

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 1 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03336

研究課題名（和文）倒壊にいたるまでの性能を考慮した鋼構造建築物の耐震設計法の確立

研究課題名（英文）Towards seismic design of steel buildings addressing collapse risk

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） 12,800,000円

研究成果の概要（和文）：鋼構造建築物が、設計想定を超える大地震を受けても倒壊を回避できるか、機能復旧できるかを評価するための基礎データを蓄積し、技術を開発することを目的とした。まず、柱梁接合部の動的載荷実験を実施して、接合部形式の違いや床スラブの存在が、破壊に至るまでの柱梁接合部の耐震性能に与える影響を明らかにした。次いで、こうした梁や柱単体の実験データを精密に再現する数値解析モデルを構築し、このモデルの集合体として構造物全体のモデルを構築することで、地震動を受けた鋼構造建築物に損傷が発生し、損傷が伝播する過程を再現できることを示した。関連して、減衰の数値モデルが地震応答解析に及ぼす影響を、数値実験によって検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鋼構造建築物が、設計実務で考慮されるより大きな地震動を受けて、設計で想定されない損傷を受ける過程を評価するための科学技術を蓄積した。具体的には、鋼構造建築物の耐震性能を左右する柱梁接合部について、非常に実情に近い条件で再現実験を実施し、地震を受けて損傷し、最終的に破壊に至るまでの過程に関する詳細なデータを得た。さらに、こうした実験データに対して校正した数値モデルを組み合わせ、鋼構造建築物の全体系が地震を受けて損傷する過程を、数値解析で再現する技術を蓄積した。

研究成果の概要（英文）：The primary objective of the research was to obtain experimental data on failure of steel components and to advance the technology to numerically simulate the seismic response of steel building structures. The research was planned towards the larger goal of establishing a methodology to assess whether a steel building can safely survive, or maintain usable, after an extremely large earthquake beyond the consideration of building codes. Dynamic loading test of beam-to-column connections was conducted to examine how seismic performance may be affected by connection type and presence of composite floor slab. Numerical modeling techniques were examined to capture the gradual degradation of steel components due to start and propagation of ductile fracture. The model was used to demonstrate that good agreement can be obtained between simulated and experimental behavior of multi-story steel building systems. An additional study was conducted on damping models suited for nonlinear analysis.

研究分野：建築構造

キーワード：建築構造 鋼構造 動的挙動 振動台実験 柱梁接合部 破壊

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

設計規準の想定を超える大地震の危険性が認知され、都市の強靱化が社会的な関心事項になっているいま、従来の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。現代の建築構造設計は、さまざまな不確定性、地震動を含めた環境条件や、構造物の挙動に対する理解に立脚し、コンピュータ解析の精度と信頼性に大きく依存する。一般的に、コンピュータ解析の主目的は、設計者が想定した条件のもとで、変形と被害が許容限度内にとどまることを確認することであり、想定を超えた地震動を受けた場合に、構造物が大きく塑性変形し、応力再分配が進行し、部材が連鎖的に破壊し、やがて重力の作用によって倒壊する過程を追跡する能力は期待されていない。非線形有限要素法などに基づく、より高性能な解析ソフトウェアも、実験などで得た信頼性の高い実データに対してパラメータを較正し検証しないことには、精度と信頼性を期待できない。こんにちの社会が希求する水準まで構造工学を高度化するためには、倒壊にいたるまでの構造物の非線形・動的挙動を解明し、さらに、その現象を追跡する数値解析技術を整備する必要がある。どれほど正確に実際の倒壊挙動を再現するのか、解析の信頼性の評価も大きな課題として残されている。

1995年兵庫県南部地震の被害を受けて、多くの研究者が、鋼構造建築物の倒壊挙動に関連する研究を実施してきた。梁端破断に伴う弾性波の伝播と応力再分配、柱の局部座屈を契機としたラーメン架構の倒壊、柱梁接合部破断の連鎖、長周期地震動を繰り返し受けた超高層ラーメン架構の倒壊などに着目した振動台実験が実施されている。また、実験結果を再現する各種コンピュータ解析法が検証され、鋼構造建築物の倒壊現象は徐々に解明されつつある。しかし、鋼構造建築物の大多数を占める中・低層ラーメン架構やブレース付ラーメン架構において、局所的な破壊が倒壊に至るまでの過程、ひいてはこれらの架構の倒壊危険性は、まだまだ明らかになっていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、中・低層ラーメン架構とブレース付ラーメン架構が、現行設計の想定を超える大地震を受けて倒壊に至るまでの過程を、振動台実験と解析により明らかにすることであった。さらに、倒壊安全性を定量的に評価する手法を確立し、倒壊安全性を効率的・経済的に確保するための設計法を確立することを目指した。

