

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06291

研究課題名(和文) 軸方向力と曲げモーメントが作用するH形鋼柱の塑性変形性能

研究課題名(英文) Deformation Capacity of the Beam-Column subjected to Axial Force with Bending Moment

研究代表者

佐藤 篤司 (Sato, Atsushi)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00362319

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では建物を支える鋼柱が、作用する鉛直力を保持した状態で確保できる塑性変形能力を実部材実験から明らかにした。また、有限要素法による数値シミュレーションも実施した。実験結果は日本建築学会が刊行する指針と比較を行い、設計指針が担保する性能と実験より確認した性能の比較を行った。現行指針との比較の結果、現行の設計規範は耐力および塑性変形能力において安全側の評価を与えることを確認し、実部材性能が設計では十分に活かされていないことを確認した。最終的に、H形鋼柱の応力状態に応じた適切な耐力評価法を示した。また、実験結果と解析結果の回帰分析から最大耐力評価式および塑性変形能力評価式を提案した。

研究成果の概要(英文)：The H-shape column that is subjected to the compressive axial force with the bending moment was testing in this study. Additionally, a numerical simulation that is using finite element method was also conducted. The structural performance of the H-shape column was compared with the design rules that are stipulated in the recommendation published from AIJ. From the comparison study, it can be recognized that the current design rules provided conservative results on strength and ductility; the actual structural performance of the H-shape column is not used in the design. Finally, the design rules to evaluate the strength of the column was shown; the formulae that can evaluate the strength and ductility were proposed from the regression analysis of the test and numerical results.

研究分野：建築構造

キーワード：H形鋼柱 最大曲げモーメント 塑性変形能力 崩壊形式 P モーメント 軸力比 曲げ座屈細長比 材端曲げモーメント比

### 1. 研究開始当初の背景

鋼構造建物の構造安全性は、骨組を構成する部材の耐力を確保することで担保されており、部材板要素の幅厚比(幅に対する板厚さの比率)、部材の細長比(材長に対する断面の曲がり難さの比率)区分などが設定されることで、耐力確保と同時に塑性化を許容する部材での塑性変形能力も確保している。構造部材の中で柱材は、重力によって構造物に作用する鉛直力を支持する部材であり、その鉛直支持能力を喪失した場合には建物の崩壊に直結することから極めて重要な部材と言える。日本で最も利用される柱と梁を剛節としたラーメン架構では、外力の作用により柱材には鉛直力による軸方向力と地震力などの水平力に抵抗するせん断力が同時に作用し、抵抗するせん断力に伴う曲げモーメントを受けることになる。極めて稀に発生する大地震による大きな水平力が建築構造物に作用する場合には、建物の崩壊を防止する意味で、軸方向力と曲げモーメントが同時に作用する柱材を適切に設計しておく必要があり、柱の塑性域での構造性能も明らかにしておく必要がある。

建物の終局限界における鋼柱の設計規範としては、日本建築学会が刊行した鋼構造限界状態設計指針(以降、LSD指針と称す)と鋼構造塑性設計指針(以降、塑性指針と称す)の2つが存在し、研究開始当時は、それぞれに異なった設計耐力式が示されており、構造設計者に混乱を与えている状態であった。また、2010年に改定されたLSD指針(最も新しい設計規範)では、実験結果に基づいた部材が担保できる塑性変形能力を明記していたが、限られた実験条件のデータの統計解析より得られた値であったことから、様々な応力状態にさらされる鋼柱の評価式としての妥当性については疑問が残っていた状態であった。

建物の構造部材の大きさは、建物コストに直結することから、構造部材本来の構造性能が適切に評価できる設計規範が必要であり、設計者が設定する安全性に見合った部材選定ができる設計式の構築は必要と言える。

### 2. 研究の目的

極めて稀に発生する大地震による大きな水平力が建物に作用する場合には、大きな軸方向力と曲げモーメントが柱材には作用する。作用する軸力の大きさ・部材中の曲げモーメント分布は、構造骨組全体との関係によって決まるため、柱は様々な応力状態に曝されていると言える。つまり、軸方向力と曲げモーメント分布が作用外力として変数となる。軸方向力と曲げモーメントの組み合わせを変数として実部材実験を実施し、鋼柱の構造性能を実験データとして収集することを第一の目的とする。

