

令和 4 年 9 月 21 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02290

研究課題名(和文)鉄筋を複合する革新的木質ハイブリッド部材ラーメン構法の構造設計法に関する基礎研究

研究課題名(英文)Development of structural-design methodology for tow-way rigid frame composed of hybrid steel rebar-timber glulam members

研究代表者

塩屋 晋一 (Shioya, Shinichi)

鹿児島大学・理工学域工学系・教授

研究者番号：80170851

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：鉄筋コンクリート造や鉄骨造と同等以上の構造性能を発揮する木質ハイブリッド鉄筋集成材を用いる大規模木質ラーメンの限界耐力計算の設計技術を開発する研究である。集成材の樹種は成長の早いスギ(国内林の40%)を対象にしている。鉄筋集成材は曲げ縁に鉄筋を材軸方向に挿入してエポキシ剤で集成材内に接着する。これによりスギ集成材の曲げ剛性を4-5倍に増大させ、集成材に対して梁せいを約60%に縮減でき、曲げ強度も増大する。更に鉄筋による、木の曲げクリープの抑制効果を考慮すると、梁せいを55%に縮減できる。申請の期間の本研究では柱、梁、柱と梁の接合、梁の耐熱性能、および耐火性能を実験と解析により解明している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国では住宅・建築分野が二酸化炭素量の3割を排出し、セメントや鋼の生産の排出を加えると4割に及ぶ。建築材料・構造分野でもカーボンニュートラルに対応する新たな社会基盤への貢献が求められている。セメントと鋼は不可欠であるが、今後は構造部材を、CO2吸収を伴う自然循環により生み出される木質材料に転換させる技術を開発する必要がある。建築計画と設計へ自由度を与え、地球環境と調和する木質の柱・梁及び構造システムの構築が極めて重要である。既存の木質構造では限界がある。その転換を加速させることを狙いに、本研究は木質ハイブリッド軸材と、その構造システム及び設計方法の開発を目指している。

研究成果の概要(英文)：The study develops a design technique for calculating the critical load capacity of large-scale timber lamellae using wood hybrid reinforced laminated timber, which exhibits structural performance equivalent or superior to that of reinforced concrete or steel-framed structures. The species of glued laminated timber is fast-growing cedar. Reinforcing bars are inserted into the axial direction of the timber at the bending edges of the glued laminated timber and glued into the glued timber using epoxy resin adhesive. This increases the bending stiffness of the cedar glued-laminated timber by a factor of 4-5 and reduces the beam depth to about 60% of that of the conventional timber, while also increasing the bending strength. In this work of study, column, beam, column-beam connection, and the thermal and fire resistance have been investigated experimentally and analytically.

研究分野：建築構造

キーワード：木質ハイブリッド部材 集成材 鉄筋 柱 梁 接合 損傷抑制 大地震

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

我が国は、温暖多雨で樹木の成長が極めて早く、森林資源国家である。木材を建築の構造材として大量に利用することは建築構造分野が環境負荷の削減に貢献する。更に建物が役割を終えた後、その木質を効率よく燃焼させてエネルギーに変換できる。樹木の成長周期(スギは約 50 年)に合わせて森林による自然エネルギー循環システムを構築できる。この概念は海外で研究されており、我が国はそれに最も適している。可能な限り、建築物の構造体の木質化を探るべきである。設計の自由度を高める、剛性と強度が極めて高い木質軸材とそのラーメン構法が熱望されており、木質ハイブリッド部材と、その構法システムが不可欠である。

本構法に対する社会からの期待は大きく、一般の構造設計者でも汎用的に設計できる設計技術の一般化が強く求められている。

### 2. 研究の目的

鉄筋コンクリート造(RC造)や鉄骨造(S造)と同等以上の構造性能を発揮する鉄筋集成材を用いる大規模木質ラーメンの限界耐力設計の設計技術を開発することを目的としている。

### 3. 研究の方法

鉄筋集成材と、その構造の設計方法を一般に普及させるためのラーメンの限界耐力設計技術を開発するために、下記の実験を実施し、各部分の設計方法を整備する。

- (1) 高層の建物への応用を目指して、高軸力を受ける柱の曲げ弾塑性性状を明らかにする実験
- (2) 大地震時に梁端に変形を集中させて早期の変形からエネルギー吸収性能を発揮し、無損傷で残留変形を抑制できる梁と、その梁と柱の接合部の弾塑性性状を明らかにする実験
- (3) 鉄筋集成材の耐火設計の基礎データを得るための梁の耐熱载荷実験

