

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

|                   |  |
|-------------------|--|
| 論題(和文)            | 風方向風力を対象としたLQR重み行列のアクティブ制御の性能に与える影響  |
| Title(English)    | Dependency of control performance to LQR weighting matrix for active structural control under along-wind force |
| 著者(和文)            | 陳引力, 佐藤大樹, 宮本皓, 余錦華  |
| Authors(English)  | 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, , pp. 905 -906  |
| Citation(English) | Summaries of technical papers of annual meeting, , pp. 905 -906  |
| 発行日 / Pub. date   | 2019, 9  |
| 権利情報              | 一般社団法人 日本建築学会  |

## 風方向風力を対象とした LQR 重み行列のアクティブ制御の性能に与える影響

アクティブ制御  
重み行列風方向風力  
制御力LQR  
制御性能正会員 ○陳 引力\*1 同 佐藤大樹\*1  
同 宮本 皓\*2 同 余 錦華\*3

## 1. はじめに

近年、日本では重要施設や高層建築物に免震構造を適用した件数が増えている。地動加速度を上部構造に伝わりにくくするために、免震層は一般的に柔らかく設計されている。しかし、高層建築物におけるでは地震荷重よりも風荷重による構造への影響が懸念されるため、強風時に免震層の変位を許容範囲内に抑えることが難しい。

この問題を解決するためには、免震とアクティブ制御との併用が考えられる。筆者らは、風方向風力における、免震とアクティブの併用を考慮した制御力と応答変位の推定方法を提案した。また、数値例より LQR を用いて設計された制御系において、平均制御力に上限値があることを示した。制御力の制限値により、設計目標となる免震層変位を望ましい範囲に抑えない恐れがある<sup>1)</sup>。

本報では、異なる LQR 重み行列を用いて制御系を構築する。また、制御系の平均制御力を理論的に計算し、LQR 重み行列の平均制御力の上限値に与える影響を分析する。最後に数値シミュレーションを行い、各制御系の応答を示す。

## 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  $H = 200$  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<sup>2)</sup>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 30 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 30 ケースのアンサンブル平均より計算される。Fig. 2 に例としての 1 ケースの 7 層風力の波形とパワースペクトル密度を示し、Fig. 3 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。

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

ここに、 $I$  は単位行列である。

式(1)の状態方程式は次式であり、Fig. 4 に制御系のブロック線図を示す。

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

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。

$$u(t) = K_P Z(t) \quad (5)$$

ここで、 $K_P$  はコントローラゲインであり、以下の LQR 評価関数  $J$  を最小化するように設計される。

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

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、重み行列  $Q$  と  $R$  の制御性能に与える影響を考察するためには、Table 2 に示す 4 パターンの重み行列を用いる。ここに、 $\alpha$  は重み行列  $Q$  のなか係数である。

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。

$$K_P = -R^{-1} B_u^T P \quad (7)$$

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

$$A^T P + PA - P B_u R^{-1} B_u^T P + Q = 0 \quad (8)$$

## 4. 平均制御力の上限値

平均制御力の計算は次の方程式の解を用いる<sup>1)</sup>。

$$\bar{u} = K_P \begin{bmatrix} K^{-1} [\bar{u} \ \bar{F}_1 \ \cdots \ \bar{F}_{10}]^T \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(9)より計算された平均制御力  $\bar{u}$  と  $\alpha$  の関係を Fig. 5 に示す。Fig. より、以下のことがわかる。

- すべてのパターンにおいて、平均制御力に上限値がある。
- 重み行列の選択により、平均制御力の上限値が異なる。
- パターン 1\_0 では平均制御力の上限値は層風力の和より大きい。これはアクティブ制御により、免震層の平均変位を風の逆方向に抑えたことを意味する。

## 5. 時刻歴応答解析

Fig. 6 に  $\alpha$  を 20 を用いて各層の平均変位と最大変位を示し、Fig. 7 に最大加速度を示す。Fig. 6 と Fig. 7 より以下のことがわかる。

- 平均制御力が大きくなると、モデルの応答変位が小さくなる。

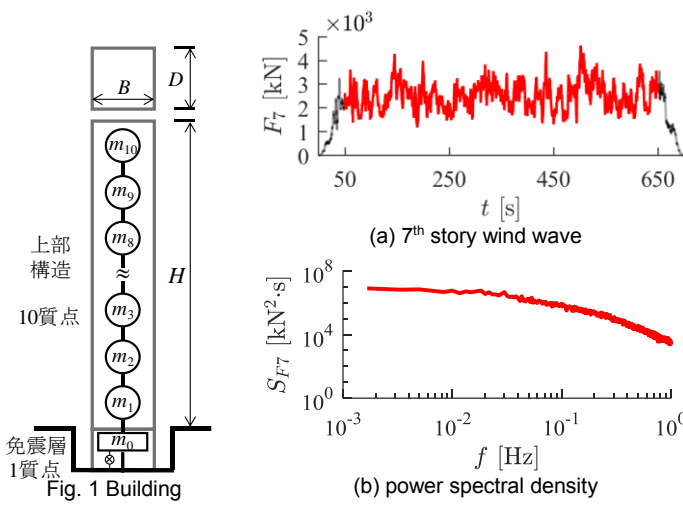
Dependency of control performance to LQR weighting matrix for active structural control under along-wind force

CHEN Yinli,  
SATO Daiki,  
MIYAMOTO Kou,  
SHE Jinhua

- パターン 1\_0 は免震層の平均変位を風の逆方向に抑え、最大応答変位が最も小さい。
- パターン  $K_M$ ,  $K_0$  と 1\_1 における最大応答加速度がほぼ一致するが、パターン 1\_0 の加速度が他のパターンより大きい。

