

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	応答と制御力を考慮した超高層アクティブ免震のためのガストファクター方法 (その2: 予測方法の適応範囲と LQR 重みマトリックスの設定の提案)
Title(English)	Gust factor approach for high-rise active base-isolated buildings considering response and control force Part 2: Applicable condition of estimation method and suggestion for setting of LQR weighting matrix
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(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, , , pp. 781-782
Citation(English)	, , , pp. 781-782
発行日 / Pub. date	2022, 9
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

応答と制御力を考慮した超高層アクティブ免震のためのガストファクター方法  
(その2: 予測方法の適応範囲とLQR重みマトリックスの設定の提案)

アクティブ制御 免震構造 LQR  
ガストファクター 重み行列 最大制御力

正会員 ○陳 引力\*1 同 佐藤大樹\*2  
同 宮本 皓\*3 同 余 錦華\*4

## 1. はじめに

本報その1では、6ケースのLQR重みマトリックスを構築し、前報で提案した平均変位、平均制御力、変位のガストファクターと制御力のガストファクターの予測式の精度検証を行った。数値例により、一部のケースにおいて、制御力の予測誤差が大きいことが確認した。

その2では前報の提案式の導出に用いられた仮定を示し、予測方法の適応範囲を明らかにする。また、LQRマトリックスの設定方法の提案を行う。

## 2. 予測式の適応範囲

式その1で示された制御力のガストファクター(その1, 式(14))は以下の2つの条件を仮定する。

条件1 免震層の最大速度が次式で予測できる。

$$\dot{x}_{0,\max} \approx (x_{0,\max} - \bar{x}_0)\omega_{m1} \quad (1)$$

ここに、 $\dot{x}_{0,\max}$ は免震層の最大速度、 $x_{0,\max}$ は免震層の最大変位、 $\bar{x}_0$ は免震層の平均変位、 $\omega_{m1}$ は制御系の1次固有円周波数である。

条件1は一次モードの値のみを用いて、最大速度を予測するため、その適応範囲は制御系の1次モードが支配的であること。

条件2 次式の仮定が成り立つ。

$$\max(\mathbf{K}_{PD}\mathbf{X}(t)) \approx \mathbf{K}_{PD}\boldsymbol{\Phi}_{m1}x_{0,\max} \quad (2a)$$

$$\max(\mathbf{K}_{PV}\dot{\mathbf{X}}(t)) \approx \mathbf{K}_{PD}\boldsymbol{\Phi}_{m1}\dot{x}_{0,\max} \quad (2b)$$

ここに、 $\mathbf{X}(t)$ は変位ベクトル、 $\dot{\mathbf{X}}(t)$ は速度ベクトル、 $\boldsymbol{\Phi}_{m1}$ は制御系の1次モードである。

式(2)の左辺は2つのベクトルの内積の最大値で、式(2a)を例にすると

$$\mathbf{K}_{PD}\mathbf{X}(t) = \|\mathbf{K}_{PD}\| \cdot \|\mathbf{X}(t)\| \cos \theta_D(t) \quad (3)$$

ここに、 $\theta_D$ は $\mathbf{K}_{PD}$ と $\mathbf{X}(t)$ の間のベクトル角である。よって、左辺の最大値が次式になる。

$$\max(\mathbf{K}_{PD}\mathbf{X}(t)) = \|\mathbf{K}_{PD}\| \cdot \|\boldsymbol{\Phi}_{m1}\| x_{0,\max} \max(\cos \theta_D(t)) \quad (4)$$

ここで、 $\theta_D$ を一定不変に仮定すると式(4)が

$$\begin{aligned} \max(\mathbf{K}_{PD}\mathbf{X}(t)) &= \|\mathbf{K}_{PD}\| \cdot \|\boldsymbol{\Phi}_{m1}\| x_{0,\max} \cos \theta_D \\ &= \mathbf{K}_{PD}\boldsymbol{\Phi}_{m1}x_{0,\max} \end{aligned} \quad (5)$$

となる。同様に、式(2b)が成り立つ条件は $\mathbf{K}_{PV}$ と $\dot{\mathbf{X}}(t)$ の間のベクトル角 $\theta_V$ が一定不変であること。 $\theta_D$ と $\theta_V$ は次式より定義される。

$$\theta_D(t) = \arccos\left(\frac{\mathbf{K}_{PD}\mathbf{X}(t)}{\|\mathbf{K}_{PD}\| \cdot \|\mathbf{X}(t)\|}\right) \quad (6a)$$

$$\theta_V(t) = \arccos\left(\frac{\mathbf{K}_{PV}\dot{\mathbf{X}}(t)}{\|\mathbf{K}_{PV}\| \cdot \|\dot{\mathbf{X}}(t)\|}\right) \quad (6b)$$

