

令和元年6月19日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06578

研究課題名(和文) 森林資源による自然エネルギー再生循環を促進する革新的ハイブリッド木質ラーメン構法

研究課題名(英文) Tow-way frame rigidly connected using hybrid timber-steel rebar 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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：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。木材を建築の構造に大量に利用することは環境負荷の削減に貢献する。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建物の設計技術を開発している。鉄筋集成材の柱と梁は大地震を多数回、経験しても耐震性能はほとんど低下しないで、地震後には損傷や倒れも残らない性能を発揮することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

森林における自然循環により生み出される木材を、大量に建築の構造部材で利用することは、地球温暖化を抑制するのに大きく貢献する。このためには、鉄筋コンクリート造部材や鉄骨部材と同等以上の構造性能を発揮する木質部材とその構造システムの開発が不可欠である。本研究で開発している鉄筋集成材は、その性能を十分、発揮した。特に柱や梁は大地震を8回経験してもほとんど性能が低下しないことが明らかになった。今後は、耐火に対する設計方法も含めて、一般の設計者でも設計できる設計方法の開発を行う予定である。

研究成果の概要(英文)：Japan is a representative nation all over the world, with a large amount of forests and woods derived from its very warm and rainy weather. Employing a great number of timber members for structure frames of buildings contributes to suppress the global warming. We are developing an innovative structural member and frame system adopting hybrid timber-steel rebar glulam members, which can perform at same or higher levels than reinforced concrete or steel structures. The columns and beams composed of the hybrid timber demonstrated the potential of performing very little deterioration in seismic performance even though buildings composed of them may be attacked by many-times mega-earthquakes.

研究分野：木質構造

キーワード：集成材 鉄筋 ハイブリッド部材 柱 エネルギー吸収 復元性 制震構造 損傷抑制

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我が国は、海に囲まれ温暖多雨で樹木の成長が極めて早く、世界的にも希有な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 CO₂ 削減に貢献する。さらに建物が役割を終えた後、その木質を燃焼させてエネルギーに変換できる。樹木の生長周期(日本スギは約 50~60 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。この概念は海外で調査研究が行われているが、我が国の風土はこれに最も適している。

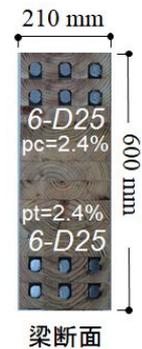
可能な限り、建築物の構造体の木質化を探るべきである。

木質構造を普及させるためには、鉄筋コンクリート構造(RC 造)や鉄骨構造(S 造)と同じような断面寸法とスパン寸法でラーメン架構の建築計画ができる、木質ハイブリッド部材と、それを用いる構法システムが不可欠である。一方、開発後は大量に普及させる必要がある。現行の木質部材の製品標準や製造工程を利用するプロセスイノベーションを前提としたハイブリッド部材を開発する必要がある。

木質構造は耐火が弱点であるが、規模と階数を限定すれば燃え代設計で対応できる。2015 年 6 月の建築基準法改正で適用範囲も広がった。耐火を除くとハイブリッド化で重視すべき点は、1)複合する異種材料が低コストで少量であり、かつ集成材の製造工程を変化させない、2)木質の軽さと強度を損なわない、3)成長が早く等級の低い樹木の剛性と強度を効率よく補う、4)部材相互の接合が部材の構造性能を損なわない、5)比例限界ひずみ(繊維方向)が極めて大きいため大変形でも損傷や残理変形が抑制する、6)クリープ変形を抑制する、7)建物解体後、木質部を容易に燃焼させてエネルギーに変換できること、などである。

樹種は成長の早い日本スギ(現有の国内林の 40%占める)を対象にすべきである。

木質ハイブリッド部材は国内外で研究されている。1)鉄骨を木質で覆うタイプ、2)FRP や CFRP の強化プラスチックのシートや棒を木質部材に接着するタイプ、3)異形鉄筋(以後、鉄筋)を部材の曲げ縁に挿入して接着するタイプに分けられる。部材の接合方法としては、異形鉄筋を用いる glued-in-rod(鉄筋接合)が実用化され、建設された実績も多い。部材相互の接合も含め、材料コストと補強の効率および前述のプロセスイノベーションを考慮すると、最も普及が期待されるのは鉄筋を用いるタイプである。このタイプは海外でも研究されているが、しかし、構法システムと設計理論の構築までは至っていない。



