

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H03047

研究課題名（和文）木造の中大規模化のために巨大化する実験に対応する縮小モデル実験の可能性

研究課題名（英文）Study on Scale Effect of Miniaturization for Structural Test Specimen

研究代表者

田中 圭（TANAKA, Kei）

大分大学・理工学部・准教授

研究者番号：00325698

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、実大スケール及び縮小スケールの試験体を製作、材料試験、構造上重要な構成要素である基本的な接合部の要素試験を実施し、材料異方性や寸法効果の影響を実験的に検証することを目的とし、実大、1/2、1/3の集成材をJASに基づいて製作し、それを用いた逆対称せん断試験及びJIS椅子型せん断試験を行い、せん断性能について検討を行った。また、鋼板挿入ドリフトピン接合の単位試験体、実大および1/3縮小スケールの試験体を用いた柱-梁モーメント抵抗接合部の縮小化についての構造特性への影響を検証するため、鋼板挿入ドリフトピン接合部及びGIR接合部を対象とし、寸法効果の検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、現在急速に進んでいる木造建築の大型化や高層化に対して必要な新しい技術開発とその構造性能や安全性の検証において、他構造と同様の縮小モデル実験を効率的に実施し、その成果を実際の建物の設計に反映させるために不可欠なものである。また、現在実施されている縮小モデルによる構造検証に対して、その危険性や留意点について警鐘を鳴らすとともに、安全な活用に向けた一案を提示するものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, full-scale, 1/2, and 1/3 laminated lumber was manufactured based on JAS. Material and basic joints tests which are important structural elements, were carried out to conducted on the effects of material anisotropy and dimensional effects. For the purpose of practical verification, and reverse symmetrical shear test and a JIS chair-type shear test were performed using their, and the shear performance was evaluated. In addition, in order to verify the structural characteristics of the column-to-beam moment resistance joint using specimens of steel plate-inserted drift-pin joints, and GIR joint with full-scale and 1/3 scale, the size effect was investigated.

研究分野：建築構造学

キーワード：構造実験 縮小試験体 せん断強度 ドリフトピン接合 GIR接合 モーメント抵抗接合 寸法効果

1. 研究開始当初の背景

2010年10月の「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」の施行などを背景に、木質構造の中層大規模化や、鋼構造や鉄筋コンクリート構造とのハイブリッド構造化により、中大規模木造建築物の構法、構造設計法の一般化が求められており、これらの建築物の安全性を担保するためには、構造性能の確認は欠かせない。しかし、このような大型構造物を対象とした構造実験は装置や試験体の大型化、それに伴うコスト面の問題から他構造では縮小モデル試験体を用いるのが一般的である。そのため、縮小モデル試験体を用いた実験による構造性能確認とそのデータの実大スケールへの割り戻しが高精度かつ安全側に行えることが不可欠である。

木質材料分野において、JISに規定された無欠点小試験片による材料特性と実大製材や集成材の材料特性の関係については、比較的多くの研究が行われているが、節を含んだ材料特性についての縮小モデル実験については十分な実験データが得られていない。理由として、木材には力学的特性に強い異方性があり、それに加えて節などの欠点の影響から寸法効果が大きく、不確定要素が多いことも大きく挙げられる。

2. 研究の目的

本研究では、実大スケール及び縮小スケールの試験体を製作、材料試験、構造上重要な構成要素である基本的な接合部の要素試験を実施し、材料異方性や寸法効果の影響を実験的に検証することを目的とし、実大、1/2、1/3の集成材をJASに基づいて製作し、それを用いた逆対称せん断試験及びJIS椅子型せん断試験を行い、せん断性能について検討を行った。また、鋼板挿入ドリフトピン接合の単位試験体、実大および1/3縮小スケールの試験体を用いた柱・梁モーメント抵抗接合部の縮小化についての構造特性への影響を検証するため、鋼板挿入ドリフトピン接合部及びGIR接合部を対象とし、寸法効果の検討を行った。

