数、減衰係数、等価剛性と積層数の関係

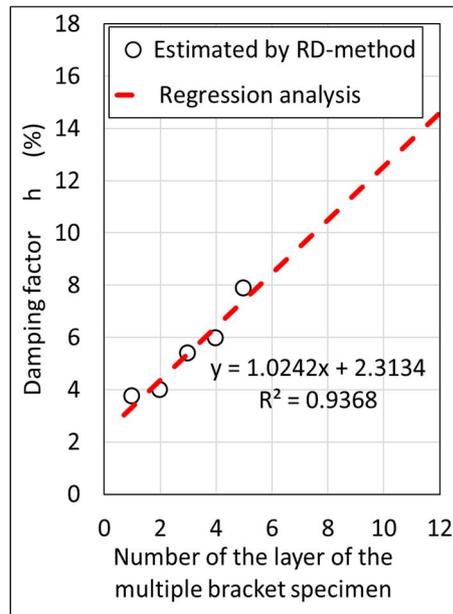


図7 斗きょうの積層数が増加した場合の減衰係数(h)の増加予想

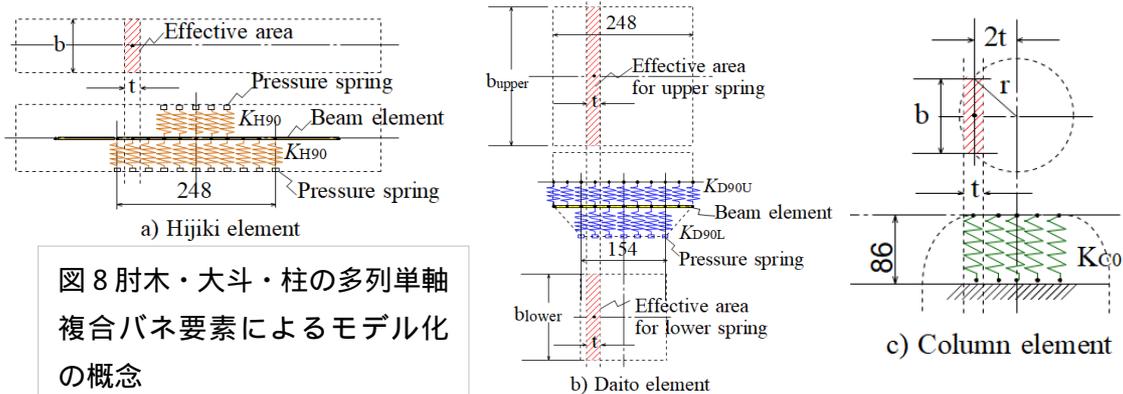


図8 肘木・大斗・柱の多列単軸複合バネ要素によるモデル化の概念

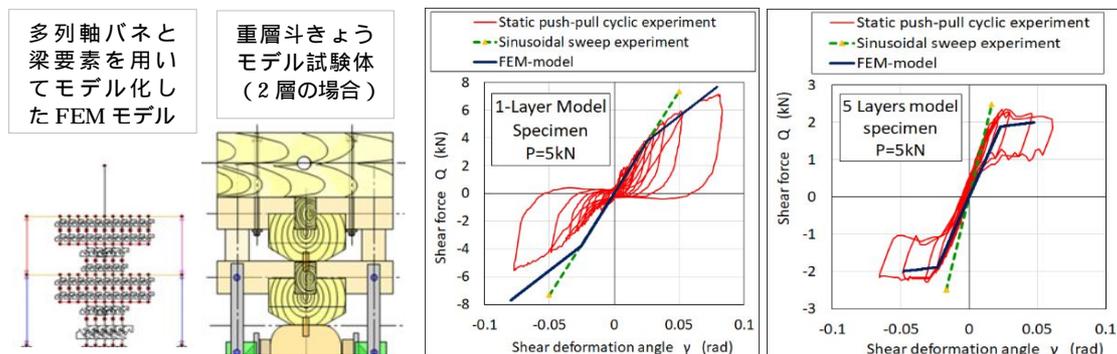


図9 多列軸バネと梁要素を用いFEMモデルと重層斗きょう試験体との対応関係並びにFEM数値計算結果と実験結果の対応関係例

これまで伝統木造建築の挙動を数値解析で推定する場合は、斗きょうや柱-貫接合部の回転モーメント (M) と回転角 (θ) の関係の一つの巨視的な回転バネでモデル化し、実験で得られた M - θ 関係を用いて数値計算を行う手法が多かった。しかしこの方法では本研究で扱うような緩やかな固定度の斗きょう構造をうまくモデル化することが困難であることが研究を進めるうちに明らかとなったため、本研究では図8に概念を示すように、肘木、斗を梁要素と仮定し、接触する部分についてはめり込みに抵抗する多列の単軸バネを設定した。その際2部材が接触する節点には圧縮力のみを伝達できる「感圧バネ」を直列接続した。このような多列の圧縮バネを用いて斗きょうをモデル化することによって、上載荷重によって緩やかに固定される斗きょう構造を比較的正確にモデル化できた。また材料の繊維直交方向に関する圧縮実験を実施することで、最も基本的な材料常数を用いて様々な斗きょう形態にも適用できるモデルを構成することが出来ると考えた。図9に重層斗きょう試験体と多列軸バネと梁要素を用いてモデル化したFEMモデルとの対応関係ならびに計算結果と実験結果の比較例を示す。先に実施した正弦波掃引振動実験で求めた初期剛性はFEM解析の結果と良く一致した。また静的正負繰り返し加力実験の結果は概ねFEM解析結果と一致したが、必ずしも全て良好な予測ができたとは言えなかった。なお、本成果報告書作成時点において、重層斗きょうの履歴変形モデルは未完成であり、実際の寺院架構を対象とした時刻歴応答解析等は次の段階の研究課題として残っている。

(2)「扶壁きょう」の場合⁷⁾

本課題では、斗きょうの垂直方向積層数(layer)および水平方向設置数(column)を変化させた図10に示す4種類の試験体を作成した。柱に見立てた軽量溝型鋼2本を2.928mのスペンで反力フレーム下部にピン接合し、3本の桁を所定の位置で水平抵抗が起きないように長穴支点でボルト支持し、桁間の所定の位置に平三斗を配置した。

大斗尻と桁上面間は直径26mm、長さ100mmの白樫木ダボで固定したが、巻斗と桁下面の間には伝統木造建築における施工上の慣習に従って、木ダボ固定は行っていない。

正負交番水平荷重は最上桁の重心位置に与え、一定上載荷重はジャッキ全体がスムーズに水平移動できるローラーを介して与えた。実験パラメータは平三斗の配置を2層2列(2L2C-model)、2層1列(2L1C-model)、1層2列(1L2C-model)、1層1列(1L1C-model)の4種類とし、上載荷重は $P=15\text{ kN}$ と $P=30\text{ kN}$ の2段階とした。

