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１：予測方法と数値例）
Title(English)	Gust factor approach for high-rise active base-isolated buildings considering response and control force Part 1: Estimation method and numerical examples
著者(和文)	佐藤大樹, 陳引力, 宮本皓, 佘 錦華
Authors(English)	Daiki Sato, Yinli Chen, Kou Miyamoto, Jinhua She
出典(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集， II， , pp. 779-780
Citation(English)	， II， , pp. 779-780
発行日 / Pub. date	2022, 9
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

日本建築学会大会学術講演梗概集
（北海道） 2022 年 9 月

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 1：予測方法と数値例）

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　○佐藤大樹[*1]　同　陳　引力[*2]
同　宮本　皓[*3]　同　佘　錦華[*4]

1. はじめに

地震から建築物を防ぎ、被害を最小限にすることを目的として、多くの建築物で免震構造を採用するケースが増えている[1)]。また、近年では、制御性能をさらに向上させることを目的として、アクティブ制御と組み合わせる手法（アクティブ免震）も提案され、実現例も報告されている[2)]。アクティブ制御を用いることで、従来のパッシブ制御よりも見掛け上高い減衰定数が得られ、優れた制御性能が得られる一方で、設計のためのパラメーターが増える欠点がある。また，耐風設計の場合，風力の継続時間が長く，応答は複数ケースのアンサンブル平均で計算され[3)]，試行錯誤的な設計に莫大な探索と数値シミュレーションが必要となり，設計の見通しが悪くなる。

この問題に対し，筆者らは風方向風力を受けるアクティブ免震のための簡易設計方法を提案した[4)]。この方法は従来のパッシブ設計に広く用いられるガストファクター方法をアクティブ免震に拡張し，試行錯誤と数値シミュレーションを行わずに，制御系の最大応答と最大制御力の予測を可能にした。本報その 1 では，複数の数値例を用いて前報で提案した方法の妥当性を確認する。

2. 制御対象モデルと入力風力の概要

本報における建築物モデルの概要を Fig. 1 に示す。解析対象のモデルを高さ H = 100 m の超高層免震建築物とし，建築物の上部構造を 10 質点せん断モデルでモデル化した。上部構造の各層の剛性 k_i は文献[5)]より与えられ，減衰は剛性比例型モデルを用いる。上記の 10 質点の上部構造モデルの下に天然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モデルの解析を行う。建築物モデルの諸元を Table 1 に示し，運動方程式を次式に示す。

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

ここに、$\mathbf{M}$ は質量マトリックス，$\mathbf{K}$ は剛性マトリックス，$\mathbf{C}$ は減衰マトリックス, $\mathbf{X}$ は変位ベクトル, $\mathbf{F}$ は風力ベクトル, u は制御力である。$\mathbf{E_F}$ と $\mathbf{E_u}$ はそれぞれ $\mathbf{F}$ と u の入力マトリックスである。

本報では, モデルに作用する風力を風向角 0°, 再現期間 500 年の 12 ケースの風方向風力とし，風洞実験結果[6)]を用いる。応答は 12 ケースのアンサンブル平均より計算される。Fig. 2 に各ケース層風力とそのアンサンブル平均を示す。

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。

$$\dot{\mathbf{z}}(t)=\mathbf{A}\mathbf{z}(t)+\mathbf{B_F}\mathbf{F}(t)-\mathbf{B_u}u(t) \tag{2}$$

になる。ここに，$\mathbf{z}$：状態ベクトル，$\mathbf{A}$：システムマトリックス，$\mathbf{B_F}$：地震入力ゲイン，$\mathbf{B_u}$：制御入力ゲインである。$\mathbf{z}$，$\mathbf{A}$，$\mathbf{B_F}$ は式(5)による。

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

$$\mathbf{B_F}=[\mathbf{0}\quad \mathbf{M}^{-1}\mathbf{E_F}]^{\mathrm{T}},\qquad \mathbf{B_F}=[\mathbf{0}\quad \mathbf{M}^{-1}\mathbf{E_F}]^{\mathrm{T}}. \tag{3c, d, e}$$

ここで、制御力 $u(t)$は以下の制御則に従う。

$$u(t)=\mathbf{K_P}\mathbf{z}(t)=[\mathbf{K_{PD}}\quad \mathbf{K_{PV}}][\mathbf{X}(t)\quad \dot{\mathbf{X}}(t)]^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

