

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	1質点系モデルを対象としたアクティブ制御の等価モデルの構築（その2：地震と風外乱を用いた等価モデルの精度検証）
Title(English)	
著者(和文)	陳引力, 佐藤大樹, 宮本皓, 余錦華
Authors(English)	Yinli Chen, Daiki Sato, Kou Miyamoto, Jinhua SHE
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 385-388
Citation(English)	, , , pp. 385-388
発行日 / Pub. date	2018, 3

# 1 質点系モデルを対象としたアクティブ制御の等価モデルの構築

## (その2: 地震と風外乱を用いた等価モデルの精度検証)

構造—振動

正会員 ○陳引力<sup>\*1</sup>  
〃 宮本皓<sup>\*3</sup>

正会員 佐藤大樹<sup>\*2</sup>  
〃 余錦華<sup>\*4</sup>

アクティブ制御 LQR リカッチ方程式

1 質点系 等価モデル

### 1. はじめに

本報その1ではアクティブモデルの等価モデルを構築し、等価モデルの各要素と重み関数の関係を評価した。その2では異なる制御対象モデルで時刻歴応答解析を行い、等価モデルの精度検証を行う。

### 2. 数値解析

#### 2.1 外乱入力の概要

本報では、外乱として2種類の地震波と、平均成分を持つ風方向風力を用いて、構築したモデルの精度検証を行う。地震波はJMA KobeとTaftを選択し、風外乱を再現期間500年の風方向風力にする。なお、風方向風力は風洞実験結果<sup>13)</sup>を用いる。Figs. 1と2にそれぞれJMA KobeとTaftの加速度波形と変位、速度、絶対加速度の応答スペクトル( $S_D$ ,  $S_V$ ,  $S_A$ )を示す。Fig.3に再現期間500年の1次モード風方向風力波形とそのパワースペクトル密度を示す。なお、本報では、スウェイモードを仮定し、1質点系のモード風力を作成した。ただし、地震の場合、外乱入力とは式(1a)による。風の場合、外乱入力とは式(1b)による。

$$d(t) = -m\ddot{x}_g(t), \quad d(t) = F(t) \tag{1a,b}$$

#### 2.2 制御対象モデルの概要

本報その2における制御対象モデルの固有周期を1s, 2s, 4s, 8sとし、減衰率 $\zeta$ をそれぞれ0.01, 0.02とする。モデル高さ、幅、奥行きは式(2)による。質量 $m$ 、剛性係数 $k$ 、減衰係数 $c$ はそれぞれ本報その1式(1)~(3)による。Table 1に各モデルの名称および諸元を示す。

$$H = T/0.02, \quad B = D = H/5 \tag{2a, b}$$

#### 2.3 制御系の構築

本報その2では、コントローラゲイン $K_P$ の設計は本報その1と同様の物を用いる。本報その1より、アクティブモデルの等価モデルの等価減衰率 $\zeta_{eq}$ は重み関数 $Q$ の対角線要素 $q_1$ と $q_2$ に関係があることがわかる。本報その2では、より簡便な表現として、 $q_1$ と $q_2$ の値は $\alpha$ を用いて式(3)によって与えられる。

$$q_1 = 10^\alpha \cdot k, \quad q_2 = 10^\alpha \cdot c \tag{3a, b}$$

Fig. 4に各制御対象モデルにおける $T_{eq}$ ,  $\zeta_{eq}$ と $\alpha$ の関係を示す。Fig. 4より、 $\alpha$ を大きくすると、 $T_{eq}$ の値が小さくなり、 $\zeta_{eq}$ の値が大きくなる事がわかる。本報ではFig. 4(b)と(c)のように $\zeta_{eq} = 0.1$ となる時の $\alpha$ を用いる (Table 1)。

