

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23360247

研究課題名(和文) 予想される超大地震動に対する鋼構造建物の自立限界を超える倒壊性状の把握

研究課題名(英文) Collapsing behavior of steel structural buildings beyond stable limit subjected to predictable super mega earthquake

研究代表者

多田 元英 (Tada, Motohide)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90216979

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,900,000円

研究成果の概要(和文)：建築基準法が要求するクライテリアだけに基づいた画一的なチェックでは、近い将来に発生するであろう南海・東南海・東海および上町断層帯等の超大地震に対して建物の倒壊が危惧される。本研究では、鋼構造建物において角形鋼管柱の大変形域での劣化挙動が建物の完全倒壊に至るまでの構造性能に大きな影響を及ぼすことを明らかにし、様々な柱脚形式について角形鋼管柱の劣化挙動を載荷実験で明らかにした。また、完全倒壊に至る挙動を追跡可能な数値解析プログラムを開発し、それを用いたパラメトリックスタディーにより、鋼構造建物が完全倒壊に至る条件を明らかにすることができた。

研究成果の概要(英文)：Complete collapse of buildings is worried about in cases of Nankai, Tohankai, Tohkai and Uemachi-fault mega earthquakes, provided the buildings are structurally checked only for Building Standard Law. This study clarified that degradation behavior of steel tube columns in large deformation range affects the structural performance of complete collapse, and clarified the degradation behavior of steel columns with various types of column bases by loading tests. Numerical analysis programs that can analyze complete collapse were also developed. Conditions of complete collapse of steel building structures were derived by parametric analyses using the developed programs.

研究分野：建築構造

キーワード：倒壊 超大地震 鋼構造建物

1. 研究開始当初の背景

建築基準法が要求するクライテリアだけに基いた画一的なチェックでは、近い将来に発生するであろう南海・東南海・東海および上町断層帯等の超大地震に対して建物の倒壊が危惧される。建物の倒壊は所有者・使用者の被害に留まらず、周辺地域に危害を及ぼし、都市機能の損傷や復旧の障害にもつながる。そのようなことから、建物が最大水平耐力に到達後に最終的な倒壊がどのように発生するのかを明確にし、それを構造設計技術に反映させることが重要である。

2. 研究の目的

本研究では鋼構造建物を対象に、柱・梁などの構成部材の劣化特性を把握し、倒壊時の崩壊機構や骨組の劣化を伴う荷重-変形挙動を明らかにし、鋼構造建物の完全倒壊に対する構造性能を定量的に明らかにして設計に反映させることを目的としている。

3. 研究の方法

(1) 中空長方形断面柱の大変形域での劣化挙動

中空長方形断面の柱を対象に、鋼種・製造工程・幅厚比・柱脚型式・载荷方向などをパラメータとして、大変形域までの载荷実験を行う。これにより、柱が最大耐力を発揮後に、主に局部座屈により耐力劣化する挙動を定量的に把握する。载荷装置の概要を図1に示す。鉛直荷重用のオイルジャッキで柱に軸力を導入した後、水平荷重用のオイルジャッキで水平荷重を与え、復元力がほぼ喪失する程度までの挙動を把握する。

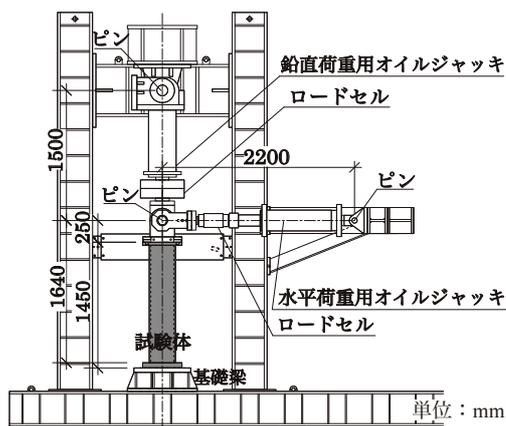


図1 载荷装置の概要

(2) 局部座屈による耐力劣化を考慮した多層鋼構造ラーメン骨組の倒壊解析

柱および梁の復元力特性を部材レベルで表現しつつ取り扱いが容易な魚骨形骨組(図2)を用いて、時刻歴地震応答解析により、鋼構造ラーメン骨組が最大水平耐力を越して倒壊していく挙動を分析する。

