

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06574

研究課題名(和文) 曲げ座屈を伴う軸組筋違い構造の超大地震動に対する完全倒壊性状の把握

研究課題名(英文) Complete collapse behavior of braced structures with bending buckling for mega ground motion

研究代表者

多田 元英 (TADA, Motohide)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：90216979

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、既往の簡易な力学モデルを用いて、筋違い構造建物が完全倒壊に至るまでの挙動を数値解析して、現行の建築基準法で設計された筋違い構造建物の耐倒壊性能をまず把握した。その結果、建築基準法に則って設計した筋違い構造建物では、2次設計で想定する極稀地震動の2.8-5.5倍の大きさの地震動で完全倒壊に至ることがわかった。

さらに、より精度の高い数値解析技術の構築を目指して、軸力と2軸曲げを受けて局部座屈する角形鋼管柱やH形鋼柱、曲げモーメントを受けて局部座屈するH形鋼梁、曲げ座屈と引張降伏を繰り返すH形鋼筋違いについて、大変形の繰返し挙動を高精度に追跡可能な力学モデルを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建築基準法は最低守られるべき必要条件であるにもかかわらず、法が要求するクライテリアだけに基づいた画一的な構造安全性のチェックが長年にわたって行われてきた。法が担保するのは震度V弱程度の中地震に対して建物が無損傷、震度VI強程度の大地震に対して建物がある程度の損傷に留まることである。しかし、最も大切な構造性能は、発生の可能性が低くともゼロではない超大地震に対して建物を倒壊させないことであろう。本研究で得られた成果から、建築基準法に則って設計した建物が、完全倒壊に至るまでの余裕度を定量的に把握することができた。また、その評価制度をさらに向上させるための数値解析技術も提案することができた。

研究成果の概要(英文)：Braced structures designed by Building Standard Law were numerically analyzed for mega earthquake ground motion to estimate the ultimate capacity against the complete collapse. The results show that the structures completely collapse by 2.8-5.5 times earthquake that was specified as an extremely rare ground motion.

Aiming to improve analysis technology, the mechanical models for large deformation cyclic behavior were developed. Targets are rectangular tube column and H-shaped column that buckles locally due to axial force and biaxial bending, H-shaped beam that buckles locally due to bending moment, and H-shaped brace that repeats bending buckling and tensile yielding.

研究分野：建築構造

キーワード：筋違い 曲げ座屈 局部座屈

## 1. 研究開始当初の背景

建築基準法は最低守られるべき必要条件であるにもかかわらず、法が要求するクライテリアだけに基づいた画一的な構造安全性のチェックが長年にわたって行われてきた。法が担保するのは数十年に一度の中地震（震度Ⅴ弱程度）に対して建物が無損傷、数百年に一度の大地震（震度Ⅵ強程度）に対して建物がある程度の損傷に留まることである。

それに対し、兵庫県南部地震で被った甚大な被害は大きな教訓をもたらし、その結果、施主と構造技術者の対話と合意に基づいて建物の構造性能を設定すべきであること、設定される構造性能は決して画一的なものでなく地震規模と損傷程度の多様な組合せが用意されるべきであることなど、いわゆる「性能設計」に向けての技術整備が社会から要求されている。そのような社会要求を受け、事業継続性、被害建物の修復性などを様々な地震レベルに対応させた検討がなされ、制振構造などの実建物に反映されている。

しかし、とりわけ基本的で最も大切な構造性能は、発生の可能性が低くともゼロではない超大地震に対して建物を倒壊させないことであろう。たとえば大阪地域では上町断層や南海・東南海で超大地震の発生が危惧されており、現在の建築基準法に基づく画一的なチェックだけでは倒壊に対する余裕度が不明なだけでなく、余裕度の低いものから高いものまで玉石混交の状態になっている。建物の倒壊は所有者・使用者だけの損害に留まらず、周辺地域に多大な危害を及ぼし都市機能の欠損にもつながることから、保有水平耐力の発揮後に最終的な倒壊がどのように発生するかを明確にし、それを構造設計技術に反映させることが極めて重要かつ急務である。

## 2. 研究の目的

筋違い構造は筋違いが圧縮力を受けて曲げ座屈しても、引張側で依然として高い耐震性能を保持することから、耐震性能を建物に付与する上で高いコストパフォーマンスを期待できる。座屈後挙動の数値解析技術が高められ、それによる筋違い構造の挙動検討が充実できれば、筋違い構造を社会に適切に普及できるものと考えられる。