2. 研究の目的

鉄筋コンクリート造(RC 造)や鉄骨造(S 造)と同様またはそれ以上の構造性能を発揮するハイブリッド鉄筋スギ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方法を開発する。写真 1 に示すように集成材の曲げ縁の近くに異形鉄筋(以後、鉄筋)を材軸方向に挿入してエポキシ接着剤で鉄筋を集成材内に接着する。これによりスギ集成材の曲げ剛性と曲げ強度を 3~4 倍に増大させる。また鉄筋はスギ材に対するヤング係数比が 31 倍であるため、効率よく曲げクリープ変形を約 75%抑制する。この他、等級の低いスギ集成材でもせん断強度はコンクリートの Fc42 相当はある。これらの性能を有するハイブリッド鉄筋スギ集成材による木質ラーメンの設計技術を開発する。今回の申請の研究では、柱、梁の弾塑性性状を明らかにして部材の設計方法を開発する。

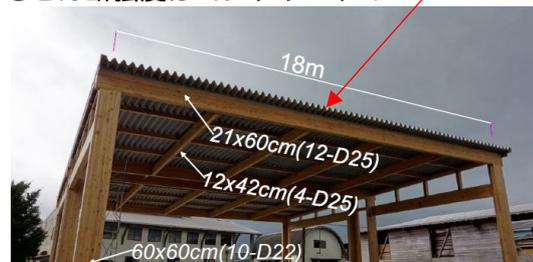


写真 1 鉄筋スギ集成材構法で建てられた試作建物, 2014 年建設(構造設計:申請者)

研究期間内に明らかにする事項と範囲

- 1)曲げ降伏後、せん断破壊に転ずるメカニズムと限界変形の評価方法を解明する。既往の柱の実験で、柱脚が曲げ降伏しても層間変形角 1/25rad. で柱の材軸方向にせん断破壊した。せん断破壊に転じる繰り返し疲労破壊のメカニズムと、その評価方法を明らかにする。
- 2)梁端が曲げ降伏する梁の弾塑性性状の履歴ループを評価する解析モデルを解明する。
柱と梁は接合筋で接合して梁端を曲げ降伏させる。大変形域まで下端の接合筋だけが降伏して、エネルギー吸収するように工夫する。
- 3)柱脚が曲げ降伏する柱の弾塑性性状の履歴ループを評価する解析モデルを解明する。
柱は RC 基礎と接合して柱脚の接合筋を曲げ降伏させる。大変形域まで接合筋が降伏して、エネルギー吸収するように工夫する。

3. 研究の方法

地震時の鉄筋スギ集成材の梁と柱の設計方法を開発できるように計画する。

- 1)柱脚が曲げ降伏する柱と、2)梁端が曲げ降伏する梁の、繰り返し曲げせん断加力実験を行う。
- 3)柱と梁の弾塑性性状、エネルギー吸収と残留変形抑制の性能、限界変形などを明らかにする。
- 4)ラーメン架構の限界耐力設計法を確立するために、柱と梁の履歴ループを大変形域まで追跡できる解析モデルを構築する。

開発する構法と想定する耐震設計のクライテリア

図 1 に 3 階建の軸組と配筋の例を示す。法規制制限があり現時点では 3 階建部分までを対象

にする。屋根組は別途、構成する。柱と梁に鉄筋スギ集成材を用いる。その鉄筋を曲げ筋とする。柱と梁の接合、および1階柱脚とRC基礎の接合は鉄筋と接着剤による。これらは実用化されている。接合の鉄筋を接合筋とする。曲げ筋と接合筋はエポキシ接着剤を用いて部材内で接合する。