柱・梁部材の劣化要因としては、一般に座

屈と接合部破断が挙げられる。ここでは、保有耐力接合および保有耐力横補剛が十分に施され、破断や横座屈が耐力劣化に影響せず、局部座屈のみが耐力劣化の要因となる場合を対象とし、加藤・秋山によって提案された3折れ線で表現される骨格曲線で復元力特性を規定する。この骨格曲線は、軸力比、幅厚比、細長比、降伏応力度で規定される。解析パラメータは、層数(5層と10層)、保有水平耐力の  $D_s$  換算値(0.25, 0.50)、柱の幅厚比による構造ランク(十分なFAランク, FA, FB, FCランクの境界)、梁の幅厚比による構造ランク(FA, FB, FCランクの境界)、柱梁耐力比(COF)である。解析プログラムにはCLAP.fを用い、幾何学的非線形性を考慮する。各構造ランクに対応する骨格曲線(無次元化曲げモーメント-無次元化回転角関係)を図3に示す。

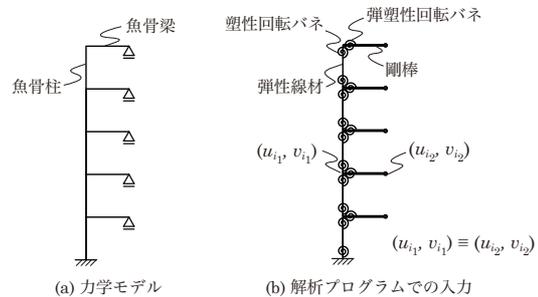


図2 魚骨形骨組

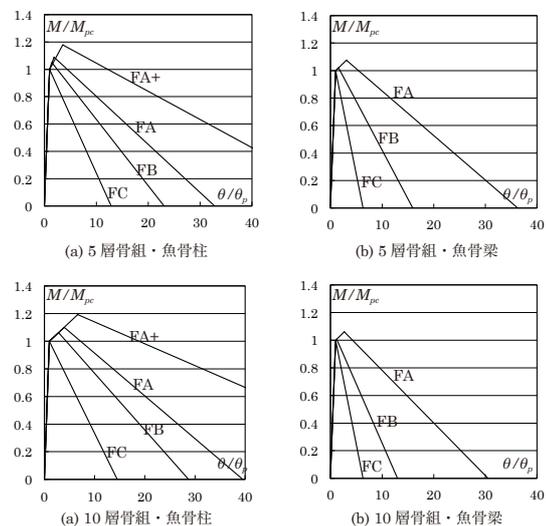


図3 魚骨柱・魚骨梁の骨格曲線

一方、現行の耐震設計基準に基づいて設計・施工された鉄骨造4階建て建物の巨大地震動下で倒壊に至る挙動が、E-ディフェンス震動台での実大実験で明らかにされている。申請者らは「統合化構造解析システム」を利用した高精度な立体数値解析により、その倒壊挙動を高精度に再現することに成功している。その成果を発展させ、様々な入力地震動による当該建物の倒壊挙動を数値解析で分析することにより、水平2方向と鉛直方向

の地震動を受けるときの耐倒壊性能を地震入力エネルギーの見地から明らかにする。

### (3) 柱梁ラーメン骨組の魚骨形骨組へのモデル化手法

魚骨形骨組は単純な構造解析モデルでありながら、柱梁耐力比が建築構造物の弾塑性挙動に及ぼす影響も考慮可能な精緻なモデルでもある。従来、実務で多用されているせん断形多質点系モデルは骨組の耐力劣化挙動を追跡するには限界があるが、魚骨形骨組モデルは耐力劣化に伴う崩壊機構の変化も考慮できるので倒壊に至る骨組挙動を精緻に追跡できる。ここでは小川らの研究を進展させ、耐力劣化を伴う柱・梁で構成される部材レベルの構造解析モデルから魚骨形骨組モデルを作成する方法を提案する。