### 4. 研究成果

- (1) 高軸力下で柱脚が曲げ降伏する柱の弾塑性性状を明らかにする実験

図2の高軸力を受ける十字形、T形、正方形断面の柱について繰返しの水平加力実験を行い、弾塑性性状を明らかにして解析モデルを検証した。図3に正方形断面柱の水平せん断力-変形角関係を示す。水平剛性と曲げ耐力は柱脚を固定端と仮定した一般の集成材の柱の計算値より高くなり、それぞれ122-133%、178-188%となった。極めて高い水平剛性と曲げ耐力を発揮した。軸力比が0.25以下であれば、 $0.5 \times 10^{-2} \text{rad}$ . から  $2.0 \times 10^{-2} \text{rad}$ . までの漸増繰返し加力を、5回、経験しても柱には損傷はほとんど生じないで、柱脚の接合鉄筋が降伏した以降の履歴ループは、豊富なエネルギー消費性能を発揮した。

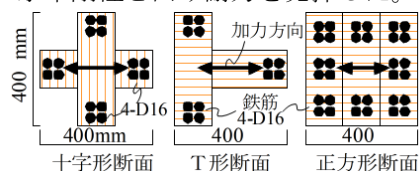


図2 対象にする柱の断面

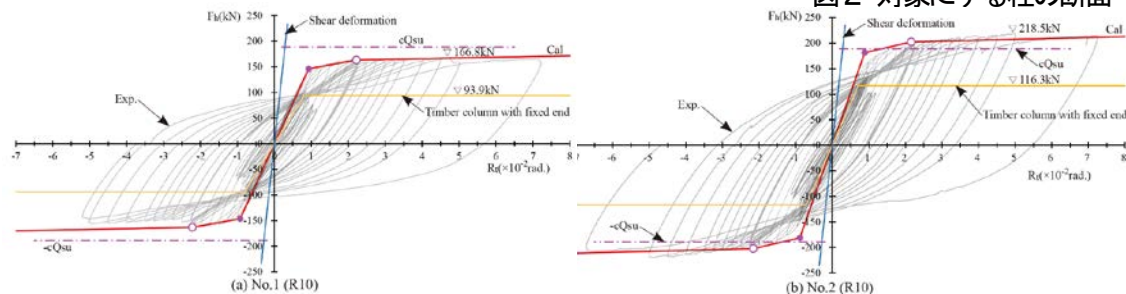


図3 柱の水平荷重-部材変形角関係

(2) 梁端に変形を集約する梁の弾塑性性状と、その履歴ループの解析モデルを解明する実験

柱と接合する梁端に回転角を集約する乾式接合を開発した。図4にその接合方法を示す。一般の集成材では鋼板とドリフトピンで接合するが、図18右のように鋼板の代わりに2個のH形鋼A,Bを用い、梁側のH鋼Aと集成材内の鉄筋を接合する方法(同図左下)を考案して性能を明らかにした。フランジにより曲げモーメントを伝達させる。梁側と柱側のH鋼A,Bの接合では、上端フランジは降伏させないで下端フランジは摩擦ダンパーで接合してすべり降伏させる。鉄筋集成材の曲げ剛性は鉄骨梁と同等であるため梁端の接合位置に回転角が集約されて豊富なエネルギー消費を發揮する。そのダンパーには吉岡らの鉄骨造梁の方法を採用しているが、課題であったせん断力の伝達については、代表者が回転を吸収できるせん断キー(同図左上)を開発した。安価なレーザーカット技術を活かした。図6に梁のせん断力-変形角関係を示す。狙いのおり安定した履歴ループと豊富なエネルギー消費の性能を示した。

