

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	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
Title(English)	METHOD OF DESIGNING CONTROL SYSTEM FOR HIGH-RISE SEISMICALLY ISOLATED BUILDINGS WITH ACTIVE 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)	構造工学論文集, Vol. 64B, , pp. 199-206
Citation(English)	Journal of Structural Engineering, Vol. 64B, , pp. 199-206
発行日 / Pub. date	2018, 3
権利情報	日本建築学会

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

METHOD OF DESIGNING CONTROL SYSTEM FOR HIGH-RISE SEISMICALLY ISOLATED BUILDINGS WITH ACTIVE CONTROL UNDER ALONG-WIND FORCE

陳 引 力 *¹, 佐 藤 大 樹 *², 宮 本 皓 *³, 余 錦 華 *⁴
Yinli CHEN, Daiki SATO, Kou MIYAMOTO, Jinhua SHE

Active control has been using for buildings in recent years. It has been shown by previous studies that the combination of seismically passive isolation and active control achieves better control performance for earthquakes. However, the control performance of such a system is not guaranteed for a strong wind because the characteristics of seismic waves are quite different from strong winds. This study devised a method of computing mean control force presented a method of designing a control system for along-wind force. This features the design of a building with active control under along-wind force without solving differential equations.

Keywords : Active control, Seismically Isolated Buildings, Seismically Isolated Period, Along-Wind Force, Mean Component

アクティブ制御, 免震構造, 免震周期, 風方向風力, 平均成分

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¹⁾。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²⁾⁻³⁾。

免震構造とアクティブ制御を併用する研究について、宮本らはアクティブ制御の設計にLQR(Linear quadratic regulator)^{例えば4)}を用いた際の、コントローラ設計のための重み関数の設定方法についての検討を行い、絶対加速度と層間変位を抑えるための重み関数の選択方法についての考察を行った⁵⁾⁻⁶⁾。さらに、筆者らにより、アクティブ制御と免震構造を併用した際の免震構造の設計方法に関する考察が行われ、免震周期ごとの最大制御力・エネルギーについての分析が行われた⁷⁾。これにより、免震周期を短くすることにより、アクティブ制御に用いる最大制御力を減らすことが可能になる一方で、制御力のエネルギーに関しては、免震周期を長くすることで、使用するエネルギーを減少させることが可能であると示された。

これらの文献では建築物に入力する外乱として地震が想定されているが、高層建築物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こともあり、地震のみならず風荷重についての考慮も必要になる⁸⁾。しかし、地震は地動加速度による慣性力として地面から建築物に作用し、免震構造を適用することにより、地震による

振動を軽減することができる。それに対し、風外乱には風方向風力、風直交方向風力、ねじれ風力があり、それらは建築物の上部構造に直接作用し、地震の時とは異なる。そのため、従来の地震による振動を制御するコントローラでは風には対応できないことが危惧される。また、風方向風力には、平均成分を保有するという地震外乱と異なる特性を持っている。実際の耐風設計において、平均変位を静的な方法で算出し、ガストファクターをかけることよって、最大応答を予測することも行っている⁹⁾。そのため、アクティブ制御を併用した建物の風方向風力での平均応答を評価することが重要である。

本研究は地震外乱のみならず、風外乱にも適応するアクティブ制御のコントローラ設計方法を提案することを最終的な目的とし、本論文ではその前段階として、アクティブ制御を併用した超高層免震建築物を対象に、風方向風力に対する制御系の設計方法についての検討を行う。なお、コントローラは構造物振動制御に最も用いられるLQRによって設計される。制御系の設計を行う際は、風方向風力の平均成分の制御性能への影響を把握することを目的として、風方向風力の平均成分に対し、静的な方法として、コントローラの出す平均制御力と平均応答変位の計算式を示す。さらに、解析モデルの免震周期を変化させることにより免震周期ごとの必要となる平均制御力とコントローラが出せる平均制御力の考察を行い、風外乱を抑えるための超高層免震建築物を対象としたアクティブ制御の制御系の設計方法を提案する。

本論文で使う記号を Table 1 に示す。

*1 東京工業大学大学院環境・社会理工学院建築学系 大学院生 修士課程

*2 東京工業大学未来産業技術研究所 准教授・博士 (工学)

*3 東京工業大学大学院環境・社会理工学院建築学系 大学院生 博士課程

*4 東京工科大学工学部機械工学科 教授・博士 (工学)

Graduate Student, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology Associate Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Doctoral Student, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology Prof., Dept. of Mechanical Engineering, Tokyo University of Technology, Dr. Eng.

Table 1 Nomenclature

$0_{i \times j}$	i 行 j 列のゼロマトリックス	$1_{i \times j}$	i 行 j 列の1で構成されるマトリックス
A	システムマトリックス	B	モデルの幅
B_F	風入力ゲイン	B_u	制御力ゲイン
c	粘性係数	C	粘性マトリックス
D	建築物モデルの奥行き	E	アンサンブル平均
E_F	外乱入力マトリックス	E_u	制御力マトリックス
F	層風力	G	ガストファクター
h	上部構造の層高さ	H	上部構造の総高さ
I_n	n 次単位行列	J	LQR 評価関数
k	剛性係数	K	剛性マトリックス
K_P	コントローラゲイン	m	質量
M	質量マトリックス	N_s	応答評価の開始時間 (50.05 s) のステップ
N_e	応答評価の終了時間 (650 s) のステップ	P	リカッチ方程式の解
q	せん断力係数	Q	Zに対応する重み関数
R	u に対応する重み関数	RR	低減率
S	パワースペクトル密度	t	時間
T_0	免震周期	T_u	上部構造の1次周期
u	制御力	x	相対変位
X	建築物モデルの各層の相対変位ベクトル	Z	建築物モデルの状態ベクトル
α	Q のべき指数	Δx_i	i 層の層間変位
ϕ	1次固有モード	ρ_0	免震層の密度
ρ_u	上部構造の密度	ω	1次固有円振動数
ζ_0	免震層の1次減衰率	ζ_u	上部構造の1次減衰率
θ	層間変形角	$\bar{\square}$	制御ありの変数
$\bar{\square}$	平均成分	\square'	変動成分
\square	平均成分のない変数	$m \square$	平均成分のある変数
\square_i	風力の再現期間	\square_i	第 i 層 (0: 免震層)
\square_{lim}	制限値	\square_{peak}	最大値
\square_{tar}	目標値		

※ \square : 任意の変数 (例えば: $F, q, u, x, X, Z, \Delta x, \theta$)