### (4) 2軸曲げと軸力を受ける柱部材を解析可能なステーションプログラム

様々な構造解析プログラムを統合することによって、それぞれの機能を活かした数値解析を実現できるシステム（統合化構造解析システム）を申請者らは開発している。ここでは、そのシステム上で作動するためのステーションプログラムとして、2軸曲げと軸力を受ける柱部材の劣化を伴う弾塑性挙動を解析するプログラムを開発する。このプログラムを統合することによって、平面骨組だけでなく立体の鋼構造建築骨組の弾塑性挙動を解析・検討することが可能となる。

## 4. 研究成果

### (1) 中空長方形断面柱の大変形域での劣化挙動

載荷実験結果の例として、軸力比が 0.25、幅厚比が 25 (FA ランクの境界値) の場合について、ロール成形角形鋼管 (R2525) とプレス成形角形鋼管 (P2525) の無次元化曲げモーメント-回転角関係を図 4 に重ねて示す。また、局部座屈の発生状況を図 5 に示す。

一連の実験結果より得られた知見は以下のとおりである。

- ・幅厚比が FA ランクの境界値程度 (25) 以上の場合、成形方法による最大耐力の差はほとんど見られなかったが、幅厚比がさらに小さい (19) 場合、降伏比が低いプレス成形の方が最大耐力が大きくなる。
- ・最大耐力発揮後の劣化勾配は、ロール成形材とプレス成形材とで概ね同程度であり、溶接組立材よりも急勾配になる。
- ・局部座屈モードは、0 度方向載荷の多くの場合は圧縮側フランジが内側に凹となり、1 つの波形が進展するモードとなる。45 度方向載荷の場合は非対称な 2 波が進展するモードとなる。
- ・根巻き柱脚の場合は、根巻き高さおよび頂部補強筋を学会指針で規定する最小限に抑えた場合、曲げ破壊後、支圧破壊によって最大耐力が決定する。その後、支圧破壊と主筋

の定着破壊が進行して緩やかに耐力劣化する。

・根巻き高さおよび頂部補強筋を増すことで、支圧破壊が進展しにくくなり、最大耐力や劣化後耐力がやや大きくなる。その一方で、定着破壊が生じないことで、鉄筋が破断しやすくなる。

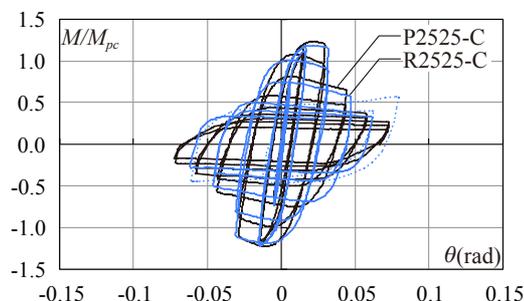
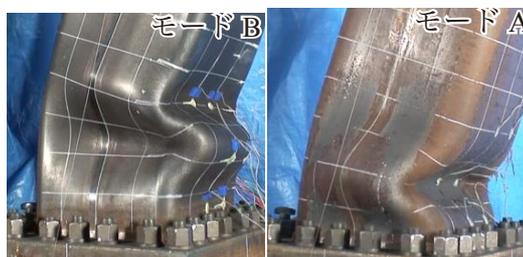