一次設計は許容応力度設計法と同じとする。地震に対する二次設計では、1/150rad. レベルで一階柱脚が曲げ降伏し、その後、各階の梁端を曲げ降伏させる。そこでは接合筋を降伏させる。接合筋は接着剤により拘束され、降伏する範囲が限定される。建物の骨格曲線では接合筋の降伏棚に相当する変形は無視できる程度で、ひずみ硬化による二次剛性が生じる。1/50rad. レベルで接合筋の応力は破断強度の90%程度になる。これ以降、建物の二次剛性は失われる。1/40rad. レベルで崩壊機構の限界耐力に近づく。この時の接合筋のひずみは5%程度で、破断ひずみ(20~30%)に対して余裕がある。想定外の大地震に対しては、その余力のエネルギー吸収能力で抵抗させる。二次剛性が発揮されると、制震構造と同様に最大応答後の残留変形は抑制される。本構法も1/50rad. までは二次剛性が発揮できる。二次設計は層間変形を1/50rad. 以下に設定し、残留変形と損傷が生じないクライテリアを想定する。

曲げ降伏後の部材の限界変形の評価方法のほかに、柱と梁の接合面の曲げモーメントの制御方法を開発する必要がある。上述したようにヒンジの接合筋は引張強度まで抵抗し、柱梁接合部ではせん断破壊や接合筋の定着破壊も生じやすい。梁端の曲げ耐力の制御方法と、それを用いた梁の履歴特性の評価方法が必要となる。これらが解決できるように計画した。

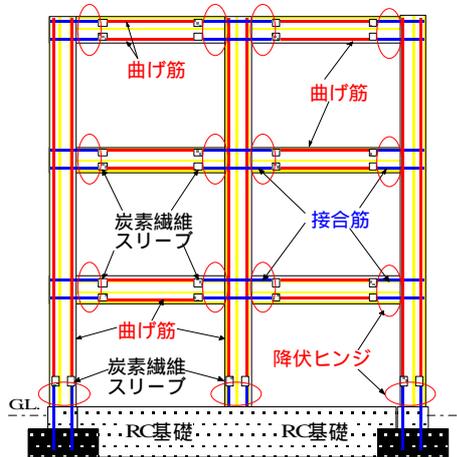


図1 現時点で設計可能な三階建ての軸組と配筋

4. 研究成果

(1) 柱脚が曲げ降伏した以降、せん断破壊に転ずるメカニズムと限界変形の評価方法の解明

過去の柱の実験では柱脚の接合筋が降伏して1/50rad. でほぼ最大耐力に達して、その後、1/25rad. で集成材が鉛直方向にせん断破壊して急激に耐力を失った。せん断破壊時の柱の平均せん断力 m は、スギ集成材の基準終局せん断強度 u (2.7N/mm^2) に対して85%であった。最大荷重に近い荷重レベルでは集成材のキシム音が頻繁に発生した。図2に示すように集成材のせん断強度に近いレベルでは繰り返し加力により集成材のせん断ひずみは増加し、 m が u より小さくても、 m を維持できる限界のせん断ひずみ u に到達してせん断破壊に転じると考えられる。 m が増加する量は、 m が u に近いほど大きいと考えられる。限界せん断ひずみ u は m/u 、繰り返し回数、せん断ひずみの累積消費エネルギーなどの影響を受けると予想される。これらの要因が m と u に及ぼす影響量を定式化できれば、曲げ降伏後のせん断破壊に転ずるメカニズムと、限界変形の評価方法は解明できる。これを解明するために、図3に示すスギ集成材のブロック試験片に対する繰り返しせん断加力実験を実施して、せん断応力レベルに応じた繰り返し疲労回数の評価方法を構築した。本成果は学会発表の⑰⑳㉑にまとめている。主たる成果を下記に述べる。