3. 研究の方法

(1) 各スケールの集成材の試作

JASに準拠し、対称異等級構成集成材E65-F225相当の試験体を製作した。縮尺は実大スケール、1/2縮小スケール、1/3縮小スケールの3通りとした。1/3縮小スケールについてはラミナ厚を1/3に加工し積層数を実大スケールと同様とした試験体(以下、1/3縮小スケール試験体とする)とラミナ厚は実大スケールと同様とし積層数を調整した試験体(以下、7層1/3縮小スケール試験体とする)の2種類を製作した。実大スケールと1/3縮小スケールの試験体についてはラミナごとの個体差の影響を小さくするため、同一のラミナを3:1に切り分け、ラミナ配置が同一となるように加工を行った(図1参照)。また、JASでは各層におけるラミナのヤング係数の下限値のみ定められており、上限値については示されていない。そのため、各試験体の特性値が大きく乖離するのを防ぐ目的で入手したラミナの分布を考慮し、各層に特定の等級のラミナが配置されるように構成した(図2参照)。

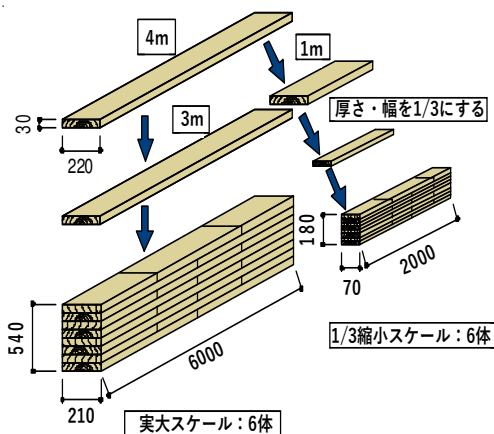


図1 試験用集成材製作工程のイメージ

(2) 逆対称4点曲げ試験での検証

図2に試験体の断面形状及び寸法を示す。試験には前節で製作した構造用集成材を使用した。強度等級は対称異等級E65-F225相当で、接着剤にはレゾルシノール・フェノール樹脂接着剤(オーシカ、主剤:D-4320、硬化剤:DL-940)を用いている。なお、各試験体でフィンガージョイント位置が一致するように加工を行っている。

図3に実大試験における加力装置の一部を示す。加力は、実大試験及び1/2縮小スケール試験に1000kN木材実大強度試験機(島津製作所、UH-1000kNAR)、1/3縮小スケール試験には2000kN万能試験機(島津製作所、UH-2000kNC)を用いた。加力方法は構造用木材の

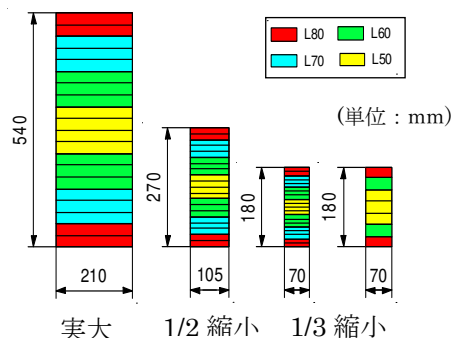


図2 試験体の断面形状及び寸法

強度試験マニュアルに準拠し、逆対称4点荷重法とし、最大耐力の80%に荷重が低下するまで加力を行った。加力速度は実大試験 3.0mm/min、1/2 縮小スケール試験 1.5mm/min、1/3 縮小スケール試験 1.0mm/minとした。支持点は一端をピン支持、他端をピンローラー支持とした。変位はストレインゲージ式変位計を用いて試験体中央及び加力点の下端、支持点の上端において計測した。なお、加力点及び支持点においてめり込み破壊が先行するのを防ぐため、溝形鋼を組み合わせた鞍形の治具で試験体をはさみ、両面を構造用ビスで固定した。

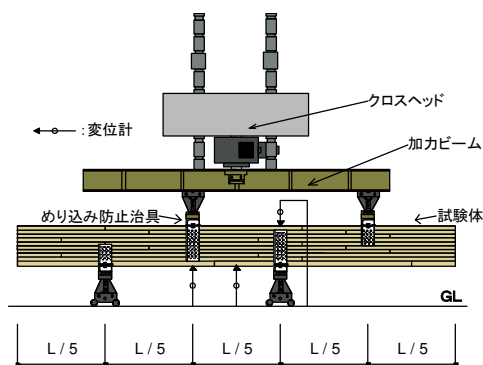


図3 加力装置

(3) 鋼板挿入ドリフトピン接合部での検証

図4に採材箇所およびDP位置を示す。前節のせん断試験で用いた試験体の損傷が少ない箇所を選択し、試験体を切り出した。『木質構造設計規準・同解説』のDP配置等の条件より、DP打ち込み箇所は最低寸法である端距離7d、縁距離4dとした。試験体の縮尺は実大スケール、1/2 縮小スケール、1/3 縮小スケールの3通りとした。1/3 縮小スケールについてはラミナ厚を1/3に加工し積層数を実大スケールと同様とした試験体(以下、1/3 縮小スケール試験体)とラミナ厚は実大スケールと同様とし積層数を調整した試験体(以下、7層1/3 縮小スケール試験体)を用いているため、最外層のみラミナ厚さが22.5mmである。試験体形状、DP長さ、DP直径、鋼板厚の縮尺を実大スケールに対し、1/2 縮小スケール、1/3 縮小スケールはそれぞれ1/2、1/3とし、DPおよび挿入鋼板の材質はSS400とした。

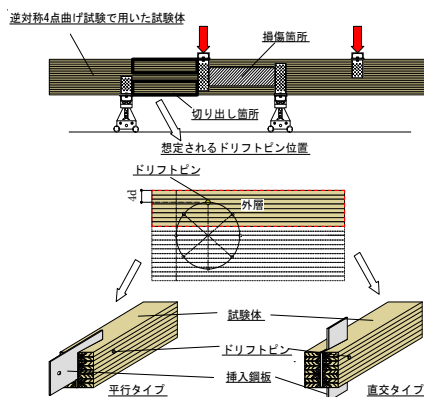


図4 採材箇所およびドリフトピン位置

図5に加力装置の模式図を示す。

加力方向が繊維平行方向の試験体(以下、平行加力)は木材の繊維方向に対し引張負荷を、繊維直交方向の試験体(以下、直交加力)は中央載荷方式の曲げ加力とした。直交加力についてDP接合部側の支点反力を測定するため、ロードセルを設置した。また、変位は一对のストレインゲージ式変位計を用いてDP付近の木材と挿入鋼板の相対変位を計測した。

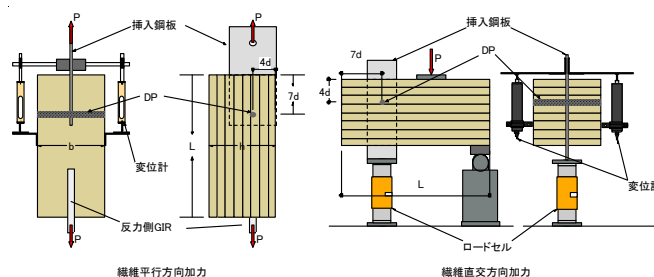
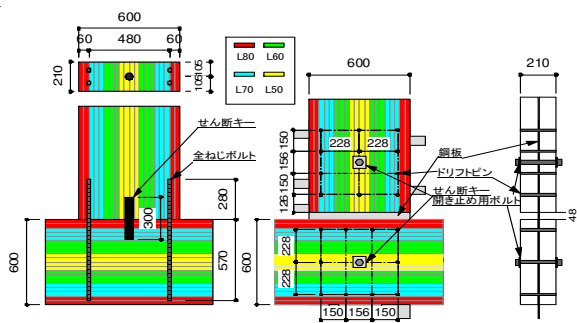


図5 加力装置(左:平行加力、右:直交加力)

(4) 柱-梁接合部のモーメント抵抗試験による検証

図6に接合部詳細図、写真1に試験体スケールの比較を示す。実大スケールは、3~4階建ての中層木造ラーメン構造を想定した建物1)の柱-梁接合部とし、試験体の縮尺は実大スケールと1/3縮小スケールの2通りとした。試験に用いた母材は、実大試験体ではJASの対称異等級構成集成材:強度等級E65-F225相当とし、柱、梁ともに断面210mm×600mmとし、1/3縮小スケールは、試験体断面70mm×200mmとした。用いたラミナ厚さは実大30mmに対して1/3スケールは10mmとし、それぞれJASの節径比の条件をもとに節を除去し、ラミナの構成も全く同じとなるように積層接着した。



GIR 鋼板挿入ドリフトピン
図6 接合部詳細(実大スケール)

GIR試験体について、実大スケールでは、接合金物(M24×850)、接合金物の埋め込み深さは繊維平行方向280mm、繊維直交方向570mm、せん断金物(Φ48×300)とした。一方、1/3スケールでは接合金物(M8×283)、接合金物の埋め込み深さは繊維平行方向93mm、繊維直交方向190mm、せん断金物(Φ8×100)とした。

ドリフトピンを用いた試験体 (DP) について、『木質構造設計規準・同解説』の DP 配置基準より、端距離 7d、縁距離 4d とし、DP 相互間隔は 7d 以上満足するように DP の配置を決定した。実大スケールは、DP 長さ 210mm、DP 直径はφ18、鋼板厚 t=9、せん断キールおよび開き止め用ボルトは M24 とし、1/3 縮小スケールは、DP 長さ 70mm、DP 直径φ6、鋼板厚 t=3、せん断キールおよび開き止め用ボルト M8 とした。すべての構成要素で実大スケールに対し 1/3 となるようなディテールとした。



写真1 試験体のスケール比較
(左: GIR 右: DP)

4. 研究成果

(1) 逆対称4点曲げ試験での検証

JAS の寸法調整係数により適切な補正ができなかったことから、イス型せん断試験および3点曲げ試験のせん断性能について最弱リンク理論を用いて、最大せん断応力度とせん断面積との関係式を導いた手法について比較、検討を行った。一般的に曲げ方式のせん断試験では加力方向に対して平行な面の断面積をせん断面積として評価を行うが、この手法では、せん断区間の水平断面積である試験体の幅×せん断スパンの長さ(以下、せん断破壊面積とする)を採用している(図7参照)。

図8にせん断破壊面積と最大せん断応力度の関係を示す。また、図中の曲線は逆対称4点曲げ試験の実験値における最小二乗法による累乗近似である。累乗近似の指数で表される寸法効果パラメータは 0.084 となりせん断破壊面積を基準とした方法で導かれた 0.082 と同等の値を示し、実験値の平均値をプロットすると近似曲線と比較的よく一致した。しかし、この試験での試験体の非破壊箇所を用いて実施した内層ラミナにおけるイス型せん断試験の実験値との比較を行うと一部の試験体を除き、近似曲線と比べ大きく低い値を示した。これは、イス型せん断試験と逆対称4点曲げ試験において最大せん断応力度の算出に用いるせん断面積が異なることが影響していると考えた。そこで、逆対称4点曲げ試験においてもイス型せん断試験と同様にせん断破壊面積を用いて最大せん断応力度(以下、せん断破壊応力度とする)を算出した。図9にせん断破壊面積とせん断破壊応力度の関係を示す。図中の曲線は逆対称4点曲げ試験の縮小スケール試験体及びイス型せん断試験における実験値の累乗近似を示す。近似曲線と実大スケールの試験体における実験値を比較すると実験値における下限値と比較的よく一致し、縮小試験の結果から実大スケールへの割戻しをすることができた。しかし、せん断破壊面積は試験方法により採用する面積が異なるため、接合部を含む試験体など試験体の形状や載荷方法が複雑になると適切な面積をどことするのか判断が困難になることが想定される。

(2) 鋼板挿入ドリフトピン接合部での検証

実験から求められた降伏耐力、最大耐力を支圧面積である DP の投影面積 ($d \times \ell$) で除して基準化し、試験体のスケールの違いが及ぼす影響について検討を行った。

横軸に $d \times \ell$ 、縦軸に降伏耐力/ $(d \times \ell)$ を図10に示す。内層試験体について、実大スケールと縮小スケールの試験体を比較すると、実大スケールに対し 1/2 縮小スケールは 11% 高い値を示