図 4 無次元化曲げモーメント-回転角関係



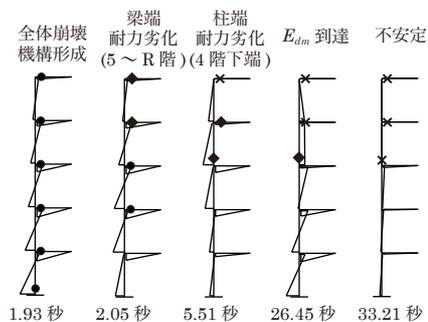
(a) R2525 (b) P2525  
図 5 局部座屈による変形状況

### (2) 局部座屈による耐力劣化を考慮した多層鋼構造ラーメン骨組の倒壊解析

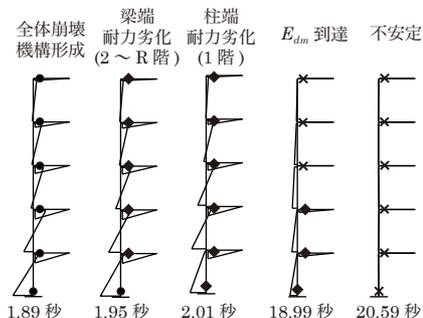
時刻歴地震応答解析の結果、倒壊に至るまでの応力状態と部材端の塑性化状態を、柱梁耐力比 (COF) が 2.0 と 2.5 の場合について図 6 に示す。図(a)が COF=2.0、図(b)が COF=2.5 の場合である。いずれも COF が 1 を上回っているので柱が梁よりも強く、まずはすべての梁端に塑性ヒンジ (●印) が生じて全体崩壊機構を形成する。その後、梁端の塑性ヒンジが耐力劣化して (◆印) 隣接柱の曲げモーメントの反曲点高さが中央から移動する。反曲点高さの移動にともなって片側の柱端の曲げモーメントが増大し、COF=2.0 の場合は曲げ耐力に達して最終的に第 4~5 層の層崩壊に至っている。一方、柱が十分に強くて COF=2.5 の場合は、最下層の柱脚を除いて柱が塑性化することなく、最終的にも全体崩壊形で倒壊に至っている。建築基準法の 2 次設計レベルでは、一般に COF=2.0 もあれば全体崩壊機構を保証するが、完全な倒壊に至るまで全体崩壊機構を保証するにはより大きな COF が必要なことがわかる。

地震動の大きさを徐々に増し、ちょうど倒壊に至るケースについて「損傷に寄与する地震入力エネルギー」を速度換算した値を  $V_{dm}$  とする。この  $V_{dm}$  を縦軸にとり、COF を横軸にとった例を図 7 に示す。図(a)は 5 層骨組、

図(b)は10層骨組についてである。白抜き印は部分層倒壊になった場合を表し、黒塗り印は全層倒壊になった場合を表す。COFが小さい範囲ではCOFが大きくなるにつれて倒壊に至る層の範囲が広がり、図7に示すようにV<sub>dm</sub>の値も増加する。また、COFがある値を超すとV<sub>dm</sub>がさほど増加しなくなる。そのとき、5層骨組では全層倒壊になっており、10層骨組では全層倒壊に至っていないものの倒壊層の範囲が一定で広がらなくなっている。

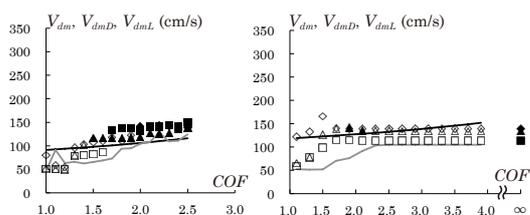


(a) COF = 2.0



(b) COF = 2.5

図6 倒壊に至る過程



(a) 5層骨組 (b) 10層骨組  
図7 V<sub>dm</sub> - COF関係

E-ディフェンス震動台での4階建て鉄骨造建物試験体に正弦波半波を様々な方向に入力して倒壊解析を行うことで、その建物を倒壊に至らしめる各方向の入力エネルギーを求める。これは、当該建物が倒壊することなく吸収可能なエネルギー性能に相当する。一方、水平2方向の自由度を有する1質点系に、水平2方向の地震動を入力した地震応答解析を行うことにより、その地震動の各方向への入力エネルギーを求める。これは、各地震動が建物に及ぼす入力エネルギーに相当する。前述の建物のエネルギー性能と後述の地震動の入力エネルギーを比較することで、建物が倒壊するかどうか、また倒壊する場合

にどの方向に倒壊するかを説明することができる。これについては、現在、査読論文に投稿するべく研究成果をまとめているところである。

### (3) 柱梁ラーメン骨組の魚骨形骨組へのモデル化手法

魚骨形骨組へのモデル化にあたり、小川らのオリジナルな方法を踏襲して二つの仮定を設定する。すなわち、[1] 同一床レベルにある節点の水平変位と節点回転角はすべて等しい。[2] 柱・梁の反曲点位置は材軸方向の中央である。ここでは、二つのモデル化手法を提案する。