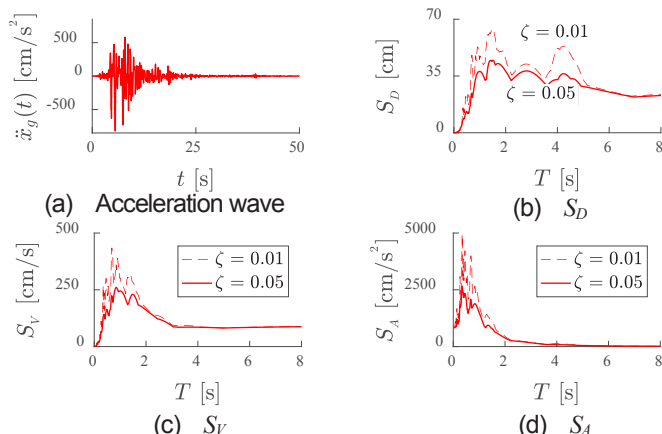


Fig. 1 Acceleration wave and response spectrum of JMA Kobe

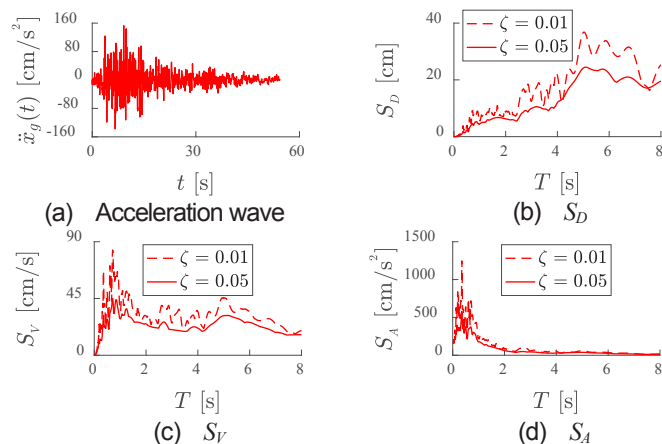


Fig. 2 Acceleration wave and response spectrum of Taft

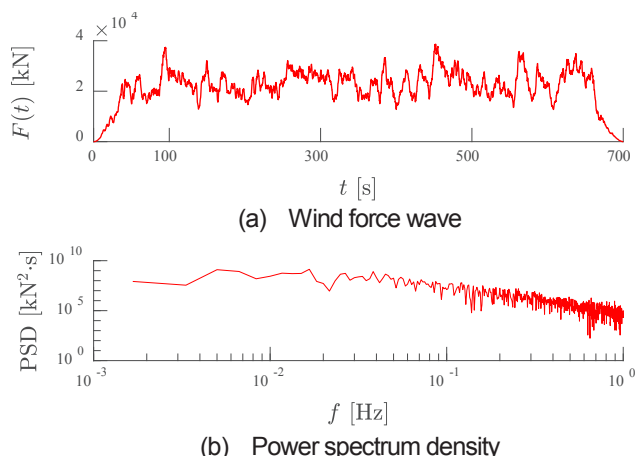


Fig. 3 Wave and power spectrum density of wind force

Table 1 Parameters of every analysis model

Model		M1-1	M1-5	M2-1	M2-5	M4-1	M4-5	M8-1	M8-5
Parameter									
Passive	$T$ [s]	1		2		4		8	
	$\zeta$ [-]	0.01	0.05	0.01	0.05	0.01	0.05	0.01	0.05
	$H$ [m]	50		100		200		400	
	$B$ [m]	10		20		40		80	
	$D$ [m]	10		20		40		80	
	$m$ [kg]	900000		7200000		57600000		460800000	
	$k$ [N/m]	$3.55 \times 10^7$		$7.11 \times 10^7$		$1.42 \times 10^8$		$2.84 \times 10^8$	
	$c$ [Ns/m]	$1.13 \times 10^5$	$2.26 \times 10^5$	$4.52 \times 10^5$	$9.05 \times 10^5$	$1.81 \times 10^6$	$3.62 \times 10^6$	$7.24 \times 10^6$	$1.45 \times 10^7$
Active ( $\zeta_{eq} = 0.1$ )	$\alpha$ [-]	5.11	4.82	5.44	5.22	5.75	5.58	6.06	5.91
	$k_{eq}$ [N/m]	$3.62 \times 10^7$	$3.59 \times 10^7$	$7.24 \times 10^7$	$7.19 \times 10^7$	$1.45 \times 10^8$	$1.44 \times 10^8$	$2.90 \times 10^8$	$2.88 \times 10^8$