2. 建築物モデル

本論文における建築物モデルの概要を Fig. 1 に示す。建築物モデルの諸元を Table 2 に示す。本研究では、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。上部構造の各層の高さと質量はそれぞれ式(1)と式(2)で与えられ、剛性 k_i は文献¹⁰⁾より式(3)で与えられる。

$$h_i = \frac{H}{10}, \{i=1 \sim 10\} \quad (1)$$

$$m_i = B \times D \times h_i \times \rho_u \quad (2)$$

$$k_1 = \frac{\omega^2 \cdot m_1 \cdot \phi_1 + k_2 (\phi_2 - \phi_1)}{\phi_1} \quad (3a)$$

$$k_i = \frac{\omega^2 \cdot m_i \cdot \phi_i + k_{i+1} (\phi_{i+1} - \phi_i)}{\phi_i - \phi_{i-1}}, \{i=2 \sim 9\} \quad (3b)$$

$$k_{10} = \frac{\omega^2 \cdot m_{10} \cdot \phi_{10}}{\phi_{10} - \phi_9} \quad (3c)$$

ここで、1次固有モード ϕ は以下に示す。本論文では1次モードを直線モードとして選択する。

$$\phi_i = i, \{i=1 \sim 10\} \quad (4)$$

上部構造の減衰は内部粘性減衰とし、1次減衰率を上部構造の1次固有周期に対して $\zeta_u = 2\%$ とする際の剛性比例型とする。

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。免震層にアクティブ制御装置を設置することを前提とし、減衰率を $\zeta_0 = 5\%$ とする。また、上部構造を剛体と仮定した時の周期 (以下、免震周期) T_0 のアクティブ制御への影響を考察するために、 T_0 を6~10 sまで1秒ずつ変化させた5つのモデルを用いる。免震層の質量 m_0 は式(5)によって与えられ、剛性係数 k_0 と減衰係数 c_0 は線形のバネとダッシュポットによってモデル化され、それぞれ式(6)と式(7)によって与えられる。

$$m_0 = B \times D \times \rho_0 \quad (5)$$

$$k_0 = \frac{4\pi^2 \cdot \sum_{i=0}^{10} m_i}{T_0^2} \quad (6)$$

$$c_0 = 2\zeta_0 \sqrt{\sum_{i=0}^{10} m_i \cdot k_0} \quad (7)$$

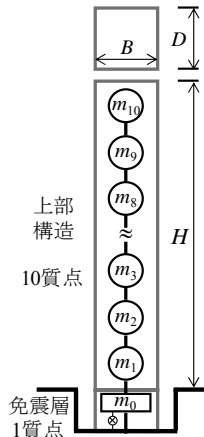


Fig. 1 Analysis model

Table 2 Elements of analysis model

幅	B [m]	40
奥行き	D [m]	40
高さ	H [m]	200
	h_i [m]	20
密度	ρ_u [kg/m ³]	175
1次周期	T_u [s]	4.0
1次減衰率	ζ_u [%]	2.0
密度	ρ_0 [kg/m ²]	2551
免震周期	T_0 [s]	6 ~ 10 s
免震層減衰率	ζ_0 [%]	5.0

3. コントローラの設計

本論文では2章で述べたように、免震層にアクティブ制御装置を設置する。式(8)に建築物の運動方程式を示す。

$$M \ddot{X}(t) + C \dot{X}(t) + K X(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ F_1(t) \\ \vdots \\ F_{10}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u(t) \\ \mathbf{0}_{10 \times 1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(9)は建築物の運動方程式を状態方程式の形で表したものである。

$$\dot{Z}(t) = AZ(t) + B_u u(t) + B_F \begin{bmatrix} 0 \\ F_1(t) \\ \vdots \\ F_{10}(t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

ここで、 Z, A, B_u, B_F は以下に示される。

$$Z(t) = [X(t)^T \quad \dot{X}(t)^T]^T \quad (10a)$$

$$A = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{10 \times 10} & I_{10} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (10b)$$

$$B_u = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{10 \times 1} \\ (M^{-1}E_u)^T \end{bmatrix}^T, E_u = [1 \quad \mathbf{0}_{1 \times 10}]^T \quad (10c,d)$$

$$B_F = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{10 \times 1} \\ (M^{-1}E_F)^T \end{bmatrix}^T, E_F = I_{11} \quad (10e,f)$$

本論文では、式(10a)に示すように、全層の変位と速度を直接観測可能であると仮定した。全層が直接観測不可能な場合は、オブザーバによって推定することができる¹¹⁾。コントローラの設計において、まず、以下の二次評価関数

$$J = \int_0^{\infty} (Z^T(t)QZ(t) + u^T(t)Ru(t))dt \quad (11)$$

ここで、 $R : u$ に対応する重み関数であり、本論文では 0.1 とした。
 $Q : Z$ に対応する重み関数であり、式(12)で表される。

$$Q = 10^{\alpha} \times \begin{bmatrix} K \\ M \end{bmatrix} \quad (12)$$

評価関数 (11) を最小になるようなコントローラは

$$u(t) = K_p Z(t) = -R^{-1} B_u^T P Z(t) \quad (13)$$

により与えられる。上の式において、 P は以下のリカッチ代数方程式の解である (例えば 4)。

$$A^T P + PA + Q - P B_u R^{-1} B_u^T P = 0 \quad (14)$$

Fig. 2 に状態フィードバックによる制御系のブロック線図を示す。

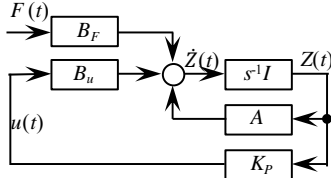


Fig. 2 Block diagram of control system

4. 解析用風外力

本論文では、モデルに作用する風力は風洞実験結果¹²⁾を用いる。実験気流は、建築物荷重指針・同解説¹³⁾の地表面粗度区分Ⅲの気流を目標に作成されたものである。アクティブ制御が風力の平均成分に与える影響を把握するために、本論文における検討用風力は平均成分と変動成分両方を含む風方向風力および平均成分を含まない変動成分のみの風方向風力とする。なお、風向角を 0° とする。風速は、再現期間 100 年と 500 年それぞれに相当の頂部風速 54.9 m/s と 63.8 m/s を用いる。各風力波形は、解析開始時の過渡応答の影響を避けるために、先頭 50 s にエンベロープを設けた後、50 s ~ 650 s の 600 s 間で各応答を検討する。モデルの応答検討は 30 ケースのアンサンブル平均で評価する。Fig. 3 に例としての平均成分を含む風方向風力と平均成分を含まない風方向風力の上部構造第 7 層風力の波形を示す。Fig. 4 に上部構造 7 層に作用する風力変動成分のパワースペクトル密度 (Power spectral density 以下、PSD) S_{F7} を示す。