一つ目(モデル化手法A)は、各柱・梁部材の劣化を伴う材端曲げモーメントと材端回転角の関係を柱梁節点位置での回転モーメントと節点回転角の関係に変換し、すべての柱部材について合成することで魚骨柱回転バネの復元力特性を得、すべての梁部材について合成することで魚骨梁回転バネの復元力特性を得る方法である。柱梁接合部パネルが存在するときは、その復元力特性を梁の復元力特性と直列結合することで、魚骨梁回転バネの復元力特性を補正すればよい。

個材の復元力特性を、全体座標系である柱梁節点位置での回転モーメントと節点回転角の関係に変換して合成するという前述の手順は、マトリクス変位法において全体座標系の剛性行列を作成する手順と同様のことである。そのようなことから、マトリクス変位法による部材レベルの増分解析が可能なプログラムを駆使して魚骨形骨組のモデル化を行うのが二つ目の方法(モデル化手法B)である。具体的には全層の層間変位を漸増させる静的増分解析を行うのであるが、魚骨柱回転バネの特性を得るには梁および柱梁接合部パネルを剛に設定し、魚骨梁回転バネの特性を得るには柱を剛に設定することで、それぞれの回転バネの復元力特性を得ることができる。

モデル化手法Bによる魚骨形モデルを用いた場合と部材レベルの構造解析モデルを用いた場合について、倒壊に至るまでの時刻歴地震応答解析を行った。結果の一例を図8に示す。時刻5.12sで梁端の塑性ヒンジが全層に分布し全体崩壊正常を示した後、塑性化部位が下層部に局所化して最終的に倒壊する様子が、両モデルで同様に表現できている。最終的な倒壊層は、部材レベルの構造解析モデルでは1~3層、魚骨形骨組モデルでは1~4層と若干の食い違いがあるものの、図8の下図に示す損傷に寄与する地震入力エネルギー(E<sub>e</sub>+E<sub>p</sub>-E<sub>g</sub>)の時刻歴は両者ではほぼ一致しており、エネルギーの尺度で見た構造性能が魚骨形骨組モデルで精度よく表現できていることがわかる。

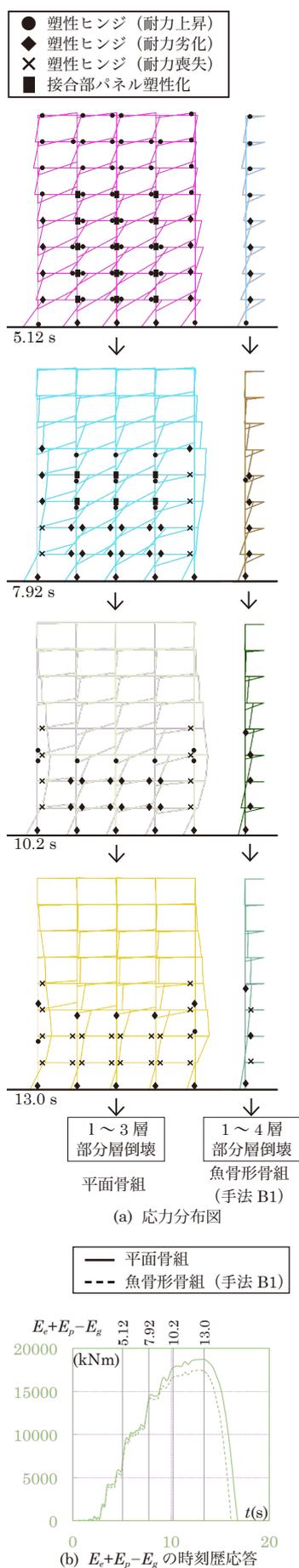


図 8 平面骨組と魚骨形骨組の比較

(4) 2軸曲げと軸力を受ける柱部材を解析可能なステーションプログラム

柱端部の塑性化後の負荷挙動を、それぞれの回転軸で独立した単純バネで表現する機能と、軸力・2軸曲げの相関を考慮した一般化塑性ヒンジで表現する機能を装備したステーションプログラムを開発した。初期の動作確認を済ませた段階であり、今後、統合化構造解析システム上で使い込んでいくこともない、様々な修正・改良を予定している。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