	$c_{eq}$ [Ns/m]	$1.14 \times 10^6$	$1.14 \times 10^6$	$4.57 \times 10^6$	$4.55 \times 10^6$	$1.83 \times 10^7$	$1.82 \times 10^7$	$7.31 \times 10^7$	$7.29 \times 10^7$
	$T_{eq}$ [rad/s]	0.99	1.00	1.98	1.99	3.96	3.97	7.92	7.94
	$\zeta_{eq}$ [-]	0.10							

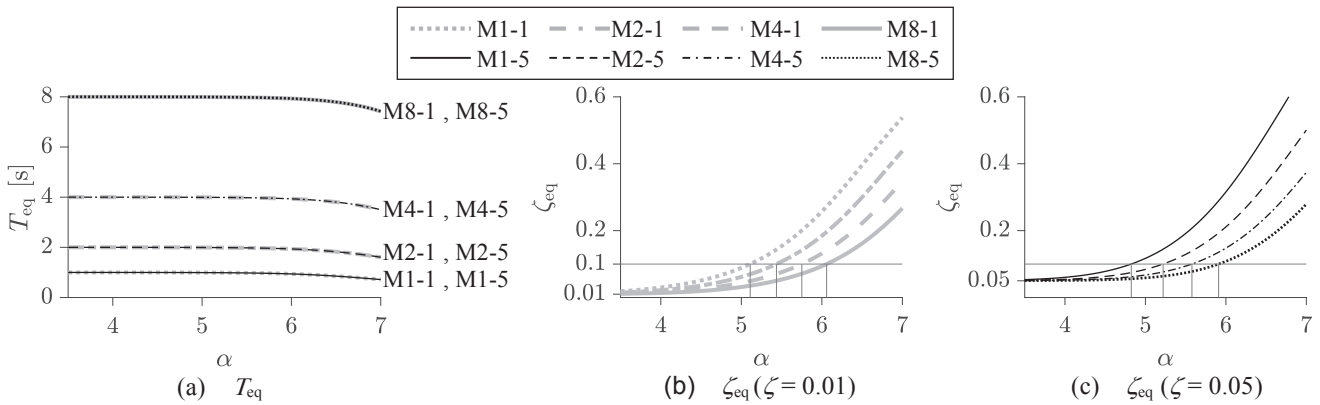


Fig. 4 Relationship between  $\alpha$  and  $T_{eq} \cdot \zeta_{eq}$

### 3. 数値解析

#### 3.1 地震での解析結果

Fig. 5 と 6 に例としての M4-1 モデルと M4-5 モデルにおける JMA Kobe でのアクティブモデルと等価モデルの解析結果との比較を示す。Fig. 5 と 6 の(a)にコントローラの制御入力を示す。Fig. 5 と 6 の(b)~(d)なお、等価モデルの制御入力は等価モデルの応答変位  $x(t)$  および応答速度  $\dot{x}(t)$  を用いて、式(4)により与えられる。

$$u_{eq}(t) = (k - k_{eq})x(t) + (c - c_{eq})\dot{x}(t) \quad (4)$$

Fig. 5 と 6 より、JMA Kobe での等価モデルの応答変位、応答速度、応答絶対加速度、制御入力の時刻歴波形はアクティブモデルと一致することがわかる。Fig. 5 と 6 (a)の比較より、M4-1 モデルの制御入力は M4-5 モデルより大きいことがわかる。これは、M4-1 モデルの  $\zeta$  が M4-5 モデルに比べて小さいためである。しかし、M4-1 モデルと M4-5 モデルの  $T_{eq}$  および  $\zeta_{eq}$  が等しいため、M4-1 モデルと M4-5 モデルでの応答変位、応答速度、絶対加速度が一致することが Fig. 5 と 6 (b)~(d)よりわかる。