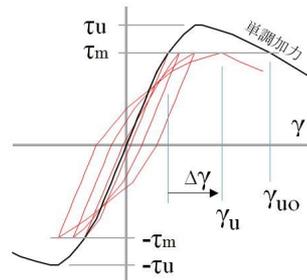


図2 繰り返し加力を受ける集成材のせん断応力 - せん断ひずみ関係

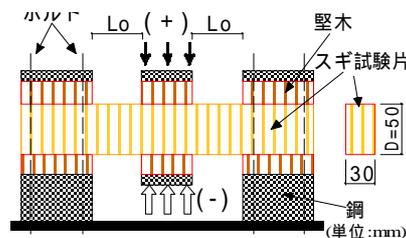


図3 スギ試験片のせん断加力

小型の鉄筋スギ集成材(E65-225)のミナのせん断繰り返し加力を行い、疲労特性を明らかにした。既往の枠付きパネルの累積消費エネルギー量を基準化した疲労特性の評価方法を修正して、鉄筋集成材のせん断疲労破壊のS-N曲線を誘導した。繰り返しループの消費エネルギー量の低下率と繰り返し回数の関係を関数で表して、応力比が99%から50%の無限回数までのS-N曲線を誘導した。図4に示すように、その誘導したS-N曲線により、繰返し疲労破壊の破壊回数を説明できた。また、疲労破壊する応力レベルに対する安全側のS-N曲線も提示した。このほか時刻歴応答解析を行い、代表的な観測地震時の繰返し回数を明らかにして、具体的な計算例も示した。

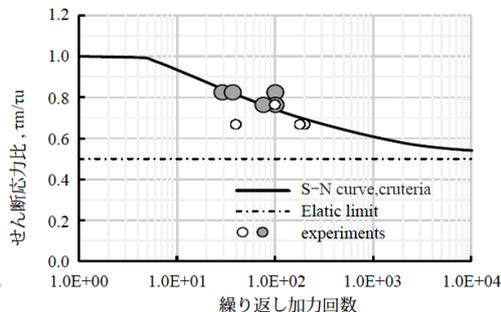


図4 鉄筋集成材のせん断応力の繰返し加力の推定S-N曲線とデータ

(2) 梁端が曲げ降伏する梁の弾塑性性状と履歴ループを評価する解析モデルの解明

[梁端の曲げモーメントを抑制する方法]

図5に梁の試験体の形状と寸法を示す。両端に柱部分を接合している。縮尺は1/2である。梁の応力と変形の状態は図1の骨組が地震により水平力を受ける場合になるように加力を行っている。両側の梁端では、上端の接合筋に対して下端の接合筋の断面積を小さくして、下端の接合筋だけが降伏するようにしている。これにより柱梁の接合部のせん断応力が大きくなることを抑制して、柱梁接合部のせん断破壊を防止して、更に地震後の梁の長期たわみも抑制することも狙いとされている。

[繰り返し曲げせん断加力実験]

材質はスギ集成材でE65-F225とした。梁の曲げ筋は3本の異形鉄筋D13を配筋した。両側の梁端の下端の接合筋を降伏させてエネルギー吸収を促進させる工夫を施した。1/50rad. までは上端の接合筋は降伏させなかった。静的漸増繰り返し加力を行った。残留変形の抑制性能を調べる変形では最大応答後の振動を想定した準静的加力を行った。試験体4体とした。

図5に梁のせん断力 - 変形角関係の例を示す。青色の破線が実験値である。梁端の下端の接合筋が降伏して、エネルギー吸収を發揮して、二次剛性を發揮している。残留変形が抑制される性能も發揮された。鉄筋コンクリート構造の梁で發揮できない性能を發揮した。この梁のせん断力 - 変形角関係の履歴ループを、鉄筋コンクリート構造で用いられるマルチスプリングモデル(MSモデル)を用いて評価できるように、適用方法を開発した。その解析によるループを図6に赤い実線で示す。いずれも、精度よく評価できることが明らかになった。