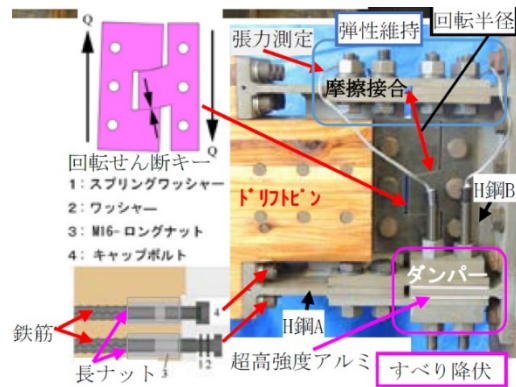


図4 開発した梁端の

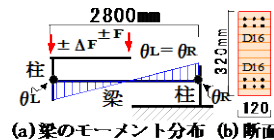


図5 梁の応力状態



写真2 試験体と加力状況

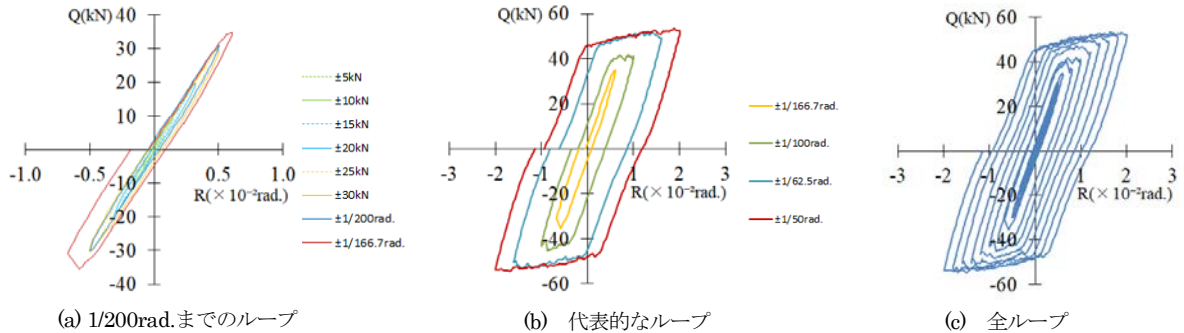


図6 梁のせん断力-変形角関係

(3) 鉄筋集成材梁の耐熱性能

高温環境下での繰り返し加熱により生じる、鉄筋集成材梁のたわみと木のひずみの収束と発散の状況から、鉄筋が梁の曲げ変形の成分の進行を抑制して、その抑制量は、既に提案しているクリープの評価式を準用することにより評価できることを明らかにした。

高温環境下での繰り返し加熱により生じる、鉄筋集成材梁のたわみと木のひずみの収束と発散の状況から、鉄筋が梁の曲げ変形の成分の進行を抑制して、その抑制量は、既に提案しているクリープの評価式を準用することにより評価できることを明らかにした。

20℃から70℃までの繰り返し加熱による鉄筋集成材梁の最終のクリープたわみの増加量は、集成材梁に対して約37~81%に抑制された。曲げ変形成分のたわみに限定すれば、高温環境下(70℃以下)でも鉄筋によりクリープ量を20~25%に激減させることが確認できた。夏季高温環境でのクリープたわみの曲げ変形成分の量は、既に提案している式で精度よく評価できた。

