

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	風方向風力を受けるアクティブ制御とパッシブ免震を併用した超高層建物に対する制御系の設計方法
Title(English)	CONTROL SYSTEM DESIGN FOR HIGH-RISE BASE-ISOLATED BUILDINGS WITH ACTIVE STRUCTURAL CONTROL FOR ALONG-WIND FORCE
著者(和文)	陳引力, 佐藤大樹, 余錦華, 宮本皓
Authors(English)	Yinli Chen, Daiki Sato, Jinhua She, Kou Miyamoto
出典(和文)	風工学シンポジウム講演梗概集, , No. 26, pp. 114-119
Citation(English)	National Symposium on Wind Engineering Proceeding, , No. 26, pp. 114-119
発行日 / Pub. date	2020, 11

# 風方向風力を受けるアクティブ制御とパッシブ免震を併用した 超高層建物に対する制御系の設計方法

## CONTROL SYSTEM DESIGN FOR HIGH-RISE BASE-ISOLATED BUILDINGS WITH ACTIVE STRUCTURAL CONTROL FOR ALONG-WIND FORCE

陳 引力<sup>1)</sup>      佐藤大樹<sup>2)</sup>      余 錦華<sup>3)</sup>      宮本 皓<sup>4)</sup>

Yinli CHEN<sup>1)</sup>, Daiki SATO<sup>2)</sup>, Jinhua SHE,<sup>3)</sup> and Kou MIYAMOTO<sup>4)</sup>

### ABSTRACT

The number of passive-base-isolation (PBI) structures increased rapidly in Japan after the Great Hanshin earthquake of 1995. In recent years, PBIs have also been installed in high-rise buildings, and the combination of a PBI and active structural control (ASC) has been employed in many buildings globally to improve control performance. However, conventional approaches need numerical simulations to calculate the maximum response, thereby making complicate the design of control systems that satisfy design limitations. This paper presents a new method that theoretically estimates the mean control force and mean displacement response under along-wind force using only the static equilibrium. Moreover, the gust factors for PBI buildings with ASC, which estimate the maximum displacement and control force are devised. Our method makes it possible to estimate the mean and maximum control force and the displacement of the structure without using simulation.

Key Words: along-wind force, base-isolated structure, active structural control, response estimation, gust factor

### 1. はじめに

兵庫県南部地震の後から、建物が崩壊することを防ぐことのみならず、建物の損傷をできるだけ少なくすることを目的として、免震構造を採用する建物の件数が急激に増えている<sup>1)</sup>。近年では、超高層建物への適用も視野にいれ、アクティブ制御を併用した免震建物により、地震時に更なる制御性能を引き出す研究も報告されている<sup>2)</sup>。

既報ではアクティブ制御を併用した超高層免震建物に対し、時刻歴応答解析を行わずに系の平均変位と平均制御力を予測する方法を提案した<sup>3)</sup>。しかし、この研究ではガストファクターについての考察はなく、最大変位と最大制御力の予測には時刻歴応答解析の値が必要である。一方で、耐風設計においては、平均変位を静的なつり合いで算出し、これにガストファクターをかけることよって、最大応答を時刻歴応答解析せずに予測することができる<sup>4)</sup>。筆者らはガストファクター手法を免震とアクティブ制御を併用した建物へと拡張した<sup>5)</sup>。筆者らが提案した方法を用いること

---

1) 東京工業大学環境・社会理工学院 博士課程 (〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259)

2) 東京工業大学未来産業研究所 准教授 (〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259)

3) 東京工科大学工学部機械工学科 教授 (〒192-0982 八王子市片倉町1401-1)

4) 清水建設株式会社技術研究所 研究員 (〒135-0044 江東区越中島3-14-17)

より、時刻歴応答解析を行わずに、免震とアクティブ制御を併用した建物の最大応答と最大制御力を予測することが可能である。本報では、その方法を紹介し、既報において考察されていなかったガストファクターと制御系のパラメータとの関係について分析する。

