

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	風力を受ける超高層アクティブ免震建築物に関する研究(その1. 制御目標ごとの応答低減効果の比較)
Title(English)	Research on A High-Rise Base-Isolated Structure with Active Control subjected to Wind Force (Part.1, Comparison of Control Performance using Various Performance Index)
著者(和文)	鎌野隆貴, 陳引力, 佐藤大樹, 宮本皓, 余錦華
Authors(English)	Ryuki Kamano, 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, 構造II, , pp. 389-390
Citation(English)	, 構造II, , pp. 389-390
発行日 / Pub. date	2025, 9
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

風力を受ける超高層アクティブ免震建築物に関する研究 (その 1. 制御目標ごとの応答低減効果の比較)

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

アクティブ制御      LQR 制御      応答低減効果  
超高層免震建築物      風方向風力      風直交方向風力

1. はじめに

近年、免震技術の発達により免震建築物の高層化が進んでいる<sup>1)</sup>。建築物が高層化すると見付面積が大きくなり、風力の影響を強く受けることにより、免震層変位が許容値を上回るといった問題が発生する<sup>2)</sup>。これを解決するために、本研究では超高層免震建築物にアクティブ制御を併用した、超高層アクティブ免震建築物を対象とする。

本研究ではアクティブ制御で広く用いられる LQR 制御 (Linear Quadratic Regulator) を行う。LQR 制御は様々な制御目標を設定することが可能だが、制御目標ごとの応答低減効果は異なる。特に超高層アクティブ免震建築物を対象とした場合、風力を受けた際に高い応答低減効果を発揮する制御目標を設定することが重要であるが、制御目標ごとの応答低減効果は比較・考察はされていない。

そこで、本報その 1 では風力を受ける超高層アクティブ免震建築物の制御目標を複数設定し、各種最大応答を制御目標ごとに比較することで高い応答低減効果を発揮する制御目標について検討・考察する。

2. 力学モデル・制御系の設計

風力を受ける  $N$  自由度系アクティブ免震建築物の振動方程式は以下で表される。

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

ここで、 $\mathbf{x}(t)$ : 応答変位ベクトル、 $M$ : 質量マトリクス、 $C$ : 減衰マトリクス、 $K$ : 剛性マトリクス、 $\mathbf{f}(t)$ : 風外乱ベクトル、 $\mathbf{E}_f$ :  $\mathbf{f}(t)$  の入力マトリクス、 $u(t)$ : 制御力、 $\mathbf{E}_u$ :  $u(t)$  の入力マトリクスであり、それぞれ次式で定める。

$$\mathbf{x}(t) = [x_0(t) \ x_1(t) \ \dots \ x_N(t)]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{f}(t) = [0 \ f_1(t) \ \dots \ f_N(t)] \quad (3)$$

$$\mathbf{E}_f = \mathbf{I}, \quad \mathbf{E}_u = [1 \ 0 \ \dots \ 0]^T \quad (4, 5)$$

ここに、 $x_i(t)$ ,  $f_i(t)$ : 順に第  $i$  層の応答変位、風力であり、 $i = 0$  は免震層、 $T$  は転置、 $\mathbf{I}$  は単位行列を表す。

上部構造の質量  $m_i$  は次式で与え、減衰係数  $c_i$  は剛性比例型、水平剛性  $k_i$  は文献<sup>3)</sup>により与える。

$$m_i = \rho H B D / N, \quad c_i = \frac{2\zeta_{s,m1}}{\omega_{s,m1}} k_i \quad i = 1 \sim N \quad (6, 7)$$

ここで、 $\rho$ ,  $H$ ,  $B$ ,  $D$ : 順に上部構造の密度、高さ、幅、奥行きである。また、 $\omega_{s,m1}$ ,  $\zeta_{s,m1}$ : 順に上部構造の 1 次固有円振動数、1 次減衰定数である。