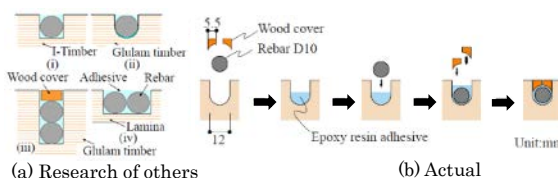


図6 鉄筋のラミナへの接着の方法

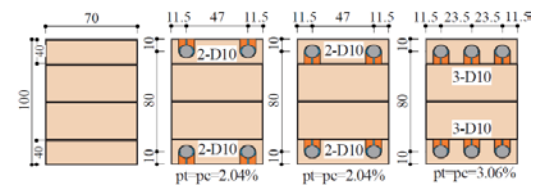


図7 試験体の断面

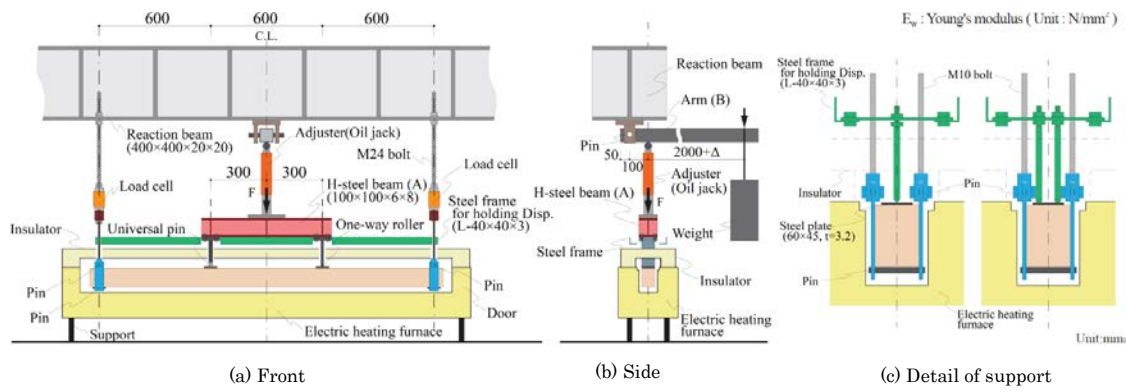
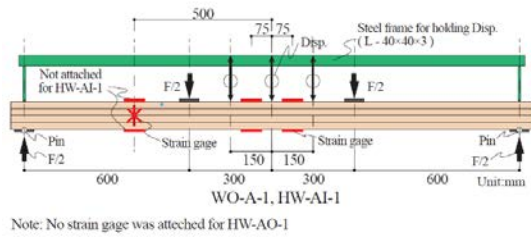


図 8 電気炉と加力装置



Note: No strain gage was attached for HW-AO-1

図 9 たわみと木のひずみの測定位置

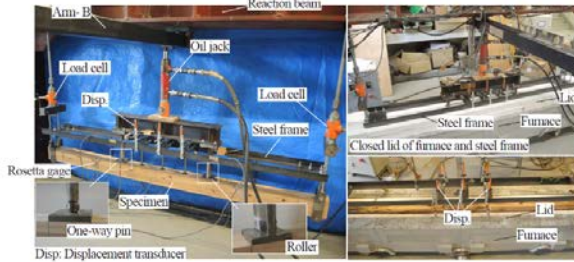


写真 3 試験体に対する加力装置と変形計

(4) 燃えしろ設計のための梁の燃焼実験

木質構造では木を頭わしにする燃えしろ設計の要望が極めて強く、60分以下の準耐火の建築が多い。しかし、国土交通省告示に定められている木質構造の燃えしろ設計は、その適用が日本農林規格(JAS)の集成材と製材に限定されているため、新たな構造材料の鉄筋集成材に燃えしろ設計の方法を準用する場合は、実大の部材の性能評価試験を実施して非損傷性の基準を満たす必要がある。鉄筋集成材のように木を主材とした木質ハイブリッド部材の燃えしろ設計の研究は国内では全くなく、国外では研究の緒に就いたばかりである。鉄筋集成材の60分間燃焼の準耐火構造のための燃えしろ設計の方法を確立することを目的にして梁の燃焼試験を実施した。

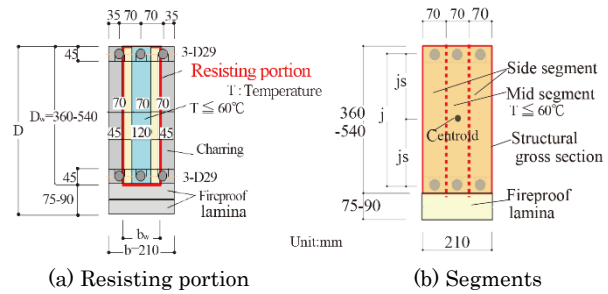


図 10 60分燃焼後に想定している梁の抵抗断面

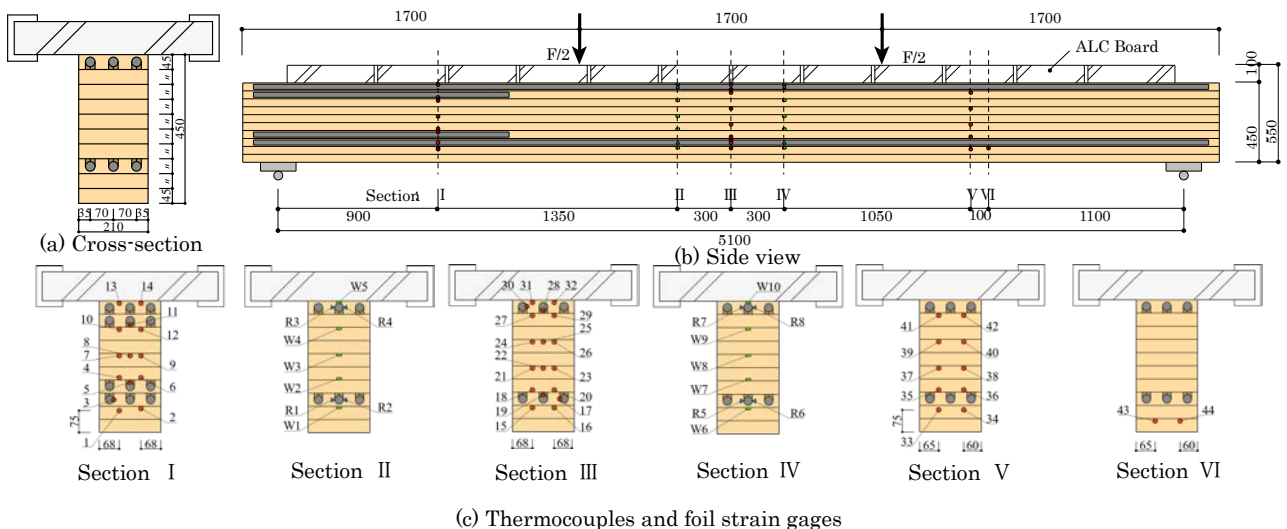


図 11 試験体と梁断面、および温度とひずみの測定位置

60分燃焼中の梁内部の温度分布とひずみ挙動が明らかになった。以下に成果をまとめる。

①梁下端に耐火ラミナ(厚さ90mm)を接着して提案する抵抗断面モデルを用いて計算される60分燃焼後の鉄筋集成材梁の曲げ耐力とせん断耐力を発揮することを燃焼試験により確認した。

更に燃焼を継続して載荷荷重を増加させ、長期荷重の126%の荷重までは耐えることを確認した。鉄筋の降伏状況から、曲げ破壊の荷重は本試験の最大荷重より大きいと推察した。

②集成材内で、限られる位置の木の温度の測定データから、任意の燃焼時間の、集成材内の木の未炭化領域の温度分布を推定する方法を提案し、これにより測定点の温度と燃焼時間の関係の曲線を再現して、60分燃焼時の断面内の温度分布(図16(a))を示した。

③既往の研究の実験値を基に、60分間燃焼後の曲げヤング係数と曲げ強度の低下率を推定した。今後は、同低下率を用いて曲げ耐力の評価を行い、提案した方法の検証を行う予定である。



(a) Side view (b) Residual wood in section

図12 1時間燃焼後の梁試験体の側面と炭化層を除去した梁断

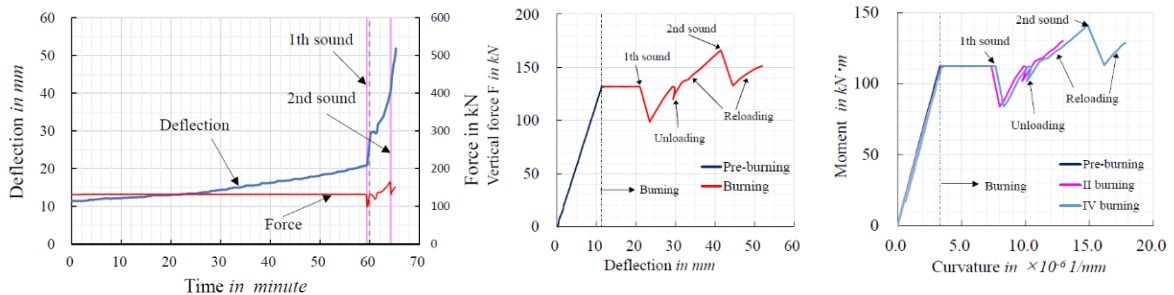


図13 燃焼に伴うスパン中央のたわみの経 図14 燃焼中の荷重-たわみ関係とモーメント-曲率関係

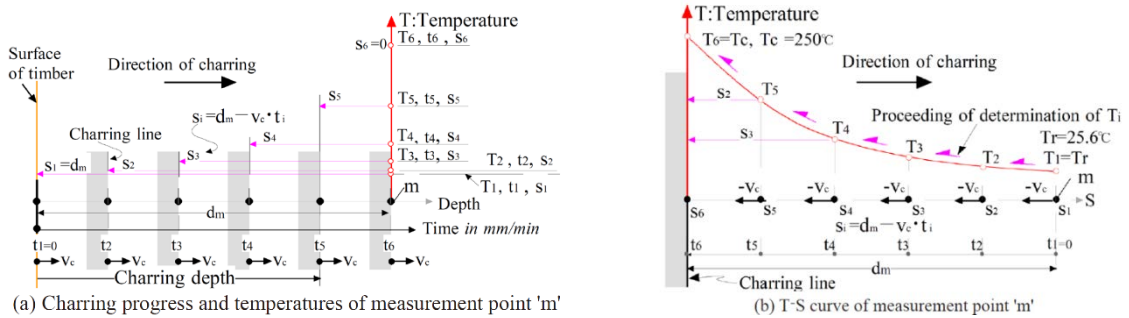
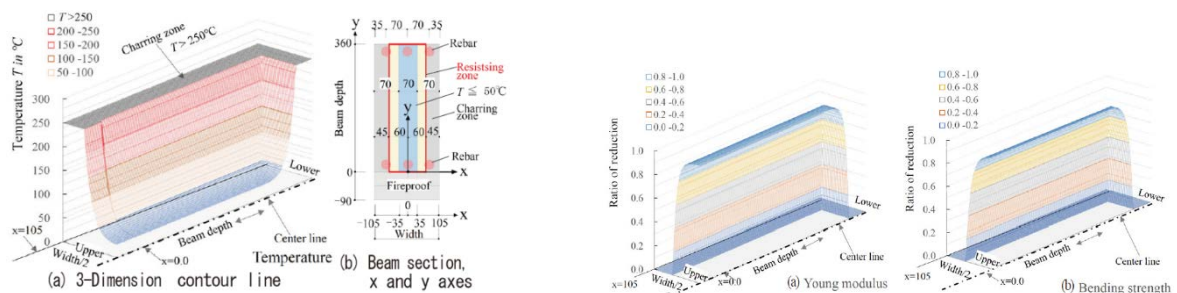


図15 木の未炭化領域の温度分布を評価するための新たな概念



(a) 3-D isotherm (b) Beam section (c) Young's modulus reduction (d) Bending strength reduction

図16 開発した方法による60分間燃焼後の木の未炭化領域の温度分布と曲げヤング係数と曲げ強度の低下率

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 塩屋晋一、松岡直	4. 巻 85
2. 論文標題 温度と含水率の変動に伴う鉄筋集成材内の鉄筋と集成材の内部応力度に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 1469-1487
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aijs.85.1469	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 塩屋晋一、伊集貴洋、大田崇央、春口綱慶	4. 巻 86
2. 論文標題 柱脚が曲げ降伏する鉄筋集成材柱の弾塑性性状に関する実験的研究（その1）	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 107-116
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aijs.86.589	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計23件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 永野功大、塩屋晋一
2. 発表標題 大地震時の損傷と残留変形を抑制する二段階曲げ降伏梁の概念の提案 その1. 新たな梁の接合の概念と方法および鉄筋集成材ラーメン架構への適用
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 春口綱慶、塩屋晋一
2. 発表標題 大地震時の損傷と残留変形を抑制する二段階曲げ降伏梁の概念の提案 その2. ウェブのシャーキーと鉄筋集成材ラーメン架構への適用
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 朴珍錫、春口綱慶、永野功大、塩屋晋一
2. 発表標題 リセンタリング性能を発揮する乾式接合を用いる曲げ降伏型鉄筋集成材梁に関する実験 その1. 研究の目的と実験概要および履歴ループ
3. 学会等名 日本建築学会研究報告 九州支部
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松岡直、塩屋晋一、福留幹太
2. 発表標題 高温下の鉄筋集成材梁のクリープたわみに関する長期載荷実験
3. 学会等名 日本建築学会研究報告 九州支部
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川崎 璃子、向井基紘、大田崇央、森和也、塩屋晋一
2. 発表標題 柱脚が曲げ降伏する鉄筋集成材柱の弾塑性性状に関する実験的研究 その4. 中高層を想定した正方形断面柱の追加水平加力実験
3. 学会等名 日本建築学会研究報告 九州支部
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 向井基紘、塩屋晋一、大田崇央、森和也、川崎 璃子
2. 発表標題 柱脚が曲げ降伏する鉄筋集成材柱の弾塑性性状に関する実験的研究 その5. 水平せん断力 - 変形角関係と曲げ耐力式および骨格曲線
3. 学会等名 日本建築学会研究報告 九州支部
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 向井基紘、塩屋晋一、大田崇央、森和也、川崎 璃子
2. 発表標題 柱脚が曲げ降伏する鉄筋集成材柱の弾塑性性状に関する実験的研究 その6. 曲げ降伏後のせん断耐力と限界変形の評価
3. 学会等名 日本建築学会研究報告 九州支部
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森和也、大田崇央、塩屋晋一
2. 発表標題 柱脚が曲げ降伏する鉄筋集成材柱の弾塑性性状に関する実験的研究 その7. マルチスプリングモデルによる正方形断面柱の履歴特性の評価モデル
3. 学会等名 日本建築学会研究報告 九州支部
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大田崇央、塩屋晋一
2. 発表標題 柱脚が曲げ降伏する鉄筋集成材柱の弾塑性性状に関する実験的研究 その8. 等価粘性係数と評価
3. 学会等名 日本建築学会研究報告 九州支部
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西谷政彦、塩屋 晋一、福富成彦
2. 発表標題 実大断面寸法の鉄筋集成材はり載荷試験 その1. 断面寸法210×350, 210×540の場合の曲げ載荷
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(金沢)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 福富成彦、塩屋晋一、西谷政彦
2. 発表標題 実大断面寸法の鉄筋集成材はり載荷試験 その2. 断面寸法210×360と210×540の場合のせん断載荷
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集（金沢）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 財前将大、塩屋晋一、福富成彦、西谷政彦
2. 発表標題 実大断面寸法の鉄筋集成材はり載荷試験 その3 鉄筋の付着試験と結果
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集（金沢）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塩屋晋一
2. 発表標題 鉄筋集成材梁における温度と含水率の変動に伴う応力変動に関する解析
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集（金沢）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 春口綱慶、塩屋晋一、大田崇央、福富成彦
2. 発表標題 柱脚が曲げ降伏する鉄筋集成材柱の弾塑性性状に関する研究 その1. 実験概要と実験結果
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集（金沢）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大田崇央、塩屋晋一、春口綱慶、福富成彦
2. 発表標題 柱脚が曲げ降伏する鉄筋集成材柱の弾塑性性状に関する研究 その2.実験結果
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(金沢)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福留幹太、塩屋晋一、井崎 丈
2. 発表標題 長期載荷を受ける鉄筋集成材梁の曲げクリープ特性に関する研究、その3. 梁の表面をコーティングすることにより吸湿脱湿を防いだ場合
3. 学会等名 日本建築学会研究報告九州支部
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福留幹太、塩屋晋一
2. 発表標題 長期載荷を受ける鉄筋集成材の曲げクリープ特性に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会研究報告九州支部
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 春口綱慶、大田崇央、塩屋晋一、森和也
2. 発表標題 柱脚が曲げ降伏する鉄筋集成材柱の弾塑性性状に関する実験的研究、その1. 中高層を想定した正方形断面柱の水平加力実験
3. 学会等名 日本建築学会研究報告九州支部
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森和也、春口綱慶、大田崇央、塩屋晋一
2. 発表標題 柱脚が曲げ降伏する鉄筋集成材柱の弾塑性性状に関する実験的研究、その2. 荷重-変形関係と残留変形抑制および剛性と曲げ耐力
3. 学会等名 日本建築学会研究報告九州支部
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大田崇央、塩屋晋一
2. 発表標題 柱脚が曲げ降伏する鉄筋集成材柱の弾塑性性状に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会研究報告九州支部
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 永野功大、春口綱慶、塩屋晋一
2. 発表標題 鉄筋集成材と柱梁接合部のせん断剛性とせん断耐力に関する実験
3. 学会等名 日本建築学会研究報告九州支部
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 塩屋晋一
2. 発表標題 大地震時の損傷と残留変形を抑制する二段階曲げ降伏梁の概念の提案、その1. 新たな梁の接合の概念と方法および鉄筋集成材ラーメン架構への適用
3. 学会等名 日本建築学会研究報告九州支部
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福富成彦、塩屋晋一
2. 発表標題 大地震時の損傷と残留変形を抑制する二段階曲げ降伏梁の概念の提案、その2.3層1スパンの鉄筋集成材ラーメン架構での検証
3. 学会等名 日本建築学会研究報告九州支部
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

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