### 2. 建物モデルと風力の概要

本報における建物モデルの概要を Fig. 1 に示す。本報では、解析対象のモデルを高さ  $H=200\text{ m}$  の超高層免震建物とし、これの上部構造を 10 質点せん断モデルでモデル化した。上部構造の 1 次固有周期を 2 s とし、1 次減衰率を 0.02 とし、1 次モードを直線モードとする。また、各層の剛性  $k_i$  は文献 6) より与えられ、減衰マトリックスは剛性比例型とした。上記の 10 質点の上部構造モデルの下に天然ゴム系積層ゴムと線形のオイルダンパーで構成される免震層を設置し、11 質点のモデルとして免震建物の解析を行う。なお、解析に用いた建物モデルの諸元は Table 1 に示し、Table 1 中の免震周期および免震減衰比は上部構造を剛体と仮定した場合のモデルの固有周期および、減衰比である。

本報で用いる風力は、文献 7) で示される風洞実験の結果であり、モデルに作用する風力を風向角  $0^\circ$ 、再現期間 500 年の 10 ケースの風方向風力とする。応答は 10 ケースのアンサンブル平均より計算される。Fig. 2 に各層の風力とそのアンサンブル平均を示す。

### 3. 制御系の構築

対象建物の運動方程式を式(1)に示す。

$$M\ddot{X}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = E_F F(t) - E_u u(t) \tag{1}$$

ここに、 $M$ : 質量マトリックス、 $K$ : 剛性マトリックス、 $C$ : 減衰マトリックス、 $X$ : 変位ベクトル、 $E_F$ : 風入力マトリックス、 $F$ : 風力ベクトル、 $E_u$ : 制御力入力マトリックス、 $u$ : 制御力である。

上式を以下の状態方程式に変更する。

$$\dot{Z}(t) = AZ(t) + B_F F(t) - B_u u(t) \tag{2}$$

ここで、 $Z$ : 状態ベクトル、 $A$ : システムマトリックス、 $B_F$ : 風入力ゲイン、 $B_u$ : 制御力入力ゲインを表し、 $Z$ 、 $A$ 、 $B_F$  と  $B_u$  は次式により定義される。

$$Z(t) = \begin{bmatrix} X(t) \\ \dot{X}(t) \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}, B_F = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}E_F \end{bmatrix}, \text{ and } B_u = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}E_u \end{bmatrix} \tag{3}$$

制御力は

$$u(t) = K_P Z(t) = K_{PD} X(t) + K_{PV} \dot{X}(t) \tag{4}$$

により計算される。ここで、 $K_P$  はフィードバックゲインであり、 $K_{PD}$ 、 $K_{PV}$  はそれぞれ変位と速度に対するフィードバックゲインである。Fig. 3 に制御系のブロック線図を示す。

本報は Linear quadratic regulator(LQR)手法を用いてフィードバックゲイン  $K_P$  を設計する。LQR 手法は次の評価関

Table 1 Parameters of model			
幅	$B$	20 m	
奥行き	$D$	20 m	
高さ	$H$	100 m	
上部構造	高さ $h_i$	10 m	
	密度 $\rho_s$	175 kg/m <sup>3</sup>	
	1次固有周期 $T_s$	2 s	
	1次減衰比 $\zeta_s$	0.02	
免震層	密度 $\rho_0$	2551 kg/m <sup>2</sup>	
	免震周期 $T_0$	4 s	
	免震減衰比 $\zeta_0$	0.01, 0.05, and 0.10	

