

令和 6 年 5 月 18 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H00269

研究課題名（和文）鋼構造建築物の倒壊挙動に対する予測技術と性能評価技術の高度化

研究課題名（英文）Analysis and assessment technology for seismic collapse safety of steel building structures

研究代表者

岡崎 太一郎 (OKAZAKI, TAICHIRO)

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：20414964

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 43,160,000円

研究成果の概要（和文）：鋼構造建築物の倒壊過程を実験的に解明する研究目的に沿って、防災科学技術研究所の大型耐震実験施設で、2021年12月に縮尺1/2の重層ラーメン試験体の倒壊実験を実施した。同研究所の兵庫耐震工学研究センターで、2020年12月に実施された日米共同実験に参加し、次世代型鋼構造システムを開発する研究を推進、2022年2月に実施された10層鋼構造建物実験に参加し、構造部材に生じる力や変形を詳細に計測した。実験データを詳細に分析するとともに、部材の劣化と破断にともなう非線形・動的挙動、部材破断後の部材力再分配を追跡するためのコンピュータ解析技術を開発・蓄積した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建築物に対する設計要求は高度化・複雑化しており、千年に一度の大地震に対しても、安全・安心はおろか、事業継続・生活継続が望まれるようになった。設計想定を超える地震動に対する構造安全性については、科学的な検証技術は確立されておらず、実務設計でも陽に考慮されていない。そこで、本研究は、典型的な鋼構造建築物が倒壊に至るまでの過程を実験的に確認し、その過程を追跡するためのコンピュータ解析技術を開発し、解析技術をさらに改善するための課題を抽出した。建築物の耐震性能余裕度の評価という、耐震工学の難題に寄与する成果を得た。

研究成果の概要（英文）：The objective to collect experimental data on the large deformation and collapse behavior of steel building structures was fulfilled by conducting several shake table tests: In 2021, a scaled, four-story steel building specimen was tested to collapse; In 2020, the PI's collaborated with Japan and US researchers to test a new resilient steel system at E-Defense; In 2022, the PI's participated in a 1-story steel building tests at E-Defense, contributing to detailed measurement of force and deformation in key members. The experimental data obtained from the shake-table tests was combined with data available in the literature to advance computer analysis methods for steel buildings subjected to strong earthquake ground motion. Methods to simulate the stiffness and strength degradation caused by local-buckling deformation and fracture was developed. Schemes to reproduce the gradual change in vibration properties and force redistribution following damage was examined.

研究分野：建築構造

キーワード：鋼構造建築物 耐震性能 振動台実験 コンピュータ解析 耐震性能余裕度

## 1. 研究開始当初の背景

わが国の主要大都市は、世界で群を抜いて自然災害危険度が高く、その主要因が地震であることを、再保険会社の分析報告が明らかにしている。近年でも地震被害が頻発しており、設計規準の想定を超える大地震の危険性は、国民に広く認知され、都市の強靱化が社会的な関心事項になっている。こうした状況で、設計想定を超える地震動が建築構造物にもたらす被害を、精度高く予測する技術が求められている。しかし、いまま、建築構造設計におけるコンピュータ解析は、想定した条件のもとで、変形と被害が小さな許容限度内にとどまることの検定が主目的であって、想定を超えた地震動を受けて構造物が大きく塑性変形し、やがて重力の作用で倒壊する過程は検討されていない。損傷を受けた構造部材の耐力劣化を詳細にモデル化できるソフトウェアも開発されているが、実験等で得た信頼性の高い実データに対して、丹念にパラメータを校正し検証しない限り、解析結果の精度と信頼性を期待できない。柱や梁などの部材単体については、多くの研究成果が集積されているが、構造システム(構造系全体)の倒壊過程に関するデータは、極めて少ない。

