

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	風荷重を受ける超高層アクティブ免震建築物における応答と制御力の考察 積層ゴムの固有周期とLQR重み関数をパラメータとした解析結果の比較
Title(English)	Consideration of wind-load response and control force in a highrise base-isolated building with active control
著者(和文)	鎌野隆貴, 高橋治, 陳引力, 佐藤大樹
Authors(English)	Ryuki Kamano, Osamu Takahashi, Yinli Chen, Daiki Sato
出典(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, , pp. 729-730
Citation(English)	, 構造II, , pp. 729-730
発行日 / Pub. date	2024, 8
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

風荷重を受ける超高層アクティブ免震建築物における応答と制御力の考察
ー積層ゴムの固有周期と LQR 重み関数をパラメータとした解析結果の比較ー

正会員 ○鎌野 隆貴*¹ 正会員 高橋 治*²
 “ 陳 引力*³ “ 佐藤 大樹*⁴

超高層建築物	アクティブ免震	フィードバック制御
風荷重	風応答	制御力

1. 研究背景および研究目的

1995 年の兵庫県南部地震以降、建築物の倒壊防止や部材損傷防止を目的として免震構造を採用する建築物が増加している^り。免震建築物の問題点として、上部構造に直接作用する風荷重を遮断できず、建物応答が増大してしまうことが挙げられる。

そこで、1989 年に建築物の地震荷重や風荷重の応答低減を目的としてアクティブ制振を併用する方法が提案された²⁾。近年ではアクティブ制振と免震構造を併用したアクティブ免震も登場している³⁾。しかし、超高層建築物への適用事例はいまだ存在しない。この原因は地震荷重や風荷重に対する応答が未解明な点が多いことにある。

そこで本研究では、超高層アクティブ免震建築物の風荷重応答を対象とし、時刻歴応答解析を行うことで応答制御力と建物応答について考察を行う。

2. 解析概要

2.1. モデル概要および風力概要

本研究ではアスペクト比 5、辺長比 1、高さ 150 m の鉄骨造超高層アクティブ免震建築物を対象とする。力学モデルを図 1 に、モデルの各諸元を表 1 に示す。

上部構造を40質点とし、各層の剛性 k_i は文献⁴⁾により与えられ、減衰は剛性比例型とする。免震層を1質点とし、天然系積層ゴムと履歴型鋼材ダンパーで構成され、バイリニア型の復元力特性とする。本研究のモデルの振動方程式を次式に示す。

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

ここで、 $\mathbf{x}(t)$ ：応答変位ベクトル[m]、 $\mathbf{M}$ ：質量マトリクス[kg]、 $\mathbf{C}$ ：減衰マトリクス[N・s/m]、 $\mathbf{K}$ ：剛性マトリクス[N/m]、 $F_{hy}(t)$ ：履歴減衰力[N]、 $\mathbf{f}(t)$ ：風荷重ベクトル[N]、 $\mathbf{u}(t)$ ：制御力[N]である。なお、 $\mathbf{E}_{hy}$ 、 $\mathbf{E}_f$ 、 $\mathbf{E}_u$ は各荷重の入力マトリクスを示し、次式により定義する。

$$\mathbf{E}_{\text{hy}} = [1 \quad 0 \quad \cdots \quad 0]^T, \mathbf{E}_{\text{f}} = \mathbf{I}, \mathbf{E}_{\text{u}} = [1 \quad 0 \quad \cdots \quad 0]^T \quad (2a, b, c)$$

また、上部構造の1次モードを下記の直線分布とする。

$$\phi_i = i \quad (i = 1 \sim 40) \quad (3)$$

風荷重は風洞実験結果⁵⁾を用い、10 ケースのデータで時刻歴応答解析を行う。表 2 に風荷重の各諸元を、図 2 に風洞実験結果を示す。

表1 モデルの各諸元

パラメータ	数値
構造種別	鉄骨
アスペクト比	5
辺長比	1
上部構造高さ	150 m
幅	30 m
奥行き	30 m
自由度	40
第 <i>i</i> 層階高	3.75 m
密度	175 kg/m ³
1 次固有周期	3.75 s
1 次減衰定数	2 %
幅	30 m
奥行き	30 m
免震面密度	2,500 kg/m ²
自由度	1
層ゴム固有周期	5, 6, 7 s
降伏比	4 %
降伏変位	3 cm

