

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 その1：ガストファクターの導出及び精度検証
Title(English)	Design method for control system for high-rise base-isolated buildings combined with active structural control under along-wind force Part 1: Derivation and accuracy verification of gust factors
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)	日本建築学会大会学術講演梗概集, , , pp. 655-656
Citation(English)	Summaries of technical papers of annual meeting, , , pp. 655-656
発行日 / Pub. date	2020, 9
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

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  
その1: ガストファクターの導出及び精度検証

アクティブ制御  
LQR

風方向風力  
応答予測

ガストファクター

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

### 1. はじめに

兵庫県南部地震の後から、建築物が崩壊することを防ぐことのみならず、建築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築物の件数が急激に増えている。現在では多くの建築物が免震構造を採用しており、近年では、超高層建築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築物により、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。

耐風設計において、平均変位を静的なつり合いで算出し、ガストファクターをかけることよって、最大応答を数値解析せずに予測することができる<sup>1)</sup>。筆者らはアクティブ制御を併用した超高層免震建物に対し、数値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>2)</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は数値解析が必要となる。また、文献1)では免震建物を対象としたの変位のガストファクターを示された。しかし、この研究はアクティブ制御とパッシブ免震との併用を考慮しなかった。

本研究その1では文献1)で示された変位のガストファクターをアクティブ制御と併用した超高層免震建物に拡張する。また、最大制御力を静的に予測するための制御力のガストファクターを提案し、数値例により精度検証を行う。

### 2. 制御対象モデルと風力の概要

本報における建築物モデルの概要を Fig. 1 に示す。本報では、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、これの上部構造を10質点せん断モデルでモデル化した。各層の剛性  $k_i$  は文献3)より与えられる。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 に示す。

本報では、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し、風洞実験結果<sup>3)</sup>を用いる。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 に各層の風力のアンサンブルを示す。

### 3. 制御系の構築

制御系の運動方程式を次式に示す。

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

ここに、 $X$ : 変位ベクトル、 $F$ : 層風力、 $u$ : 制御力、 $M$ : 質量行列、 $C$ : 減衰行列、 $K$ : 剛性行列であり、 $E_F$  と  $E_u$  はそれぞれ  $F$  と  $u$  の位置を表すベクトルで、次式より与えられる。

$$E_F = I, E_u = [1 \ 0 \ \dots \ 0]^T \quad (2)$$

Design method for control system for high-rise base-isolated buildings combined with active structural control under along-wind force  
Part 1: Derivation and accuracy verification of gust factors

ここに、 $I$  は単位行列である。

制御系を構築するために、式(1)の運動方程式を次式の状態方程式に変換する。

$$\dot{Z}(t) = AZ(t) + B_F F(t) + B_u u(t) \quad (3)$$

ここに、 $Z$ : 状態ベクトル、 $A$ : システム行列、 $B_u$ : 制御力ゲイン、 $B_F$ : 風力ゲインであり、それらは次式による。

$$Z(t) = [X^T(t) \ \dot{X}^T(t)]^T \quad (4a)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (4b)$$

$$B_F = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}E_F \end{bmatrix}, B_u = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}E_u \end{bmatrix} \quad (4c, d)$$

本報ではフィードバック制御を用い、制御力は次式による。

$$u(t) = K_P Z(t) = [K_{PD} \ K_{PV}] [X^T(t) \ \dot{X}^T(t)]^T \quad (5)$$

ここで、 $K_P$  はコントローラゲインであり、 $K_{PD}$  と  $K_{PV}$  はそれぞれ変位以下の LQR 評価関数  $J$  を最小化するように設計される。

$$J = \int_0^\infty (Z^T(t)QZ(t) + u^T(t)Ru(t))dt \quad (6)$$

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。

$$Q = \text{diag}(1 \ \dots \ 1 \ | \ 0 \ \dots \ 0) \text{ and } R = 1 \quad (7)$$

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。

$$K_P = R^{-1}B_u^T P \quad (8)$$

ここに、 $P$  は次のリカッチ代数方程式の解である<sup>4)</sup>。

$$A^T P + PA - PB_u R^{-1} B_u^T P + Q = 0 \quad (9)$$

### 4. ガストファクター

風方向風力に平均成分を保有することため、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)をかけることにより予測することができる。本章では文献1)で示された変位のガストファクターの予測式を、アクティブ制御を併用した超高層免震建物に拡張し、制御力のガストファクターを提案する。また、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の予測式は文献1)により、次式であたえられる。

$$G_D = 1 + g_D \frac{C_g'}{C_g} \sqrt{1 + \phi_D^2 R_D} \quad (10)$$

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。

CHEN Yinli,  
SATO Daiki,  
SHE Jinhua,  
MIYAMOTO Kou

Fig. 4 (a)に変位のカストファクターの予測値と数値解析の結果の比較を示す。なお、数値解析の結果は免震層の値のみ示す。Fig. 4 (a)より、以下のことがわかる。

