

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420574

研究課題名(和文) 巨大長周期地震動に対する超高層建物の耐震性評価指標の構築と制振改修設計手法の提案

研究課題名(英文) Proposal of earthquake resistance evaluation index in high rise building to huge long-period ground motions and of vibration control repair design technique

研究代表者

佐藤 大樹 (Sato, Daiki)

東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授

研究者番号：40447561

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、超高層建物に巨大な長周期地震動が作用した場合の被害・損傷状況を評価し、さらに制振装置を用いた被害軽減対策を提案することを目的としている。柱梁接合部の塑性変形能力の評価指標として、梁端部の累積塑性変形倍率と実験方法に着目した調査を行なった。下層部に部分的にオイルダンパーや鋼製ダンパーを設置した制振補強を提案した。時刻歴応答解析結果を基に分析を行い、高い制振性能を確認した。長時間の繰り返しによる制振ダンパーの性能低下指標を組み込んだ解析モデルを構築し、多質点モデルによる地震応答解析によってダンパー性能の低下を考慮した応答の評価を行った。

研究成果の概要(英文)：In the present study, it has aimed to evaluate damage and the damage situation when a huge long-period ground motion acts on the high rise building, and to propose the damage reduction measures with a vibration control device. The accumulation plastic strain magnification and the experimental methodology of the edge of the beam were investigated. The vibration control reinforcement that partially established the oil damper and the steel-made damper in the lower layer part was proposed. A high vibration control performance was confirmed from the response analysis results. An analytical model considering the performance decrease index of the vibration control damper by the repetition for a long time was built. The response considering the performance decrease by the seismic response analysis was evaluated. The response considering the performance decrease by using the response analysis results was evaluated.

研究分野：建築構造・材料

キーワード：超高層建物 長周期地震動 制振改修 時刻歴応答解析 制振ダンパー 長時間繰り返し 性能低下

### 1. 研究開始当初の背景

超高層建物が建設され始めて 40 年以上が経ち、この間の超高層建物の設計・建設方法は技術水準や社会・経済状況を反映しながら変化してきた。1980 年代に建設された既存超高層建物が設計された際には、それまでに観測されている地震動に対して、柱・梁接合部を塑性化させる耐震構造の考え方に基づき、最大変形のみに着目した耐震安全性の評価が行われていた。つまり、これらの建物に対して近年の研究により必要性が明らかになってきた長周期地震動への対策、特に長時間の繰り返し振動や余震を含めた複数の地震に対する累積疲労評価を考慮した建物の耐震安全性評価は行われていない。こうしたなか、首都直下地震防災・災害特別プロジェクトの「長周期地震動による被害軽減対策の研究開発」(以下、首都直下PJ)による大規模振動台実験が E - ディフェンスで行われた。試験体はこれまでに最も多く建設された高さ 80m 程度の鉄骨造の建築物を想定して、下層 4 層には実代鉄骨造骨組みを作成し、その上に 3 個のコンクリートの錘とその間に積層ゴムを挟むことで超高層建物と同じ周期で振動するものである。

2007 年度の実験の結果、長周期地震動によって鋼構造架構が多数回変形し、ついには梁端フランジが破断に至った。この実験から、最大値だけで無く累積疲労評価の必要性が改めて確認された。しかし、現状では累積値に着目して耐震安全性を評価する具体的な指標がなく、さらには梁端が破断した後の建物特性の変化を考慮したシミュレーション手法が構築されていないため、想定以上の巨大長周期地震動が作用した場合における超高層建物の終局限界状態は不明瞭なままである。その後さらに、既存超高層建物の長周期地震動対策に対する課題が整理され、2009 年度には、同様の試験体を用いて、制振ダンパーを用いた制振補強を確認する実験が再度行われた。この実験では、長周期地震動が作用した場合に入力されるエネルギーのほとんどをダンパーが吸収し架構の損傷を大幅に低減するという、既存超高層建物に対する制振補強の有効性を裏付けるデータが提示された。

一方、首都圏などの大都市に既に建設されている初期の超高層建物のいくつかで制振補強を行っている例があるが、それぞれで試行錯誤的に行われているのが現状である。既存超高層建物の制振補強による高耐震化を促進するためには、簡便で有効な設計手法の確立が必要である。2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では、震源から数百キロ離れた東京の超高層ビルが 10 分以上も揺れ続けた。このままでは近い将来に南海トラフによる巨大地震が発生した場合、先の E - ディフェンス実験と同様に、多くの超高層建物で梁端が破断するなどの大きな被害が発生することが考えられる。このような東日