そのため、本報その1の制御力のガストファクターの予測式(その1, 式(14))の適応範囲を以下に示す。

- 制御系の1次モードが支配的であること。
- $\mathbf{K}_{PD}$ と $\mathbf{X}(t)$ の間のベクトル角 $\theta_D$ と $\mathbf{K}_{PV}$ と $\dot{\mathbf{X}}(t)$ の間のベクトル角 $\theta_V$ が一定不変であること。

## 3. 数値例と分析

Figs. 1~6の(a)にCases 1~6の1次モードの固有周期と固有減衰定数を示し、Figs. 1~6の(b)に $\mathbf{K}_{PD}$ と $\mathbf{X}(t)$ の間のベクトル角 $\theta_D$ と $\mathbf{K}_{PV}$ と $\dot{\mathbf{X}}(t)$ の間のベクトル角 $\theta_V$ と $\mathbf{K}_{PV}$ と $\dot{\mathbf{X}}(t)$ の間のベクトル角 $\theta_V$ の時刻歴波形を示す。Figs. 1~6とその1のFigs. 4~9より、以下のことがわかる。

- Figs. 1~6の(b), (c), and (d)より、全てのケースにおいて $\mathbf{K}_{PD}$ と $\mathbf{X}(t)$ の間のベクトル角 $\theta_D$ がほぼ一定値になるため、変位のガストファクターの予測値が真値である数値シミュレーションの結果と精度良く一致する。
- Figs. 1 and 5の(b), (c), and (d)より、Cases 1 and 5において、 $\mathbf{K}_{PV}$ と $\dot{\mathbf{X}}(t)$ の間のベクトル角 $\theta_V$ が一定値になるため、制御力のガストファクターが精度良く予測されている。
- Figs. 2, 3, 4 and 6の(b), (c), and (d)より、Cases 1 and 5において、 $\mathbf{K}_{PV}$ と $\dot{\mathbf{X}}(t)$ の間のベクトル角 $\theta_V$ が時々刻々変化するため、制御力のガストファクターの予測精度が悪い。
- Figs. 5 and 6の(a)より、1次モードの固有周期は $\beta=15$ 付近に極値があるため、ガストファクターの予測値も $\beta=15$ 付近に極値がある。

## 4. 重み行列の設定の提案

本報で用いられる免震層のみに制御装置を設置する場合、上部構造の応答に重みを入れても(Cases 2, 3, 4, and 6)、制御性能の改善は見られないものの、本研究で提案した最大制御力の予測方法の精度が悪くなる可能性がある。そのため、耐風設計の場合は免震層のみに重みを入れることを推奨する。

## 5. まとめ

本報その2では、前報で提案した予測式の適応範囲を明らかにし、その1の数値例を用いて適応範囲の確認を行った。また、数値例により、重みマトリックスの設定の提案を行っ

た。免震層のみに制御装置を設置する建築物の耐風設計の場合は、免震層のみに重みを入れることを推奨する。

参考文献

1) 日本免震構造協会：免震建築物計画推移棟数，  
 <[http://www.jssi.or.jp/menshin/doc/ms\\_ss\\_data.pdf](http://www.jssi.or.jp/menshin/doc/ms_ss_data.pdf)>，2016  
 2) 背戸一登：構造物の振動制御，コロナ社，2006  
 3) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，2015.2

4) Yinli Chen, Daiki Sato, Kou Miyamoto, and Jinhua She: 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, pp. 110712, 2020.9  
 5) 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  
 6) 森泰親：わかりやすい現代制御理論，2016.2