本研究では、既往の簡易な力学モデルを用いて、筋違い構造が完全倒壊に至るまでの挙動を解析して、現行の建築基準法で設計された筋違い構造の耐倒壊性能をまず把握する。さらに、より精度の高い数値解析技術の構築を目指して、角形鋼管柱、H形鋼柱、H形鋼梁、H形鋼筋違いの座屈後挙動を、高精度に追跡可能な力学モデルの開発に取り組む。

## 3. 研究の方法

### (1) 既往の力学モデルによる筋違い付きラーメン構造の完全倒壊性状

建築基準法に則って設計した、3層3×3スパンの筋違い付き鋼構造建物を対象に、基準法で想定している以上の地震動に対して、完全倒壊に至るまでの地震応答解析を実施し、筋違い付き建物が有する耐倒壊性能を把握する。柱・梁・筋違いの力学モデルには既往の簡易なモデルを用いる。すなわち、柱・梁には、加藤秋山の骨格曲線と履歴則を用い、筋違いには一般化塑性ヒンジを用いた、曲げ座屈後挙動を追跡可能なモデルを用いる。

### (2) 角形鋼管柱の局部座屈を伴う劣化挙動解析モデル

角形鋼管柱が軸力と2軸曲げを受けて局部座屈した後の劣化挙動を追跡するために、一般化塑性ヒンジモデルを改良する。従来の一般化塑性ヒンジモデルは、1つの降伏曲面を用いたBi-Linear型に限定されていたのを、多重の降伏曲面を設定して、降伏曲面の更新則を劣化挙動に合致させることで、簡易で高精度な力学モデルに発展させる。

この力学モデルを柱に適用することで、局部座屈後の挙動を高精度に追跡できるだけでなく、建物の立体挙動も追跡可能になる。

### (3) H形鋼柱の局部座屈を伴う劣化挙動解析モデル

上述の角形鋼管柱に用いた方法をH形鋼柱にも適用し、軸力と2軸曲げを受けて局部座屈した後の劣化挙動を解析するための一般化塑性ヒンジモデルを提案する。

### (4) H形鋼梁の局部座屈を伴う劣化挙動解析モデル

曲げモーメントを受けて局部座屈したH形断面梁の耐力劣化挙動について、いくつかの幅厚比をパラメータとした有限要素解析を実施し、従来の加藤秋山モデルの適用範囲を明らかにする。さらに、曲げモーメント-回転角関係を表すモデルの改良に取り組む。

### (5) H形鋼筋違いの曲げ座屈を伴う劣化挙動解析モデル

曲げ座屈と引張降伏を繰返す筋違いの軸力-伸び関係は、実験結果を回帰した修正柴田若林モデルが一般に用いられている。一方、曲げ座屈部材の幾何学的非線形を忠実に考慮し、一般化塑性ヒンジモデルで塑性化後の負荷挙動を考慮することで、筋違いの履歴挙動を表現する方法も井上らによって提案されている。この方法は力学的に明快である反面、実験結果に対してある程度の誤差を含んでいた。

本研究では、後者の一般化塑性ヒンジモデルを利用した方法に、必要最低限の回帰式を導入す

ることで、力学的に明快な利点を保ちつつ、実挙動を高精度に表現可能な方法を提案する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 既往の力学モデルによる筋違い付きラーメン構造の完全倒壊性状

図1に示す3層3×3スパンの鋼構建造物において、A通りとD通りの2-3通り間に筋違いが配置されている。図1に示すような3つの筋違い形式を設定して、骨組を建築基準法に則って設計し、完全倒壊に至るまでの地震応答解析を実施した。得られた層間変形角の時刻歴と層せん断力-層間変形角関係の一例を図2に示す。座屈に伴って層せん断耐力が劣化し、層間変形角が大きくなって骨組が倒壊に至っていく様子が解析できている。