表2 風力の概要

計画地	東京
再現期間	500 年
地表面粗度区分	III
風向角	0°
設計風速	61 m/s

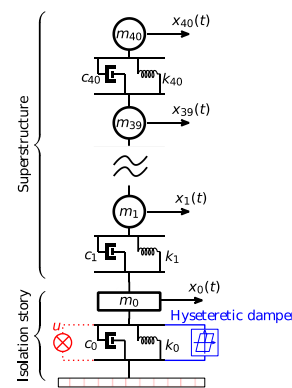


図1 力学モデル

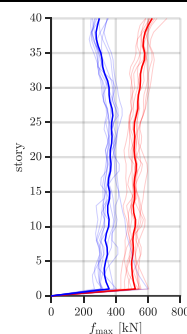


図2 風洞実験結果

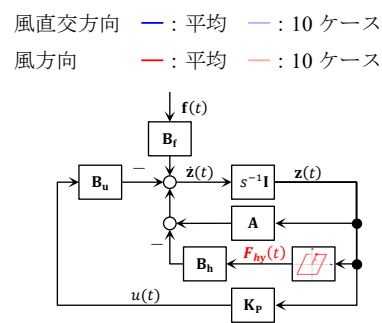


図3 ブロック線図

2.2. 制御系概要

式(1)の状態方程式を次式に示す。

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{z}(t) - \mathbf{B}_{\text{hy}}F_{\text{hy}}(t) + \mathbf{B}_{\text{f}}\mathbf{f}(t) - \mathbf{B}_{\text{u}}u(t) \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{z}(t)$: 状態ベクトル、 $\mathbf{A}$: システムマトリクス

B_{hy} , B_f , B_u は各荷重の入力ゲインであり、次式による。

$$\mathbf{z}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \dot{\mathbf{x}}(t) \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix} \quad (5a, b)$$

$$\mathbf{B}_{hy} = [\mathbf{0} \quad (\mathbf{M}^{-1}\mathbf{E}_{hy})^T]^T, \mathbf{B}_f = [\mathbf{0} \quad (\mathbf{M}^{-1}\mathbf{E}_f)^T]^T \quad (5c, d)$$

$$\mathbf{B}_u = [\mathbf{0} \quad (\mathbf{M}^{-1}\mathbf{E}_u)^T]^T \quad (5e)$$

本研究ではフィードバック制御を行い、制御力は以下の制御側に従う⁶⁾。図3にブロック線図を示す。

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{K}_p \mathbf{z}(t) = [\mathbf{K}_{pD} \quad \mathbf{K}_{pV}] [\mathbf{x}^T(t) \quad \dot{\mathbf{x}}^T(t)]^T \quad (6)$$

$\mathbf{K}_p$ ：フィードバックゲインであり、 $\mathbf{K}_{pD}$ および $\mathbf{K}_{pV}$ はそれぞれ変位と速度に対するフィードバックゲインである。

本研究では、次式の評価関数 J を最小化する最適レギュレータを用いてフィードバックゲインを得る。

$$J = \int_0^\infty [\mathbf{z}^T(t)\mathbf{Q}\mathbf{z}(t) + \mathbf{u}^T(t)\mathbf{R}\mathbf{u}(t)]dt \quad (7)$$

ここに、 $\mathbf{Q}$ と $\mathbf{R}$ はそれぞれ状態ベクトル $\mathbf{z}(t)$ と制御力 $\mathbf{u}(t)$ に対する重み行列である。本研究は免震層の変位を抑えるために、以下の重み行列を用いる。

$$\mathbf{Q} = 10^\beta \begin{bmatrix} \mathbf{D} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \mathbf{R} = 1, \mathbf{D} = \text{diag}(1, 0, \dots, 0) \quad (8a, b, c)$$

ここで、 β ：重み指数、 $\mathbf{D}$ ：第1成分のみ1の対角行列であり、免震層の変位のみ重みづけすることを意味する。

2.3. 解析項目および設計クライテリア

本研究では、表1に示す超高層免震建築物に風方向荷重、風直交方向荷重がそれぞれ作用した場合を想定し、制御力、頂部応答加速度、第1層のベースシア係数を比較する。

また、 $T_0 = 5$ sの免震変位が0, 15, 30 cmになるようなアクティブ制御を行うために式(8a)の重み指数を表3のように設定する。また、表4に設計クライテリアを示す。