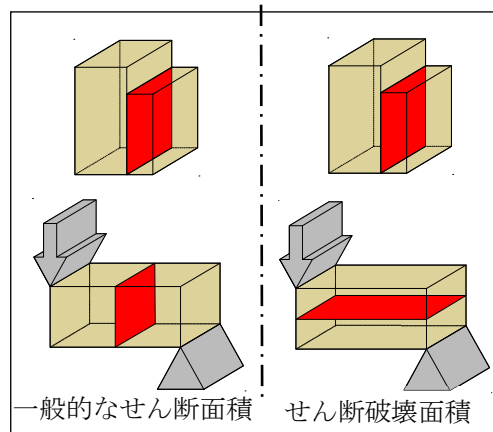


図7 せん断破壊面積の概要

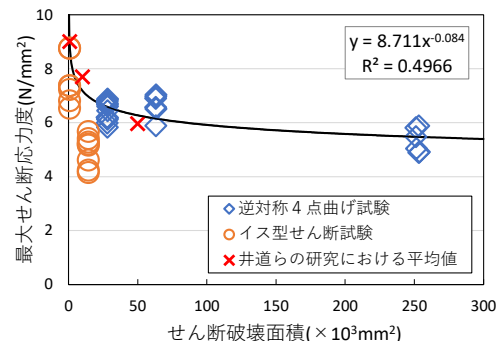


図8 せん断破壊面積とせん断強度の関係

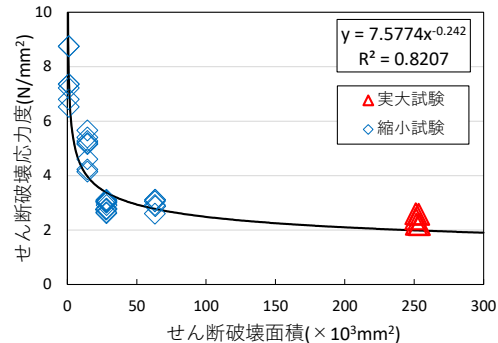


図9 せん断破壊面積とせん断破壊応力との関係

し、1/3 縮小スケールは実大スケールと同様の値を示した。外層試験体については、実大スケールに対し1/2 縮小スケール、1/3 縮小スケールは同様の値を示し、スケールの違いが及ぼす影響は確認されなかった。

横軸に $d \times \ell$ 、縦軸に最大耐力/ $(d \times \ell)$ を図 11 に示す。内層試験体について、実大スケールと縮小スケールの試験体を比較すると、実大スケールに対し1/2 縮小スケールは19%高い値を示し、1/3 縮小スケールは24%高い値を示した。外層試験体については、実大スケールに対し1/2 縮小スケールは6%高い値を示し、1/3 縮小スケールは20%高い値を示した。内層試験体、外層試験体ともに寸法が小さくなるに伴って最大耐力/ $(d \times \ell)$ が高くなる傾向を示し、寸法効果の影響が確認された。寸法が及ぼす影響として平行加力、直交加力共に最大耐力に関して寸法効果が確認された。縮小スケールから実大スケールへ割り戻しを行う際には寸法の比率で行うと過大評価となるため寸法効果の影響を考慮する必要があると考える。

(3) 柱-梁接合部のモーメント抵抗試験による検証

写真 2、3 に破壊性状を示す。破壊性状は、GIR、DP ともに実大スケールと 1/3 スケールで全く同じであった。

図 12 に終局耐力を断面係数 Z で基準化した値と材せいの関係を示す。また、JAS に定められている曲げ強度と材せいの関係も併せて示す。耐力が寸法効果なく、寸法比のみで決まるのであれば、同じ値となると考えられるが、断面性能で基準化した終局耐力は DP 接合で実大スケールに対し1/3 縮小スケールは1.5 倍、GIR 接合は1.7 倍の値となった。また、JAS の曲げ強度における寸法効果係数と比較すると約4 倍の値となった。

図 13 に曲げ耐力を曲げ耐力の推定値で規準化した値と断面係数 Z の関係を示す。DP 接合の終局耐力と推定値の比は、実大スケールは1.2 倍、縮小スケールは1.8 倍の値を示した。GIR 接合の終局耐力と推定値の比は、実大スケールは0.8 倍、縮小スケールは1.2 倍となった。寸法効果係数はどちらの接合でも0.1 程度となり、JAS の曲げ強度の寸法効果パラメータ 0.11 と同等の値となった。

しかし、現在パラメータが実大スケールと1/3 縮小スケールの2 つのため、1/2 縮小スケールなど新たなパラメータのデータの蓄積を行い、寸法効果の適用について検討し、精度を高めていく必要があると考える。



写真 2 GIR 試験体の破壊性状
(左: 実大 右: 1/3)

