

令和 5 年 4 月 22 日現在

機関番号：82113

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02305

研究課題名（和文）中高層木質構造物における高軸力を受ける柱脚接合部の汎用設計法の提案

研究課題名（英文）Proposal of general design method of column base connections subjected to large axial force for mid-to-high-rise wooden buildings

研究代表者

山崎 義弘（Yamazaki, Yoshihiro）

国立研究開発法人建築研究所・材料研究グループ・主任研究員

研究者番号：70644425

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、木材の繊維方向圧縮における評価の課題を解決するとともに、中高層化により増大する軸力と同時に曲げモーメントを受ける柱脚接合部の汎用設計法を提案する。

集成材およびCLTを対象に、木口面に支圧応力と同時に発生するせん断応力の大きさをパラメータとした実験を行い、せん断応力が大きいと支圧強度がやや低下することを確認した。引きボルト式接合部の座彫部では、圧縮強度の80～90%以上の圧縮応力を事前に経験すると、その後の引張強度が低下することを確認した。繰り返し変動軸力と曲げモーメントを受ける引きボルト式柱脚接合部の実大実験を行い、保証設計に必要な材料強度の安全率を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

木口面における支圧とせん断の複合応力の影響が明らかとなり、木口面の支圧に期待した柱脚接合部においては、せん断力の処理を木口の摩擦に期待することなく、別途シアキーを適切に設けることの必要性が示された。

圧縮強度の80～90%以上の圧縮応力を事前に経験すると、その後の引張強度が明確に低下する現象について、木材の基準強度は信頼水準75%の5%下限値で規定されているため、設計で基準強度以下とすれば実強度の80%ほどには達しないと考えられるが、保証設計で必要となる材料強度の安全率を設定するには有用なデータが得られた。

研究成果の概要（英文）：In this research, technical issues on evaluation of compression of wood perpendicular to the grain are resolved while seismic design method for column bottom joint subjected to large axial force and bending moment for mid- to high-rise wood buildings is proposed. Experiments of glulam and CLT subjected to partial compression as well as shear on the butt end were conducted. The compression strength got smaller when the associated shear stress was large. In tensile bolted glulam joint with rectangular notched hole, the tensile strength was decrease when 80 to 90 % of compression strength had been applied. Full-scale tests for tensile bolted glulam column bottom joint were conducted, and we confirmed that the above findings were applicable to real situation.

研究分野：木質構造

キーワード：集成材 CLT 木口 支圧 引きボルト式接合 複合応力

1. 研究開始当初の背景

地球環境問題対策の最重要テーマである CO₂ 削減に対し、建築分野での木材利用による炭素固定化が期待されている。そしてこの動きを加速するには、これまで木造が採用されなかった中高層建築物への木材利用が一つの鍵となる。中高層木造建築物の実現にあたり、現状では主に耐震および耐火の両面での課題解決が重要であるが、本研究はこのうち耐震に関する技術資料を提供する。CO₂ 削減に貢献するため、豊富な国産材を利用する前提においては、木材自体の材料強度を極端に増加させることは不可能であり、この点で材料強度をコントロールし易い鉄骨造や鉄筋コンクリート造とは異なるアプローチにより中高層化を実現する必要性が生じる。

中高層化による 1 階柱の負担軸力の増大に対し、材料強度を増加させないなら断面を大きくするしかなく、この場合、地震時に柱は軸力と曲げモーメントを同時に受け、断面の縁応力度が極めて大きくなる。木質構造物の接合部は、鋼材を用いた引張側接合具を先行降伏させる設計が望ましいが、中高層化が進めば圧縮側で木材が繊維平行方向に受ける圧縮応力により圧壊が生じる恐れがあるが、複合応力や繰り返しの影響など、未だ明らかとなっていないことが多い。