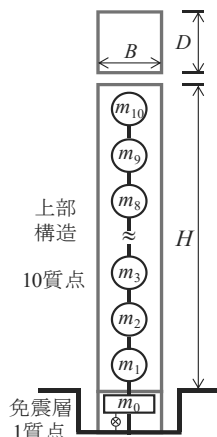


Fig. 1 Building model

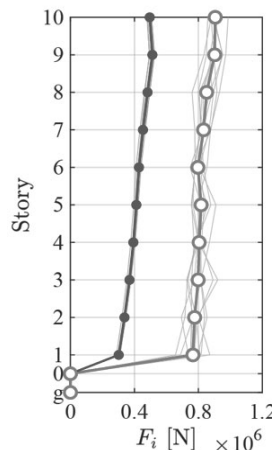


Fig. 2 Story wind force

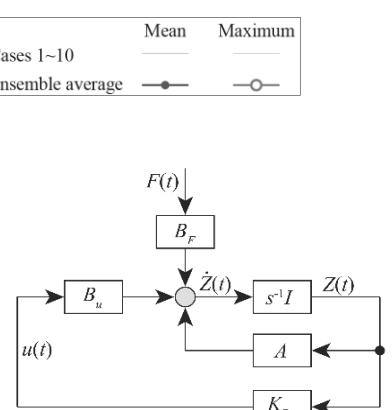


Fig. 3 block diagram

数を最小にするようにフィードバックゲイン  $K_P$  を算出する。

$$J = \int_0^{\infty} [Z^T(t)QZ(t) + u^T(t)Ru(t)] dt \quad (5)$$

ここで、 $R$  は  $u$  に対する重み関数で、 $Q$  は  $Z$  に対する重み関数ある。本報では、重み関数を次式のように設定する。

$$Q = 10^\alpha \text{diag}(1 \ \cdots \ 1 \ | \ 0 \ \cdots \ 0) \text{ and } R = 1 \quad (6)$$

ここに、 $\alpha$  の中の重み係数である。 $\alpha$  の大きさは扱える制御力の大きさに関連し、より大きい  $\alpha$  を用いることで、より大きい制御力を出力できる制御系が設計されることを示す。

式(6)を最小化するためにローラゲイン  $K_P$  は次式によって与えられる。

$$K_P = R^{-1}B_u^T P \quad (7)$$

ここに、 $P$  は次のリカッチ代数方程式の解である<sup>8)</sup>。

$$A^T P + PA - PB_u R^{-1} B_u^T P + Q = 0 \quad (8)$$

#### 4. ガストファクター

風方向風力は平均成分を有するため、耐風設計では平均変位を静的な釣り合いにより計算することができる。また、最大応答については確率論に基づき、平均応答にガストファクター(係数)を掛けることにより予測することができる。本章では文献 4)で示されたガスト影響係数を変位のガストファクターとして用いて、アクティブ制御を併用した超高層免震建物に拡張する。また、本報では、制御力のガストファクターを導出し、最大制御力の予測検討も行う。さらに、数値例を用いて提案されたガストファクターの精度検証を行う。

##### 4.1 変位のガストファクター

変位のガストファクターを次式<sup>4)</sup>より予測する。

$$G_D = 1 + g_D \frac{C'_g}{C_g} \sqrt{1 + \phi_D^2 R_D} \quad (9)$$

ここに、 $G_D$ : 変位のガストファクター、 $g_D$ : 風方向ピークファクター、 $C_g$ : 風方向の転倒モーメント、 $C'_g$ :  $C_g$  の標準偏差、 $\phi_D$ : モード形状係数、 $R_D$ : 風方向の共振係数である。 $g_D$ 、 $C_g$ 、 $C'_g$  と  $R_D$  の算出は文献 4)を参照する。

式(4)を式(1)に代入して整理することで、アクティブ制御系を施すことは、系のみかけの剛性マトリックスを  $K$  から  $K+EK_{PD}$  へ、みかけの減衰マトリックスを  $C$  から  $C+EK_{PV}$  変えることと解釈できる。本報では、アクティブ制御の併用を考慮し、変位のガストファクターを計算する。ここで、上記の剛性及び減衰係数を用いて、1次固有円振動数と1次減衰比の計算を行う。