ここに，$\mathbf{K_P}$：フィードバックゲインであり，$\mathbf{K_{PD}}$ と $\mathbf{K_{PV}}$ はそれぞれ変位および速度応答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。

$$J=\int_0^\infty[\mathbf{z}^{\mathrm{T}}(t)\mathbf{Q}\mathbf{z}(t)+u^{\mathrm{T}}(t)Ru(t)]\mathrm{d}t \tag{5}$$

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。

$$Q=10^{\alpha}\mathrm{diag}(\mathbf{q}) \tag{6}$$

ここに，α は重み係数である。本報では以下の 6 ケースの $\mathbf{q}$ を用いる。

Case	1	2	3	4	5	6
x_0	1	0	1	1	1	1
x_1	0	0	0	1	0	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
x_9	0	0	0	1	0	1
x_{10}	0	1	1	1	0	1
	…	…	…	…	…	…
$\dot{x}_0$	0	0	0	0	1	1
$\dot{x}_1$	0	0	0	0	0	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$\dot{x}_9$	0	0	0	0	0	1
$\dot{x}_{10}$	0	0	0	0	0	1

フィードバックゲイン $\mathbf{K_P}$ は

$$\mathbf{K_P}=-\mathbf{B_u^T}\mathbf{P} \tag{7}$$

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[7)]。

$$\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{P}+\mathbf{P}\mathbf{A}-\mathbf{P}\mathbf{B_u}\mathbf{R}\mathbf{B_u^T}\mathbf{P}+\mathbf{Q}=\mathbf{0} \tag{8}$$

4. 最大変位と最大制御力の数値例

本報ではガストファクター方法（平均値にガストファクターを乗じる）を用いて，最大変位と最大制御力を予測する。予測式を以下に示し，その詳細と記号については文献を参照する。

Gust factor approach for high-rise active base-isolated buildings considering response and control force
Part 1: Estimation method and numerical examples

SATO Daiki
CHEN Yinli
MIYAMOTO Kou
SHE Jinhua,

$$\bar{\mathbf{X}}=\mathbf{K}_{\mathrm{eq}}^{-1}\bar{\mathbf{F}} \tag{9}$$

$$\bar{u}=\mathbf{K}_{\mathrm{PD}}\bar{\mathbf{X}}=\mathbf{K}_{\mathrm{PD}}\mathbf{K}_{\mathrm{eq}}^{-1}\bar{\mathbf{F}} \tag{10}$$

$$G_D=1+g_D\frac{C_g'}{C_g}\sqrt{1+\phi_D^2R_D} \tag{11}$$

$$G_u=\sqrt{G_D^2+G_V^2}=\sqrt{G_D^2+\left(\frac{\mathbf{K}_{\mathrm{PV}}\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{m1}}\left(x_{0,\max}-\bar{x}_0\right)\omega_{\mathrm{m1}}}{\mathbf{K}_{\mathrm{PD}}\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{m1}}\bar{x}_0}\right)^2} \tag{12}$$

式(9)~(12)を用いて，数値シミュレーションを行わずに，制御系の最大変位と最大制御力を予測できる。Fig. 4~9 に予測値と数値シミュレーションから得られた真値との比較を示す。Fig. 4~9 より，以下のことがわかる。

- 全てのケースにおいて，平均変位と平均制御力の予測値が真値と精度良く一致する。
- Case 5 において，ガストファクターの予測値が $\beta=15$ 付近に極値を持つ。
- Cases 1, 3 and 5 においては制御力のガストファクターが精度良く予測されているが，Cases 2, 4 and 6 においては制御力のガストファクターの予測誤差が極めて大きい。

5. まとめ

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 ではその原因について分析する。

参考文献

参考文献はその 2 にまとめて示す

Table 1　Parameters of model

幅		B	20 m
奥行き		D	20 m
上部構造	高さ	H	100 m
		h_i	10 m
	密度	ρ_s	175 kg/m^3
	1次固有周期	T_s	2 s
	1次減衰比	ζ_s	0.02
免震層	密度	ρ_0	2551 kg/m^2
	免震周期	T_0	4 s
	免震減衰比	ζ_0	0.01, 0.05, and 0.10