以上のように、木造建築物の中高層化によって柱が高軸力を受けたときの挙動を、現状の知見のみで推定することは困難な状況にある

2. 研究の目的

木材は繊維方向に比して繊維直角方向の弾性係数・強度が 1/10 ~ 1/20 も低いという "異方性" を示すため、これまでの小規模木質構造の性能は、繊維直角方向に接触される部位の圧縮変形に支配されていた。しかし、異方性を緩和した新しい木質材料(直交集成板(CLT))の登場や、鉄やコンクリート等の異種材料とのハイブリッド化により、繊維直角方向圧縮の弱点が克服された結果、繊維方向圧縮が次なるボトルネックとなった。

木材の繊維方向圧縮については、木口面の場合とその他の場合でわけて考える必要がある。前者では木口面の摩擦に起因したせん断応力が同時に発生することが多く、圧縮とせん断の複合応力下での強度特性の評価が必要である。後者では地震力下において圧縮と引張の繰り返し応力が生じるため、圧縮による損傷が引張強度におよぼす影響を明らかにする必要がある。

そこで本研究では、上述した木材の繊維方向圧縮における課題解決を行いつつ、最終的には中高層化により増大する軸力と同時に曲げモーメントを受ける、過酷な条件下にある柱脚接合部の汎用設計法を提案する。

3. 研究の方法

1) 木口面に三角形支圧を受ける集成材の強度特性

引きボルト式柱脚接合部を例とした応力分布を図 1 に示す。曲げモーメント作用時は木口の断面縁に三角形形状の支圧が生じるが、その接合面には一般にせん断力も同時に作用する。せん断力は通常シアキーで対処されるが、木口面が接触している限り、摩擦も関与する。このような状況を再現する試験法として、図 2 に示す載荷装置を用いて木口面の三角形支圧実験を行った。ピン接合された鉄骨柱を水平ジャッキで傾けることで、木口面に三角形形状の表面変位を与えた。また、図 3 のように木口面に圧縮応力と同時に作用させるせん断応力の有無の影響を比較した。試験体は断面 120x450mm の同一等級構成集成材とした。各樹種につき、3 種の境界条件、2 種の支圧幅(セットアップ時に 75/150mm)とし、それぞれ 6 体ずつとした。

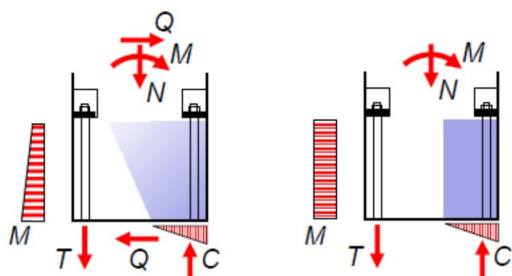


図 1 引きボルト式柱脚接合部を例とした応力分布
(左:せん断応力あり、右:せん断応力なし)

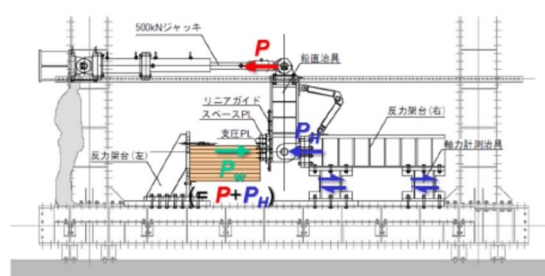


図 2 載荷装置セットアップ(せん断なし)

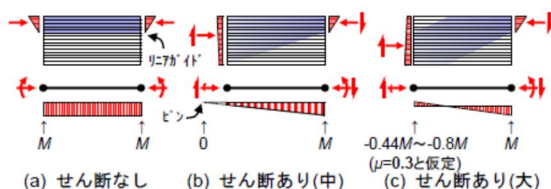


図 3 3種の境界条件

2) 圧縮 / 引張の交番応力を受ける集成材の強度低下

引きボルト式集成材柱脚接合部の座彫部では圧縮縁の損傷後にその部分が引張応力下に転じると、繊維の屈曲部を起点とした引張破壊が生じ、通常の引張強度より低い応力レベルで破壊することが確認されている(図4)。そこで、圧縮 / 引張の繰り返し交番応力に対する集成材の強度低下現象の把握を行った。