Figure 4 に変位のガストファクター  $G_D$  の予測値(estimation values)と時刻歴応答解析(simulation values)の結果の比較を示す。時刻歴応答解析の結果は免震層の値のみ示す。Fig. 4 より、以下のことがわかる。

- 変位のガストファクターの設計値は時刻歴応答解析の結果と概ね一致するため、文献 3)の計算式はアクティブ制御を併用した免震建物へも適用することが可能である。
- $\alpha$  を大きくすると変位のガストファクターは小さくなる傾向がある。この原因については  $\alpha$  を大きくすると、制御系の剛性と減衰比は大きくなることが考えられる。
- $\alpha > 15$  の場合、変位のガストファクターが変化しない。この原因については  $\alpha > 15$  の場合、 $\alpha$  の値を大きくしても式の評価関数の最適解が変わらないと考えられる。
- $\alpha < 12$  の場合、免震層減衰比を大きくすると変位のガストファクターは小さくなる傾向がある。この原因は  $\alpha$  が比較的小さいとき、制御力が小さく、その影響も小さいことに起因するものと考察できる。
- $\alpha > 15$  の場合、免震層減衰比を大きくしても変位のガストファクターは変化しない。この原因は  $\alpha$  が比較的に大きい場合、制御力による影響が支配的となることが原因として考えられる。

##### 4.2 制御力のガストファクター

制御力のガストファクターを次式で定義する。

$$G_u = \frac{\max u}{\bar{u}} \quad (10)$$

式(4)を式(10)に代入すると

$$G_u = \frac{\max\{[K_{PD} \ K_{PV}][X^T \ \dot{X}^T]^T\}}{[K_{PD} \ K_{PV}][\bar{X}^T \ \bar{\dot{X}}^T]^T} = \frac{\max(K_{PD}X + K_{PV}\dot{X})}{K_{PD}\bar{X} + K_{PV}\bar{\dot{X}}} \quad (11)$$

が得られる。ここに、 $\bar{X}$ と $\bar{\dot{X}}$ はそれぞれ平均変位ベクトルと平均速度ベクトルを示す。文献 3)より、アクティブ制御を併用した場合、速度応答に平均成分を含まないことが分かる。したがって、式(11)は

$$G_u \approx \frac{\max(K_{PD}X + K_{PV}\dot{X})}{K_{PD}\bar{X}} = G_D + \frac{K_{PV} \max \dot{X}}{K_{PD}\bar{X}} \quad (12)$$

となる。また、最大速度を $(\max X - \bar{X})\omega_1$ で近似し、これを上式に代入すると、式(12)は次式となる。

$$G_u \approx G_D + \frac{K_{PV}(\max X - \bar{X})\omega_1}{K_{PD}\bar{X}} = G_D + \frac{K_{PV}(G_D\bar{X} - \bar{X})\omega_1}{K_{PD}\bar{X}} \quad (13)$$

ここに、 $\omega_1$ は制御系の1次固有円振動数である。

式(13)より、時刻歴応答解析を行わずに最大制御力を予測することができる。Fig. 5 に変位のガストファクターの予測値と時刻歴応答解析の結果の比較を示す。なお、時刻歴応答解析の結果は免震層の値のみ示す。Fig. 5 より、以下のことがわかる。

- 制御力のガストファクターの設計値は時刻歴応答解析の結果と概ね一致するため、式(14)の妥当性を確認できる。
- $\alpha$ を大きくすると制御力のガストファクターは小さくなる傾向がある。この原因については $\alpha$ を大きくすると、制御系の剛性と減衰は大きくなることが考えられる。
- $\alpha > 15$ の場合、変位のガストファクターが変化しない。この原因については $\alpha > 15$ の場合、 $\alpha$ の値を大きくしても式の評価関数の最適解が変わらないと考えられる。
- $\alpha < 12$ の場合、免震層減衰比を大きくすると制御力のガストファクターは小さくなる傾向がある。この原因については $\alpha$ が比較的小さいとき、制御系の動特性は建物自体の動特性からの影響を受けることが考えられる。
- $\alpha > 15$ の場合、免震層減衰比を大きくしても制御力のガストファクターは変化しない。この原因については $\alpha$ が比較的大きい場合、制御対象の免震層減衰比が異なっても制御によつての制御系動特性は一定の値になったことが考えられる。