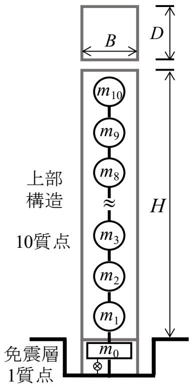


Fig. 1 Building

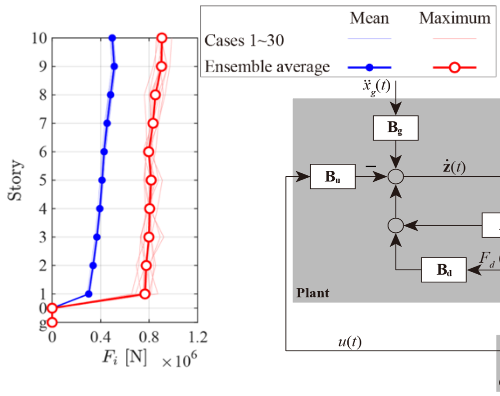


Fig. 2 Story wind force

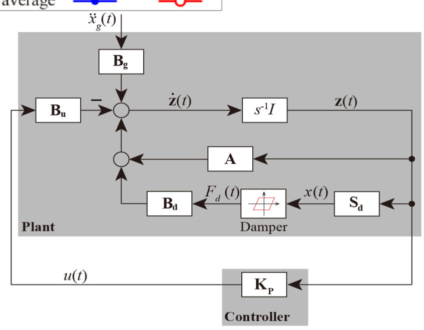
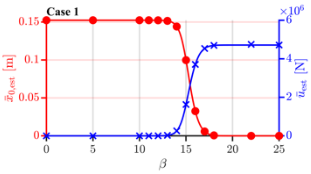


Fig. 3 block diagram


(a)　Mean value

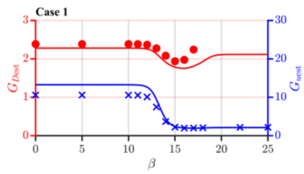
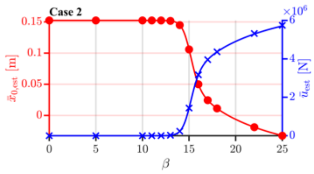

(b)　Gust factor

Fig. 4　Case 01: estimation values vs. simulation results


(a)　Mean value

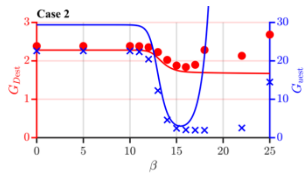
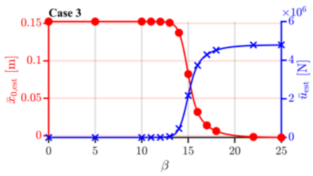

(b)　Gust factor

Fig. 5　Case 02: estimation values vs. simulation results


(a)　Mean value

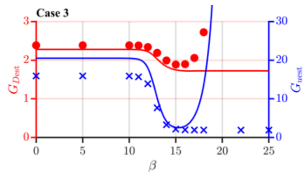
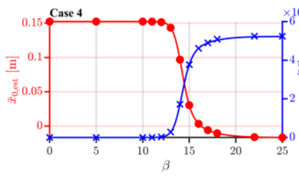

(b)　Gust factor

Fig. 6　Case 03: estimation values vs. simulation results


(a)　Mean value

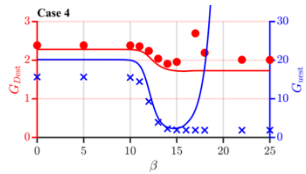
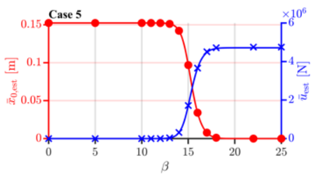

(b)　Gust factor

Fig. 7　Case 04: estimation values vs. simulation results


(a)　Mean value

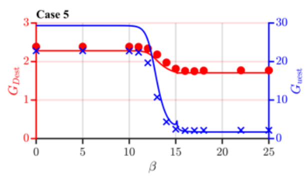
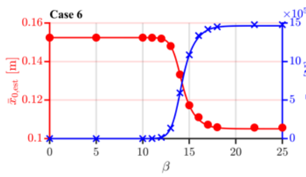

(b)　Gust factor

Fig. 8　Case 05: estimation values vs. simulation results


(a)　Mean value

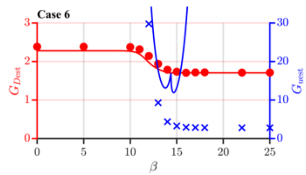

(b)　Gust factor

Fig. 9　Case 06: estimation values vs. simulation results

*1 東京工業大学　未来産業技術研究所　博士（工学）
*2 東京理科大学　工学部建築学科　博士
*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 Institute of Tech., FIRST, Dr. Eng.
*2 Tokyo Univ. of Science, Faculty of Eng., Dept. of Arch., Ph.D.
*3 Shimizu Corporation, Institute of Tech., Dr. Eng.
*4 Tokyo University of Tech., Dept. of Mech. Eng., Dr. Eng.