3. 研究の方法

(1) 防災科学技術研究所の大型耐震実験施設を利用して、柱梁接合部の動的載荷実験を実施した。載荷装置を図1に、接合部の詳細を図2に示す。5体の大型試験体を製作し、施工形式の違いや、鉄筋コンクリート合成床スラブの存在が、柱梁接合部の耐震性能に及ぼす影響を、大変形までの動的載荷実験によって検証した。

(2) 破壊の伝播を表現するための数値解析方法を検証した。弾塑性挙動から亀裂の進展による剛性と耐力の劣化にいたるまで、部材の破壊過程を詳細に再現できる数値モデルを構築した。この数値モデルを利用して、過去の大型振動台実験を時刻歴応答解析で再現し、部材が連鎖的に破壊する過程をどの程度正確に追跡できるか検証した。

(3) 建築構造における非線形動的解析に適した減衰モデルを、数値実験によって検証した。

4. 研究成果

(1) 施工形式の違いや合成床スラブの存在が、柱梁接合部の耐震性能に及ぼす影響を、動的載荷実験（図3参照）で検証して、下記の知見を得た。

- 梁ウェブを高力ボルト摩擦接合で接合する現場溶接式接合部は（いずれも設計上、高力ボルト摩擦接合の滑りで梁ウェブ接合部の曲げ耐力が決定される試験体であったが）、高力ボルト