表3 重み指数の設定		表4 設計クライテリア	
免震層の想定変位	重み指数 β	項目	数値
0 cm	22	免震層最大変位	45 cm
15 cm	15.2	頂部最大加速度	200 gal
30 cm	13	ベースシア係数	0.2

3. 解析結果

3.1. 制御力と免震層の最大応答変位

図4に制御力と免震層の最大応答変位を示す。風方向、風直交方向ともに約10,000 kN以上の制御力を出力することにより免震層の最大変位を15 cm以内に抑えることができることを確認した。また、全層風力(約25,000 kN)と等しい制御力で免震層の最大変位を0 cmに収束させることができることを確認した。

3.2. 頂部最大応答加速度

図5に頂部最大応答加速度を示す。風方向では全ケースで200 galを下回り、100 gal程度であった。しかし、風直交方向では200 galを上回るケースが多く、式(8a)において適切な重み指数を選択することにより200 gal程度に抑え設計クライテリアを満たすことができた。

3.3. ベースシア係数

図6に第1層のベースシア係数を示す。ベースシア係数は制御力の大きさによらず概ね0.1で一定となることを確認した。

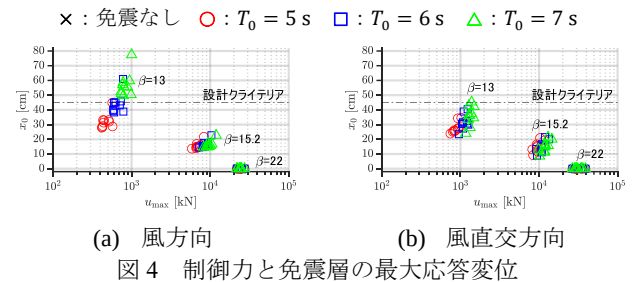


図4 制御力と免震層の最大応答変位

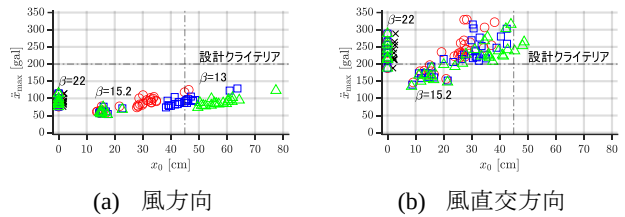


図5 頂部最大応答加速度

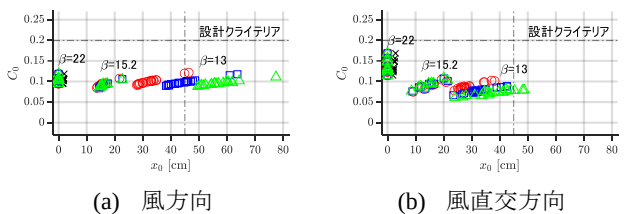


図6 ベースシア係数

4. 結論

本研究は高さ150m、アスペクト比5、辺長比1の超高層アクティブ免震建築物における風荷重応答および制御力について考察した。得られた知見を以下に示す。

このモデルでは約10,000 kN以上の制御力を出力することにより積層ゴムの固有周期 T_0 に依存せず免震層の最大変位を15 cm以内に抑えることができる。また、このような制御を行う場合、頂部最大応答加速度において風方向は200 galを下回り、風直交方向は適切な重み指数を選択することで設計クライテリアを満たすことができる。対してベースシア係数は制御力の大きさによらず概ね0.1で一定になることを確認した。

謝辞

本研究における風洞実験⁵⁾については株式会社泉創建エンジニアリングで実施され提供いただいたものです。ここに感謝の意を示します。また、東京工科大学の余錦華教授、清水建設技術研究所の宮本皓氏にも研究に関する助言をいただきました。ここで感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本免震構造協会：免震建築物等の計画推移、2022.6
- 2) 青戸一登：構造物の振動制御、コロナ社、2006.4
- 3) 日本建築学会：アクティブ・セミアクティブ振動制御技術の現状、2006.5
- 4) 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74巻、第635号、pp.75-82、2009.1
- 5) 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
- 6) 森泰親：わかりやすい現代制御理論、2013.4

*1 元東京理科大学 大学生
*2 東京理科大学 教授・博士 (工学)
*3 東京工業大学 助教・博士 (学術)
*4 東京工業大学 准教授・博士 (工学)

*1 Former Bachelor, Tokyo University of Science
*2 Professor, Tokyo University of Science, Dr. Eng
*3 Assistant Professor, Tokyo Institute of Technology, Ph.D
*4 Associate Professor, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng