

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 6 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04944

研究課題名（和文）二方向地震動入力を受ける軸力比の高い鋼柱部材を有する鋼構造骨組の崩壊機構の解明

研究課題名（英文）Collapse mechanism of steel moment frames with columns under high axial load subjected to bi-directional ground motions

研究代表者

松井 良太 (Matsui, Ryota)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：00624397

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,000,000 円

研究成果の概要（和文）：都市基盤上極めて重要性の高い施設の一つである火力発電プラントでは、重量物のボイラーを支持するために、他の構造形式では見られない高い軸力が鋼柱材に作用する。本研究では、この高い軸力が作用した状態で、繰返し水平力を受ける鋼柱材の耐力および変形性能について、部材実験より検証した。シェル要素などを用いた有限要素解析よりも相対的に少ない要素数で鋼柱材を構成した数値モデルである、一次元部材モデルにより、鋼柱材の挙動を再現できた。同モデルを地震応答解析プログラムに組み込み、鋼構造骨組の耐震性能を、検証できる枠組みを構築した。実大4層鋼構造骨組の振動台実験結果より、同プログラムの有効性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究より、これまで未解明であった、高い軸力が作用した鋼柱材の耐震性能が、一次元部材モデルにより分析し得ることが明らかとなった。本研究で構築した一次元部材モデルは、火力発電プラントのみならず、他形式の鋼構造骨組にも適用可能と考えられる。一次元部材モデルは、有限要素解析より相対的に少ない計算量で、有限要素解析と同等に鋼柱材の挙動が分析できた。本研究で提案した手法を用いることにより、要素数の多い立体鋼構造骨組を迅速に検証できるようになり、都市基盤上重要な施設の耐震安全性を向上させることが期待される。

研究成果の概要（英文）：A facility for thermal power generation is one of the most important urban infrastructures. Steel structures are typically used for the facility. This kind of facilities necessary to support heavy masses such as a boiler, which in turn lead to high axial load of steel columns. This study presents the strength and ductility of the steel columns subjected to high axial load based on physical tests of members. A phenomenological fiber element was proposed to reproduce the local buckling-induced softening of those steel columns reasonably. The number of elements of the phenomenological fiber element was relatively less than that of the finite element analysis with shell elements. A numerical program for time history response analysis was developed using the phenomenological fiber element to assess the seismic performance of the facilities with heavy masses. The program was validated by a past shake table test of a 4-story steel moment frame including local buckling-induced softening.

研究分野：建築構造

キーワード：柱材 局部座屈 高軸力比 載荷実験 数値モデル 塑性変形性能 崩壊解析 地震応答

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初のみならず、現在においても、2016年4月に発生した熊本地震をはじめとし、近年地震動の大きさは上昇傾向にある。このような状況を受け内閣府は、検討会を構成し、従来の設計で想定されてきた大きさを上回る長周期地震動が、今後30年以内に70パーセント程度という確率で南海トラフ沿いの地域において発生する可能性があるとして報告していた。また経済産業省は、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では広域停電が発生しており、最大停電戸数は約466万戸、地震発生後3日間が経過しても20%程度の停電を未解消であったことが報告していた。災害発生後の防災拠点となり得る病院等の多量の電力を要する施設で、電力が逼迫することなどが懸念された。このような、都市基盤上極めて重要性の高い火力発電プラントなどの施設では、大型で重量の大きい設備を支持するブレース付骨組が必要となる。同ブレース付骨組では高い軸力が鋼柱部材に作用するが、同部材の局部的に大きく変形し耐力が劣化する局部座屈等を含めた挙動については殆ど検証されていない状況であった。そのため、高い軸力が作用した鋼柱部材の復元力特性を適切に表現し得る比較的簡易な数値解析プログラムを構築し、鋼構造骨組の耐震性能を迅速に評価できる仕組みを確立することが急務とされていた。

