

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 26 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760448

研究課題名(和文)長周期地震動を受ける超高層建物の接合部破断を考慮した耐震性能評価手法の提案

研究課題名(英文)Proposal for seismic performance of high-rise buildings under long period ground motion taking fracture of connections

研究代表者

松井 良太 (Matsui, Ryota)

東京工業大学・理工学研究科・助教

研究者番号：00624397

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、長周期地震動を受ける超高層建物の終局状態を評価するために、まず、数値解析により梁端接合部の累積変形性能について分析し、定量的な評価手法を提案した。また、H形断面梁端部に同評価手法を適用するために必要となる、繰返し荷重下の横補剛条件について、実験および数値解析より検証した。次に、同評価手法を拡張させるため、円形鋼管同士の間接継手接合部を対象とした繰返し載荷実験を行った。最後に、申請者が提案してきたブレースおよび接合部破断の評価手法を組み込んだ時刻歴応答解析プログラムにより、建物の周期帯を考慮した地震動を用い、極大地震を受けた際の建物の耐震性能や脆弱性曲線について分析した。

研究成果の概要(英文)：In this research, the cumulative deformation capacity of the end of the beam was investigated on the basis of the experimental and numerical data, and an evaluation method for assessing the ultimate state of the high-rise buildings under long period ground motion was proposed. Additionally the lateral bracing requirements for H-section beams under cyclic loading was examined by experiments and numerical analysis. To expand the proposed evaluation method, the cumulative deformation capacity of the circular hollow section T-joints was investigated by experiments and finite element analysis. The seismic performance of buildings under severe ground motion in a range of the dominant natural period of the buildings was examined, using the time history analysis program including fracture of the braces and connections. This analysis results also provide a fragility curve of the buildings including the connection fracture effect.

研究分野：耐震構造

キーワード：梁端接合部 ブレース 接合部破断 部材破断 耐震性能 累積変形性能 エネルギー吸収性能 フラジリティ曲線

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、首都圏域に数多くある鋼構造超高層建物が長周期地震動を受け、大きな揺れが長時間継続することが明らかとなった。文部科学省地震調査研究推進本部の長期評価結果より、2011年1月1日から今後30年間に、M8.4前後の南海地震が60%程度、M8.1前後の東南海地震が70%程度という高い確率で発生すると推測されている。内閣府中央防災会議では、これら海洋型大規模地震が同時に発生し、震源より遠く離れた地域において長周期地震動が強く発生する可能性があり、首都圏域において超高層建物に甚大な被害が生じることが懸念されている。超高層建物が規模の大きい長周期地震動を受けると、梁端等の箇所において大きな塑性変形を多数回繰返して生じ、甚大な損傷が発生する可能性があるが、このような場合における同建物の耐震性能評価手法については殆ど研究がなされておらず、実験的・数値解析的な知見の充実が急務とされている。

2. 研究の目的

研究の目的は、長周期地震動を受ける鋼構造超高層建物の終局的な耐震性能について評価する手法を提案することである。長周期地震動は、超高層建物の長時間の揺れを引き起こし、梁端接合部が大きな損傷を受ける可能性がある。そこで、本研究では以下に示す項目の研究を遂行し、目的の達成を目指す。  
 (1) これまで提案してきた梁端接合部の破断評価手法について、より詳細に検討する。また併せて、極大地震下における梁の横座屈性状についても検証する。

(2) これまで検討されていない範囲の、梁端接合部の部分架構を対象として、梁端接合部破断に至るまでの累積変形性能について調査する。

(3) 現行の設計では検討されていない梁端接合部が破断を伴う場合において、極大地震が超高層建物の応答性状に与える影響について、数値解析により分析する。

3. 研究の方法

本研究は、以下に示す具体的な方法により遂行され、目的の達成を目指す。

(1) 継手効率が梁端接合部の累積変形性能に与える影響の分析

角形鋼管柱に接合されたH形断面梁の端部を対象として、ウェブの継手効率を考慮した累積変形性能評価を試みる。既往研究における実験結果を参照し、梁端部における塑性歪を計算する。この塑性歪を、曲げ要素とバネ要素を組み合わせた線材モデルにより簡便に算出し、鋼素材の疲労性能式と適合させることで、梁端接合部の破断を予測することを試みる。