建築分野の将来を見据えるとき、情報技術の波及、特に、米国で発祥した BIM (Building Information Modeling) の展開が注目される。BIM とは、設計・施工・維持管理・解体までのライフサイクルに亘って、建築物の関連データを管理するためのシステムである。電子情報をフォーマット統一し、可視化して、業種間の情報のやり取りを円滑にすること、ライブラリを大量に揃えて、作業の自動化を推進することなどを目指している。BIM は、建設分野の効率化、品質管理・確保に革命をもたらしつつあるが、まだまだ未開の可能性を多く秘めている。建築構造では、自動的に、構造図面から詳細な構造解析モデルを生成し、多数の地震動に対する非線形応答解析を実行し、結果を統計的に処理することも夢ではない。この大容量自動計算を瞬時に行うことで、極めて信頼性の高い構造設計を可能にする High-Definition BIM の構想が提案されている。従来から米国を中心に開発されてきた確率論的耐震設計、性能志向型設計の一つの帰結である。わが国の関心からも、BIM で捉えられる自動解析/評価技術によって、耐震設計基準より高度な耐震性評価技術、想定を超える地震動を受けた建築物の応答予測や被害予測技術を実現する意義は極めて大きい。ただ、この構想を実現するには、地震危険度や地震動の評価技術の飛躍的向上(注意:本研究の対象外)、モデル化方法の判断方法の確立、構造物の限界変形特性に関する遥かに詳細な理解、誤差(モデル化における誤差、偶発性に起因する誤差など)に関する感度分析、などが課題として残されている。

国内外の多くの研究者が、建築構造物の倒壊現象に関するコンピュータ解析例を示しているが、ほとんど例外なく、個々の部材の破壊現象を集積した技術である。研究代表者らは、実台振動台実験で、一つの部材の破壊(梁端やブレースの破断)が周囲の部材に応力再分配をもたらし、場合によっては瞬時に次の破壊・破断をもたらす、損傷が連鎖する現象を観察した。こうした現象を含めた鋼構造建築物の破壊について、データ分析によって理解を深め、多数回繰返しによる破断と破断の動的な伝播現象を、コンピュータ解析で再現する技術を構築してきた。しかし、建築構造物の倒壊過程に関する一般的な知見を導き、さらに、倒壊安全性を定量的に評価する手法を確立するためには、実データが圧倒的に不足しているとの認識が募ってきた。

## 2. 研究の目的

下記の3つの研究目的を立てた。

- (1) 鋼構造建築物の倒壊過程を実験的に解明する
- (2) 倒壊に至る鋼構造の非線形・動的挙動を追跡するコンピュータ解析技術を確立する
- (3) 耐震性能余裕度を把握するための性能評価技術を構築する

### (1) 鋼構造建築物の倒壊過程を実験的に解明する

ラーメン構造とブレース付構造という、中・低層にもっとも一般的な鋼構造形式を模した試験体を大型振動台に設置して、極めて大きな地震動を与えて、倒壊に至らしめ、その過程を詳細に記録する。倒壊挙動の全過程を実験的に再現し、希少なデータを収集する。単体の部材や要素(柱や梁、接合部など)が破壊するまでの挙動は詳らかにされてきたが、構造システムとしての鋼構造建築物に損傷が進展し、応答性状が変化して倒壊に至るまでの過程には、未解明な点が多い。ブレースの破断や、接合部近傍の梁やブレースの破断といった、もっとも懸念される破壊形態が、どのように構造システム全体に伝播するか、という疑問の解消を目指す。

### (2) 倒壊過程を再現するコンピュータ解析技術を確立する

設計想定を超えた地震動を受けた鋼構造建築物において、塑性変形から耐力劣化、破壊に至る個々の部材の挙動、部材間の応力再分配、大変形領域における重力の影響等を表現するモデル化と解析方法を整理する。国内外の多くの研究者が、建築構造物の倒壊現象に関するコンピュータ解析例を示しているが、ほとんど例外なく、静的実験に基づく単一部材の知見を集積した技術である。動的に破壊が進行した建築構造物では、個々の部材に生じる力学的条件が瞬間ごとに変化するので、解析技術の信頼性を担保するためには、動的実験による構造システムの実データが欠

かせない。

### (3) 耐震性能余裕度を把握するため性能評価技術を構築する

前述の High-Definition BIM に象徴される将来の構造設計への実装も見据えて、米国で展開される性能志向型設計も参考に、確率論的な耐震性能評価技術を構築する。現行の設計規準に基づく鋼構造建築物が、設計想定を超える大きな地震動を受けた時の応答を詳細に解析し、機能と居住性が保全される限界、機能が居住性が回復可能な限界、倒壊安全限界に至る確率等を整理する。実データで検証された高度な解析技術を駆使して、客観性と信頼性を高める。