2. 研究の目的

火力発電プラント等において発電機等を支持する大型重プラント架構にはブレース付鋼構造骨組が多用されている。現行の設計規基準の想定を超えた大地震が発生した場合には、高い軸力が作用した柱材が繰返し曲げを受けるため、柱材の限界状態の把握が肝要である。本研究課題では、高い軸力が作用した鋼柱材が繰返し曲げを受けた場合における終局限界性能を実験的に把握し、鋼構造骨組の耐震性能にどのような影響を与えるか数値解析により検証することを目標とした。

3. 研究の方法

わが国で頻繁に用いられるH形鋼および角形鋼管の2種類の断面を有する鋼柱材を対象に、高い軸力が作用した鋼柱材の限界性能を検証することとした。大きく分けて研究方法は、柱材単体を対象とした載荷実験と、鋼構造骨組を対象とした数値解析シミュレーションとした。なお、高い軸力とは鋼柱材の引張降伏耐力と比較して相対的に0.8倍程度の軸力を指す。以降、簡潔のため、高い軸力が作用した鋼柱材のことを、高軸力比の鋼柱材と称し、各項目について概説する。

(1) 高軸力比の鋼柱材を対象とした繰返し曲げ載荷実験

鋼柱材の細長比を成るべく一定に保持し、断面の幅に対する厚さの比、加力する向きに対する断面の方向を変化させ、12体のH形鋼柱と、7体の角形鋼管柱の試験体を製作した。角形鋼管柱の細長比をH形鋼柱と揃え、角形鋼管柱の幅厚比は相対的に大きく設計した。試験機で鋼柱材に高軸力を作用できるサイズは、最大で実大の1/6倍程度であった。柱材の厚さが薄いと、実寸大とは異なる力学的な挙動を示す可能性があり、試験機で加力できる範囲で最大となる実大の1/3倍程度の低軸力比の試験体も用意した。図1に鋼柱材の載荷実験セットアップを示す。ピンを介して試験体の上部を反力梁に接合することで水平移動を拘束し、下部を振動台に接合することで水平方向に強制的に変形させることで加力した。試験体の耐力が顕著に劣化するまで、図中に示した正負の水平方向に、繰返し加力した。

(2) 一次元部材モデルによる高軸力比の鋼柱材の応答のモデル化

高軸力比の鋼柱材が水平力を受け局部座屈すると、低軸力が作用した鋼柱材よりも、塑性化する範囲が軸方向に広がる傾向がある。この塑性化する範囲が拡大する挙動を捉えるため、図2に示すようなファイバー要素で構成された一次元部材モデルで、高軸力比の鋼柱材の応答を追跡することを試みた。一次元部材モデルでは、図3に示す応力-歪関係をファイバー要素に組み込むことで、局部座屈による耐力劣化を表現している。この一次元部材モデルで、高軸力比の鋼柱材を対象とした繰返し曲げ載荷実験の再現を試みた。載荷実験で測定しきれない応力や歪等の応答については、図4に示すような有限要素解析により分析し、一次元部材モデルとの対応を確認した。

(3) 一次元部材モデルを用いた鋼構造骨組の耐震性能検証

鋼柱材単体と比較して妥当性を検証した一次元部材モデルを用いて、時刻歴応答解析プログラムを構築した。同プログラムを用いて、図5に示すような火力発電プラントの地震応答を分析した。火力発電プラントでは、ボイラーなどの重量物を支持するため、柱材に大きな軸力が作用しているものと仮定して、構造モデルの重量配分を決