(2) 繰返し逆対称曲げを受ける上フランジ補剛されたH形断面梁の必要補剛条件の検証

上記の梁端接合部の累積変形性能の評価手法は、繰返し荷重下において梁が適切に横補剛されている条件が必要となる。これより、1/5サイズに縮小されたH形断面梁を対象として、繰返し逆対称曲げを受ける同梁の横座屈性状について、補剛条件を変化させて検証する。有限要素解析モデルを用いて、実験結果の再現を試み、同モデルにより実大サイズの梁に求められる必要補剛条件について分析する。

(3) 繰返し塑性曲げを受ける円形鋼管T形分岐継手の累積変形性能の評価手法の提案

アトリウム構造等、円形鋼管を柱梁に適用した場合などを参照し、塑性変形を伴う繰返し面内曲げを受ける円形鋼管T形分岐継手を対象として、実験および解析により主管と支管の断面寸法が分岐継手の破壊形態および累積変形性能に与える影響を検証する。

(4) ブレースおよび梁端部破断を考慮した鋼構造骨組の耐震性能評価

上記に示した検討内容をもとに、部材破断を考慮した時刻歴応答解析を用い、柱梁耐力比やブレース種別が鋼構造骨組の極大地震時における応答および崩壊機構に与える影響を分析する。

4. 研究成果

本研究により、以下のような研究成果が得られた。

(1) 継手効率が梁端接合部の累積変形性能に与える影響の分析

図1に示す数値解析モデルを用い、ウェブの継手効率を50~75%程度に変化させた梁端接合部の歪分布について分析した。静的増分解析より得られた梁端回転角0.02rad時におけるフランジ幅方向の歪分布は図2に示す通りとなる。梁端部がノンスカラップで接合されている場合、フランジの内外の歪分布はフ