試験体は図5に示す引きボルト式接合部の座彫部を模したもので、材中央に設けた四角穴周辺を破壊部とした。材料は同一等級構成集成材で表1に示すオウシュウアカマツとスギを用意した。各仕様6体ずつ試験を行った。図6に示す加力装置を用い、(i)単調圧縮荷、(ii)単調引張荷、(iii)圧縮後引張荷の3種の荷を行った。(i)と(ii)で単調圧縮強度 σ_c と単調引張強度 σ_t の平均値を求め、(iii)ではまず σ_c の α 倍の圧縮応力を1回与えた後に引張応力を与えて破壊に至らしめ、そのときの引張破壊強度の σ_t に対する比 R_t を求めた(図7)。 α は3水準(各6体ずつ)とした。

3) 繰り返し変動軸力と曲げモーメントを受ける実大接合部実験

図8(左)に示す引きボルト接合による柱脚部を模した試験体について、図8(右)の装置を用いて、変動軸力下での逆対称曲げを再現した。軸力3水準と、単調 / 繰り返しの荷により計12体を試験した。

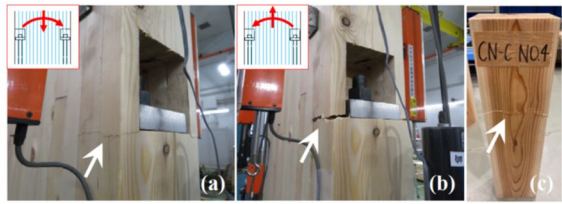


図4 座彫部の破壊 (a)圧縮応力で生じたしわ、(b) (a)後の引張応力で生じた破断、(c)圧縮試験で見られるしわ)

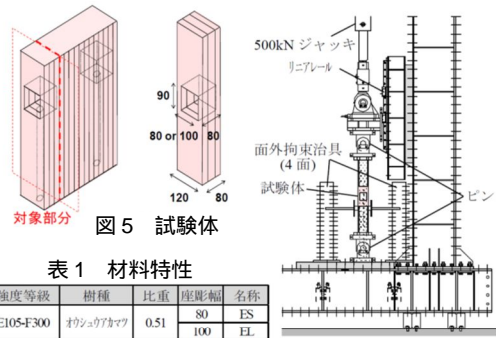


図5 試験体

表1 材料特性

強度等級	樹種	比重	座彫幅	名称
E105-F300	オウシュウアカマツ	0.51	80	ES
			100	EL
E65-F240	スギ	0.42	80	CS

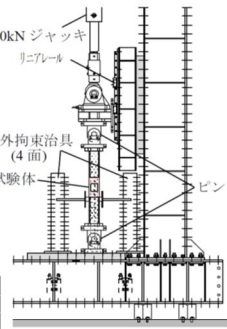


図6 加力装置

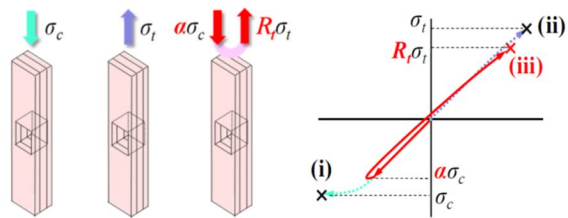


図7 荷方法 (i)単調圧縮荷、(ii)単調引張荷、(iii)圧縮後引張荷、右図は(i)-(iii)の応力 - 変位関係の概形)

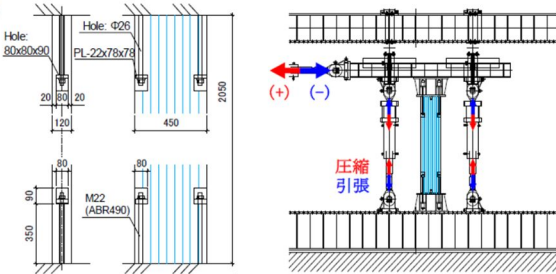


図8 実大接合部実験の試験体(左)と荷装置(右)