## 3. 研究の方法

防災科学技術研究所の大型耐震実験施設で、2020年12月に、実験システムを検証するための準備実験を、2021年12月に縮尺1/2の重層ラーメン試験体の倒壊実験を実施した。同研究所の兵庫耐震工学研究センターで、2020年12月に実施された日米共同実験に参加し、次世代型鋼構造システムを開発する研究を推進、2022年2月に実施された10層鋼構造建物実験に参加し、構造部材に生じる力や変形を詳細に計測した。実験データを詳細に分析するとともに、部材の劣化と破断にともなう非線形・動的挙動、部材破断後の部材力再分配を追跡するためのコンピュータ解析技術を開発・蓄積した。

## 4. 研究成果

目的(1)に沿って、図1に示す縮尺1/2の重層ラーメン試験体を製作し、極めて大きな変形に至るまで加振し、梁に局部座屈や亀裂を生じ、その被害が伝播し、構造系の振動特性が変化する状況(図2参照)を、力や変形の物理データ(図3参照)と画像(図4参照)で記録した。

この振動台実験で培った手法を用いて、国際共同で実施された実大鋼構造振動台実験に二件参加して、同種のデータを収集した。

部分応答のより詳細なデータを収集するために、また、部分架構と構造系での応答の違いを検証するために、柱と梁の一部だけを取り出した部分架構について、静的繰り返し実験を実施した。

目的(2)と(3)に沿って、鋼構造物において、梁に局部座屈や亀裂を生じることによる剛性と耐力が劣化し、亀裂が進展して破断に至る現象を表現するためのモデル化方法を検証した。本研究で得た実験データや、既往文献から収集した実験データに対して、パラメータを校正した。図5に示す例では、断面を繊維要素に分割し、各繊維要素に付与した繰返し材料則に、局部座屈による劣化と、疲労限界を超えた場合に消滅させる条件を付加した。局部座屈の発生と進展、亀裂の発生と進展まで、非常によく再現できた。図6に、部分要素に対して構成したモデルを、重