次に、実建物での構造部材は、設計規範に倣って設計者が決定するため、その設計規範

が構造部材の本来の構造性能を適切に評価できる必要がある。日本建築学会が刊行したLSD指針・塑性指針ではそれぞれ異なった設計規範が記述されているため、得られた実験データを分析することで、適切な設計規範の提案を試みることを目的とする。また、部材の構造性能を示す「最大耐力」「塑性変形能力」が定量的に評価可能な評価式の提案も試みる。なお、実験データには限りがあるため、データを補間するために、有限要素法解析を用いた数値シミュレーションを実施し、計算結果も同時にデータ分析することで、鋼柱の設計体系の構築を試みる。

### 3. 研究の方法

鋼柱に作用する外力は軸方向力と曲げモーメントであり、2つが実験変数となる。鋼柱の変数としては、断面形状と材長が存在するが、限られた期間を考慮し、断面形状はH形断面の1断面のみとし、材長を実験変数として実験を実施する。軸方向力は断面で決まる降伏軸力に対する比率で決定し、0.1~0.6の間で設定した。曲げモーメントについては、部材中の一次モーメント分布形状とし、一端曲げ(片曲げ)、逆対称曲げ、およびその中間的な曲げモーメント分布の3つを設定した。各フェーズでの実験では、材長を3種類設定した。したがって、1フェーズで想定される試験体数は最大 $6 \times 3 \times 3 = 54$ 体となるが、事前の数値シミュレーションに基づいて9~11体に試験体を絞り実験を実施した。各フェーズでの研究方法を以下に示す。

#### 1) フェーズ1(一端曲げ)

図1にH形断面鋼柱の試験体と現行指針との対応関係を示している。横軸は材長と断面形状で決まる曲げ座屈細長比、縦軸は降伏軸力に対する作用軸力の比である。全11体の試験体を計画した。本フェーズで実施する一端曲げとは、一方の材端に外力として曲げモーメントを作用させ、他端は回転を自由とした曲げモーメントゼロの応力状態である。現行指針を満たす試験体(太実線の内側)と満たさない試験体を計画した。現行指針を満たさない試験体は、断面形状で決まる耐力を確保することができず、かつ塑性変形能力が期待できない(数値として、3以下)部材と指針では定義されるものである。

#### 2) フェーズ2(逆対称曲げ)

図1と同様に現行指針を満たす試験体と満たさない試験体を計画した。全11体の試験体を計画した。本フェーズで実施する逆対称曲げとは、両材端に外力として同じ回転方向に同じ大きさの曲げモーメントを作用させた応力状態である。指針を満たす柱が担保できる性能は1)フェーズ1で示したものと同じである。

#### 3) フェーズ3(材端曲げモーメント比0.5)

図1と同様に現行指針を満たす試験体と満たさない試験体を計画した。全9体の試験体を計画した。本フェーズで実施する材端曲げ

モーメント比 0.5 とは、両材端に作用させる外力の曲げモーメントは向き同一であるが、その大きさの比率が 1:2 になっている応力状態である。指針を満たす柱が担保できる性能は 1) フェーズ 1 で示したものと同一である。

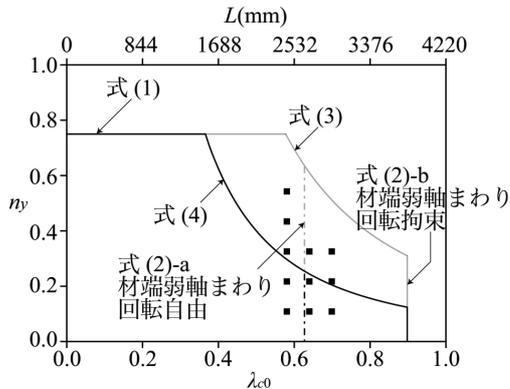


図 1 試験体と設計指針制限式との関係（一端曲げ）

#### 4. 研究成果

##### 1) フェーズ 1（一端曲げ）

図 2 に材端に作用させた曲げモーメントと材端に生じた回転角との関係を示している。両軸はそれぞれ基準となる全塑性モーメントとそれに対応する弾性回転角で無次元化されている。図 1 に示したように、曲げ座屈細長比 0.581 の試験体（最も短い試験体）は、高軸力の場合、指針が定める制限（太実線）を満たさない試験体である。指針制限を満たさない試験体は、基準である全塑性モーメントに到達しない試験体となるが、実験では図 2 に示すように、高軸力であっても、最大耐力は縦軸の 1.0 を超えており、基準となる耐力が確保できていた。