4. 研究成果

1) 木口面に三角形支圧を受ける集成材の強度特性

典型的な破壊性状を図9に示す。せん断なしは支圧方向に木口がへこむとともに、支圧部の境界付近で繊維方向に割れが生じ、その割れの進展とともに荷重低下した。一方、せん断あり(大)は木口のへこみとともにせん断力の方向に繊維が傾き、局部せん断破壊を伴った圧縮破壊と判断できる。荷重中は圧縮縁の沈み込み変位と横すべりがともに生じていた。木口面から見ると、材側面の繊維が木口面に巻き込まれていた。既往研究で不完全摩擦と呼ばれる現象と類似するものと考えられる。このような破壊はせん断あり(中)でも同様に見られた。

支圧強度の比較を図10に示す。全面圧縮時の圧縮強度に比して、三角形支圧ではせん断なしの支圧強度が同程度か若干上昇、せん断あり(中)は同程度か若干減少する程度であり、せん断あり(大)のみ明確に低かった。また、本実験の範囲内では、支圧幅や全面圧縮と部分圧縮の違いによる支圧強度への影響はそれほど大きくなかった。せん断あり(中)においても局部せん断破壊を伴った圧縮破壊(図9右)が観察されたことから、最大支圧応力時の支圧面における見かけの摩擦係数 μ と最大せん断応力度 σ_{max} を図11に示す。本実験における荷重用鋼板の表面は黒皮であるが、得られた μ は0.15~0.18と低めで、不完全摩擦により見かけの摩擦係数が低下した可能性がある。また、 σ_{max} は基準強度を大きく超えていた。

2) 圧縮 / 引張の交番応力を受ける集成材の強度低下

(i)単調圧縮荷と(ii)単調引張荷で得られた σ_c と σ_t を表2に示す。次に、(iii)圧縮後引張荷で得られた R_t - 関係を図12に示す。図12には6体平均値に加え、信頼水準75%の5%下限値と、(ii)と(iii)を独立した標本と見なしたWelchのt検定によるp値を併記した。ESは $\mu = 0.9$ で、ELは $\mu = 0.8$ 以上で R_t の有意な低下が見られた($p < 0.05$)。そのときの R_t の平均値は0.8程度であった。CSは μ が0.9以下で有意な低下はない($p > 0.05$)と判断されるが、 $\mu = 0.9$ で6体のうち2体で R_t が0.5程度と低い値を示しており、5%下限値で見ると顕著な低下を示した。

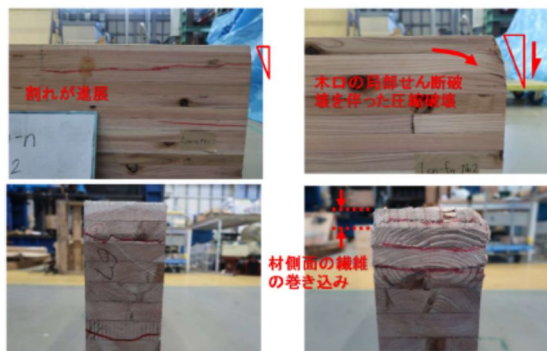


図9 典型的な破壊性状 (左:せん断なし、右:せん断あり(大))

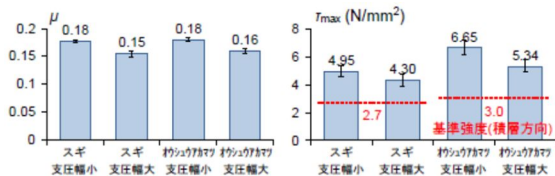


図11 せん断あり(中)の見かけの摩擦係数 μ と最大せん断応力度 T_{max} (6体平均)

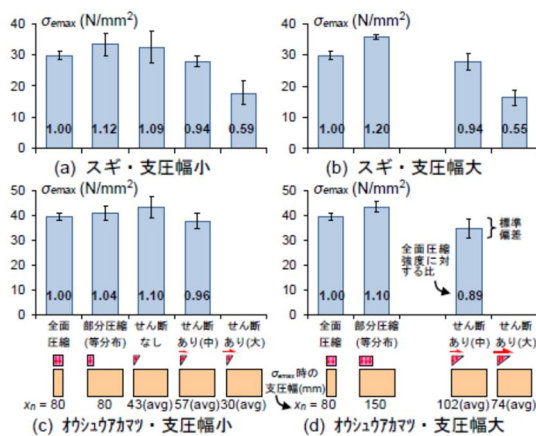


図10 支圧強度の比較(6体平均)