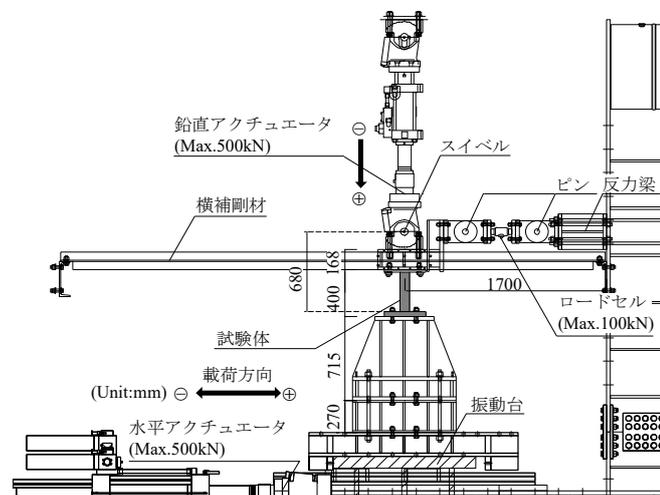


図1 鋼柱材の載荷実験セットアップ

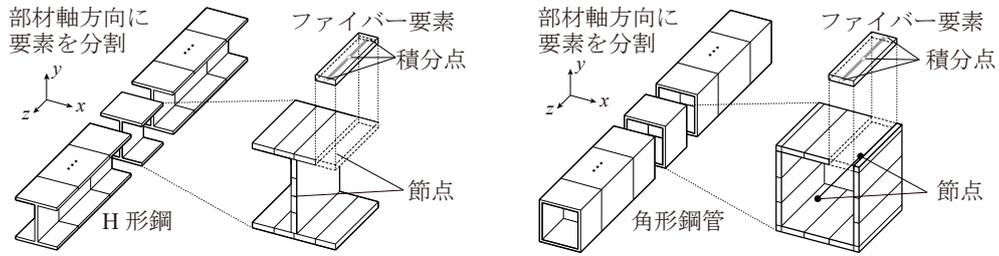


図2 1次元部材モデル

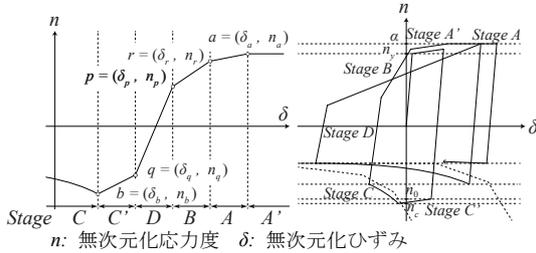


図3 ファイバーの応力-歪関係

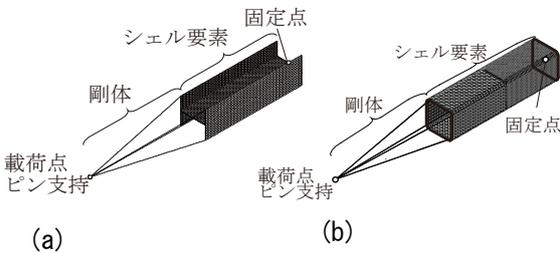


図4 有限要素解析モデル (a)H形; (b)角形

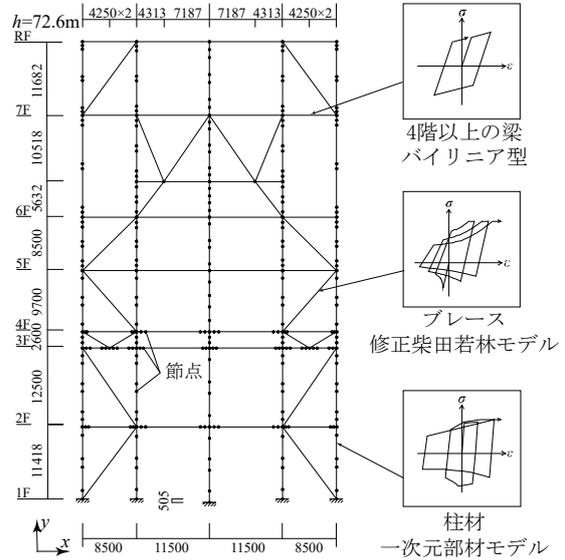


図5 火力発電プラントの構造モデル

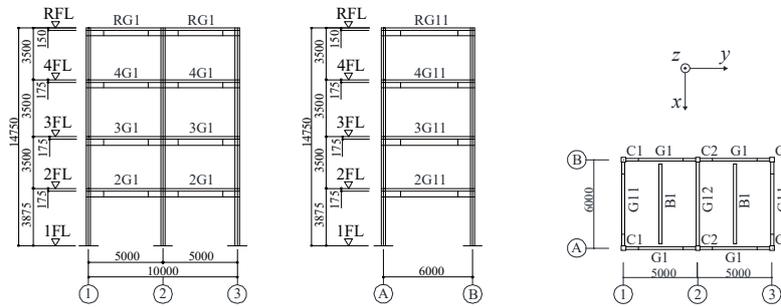


図6 振動台実験に採用された実大4層鋼構造骨組

定した。柱材には、本研究課題で検証した一次元部材モデルを適用した。既往の研究を参照し、梁材にはバイリニア型モデル、ブレースには柴田-若林モデルを適用し、弾塑性の荷重-変形関係を構成した。入力地震動には、日本建築センターが配布しているBCJ-L2を用いた。次いで、文献①を参考に、図6に示す2009年にE-defenseで実施された実大4層の鋼構造骨組の崩壊実験を、図7に示す構造モデルで再現を試みた。一次元部材モデルを柱材に適用し、4層骨組を構造モデル化した。柱材の応答を十分に追跡できたことから、図7に示すように柱材端および材中央を柱幅相当として要素分割した。

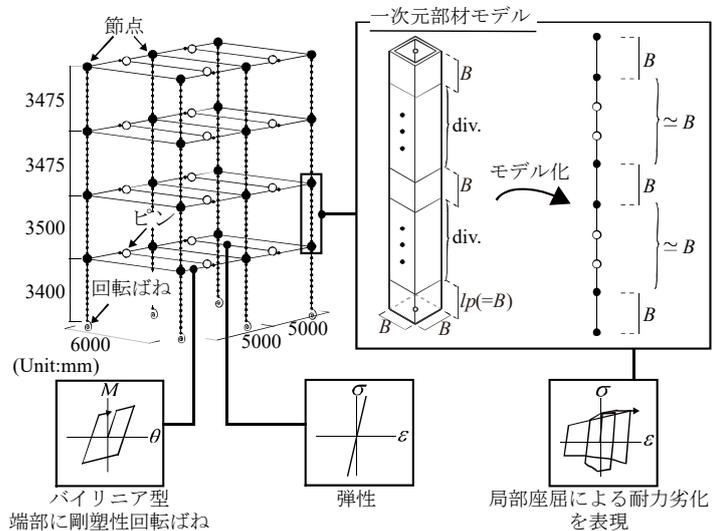


図7 実大4層鋼構造骨組の構造モデル化

4. 研究成果

(1) 繰返し曲げ高軸力比の鋼柱材の耐力と塑性変形性能