図 3 は縦軸に塑性変形能力（塑性変形できる程度）、横軸は軸力比を示している。現行指針では、指針制限を満たす（図 1 太実線よりも内側）ことで、塑性変形能力は 3 以上確保できるとしている。本実験では、指針を満たさない試験体であっても、指針が定める性能よりも大きな変形能力が確保できる領域があることを確認した。

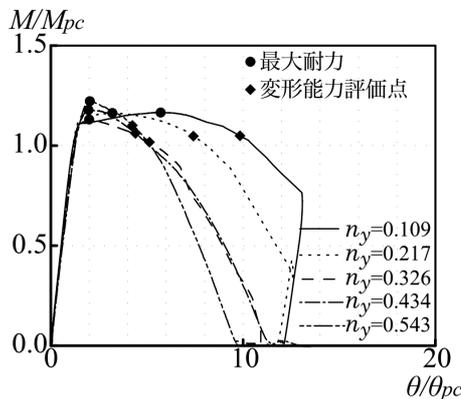


図 2 無次元化荷重変形関係（一端曲げ）

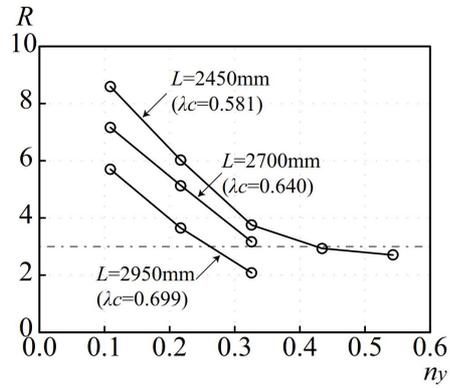


図 3 塑性変形能力（一端曲げ）

##### 2) フェーズ 2（逆対称曲げ）

図 4 に曲げモーメントを逆対称に作用させた場合の最大耐力と耐力式との関係を示している。太実線よりも外側に実験結果がプロットされれば、鋼柱は基準となる全塑性モーメントに到達したことを意味する。本実験においても、現行指針を満たさない柱を含めた実験であったが、すべての試験体において、鋼柱は断面の性能で決まる全塑性耐力（図中実線）が確保できた。

図 5 に部材の塑性変形能力を示しており、水平破線は現行指針を満たすことで担保できる変形能力の下限値である。図に示すように、縦破線の制限式を超える試験体であっても、指針下限値の性能を十分に満たすことが確認できた。

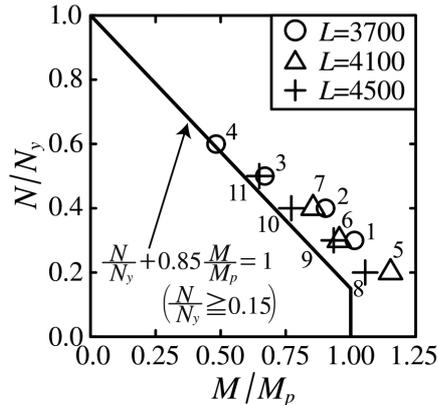


図 4 最大曲げ耐力（逆対称曲げ）

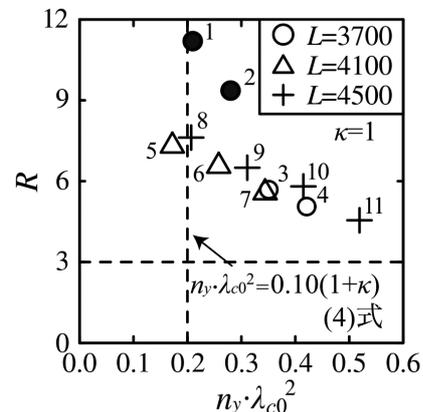


図 5 塑性変形能力（逆対称曲げ）

### 3) フェーズ3(材端曲げモーメント比0.5)

図6に曲げモーメントを1:2の比率で作用させた場合の最大耐力と耐力式との関係を示している。太実線よりも外側に実験結果がプロットされれば、鋼柱は基準となる全塑性モーメントに到達したことを意味する。本実験においても、現行指針を満たさない柱を含めた実験であったが、すべての試験体において、鋼柱は断面の性能で決まる全塑性耐力(図中実線)が確保できた。