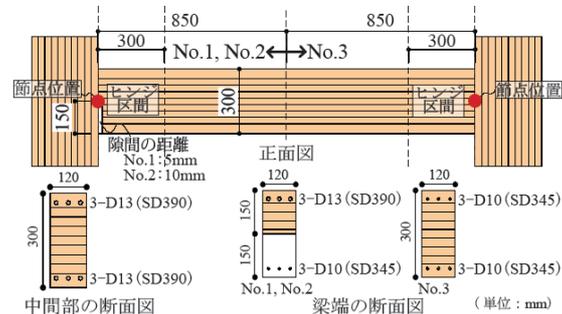


図5 梁端を曲げ降伏させる鉄筋集成材の梁の試験体

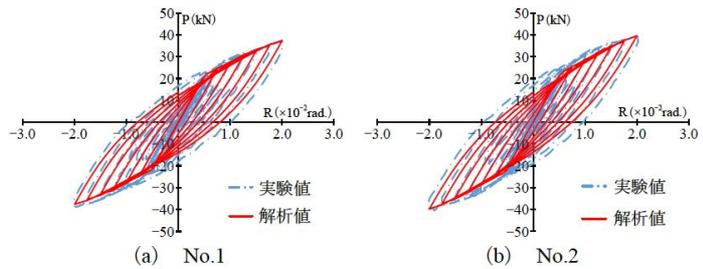


図6 梁のせん断力 - 部材角関係の実験値と計算値の比較

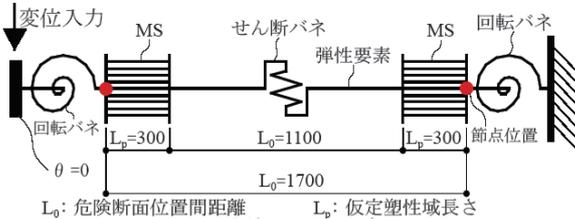


図7 せん断力 - 部材角関係の評価モデル

(3) 柱脚が曲げ降伏する柱の水平加力実験と限界変形の評価方法と数値解析モデルを検討する。

柱脚をRC基礎に接合して、柱脚が曲げ降伏する柱の水平加力実験を実施した。図8(a)に柱の試験体の形状と寸法を示す。柱は図8(b)の長方形断面とした。縮尺は2/3とした。柱主筋は全てD16とした。柱の軸力を、軸力比で10%~30%で3種類を設定した。

図12に水平荷重 - 部材角関係の例を示す。青色の破線が実験値である。柱脚の接合筋が降伏して、エネルギー吸収を發揮した。残留変形も抑制される性能も發揮された。鉄筋コンクリート構造の柱で發揮できない性能を發揮した。この柱のせん断力 - 変形角関係の履歴ループを、鉄筋コンクリート構造で用いられるマルチスプリングモデル(MSモデル)を用いて評価できる