いくつかのケーススタディーの結果、建築基準法の2次設計で想定する極稀地震動の2.8～5.5倍の大きさの地震動で、筋違い付き構造が完全倒壊に至ることがわかった。

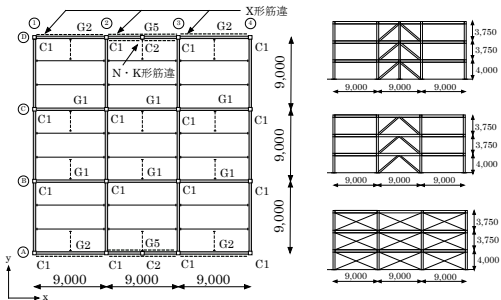


図1 解析対象

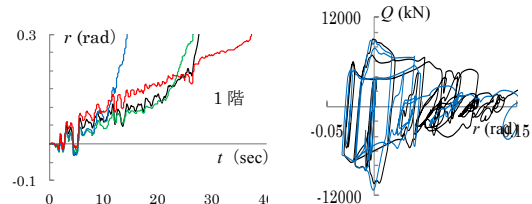


図2 層間変形角の時刻歴と層せん断力-層間変形角関係

##### (2) 角形鋼管柱の局部座屈を伴う劣化挙動解析モデル

軸力と2軸曲げを受ける角形鋼管柱の繰返し載荷時の劣化挙動を一般化塑性ヒンジモデルで表現するために、多重の降伏曲面を設定することとした。

まず、角形鋼管柱に局部座屈が発生して耐力劣化する挙動を有限要素解析で検討し、繰返し載荷時の特徴を把握した。検討時に作成した図を図3の左側に示す。上図の縦軸は柱端部の無次元化軸力、横軸は無次元化曲げモーメントである。また、下図の縦軸は柱端部の回転角で、横軸は無次元化曲げモーメントである。ある軸力の下で回転角を与え、耐力劣化した後に一旦除荷し、軸力を変化させて再載荷して得られた極大モーメントをプロットしている。この図から、耐力劣化に伴って、最も外側の降伏曲面を、引張側特異点を中心に収縮させるとともに、軸力軸を傾ける更新則を新たに提案した。

提案した更新則を用いて一般化塑性ヒンジ法で解析した結果を図3の右側に実線で示す。縦軸は柱端部の無次元化曲げモーメントで横軸は回転角である。点線は過去に行った載荷実験結果であり、両者がよく一致していることから、ここで提案したモデルの妥当性を確認した。

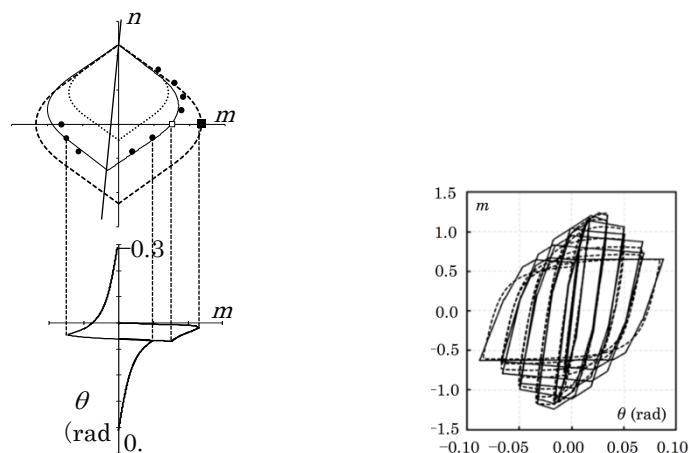


図3 降伏曲面更新則の検討と解析結果の実験結果との比較

##### (3) H形鋼柱の局部座屈を伴う劣化挙動解析モデル

H形断面の降伏曲面は、精密な関数がこれまでに提示されていたが、部分的に数値解に頼る関数であり、完全な解析解が得られていなかった。また、近似の解析解については、いくつか提案されていたものの、精度に難点があった。一般化塑性ヒンジモデルに利用するには、降伏曲面の解析解が必要なことから、今回、独自に精度の高い近似解析解を提案することとした。

図4の左側の点線が、今回提案した近似解による降伏曲面である。y, xの両軸周りの無次元化曲げモーメントを縦横軸に取っている。また、無次元化軸力のnが0.0～0.8の場合を図示して

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

いる。図中の実線は、部分的に数値解に頼った既往の精密な降伏曲面である。実線と点線がほぼ一致していることから、精度の高い近似降伏曲面を解析解の形で得られたことを確認した。

上述の降伏関数を用いて、H形断面柱の局部座屈後挙動を、角形鋼管柱のときと同様に検討した。その結果を図4の右側に示す。この図より、H形断面柱についても、角形鋼管柱のときと同様の方法を、一般化塑性ヒンジモデルにも適用可能であることを確認した。