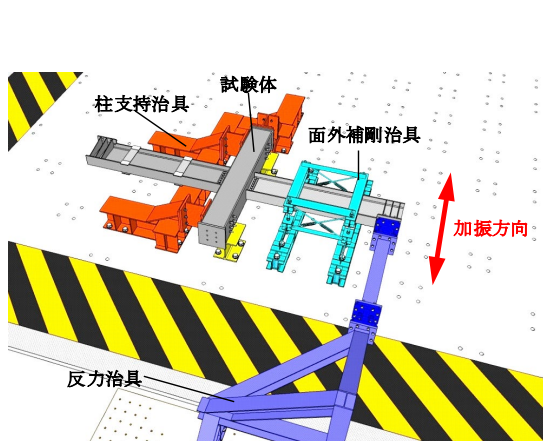


図1 振動台に設置した試験体

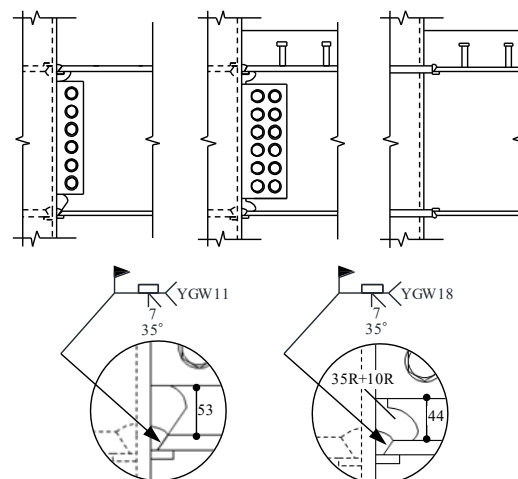


図2 試験体の柱梁接合部の詳細

トの滑りを生じたのち、梁フランジが破断した。

- 過去の静的実験から報告される通り、合成床スラブは梁の耐力に貢献したが、下フランジに作用する塑性歪を大きくし、下フランジの破断時期を早めた。また、合成床スラブが付いても、工場溶接型式が現場溶接型式より優れた変形性能を示した。
 - 動的载荷であっても、静的実験をもとにした計算方法で接合部の耐力を予測でき、荷重の増減以外は過去の静的実験の報告通りの挙動であった。
- (2) 研究開発で世界の研究者が活用するソフトウェア OpenSees を利用して、建築鋼構造における破壊の発生と伝播を表現するための数値解析方法を検証して、下記の知見を得た。
- 精度と計算効率を両立させたファイバー要素 (図4参照) の作成方法を追求し、このファイバー要素によって、実験で観察された梁の損傷と耐力劣化を、非常によく再現できることを示した。
 - ファイバー要素を使用した非線形時刻歴応答解析によって、建築鋼構造における破壊の発生と、損傷や破壊は徐々に構造物全体に伝播する過程を制限しうることを、過去の大型振動台実験との比較によって示した (図5と6参照)。
- (3) 数ある比例減衰モデルを整理し、それぞれの特徴を把握したうえで、基礎的な弾塑性質点系の時刻歴応答解析に基づいて、各減衰モデルの適性を比較、検証して、下記の知見を得た。
- 減衰モデルによって、最大変形量が数倍も異なる場合があり、多自由度系には、質量比例減衰や剛性比例減衰を採用するべきでないことを確認した。逐次、減衰行列を更新しても、剛性比例減衰の欠点を補えない。
 - 従来の指摘どおり、構造解析で最も一般的に用いられるレイリー減衰は、系が降伏したときの減衰力を過大評価することを確認した。
 - 逐次、固有値解析を実施し、全モードのモード減衰を加算して減衰行列を更新する減衰モデルを正解と考えて、もっともこの正解に近く、かつ計算効率が良い減衰モデルを2つ見出した。ただ、いずれも一般的なソフトウェアに実装されていない。