Fig. 7 と 8 に例として M1-1, M2-1, M4-1, M8-1 における JMA Kobe と Taft での解析結果と応答スペクトルの比較をそれぞれ示す。Fig. 7 と 8 より、アクティブモデルの解

析結果が応答スペクトルの値と一致することがわかる。この結果のより、アクティブモデルの等価モデルの固有周期と等価減衰率と応答スペクトルを用い、従来の建築物と同様に、時刻歴応答解析を行わずにアクティブモデルの最大応答を予測することができる。

#### 3.2 風方向風力での解析結果

Fig. 9 と 10 に M4-1 モデルと M4-5 モデルにおける風方向風力での等価モデルの解析結果とアクティブモデルの比較を示す。Fig. 9 と 10 の(a)にコントローラの制御入力を示す。Fig. 9 と 10 の(b)~(d)。にそれぞれ応答変位と応答速度と応答絶対加速度を示す。

Fig. 9 と 10 より、風外乱の場合、平均成分を有する風方向風力での等価モデルの応答変位、応答速度、応答絶対加速度、制御入力の時刻歴波形もアクティブモデルと一致することがわかる。Fig. 9 と 10 (a)の比較より、M4-1 モデルの制御入力は M4-5 モデルより大きいことがわかる。これは、M4-1 モデルの  $\zeta$  が M4-5 モデルに比べて小さいためである。しかし、M4-1 モデルと M4-5 モデルの  $T_{eq}$  および  $\zeta_{eq}$  が等しいため、M4-1 モデルと M4-5 モデルでの応答変位、応答速度、絶対加速度が一致することが Fig. 9 と 10 (b)~(d)よりわかる。

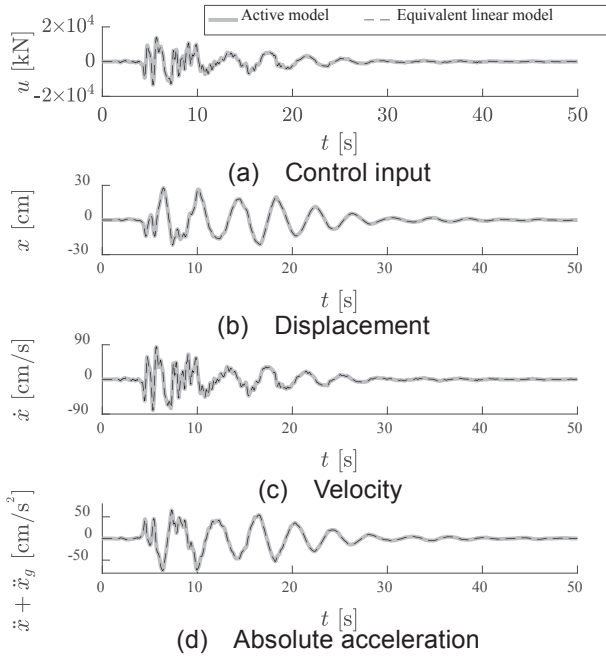


Fig. 5 Analysis results under JMA Kobe (M4-1)