図7に部材の塑性変形能力を示しており、水平破線は現行指針を満たすことで担保できる変形能力の下限値である。図に示すように、縦破線の制限式を超える試験体であっても(制限を大きく外れた試験体を除く)、鋼柱は指針下限値の性能を十分に満たすことが確認できた。

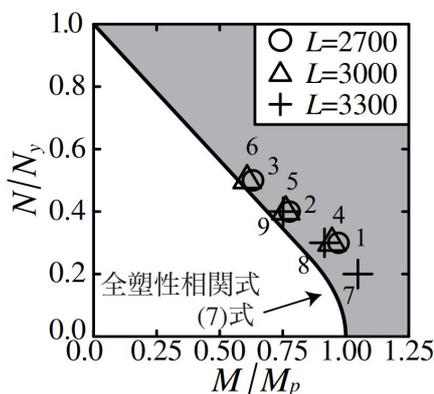


図6 最大曲げ耐力(材端曲げモーメント比0.5)

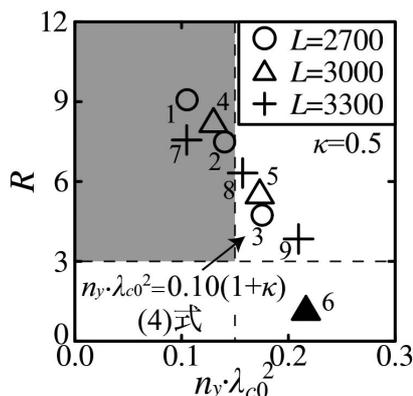


図7 塑性変形能力(材端曲げモーメント比0.5)

以上の3フェーズより、曲げモーメント分布が逆対称曲げに近づくほど、塑性変形能力を見た場合、現行指針は安全側の評価を与えることを確認した。これは、現行指針の設計式がフェーズ1の応力状態の実験結果に基づいて導出されたことに起因しており、その他の応力状態に対応していないためである。

最終的に、上記の結果を踏まえて、鋼柱の応力状態、材長、強度を考慮した最大耐力及び塑性変形能力の評価式を実験結果および数値解析結果の回帰分析から導出し、より部材の実性能を評価できる提案を行った。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計10件)

佐藤篤司, 三井和也: 軸方向圧縮力と一端単調曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 81, No.729, pp. 1933-1943, 2016 (査読あり)

DOI:<http://dx.doi.org/10.3130/aijs.81.1933>

佐藤篤司, 青山雅弘, 小野徹郎: 軸方向力と一端曲げモーメントを受けるH形鋼柱の耐力評価, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 24, pp814-821, 2016 (査読あり)

佐藤篤司, 三井和也: 軸方向圧縮力と単調逆対称曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 82, No.732, pp. 267-277, 2017 (査読あり)

DOI:<http://dx.doi.org/10.3130/aijs.82.267>

佐藤篤司, 三井和也: 軸方向圧縮力と繰返し一端曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 82, No.735, pp. 701-711, 2017 (査読あり)

DOI:<http://dx.doi.org/10.3130/aijs.82.701>

佐藤篤司, 三井和也, 青山雅弘: 初期不整が軸方向圧縮力と一端単調曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の弾塑性挙動に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 82, No.736, pp. 929-939, 2017 (査読あり)

DOI:<http://dx.doi.org/10.3130/aijs.82.929>

Masahiro Aoyama, Kazuya Mitsui, Atsushi Sato: Experiment study on square steel tubular columns: Under compressive axial force with monotonic antisymmetric bending moment, *The 8th European Conference on Steel and Composite Structures*, Vol. 1, pp. 1096-1105, 2017 (査読あり)

DOI:<http://dx.doi.org/10.1002/cepa.150>

Kazuya Mitsui, Atsushi Sato, Masahiro Aoyama: Effect of initial imperfection on elasto-plastic behavior of SHS columns under axial force with bending moment, *The 8th European Conference on Steel and Composite Structures*, Vol. 1, pp. 1123-1132, 2017 (査読あり)