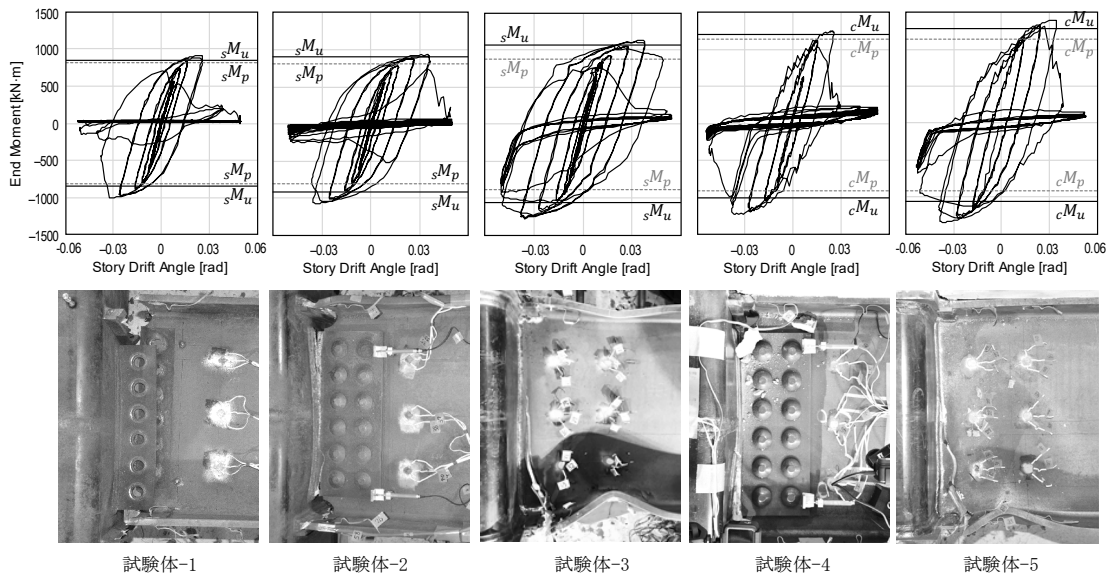


図3 実験結果

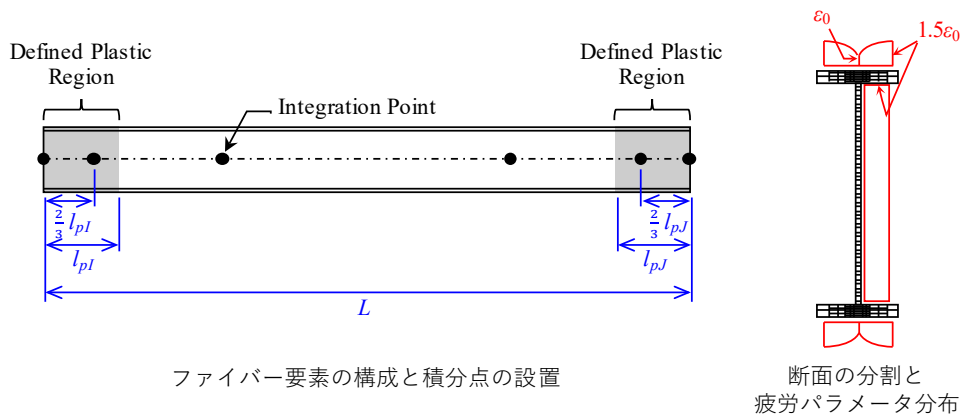


図4 ファイバー要素の構成

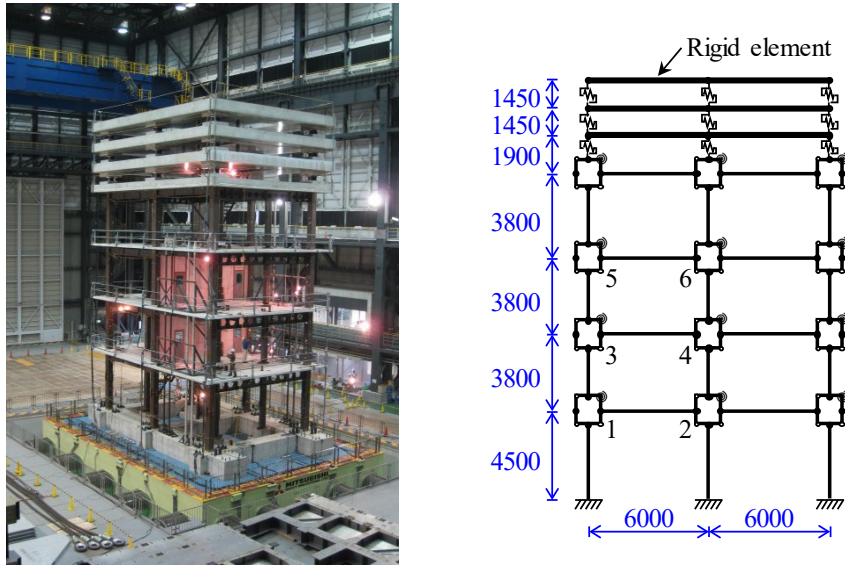


図5 過去の振動台実験（左）と数値解析モデル（右）

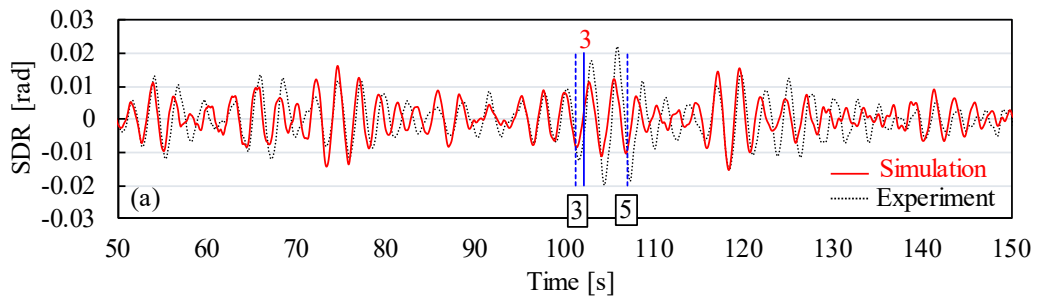


図6 振動台実験と数値解析で得た応答の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 NONOYAMA Yusuke, NAGAE Takuya, OKAZAKI Taichiro, MATSUMIYA Tomohiro, TAKAHASHI Noriyuki, KAJIWARA Koichi, NAKAZAWA Hiroshi, MIKOSHIBA Tadashi	4. 巻 26
2. 論文標題 NUMERICAL ANALYSIS FOCUSING ON STIFFNESS DETERIORATION BEHAVIOR OF COMPOSITE BEAM SUBJECTED TO CYCLIC DEFORMATIONS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIJ Journal of Technology and Design	6. 最初と最後の頁 153 ~ 158
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.3130/aijt.26.153	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16件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Taichiro Okazaki
2. 発表標題 Contribution of Academic Research to the Seismic Safety of Steel Structures in Japan
3. 学会等名 16th Symposium on Earthquake Engineering（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Taichiro Okazaki, Takuya Nagae, Tomohiro Matsumiya, Noriyuki Takahashi, Hiroshi Nakazawa, and Tadashi Mikoshiba
2. 発表標題 Dynamic loading tests of typical Japanese steel beam-to-column moment-resisting connections
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 Ilanildo DIAS, Akiri SEKI, Taichiro OKAZAKI
2. 発表標題 A COMPUTATIONAL STUDY ON THE CYCLIC LOADING BEHAVIOR OF STEEL CHEVRON BRACED FRAMES
3. 学会等名 第15 回日本地震工学シンポジウム（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akiri SEKI, Taichiro OKAZAKI, Ilanildo DIAS, Hayato ASADA
2. 発表標題 EXPERIMENTAL BEHAVIOR OF CHEVRON BRACED FRAMES DESIGNED ACCORDING TO CURRENT PRACTICE
3. 学会等名 第15 回日本地震工学シンポジウム（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上杉周平, 関あきり, 岡崎太郎, 浅田勇人
2. 発表標題 H形断面ブレースを用いたK形ブレース付鋼架構の繰返し載荷実験
3. 学会等名 鋼構造年次論文報告集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akiri Seki, Shuhei Uesugi, Taichiro Okazaki, Hayato Asada, Ryota Matsui, Tetsuhiro Asari