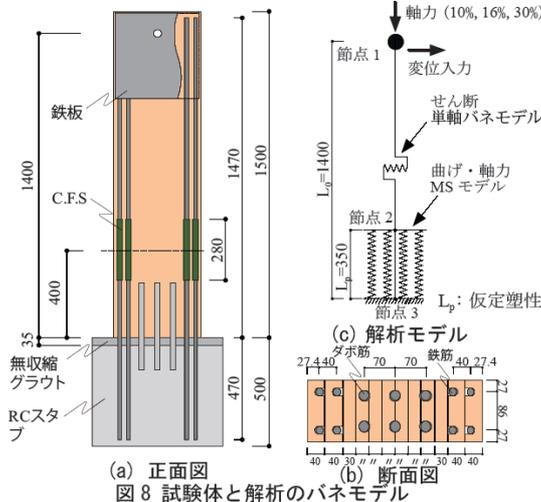


図8 試験体と解析のバネモデル

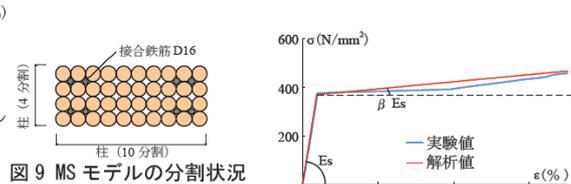


図9 MSモデルの分割状況

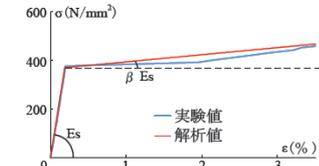


図10 D16の応力-ひずみ関係

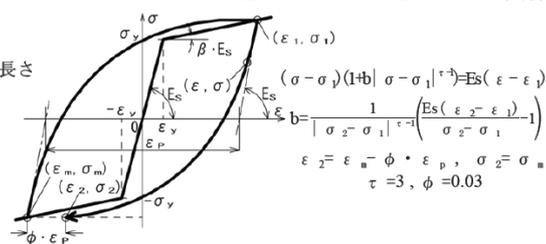


図11 Ramberg-Osgoodモデル

ように、適用方法を開発した。その解析によるループを図 12 に赤い実線で示す。いずれも、精度よく評価できることが明らかになった。

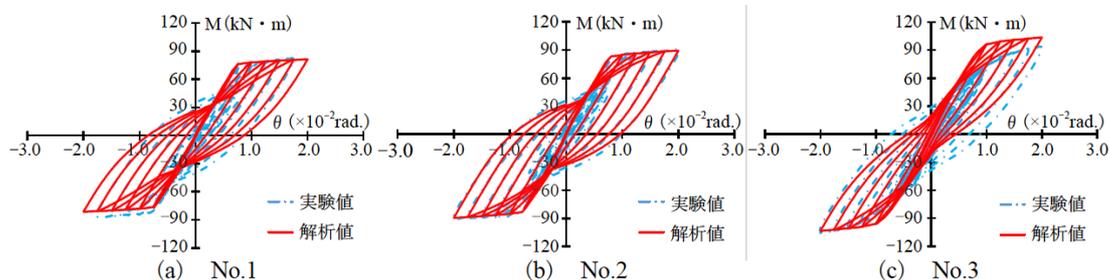


図 12 柱のせん断力 - 部材角関係の実験値と計算値の比較

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

塩屋晋二、鉄筋を複合する木質集成材梁の短期載荷時の曲げ性能と評価式、日本建築学会構造系論文、査読有、84 巻、2019、p.p.247 - 256 DOI: <http://doi.org/10.3130/aijs.84.247>

塩屋晋二、清水庸介、庄司秀雄、鉄筋を複合する木質集成材梁の短期載荷時の曲げ性能と評価式、日本建築学会構造系論文、査読有、84 巻、2019、p.p.257-266 DOI: <http://doi.org/10.3130/aijs.84.257>

Naruhiko FUKUTOMI, Shinichi SHIOYA, Design Method to Estimate Stiffness and Strength of Hybrid Timber-Steel Beams, World Conference on Timber Engineering, WCTE 2018 CD-ROM Proceedings, Seoul, Republic of Korea, 査読有,2018

Sayaka KIYOTO, Shinichi SHIOYA, Long - Term Testing of Timber-Steel Bar Hybrid Beams, World Conference on Timber Engineering, WCTE 2018 CD-ROM Proceedings, Seoul, Republic of Korea, 査読有,2018

Masahiko NISHITANI, Shinichi SHIOYA, Duration of Load Factor for Hybrid Timber-Steel Bar Beams, World Conference on Timber Engineering, WCTE 2018 CD-ROM Proceedings, Seoul, Republic of Korea, 査読有,2018

Takahiro IJU, Kazuaki OTSUKI, Naruhiko FUKUTOMI, Shinichi SHIOYA, Hybrid Timber - Steel Bar Beams Producing Energy Dissipation and Re-Centering, World Conference on Timber Engineering, WCTE 2018 CD-ROM Proceedings, Seoul, Republic of Korea, 査読有,2018

〔学会発表〕(計 21 件)

春口綱慶、大田崇央、伊集貴洋、福富成彦、塩屋晋二、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. 実験の概要、日本建築学会研究報告 九州支部、第 58 号、構造系、2019、pp.521-524

大田崇央、春口綱慶、伊集貴洋、福富成彦、塩屋晋二、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、日本建築学会研究報告 九州支部、第 58 号、構造系、2019、pp.525-528

伊集貴洋、塩屋晋二、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 3. マルチスプリングモデルによる柱の履歴特性の評価モデル、日本建築学会研究報告 九州支部、第 58 号、構造系、2019、pp.529-532

清藤彩、塩屋晋二、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 1. 曲げクリープに及ぼすせん断クリープの影響、日本建築学会研究報告 九州支部、第 58 号、構造系、2019、pp.533-536

清藤彩、塩屋晋二、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 2. せん断クリープが曲げクリープを促進させる現象の解析、日本建築学会研究報告 九州支部、第 58 号、構造系、2019、pp.537-540

清藤彩、塩屋晋二、鉄筋集成材の長期クリープ性能に関する研究 長期載荷と曲げクリープ係数の評価、日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北) 2018、構造系、p.p.279-280

西谷政彦、塩屋晋二、福富成彦、伊集貴洋、最大応答変形と残留変形を抑制する鉄筋集成材梁の曲げせん断加力実験 その 1. 下端スリット幅を広くした梁と上端筋と下端筋も降伏させる梁、日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北) 2018、構造系、p.p.281-282