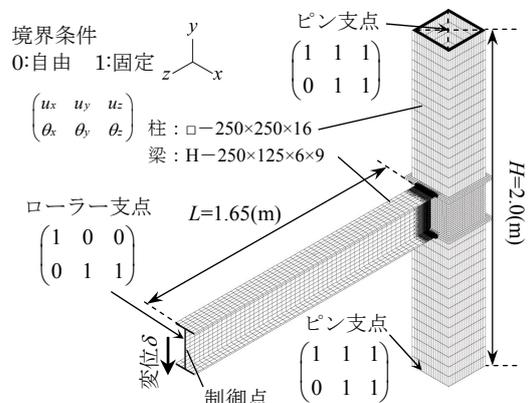


図1 梁端接合部の数値解析モデル

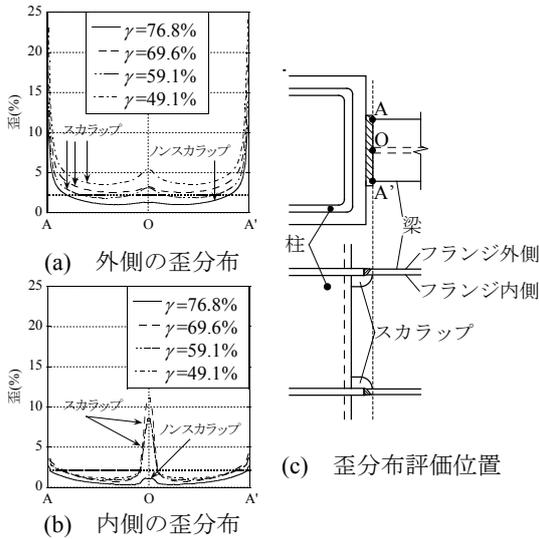


図2 フランジの歪分布

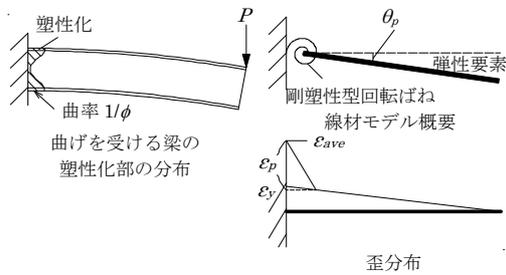


図3 線材モデル概要

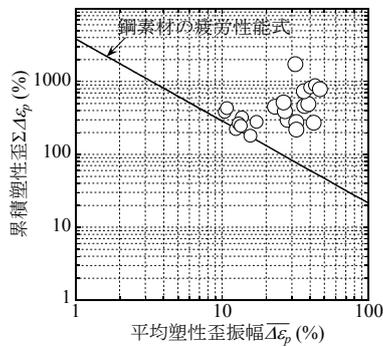


図4 フランジの歪分布

ランジ端部に集中する。一方、スカラップを有する接合部の場合、スカラップ底に歪が集中する。また、継手効率 $\gamma$ が小さくなるほど、局所における塑性歪の集中が顕著となる傾向がある。同塑性歪は、図3に示した線材モデルを用い、回転角から評価し得る。同モデルより、既往研究の実験結果から塑性歪の履歴を評価し、梁端接合部が破断に至るまでの累積塑性歪および平均塑性歪振幅を算出し、鋼素材の疲労性能式と併せて図4に示す。両者は概ね対応しており、提案手法を用いて得られた塑性歪の累積値と平均値を、鋼素材の疲労性能式とを適合することで、梁端接合部の破断を評価し得ることが分かった。

(2) 繰返し逆対称曲げを受ける上フランジ補剛されたH形断面梁の必要補剛条件の検証

図5に示す1/5縮小サイズのH形断面梁の骨組を加力台に設置し、繰返し載荷実験を実施した。H形断面梁試験体は、補剛材の有無、水平剛性および回転剛性をパラメータとして設定した。図6に実験より得られた梁端曲げモーメント-梁端回転角関係を示す。現行の規定を満足した水平および回転補剛材を設けることで、繰返し荷重下における耐力劣化を低減できる。なお、回転補剛材の剛性が規定の1/10倍の場合でも、規定を満足している場合と履歴は概ね同等であった。図7に実験結果を再現し得るH形断面梁の数値解析モデルを示す。同モデルを用い、補剛間隔2000mmの場合における梁端の耐力およびエネルギー吸収率を、補剛材の剛性を変化させて分析した結果を図8に示す。梁端の耐力およびエネルギー吸収率は、必要補剛剛性までは補剛材の剛性が大きくなるほど向上するが、それ以上に剛性を大きくしても向上しない。補剛間隔の場合も同様で、必要補剛間隔以下の間隔で補剛材を設けても耐力およびエネルギー吸収率は頭打ちとなる。以上より、現行の規定は、繰返し荷重の影響を考慮しても有用であることが分かった。

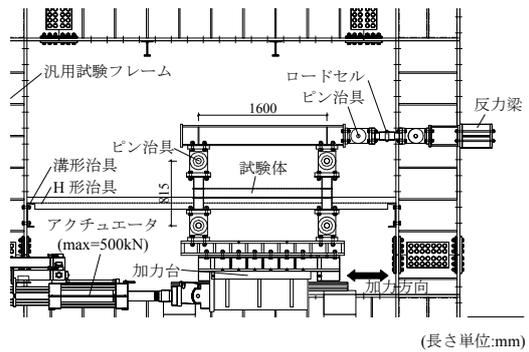
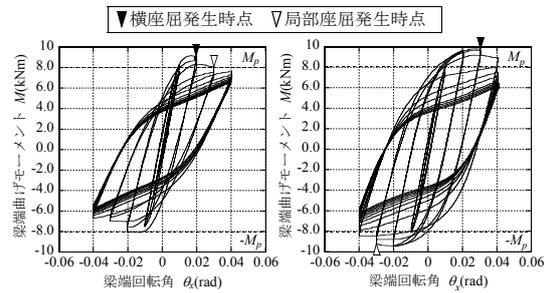