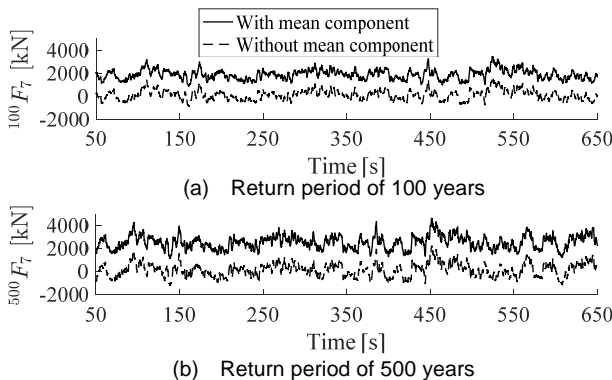


Fig. 3 Example of along wind force wave

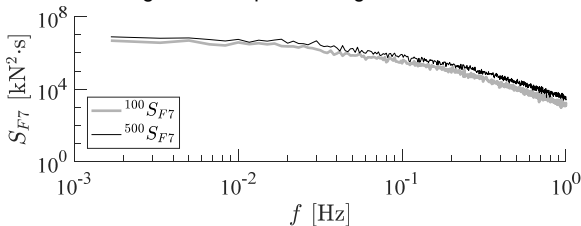


Fig. 4 PSD for superstructure 7th story along wind force

平均成分を含む風方向風力 ${}_m F_i$ と平均成分を含まない風方向風力 ${}_0 F_i$ の関係は、式(15)で示され、 \bar{F}_i を平均風力と呼ぶ。

$$\bar{F}_i(t) = {}_m F_i(t) - {}_0 F_i(t) = \bar{F}_i \text{ (const.)}, \quad t \in (50, 650] \quad (15)$$

Fig. 5 に例としての平均成分を含む風方向風力の上部構造第 7 層風力の波形とその平均成分を示す。Fig. 6 に風方向風力の高さ分布の 30 波のアンサンブル平均を示す。

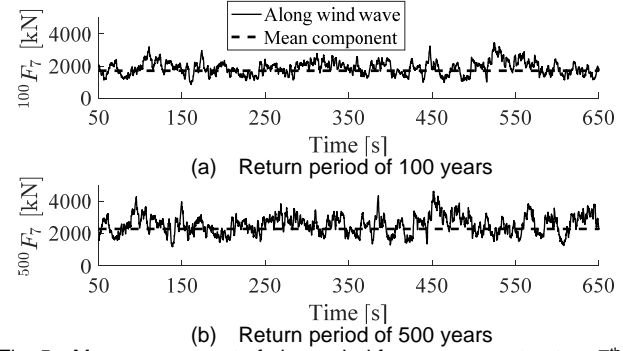


Fig. 5 Mean component of along wind force at superstructure 7th floor

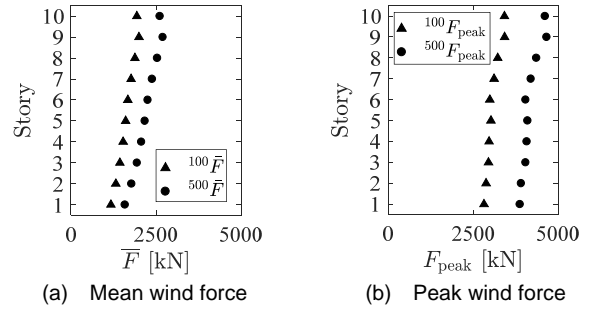


Fig. 6 Wind force of every story

5. 風応答時刻歴解析

Fig. 7 に $T_0 = 8$ s の免震周期に対して、後述の性能限界となる $\alpha_{im} = 12.5$ を用いて設計されたコントローラが設置されたモデルに、再現期間 500 年の平均成分ありとなしの両者を作用させた際の風方向風力で制御 u と建築物モデルの免震層応答変位 \tilde{x}_0 、応答速度 $\dot{\tilde{x}}_0$ 、および応答加速度 $\ddot{\tilde{x}}_0$ の時刻歴波形を示す。Fig. 7(a)より、平均成分を含む風方向風力と含まない風力に対する制御 u は一定値の差があることがわかる。この一定値を平均制御力 \bar{u} と定義し、式(16a)より算出する。同様に、Fig. 7(b)より、応答変位においても、平均成分を含む風方向風力を入力した際の履歴波形は、平均成分を含まない風方向風力を入力した際の応答変位に対して一定値大きいことがわかる。この一定値を平均応答変位 \bar{x}_0 と定義し、式(16b)より算出する。また、Fig. 7(c)と Fig. 7(d)より、平均成分を含む風方向風力を入力する時の応答速度と応答加速度の履歴波形は平均成分を含まない風方向風力を入力する時と一致し、平均成分を含まないことがわかる。これらの関係を式(17)に示す。

$$\bar{u}(t) = {}_m u(t) - u(t) = \bar{u} \text{ (const.)}, \quad t \in (50, 650] \quad (16a)$$

$$\bar{X}(t) = {}_m \tilde{X}(t) - \tilde{X}(t) = \bar{X} \text{ (const.)}, \quad t \in (50, 650] \quad (16b)$$

$${}_m \dot{\tilde{X}}(t) = \dot{\tilde{X}}(t), \quad {}_m \ddot{\tilde{X}}(t) = \ddot{\tilde{X}}(t) \quad (17a,b)$$

Fig. 8 と Fig. 9 に、再現期間 100 年と 500 年の風方向風力で制御系の性能限界における各モデル応答の 30 ケースのアンサンブル平均をそれぞれ示す。Fig. 8 と Fig. 9 より、再現期間 100 年と 500 年の風方向風力でアクティブ制御を行い、以下のことがわかった。

- Fig. 8(a)~(e)の応答変位 x の図より、アクティブ制御は各モデルの最大応答変位と平均応答変位を抑えることができる。また、免震周期 T_0 を長くすると、制御なしと制御ありともに、最大応答変位と平均応答変位が大きくなる傾向がある。
- Fig. 8(a)~(e)の応答速度 \dot{x} の図より、アクティブ制御は各モデルの最大応答速度を抑えることができる。また、免震周期を長くすると、制御なしと制御ありの最大応答速度においても、大きくなる傾向がある。
- Fig. 8(a)~(e)の応答加速度 \ddot{x} の図より、アクティブ制御は各モデルの最大応答加速度を抑えることができる。制御なしの応答加速度は、免震周期 T_0 が長くなっても、各モデルの最大応答加速度はほとんど一致する。制御ありは制御なしに対して \ddot{x} は低減するが、 T_0 を変更しても \ddot{x} はほぼ変化しない。
- Fig. 8(a)~(e)の応答層間変形角 θ の図より、アクティブ制御は上部構造の最大応答層間変形角を抑えることができるが、平均応答層間変形角に影響せず、制御あり時モデルの平均応答変形角が制御無し時モデルの平均応答変形角と一致する。また、層間変形角は、免震周期 T_0 による影響がほとんどなく、 T_0 を変化させても、各モデルの制御ありと制御なし両方の最大応答層間変形角と平均応答層間変形角は変化しない。