表2 単調圧縮強度と単調引張強度の6体平均値 (N/mm²)

	(i) σ_c	(ii) σ_t
ES	38.7	38.3
EL	40.3	48.9
CS	33.6	28.6

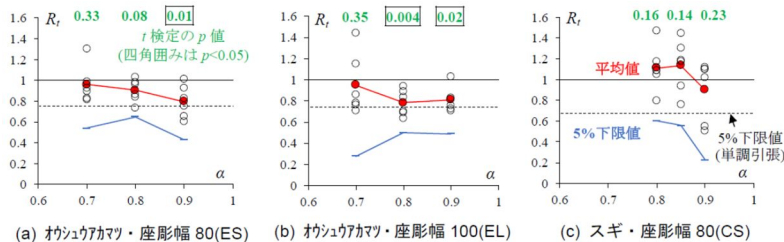
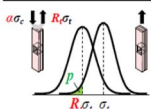


図12 圧縮応力経験後の引張強度の低下率

3) 繰り返し変動軸力と曲げモーメントを受ける実大接合部実験

図13に実大接合部実験の各試験体の曲げモーメント M - 回転角 関係を示す。変動軸力中・大の試験体において、繰り返し载荷により曲げ圧縮で座彫近傍にしわが生じた後に曲げ引張を受けることで、そのしわから引張破壊が生じた(図4(a),(b))。これが前述の実験で見られた現象であり、これにより、繰り返し载荷と単調载荷では、曲げ耐力は単調载荷の方が僅かに高い程度だが、変形性能は単調载荷の方が優れていた。

図14に最大曲げモーメント M_{max} と最大軸力 N_{max} の関係を示す。文献1の接合部の終局曲げ耐力 M_u および母材の曲げ耐力 cM_{wu} の理論式に基づく $M-N$ 曲線も重ねて示す。いずれも理論値に概ね一致している。変動軸力大で接合部曲げ耐力・母材曲げ耐力の理論値のいずれも下回っているもの(図14の(i)や(ii))は、繰り返しの影響と考えられる。

次に、座彫のある断面の縁応力度に着目する。曲げと軸力の複合応力による縁応力度を σ_1 、アンカーボルトの引張力を座彫脇の断面のみで負担したと考えた平均応力度を σ_2 とすると、それぞれ図15のように求まる。座彫部の縁応力度履歴の一例を図16に示す。図中の σ_c と σ_t は表2のESの値である。引張応力を σ_1 (黒線) で評価すると実験中に σ_t の20%以下程度しか生じないが、 σ_2 (青線) で評価すると σ_t に近い大きさまで生じている。 σ_t の20%程度で破壊に至るとは考え難く、また座彫部の引張破壊はいずれも低圧縮軸力または引張軸力のときに生じており、このときの $M-N$ 関係(図14)は母材破壊に対しては相当の余裕があることを鑑みると、本論で対象とする座彫部の引張破壊は引張接合部近傍の局所的な破壊と捉える方が妥当と考えられ、以下では引張応力を σ_2 で評価する。図16より0.9 σ_t 程度の引張応力に耐えつつ σ_c に近い圧縮応力を複数回経験したあとに、 $\sigma_{t,r}$ ($=0.4 \sigma_t$ 程度) で引張破壊が生じた。なお、 $\sigma_{t,r}$ で生じた座彫部の引張破壊は部分的(図17)で、破壊後もそれなりに高い引張応力を保持しているが、割れが大きく進展して安定した性能は期待できないため、 $\sigma_{t,r}$ で割れが生じた段階を破壊と見なすのが妥当と考えられる。

上述のような応力履歴の分析を全12体の試験体を実施し、最大引張応力度 $\sigma_{t,max}$ (破壊しなかった試験体) または引張破壊時応力度 $\sigma_{t,r}$ (破壊した試験体) と、その前に経験した最大圧縮応力度 $\sigma_{c,max}$ の関係を図18に示す。1体のみ外れたプロットがあるものの、要素実験結果と同様、 $\sigma_{c,max}$ が σ_c の0.8~0.9倍を超えると、 σ_t 未満の低応力で引張破壊が生じる可能性があると言える。

木材の基準強度は信頼水準75%の5%下限値で規定され、その他各種の安全率も見込まれており、座彫部の圧縮縁応力を基準強度以下とすれば σ_c (実強度の平均値) の0.8倍ほどには達しないと考えられるが、保証設計においては確率論に基づく検討も必要である。本実験で得られ

たデータをもとに、保証設計で必要とされる材料強度の安全率を設定することが可能となったことは重要な足掛かりであるが、より広範な材料・接合方法等について一般化するには追加検討が必要であり、今後の課題としたい。

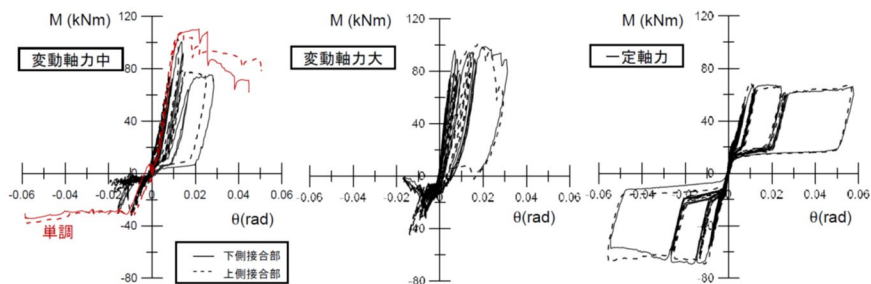


図 13 接合部のモーメント M - 回転角 関係

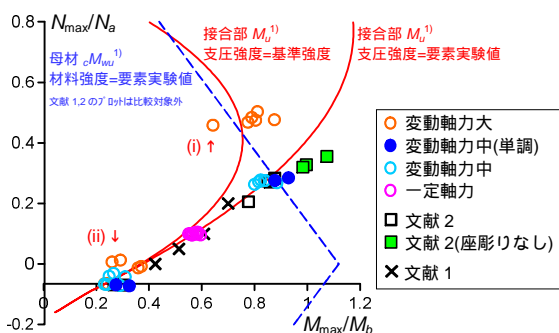


図 14 M-N 相関関係

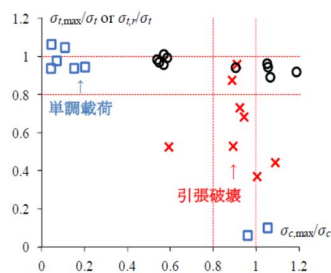


図 18 最大引張応力度または引張破壊時応力度と既経最大圧縮応力度の関係

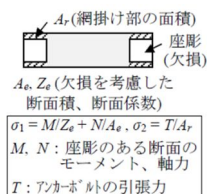


図 15 応力の評価方法

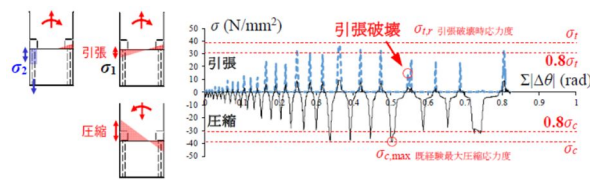


図 16 座彫りのある断面の縁応力度の履歴 (変動軸力中試験体の例)

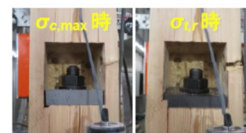


図 17 破壊状況

参考文献

- 1) 秋山信彦, 岡本滋史, 山崎義弘, 榎本敬大 : 引きボルト式集成材ラーメン構造の耐震設計法に関する研究 軸力を考慮した柱脚接合部の剛性および耐力の推定方法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 87 巻, 第 793 号, pp.295-306, 2022.3
- 2) 山崎義弘, 溝口比菜, 松田和浩, 秋山信彦 : 曲げモーメントと軸力の複合応力を受ける集成材柱脚部および CLT 壁脚部の性能評価, 日本建築学会技術報告集, 第 28 巻, 第 68 号, pp.161-166, 2022.2