図5 H形断面梁の実験セットアップ



(a) 無補剛 (b) 水平+回転補剛

図6 梁端曲げモーメント-梁端回転角関係

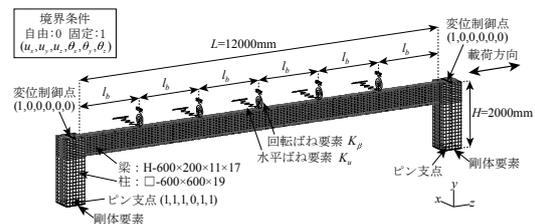


図7 H形断面梁の数値解析モデル

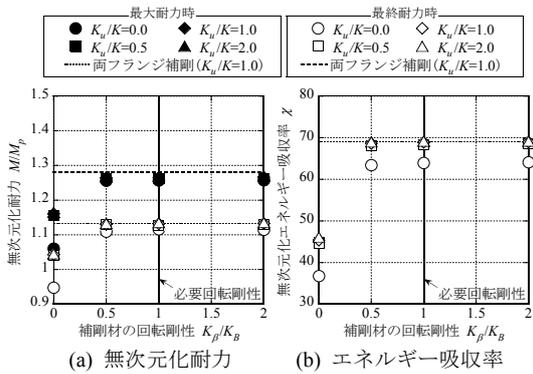


図8 耐力およびエネルギー吸収率

(3) 繰返し塑性曲げを受ける円形鋼管 T 形分岐継手の累積変形性能の評価手法の提案

図9に示すセットアップにて、T形分岐継手の繰返し塑性曲げ載荷実験を実施した。T形分岐継手は、同じ主管に対し支管を変化させ4種類を設定した。

図10に示すように、管径比  $\beta=0.61$  のみで比較すると、支管の径厚比  $d/t$  が大きくなるほど、塑性歪が集中する箇所が主管管壁、支管管壁、局部座屈発生箇所と変化することが分かる。図11に数値解析モデルで実験における試験体の挙動を再現した結果を示す。破壊形態は概ね実験と対応しており、塑性歪が集中する箇所を捉えられている。同箇所の塑性歪は、支管壁で破壊する場合は図3のモデルで、局部座屈部で破壊する場合は図12(a)のモデルで算出し得る。図12(b)に見るように、これらのモデルで評価した塑性歪の累積値と平均値は、FEM解析と概ね対応しており、図3および図12(a)のモデルより、T形分岐継手の累積変形性能を評価できることが分かった。

(4) ブレースおよび梁端部破断を考慮した鋼構造骨組の耐震性能評価

これまでの知見をもとに、現状の法規定を満たす24種の7層、15層、21層のブレース付骨組(図13)を対象として、漸増動的解析(IDA)により骨組の耐震性能について分析した。観測波は内陸型地震および海溝型地震より抽出し、人工地震波として14種の地震動を採用し、図14に見るように設計用速度応答スペクトルにモデルの周期帯0.6~3秒に対応するよう規準化した。図15に、円形鋼管ブレース(CHS)および座屈拘束ブレース(BRB)を用いた21層モデルを例として、得られた最大層間変形角のIDAカーブのうち中央値を示す。入力地震動倍率SF=1までは、部材破断の非考慮/考慮が最大層間変形角に与える影響は小さいが、SF=1を超えると、梁降伏型および柱降伏型の破断を考慮した場合の最大層間変形角が、非考慮の場合を大きく上回る傾向が見られる。また、他の骨組モデルの場合でも同様の結果が得られた。