図 8(a), (b)に、軸力を受けていない H 形鋼柱材の曲げ-部材回転角関係を示す。なお、試験機の構成により生じた付加的な荷重は補正した。試験体の曲げ剛性および耐力が、最も大きくなる 0° 方向に水平力を加力した。図中には断面のせいは等しく板厚が異なる 2 体の試験体の結果を示している。幅厚比が小さい試験体の方が、小さい試験体より大きな耐力を示す。幅厚比が大きいのほうが、早期に局部座屈により耐力が劣化し始めた。図 8(b)中の大小は、幅厚比の大小を意味している。1/3 倍の試験体における耐力の劣化度合いと耐力計算値の比は、1/6 倍の場合と同程度であった。いずれの試験体も、鋼材がひずみ硬化することにより、設計で用いる耐力計算値より高い最大耐力を発揮した。これより、1/6 倍の試験体で、高軸力比の鋼柱材の耐力が劣化する挙動を捉えられと見なした。図 8(c), (d)に、1/6 倍の高軸力比の鋼柱材を対象に、曲げ-部材回転角関係を示す。図 8(a)の軸力を作用させていない場合の結果と、図 8(c)を比較すると、 0.005 rad 程度から耐力が劣化し始めていたことが分かる。幅厚比の大小にかかわらず、局部座屈は 0.01 rad 程度の変形で発生した。 0.02 rad まで変形すると、試験体の曲げ耐力は 0 に近い値となり、設計上の耐力計算値を下回るほど劣化した。図 8(d)は、試験体に加力した水平力の方向を、 0° から 45° 、 90° と変化させた場合の結果を示している。 45° 、 90° 方向に加力した場合、局部座屈は生じることなく、 0.02 rad まで変形させても耐力は最大耐力の 7 割程度まで劣化に抑えられ、耐力計算値を上回った。

