

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	超高層アクティブ免震を対象とした線形制御系のピークファクターの適応の検証
Title(English)	Numerical Verification of Peak Factor Approach for High-rise Active Base-isolation Building
著者(和文)	陳引力, 佐藤大樹, 鎌野隆貴, 宮本皓, 余錦華
Authors(English)	Yinli Chen, Daiki Sato, Ryuki Kamano, Kou Miyamoto, Jinhua She
出典(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, , pp. 407-408
Citation(English)	, 構造II, , pp. 407-408
発行日 / Pub. date	2024, 8
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

超高層アクティブ免震を対象とした線形制御系のピークファクターの適応の検証

正会員 ○陳 引力*¹ 同 佐藤大樹*²
同 鎌野隆貴*³ 同 宮本 皓*⁴
同 余 錦華*⁵

アクティブ制御 免震構造 LQR
ピークファクター 応答予測 最大制御力

1. はじめに

アクティブ免震の簡易耐風設計方法を提案することを目的として、筆者ら風方向において数値シミュレーションを行わずに最大応答と最大制御力を予測するためのガストファクター方法を提案した^{1),2)}。しかし、風直交方向の予測方法はまだ整備されていない。本報では、先行段階として、風直交方向において最大応答を予測するためのピークファクター方法は超高層アクティブ免震に適応可能かを検証する。

2. 制御対象モデルと入力風力の概要

本報に用いられる免震建築物の上部構造を 10 質点せん断モデルとする。上部構造の各層の剛性 k_i は文献³⁾より与えられ、減衰は剛性比例型モデルを用いる。上部構造モデルの下に線形免震層を設置し、計 11 質点のモデルで解析を行う。モデルの諸元を Table 1 に示し、運動方程式を次式に示す。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{E}_f\mathbf{f}(t) - \mathbf{E}_u\mathbf{u}(t) \quad (1)$$

ここに、 \mathbf{M} は質量行列、 \mathbf{K} は剛性行列、 \mathbf{C} は減衰行列、 \mathbf{x} は変位ベクトル、 \mathbf{f} は風力ベクトル、 \mathbf{u} は制御力である。 \mathbf{E}_f と \mathbf{E}_u はそれぞれ \mathbf{f} と \mathbf{u} の入力行列である。

本報では、モデルに作用する風力を風向角 0° 、再現期間 100 年と 500 年の風直交方向風力とし、風洞実験結果⁴⁾を用いる。応答評価は 12 ケースの 10 分間風力より計算された応答アンサンブル平均を用いる。

3. 制御系の設計

式(1)の運動方程式を次式の状態方程式に変換する。

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{z}(t) + \mathbf{B}_f\mathbf{f}(t) - \mathbf{B}_u\mathbf{u}(t) \quad (2)$$

になる。ここに、 \mathbf{z} : 状態ベクトル、 \mathbf{A} : システム行列、 \mathbf{B}_f : 地震入力ゲイン、 \mathbf{B}_u : 制御入力ゲインである。 \mathbf{z} 、 \mathbf{A} 、 \mathbf{B}_f 、 \mathbf{B}_u は式(5)による。

$$\mathbf{z}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \dot{\mathbf{x}}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}, \quad (3a, b)$$

$$\mathbf{B}_f = [\mathbf{0} \quad (\mathbf{M}^{-1}\mathbf{E}_f)^T]^T, \quad \mathbf{B}_u = [\mathbf{0} \quad (\mathbf{M}^{-1}\mathbf{E}_u)^T]^T. \quad (3c, d)$$

ここで、制御力 $\mathbf{u}(t)$ は以下の制御則に従う。

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{K}_P\mathbf{z}(t) \quad (4)$$

ここに、 \mathbf{K}_P : フィードバックゲインである。Fig.1 に制御系のブロック線図を示す。

本報では Linea quadratic regulator (LQR) を用いて、コントローラゲインを設計し、次式の評価関数 J を最小にするように決定される。

$$J = \int_0^{\infty} [\mathbf{z}^T(t)\mathbf{Q}\mathbf{z}(t) + \mathbf{u}^T(t)\mathbf{R}\mathbf{u}(t)]dt \quad (5)$$

ここで、 \mathbf{Q} と \mathbf{R} はそれぞれ状態と制御力に対する重みである。本報では \mathbf{R} を 1 と固定し、 \mathbf{Q} を次式のようにする。

$$\mathbf{Q} = 10^\beta \text{diag}(\mathbf{q}) \quad (6)$$

ここに、 β は重み係数である。本報では免震層の変位を抑え

ることを目標とするため、 β を次式と定義する。

$$\mathbf{q} = [1 \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \quad (7)$$