本検討で得られた21層モデルフラジリティ曲線を図16に示す。図中における、被災

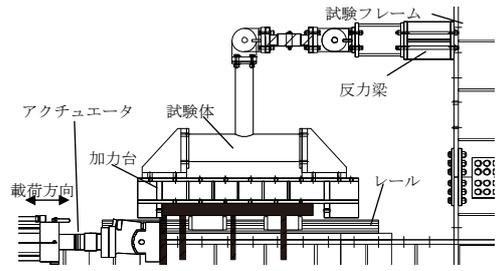


図9 T形分岐継手の実験セットアップ

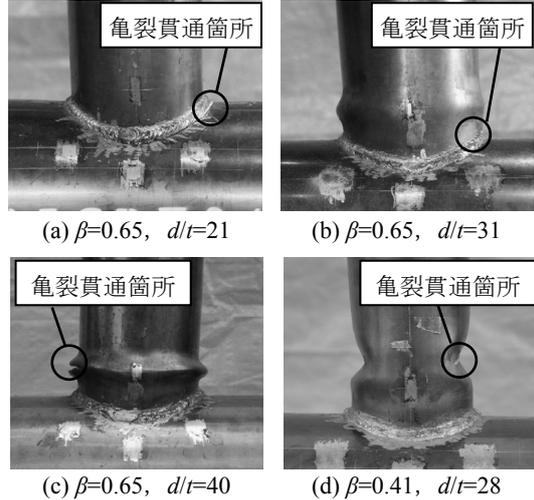


図10 T形分岐継手の破壊形態

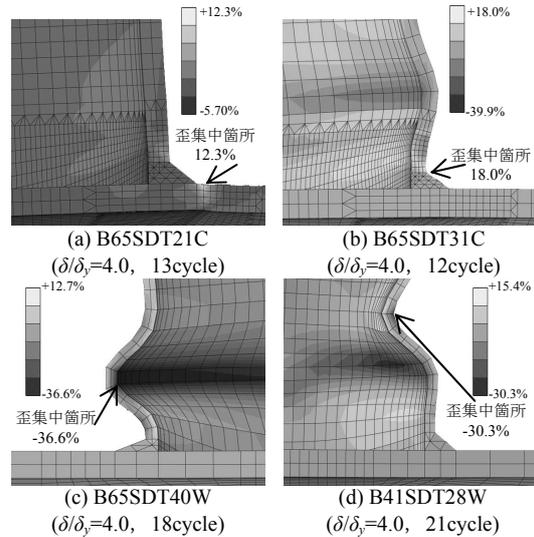
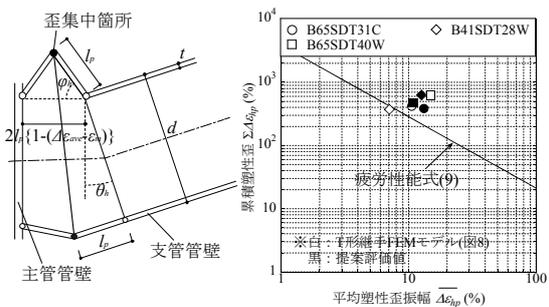