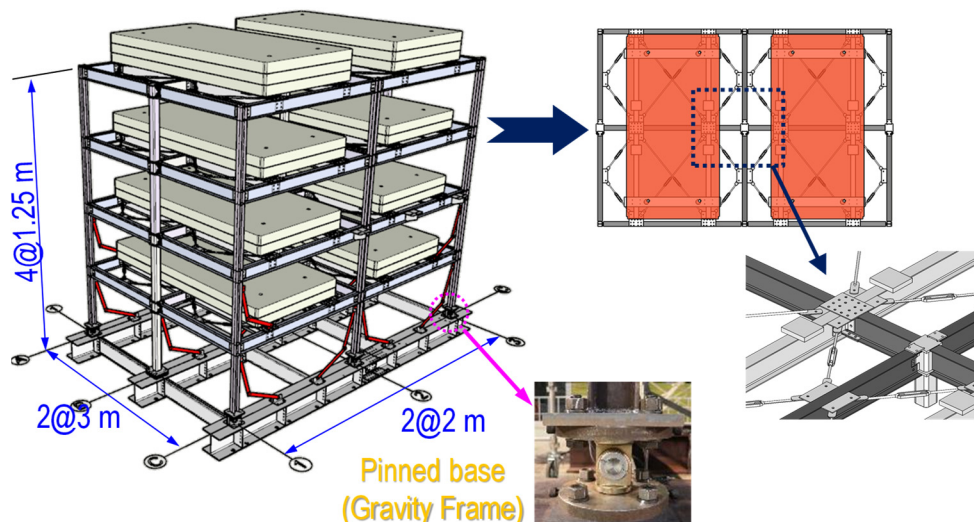


図1. 縮尺1/2の重層ラーメン試験体

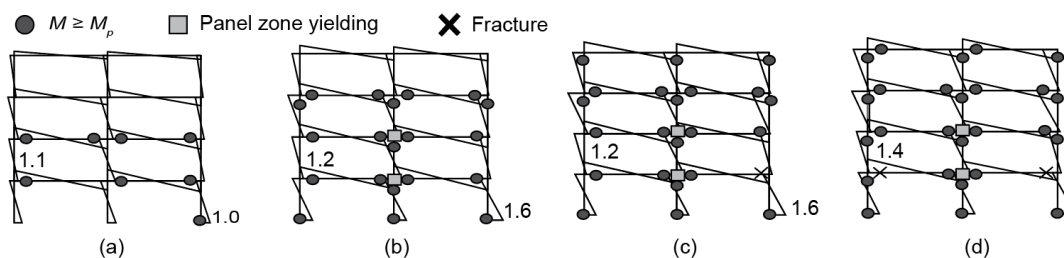


図2. 損傷分布 : (a) 50%加振 ; (b) 100%加振-1 ; (c) 100%加振-3 ; (d) 100%加振-4

層ラーメン試験体を模擬した構造システムモデルに付与して、振動台実験の結果との整合性を検証した結果である。弾塑性応答を非常によく追跡できたが、部材に亀裂を生じたタイミングや、亀裂の進展速度を必ずしも正確にとらえられなかった。現象を左右する偶発性をどのように定量化するか、課題が残されている。