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 YAMAZAKI Yoshihiro、NAKANISHI Satori、SAKATA Hiroyasu	4. 巻 86
2. 論文標題 PROPOSAL OF HYSTERESIS MODEL OF TIMBER SHEAR WALLS CONSIDERING FATIGUE BEHAVIOR AND APPLICATION TO EQUIVALENT LINEARIZATION TECHNIQUE	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 425 ~ 435
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.86.425	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 -
1. 著者名 YAMAZAKI Yoshihiro、SUZUKI Koya、MATSUDA Kazuhiro、SAKATA Hiroyasu	4. 巻 27
2. 論文標題 EVALUATION OF PERFORMANCE DETERIORATION OF PLYWOOD SHEATHING WALL SUBJECTED TO REPEATED CYCLIC LOADING	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIJ Journal of Technology and Design	6. 最初と最後の頁 202 ~ 206
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijt.27.202	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 -
1. 著者名 MIKI Norihito、NAKASHIMA Shoichi、YAMAZAKI Yoshihiro、ISHIHARA Tadashi	4. 巻 27
2. 論文標題 CYCLIC LOADING TEST OF CLT-STEEL HYBRID STRUCTURE FRAME WITH CONNECTIONS TO IMPROVE HYSTERETIC BEHAVIOR	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIJ Journal of Technology and Design	6. 最初と最後の頁 213 ~ 218
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijt.27.213	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 -
1. 著者名 Yamazaki Yoshihiro、Kanda Kengo、Sakata Hiroyasu	4. 巻 3
2. 論文標題 Strength and energy dissipation of timber shear walls subjected to arbitrary deformation history study on fatigue behavior of timber structures subjected to repeated earthquake motions: Part 1	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JAPAN ARCHITECTURAL REVIEW	6. 最初と最後の頁 518 ~ 528
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2475-8876.12178	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7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 榎本敬大, 秋山信彦, 岡本滋史, 山崎義弘
2. 発表標題 引きボルト式集成材ラーメン構造の耐震設計法に関する研究 その3: 柱脚接合部の定軸力下における曲げ性能の実験検証
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演(関東)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡本滋史, 秋山信彦, 榎本敬大, 山崎義弘
2. 発表標題 引きボルト式集成材ラーメン構造の耐震設計法に関する研究 その4: 柱脚接合部の圧縮側木口面と引張ボルトの定着座金部の面圧挙動の実態性能の把握
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演(関東)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山崎義弘, 秋山信彦, 岡本滋史, 榎本敬大
2. 発表標題 引きボルト式集成材ラーメン構造の耐震設計法に関する研究 その5: 繊維方向めり込み特性の評価方法の検討
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演(関東)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 秋山信彦, 岡本滋史, 榎本敬大, 山崎義弘
2. 発表標題 引きボルト式集成材ラーメン構造の耐震設計法に関する研究 その6: 柱脚接合部に関する一定軸力を考慮した降伏耐力・終局耐力の推定法の提案
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演(関東)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林望, 中西理, 山崎義弘, 坂田弘安
2. 発表標題 繰り返し載荷による耐力劣化を表現し得る木造耐力壁復元力モデルの提案とその応用 その 1: 提案モデルの概要
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演(関東)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤岡諒太郎, 中西理, 山崎義弘, 坂田弘安
2. 発表標題 繰り返し載荷による耐力劣化を表現し得る木造耐力壁復元力モデルの提案とその応用 その 2: 実験に対する精度検証
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演(関東)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中西理, 山崎義弘, 坂田弘安
2. 発表標題 繰り返し載荷による耐力劣化を表現し得る木造耐力壁復元力モデルの提案とその応用 その 3: 等価線形化手法への応用
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演(関東)
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	秋山 信彦 (Akiyama Nobuhiko) (20806054)	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	松田 和浩 (Matsuda Kazuhiro) (80567397)	名城大学・理工学部・准教授 (33919)	

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