図 9 に高軸力比の角形鋼管柱材の曲げ-部材回転角関係を示す。図中から、加力方向が応答に与える影響は小さく、 0° 、 45° に加力した両試験体とも局部座屈を生じた。角形鋼管柱の幅厚比は H 形鋼柱より小さく、 $1/100 \text{ rad}$ 程度で局部座屈を生じた。H 形鋼柱と比較し、角形鋼管柱では局部座屈後の耐力はより顕著に劣化した。

図 10 に載荷実験が終了した後の、試験体の変形状況を示す。図 10(a)の板厚が大きい試験体では、材端から離れた中央付近で局部座屈が生じており、塑性化領域が拡大していることが分かる。図 10(b)は板厚が小さい試験体であるが、水平抵抗力が失われた後に、軸力を支持できず軸方向に大きく変形した。

(2) 一次元部材モデルによる高軸力比の鋼柱材の応答

図 2 に示した一次元部材モデルと、図 3 に示した有限要素解析モデルで、図 8, 9 に示した高軸力比の鋼柱材の力学挙動を再現した。図 11 に、再現解析結果の一例を示す。一次元部材モデ

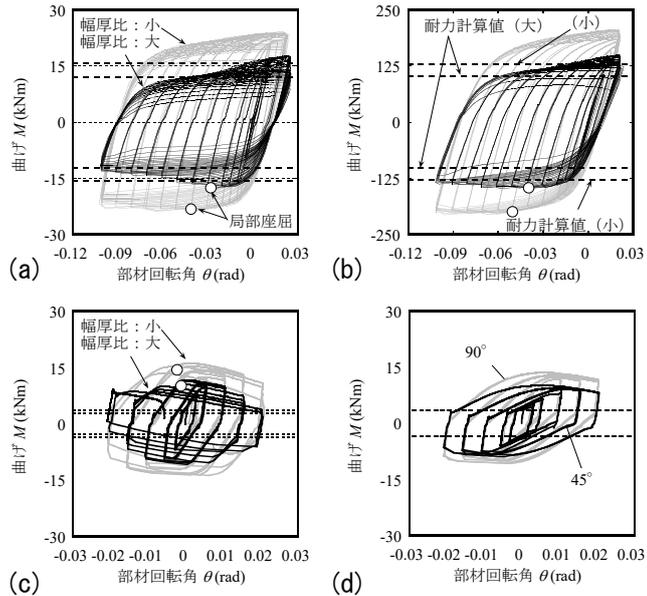


図 8 H 形鋼柱材の実験結果

- (a) 1/6 倍, 軸力無, 0° ; (b) 1/3 倍, 軸力無, 0°
(c) 1/6 倍, 高軸力比, 0° ; (d) 1/6 倍, 高軸力比

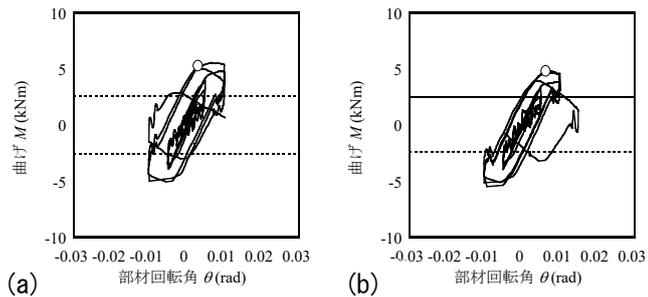


図 9 角形鋼管柱材の実験結果, 1/6 倍

- (a) 高軸力比, 0° ; (b) 高軸力比, 45°

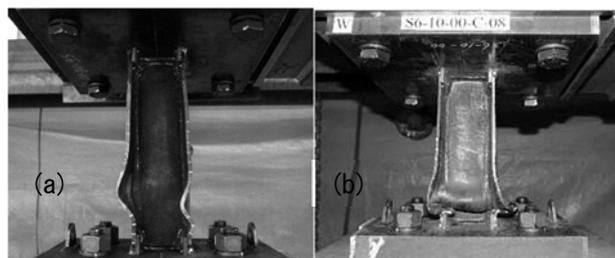


図 10 試験体変形状況 (a) 幅厚比小; (b) 大