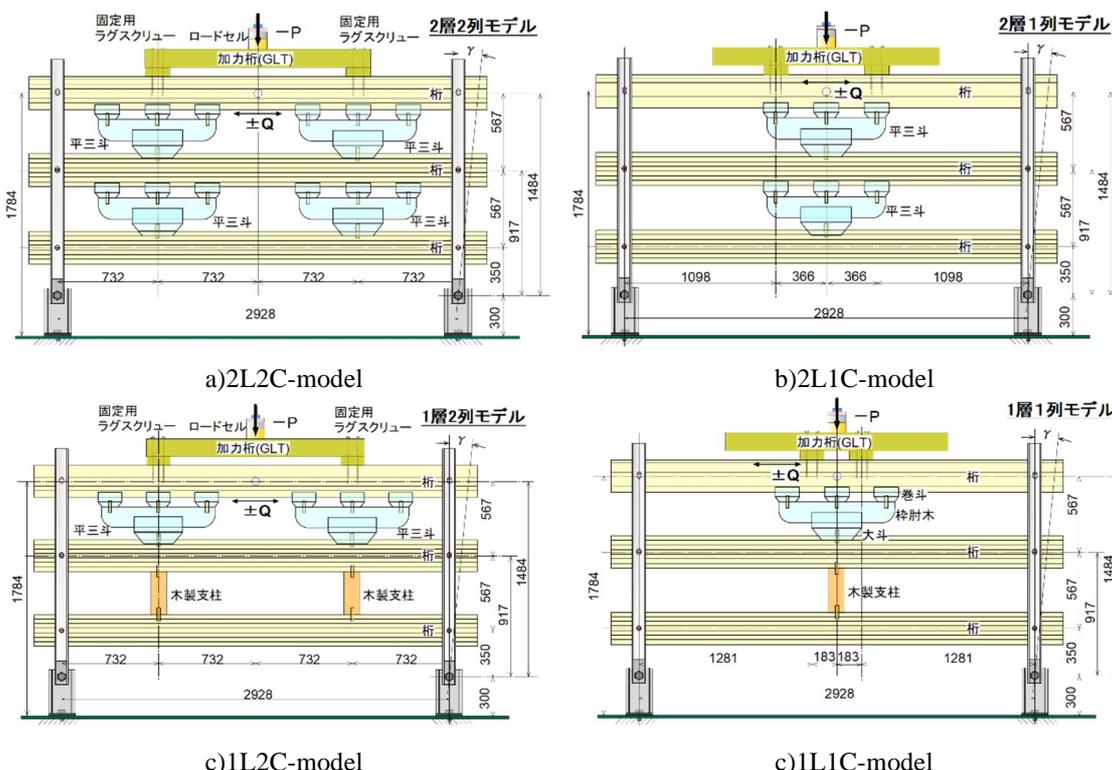


図10 扶壁きょうを模した4種類のモデル多層斗きょう試験体

図11に各試験体のせん断力 (Q) - せん断変形角 (γ) の関係と等価減衰定数 heq の評価値を示す。図11から、モデル多層斗きょう試験体の復元力特性は、桁と巻斗間のクーロン摩擦による矩形履歴特性が主で、桁と大斗尻に打ち込んだ木ダボのせん断抵抗(バイリニア曲線を呈する)が少し加算されたものと推定された。

当初予想した大斗や巻斗の回転めり込み抵抗は殆ど測定されなかった。大斗や巻斗の回転めり込み抵抗によるエネルギー消費は起らなかったが、桁-巻斗間で木材同士の摩擦抵抗を受けながら非常に粘り強いすべり変形が観察された。

図 11 右側第 2 縦軸の表示に注目すると、桁-巻斗間の本格的な迂り発生後の heq は 30~55% という高い値を示しており、扶壁きょうをモデル化した試験体のこのような高い減衰性能とクーロン摩擦による矩形ループに木ダボのバイリニアール曲線が重なって生み出される特異な復元力特性を見ると、古代木造寺院建築における扶壁きょうは、一種の摩擦ダンパーとしての役割を演じていたのではないかと推察された。なお、試験体のせん断抵抗能力は、斗きょうの列数を増加させることで向上するが、上載荷重も分散されるので、摩擦抵抗の増加は単純な比例的増加にはならない事が確認された。

実際の古代木造寺院建築においては、柱と横架材間の柄接合による半剛節回転モーメントによるせん断抵抗も加わるので、扶壁きょうを有する古代木造寺院建築は予想以上に高い耐震性能を有していたのではないかと想像される。