フィードバックゲイン \mathbf{K}_P は

$$\mathbf{K}_P = -\mathbf{B}_u^T\mathbf{P} \quad (8)$$

で計算され、ここで、 \mathbf{P} は次式表されるリカッチ代数方程式の解である。

$$\mathbf{A}^T\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A} - \mathbf{P}\mathbf{B}_u\mathbf{B}_u^T\mathbf{P} + \mathbf{Q} = \mathbf{0} \quad (9)$$

4. 解析結果

Figs. 2 ~ 7 にピークファクターの予測値と解析結果 (免震層変位と制御力) との比較を示す。なお、ピークファクターの予測値は荷重指針の提案式 (次式)⁵⁾を用いる。

$$g_{\text{est}} = \sqrt{2 \ln(600f_{m1}) + 1.2} \quad (10)$$

ここに、 f_{m1} は制御系の一次モードの固有周波数である。

Figs. 2 ~ 7 より、本報で用いられた重み関数の場合は、全てのケースにおいて免震層変位と制御力のピークファクターの予測値は精度良く一致することがわかった。

5. まとめ

本報では超高層アクティブ免震の最大応答と最大制御力を予測する際に、ピークファクターの適応を検証した。解析結果により、ピークファクターの予測値と数値シミュレーション結果が精度良く一致することがわかった。

参考文献

- 1) 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
- 2) Yinli Chen, Daiki Sato, Kou Miyamoto, and Jinhua She: Gust Factor Approach for Estimating Maximum Response and Control Force in High-Rise Base-Isolated Buildings with Active Structural Control, *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 2024, pp. 9995641, 2024.3
- 3) 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*, Vol. 635, pp. 75-82, 2009.1
- 4) 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
- 5) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 2015.2

Table 1 Parameters of model

幅	B	20 m
奥行き	D	20 m
高さ	H	100 m
層高	h_i	10 m
密度	Γ_s	175 kg/m ³
1次固有周期	T_s	2 s
1次減衰比	Z_s	0.02
免震層密度	Γ_0	2551 kg/m ²
免震周期	T_0	2 s, 3 s, and 4 s
免震減衰比	Z_0	0.05

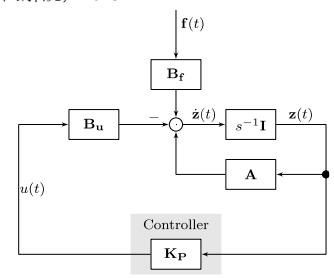


Fig. 1 block diagram

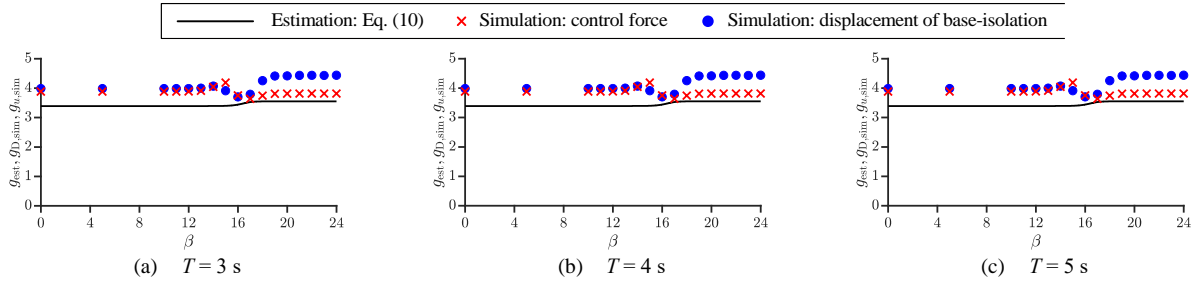


Fig. 2 Peak factor: estimation vs. simulation (aspect ratio: 3, return period: 100 years)

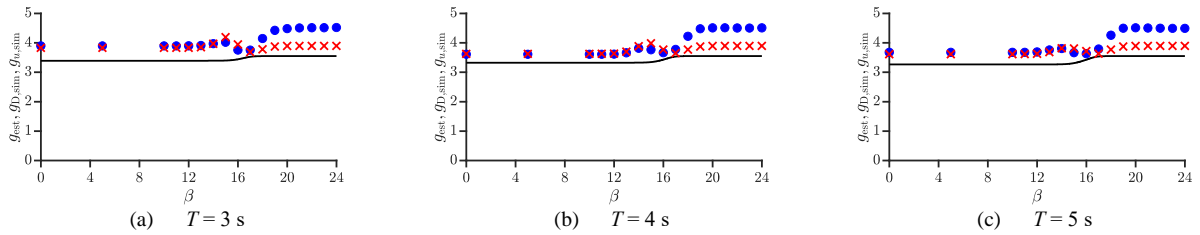


Fig. 3 Peak factor: estimation vs. simulation (aspect ratio: 3, return period: 500 years)