ル、有限要素モデルの方が、実験結果より早期に耐力が劣化した。一次元部材モデルは、有限要素モデルの局部座屈発生時期および耐力劣化挙動と良く対応した。H形鋼柱では、細長比 50~60 程度、幅厚比 7.5~10、軸力比 0~0.8 の範囲、角形鋼管柱では、細長比 43 程度、幅厚比 25~35、軸力比 0.2~0.8 の範囲において、一次元部材モデルと実験結果との対応関係を確認した。いずれの試験体においても、実験結果と一次元部材モデルの対応関係は、図 11 とほぼ同様であった。

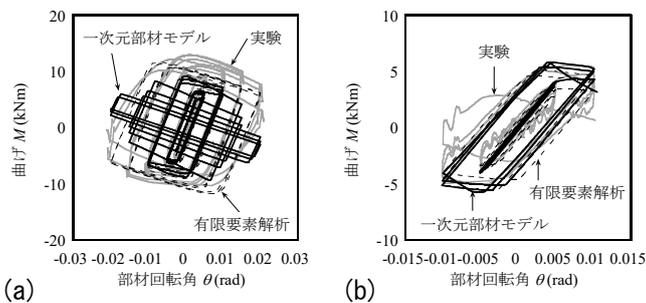


図 11 高軸力比の鋼柱材の再現解析結果

(a)H 形; (b)角形

(3) 一次元部材モデルを用いた鋼構造骨組の地震応答解析

図 12 に、地震動の強さと、図 5 の火力発電プラントの最大層変形角との対応関係を示す。図中には、柱材に一次元部材モデルを用いて局部座屈を考慮する場合と、バイリニア型モデルを用いて局部座屈を考慮しない場合と併せて示す。両者とも、地震動の強さが大きいと、層変形角は大きい。地震動の強さが 2.5 より大きい範囲で、局部座屈を考慮した場合、地震動の強さの増分に対する層変形角の増分の割合が大きくなる地震動の強さが、非考慮の場合よりも小さいことが分かる。図 13 に、地震動の強さが 3.0 の場合における、火力発電プラントの変位応答を示す。局部座屈の考慮/非考慮により、座屈、破断などの損傷状況が変化することを確認した。

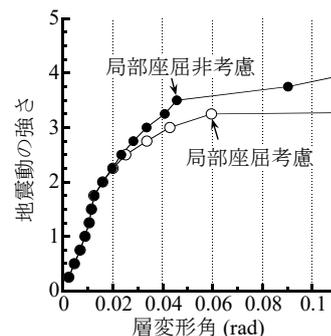


図 12 IDA カーブ

図 14 に、振動台で模擬した地震動を受けた 4 層骨組の 2 方向の層変形角応答を示す。解析結果は、実験結果の 2 方向の変位応答を良く捉えた。

以上より、本課題で提案した一次元部材モデルを用いて、局部座屈などの耐力劣化を考慮しつつ、二方向地震動入力を受ける鋼構造骨組の地震応答を検証できるようになったことが明らかになった。