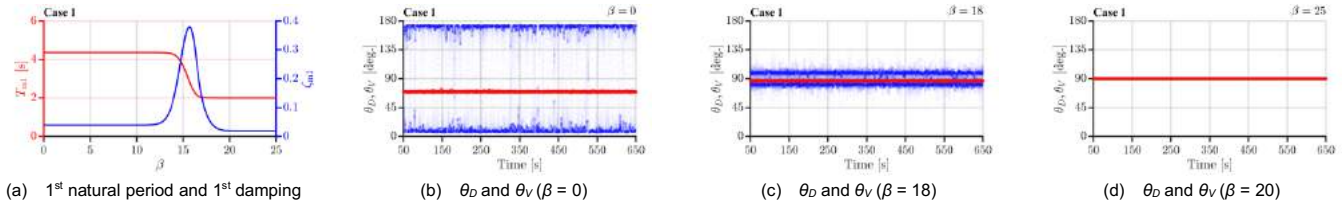


Fig. 1 Analysis of Case 01

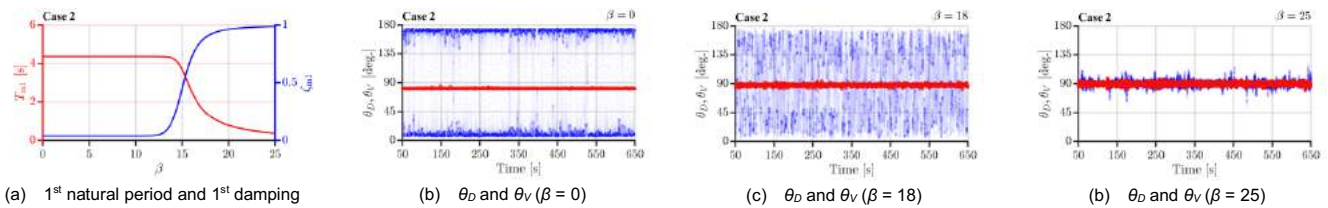


Fig. 2 Analysis of Case 02

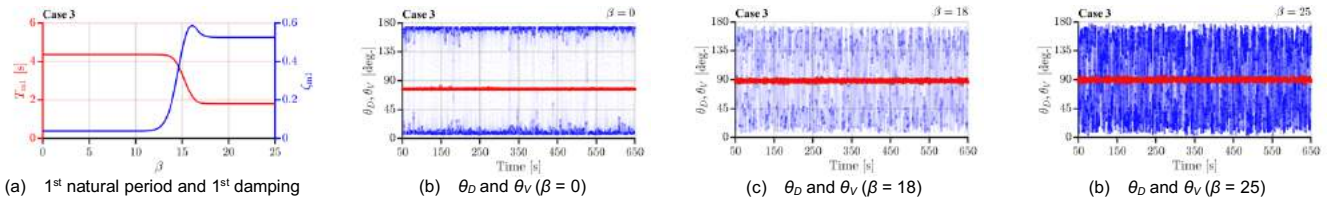


Fig. 3 Analysis of Case 03



Fig. 4 Analysis of Case 04

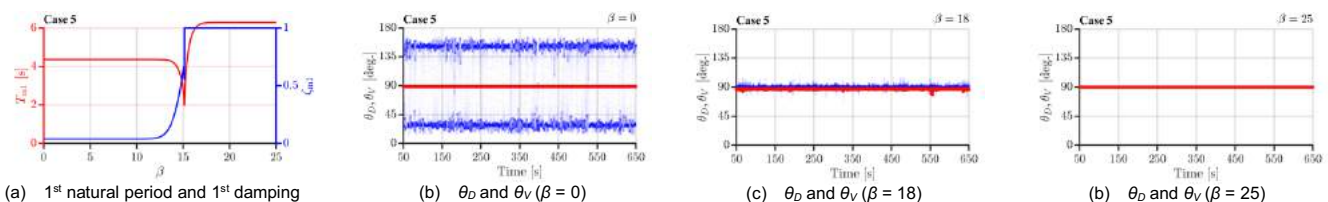


Fig. 5 Analysis of Case 05

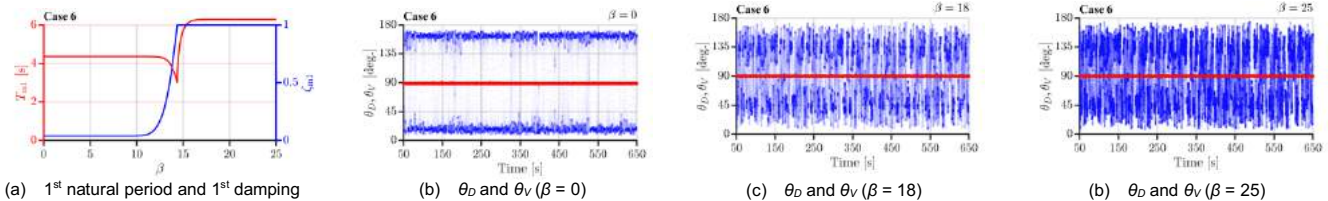


Fig. 6 Analysis of Case 06

\*1 東京理科大学 工学部建築学科 博士  
 \*2 東京工業大学 未来産業技術研究所 博士 (工学)  
 \*3 清水建設 技術研究所 博士 (工学)  
 \*4 東京工科大学 工学部機械工学科 博士 (工学)

\*1 Tokyo Univ. of Science, Faculty of Eng., Dept. of Arch., Ph.D.  
 \*2 Tokyo Institute of Tech., FIRST, Dr. Eng.  
 \*3 Tokyo Institute of Tech. FIRST Dr. Eng.  
 \*4 Tokyo University of Tech. Dept. of Mech. Eng. Dr. Eng.