- 変位のカストファクターの設計値は数値解析の結果と概ね一致するため、文献1)の計算式はアクティブ制御を併用した免震建築物へ拡張することができる。
- $\alpha$ を大きくすると変位のカストファクターは小さくなる傾向がある。
- $\alpha < 12$ の場合、免震層減衰比を大きくすると変位のカストファクターは小さくなる傾向がある。
- $\alpha > 15$ の場合、免震層減衰比を大きくしても変位のカストファクターは変化しない。

#### 4.2 制御力のカストファクター

制御力のカストファクターは

$$G_u = \frac{\max\{u\}}{\bar{u}} \quad (11)$$

で定義される。式(5)を式(10)に代入すると

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

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2)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がないことがわかる。したがって、式(12)が

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

になる。モーダル理論より最大速度を $\max\{\dot{X}\} \approx (\max\{X\} - \bar{X})\omega_1$ で近似し、これを式(12)に代入すると、次式となる。

$$G_u \approx G_D + \frac{K_{PV}(\max\{X\} - \bar{X})\omega_1}{K_{PD} \bar{X}^T} = G_D + \frac{K_{PV}(G_D \bar{X} - \bar{X})\omega_1}{K_{PD} \bar{X}^T} \quad (14)$$

ここに、 $\omega_1$ は制御系の1次固有円周波数である。

式(14)より、数値解析を行わずに最大制御力を予測することができる。Fig. 4 (b)に変位のカストファクターの予測値と数値解析の結果の比較を示す。なお、数値解析の結果は免震層の値のみ示す。Fig. 4 (b)より、以下のことがわかる。

- 制御力のカストファクターの設計値は数値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カストファクターは小さくなる傾向がある。
- $\alpha < 12$ の場合、免震層減衰比を大きくすると制御力のカストファクターは小さくなる傾向がある。
- $\alpha > 15$ の場合、免震層減衰比を大きくしても制御力のカストファクターは変化しない。

#### 6. まとめ

本報その1では、変位と制御力のカストファクターを提案し、数値例を用いて提案されたカストファクターの精度検証を行った。数値解析の結果により、カストファクターの予測値は概ね真値と一致する。そのため、変位と制御力のカストファクターを用いて、最大変位と最大制御力を数値解析を行わずに予測することができる。

#### 参考文献

その2に示す。

Table 1 Parameters of model			
幅	$B$	20 m	
奥行き	$D$	20 m	
高さ	$H$	100 m	
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	
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	

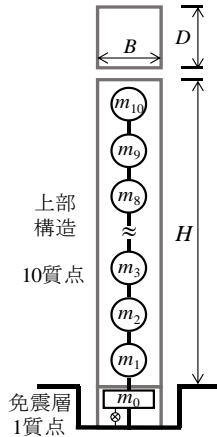


Fig. 1 Building

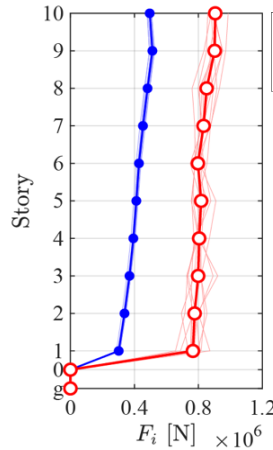


Fig. 2 Story wind force

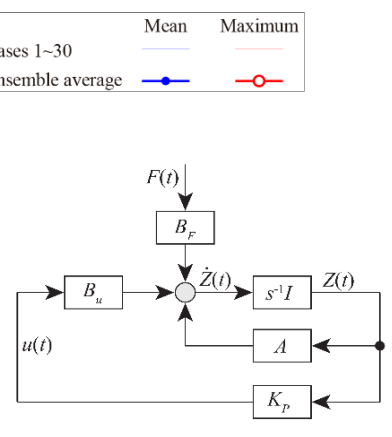
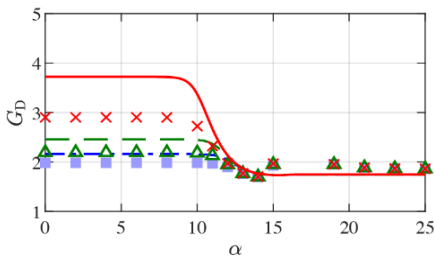
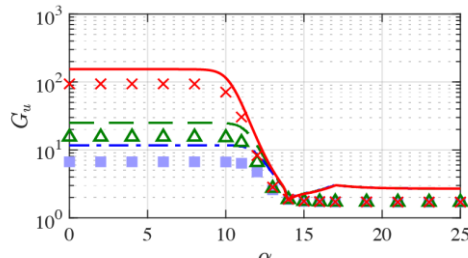


Fig. 3 block diagram



(a) Gust factor for displacement



(b) Gust factor for control force

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

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

\*1 東京工業大学  
\*2 東京工科大学  
\*3 清水建設

\*1 Tokyo Institute of Technology  
\*2 Tokyo University of Technology  
\*3 Shimizu Corporation