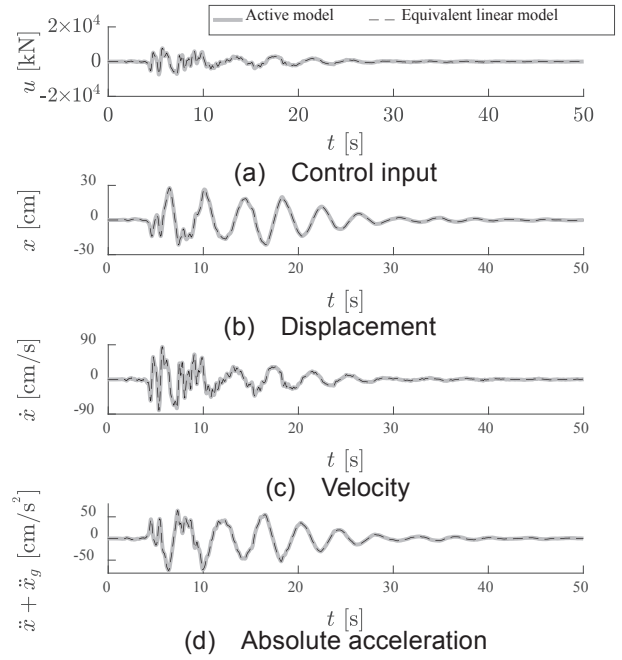


Fig. 6 Analysis results under JMA Kobe (M4-5)

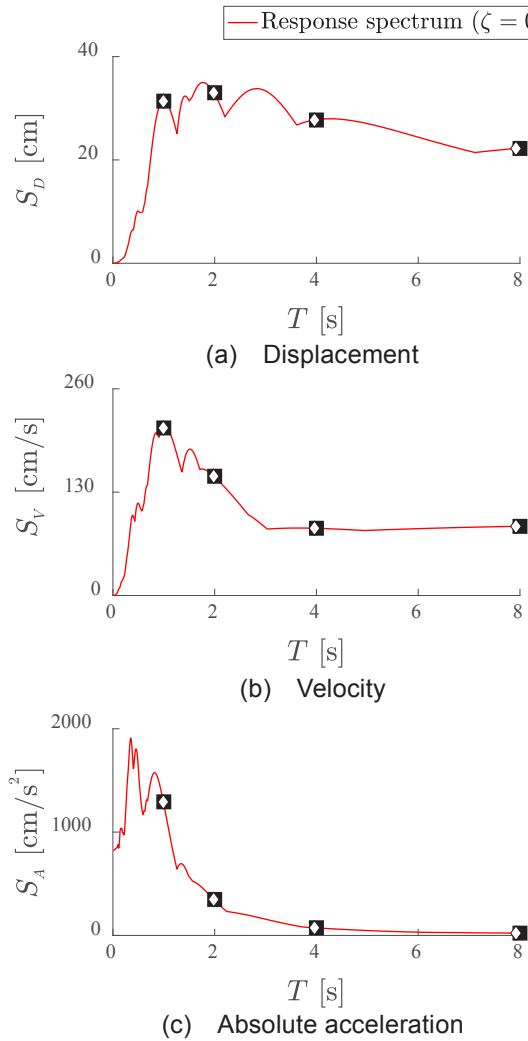


Fig. 7 Comparison between Analysis results and response spectrum (under JMA Kobe)