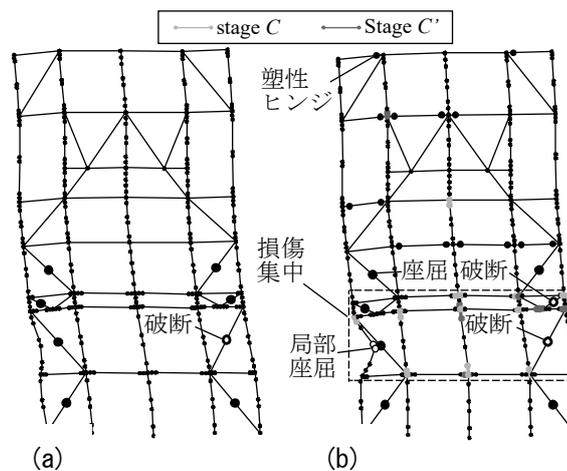


図 13 変位応答 (a)局部座屈考慮; (b)非考慮

<引用文献>

- ① 山田哲, 吹田啓一郎, 松岡祐一, 島田侑子: 震動台実験における弾塑性応答特性と崩壊メカニズムの形成 - 実大 4 層鉄骨造建物の完全崩壊実験 その 2 - , 日本建築学会構造系論文集, 第 74 巻, 第 644 号, pp. 1851-1859, 2009. 10