本大震災の経験から、都市の中核をになう超高層建物には、あらゆる可能性を考慮した最大クラスの地震動を想定した上で、地震直後から建物機能を再開できる高耐震性性能が求められている。従来設計で想定されていた振幅レベルや継続時間を大きく上回る地震動に対して、本研究課題が取り組む、既存超高層建物の終局状態に至るまでの耐震性能を的確に評価できる時刻歴応答解析手法や応答評価指標、さらには簡便で確実な制振改修の設計手法の構築が不可欠である。

### 2. 研究の目的

上記の研究背景および応募者の研究成果を基に、本研究は長周期地震動をうける既存超高層建物の耐震安全評価指標および梁端破断後の建物挙動を再現できる解析手法を構築し、制振ダンパーを用いた制振改修手法を構築するものである。具体的には研究期間内に以下の項目を明らかにする。

(1) データが公開されている E - ディフェンス震動台実験結果と、既往の柱・梁接合実験結果を用いて、梁端が破断するまでの疲労損傷を評価する。評価指標としては梁の塑性率と累積塑性変形倍率を用いる。さらに、長周期地震動を対象とした実験結果が少ないため、接合部実験を実施し、その実験結果も用いて評価指標を検証する。

(2) 2007 年度、2009 年度の行われた E - ディフェンスでの実験結果から、梁端が破断した際に発生する直交梁端や他方梁端ならびに上下柱への応力再分配を詳細に分析する。さらに梁端破断による耐力低下を再現できる材端バネモデルを提案する。

(3) エネルギーの釣合に基づき、鋼製ダンパーと粘性ダンパーを用いた制振改修手法を統一的に行える簡易設計手法を提案する。3 次元立体モデルには(1)梁端破断の評価指標と(2)梁端破断材端モデルを組み込み、設計レベルを遙かにこえる巨大長周期地震動に対する耐震安全性を検証し、本手法の有用性・実用性を確認する。

### 3. 研究の方法

本研究は 3 年計画を予定している。平成 26 年度では、これまで行われてきた E - ディフェンス実験および部材実験データの整理を行い、長周期地震動に対する既存超高層建物の耐震安全性評価指標を提案する。それと平行して梁端破断後の挙動についても E - ディフェンス実験を用いて検討する。平成 27 年度は前年度の成果を基に梁破断モデルを作成し、既往の部材実験との比較により梁端破断モデルの妥当性を検討する。また、次年度に用いる解析モデルを作成するための既存建物の調査も行う。平成 28 年度には梁端破断モデルを 3 次元部材モデルに組み込み耐震安全性指標を用いて解析結果を評価すると共に、エネルギーの釣合に基づいた既存超高層建物の制振改修設計手法を提案する。

### 4. 研究成果

119 編の論文から 966 体の試験体を対象に、

柱梁接合部の塑性変形能力の評価指標として、梁端部の累積塑性変形倍率と実験方法に着目した調査を行なった。調査の結果、実験に採用される載荷履歴および接合部の評価指標は、歴史的背景に起因し、年代ごとに採用状況が異なることが分かった。

本研究では3.2mと6.4mスパンの異なる地上52階建ての超高層建物2棟を3次元部材レベルでモデル化し、鋼製ダンパーを用いた制振補強効果について、現在の設計で用いられている地震動と長周期地震動を想定した地震動を用いて応答評価を行なった。両建物で最大変形は同程度となるものの、3.2mスパンモデルの梁端の累積損傷に大きな損傷が発生し、6.4mスパンモデルとの違いが確認された。

現在想定されている長周期地震動に対する既存超高層建物の耐震性能を評価するため、1967年～1981年まで評定を取得した建物の資料を基に20階建ての3次元部材レベルモデルを作成した。

既存超高層建物の長周期地震動に対する耐震性を向上させるためには、ダンパーを用いた制振改修が有効であるが、改修工事期間の建物機能停止による経済的負担を勘案し、下層部のみにダンパーを設置する部分制振補強が有用である。本研究では1880年代を想定した21層の鋼構造建物の下層部にオイルダンパーを設置して制振効果を確認した。下層に十分なダンパーを設置することで非設置層においても応答を低減できることが確認された。

長周期地震動対策として、下層部に部分的にオイルダンパーや鋼製ダンパーを設置した制振補強による耐震性能について、21層と35層の鋼構造建物を部材レベルでモデル化し、時刻歴応答解析結果を基に分析・評価を行なった。ダンパーを下層部に設置することで、長周期地震動入力時における最大変形および梁端部の累積損傷を大幅に低減できることが確認された。またオイルダンパーを設置することで非設置層との切り替わり層付近での応答増大が低減されることが分かった。