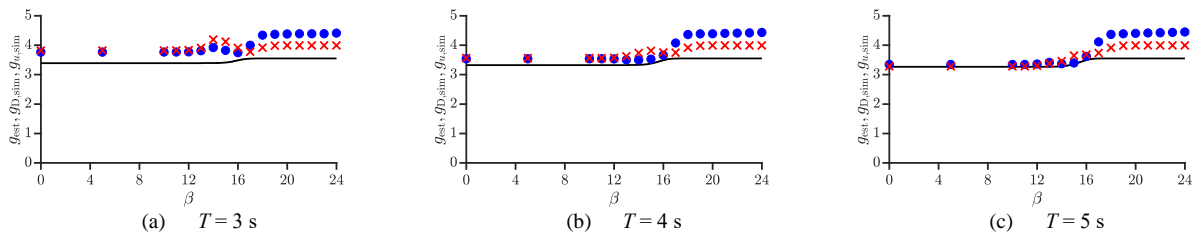


Fig. 4 Peak factor: estimation vs. simulation (aspect ratio: 4, return period: 100 years)

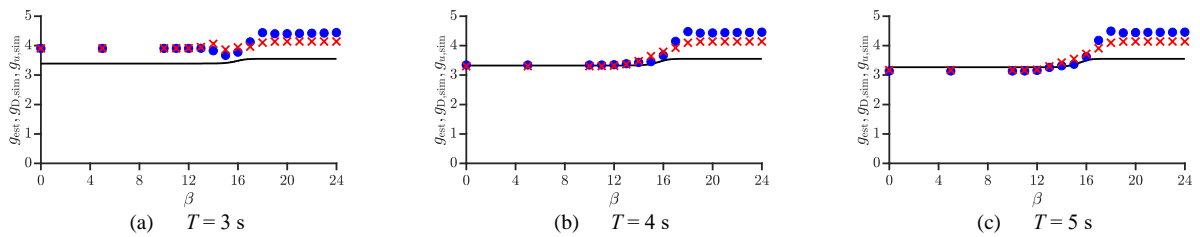


Fig. 5 Peak factor: estimation vs. simulation (aspect ratio: 4, return period: 500 years)

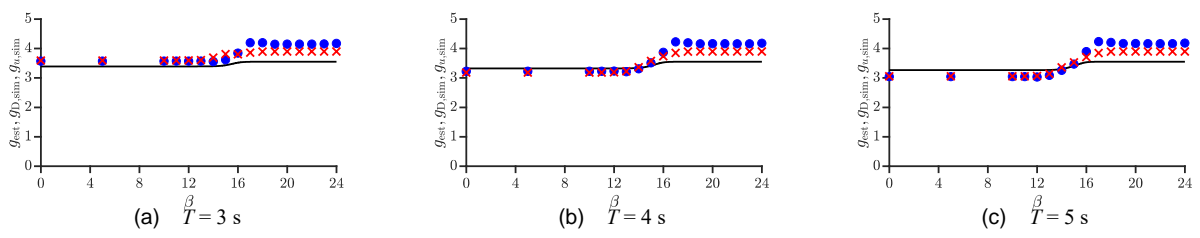


Fig. 6 Peak factor: estimation vs. simulation (aspect ratio: 5, return period: 100 years)

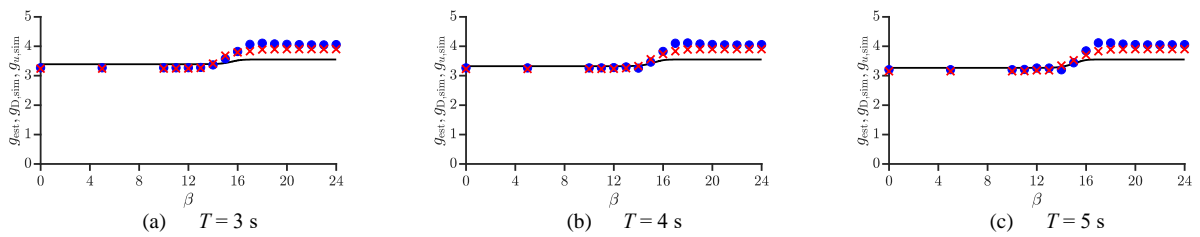


Fig. 7 Peak factor: estimation vs. simulation (aspect ratio: 5, return period: 500 years)

*1 東京工業大学 科学技術創成研究院 博士 (学術)
 *2 東京工業大学 未来産業技術研究所 博士 (工学)
 *3 東京工業大学 環境社会理工学院 修士課程
 *4 清水建設 技術研究所 博士 (工学)
 *5 東京工科大学 工学部機械工学科 博士 (工学)

*1 Tokyo Institute of Tech., IIR, Ph.D.
 *2 Tokyo Institute of Tech., IIR, Dr. Eng.
 *3 Tokyo Institute of Tech., Sch. of Envi. and Soc., Master Course
 *4 Shimizu corporation, Institute of Technology, Dr. Eng.
 *5 Tokyo University of Tech. Dept. of Mech. Eng., Dr. Eng.