

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 3月31日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2012

課題番号：22656121

研究課題名（和文） 長周期地震動に対する建物・エレベーターの自律協調制御

研究課題名（英文） Autonomous Cooperative Control of Building-Elevator System under Long Period Ground Motion

研究代表者

小檜山 雅之 (KOHYAMA MASAYUKI)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：10333577

研究成果の概要（和文）：長周期地震動による超高層建物のエレベーターロープの引掛り事故の発生を低減するため、建物とエレベーターロープの双方の応答を考慮した協調制御手法を提案した。超高層建物・エレベーターロープ連成系モデルのシミュレーションと縮小試験体を用いた振動台実験を行い、提案する制御手法の特性を明らかにするとともに、応答低減に一定の効果があることを示した。提案手法は、エレベーターロープのみならず、建物内の様々な設備機器の応答低減に応用できる。

研究成果の概要（英文）：For reducing risk of elevator rope damage in a high-rise building due to long period ground motion, a control method to suppress both building and rope responses is proposed for a vibration control device. Numerical simulations using a coupled system of a building and elevator rope are conducted and shaking-table tests using a specimen of a scaled model of the system are carried out. As a result, the characteristics of the proposed control method is clarified and it is verified that the proposed method effectively reduce the response. The proposed method can be applied to response reduction of not only elevator rope but also various equipments and facilities in a building.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	500,000	0	500,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	1,700,000	360,000	2,060,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学、建築構造・材料

キーワード：エレベーター ロープ 制振 協調制御 振動制御 振動実験 超高層建物 長周期地震動

## 1. 研究開始当初の背景

近年、地震によりエレベーターが損傷する事例や利用者が閉じ込められる事故が多く報告されている。避難時にはエレベーターを利用すべきでないとされているが、高齢者や障害者などの災害弱者の避難のため、地震後にもエレベーターが健全に機能する必要があると考えられる。また、非常用エレベータ

ーは消火・救援活動で用いられるため、地震後も確実に機能する必要がある。加えて、エレベーターが損傷して使用できなくなった場合、地震後の復旧期の高層階の住民は多大な生活の支障を被ることになる。

マグニチュードの大きい地震では長い周期の地震動が遠方まで伝播しやすく、固有周期の長い超高層建物とエレベーターロープ

は共振により地震応答が増幅しやすい。超高層建物の棟数は次第に増加してきており、エレベーターの耐震性の確保は非常に重要な課題である。

## 2. 研究の目的

本研究では、制振装置を有する超高層建物に設置されたエレベーターについて、①建物・エレベーターの同時制御の特性の解明、②効果的な建物・エレベーターの協調制御手法の提案、③提案手法の有効性の検証を目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究ではシミュレーションと振動台実験により効果的な建物・エレベーターの協調制御手法を明らかにする。

まず、建物・エレベーターの振動解析モデルを構築し、複数の入力地震動を用いた時刻歴応答解析により建物・エレベーターの同時制御特性の分析を行う。そして、その結果をもとに、効果的な建物・エレベーターの協調制御手法の提案を行う。

次に、試験体の設計と製作を行い、振動台実験により提案手法による応答低減の効果の分析を行い、その有効性の検証を行う。

## 4. 研究成果

(1) 本研究では、まず建物と設備の両方に制振装置がある場合の制御手法を、装置間の通信で共有する状態量の量と制御目的により分類した(図1)。

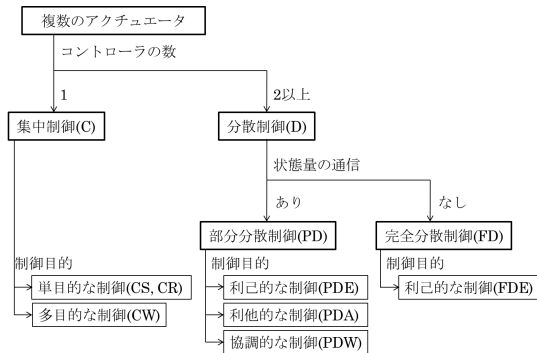


図1 制御手法の分類

(2) 次に、エレベーターを有する高さ240 mの超高層建物を対象に、地震応答解析のためのモデルの構築を行った(図2)。建物の最上層にはアクティブマスダンパー(AMD)などの建物の制振装置、ならびにエレベーターロープの制振装置が設置されている。これを用い、図1のように分類した制御手法の間で性能を比較する数値解析を行った。建物の振動抑制を制御目的としたときは各層の層間変形角を、エレベーターロープの振動抑制を制

御目的としたときはロープの振れ幅(建物・ロープ間距離)を対象として制御の評価関数を設定した。制御力の決定には線形2次レギュレータ理論を用いた。

2011年東北地方太平洋沖地震の際、エレベーターロープの引掛り事故が発生した大阪府内の超高層建物の近傍で観測された地震記録(防災科学技術研究所 KiK-net 此花波NS成分)を入力したときの建物とロープの最大応答をそれぞれ図3, 4に示す。いずれの制御方法でも非制御の状態(黒色)と比べて応答が小さくなっている。状態量の一部を通信し共有する協調的な制御(PDW、桃色)で建物・ロープの双方の応答が良好に低減できていることが確認できる。

このほか、地震観測記録や模擬地震動を入力し時刻歴応答解析を行ったところ、応答最大値や2乗積分値の評価指標は、共有する状態量が少なくても十分に低減できることを確認した。

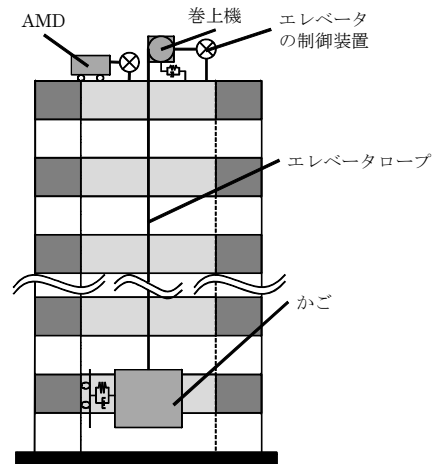


図2 建物・エレベーター連成系モデル

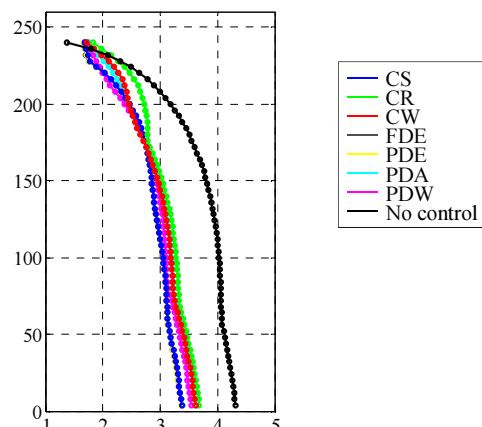


図3 建物の最大応答の比較

図3 建物の最大応答の比較

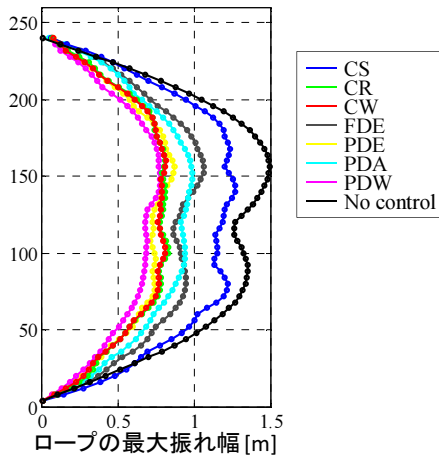


図4 ロープの最大応答の比較

(3) 続いて、建物の制振装置による建物とエレベーターロープ双方の応答制御の有効性を実証するため、超高層建物の縮小モデルであるアルミ製の4層試験体(図5)を用いた振動台実験を行った。ここで、試験体の1次固有周期は実際の建物の1次固有周期のおよそ1/10となるように設計した。エレベーターロープは銅の薄板でモデル化し、AMDを試験体の最上層に設置した。センサーについては振動台入力と建物の応答を測定するため、加速度センサーを振動台の台上と試験体第2, 3, 4層に設置した。また、ロープの建物に対する相対変位を測定するためレーザー変位計を第2層に設置した。応答制御手法は線形2次ガウシアン制御に基づき、建物の応答低減とエレベーターロープの応答低減の2通りを目標とした制御則を比較した。

振動台実験を行った結果について、KiK-net 此花波 NS 成分を入力したときの建物とロープの最大応答をそれぞれ図6, 7に示す。いずれの制御方式でも建物とエレベーターロープの応答を低減することが確認できるが、ロープの応答低減に関しては2つの制御方式における有意な違いが見られない。

このほかにも地震観測記録や模擬地震動を入力し実験を行ったところ、同様に有意なロープの応答低減効果が見られないケースがあることが明らかとなった。この原因として、レーザー変位計によるロープの応答計測はロープの中央部の1箇所のみで、ロープの高次モードの揺れを推定することが難しいこと、制御則において地震動入力の周波数特性や制御装置(AMD)の最大制御力・最大ストロークを考慮していないことなどが挙げられる。したがって、ロープ応答のセンシングシステムの開発や制御手法の改良などが、今後の課題として挙げられる。



図5 縮小試験体

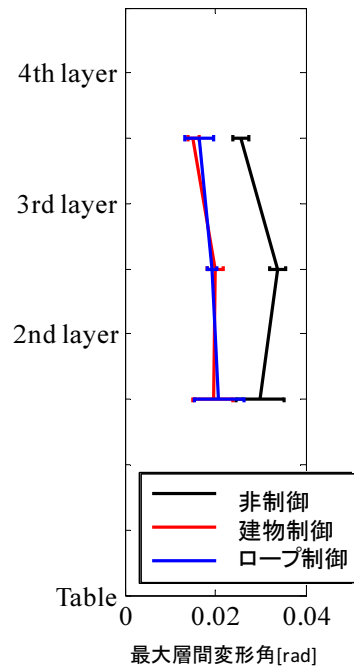


図6 試験体建物部位の最大応答の比較

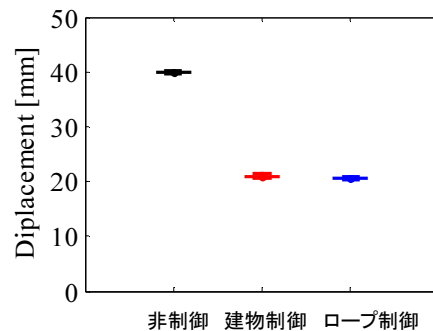


図7 試験体のロープの最大振れ幅の比較

以上、シミュレーションと実験により建物とエレベーターロープの双方の応答を考慮した協調制御の特性を明らかにし、応答低減に一定の効果があることを示した。本研究で提案する協調制御手法は、エレベーターロープのみならず、建物内の様々な設備機器の応答低減に応用できる。研究成果は今後の地震防災対策技術の開発に役立つものと考えられる。

#### 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渡邊啓介, 三浦奈々子, 小檜山雅之, 高橋正樹: 最上層に制振装置を有する建物・エレベータ連成系の地震応答制御に関する振動台実験, 構造工学論文集, 査読有, Vol. 59B, pp. 339-348, 2013.3
- ②吉田美奈子, 小檜山雅之, 高橋正樹: 線形 2 次レギュレータを用いた建物・エレベータロープの分散協調制御手法の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), Vol. B-2, pp. 679-680, 開催期間: 2011 年 8 月 23~25 日, 開催地: 東京, 口頭発表日: 2011 年 8 月 23 日
- ③三浦奈々子, 小檜山雅之: 地震動強度と応答レベルに順応する超高層建物・エレベータ連成系の可変ゲインフィードバック制御, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, Vol. 76, No. 670, pp. 2069-2076, 2011.12

[学会発表] (計 6 件)

- ①渡邊啓介, 三浦奈々子, 小檜山雅之, 高橋正樹: LQG を用いた建物-エレベータ連成系の地震応答制御に関する振動台実験, 第 9 回日本地震工学会大会-2012 梗概集, pp. 118-119, 開催期間: 2012 年 11 月 8~10 日, 開催地: 東京, 口頭発表日: 2012 年 11 月 9 日
- ② Yoshida, M., Kohiyama, M., and Takahashi, M.: Comparative Study Between Centralized and Decentralized LQR Controls of a Building-Elevator System, Proc. 15th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 2819, 10 pp., 開催期間: 2012 年 9 月 24~28 日, 開催地: Lisbon, Portugal, ポスター発表日: 2012 年 9 月 25 日
- ③Miura, N. and Kohiyama, M.: Vibration Reduction of a Building-Elevator System Considering the Intensity of Earthquake Excitation, Proc. 15th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 0278, 10 pp., 開催期間: 2012 年 9 月 24~28 日, 開催地: Lisbon, Portugal, ポスター発表日: 2012 年 9 月 25 日
- ④Watanabe, K., Miura, N., Kohiyama, M.,

and Takahashi, M.: Experimental Research of Seismic Response Control of Building-Elevator System Using Linear Quadratic Gaussian Controller, Proc. 9th International Conference on Urban Earthquake Engineering & 4th Asia Conference on Earthquake Engineering Joint Conference, Paper No. 09-126, pp. 1527-1531, CD-ROM, 開催期間: 2012 年 3 月 6~8 日, 開催地: 東京, 口頭発表日: 2012 年 3 月 7 日

- ⑤三浦奈々子, 小檜山雅之: 地震動強さと建物応答に順応する可変ゲインを用いた超高層建物・エレベータ連成系の振動制御, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), Vol. B-2, pp. 681-682, 開催期間: 2011 年 8 月 23~25 日, 開催地: 東京, 口頭発表日: 2011 年 8 月 23 日
- ⑥吉田美奈子, 小檜山雅之, 高橋正樹: 最適レギュレータを用いた建物・エレベータロープの分散協調制御手法の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), Vol. B-2, pp. 679-680, 開催期間: 2011 年 8 月 23~25 日, 開催地: 東京, 口頭発表日: 2011 年 8 月 23 日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 振動制御システム

発明者: 小檜山雅之、高橋正樹、三浦奈々子、

吉田美奈子、渡邊啓介

権利者: 学校法人慶應義塾

種類: 特許

番号: 特願 2011-157501、特開 2013-023844

出願年月日: 2011 年 7 月 19 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

小檜山 雅之 (KOHYAMA MASAYUKI)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号: 10333577

(2)研究分担者

高橋 正樹 (TAKAHASHI MASAKI)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号: 10398638