制振ダンパーの長時間加振実験結果を整理し、長時間の繰り返しによるダンパー性能の変化を評価した。特に、特性変化の大きい粘弾性ダンパーと粘性ダンパーに着目し、ダンパー性能の低下指標を提案した。さらに粘性ダンパーにおいてダンパーの性能の低下指標を組込んだ解析モデルを構築し、多質点モデルによる地震応答解析によってダンパー性能の低下を考慮した応答の評価を行った。その結果、ダンパー性能の低下を考慮したモデルによる応答は、簡易手法より小さい値となり、本モデルを用いることで、経済的な設計が可能となることが分かった。

##### 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 15件)

- [1] 加藤翼, 佐藤利昭, 佐藤大樹, 北村春幸, 長江拓也, 石井正人, 吉江慶祐: 文献調査に基づく既存超高層建物の現状把握と地震応答解析モデルの構築, 日本建築学会技術報告集, 第20巻, 第45号, pp.575-590, 2014.6(査読有)
- [2] 加藤翼, 佐藤大樹, 佐藤利昭, 北村春幸, 長江拓也, 石井正人, 吉江慶祐: オイル・鋼製ダンパーを用いた下層部部分制振補強の効果と影響に関する検討, 日本建築学会技術報告集, 第21巻, 第48号, pp.533-538, 2015.6(査読有)
- [3] 笠井和彦, 佐藤大樹, 松田和浩, 長山祥: 長時間正弦波加振実験による4種の実大制振ダンパーの動的特性の変化および簡易評価手法の提案, 構造工学論文集, Vol.63B, pp.275-283, 2017.3(査読有)
- [4] 中郡良, 佐藤利昭, 佐藤大樹, 北村春幸, 長江拓也: 文献調査に基づく柱梁接合部の評価指標および載荷履歴の変遷, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.740-741, 2014.9(査読無)
- [5] 加藤翼, 佐藤利昭, 佐藤大樹, 長江拓也, 北村春幸, 石井正人, 吉江慶祐: 架構スパンの異なる既存超高層建物に対する長周期地震動を想定した制振補強の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.663-664, 2014.9(査読無)
- [6] 加藤翼, 佐藤大樹, 佐藤利昭, 長江拓也, 北村春幸, 石井正人, 吉江慶祐: 下層部にオイルダンパーを部分配置した超高層建物の応答評価, 第14回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.2271-2280, 2014.12(査読無)
- [7] D. Sato, T. Nagae, H. Kitamura, M. Nakagawa, K. Sukemura and K. Kajiwara: Seismic Performance Evaluation of Existing High-rise Steel Building Subjected to Long-Period Ground Motion and Assessment of Retrofit by Steel Dampers, Proceedings of the 8th International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas (STESSA'15), pp.891-898, July 2015(査読無)
- [8] 長山祥, 佐藤大樹, 笠井和彦, 松田和浩: 長周期・長時間地震動時における実大ダンパーの特性評価 その14種のダンパーの長時間正弦波加振実験による動的特性の推移, 日本建築学会関東支部研究報告集(CD-ROM), 2042, pp.389-392, 2016.3(査読無)