図11 数値解析モデルによる実験再現結果



(a) 力学モデル (b) 評価精度

図12 局部座屈部破壊モデルおよび累積変形性能の評価精度

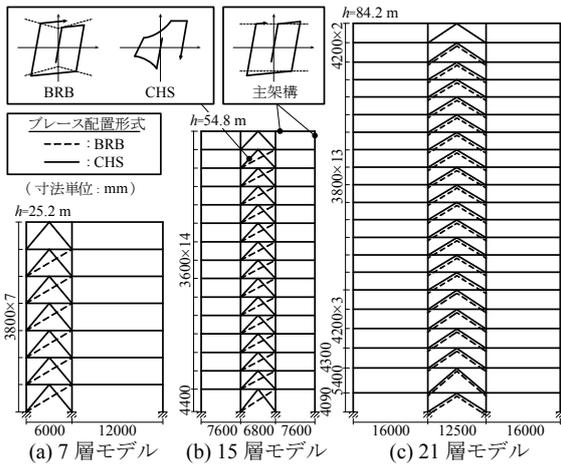


図13 ブレース付骨組の解析モデル

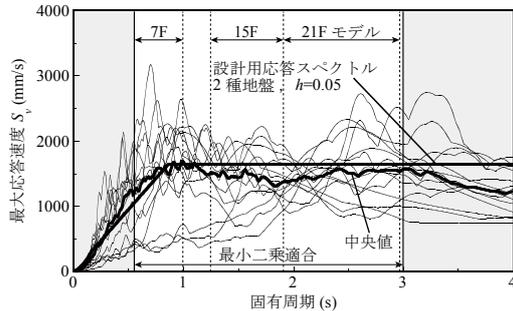


図14 設計用速度応答スペクトル

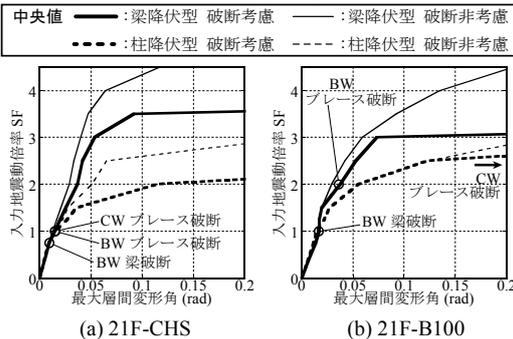


図15 最大層間変形角の中央値のIDA曲線

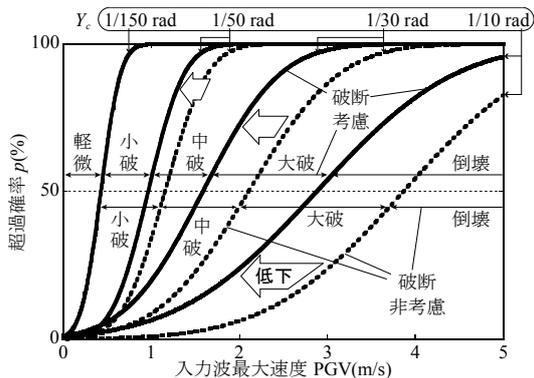


図16 フラジリティ曲線 (21層)

度は、国土交通省住宅局建築指導課の被災度区分判定基準を参照し、最大層間変形角より判定している。部材破断を考慮した場合、最大層間変形角が1/50radを超えた領域で、破断の非考慮/考慮の差異が顕著となる。これより、1/50radを超えた領域における被害を検討する際は部材破断を考慮する必要があ

ることが分かった。

(5) 成果によるインパクト、今後の課題

以上の研究成果により、現状で設計し得る鋼構造骨組の極大地震時における応答挙動を、部材破断を考慮しつつ明らかにした。また、非考慮とした場合と比較検証し、最大層間変形角が一定上の値となる場合、鋼構造骨組の設計にあたり、部材破断は考慮すべき現象であることを明らかにした。これらの成果は、今後、長周期地震動を受ける超高層建物の終局耐震性能を評価する手法の確立の一助となると考えられ、設計の信頼性向上に寄与すると考えられる。なお、本研究で提案した手法については、鋼構造架構の荷重実験(図17)により検証する予定であり、次年度以降の課題とする。