Fig. 8 と Fig. 9 の比較により、再現期間 500 年の風方向風力での各モデルの応答変位、応答速度、応答加速度、応答層間変位は再現期間 100 年の時より、大きくなる傾向がある。Table 3 にアクティブ制御による各モデルの応答の全層平均の低減率を示す。表中の RR(Reduce rate)は低減率の意味で、低減率の計算は式(18)による。

$$\text{低減率 (RR)} = \frac{\text{制御なし応答} - \text{制御あり応答}}{\text{制御なし応答}} \quad (18)$$

Table 3 Reduce rates of model responses unit: [%]

T_0 \ RR	x_{peak}	\bar{x}	x'	\dot{x}_{peak}	\ddot{x}_{peak}	θ_{peak}	$\bar{\theta}$	θ'
6 s	36.8	16.5	54.9	74.3	62.8	17.1	-0.1	32.1
	38.7	16.9	57.8	74.4	59.1	18.1	0.1	33.7
7 s	41.6	24.3	57.9	75.1	61.3	15.4	-0.1	29.6
	44.2	25.0	61.4	75.2	61.4	17.9	0.0	33.5
8 s	48.1	31.6	63.5	77.3	62.1	16.8	0.1	31.7
	51.5	32.3	67.6	78.9	62.6	20.4	0.2	37.3
9 s	54.1	37.5	68.6	79.6	64.1	17.6	0.0	33.0
	57.4	37.5	72.9	81.0	64.5	22.5	0.1	39.9
10 s	59.3	42.6	73.3	81.3	65.4	20.5	0.1	37.5
	59.9	42.0	74.8	82.1	65.0	20.4	-0.2	37.8

※ Upper column: Return period of 100 years
Lower column: Return period of 500 years

Table 3 より得られた知見を以下にまとめる。

- 再現期間 100 年の風方向風力での各モデルの各応答の低減率は再現期間 500 年の時の低減率とおおむね一致する。この原因はモデルを弾性と仮定したと考えられる。
- 免震周期を長くすると、最大応答変位、平均応答変位の低減率は大きくなる傾向がある。最大応答速度、最大応答加速度、最大応答層間変形角の低減率においても免震周期を長くすると、大きくなる傾向があるが、免震周期による影響が少ない。この原因は、免震周期による応答の変動成分(例えば: x' , \dot{x} , \ddot{x} , θ')の低減率への影響が少ないと考える。
- 平均応答層間変形角は他の応答に比べると、ほぼ低減していないとみなせる。この原因については附録 A を参照すること。

6. コントローラの平均制御力の計算方法

6.1 理論値の導出

式(16)と式(17)を式(13)に代入すると、式(19)になる。

$$\begin{aligned} m u(t) &= K_p \cdot m \tilde{Z}(t) = K_p \begin{bmatrix} m \tilde{X}(t) \\ m \tilde{X}(t) \end{bmatrix} = K_p \begin{bmatrix} 0 \tilde{X}(t) + \tilde{X} \\ 0 \tilde{X}(t) \end{bmatrix} \\ &= K_p \begin{bmatrix} 0 \tilde{X}(t) \\ 0 \tilde{X}(t) \end{bmatrix} + K_p \begin{bmatrix} \tilde{X} \\ 0_{11 \times 1} \end{bmatrix} = {}_0 u(t) + K_p \begin{bmatrix} \tilde{X} \\ 0_{11 \times 1} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

したがって、風方向風力の平均成分に対する平均制御力の値は式(20)により与えられる。

$$\bar{u} = {}_m u(t) - {}_0 u(t) = K_p \begin{bmatrix} \bar{\tilde{X}} \\ 0_{11 \times 1} \end{bmatrix} \quad (20)$$

制御ありの平均応答変位ベクトル $\bar{\tilde{X}}$ は次式により与えられる。

$$\bar{\tilde{X}} = K^{-1} \begin{bmatrix} \bar{F}_1 \\ \vdots \\ \bar{F}_{10} \end{bmatrix} \quad (21)$$

式(21)を式(20)に代入すると、 \bar{u} は次式になる。

$$\begin{aligned} \bar{u} &= K_p \begin{bmatrix} \bar{u} \\ \bar{F}_1 \\ \vdots \\ \bar{F}_{10} \\ 0_{11 \times 1} \end{bmatrix} = K_p \begin{bmatrix} K_{1,1}^{-1} & K_{1,2}^{-1} & \cdots & K_{1,11}^{-1} \\ K_{2,1}^{-1} & K_{2,2}^{-1} & \cdots & K_{2,11}^{-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{11,1}^{-1} & K_{11,2}^{-1} & \cdots & K_{11,11}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{u} \\ \bar{F}_1 \\ \vdots \\ \bar{F}_{10} \end{bmatrix} \\ &= [K_{p,1} \ K_{p,2} \ \cdots \ K_{p,22}] \begin{bmatrix} K_{1,1}^{-1} \cdot \bar{u} + K_{1,2}^{-1} \cdot \bar{F}_1 + \cdots + K_{1,11}^{-1} \cdot \bar{F}_{10} \\ K_{2,1}^{-1} \cdot \bar{u} + K_{2,2}^{-1} \cdot \bar{F}_1 + \cdots + K_{2,11}^{-1} \cdot \bar{F}_{10} \\ \vdots \\ K_{11,1}^{-1} \cdot \bar{u} + K_{11,2}^{-1} \cdot \bar{F}_1 + \cdots + K_{11,11}^{-1} \cdot \bar{F}_{10} \\ 0_{11 \times 1} \end{bmatrix} \\ &= [K_{p,1} \cdot (K_{1,1}^{-1} \cdot \bar{u} + K_{1,2}^{-1} \cdot \bar{F}_1 + \cdots + K_{1,11}^{-1} \cdot \bar{F}_{10}) \\ &\quad + K_{p,2} \cdot (K_{2,1}^{-1} \cdot \bar{u} + K_{2,2}^{-1} \cdot \bar{F}_1 + \cdots + K_{2,11}^{-1} \cdot \bar{F}_{10}) \\ &\quad + \cdots \\ &\quad + K_{p,11} \cdot (K_{11,1}^{-1} \cdot \bar{u} + K_{11,2}^{-1} \cdot \bar{F}_1 + \cdots + K_{11,11}^{-1} \cdot \bar{F}_{10}) \\ &\quad + K_{p,12} \cdot 0 + \cdots + K_{p,22} \cdot 0] \end{aligned} \quad (22)$$

ここで、 $K_{i,j}^{-1}$ は K の逆行列の第 i 行第 j 列要素を表し、 $K_{p,i}$ は K_p の第 i 列の要素を表す。

式(22)を整理すると、次式になる。

$$\bar{u} = \bar{u} \cdot \sum_{i=1}^{11} (K_{p,i} \cdot K_{i,1}^{-1}) + \left(\bar{F}_1 \cdot \sum_{i=1}^{11} (K_{p,i} \cdot K_{i,2}^{-1}) + \cdots + \bar{F}_{10} \cdot \sum_{i=1}^{11} (K_{p,i} \cdot K_{i,11}^{-1}) \right) \quad (23)$$

ここで、上式の右辺第 2 項(\bar{u} を含まない部分)を W とすると、式(23)は次式のように表される。

$$\bar{u} = \bar{u} \cdot \sum_{i=1}^{11} (K_{p,i} \cdot K_{i,1}^{-1}) + W \quad (24)$$

式(24)を \bar{u} について解くことで、最終的に、平均制御力 \bar{u} は次式で表される。

$$\bar{u} = -\frac{W}{\sum_{i=1}^{11} (K_{p,i} \cdot K_{i,1}^{-1}) - 1} \quad (25)$$

式(25)より、風方向風力の平均成分 \bar{F}_i とコントローラゲイン K_p と建築物モデルの剛性マトリックス K を用いて、コントローラの平均制御力 \bar{u} を時刻歴応答解析せずに、計算することができる。

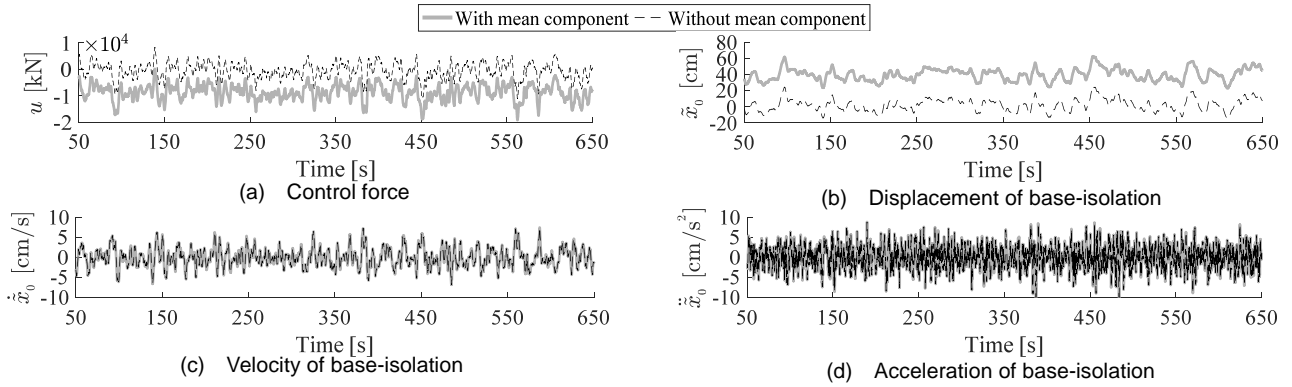


Fig. 7 Examples of control force and responses for Along wind force (Return period of 500 years, $T_0 = 8$ s, $\alpha = 12.5$)

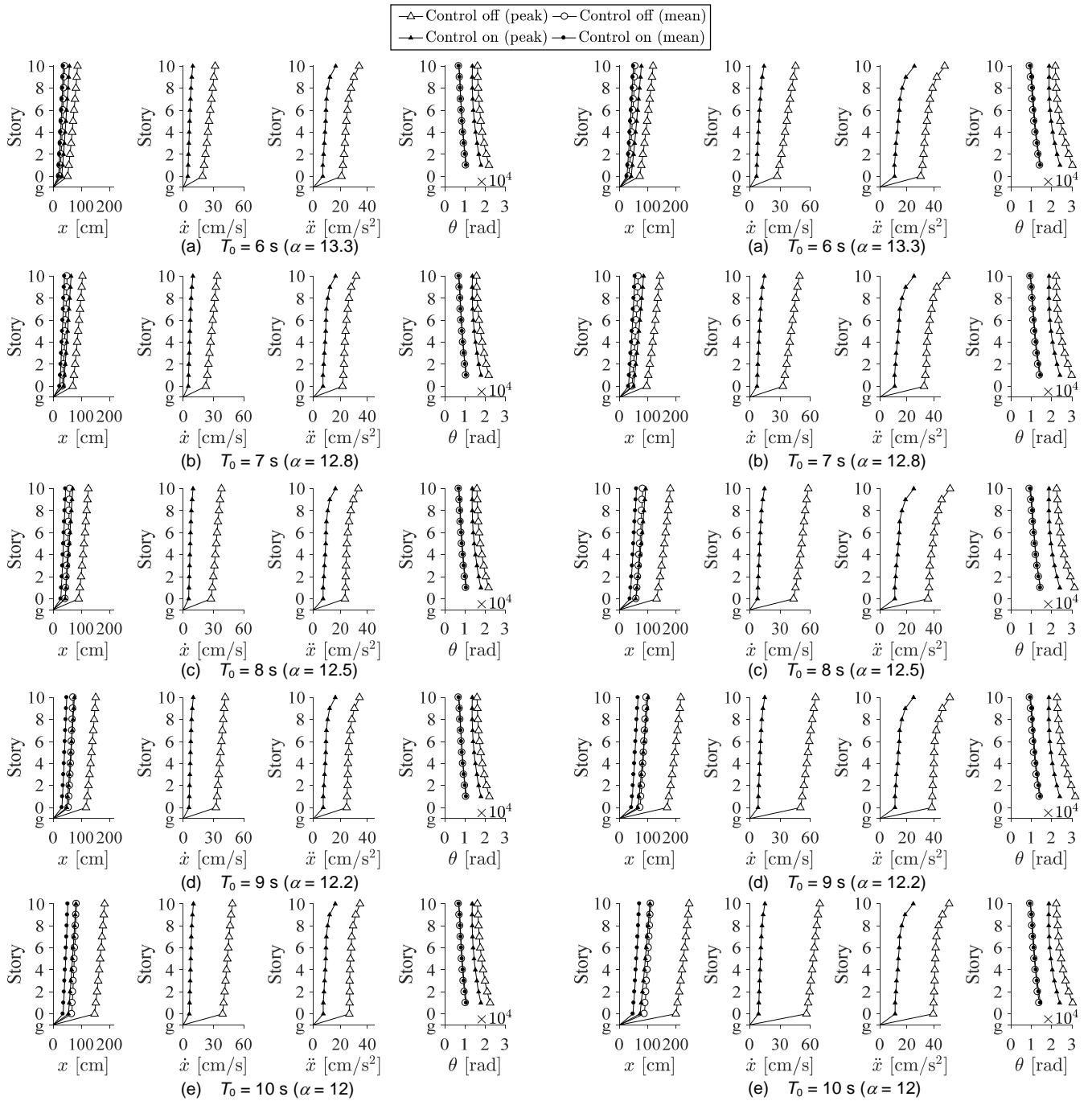


Fig. 8 Responses of along wind force (Return period of 100 years)

Fig. 9 Responses of along wind force (Return period of 500 years)

6.2 数値例

Fig. 10 に風方向風力において、式(25)より求めたコントローラの平均制御力の理論値 (図中線) と解析値 (図中プロット) の比較を示す。左縦軸は平均制御力 \bar{u} を表し、右縦軸は免震層におけるコントローラの平均制御力をせん断力係数 \bar{q} (= 平均制御力 / 建物全重量) に換算した値を表す。なお、本論文において風力の平均成分 \bar{F}_i は風洞実験結果を用いたが、荷重指針から \bar{F}_i を算出することも可能であり、風洞実験とよく一致することを確認している (附録B 参照)。Fig. 10 より、以下のことがわかる。

- ・平均制御力の解析値は理論値 (式(25)) と一致する。
- ・免震周期 T_0 を長くすると性能限界におけるコントローラの平均制御力は大きくなる傾向がある。
- ・ α を増加させてもある値から \bar{u} は増加せず、一定値となる。本論文では \bar{u} が一定値となる最小の α を制御系の性能限界 α_{lim} と呼ぶ (6.3 参照)。

制御系が性能限界 α_{lim} に到達した時の、平均制御力 \bar{u}_{lim} を Fig. 11(a) に示す。式(A2a)を用いて、計算された免震層の平均応答変位 $\bar{x}_{0,lim}$ を Fig. 11(b) に示す。Fig. 11 より、モデルの免震周期を大きくすると、コントローラが出せる平均制御力が大きくなるものの、免震層の平均応答変位も大きくなり、制御系の平均変位に対しての制御性能は悪くなることがわかる。

以上より、免震周期 T_0 における、制御系の性能限界によって、目標とする免震層平均応答変位に抑えることが不可能な場合が存在することが明らかになった。免震建物にアクティブ制御を用いる場合は免震周期の設定が重要である。

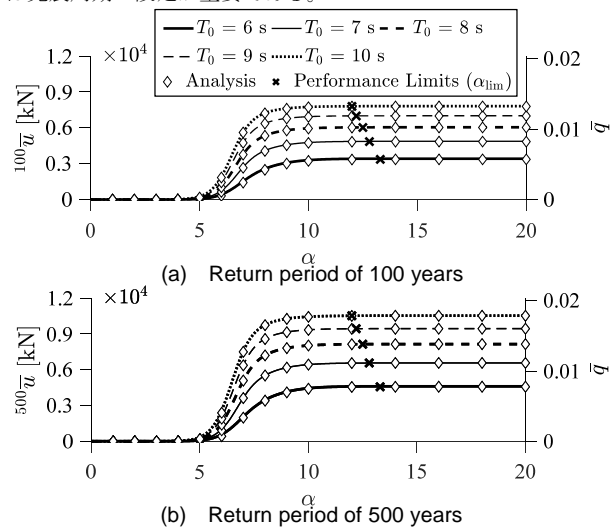


Fig. 10 Comparison of mean control force between theory and analysis

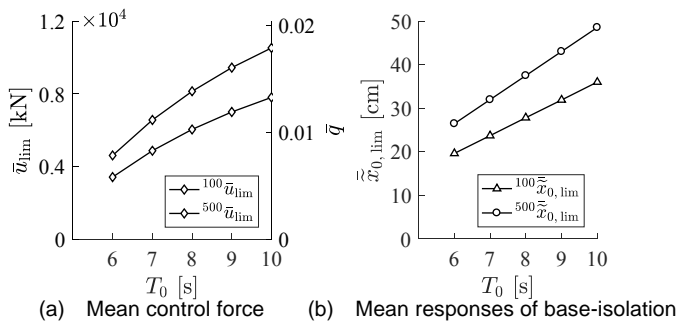


Fig. 11 Performance limit of controller

6.3 制御系の性能限界

式(26)の条件を満足する重み関数 Q のべき指数 α の最小値を制御系の性能限界と定義する。 α を性能限界以上の値にしても、より良い制御性能を得られることができないのみならず、安定領域の中に式(14)のリカッチ方程式の解が見つからない可能性がある⁴⁾。Table. 4 に各制御系が性能限界に到達する時の α を示す。Table. 4 より、性能限界に到達する時の α の値は風力の再現期間と関係なく、免震周期 T_0 を長くすると、小さくなる傾向にあることがわかる。

$$\frac{u(n) - u(n-1)}{\alpha(n) - \alpha(n-1)} < 0.001 \times u(n-1) \quad (26)$$

Table. 4 Performance limit of control system

T_0 [s]	6	7	8	9	10
α_{lim}^{100}	13.3	12.8	12.5	12.2	12.0
α_{lim}^{500}	13.3	12.8	12.5	12.2	12.0

7. 必要平均制御力

7.1 必要平均制御力の導出

アクティブ制御によって、免震層の平均変位を目標値 $\bar{x}_{0,tar}$ に抑えるために、必要となる平均制御力は、式(27)より計算できる。

$$\bar{u} = (\bar{x}_0 - \bar{x}_{0,tar}) \cdot k_0 \quad (27)$$

式(A1a)を式(27)に代入すると、次式になる。

$$\bar{u} = \sum_{i=1}^{10} \bar{F}_i - \bar{x}_{0,tar} \cdot k_0 \quad (28)$$

7.2 数値例

Fig. 12 に免震層の平均応答変位を目標値 $\bar{x}_{0,tar}$ に抑えるために、式(28)より与えられる必要平均制御力の理論値 (図中線) と解析値 (図中プロット) の比較を示す。左縦軸は必要平均制御力を表し、右縦軸は平均せん断力係数 \bar{q} を表す。Fig. 12 より、免震層の平均応答変位を目標値に抑えるために必要となる平均制御力の解析値が計算値と一致することがわかる。また、免震周期を長くすると免震層の平均応答変位は大きくなるため、目標値まで抑えるために必要となる平均制御力も大きくなることもわかる。

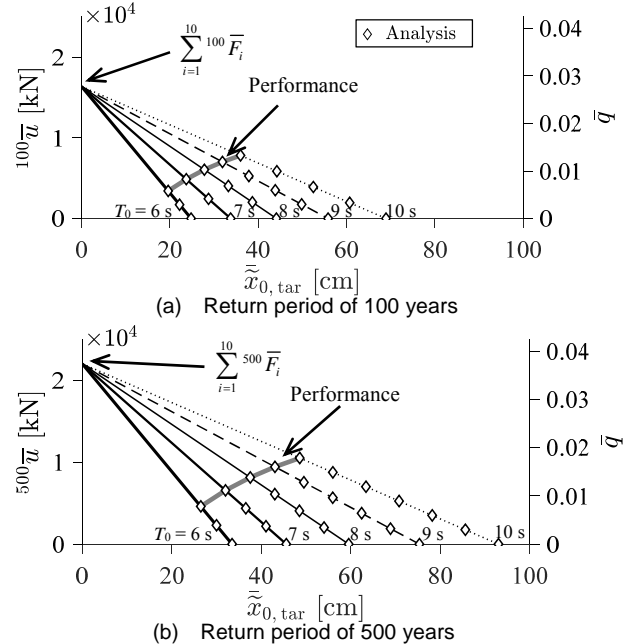


Fig. 12 Comparison of necessary mean control force between theory value and analysis value

8. 風方向風力に対するコントローラの設計方法

8.1 設計方法

Step 0

設計用風力の再現期間と上部構造の諸元（質量マトリックス M 、減衰マトリックス C 、剛性マトリックス K ）、免震周期 T_0 の検討範囲を決める。制御力の制限値、制御した後の免震層平均応答変位の制限値と頂部平均応答変位の制限値を決める。

Step 1

検討する免震周期 T_0 で、重み関数 Q のべき指数 α を変化させ、コントローラゲイン K_p を式(13)より算出する。式(25)を用いて、Fig 10のように α と \bar{u} の関係を図示する。その図より平均制御力の性能限界 \bar{u}_{lim} を決定する。

Step 2

式(27)と Step 1 で算出された各制御系の性能限界を用いて、免震層の平均相対変位の制限条件を満たす免震周期 T_0 を選択する。

Step 3

Step 2 で選択した T_0 を用い、式(21)により、頂部の平均相対変位を算出する。Step 2 で選択した T_0 の中から、頂部平均応答変位の制限値を満たす T_0 を再び選択する。

Step 4

上記で決定したコントローラを用いて、時刻歴解析を行い、制御力の制限値条件を満たすかを確認する。すべての条件を満たす免震周期 T_0 が存在しない場合、システム状態に対する重み関数 Q や評価対象の変更を行い、Step 2 に戻る。重み関数 Q を変化させても、すべての条件を満たす免震周期 T_0 が存在しない場合は Step 1 の条件の再検討等を行う。

8.2 設計例

Step 0

上部構造の諸元と免震周期の検討範囲：表 1 に示す

設計用風力の再現期間：500 年

制御力の制限値：16,000 kN

免震層平均応答変位の制限値：40 cm

頂部平均応答変位の制限値：60 cm

Step 1 & Step 2

Fig. 13 に必要制御力と制御系の性能限界と免震層平均応答変位の制限値を示す。Fig. 13 より、免震周期 6 s, 7 s, 8 s の制御系が設計の目標値を満たすことがわかる。

Step 3

式(21)を用いて算出した免震周期 6 s, 7 s, 8 s の建物の頂部平均応答変位はそれぞれ 49.0 cm, 54.4 cm, 59.7 cm であり、いずれの免震周期においても頂部平均応答変位の制限値条件(60 cm)を満たす。

Step 4

時刻歴解析を行い、各制御系の性能限界における平均制御力と最大制御力と制御力の制限値を確認する(Fig. 14)。Fig. 14 より、免震周期 6 s と 7 s の制御系が制御力の制限を満たすことがわかる。なお、風力データがない場合は、適切なガストファクターを選択することで、最大制御力を確認できる（附録 D 参照）。

Fig. 15 に時刻歴解析結果を示す。時刻歴解析結果より、 $T_0 = 7$ s, $\alpha_{lim} = 12.8$ (性能限界) と $T_0 = 6$ s, $\alpha_{lim} = 13.3$ (性能限界) の制御系の解析結果が計算値と一致し、設計条件を満たすことを確認した。

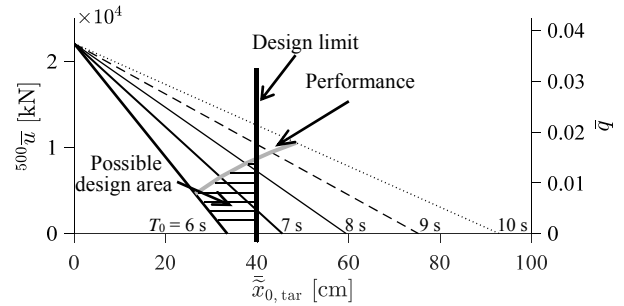


Fig. 13 Necessary control force

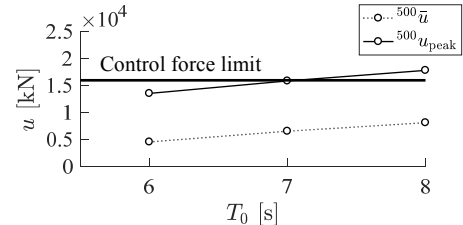


Fig. 14 Peak control force

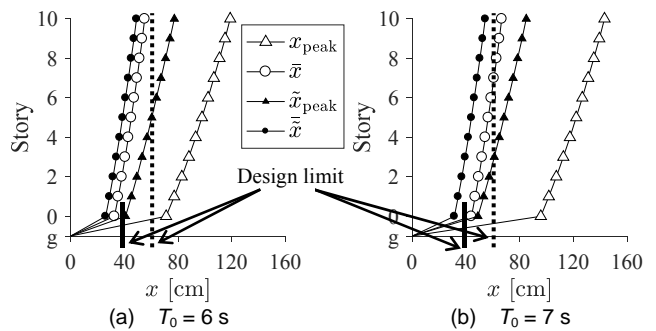


Fig. 15 Displacement responses (Return period of 500 years)

9. まとめ

本論文では数値例として、異なる免震周期で構築された制御系の制御性能について検討した。また、風方向風力の平均成分に対するコントローラの平均制御力の計算方法を示し、さらに、風方向風力の平均成分に対するコントローラの設計方法を提案した。本論文で得られた知見を述べる。

- (1) 平均成分を含む風方向風力の場合、アクティブ制御は平均層間変形角に影響を与えない。
- (2) LQR を用いた制御系には性能限界があり、重み関数のべき指数 α を必要以上に大きくしても、コントローラの出せる制御力の値は上限がある。
- (3) モデルの免震周期を長くすると、コントローラ平均制御力が大きくなるが、免震層の平均応答変位が大きくなる。
- (4) 風方向風力の場合、アクティブ制御によってモデルの平均応答への制御性能の検討は解析する必要はなく、静的な手法で行うことができる。
- (5) 免震周期 T_0 における、制御系の性能限界によって、目標とする免震層平均応答変位に抑えることが不可能な場合が存在する。免震建物にアクティブ制御を用いる場合は免震周期の設定が重要である。

今後の課題は風直交方向およびねじれでの性能評価と制御系の性能限界値を制御理論的に明らかにすることである。

参考文献

- 1) 田中佑治, 福和伸夫, 飛田潤, 護雅史: 国内免震建物のデータベース構築と現状分析, 日本建築学会技術報告集, Vol. 17, No. 35, p. 79-84, 2011. 2
- 2) 吉岡宏和, スペンサー Jr., B.F.: M R ダンパーを用いたスマート免震構造の振動台実験, 理論応用力学講演会公演論文集, pp. 65-66, 2002. 5
- 3) Kim Hyun-Su, Roschke N. Paul: GA-fuzzy control of smart base isolated benchmark building using supervisory control technique. Advance in Engineering Software, Vol.38, pp. 453-465, 2007. 7
- 4) 森泰親: わかりやすい現代制御理論, 2016. 2
- 5) 宮本皓, 佐藤大樹, 林岑蔚, 余錦華: 超高層建物を対象としたアクティブ制御を用いた免震建物の応答制御, 日本地震工学会第 12 回年次大会梗概集, p3-25, 2016. 9
- 6) 宮本皓, 佐藤大樹, 林岑蔚, 余錦華: アクティブ制御とパッシブ免震の併用による超高層免震の実現に向けた基礎的研究(その 2: アクティブ制御設置時の免震周期設定に関する検討), 日本建築学会関東支部研究報告集, pp. 437-440, 2017. 3
- 7) 陳引力, 宮本皓, 佐藤大樹, 余錦華: アクティブ制御とパッシブ免震の併用による超高層免震のためのコントローラ設計方法(その 1: 免震周期による必要制御入力エネルギー・パワーの分析), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 695-696, 2017. 8
- 8) B. Liarig, X. Shishu, T. Jiaxiang: Wind Effects on Habitability of Base-Isolated Buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 90, pp. 1951-1958, 2002. 12
- 9) 日本鋼構造協会: 構造物の耐風工学, 1997. 11
- 10) 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
- 11) Kou Miyamoto, Jinhua She, Junya Imani, Xin Xin, Daiki Sato: Equivalent-input-disturbance approach to active structural control for seismically excited buildings, Engineering Structures, pp. 392 – 399, 2016. 10
- 12) 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
- 13) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 2015. 2

附録 A アクティブ制御が上部構造の平均層間変形角に影響を与えない原因
 本制御系が上部構造の層間変形角に影響を与えない原因として、アクティブ制御装置を免震層のみに設置しているためと考えられる。平均成分を含む風方向風力の場合、制御なしのモデルの免震層平均変位 \bar{x}_0 と上部構造の平均層間変位 $\Delta\bar{x}$ は次式によってそれぞれ与えられる。

$$\bar{x}_0 = \frac{\sum_{i=1}^{10} \bar{F}_i}{k_0}, \quad \Delta\bar{x}_i = \frac{\sum_{j=i}^{10} \bar{F}_j}{k_i} \quad (A1a,b)$$

平均成分を含む風方向風力の場合、制御ありの免震層平均変位 \bar{x}_0 と上部構造の平均層間変位 $\Delta\bar{x}$ は以下の式によってそれぞれ与えられる。

$$\bar{x}_0 = \frac{\sum_{i=1}^{10} \bar{F}_i + \bar{u}}{k_0} = \bar{x}_0 + \frac{\bar{u}}{k_0}, \quad \Delta\bar{x}_i = \frac{\sum_{j=i}^{10} \bar{F}_j}{k_i} = \Delta\bar{x}_i \quad (A2a,b)$$

本論文では制御装置を免震層のみに設置しているため、平均成分を含む風方向風力の場合、アクティブ制御は免震層平均応答変位に影響を与えるが、上部構造の平均層間変位(平均層間変形角)に影響を与えないことが式(A2)よりわかる。以上のことを図で示すと、Fig. A1(a)-(c)になる。

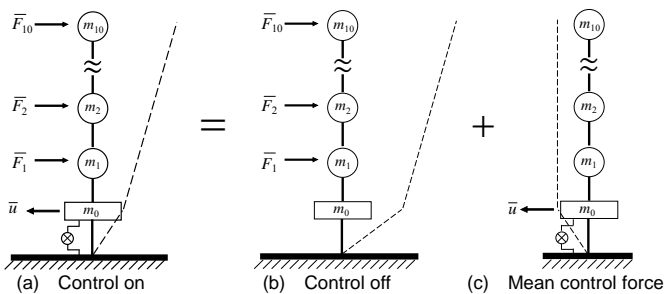


Fig. A1 Mean displacement responses

附録 B 荷重指針による平均風方向風力

Fig. B1(a),(b)に荷重指針(Recommendations for Loads on Buildings 以下, RLB)より算出された再現期間 100 年および 500 年平均層風力と風洞実験(Wind tunnel experiment 以下, WTE)から得られた平均層風力の比較をそれぞれ示す。Fig. B1より、荷重指針より算出された平均層風力は風洞実験から得られた平均層風力とおおむね一致することがわかる。本論文で風方向風力の平均成分の算出は風洞実験から得られたデータを用いた。しかし、風力のデータがない場合、建築物荷重指針・同解説¹¹⁾を参考し、平均風力を計算することが可能である。

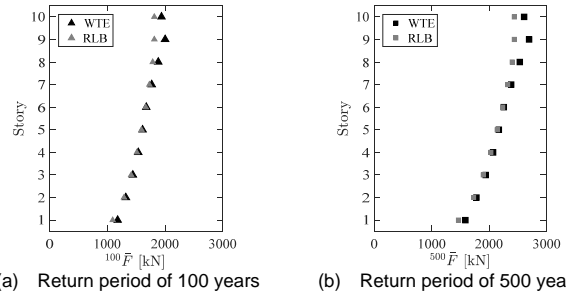


Fig. B1 Comparison of mean wind force between RTB and WTE

附録 C ガストファクター

Fig. C1 に解析結果より算出された各制御系の性能限界における最大制御力の平均制御力に対するガストファクターを示す。最大制御力の平均制御力に対するガストファクター G は式(D1)より求められる。

$$G = \frac{E|u_{peak,lim}|}{E|\bar{u}_{lim}|} \quad (C1)$$

Fig. C1 より、免震周期 T_0 を長くすると、ガストファクター G は小さくなることがわかる。風力時刻歴データがなく、時刻歴解析を行うことができない場合、Fig. C1 を参考し、平均制御力に対して 3 倍以上の余裕度で最大制御力を設計することが望ましい。ただし、この結果は $B/D=1.0$ で、風向角 $=0^\circ$ の場合のものであり、他の条件では、別途検討する必要がある。

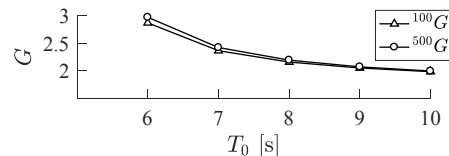


Fig. C1 Gust factors of mean control force to peak control force