また、本報では上部構造の 1 次モードは直線分布とし、頂部を 1 として基準化する。

$$\phi_i = i/N \quad i = 1 \sim N \quad (8)$$

免震層の質量  $m_0$ 、減衰係数  $c_0$ 、水平剛性  $k_0$  は次式による。

$$m_0 = \rho_0 B_0 D_0 \quad (9)$$

$$c_0 = \frac{4\pi\zeta_0}{T_0} \sum_{i=0}^N m_i, \quad k_0 = \left(\frac{2\pi}{T_0}\right)^2 \sum_{i=0}^N m_i \quad (10, 11)$$

ここで、 $\rho_0$ ,  $B_0$ ,  $D_0$ : 順に免震層の面密度、幅、奥行き、 $T_0$ : 免震周期、 $\zeta_0$ : 免震減衰比である。

次に制御系を構築するために、式(1)の状態方程式を示す。

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{z}(t) + \mathbf{B}_f \mathbf{f}(t) - \mathbf{B}_u u(t) \quad (12)$$

ここに、 $\mathbf{z}(t)$ : 状態変数ベクトル、 $\mathbf{A}$ : システムマトリクス、 $\mathbf{B}_f$ : 風力入力ゲイン、 $\mathbf{B}_u$ : 制御力入力ゲインである。

$$\mathbf{z}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \dot{\mathbf{x}}(t) \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix} \quad (13, 14)$$

$$\mathbf{B}_f = [\mathbf{0}^T \ (\mathbf{M}^{-1}\mathbf{E}_f)^T]^T, \mathbf{B}_u = [\mathbf{0}^T \ (\mathbf{M}^{-1}\mathbf{E}_u)^T]^T \quad (15, 16)$$

本報では、以下の制御則のフィードバック制御を行う。

$$u(t) = \mathbf{K}_p \mathbf{z}(t) = \mathbf{K}_{pD} \mathbf{x}(t) + \mathbf{K}_{pV} \dot{\mathbf{x}}(t) \quad (17)$$

ここに、 $\mathbf{K}_p$ : 状態フィードバックゲイン、 $\mathbf{K}_{pD}$ : 応答変位の状態フィードバックゲイン、 $\mathbf{K}_{pV}$ : 応答速度の状態フィードバックゲインである。図 1 に制御系のブロック線図を示す。

本報では LQR 制御を行う。その評価関数を次式に示す。

$$J = \int_0^{\infty} [\mathbf{z}^T(t) \mathbf{Q}_n \mathbf{z}(t) + u^T(t) R u(t)] dt \quad (18)$$

ここに、 $\mathbf{Q}_n$ : 状態変数の重み行列、 $R$ : 制御力の重みである。

LQR 評価関数を最小にするフィードバックゲイン  $\mathbf{K}_p$  は、リカッチ代数方程式の解  $\mathbf{P}$ <sup>4)</sup> を用いて次のように表される。

$$\mathbf{K}_p = -R^{-1} \mathbf{B}_u^T \mathbf{P} \quad (19)$$

3. 数値解析用のモデル、風力および制御目標の概要

3.1. モデルおよび風力の概要

図 2 に構造物モデルを、図 3 に力学モデルを、表 1 にモデルの諸元を示す。

また、本報では風洞実験<sup>5)</sup> (Wind Tunnel Experiment, WTE) により得られた層風力を用いる。表 2 に風力の諸元を、図 4 に風洞実験から得られる層風力の 1 次モードパワースペクトル密度 (Power Spectrum Density, PSD) と、荷重指針 (Recommendation for Loads on Buildings, RLB) による風力の 1 次モードパワースペクトル密度の比較を示す。

3.2. LQR 制御目標の設定

式(18)の  $\mathbf{Q}_n$  および  $R$  を以下のように設定する。

$$\mathbf{Q}_n = 10^\beta \text{diag} \mathbf{T}_n, \quad R = 1 \quad (20, 21)$$

ここに、 $\beta$ : LQR 重み指数、 $\mathbf{T}_n$ : 制御目標ベクトルである。なお、 $\mathbf{T}_n$  は表 3 で定める。

表 3 制御目標ベクトル  $\mathbf{T}_n$  と制御目標

	$x_0$	$x_1$	$\dots$	$x_{10}$	$\vdots$	$\dot{x}_0$	$\dot{x}_1$	$\dots$	$\dot{x}_{10}$	制御目標
Case1	1	0	$\dots$	0	$\vdots$	0	0	$\dots$	0	免震層変位
Case2	1	1	$\dots$	1	$\vdots$	0	0	$\dots$	0	全層変位
Case3	1	1	$\dots$	1	$\vdots$	1	0	$\dots$	0	全層変位&免震層速度
Case4	1	1	$\dots$	1	$\vdots$	0	0	$\dots$	1	全層変位&頂部速度
Case5	0	0	$\dots$	0	$\vdots$	1	1	$\dots$	1	全層速度
Case6	1	0	$\dots$	0	$\vdots$	1	1	$\dots$	1	免震層変位&全層速度
Case7	0	0	$\dots$	1	$\vdots$	1	1	$\dots$	1	頂部変位 & 全層速度
Case8	1	1	$\dots$	1	$\vdots$	1	1	$\dots$	1	全層変位 & 全層速度

#### 4. 数値解析結果

本章では、各制御目標における風力を受ける場合の制御力係数に対する免震層最大変位、頂部最大加速度、1層最大層間変形角、1層せん断力係数を考察する。なお、制御力係数は最大制御力を建物全重量で除したものである。

$$C_u = \max|u(t)| / \sum_{i=0}^{10} m_i g \quad (22)$$

また、第*i*層のせん断力係数は以下の式で算定する。

$$C_i = \max \left| \sum_{j=i}^{10} \{m_j \ddot{x}_j(t) - f_j(t)\} \right| / \sum_{j=i}^{10} m_j g \quad i = 0 \sim 10 \quad (23)$$

##### 4.1. 風方向風力を受ける場合

図5に風方向風力による各種最大応答を示す。

- (a) 免震層最大変位について、Case5,6,7のような全層速度を制御目標とすると最大変位を低減できないが、Case8のように全層速度制御に全層変位制御を併用すると最大変位を低減することができる。なお、その他の制御目標の変位低減効果は概ね同程度である。
- (b) 頂部最大加速度について、制御目標ごとの最大加速度低減効果は概ね同程度であるが、Case1は制御力係数が大きくなると基礎固定建築物として振舞うようになる

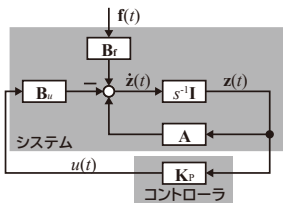


図1 ブロック線図

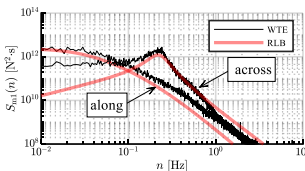


図4 風力のPSD

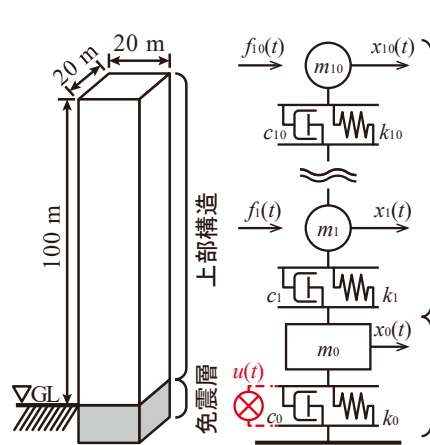


図2 構造物モデル

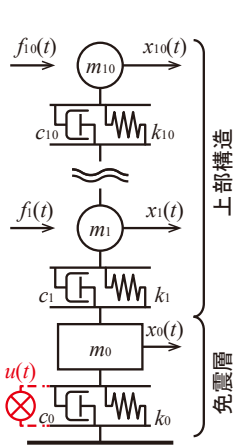


図3 力学モデル

るため最大加速度を低減することができない。

- (c) 1層最大層間変形角も上記と同様の傾向が得られた。
- (d) 1層せん断力係数も上記と同様の傾向が得られた。

##### 4.2. 風直交方向風力を受ける場合

図6に風直交方向風力による各種最大応答を示す。

- (a) 免震層最大変位について、Case5の全層速度制御以外は制御目標の違いによる変位低減効果にほぼ差はない。
- (b) 頂部最大加速度は、風方向と同様の傾向が得られた。
- (c) 1層最大層間変形角も同様の傾向が確認できるが、Case8の応答低減効果がわずかに高いことがわかる。
- (d) 1層せん断力係数も上記と同様の傾向が得られた。

総評として、応答低減効果の高い制御目標として、風方向は全層変位を含む制御、風直交方向はある層の変位&全層速度を含む制御のとき応答低減効果が大きくなる。そして両者に共通するものは全層変位&全層速度制御である。

#### 5. まとめ

本報では風力を受ける超高層アクティブ免震建築物の制御目標ごとの応答低減効果を比較した。その結果、全層変位&全層速度を制御目標とすると、最大応答低減効果が大きいことが確認された。

参考文献はその2にまとめて示す。

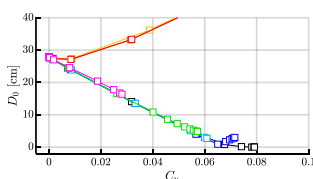
表1 モデルの諸元

パラメータ	数値
構造種別	鉄骨造
高さ	100 m
上部幅	20 m
上部奥行	20 m
密度	200 kg/m <sup>3</sup>
1次固有周期	2 s
1次減衰定数	2%
幅	20 m
奥行	20 m
面密度	3,000 kg/m <sup>2</sup>
免震層	免震層
免震周期	4 s
免震減衰比	20%

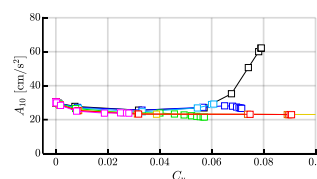
表2 風力の諸元

パラメータ	数値
外乱方向	風方向
風直交方向	風直交方向
ケース数	30
計画地	東京
地表面粗度区分	III
再現期間	500 年
基本風速	36 m/s
500年風速	40 m/s
設計風速	50.41 m/s
速度圧	1,550 N/m <sup>2</sup>

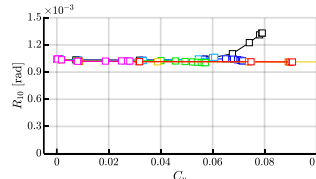
□ : Case1   □ : Case2   □ : Case3   □ : Case4   □ : Case5   □ : Case6   □ : Case7   □ : Case8



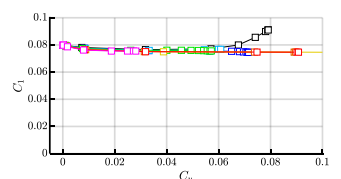
(a) 免震層最大変位



(b) 頂部最大加速度

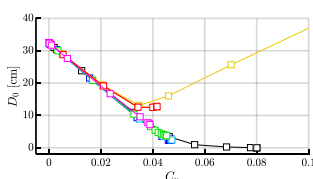


(c) 1層最大層間変形角

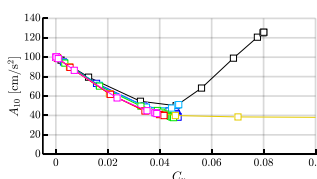


(d) 1層せん断力係数

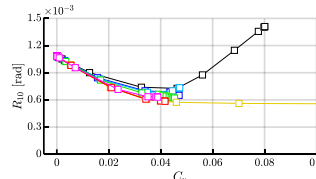
図5 各種最大応答比較 (風方向風力)



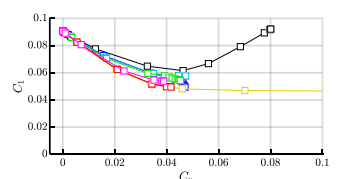
(a) 免震層最大変位



(b) 頂部最大加速度



(c) 1層最大層間変形角



(d) 1層せん断力係数

図6 各種最大応答比較 (風直交方向風力)

\*1 東京科学大学  
\*2 清水建設  
\*3 東京工科大学

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