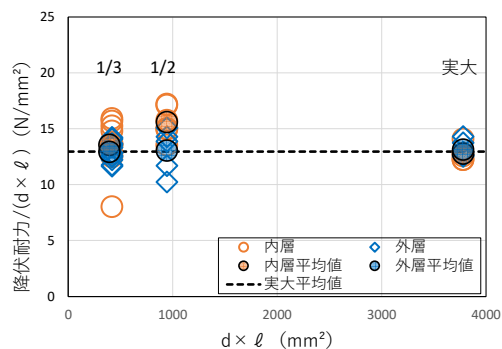


図 10 $d \times \ell$ と降伏耐力/ $(d \times \ell)$ の関係

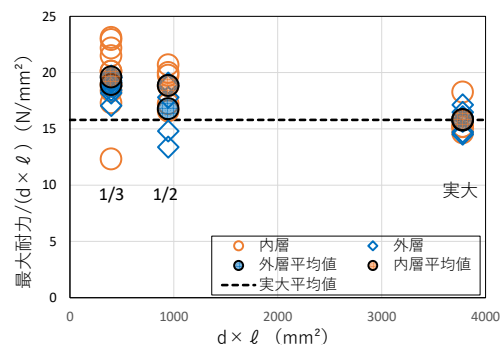


図 11 $d \times \ell$ と最大耐力/ $(d \times \ell)$ の関係

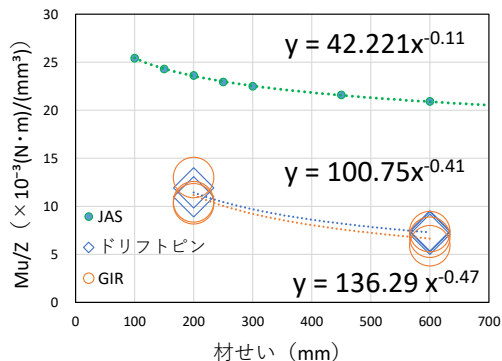


図 12 M_u を Z で基準化した値と材せいの関係

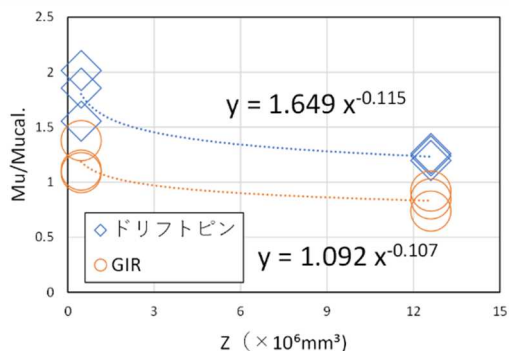


図 13 曲げ耐力を曲げ耐力の推定値で規準化した値と断面係数 Z の関係



写真 3 DP 試験体の破壊性状
(左: 実大 右: 1/3)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔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 片田舜也、廣石太郎、森達登、田中圭、森拓郎
2. 発表標題 木質構造の大規模化に伴う構造実験に用いる試験体の縮小化の影響 その1：試験体製作概要
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 廣石太郎、片田舜也、森達登、田中圭、森拓郎
2. 発表標題 木質構造の大規模化に伴う構造実験に用いる試験体の縮小化の影響 その2：逆対称4点曲げ試験による検討
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山形海斗、井上 涼、森 拓郎、片田舜也、廣石太郎、森 達登、田中 圭
2. 発表標題 木質構造の大規模化に伴う構造実験に用いる試験体の縮小化の影響 その3：椅子型せん断実験による検討
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 廣石太郎、片田舜也、森 達登、山形海斗、田中 圭、森 拓郎
2. 発表標題 大規模化が進む木質構造の構造実験に用いる試験体の縮小化による影響（その1）試験体製作概要及びせん断性能についての検討
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 片田舜也、廣石太郎、森 達登、田中 圭、森 拓郎
2. 発表標題 大規模化が進む木質構造の構造実験に用いる試験体の縮小化による影響（その2）繊維平行方向加力を受ける鋼板挿入ドリフトピン接合部の引張性能
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究報告
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 廣石 太郎、片田 舜也、森 達登、山形 海斗、田中 圭、森 拓郎
2. 発表標題 木質構造の大規模化に伴う構造実験に用いる試験体の縮小化の影響 その4：せん断性能に対する寸法効果の検討
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 片田 舜也、廣石 太郎、森 達登、田中 圭、森 拓郎
2. 発表標題 木質構造の大規模化に伴う構造実験に用いる試験体の縮小化の影響 その5：鋼板挿入ドリフトピン接合部の静的加力試験
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中圭、藤田健司、片田舜也、山形海斗、森拓郎、山本幸雄
2. 発表標題 木質構造の大規模化に伴う構造実験に用いる試験体縮小の影響 モーメント抵抗接合部の場合の検討
3. 学会等名 第73回日本木材学会大会
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	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)	

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