- [9] 長山祥, 佐藤大樹, 笠井和彦, 松田和浩: 長周期・長時間地震動時における実大ダンパーの特性評価 その2 減衰の違いによる置換正弦波パラメータの傾向および基準化エネルギー密度の提案, 日本建築学会関東支部研究報告集 (CD-ROM) 2043, pp.393-396, 2016.3 (査読無)
- [10] 長山祥, 佐藤大樹, 笠井和彦, 杉山暢方, 松田和浩: 長周期・長時間地震動における実大粘弾性ダンパーの特性評価実験, 日本地震工学会第11回年次大会梗概集 (CD-ROM), P2-10, 2015.11 (査読無)
- [11] 長山祥, 佐藤大樹, 笠井和彦, 松田和浩: 粘性ダンパーの長時間繰返しによる特性値低下を考慮した解析モデルの提案と地震応答評価, 日本建築学会関東支部研究報告集 (CD-ROM), 2073, pp.553-556, 2017.3 (査読無)
- [12] 中井亜里沙, 長山祥, 佐藤大樹, 笠井和彦, 松田和浩: 長周期地震動時における粘性ダンパーを有する制振構造建物の簡易応答評価 その1 建物モデル概要とダンパー配置計画, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.163-164, 2016.8 (査読無)
- [13] 長山祥, 佐藤大樹, 笠井和彦, 松田和浩: 長周期地震動時における粘性ダンパーを有する制振構造建物の簡易応答評価 その2 粘性ダンパーの動的特性の変化を考慮した応答評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.165-166, 2016.8 (査読無)
- [14] Osabel D., Kasai. K. and Sato D.: Numerical Analysis Model for Viscoelastic Dampers under Long Duration Excitation considering Heat Transfer and Uniform Strain Distribution (Part 1: Formulation), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.169-170, 2016.8 (査読無)
- [15] Lin TW., Osabel D., Kasai. K. and Sato D.: Numerical Analysis Model for Viscoelastic Dampers under Long Duration Excitation considering Heat Transfer and Uniform Strain Distribution (Part 2: Random and Sinusoidal Loadings), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.171-172, 2016.8 (査読無)
- [学会発表](計14件)
- [1] 中郡良, 佐藤利昭, 佐藤大樹, 北村春幸, 長江拓也: 文献調査に基づく柱梁接合部の評価指標および載荷履歴の変遷, 日本建築学会大会学術講演会, 2014.9, 兵庫
- [2] 加藤翼, 佐藤利昭, 佐藤大樹, 長江拓也, 北村春幸, 石井正人, 吉江慶祐: 架構スパンの異なる既存超高層建物に対する長周期地震動を想定した制振補強の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.663-664, 2014.9, 兵庫
- [3] 加藤翼, 佐藤大樹, 佐藤利昭, 長江拓也, 北村春幸, 石井正人, 吉江慶祐: 下層部にオイルダンパーを部分配置した超高層建物の応答評価, 第14回日本地震工学シンポジウム, 2014.12, 千葉
- [4] D. Sato, T. Nagae, H. Kitamura, M. Nakagawa, K. Sukemura and K. Kajiwara: Seismic Performance Evaluation of Existing High-rise Steel Building Subjected to Long-Period Ground Motion and Assessment of Retrofit by Steel Dampers, the 8th International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas (STESSA'15), July 2015, 上海
- [5] 長山祥, 佐藤大樹, 笠井和彦, 松田和浩: 長周期・長時間地震動時における実大ダンパーの特性評価 その14種のダンパーの長時間正弦波加振実験による動的特性の推移, 日本建築学会関東支部研究報告会, 2016.3, 東京
- [6] 長山祥, 佐藤大樹, 笠井和彦, 松田和浩: 長周期・長時間地震動時における実大ダンパーの特性評価 その2 減衰の違いによる置換正弦波パラメータの傾向および基準化エネルギー密度の提案, 日本建築学会関東支部研究報告会, 2016.3, 東京
- [7] 長山祥, 佐藤大樹, 笠井和彦, 松田和浩: 長周期・長時間地震動における実大粘弾性ダンパーの特性評価実験, 日本地震工学会第11回年次大会 2015.11, 東京
- [8] 佐藤大樹: 長時間繰返しによる制振ダンパーの特性変化, 単独発表, 東京工芸大学・風工学共同研究拠点・公開研究会「強風による建築物等の疲労損傷問題の現状と展望(3)」, 2016.1.19, 東京
- [9] 長山祥, 佐藤大樹, 笠井和彦, 松田和浩: 粘性ダンパーの長時間繰返しによる特性値低下を考慮した解析モデルの提案と地震応答評価, 日本建築学会関東支部研究報告会, 2017.3, 東京
- [10] 中井亜里沙, 長山祥, 佐藤大樹, 笠井和彦, 松田和浩: 長周期地震動時における粘性ダンパーを有する制振構造建物の簡易応答評価 その1 建物モデル概要とダンパー配置計画, 日本建築学会大会学術講演会, 2016.8, 福岡
- [11] 長山祥, 佐藤大樹, 笠井和彦, 松田和浩: 長周期地震動時における粘性ダンパーを有する制振構造建物の簡易

応答評価 その2 粘性ダンパーの動的特性の変化を考慮した応答評価, 日本建築学会大会学術講演会, 2016.8, 福岡

- [1 2] Osabel D., Kasai. K. and Sato D.: Numerical Analysis Model for Viscoelastic Dampers under Long Duration Excitation considering Heat Transfer and Uniform Strain Distribution (Part 1: Formulation), 日本建築学会大会学術講演会, 2016.8, 福岡
- [1 3] Lin TW., Osabel D., Kasai. K. and Sato D.: Numerical Analysis Model for Viscoelastic Dampers under Long Duration Excitation considering Heat Transfer and Uniform Strain Distribution (Part 2: Random and Sinusoidal Loadings), 日本建築学会大会学術講演会, 2016.8, 福岡
- [1 4] 佐藤大樹: 長時間正弦波加振実験による4種の実大制振ダンパーの動的特性の変化および簡易評価手法の提案, 構造工学シンポジウム, 2017.4, 北海道

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐藤 大樹 (Sato, Daiki)

東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授

研究者番号: 40447561

### (2) 研究分担者

長江拓也 (Nagae Takuya)

名古屋大学・減災連携研究センター・准教授

研究者番号: 90402932

北村春幸 (Kitamura Haruyuki)

東京理科大学・理工学部建築学科・教授

研究者番号: 20339112

### (3) 連携研究者

無し

### (4) 研究協力者

無し