DOI:<http://dx.doi.org/10.1002/cepa.153>

Atsushi Sato, Tetsuro Ono: Deformation capacity of steel column under combined loading: Compressive axial force with double curvature bending moment, *The 8th European Conference on Steel and Composite Structures*, Vol. 1, pp. 1275-1284, 2017 (査読あり)

DOI:<http://dx.doi.org/10.1002/cepa.169>

Kazuya Mitsui, Atsushi Sato, Massimo Latour, Vincenzo Piluso, Gianvittorio

Rizzano: Experimental analysis and FE modeling of square hollow sections under combined axial and bending loads, *The 8th European Conference on Steel and Composite Structures*, Vol. 1, pp. 4732-4739, 2017 (査読あり)

DOI:<http://dx.doi.org/10.1002/cepa.535>

佐藤篤司, 位田健太, 三井和也: 軸方向圧縮力と単調複曲率曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の実験的研究 材端曲げモーメントを 0.5 とした場合, *日本建築学会構造系論文集*, Vol. 83, No.739, pp. 739-749, 2018 (査読あり)

DOI:<http://dx.doi.org/10.3130/aijs.83.739>

[学会発表](計 26 件)

山田隼地, 佐藤篤司, 小野徹郎: H 形断面鋼柱の塑性変形能力に材端部の境界条件が及ぼす影響, 2015 年度日本建築学会東海支部研究報告, 2016 年 2 月 22 日~2 月 23 日, 名古屋大学

青山雅弘, 佐藤篤司, 小野徹郎, 山田隼地: 軸方向力と曲げモーメントが作用する H 形鋼部材の耐力評価, 2015 年度日本建築学会東海支部研究報告, 2016 年 2 月 22 日~2 月 23 日, 名古屋大学

三井和也, 佐藤篤司, 小野徹郎: 一定軸力下で曲げを受ける角形鋼管柱の弾塑性挙動, 2015 年度日本建築学会東海支部研究報告, 2016 年 2 月 22 日~2 月 23 日, 名古屋大学

佐藤篤司: 圧縮軸力と強軸まわりに曲げモーメントを受ける H 形断面柱の曲げ面内挙動, 2015 年度日本建築学会東海支部研究報告, 2016 年 2 月 22 日~2 月 23 日, 名古屋大学

佐藤篤司: 圧縮軸力と強軸まわりに曲げモーメントを受ける H 形断面柱の曲げ面内挙動, 2015 年度日本建築学会九州支部研究報告, 2016 年 3 月 3 日, 琉球大学

山田隼地, 佐藤篤司, 小野徹郎: 軸力と曲げモーメントを受ける鋼柱の座屈実験装置, 2015 年度日本建築学会大会(関東), 2015 年 9 月 4 日~9 月 6 日, 東海大学

山田風人, 三井和也, 佐藤篤司: 圧縮軸力と曲げモーメントを受ける角形鋼管柱に関する研究, 2016 年度日本建築学会大会(九州), 2016 年 8 月 24 日~8 月 26 日, 福岡大学

三井和也, 佐藤篤司: 圧縮軸力と曲げモーメントを受ける角形鋼管柱に関する研究 その 2 実験結果の考察, 2016 年度日本建築学会大会(九州), 2016 年 8 月 24 日~8 月 26 日, 福岡大学

熊谷真伍, 山田隼地, 佐藤篤司, 小野徹郎: 圧縮軸力と一端曲げモーメントを受ける H 形鋼柱に関する実験的研究 その 1 実験概要と変形形状, 2016 年度日本建築学会大会(九州), 2016 年 8 月 24 日

~8 月 26 日, 福岡大学

山田隼地, 佐藤篤司, 小野徹郎: 圧縮軸力と一端曲げモーメントを受ける H 形鋼柱に関する実験的研究 その 2 単調載荷時の実験結果, 2016 年度日本建築学会大会(九州), 2016 年 8 月 24 日~8 月 26 日, 福岡大学

小野徹郎, 山田隼地, 佐藤篤司: 圧縮軸力と一端曲げモーメントを受ける H 形鋼柱に関する実験的研究 その 3 繰返し載荷時の実験結果, 2016 年度日本建築学会大会(九州), 2016 年 8 月 24 日~8 月 26 日, 福岡大学