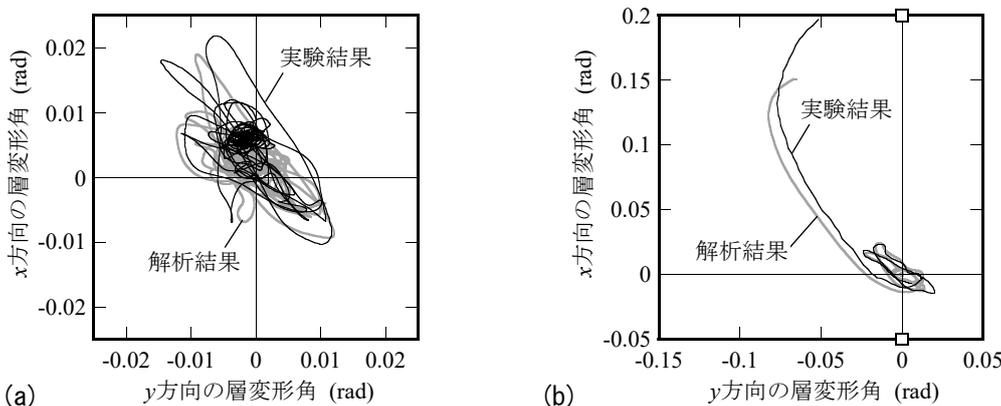


図 14 実大 4 層鋼構造骨組の応答 (a) 60%入力; (b) 100%入力

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 松井良太, 橋本舟海, 竹内徹	4. 巻 84巻
2. 論文標題 高軸力下において局部座屈を伴う箱形断面柱の一次元数値解析モデル	5. 発行年 2019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 863-873
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 松井良太, 有賀 惇, 森下邦宏, 加藤基規, 竹内 徹	4. 巻 84巻
2. 論文標題 H形断面鋼柱に一次元数値解析モデルを用いた平面架構の崩壊解析	5. 発行年 2019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 973-982
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 寺澤 友貴, 松井 良太, 中村 毅, 竹内 徹	4. 巻 82巻
2. 論文標題 径厚比の異なる円形鋼管ブレース付鋼構造骨組の累積変形性能と構造特性係数	5. 発行年 2017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 1485-1495
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.82.1485	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15件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 小泉光市, 橋本舟海, 松井良太, 竹内 徹
2. 発表標題 高軸力下において局部座屈を伴う箱形断面鋼柱の一次元数値解析モデル その1 一次元ファイバーモデルの構築
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹原 遼, 橋本舟海, 松井良太, 竹内 徹
2. 発表標題 高軸力下において局部座屈を伴う箱形断面鋼柱の一次元数値解析モデル その2 既往実験結果および既往履歴モデルとの比較
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 有賀 惇, 松井良太, 竹内 徹, 森下邦宏, 加藤基規
2. 発表標題 一次元数値解析モデルを用いたH形断面鋼部材で構成された平面架構の崩壊解析 その1 H形断面軸力部材における累積塑性歪の精度評価
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松井良太, 有賀 惇, 竹内 徹, 森下邦宏, 加藤基規
2. 発表標題 一次元数値解析モデルを用いたH形断面鋼部材で構成された平面架構の崩壊解析 その2 高軸力比の柱を有するブレース付平面骨組の地震応答性状
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村 毅, 寺澤友貴, 松井良太, 竹内徹
2. 発表標題 径厚比の異なる円形鋼管ブレース付鋼構造骨組の累積変形性能および構造特性係数 その1 振動台実験を用いた累積変形性能と崩壊挙動の比較
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 寺澤友貴, 松井良太, 竹内徹
2. 発表標題 径厚比の異なる円形鋼管ブレース付鋼構造骨組の累積変形性能および構造特性係数 その2 円形鋼管ブレースの母材部破断に対する構造特性係数の余裕度
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 橋本舟海, 松井良太, 小林隼也, 竹内 徹, 森下邦宏, 加藤 基規
2. 発表標題 高軸力下におけるH形断面鋼柱の弾塑性座屈挙動の数値解析による分析 その1 H形断面軸力部材の全体および局部座屈挙動
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小林隼也, 松井良太, 竹内 徹, 森下邦宏, 加藤基規
2. 発表標題 高軸力下におけるH形断面鋼柱の弾塑性座屈挙動の数値解析による分析 その2 高軸力比のH形断面鋼柱部材の地震応答性状
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 加藤基規, 森下邦宏, 松井良太, 小林隼也, 竹内 徹
2. 発表標題 高軸力下におけるH形断面鋼柱の弾塑性座屈挙動の数値解析による分析 その3 一次元部材モデルの復元力特性の修正
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 橋本舟海, 松井良太, 竹内徹
2. 発表標題 鋼材ブレースの座屈後履歴挙動および累積変形性能の検証
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 YuKi Terazawa, Ryota Matsui, Toru Takeuchi
2. 発表標題 Shake Table Testing of Steel Braced Frame Considering Member Fracture
3. 学会等名 The 9th International Conference on the Behavior of Steel Structures in Seismic Areas (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryota Matsui, Shunji Urui, Masaki Tokunou, Toru Takeuchi
2. 発表標題 Collapse Analysis of Steel Frames Considering Fracture of Braces and End of Beams
3. 学会等名 The 9th International Conference on the Behavior of Steel Structures in Seismic Areas (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹原 遼、松井良太、竹内 徹、森下邦宏、加藤基規
2. 発表標題 高軸力を受けるH形断面鋼柱の繰返し曲げ載荷実験 その1 実験概要および実験結果
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 有賀 惇、松井良太、竹内 徹、森下邦宏、加藤基規
2. 発表標題 高軸力を受けるH形断面鋼柱の繰返し曲げ載荷実験 その2 一次元ファイバーモデルによる分析
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryota Matsui, Ryo Takehara, Matthew Eatherton, Kunihiro Morishita, Motoki Kato, Toru Takeuchi
2. 発表標題 Experimental investigation of inelastic behavior of wide flange columns under high axial force
3. 学会等名 12th Pacific Structural Steel Conference (国際学会)
4. 発表年 2019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