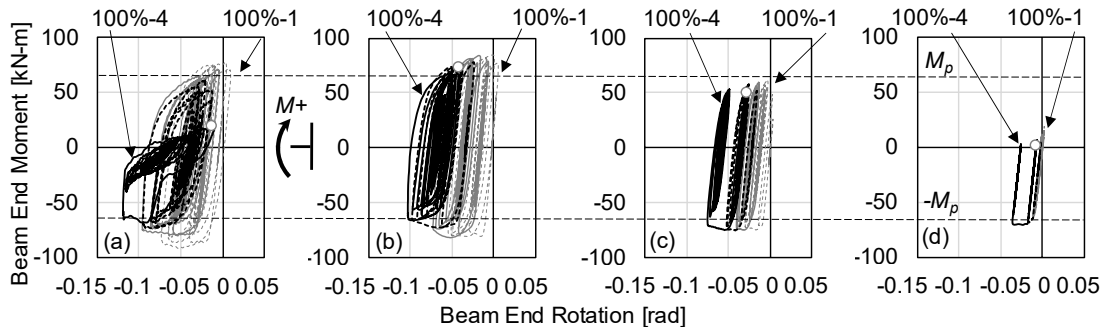


図 3. 梁の応答：(a) 2 階床；(b) 3 階床；(c) 4 階床；(d) 5 階床

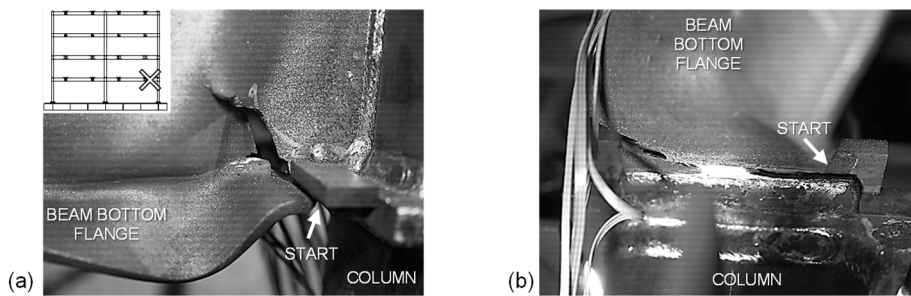


図 4. 梁の破断：(a) 横から見た下フランジ；(b) 下から見た下フランジ

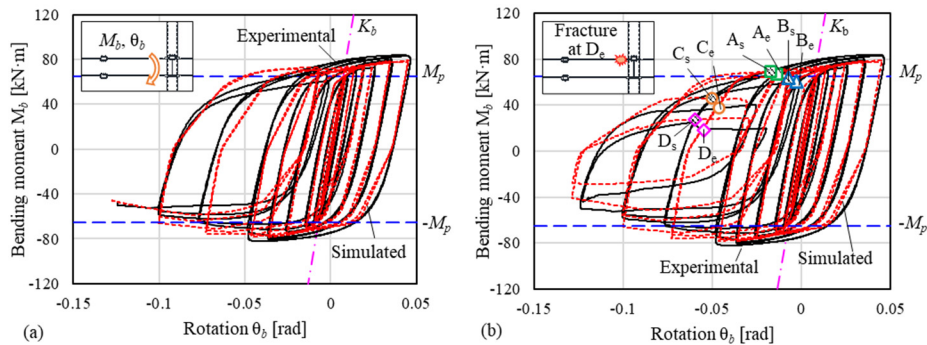


図 5. 実験結果と解析モデル：(a) 梁が破断しない場合；(b) 梁が破断した場合

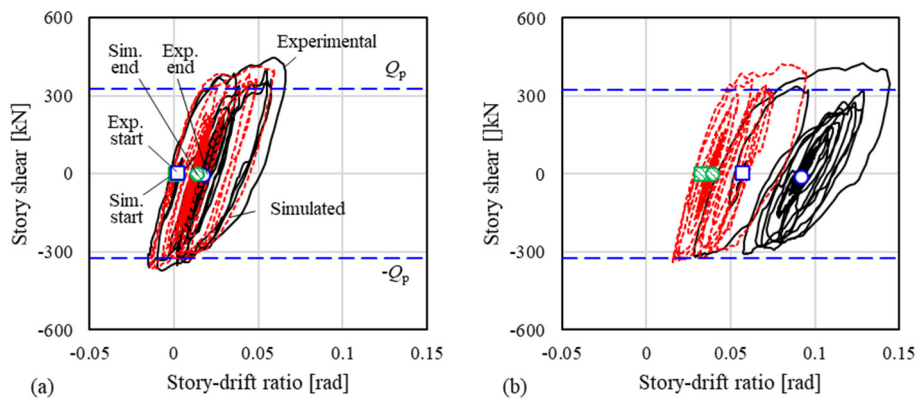


図 6. 実験結果と解析モデル：(a) 100%加振-1；(b) 100%加振-4

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 FUKUTOMI Sho, OKAZAKI Taichiro, MATSUI Ryota, ASARI Tetsuhiro	4. 巻 85
2. 論文標題 INFLUENCE OF VISCOUS DAMPING MODEL ON TIME-HISTORY RESPONSE ANALYSIS OF ELASTIC-PLASTIC SYSTEMS (PART 1): COMPARISON OF DAMPING MODELS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 1555 ~ 1563
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.85.1555	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Astudillo Bryam, Rivera David, Duke Jessica, Simpson Barbara, Fahnestock Larry A., Sause Richard, Ricles James, Kurata Masahiro, Okazaki Taichiro, Kawamata Yohsuke, Tao Zhuoqi, Qie Yi	4. 巻 52
2. 論文標題 Modeling uncertainty of specimens employing spines and force limiting connections tested at E defense shake table	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Earthquake Engineering & Structural Dynamics	6. 最初と最後の頁 4638 ~ 4659
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/eqe.3976	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 該当する

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 1件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 OKAZAKI Taichiro, SOMARRIBA Martin, NAGAE Takuya, MATSUMIYA Tomohiro, ASAI Kenshiro
2. 発表標題 Shake-Table Collapse Test of a Scaled 4-Story Steel Moment-Frame Part 1: Test Plan
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 SOMARRIBA Martin, OKAZAKI Taichiro, NAGAE Takuya, MATSUMIYA Tomohiro
2. 発表標題 Shake-Table Collapse Test of a Scaled 4-Story Steel Moment-Frame Part 2: Test Results
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 LI Jionghui, OKAZAKI Taichiro, NAGAE Takuya, MATSUI Ryota, SOMARRIBA Martin
2. 発表標題 Shake-Table Collapse Test of a Scaled 4-Story Steel Moment-Frame Part 3: Numerical Analysis
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 JIN Jialiang, OKAZAKI Taichiro, NAGAE Takuya, TAKAHASHI Noriyuki, MATSUMIYA Tomohiro, FUJIWARA Jun, KISHIDA Akiko, KAJIWARA Koichi
2. 発表標題 Comprehensive seismic performance assessment testing Part 5 Ultimate failure simulation of the ten-story test specimen
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 梅林舞, 高橋典之, 千田紘之, 長江拓也, 岡崎太一郎, 松宮智央, 梶原浩一, 中澤博志, 神崎喜和
2. 発表標題 画像処理と モニタリングを用いた間仕切壁のフラジリティ 評価 に関する 基礎的 検討
3. 学会等名 構造工学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Taichiro Okazaki, Akiri Seki, Hashini Herath, Takuya Nagae
2. 発表標題 Numerical simulation of fracture propagation in high-rise buildings subjected to long period-long duration earthquakes
3. 学会等名 17th World Conference on Earthquake Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Ilanildo Dias, Akiri Seki, Taichiro Okazaki
2. 発表標題 Computational study on the seismic behavior of steel chevron braced frames in Japan
3. 学会等名 17th World Conference on Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅井健志郎・谷口佳代・長江拓也・岡崎太一郎・松宮智央・高橋典之・中澤博志・松井良太・梶原浩一
2. 発表標題 鋼構造骨組に対する地震応答解析の精度検証の振動台実験 その2 解析方法と解析結果
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 谷口佳代・浅井健志郎・長江拓也・岡崎太一郎・松宮智央・高橋典之・中澤博志・松井良太・梶原浩一
2. 発表標題 鋼構造骨組に対する地震応答解析の精度検証の振動台実験 その1設計と実験概要
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡崎太一郎・Yi Qie・倉田真宏・河又洋介・Larry A. Fahnestock
2. 発表標題 Full-Scale Shake Table Tests on Frame-Spine System with Force Limiting Connections Part 2: Test Results
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yi Qie・岡崎太一郎・倉田真宏・河又洋介・Larry A. Fahnestock
2. 発表標題 Full-Scale Shake Table Tests on Steel Frame-Spine System with Force Limiting Connections Part 1: Test Plan
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 DIAS Ilanildo, OKAZAKI Taichiro, MATSUI Ryota, ASARI Tetsuhiro
2. 発表標題 Full-Scale Shake Table Tests on Steel Frame-Spine System with Force Limiting Connections
3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会（関東）学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 OKAZAKI Taichiro, SEKI Akiri, MATSUI Ryota, NAGAE Takuya
2. 発表標題 Fracture Simulation of Beams in a High-Rise Building Subjected to Long Period Ground Motion Part 2 Monte Carlo Simulation over Fatigue Parameter
3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会（関東）学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Jessica Duncan (Duke), Bryam Astudillo, Richard Sause, James Ricles, Larry Fahnestock, Barbara Simpson, Masahiro Kurata, Yohsuke Kawamata, Taichiro Okazaki, Zhuoqi Tao, and Yi Qie
2. 発表標題 Force limiting connections to mitigate accelerations in moment resisting frames with pinned-base spines
3. 学会等名 11th International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas (STESSA 2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年



1. 発表者名 Jionghui Li, Martin Somarriba, Taichiro Okazaki, Takuya Nagae, Ryota Matsui
2. 発表標題 Numerical simulation of a reduced-scale, 4-story steel moment-resisting frame tested to collapse
3. 学会等名 11th International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas (STESSA 2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Martin Somarriba, Jionghui Li, Taichiro Okazaki, Takuya Nagae, Tomohiro Matsumiya
2. 発表標題 Shake-table collapse tests of a reduced-scale, 4-story steel moment resisting frame
3. 学会等名 11th International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas (STESSA 2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Jionghui Li, Jun Fujiwara, Koichi Kajiwara, Akiko Kishida, Ryota Nishi, Taichiro Okazaki, Takuya Nagae, Jialiang Jin, Tatsuya Asai
2. 発表標題 Panel zone and column response in a shake-table test on a 10-story steel moment-resisting frame
3. 学会等名 18th World Conference on Earthquake Engineering (18WCEE) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 SOMARRIBA Martin, OKAZAKI Taichiro, NAGAE Takuya, MATSUMIYA Tomohiro
2. 発表標題 Shake-Table Collapse Test of a Scaled 4-Story Steel Moment-Frame Part 4: Transition of Structural Behavior Following Damage Progression
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2023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
研究分担者	松井 良太 (MATSUI Ryota) (00624397)	北海道大学・工学研究院・准教授  (10101)	
研究分担者	岸田 明子 (KISHIDA Akiko) (10599468)	国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震減災実験研究部門・主幹研究員  (82102)	
研究分担者	松宮 智央 (MATSUMIYA Tomohiro) (20454639)	近畿大学・建築学部・教授  (34419)	
研究分担者	高橋 典之 (TAKAHASHI Noriyuki) (60401270)	東北大学・工学研究科・准教授  (11301)	
研究分担者	藤原 淳 (FUJIWARA Jun) (80817049)	国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震減災実験研究部門・主幹研究員  (82102)	
研究分担者	長江 拓也 (NAGAE Takuya) (90402932)	名古屋大学・減災連携研究センター・准教授  (13901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------