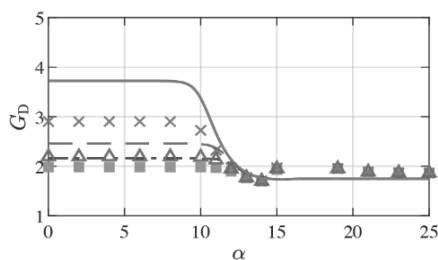


Fig. 4 Gust factors for displacement: estimation values vs. simulation results

$\zeta_0$	Estimation values	Simulation results
0.01	—	×
0.05	- - -	△
0.10	- - - -	■

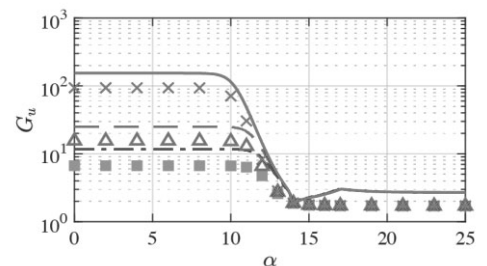


Fig. 5 Gust factors for control force: estimation values vs. simulation results

## 5. 設計方法と設計例

- Step 1. 風力の再現期間、上部構造の諸元(例えば:建物形状、質量マトリックス、剛性マトリックス、減衰マトリックス)と免震層の諸元(例えば:質量、免震周期、免震層減衰比)を決める。設計例としては風力の再現期間を500年、上部構造と免震層の諸元をTable 1で示された値にする。
- Step 2. 最大変位と最大制御力の制限値を決める。設計例としては最大制御力の制限値と免震層最大限変位の制限値をそれぞれ $1 \times 10^7$  N及び40 cmにする。
- Step 3. 文献 2)より、モデルの平均変位と平均制御力を予測する。予測された免震層の平均変位と平均制御力をFig. 5に示す。

- Step 4. 式(9)と式(13)を用いて変位と制御力のガストファクターを計算する。計算された変位と制御力のガストファクターを Fig. 6 に示す。
- Step 5. Step 3 で得られた平均変位・平均制御力と Step 4 で得られたガストファクターを用いて、最大変位・最大制御力を予測する。Fig.5 と Fig.6 を用いて、予測された最大変位と最大制御力を Fig. 7 に示す。
- Step 6. Step 5 で予測された最大変位と最大制御力が Step 2 の制限値を全て満たす場合は、その重み関数を選択し、次の Step に進む。満たさない場合は Step 1 に戻り、免震層の設計値を見直す。Fig. 7 より  $\alpha \in [12.4, 15.7]$  の場合、Step 2 の制約条件を満たすことがわかる。本報では  $\alpha=13$  を model 1 (制御力重視モデル)、 $\alpha=15$  を model 2 (応答重視モデル)と例にする。
- Step 7. Step 1 で設計された免震周期・免震層減衰比と Step 6 で得られた重み関数を用いて、制御系を設計する。式(8)を用いて、フィードバックゲインを計算し、制御系を設計する。

Figure 8 に models 1 と 2 の制御力を示す。Fig. 9 に時刻歴応答解析の結果より得られた models 1 と 2 の各層の最大変位(max $X$ ), 最大速度(max $\dot{X}$ ), 最大加速度(max $\ddot{X}$ )と最大層間変位(max $\Delta X$ )を示す。Figs. 8 and 9 より、以下の知見が得られる。