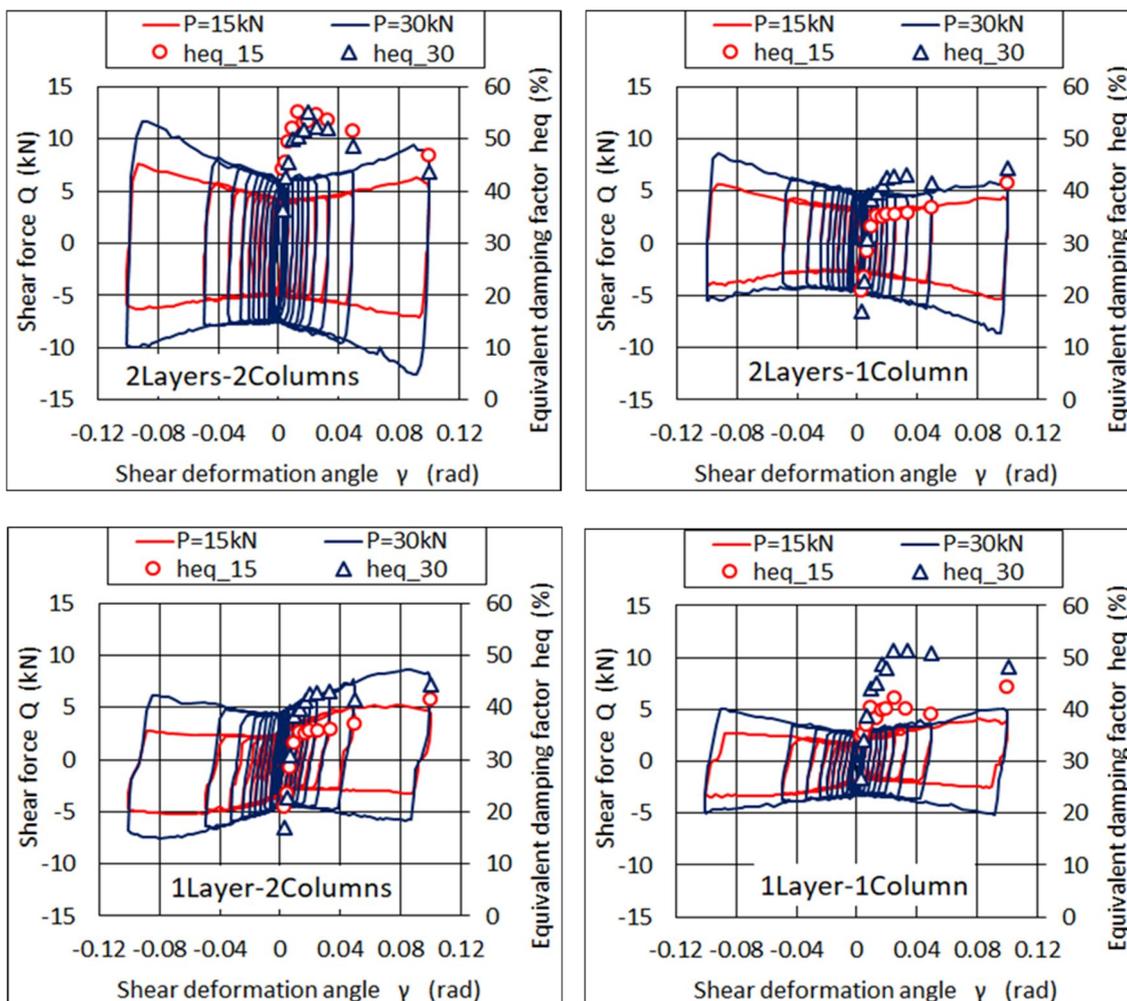


図 11 各試験体のせん断力 (Q) - せん断変形角 (γ) の関係と等価減衰定数 heq の評価値

引用参考文献

- 1) 呉国智：開元寺天王殿建筑構造（1）、古建筑と庭園技術、3(16)、pp.41-47、1987。（中国語）
- 2) 李哲陽：潮州開元寺天王殿大型木造架構造特性分析-1、四川建築科学研究、第 36 卷、第 1 号、pp.182-184、2010（中国語）
- 3) 林浩：保国寺古法保存探源、中国名城、No.3、pp.48-54、2009。（中国語）
- 4) 小松幸平、北守顕久：重層斗きょうの力学的挙動に関する研究、第 72 回日本木材学会大会発表要旨集、H16-04-1430、2022.
- 5) Kohei Komatsu: Study on the Mechanical Performance of the Multi-Layered Bracket-Complex, Proceedings of the World Conference on Timber Engineering OSLO 2023. 2023.
- 6) 小松幸平：重層斗きょうの力学的挙動に関する研究 その 2 - めりこみを多列単軸複合バネで置換した力学モデルによる数値解析、日本建築学会近畿支部研究報告集、発表番号 2042、6 月、2024.
- 7) 小松幸平、北守顕久：扶壁きょうを模したモデル試験体の力学的性能に関する研究、第 73 回日本木材学会大会発表要旨集、H14-15-1700、2023.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 小松幸平、北守顕久
2. 発表標題 扶壁きょうを模したモデル試験体の力学的性能に関する研究
3. 学会等名 第73回日本木材学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kohei Komatsu
2. 発表標題 Study on the Mechanical Performance of Multi-Layered Bracket Complex
3. 学会等名 World Conference on Timber Engineering Oslo 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小松幸平、北守顕久
2. 発表標題 重層斗きょうの力学的挙動に関する研究
3. 学会等名 第72回日本木材学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小松幸平
2. 発表標題 重層斗きょうの力学的挙動に関する研究 その2 - めりこみを多列単軸複合パネで置換した力学モデルによる数値解析
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部
4. 発表年 2024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)	

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
---------	---------