### 6. まとめ

本報では、風方向風力を対象として異なる重み行列の制御性能に与える影響について考察した。数値例から、重み行列の設定により制御系の性能が異なることがわかった。そのため、耐風設計における、重み行列の選択が重要である。



### 参考文献

- 1) 陳引力, 佐藤大樹, 宮本皓, 余錦華: アクティブ制御を併用した超高層免震建築物の風方向風力に対する制御系の設計方法, 構造工学論文集, Vol. 64B, pp. 199-206, 2018.3
- 2) 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 635 号, pp. 75-82, 2009.1
- 3) 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, B-1, pp.193-194, 2010. 7
- 4) 森泰親: わかりやすい現代制御理論, 2016. 2

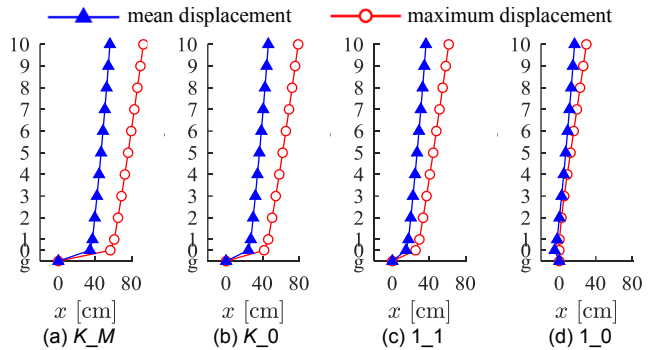
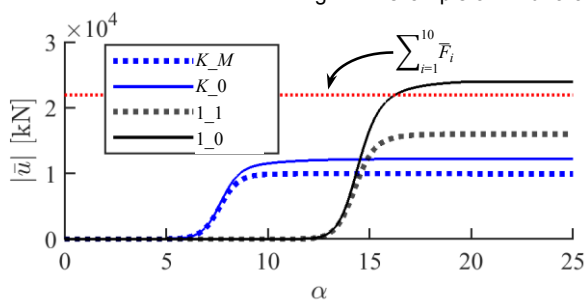
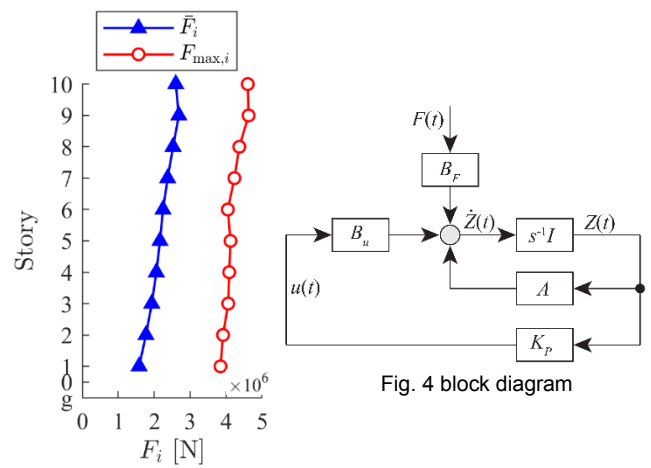


Table 1 Elements of analysis model Table 2 Setting of weighting matrices

| 幅    | $B$ [m] | 40                            |      |
|------|---------|-------------------------------|------|
| 奥行   | $D$ [m] | 40                            |      |
| 上部構造 | 高さ      | $H$ [m]                       | 200  |
|      |         | $h_i$ [m]                     | 20   |
|      | 密度      | $\rho_u$ [kg/m <sup>3</sup> ] | 175  |
|      | 1次周期    | $T_u$ [s]                     | 4.0  |
| 免震層  | 1次減衰率   | $\zeta_u$ [%]                 | 2.0  |
|      | 密度      | $\rho_0$ [kg/m <sup>2</sup> ] | 2551 |
|      | 免震周期    | $T_0$ [s]                     | 8.0  |
|      | 免震層減衰率  | $\zeta_0$ [%]                 | 5.0  |

| pattern | $Q$  | $R$ |
|---------|--|-----|
| $K_M$   | $10^\alpha \begin{bmatrix} K & \\ & M \end{bmatrix}$ | 1   |
| $K_0$   | $10^\alpha \begin{bmatrix} K & \\ & 0 \end{bmatrix}$ | 1   |
| 1_1     | $10^\alpha \begin{bmatrix} I & \\ & I \end{bmatrix}$ | 1   |
| 1_0     | $10^\alpha \begin{bmatrix} I & \\ & 0 \end{bmatrix}$ | 1   |

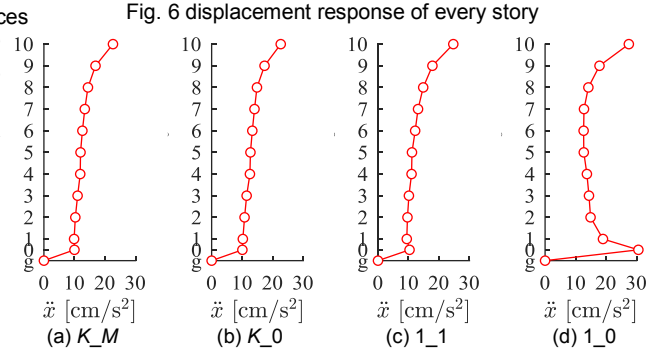


Fig. 7 displacement response of every story

\*1 東京工業大学  
\*2 清水建設 (元・東京工業大学)  
\*3 東京工科大学

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