- model 1 と model 2 の免震層の最大応答は Step 2 の制約条件を満たす。
- model 2 の応答変位, 応答速度と応答加速度は model 1 より小さい。
- アクティブ制御により各層の層間変位の低減率は小さい。これは、免震構造の使用と式(6)の評価関数に層間変位を考慮しなかったことが原因の 1 つとして考えられる<sup>8)</sup>。
- model 2 の制御力は model 1 より大きい。

## 6. おわりに

本報では、変位と制御力のガストファクターを提案し、数値例を用いて提案されたガストファクターの精度検証を行った。時刻歴応答解析の結果により、ガストファクターの予測値は概ね解析値と一致し、その妥当性が示された。本報で示した、変位と制御力のガストファクターを用いることで、時刻歴応答解析を行わずに最大変位と最大制御力の予測が可能になった。一方で、数値設計例より、重み関数の設定により制御系の性能が異なることから、耐風設計における、重み関数の選択も重要である。

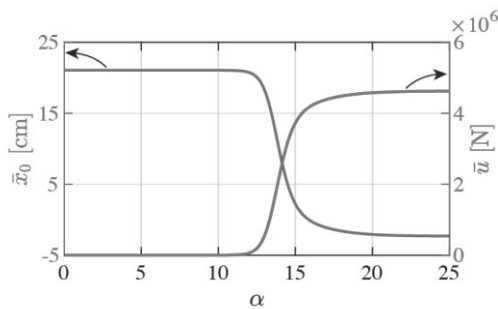


Fig. 5 Mean displacement and mean control force

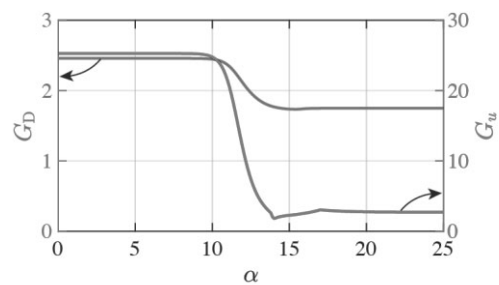


Fig. 6 Gust factors for displacement and control force

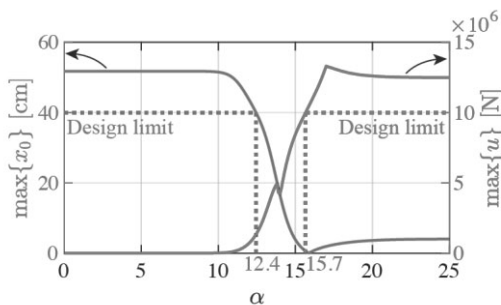


Fig. 7 Maximum displacement and mean control force

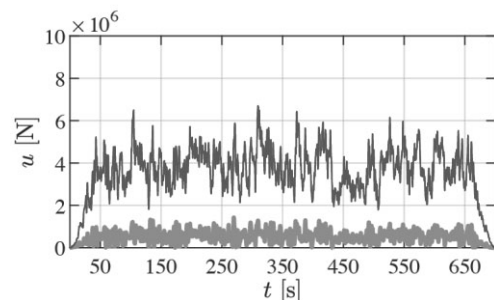


Fig. 8 Time-history waves of PBI story of models 1 and 2

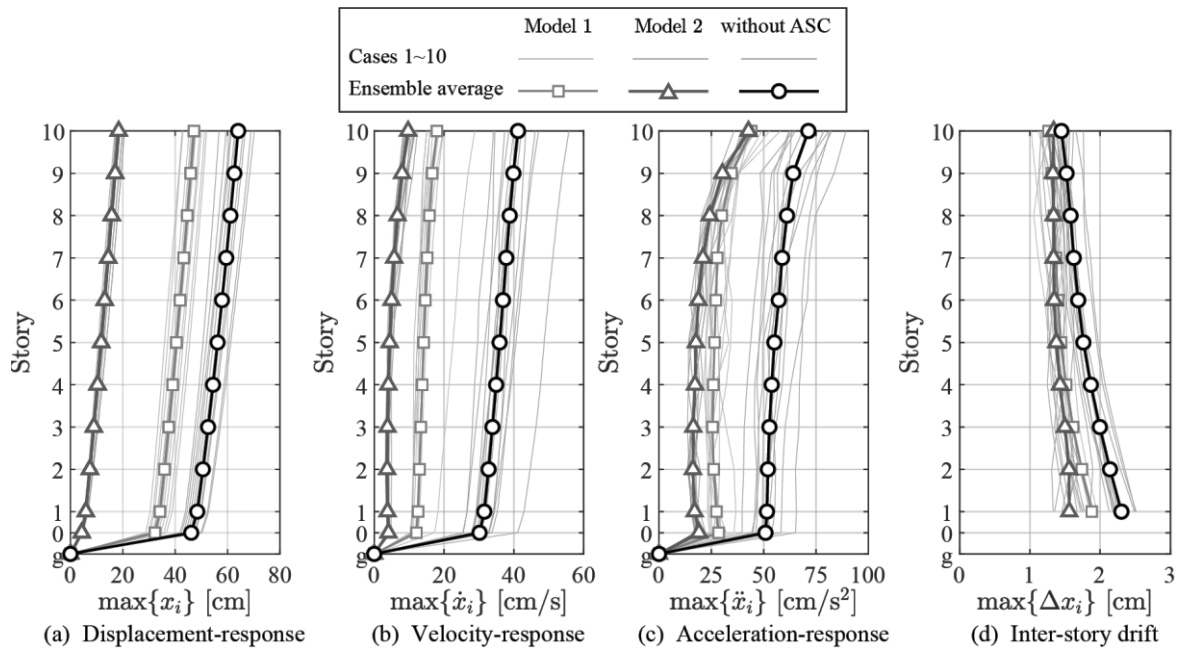


Fig. 9 Simulation results of models 1 and 2

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 (201923456) と JST 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム (JPMJOP1723) の助成を受けたものです。

## 参考文献

- 1) 日本免震協会, 免震建物の最近の動向, <http://www.jssi.or.jp/menshin/doc/keizoku2.pdf> (Retrieved September 1, 2020)