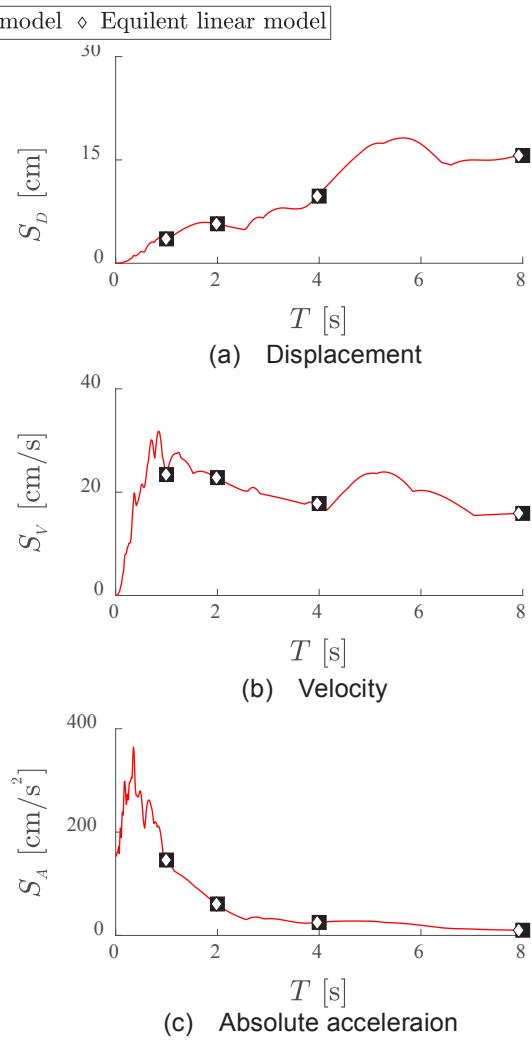


Fig. 8 Comparison between Analysis results and response spectrum (under Taft)

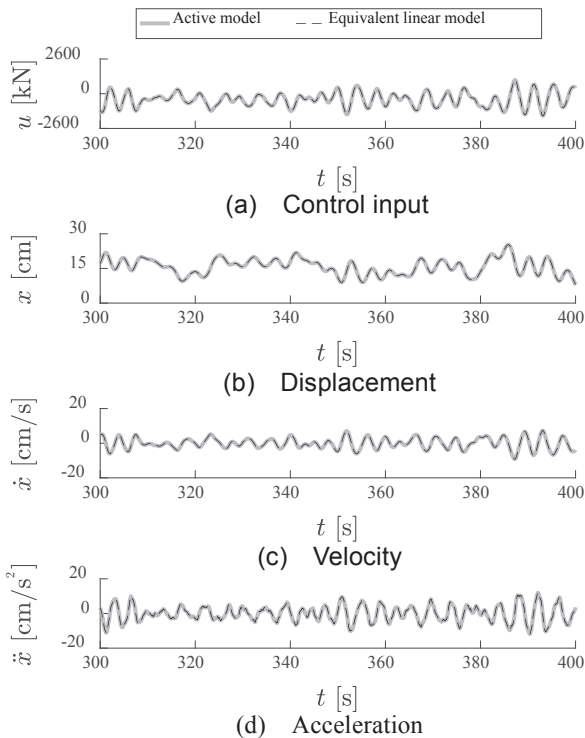


Fig. 9 Analysis results under Along-wind force (M4-1)

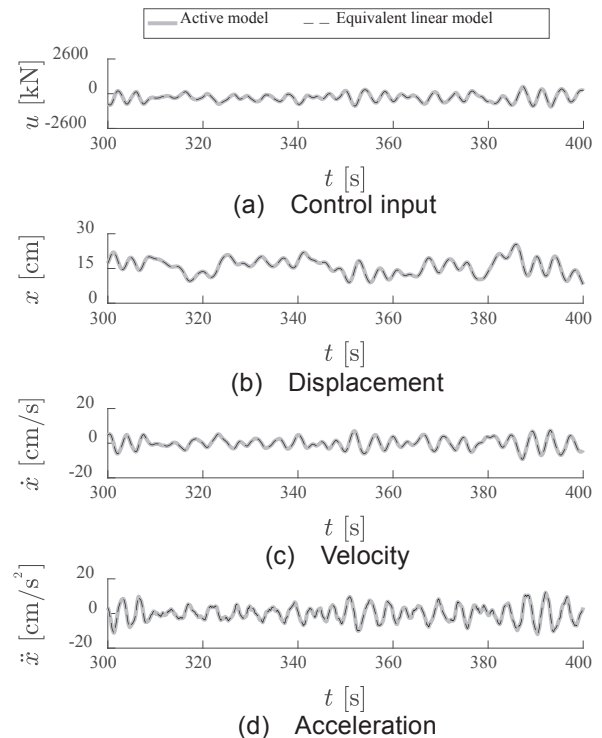


Fig. 10 Analysis results under Along-wind force (M4-5)