(4) H形鋼梁の局部座屈を伴う劣化挙動解析モデル

曲げモーメントを受けて局部座屈したH形断面梁の劣化挙動を有限要素解析した結果、従来の加藤秋山モデルは安全側の設定になっていることが確認できた。

フランジとウェブの幅厚比を統合して表現可能な幅厚比指標を、五十嵐らの研究から引用し、それを用いて、より精度の高い曲げモーメント-回転角関係を提案した。現在、より広範囲な幅厚比にも適用可能なモデルを構築し直している段階である。また、繰返しの履歴則については、米国のKrawinklerらが提案する修正IMKモデルの優位性を見出している。前述の曲げモーメント-回転角関係と修正IMKモデルを組み合わせた数理モデルをほぼ完成させており、現在、論文にまとめている段階である。

(5) H形鋼筋違いの曲げ座屈を伴う劣化挙動解析モデル

曲げ座屈と引張降伏を繰返す筋違いの挙動を表現するうえで、従来の一般化塑性ヒンジモデルの限界は、圧縮に伴う局部座屈で生じる断面形状の変化や引張に伴う断面の絞りを表現できないことにある。その原因で、従来の一般化塑性ヒンジモデルは、エネルギー吸収量を20%程度過大評価することがわかった。そこで、それらの効果を表現するために、降伏曲線を収縮させる方法を提案した。

有限要素解析を実施し、得られた軸力-伸び関係と一致するように、降伏曲線の収縮関数を帰納的に求めた。図5の実線は、提案した一般化塑性ヒンジモデル法による結果であり、点線は有限要素解析の結果である。左側は軸力-伸び関係であり、右側は歪エネルギーと累積伸び量の関係である。実線と点線がほぼ重なっており、荷重-変形関係の面でも、エネルギー吸収量の面でも、理論的な明快さを毀損することなく精度の高いモデルを構築することができた。

一般に多用されている修正柴田若林モデルも検討した結果、同モデルでは細長比が大きい範囲で精度が低下することがわかった。それに対して、ここで提案する一般化塑性ヒンジモデルは、広範囲な細長比に対して精度が保たれることを確認している。理論的な明快さが、広範囲な条件に対して精度を維持できる根拠になっていると考えている。

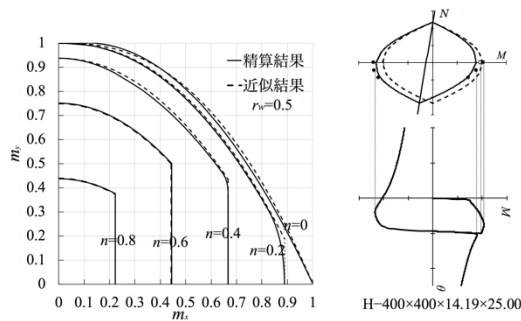


図4 H形断面の降伏関数と降伏曲面更新則の検討

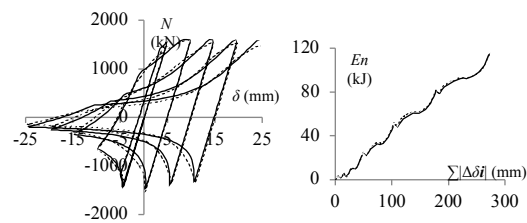


図5 改良した一般化塑性ヒンジモデルとFEM結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Qi Hao, 多田元英, 大坪丈一郎	4. 巻 Vol. 66B
2. 論文標題 筋違の曲げ座屈と引張降伏履歴を表現するための一般化塑性ヒンジモデルの改良	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 111-121
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 多幡和真, 多田元英	4. 巻 第27巻
2. 論文標題 建築基準法に基づく筋違付き3層ラーメン鋼構造の地震時倒壊挙動	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本鋼構造協会鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 219-226
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 佐熊 海, 多田元英, 安井佑里花, 向出静司	4. 巻 Vol.26, No.102
2. 論文標題 局部座屈を伴う角形鋼管柱の一般化塑性ヒンジ法による弾塑性解析プログラム (劣化履歴則の改良と塑性剛性の逐次更新)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本鋼構造協会鋼構造論文集	6. 最初と最後の頁 69-79
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 宮林航希, 多田元英, 佐熊海, 向出静司	4. 巻 Vol.24, No.96
2. 論文標題 軸力と2軸曲げを受けて局部座屈する角形鋼管柱の一般化塑性ヒンジ法による弾塑性解析プログラム	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本鋼構造協会鋼構造論文集	6. 最初と最後の頁 31-43
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 -