- 2) Korkmaz, S.: A review of active structural control: challenges for engineering informatics. *Computer Structure*, vol.89, pp. 2113-2132. 2011.07
- 3) 陳引力, 佐藤大樹, 宮本皓, 余錦華, アクティブ制御を併用した超高層免震建築物の風方向風力に対する制御系の設計方法, *構造工学論文集*, vol. 64B, pp. 199-206, 2018.3
- 4) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 2015.2
- 5) Chen, Y., Sato, D., Miyamoto, K. and She, J.: Estimating the maximum response and maximum control force for high-rise base-isolated buildings with active structural control in along-wind direction, *Engineering Structures*, vol. 216, 2020.8 (doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110712)
- 6) 佐藤大樹, 笠井和彦, 田村哲郎: 粘弾性ダンパーの振動数依存性が風応答に与える影響, *日本建築学会構造系論文集*, 第 635 号, pp. 75-82, 2009.1
- 7) 丸川比佐夫, 大熊武司, 北村春幸, 吉江慶祐, 鶴見俊雄, 佐藤大樹: 風洞実験に基づく高層建築物の多層風力によるエネルギー入力性状(その 2 矩形高層建築物に作用する層風力特性), *日本建築学会学術講演梗概集*, vol. B-1, pp.193-194, 2010. 7
- 8) 森泰親: わかりやすい現代制御理論, 森北出版, 2016. 2
- 9) Miyamoto, K., Sato, D., She, J.: A new performance index of LQR for combination of passive base isolation and active structural control, *Engineering Structures*, pp. 280-299, 2018.2