図17 鋼構造架構の荷重実験

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- 1) 松井良太, 廣山剛士, 竹内 徹: 繰返し塑性曲げを受ける円形鋼管T形分岐継手の累積変形性能, 日本建築学会構造系論文集, 第79巻, 第702号, pp. 1183-1191, 2014. 8, 査読有
- 2) 松井良太, 廣山剛士, 竹内 徹: 梁端部破断を考慮したブレース付ラーメン骨組のエネルギー吸収性能, 日本鋼構造協会鋼構造論文集, 日本鋼構造協会, 第20巻, 第79号, pp. 11-18, 2013. 9, 査読有
- 3) 松井良太, 山浦夕佳, 竹内 徹: 繰返し逆対称曲げを受ける上フランジ横補剛されたH形断面梁の必要補剛条件, 日本建築学会構造系論文集, 第78巻, 第690号, pp. 1485-1492, 2013. 8, 査読有

[学会発表] (計10件)

- 1) 松井良太, 竹内 徹, 廣山剛士: 繰返し塑性曲げを受ける円形鋼管T形分岐継手の累積変形性能 その2 亀裂発生個所における局部歪の集中度, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), C-1分冊, pp. 789-790, 2014年9月13日, 神戸大学(兵庫県・神戸市)
- 2) 三原早紀, 松井良太, 廣山剛士, 竹内

徹：繰返し塑性曲げを受ける円形鋼管 T 形分岐継手の累積変形性能 その 1 繰返し載荷実験，日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)，C-1 分冊，pp. 789-790，2014 年 9 月 13 日，神戸大学（兵庫県・神戸市）

- 3) R. Matsui, Y. Yamaura, T. Takeuchi: Lateral Bracing Requirements for H-section Beams with Supports Attached to Top Flange Subjected to Cyclic Antisymmetric Moment, Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council (Toronto, Canada), March 26th, 2014
- 4) 陳 星辰, 松井良太, 竹内 徹, 得能将紀：部材破断を考慮した漸増動的地震応答解析による制振構造の耐震性能-その 2 部材損傷度に着した耐震性能-, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)，C-1 分冊，pp. 1000-1001，2013 年 8 月 31 日，北海道大学（北海道・札幌市）
- 5) 竹内 徹, 松井良太, 得能将紀：部材破断を考慮した漸増動的地震応答解析による制振構造の耐震性能-その 1 最大層間変形に着目した耐震性能-, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)，C-1 分冊，pp. 999-1000，2013 年 8 月 31 日，北海道大学（北海道・札幌市）
- 6) 山浦夕佳, 松井良太, 竹内 徹：繰返し逆対称曲げを受ける上フランジ補剛された H 形断面梁の必要補剛条件 -その 3 床スラブ補剛の必要補剛条件-, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)，C-1 分冊，pp. 1117-1118，2013 年 8 月 30 日，北海道大学（北海道・札幌市）
- 7) 松井良太, 山浦夕佳, 竹内 徹：繰返し逆対称曲げを受ける上フランジ補剛された H 形断面梁の必要補剛条件 -その 2 既往の必要補剛条件の検証-, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)，C-1 分冊，pp. 1115-1116，2013 年 8 月 30 日，北海道大学（北海道・札幌市）
- 8) 廣山剛士, 山浦夕佳, 松井良太, 竹内 徹：繰返し逆対称曲げを受ける上フランジ補剛された H 形断面梁の必要補剛条件 -その 1 繰返し載荷実験-, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)，C-1 分冊，pp. 1113-1114，2013 年 8 月 30 日，北海道大学（北海道・札幌市）
- 9) 廣山剛士, 松井良太, 竹内 徹：梁端部破断を考慮したブレース付骨組のエネルギー吸収性能，鋼構造シンポジウム，鋼構造年次論文報告集，Vol. 20，pp. 835-840，2012 年 11 月 16 日，TFT ファッションタウンビル（東京都・江東区）
- 10) 廣山剛士, 松井良太, 竹内 徹：梁端部破断を考慮したブレース付ラーメン骨組のエネルギー吸収性能，日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)，C-1 分冊，

pp. 1221-1222，2012 年 9 月 13 日，名古屋大学（愛知県・名古屋市）

〔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〕

無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松井 良太 (MATSUI RYOTA)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号：

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し