青山雅弘, 佐藤篤司, 小野徹郎: 軸方向力と曲げモーメントが作用する H 形鋼部材の耐力評価, 2016 年度日本建築学会大会(九州), 2016 年 8 月 24 日~8 月 26 日, 福岡大学

佐藤篤司: 圧縮軸力と強軸まわりに曲げモーメントを受ける H 形断面柱の曲げ面内の塑性変形能力, 2016 年度日本建築学会大会(九州), 2016 年 8 月 24 日~8 月 26 日, 福岡大学

青山雅弘, 佐藤篤司, 小野徹郎: 軸方向圧縮力と単調逆対称曲げモーメントを受ける H 形鋼柱の実験的研究, 2016 年度日本建築学会東海支部研究報告, 2017 年 2 月 20 日~2 月 21 日, 名古屋工業大学

三井和也, 佐藤篤司: 一定軸力下で繰返し一端曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の弾塑性挙動, 2016 年度日本建築学会東海支部研究報告, 2017 年 2 月 20 日~2 月 21 日, 名古屋工業大学

三井和也, 佐藤篤司: 一定軸力下で単調逆対称曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の弾塑性挙動, 2016 年度日本建築学会東海支部研究報告, 2017 年 2 月 20 日~2 月 21 日, 名古屋工業大学

三井和也, 佐藤篤司: 初期不整が一定軸力下で一端単調曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の弾塑性挙動に与える影響, 2016 年度日本建築学会東海支部研究報告, 2017 年 2 月 20 日~2 月 21 日, 名古屋工業大学

Kazuya MITSUI, Atsushi SATO: Study on Deformation Capacity of Square Steel Tubular Columns, *The International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures*, 2016 年 5 月 30 日~6 月 1 日, Timisoara, Romania

Atsushi SATO, Kazuya MITSUI: The effect of steel properties on deformation capacity of HSS column, *The International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures*, 2016 年 6 月 15 日~6 月 17 日, Zielona Gora, Poland

青山雅弘, 佐藤篤司, 小野徹郎: 軸方向圧縮力と単調逆対称曲げモーメントを受ける H 鋼柱の実験的研究, 2017 年度日本建築学会大会(中国), 2016 年 8 月 31 日

- ~9月3日, 広島工業大学
- 21 三井和也、佐藤篤司、位田健太：圧縮軸力と曲げモーメントを受ける角形鋼管柱に関する研究 その3 繰返し一端曲げ実験, 2017年度日本建築学会大会(中国), 2016年8月31日~9月3日, 広島工業大学
  - 22 位田健太、三井和也、佐藤篤司：圧縮軸力と曲げモーメントを受ける角形鋼管柱に関する研究 その4 単調逆対称曲げ実験, 2017年度日本建築学会大会(中国), 2016年8月31日~9月3日, 広島工業大学
  - 23 位田健太、三井和也、佐藤篤司：圧縮軸力と曲げモーメントを受ける角形鋼管柱に関する研究 その4 単調逆対称曲げ実験, 2017年度日本建築学会大会(中国), 2016年8月31日~9月3日, 広島工業大学
  - 24 位田健太、佐藤篤司、三井和也：軸方向圧縮力と単調複曲率曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の弾塑性挙動 材端曲げモーメント比を0.5とした場合, 2017年度日本建築学会東海支部研究報告, 2018年2月20日~2月21日, 名古屋大学
  - 25 小野木武司、佐藤篤司：軸方向圧縮力と2軸曲げモーメントを受ける正方形中空断面鋼柱の構造性能評価, 2017年度日本建築学会東海支部研究報告, 2018年2月20日~2月21日, 名古屋大学
  - 26 青山雅弘、佐藤篤司、小野徹郎：軸方向圧縮力と単調複曲率曲げモーメントを受けるH形鋼柱の実験的研究 材端曲げモーメント比を0.5とした場合, 2017年度日本建築学会東海支部研究報告, 2018年2月20日~2月21日, 名古屋大学

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐藤 篤司 (SATO, Atsushi)

名古屋工業大学大学院・工学研究科・准教授

研究者番号：00362319

### (4) 研究協力者

1) 小野 徹郎 (ONO, Tetsuro)

名古屋工業大学・名誉教授

2) Chia-Ming Uang (UANG, Chia-Ming)