福富成彦、塩屋晋二、西谷政彦、伊集貴洋、最大応答変形と残留変形を抑制する鉄筋集成材梁の曲げせん断加力実験 その 2. 梁端の曲げ性能とせん断性能と残留変形、日本建築学会大

会学術講演梗概集(東北) 2018、構造系、p.p.283-284

伊集貴洋、塩屋晋一、西谷政彦、福富成彦、最大応答変形と残留変形を抑制する鉄筋集成材梁の曲げせん断加力実験 その3. 梁端の曲げ性能とせん断力-変形角関係の包絡線の評価、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北) 2018、構造系、p.p.285-286

塩屋晋一、最大応答変形と残留変形を抑制する鉄筋集成材梁の曲げせん断加力実験 その4. マルチスプリングモデルによる梁の履歴特性の評価モデル、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北) 2018、構造系、p.p.287-288

福富成彦、塩屋晋一、伊集貴洋、大槻一晶、最大応答変形と残留変形を抑制する鉄筋集成材梁の曲げせん断加力実験 その1. 下端スリット幅を広くした梁と上端筋も降伏させる梁、日本建築学会研究報告九州支部、第57号、構造系、2018、pp.229-232

福富成彦、塩屋晋一、伊集貴洋、大槻一晶、最大応答変形と残留変形を抑制する鉄筋集成材梁の曲げせん断加力実験 その2. 鉄筋の低サイクル疲労試験と残留変形抑制およびエネルギー吸収性能、日本建築学会研究報告九州支部、第57号、構造系、2018、pp.233-236

伊集貴洋、大槻一晶、塩屋晋一、福富成彦、最大応答変形と残留変形を抑制する鉄筋集成材梁の曲げせん断加力実験 その3. 梁端の曲げ性能と梁のせん断性能及び変形角との包絡線の評価、日本建築学会研究報告九州支部、第57号、構造系、2018、pp.237-240

大槻一晶、塩屋晋一、最大応答変形と残留変形を抑制する鉄筋集成材梁の曲げせん断加力実験 その4. マルチスプリングモデルによる梁の履歴特性の評価モデル、日本建築学会研究報告九州支部、第57号、構造系、2018、pp.241-244

伊集貴洋、塩屋晋一、大槻一晶、内村孝兵、最大応答変形と残留変形を抑制する鉄筋集成材梁の曲げせん断加力実験 その1. 実験概要とせん断力-変形角関係および破壊状況、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国) 2017、構造系、p.p.17-18

大槻一晶、塩屋晋一、伊集貴洋、内村孝兵、最大応答変形と残留変形を抑制する鉄筋集成材梁の曲げせん断加力実験 その2. 梁端の曲げ性能とせん断性能、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国) 2017、構造系、p.p.19-20

内村孝兵、塩屋晋一、清藤 彩、鉄筋集成材のせん断強度に関する実験 その2. 疲労破壊する繰返し回数の評価モデルの構築、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国) 2017、構造系、p.p.143-144

伊集貴洋、塩屋晋一、大槻一晶、内村孝兵、最大応答変形と残留変形を抑制する鉄筋集成材梁の曲げせん断加力実験 その1. 実験概要とせん断力-変形角関係および破壊状況、日本建築学会研究報告九州支部、第56号、構造系、2017、pp.633-636

大槻一晶、塩屋晋一、伊集貴洋、内村孝兵、最大応答変形と残留変形を抑制する鉄筋集成材梁の曲げせん断加力実験 その2. 梁端の曲げ性能と梁のせん断性能およびエネルギー吸収、日本建築学会研究報告九州支部、第56号、構造系、2017、pp.637-640

内村孝兵、塩屋晋一、鉄筋集成材のせん断強度に関する実験、その1. せん断スパン長さの影響の検討、日本建築学会研究報告九州支部、第56号、構造系、2017、pp.641-644

②内村孝兵、塩屋晋一、鉄筋集成材のせん断強度に関する実験、その1. せん断スパン長さの影響の検討、日本建築学会研究報告九州支部、第56号、構造系、2017、pp.641-644

6. 研究組織

(1) 研究分担

該当なし

(2) 研究協力者

該当なし