2. 発表標題 Effect of Bracing Connections on the Cyclic Loading Behavior of Steel Chevron Braced Frames Part 7 Discussion of Test Results
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hashini Herath, Taichiro Okazaki, Ryota Matsui, Takuya Nagae
2. 発表標題 Fracture Simulation of Beams in a High-Rise Building Subjected to Long Period Ground Motion
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青柳克弘, 岡崎太郎, 松宮智央, 高橋典之, 御子柴正, 梶原浩一
2. 発表標題 大型振動台を用いた構造骨組加力実験と解析評価 その8 床スラブの合成効果
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野々山優輔, 長江拓也, 岡崎太郎, 松宮智央, 高橋典之, 中澤博志, 御子柴正, 梶原浩一
2. 発表標題 大型振動台を用いた構造骨組加力実験と解析評価 その9 合成梁の変形性能と剛性劣化挙動
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福富将, 高橋裕人, 岡崎太郎, 松井良太, 麻里哲広
2. 発表標題 減衰モデルが弾塑性時刻歴応答に与える影響 その1 減衰モデルの分析
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋裕人, 福富将, 岡崎太郎, 松井良太, 麻里哲広
2. 発表標題 減衰モデルが弾塑性時刻歴応答に与える影響 その2 時刻歴応答解析
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青柳 克弘、岡崎 太一郎、長江 拓也、松宮 智央、高橋 典之、丸山 一平、中澤 博志、御子柴 正
2. 発表標題 大型振動台を用いた構造骨組加力実験と解析評価 その5 現場式柱梁接合部の繰返し載荷性能
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野々山 優輔、鳥谷尾 駿佑、長江 拓也、岡崎 太一郎、松宮 智央、高橋 典之、丸山 一平、御子柴 正、梶原 浩一
2. 発表標題 大型振動台を用いた構造骨組加力実験と解析評価 その6 床スラブの影響を含めた分析
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 根本 結衣、高橋 典之、長江 拓也、丸山 一平、松宮 智央、岡崎太一郎、中澤 博志、御子柴 正、梶原 浩一
2. 発表標題 大型振動台を用いた構造骨組加力実験と解析評価 その7 動的載荷実験における画像相関法の適用と部材損傷進展評価
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上杉 周平、関 あきり、岡崎 太一郎、浅田 勇人、麻里 哲広
2. 発表標題 接合部性能に着目したブレース付ラーメンの耐震性能評価 その8 部分架構実験4
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 関 あきり、上杉 周平、中井 沙耶、岡崎太郎、浅田 勇人、麻里 哲広
2. 発表標題 接合部性能に着目したブレース付ラーメンの耐震評価 その9 H形断面ブレースの挙動
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018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	松宮 智央 (Matsumiya Tomohiro) (20454639)	近畿大学・建築学部・准教授 (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	麻里 哲広 (ASARI TETSUHIRO) (90250472)	北海道大学・工学研究院・助教 (10101)	
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)	