〔学会発表〕 計33件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 多田元英, 岸添将至, 安井佑里花
2. 発表標題 角形鋼管柱の局部座屈後解析における一般化塑性ヒンジの多重降伏曲面数が倒壊挙動に及ぼす影響（その1 載荷実験結果と3重降伏曲面による解析結果）
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岸添将至, 多田元英, 安井佑里花
2. 発表標題 角形鋼管柱の局部座屈後解析における一般化塑性ヒンジの多重降伏曲面数が倒壊挙動に及ぼす影響（その2 多重降伏曲面数が建物の倒壊挙動に及ぼす影響）
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 多田元英, 安井佑里花, 佐熊 海, 向出静司
2. 発表標題 軸力と2軸曲げを受ける角形鋼管柱の一般化塑性ヒンジ法による局部座屈挙動の追跡（その5 硬化則の改良）
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安井佑里花, 多田元英, 佐熊 海, 向出静司
2. 発表標題 軸力と2軸曲げを受ける角形鋼管柱の一般化塑性ヒンジ法による局部座屈挙動の追跡（その6 改良した硬化則による解析例）
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Qi Hao, 大坪丈一郎, 多田元英
2. 発表標題 曲げ座屈と引張降伏を繰返す筋違の弾塑性解析における一般化塑性ヒンジモデルの改良 (その3 完全弾塑性材に対する検討)
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大坪丈一郎, Qi Hao, 多田元英
2. 発表標題 曲げ座屈と引張降伏を繰返す筋違の弾塑性解析における一般化塑性ヒンジモデルの改良 (その4 建築構造用鋼材への適用と細長比に対する検討)
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 多幡和真, 多田元英, 吉原和輝
2. 発表標題 建築基準法について設計された鋼構造3層筋違付きラーメン構造の地震時倒壊挙動 (その3 H形鋼筋違と円形鋼管筋違の比較)
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小田祐太, 多田元英, Qi Hao
2. 発表標題 軸力と2軸曲げを受けるH形断面柱の近似降伏曲面と一般化塑性ヒンジ法による解析例
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷 直樹, 多田元英, Qi Hao
2. 発表標題 局部座屈で劣化挙動を示すH形断面梁の曲げモーメント - 回転角関係
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hao Qi and Motohide Tada
2. 発表標題 Improvement of Generalized Plastic Hinge Model on Elastic-Plastic Analysis of Brace under Cyclic Axial Force
3. 学会等名 12th Pacific Structural Steel Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 多田元英, Qui Hao
2. 発表標題 曲げ座屈と引張降伏を繰返す筋違の弾塑性解析における一般化塑性ヒンジモデルの改良 (その1 従来的一般化塑性ヒンジモデルによる解析)
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Qui Hao, 多田元英
2. 発表標題 曲げ座屈と引張降伏を繰返す筋違の弾塑性解析における一般化塑性ヒンジモデルの改良 (その2 改良法の提案)
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 安井佑里花, 多田元英, 佐熊 海, 向出静司
2. 発表標題 軸力と2軸曲げを受ける角形鋼管柱の一般化塑性ヒンジ法による局部座屈挙動の追跡(その3 時時刻々変化する変形方向と軸力比の影響を考慮可能なプログラムへの改良)
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐熊 海, 多田元英, 安井佑里花, 向出静司
2. 発表標題 軸力と2軸曲げを受ける角形鋼管柱の一般化塑性ヒンジ法による局部座屈挙動の追跡(その4 各パラメータが倒壊挙動に及ぼす影響の考察)
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉原和輝, 多田元英, 多幡和真
2. 発表標題 建築基準法に基づいて設計された鋼構造3層筋違付きラーメン構造の地震時倒壊挙動(その1 H形鋼筋違破断と梁端破断の影響)
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 多幡和真, 多田元英, 吉原和輝
2. 発表標題 建築基準法に基づいて設計された鋼構造3層筋違付きラーメン構造の地震時倒壊挙動(その2 H形鋼筋違と平鋼筋違の比較)
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐熊海, 多田元英, 宮林航希, 小里謙一
2. 発表標題 軸力と2軸曲げを受ける角形鋼管柱の一般化塑性ヒンジ法による局部座屈挙動の追跡(その1 精密な降伏条件式による弾塑性解析プログラムの改良)
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宮林航希, 多田元英, 佐熊海, 向出静司, 佐武莉沙
2. 発表標題 軸力と2軸曲げを受ける角形鋼管柱の一般化塑性ヒンジ法による局部座屈挙動の追跡(その2 BCR295 幅厚比33の角形鋼管における履歴曲線の検討)
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉原和輝, 多田元英, 小里謙一
2. 発表標題 3階筋違付きラーメン構造の地震時挙動と筋違破断損傷度に関するケーススタディー
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2017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
---------	---------------------------	-----------------------	----