1) 向出静司, 元木洗介, 北川智也, 多田元英: 局部座屈による耐力劣化を考慮した多層鋼構造ラーメン骨組の倒壊解析, 日本建築学会構造系論文集 No. 685, pp. 579-588, 2013 年 3 月, 査読あり

2) 向出静司, 村上友規, 多田元英: 魚骨形骨組による鋼構造ラーメン骨組の倒壊解析, 日本建築学会構造系論文集 No. 690, pp. 1523-1532, 2013 年 8 月, 査読あり

〔学会発表〕(計 14 件)

1) 村上友規, 向出静司, 多田元英: 鋼構造ラーメン骨組の倒壊解析のための魚骨形骨組へのモデル化手法, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, pp. 817-818, 2011 年 8 月, 査読なし

2) 向出静司, 北川智也, 多田元英: 魚骨形モデルを用いた鋼構造低層ラーメン骨組の倒壊解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, pp. 819-820, 2011 年 8 月, 査読なし

3) 多田元英: 大地震動を受ける鋼構造建物の完全倒壊挙動の数値シミュレーション, 東京工業大学 第 15 回 G-COE 特別講演会, 2011 年 10 月 24 日, 招待講演

4) 松尾克也, 向出静司, 多田元英: 降伏比の異なる角形鋼管柱の大変形域単調載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 III, pp. 725-726, 2012 年 9 月, 査読なし

5) 奥 伸之, 向出静司, 松尾克也, 多田元英: 鋼種や製造工程の異なる角形鋼管柱の大変形域載荷実験 (その 1 実験概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 III, pp. 1207-1208, 2013 年 8 月, 査読なし

6) 松尾克也, 向出静司, 奥 伸之, 多田元英: 鋼種や製造工程の異なる角形鋼管柱の大変形域載荷実験 (その 2 復元力モデルの提案), 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 III, pp. 1209-1210, 2013 年 8 月, 査読なし

7) 森前直樹, 向出静司, 多田元英: 柱のヒンジモデルの違いが鋼構造骨組の倒壊挙動に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 III, pp. 981-982, 2013 年 8 月, 査読なし

8) 村上友規, 向出静司, 多田元英: 様々な地震動に対する鋼構造立体ラーメンの倒壊性状比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集

構造 III, pp. 1027-1028, 2013 年 8 月, 査読なし

9) 松尾克也, 向出静司, 奥 伸之, 多田元英: 柱脚形式の異なる角形鋼管柱の大変形域載荷実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 III, pp. 677-678, 2014 年 9 月, 査読なし

10) 西埜裕典, 向出静司, 多田元英: 接合部破断により決定される矩形中空断面柱の塑性変形能力に関する調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 III, pp. 781-782, 2014 年 9 月, 査読なし

11) 奥 伸之, 向出静司, 松尾克也, 多田元英: 鋼種や製造工程の異なる角形鋼管柱の大変形域挙載荷実験 (その 3 FEM 解析), 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 III, pp. 951-952, 2014 年 9 月, 査読なし

12) 森前直樹, 向出静司, 多田元英: 様々な地震動に対して鋼構造立体骨組が倒壊するときのエネルギー吸収性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 III, pp. 1039-1040, 2014 年 9 月, 査読なし

13) 向出静司, 佐武莉沙, 多田元英: 鋼構造根巻き柱脚の大変形域載荷実験 (その 1 標準試験体), 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 III, 2015 年 9 月, 査読なし

14) 村上亮介, 向出静司, 多田元英: 地震による柱の付加軸力が鋼構造骨組の倒壊挙動に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 III, 2015 年 9 月, 査読なし

〔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〕 なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

多田 元英 (TADA MOTOHIDE)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 90216979

### (2) 研究分担者

桑原 進 (KUWAHARA SUSUMU)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 10243172

向出 静司 (MUKAIDE SEIJI)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 20423204