#### 4. まとめ

本報その2では地震外乱と風外乱を用い、制御対象の固有周期と減衰率を変化し、等価モデルの解析結果をアクティブモデルの解析結果と比較した。解析から得られた知見を以下に示す。

- (1) 等価モデルの解析結果とアクティブモデルの解析結果が一致することを確認した。等価モデルを用いて、制御系の性能を評価することができる。
- (2) 質量  $m$  と固有周期  $T$  の同じモデルにおいて、減衰率  $\zeta$  が異なれば、同じ  $T_{eq}$  と  $\zeta_{eq}$  の等価モデルを構するための必要となる制御入力  $u$  が異なる。なお、等価モデルの応答変位と応答速度を用いて、 $u$  の違いも表現できる。 $\zeta$  の異なる場合でも、 $T_{eq}$  と  $\zeta_{eq}$  を等しくすることで、アクティブモデルの応答は等しくなる。
- (3) 地震の応答スペクトルを用いて、等価モデルの応答も通常のアクティブ制御がない建物と同様に応答予測が可能であり、時刻歴応答解析せずに制御性能を評価することができる。
- (4) 等価モデルは平均成分を含む風方向風力においても適用できることを確認した。

#### 参考文献

- 1) 吉岡宏和, スペンサー Jr, B.F.: MR ダンパーを用いたスマート免震構造の振動台実験, 理論応用力学講演会公演論文集, pp. 65-66, 2002. 5
- 2) Kim Hyun-Su, Roschke N. Paul: GA-fuzzy control of smart base isolated benchmark building using supervisory control technique. *Advance in Engineering Software*, Vol.38, pp. 453-465, 2007. 7
- 3) 池田芳樹: 日本における建築構造物のアクティブ・セミアクティブ振動制御, 第12回地震工学シンポジウム, pp.77-81, 2006
- 4) 中村佳也, 岩田直衛, 渡壁守正, 西村秀和, 井上波彦, 仲宗根

- 5) 森泰親: わかりやすい現代制御理論, 2016. 2
- 6) 宮本皓, 佐藤大樹, 林岑蔚, 余錦華: 超高層建物を対象としたアクティブ制御を用いた免震建物の応答制御, 日本地震工学会第12回年次大会梗概集, p3-25, 2016. 9
- 7) 宮本皓, 佐藤大樹, 林岑蔚, 余錦華: アクティブ制御とパッシブ免震の併用による超高層免震の実現に向けた基礎的研究(その2: アクティブ制御設置時の免震周期設定に関する検討), 日本建築学会関東支部研究報告集, pp. 437-440, 2017. 3
- 8) 陳引力, 宮本皓, 佐藤大樹, 余錦華: アクティブ制御とパッシブ免震の併用による超高層免震のためのコントローラ設計方法(その1: 免震周期による必要制御入力エネルギー・パワーの分析), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 695-696, 2017. 8
- 9) 日本免震構造協会: パッシブ制振構造設計・施工マニュアル第3版, 2013. 11
- 10) 藤井高広, 藤谷秀雄, 向井洋一: MR ダンパーの最適制御によるセミアクティブ制御効果の評価—システム特性評価とパラメータ設定法—, 日本建築学会構造系論文集, 第78巻, 第689号, p. 1237-1245, 2013. 7
- 11) Hisham Abou-Kandil, Gerhard Freiling, Vlad Ionescu, Gerhard Jank: *Matrix Riccati Equations in Control and Systems Theory*, 2003. 7
- 12) 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, B-1, pp.193-194, 2010. 7

- 
- \*1 東京工業大学 大学院生 修士課程
  - \*2 東京工業大学 准教授・博士 (工学)
  - \*3 東京工業大学 大学院生 博士課程
  - \*4 東京工科大学 教授・博士 (工学)