

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	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
Title(English)	
著者(和文)	宮本皓, 佐藤大樹, 林岑蔚, 余錦華
Authors(English)	Kou Miyamoto, Daiki Sato, Tsenwei Lin, Jinhua She
出典(和文)	日本地震工学会第12回年次大会梗概集, , , P3-25
Citation(English)	Proceedings of the 12th Annual Meeting of Japan Association for Earthquake Engineering, , , P3-25
発行日 / Pub. date	2016, 9



## 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

宮本 皓<sup>1)</sup>、佐藤 大樹<sup>2)</sup>、林 岑蔚<sup>3)</sup>、余 錦華<sup>4)</sup>

- 1) 学生会員 東京工業大学環境・社会理工学院建築学系、博士後期課程 修士（工学）  
e-mail : miyamoto.k.ag@m.titech.ac.jp
- 2) 正会員 東京工業大学未来産業技術研究所、准教授、博士（工学）  
e-mail : sato.d.aa@m.titech.ac.jp
- 3) 非会員 国立中央大学工学部土木工学科(台湾)、学部生（東京工業大学交換留学生）  
e-mail : jonathanking9136@gmail.com
- 4) 非会員 東京工科大学工学部機械工学科、教授、博士（工学）  
e-mail : she@stf.teu.ac.jp

### 要 約

本報では免震とアクティブ制御の併用について検討を行う。免震構造は建物を長周期化することにより建物の損傷を抑える。一方、元から長周期の建物を免震化すると免震層の変位が大きくなり、クリアランスの確保が困難になるだけでなく、免震装置の許容せん断ひずみを超過し、装置そのものを損傷させる恐れがある。本研究は超高層免震建物にアクティブ制御を併用したモデルの応答解析を行うことにより、アクティブ制御を併用した免震建物の応答低減の効果検討を行った。

キーワード：アクティブ制御、免震、パッシブ制御、ハイブリッド制御、

### 1. はじめに

地震による建物の振動を抑える技術の一つとしてアクティブ制御が注目されている。1989年に世界初のフルスケールのアクティブ制御を導入した京橋センタービルが建設されたことを皮切りに、アクティブ制御は建築構造物に次々取り入れられた<sup>1)、2)</sup>。同時にアクティブ制御による研究が盛んに行われ、多くの研究成果が残された<sup>(例えば3)、4)、5)</sup>。近年では国外でも最新の制御技術であるロバスト制御<sup>(例えば6)、7)</sup>やファジィ制御<sup>(例えば8)</sup>などを取り入れた研究が行われ、アクティブ制御の技術は大きな進展を見せている。

一方で、免震構造が多くの建物で導入されている<sup>9)</sup>。免震効果を高めるには、上部構造に対して長い免震周期を設定する必要がある。しかし、特に高層ビルのような固有周期が長い建物に免震を用いると、免震層の変形が大きくなり、クリアランスを確保することが難しくなるだけでなく、免震装置の許容できる最大せん断ひずみを超過する恐れがある。この問題を解決するために、免震構造をはじめとするパッシブ制御とアクティブ制御を併用した制御方法であるハイブリッド制御を使用することが望まれるが、ハイブリッド制御に関する研究については筆者の調べた限り非常に限られている<sup>(例えば10)、11)</sup>。また、これらの研究では免震層の相対変位に対する検討や、免震のみによる制御とアクティブ制御を併用した場合との比較が十分に行われておらず、アクティブ制御を用いるメリットが明確に現れていない。

一方、アクティブ制御入力では巨大な力を用いて振動制御を行うのだが、アクティブ制御入力そのものにより建物を損傷してしまうことが危惧される。しかし、既往の研究<sup>3)~9)</sup>ではそれらに対する検討が示されていない。そこで、本研究は、アクティブ制御と免震を併用したハイブリッド制御の実現を目

的とし、本報は免震装置のみ取り付けられた建物モデルと、免震とアクティブ制御を併用したモデルを比較し、超高層建物の振動制御方法として免震とアクティブ制御を併用することの有効性を確認することを目的としている。

## 2. 解析に用いたモデルの緒元および入力時振動

### 2.1 解析に用いた建物・免震のモデル

今回用いた上部構造のモデルは文献12)、13)を参考に設計された10層のせん断型のモデルを用いる。建物モデルの1次モードの固有周期は $T_u = 1.0 \text{ s}$ 、 $3.0 \text{ s}$ 、 $5.0 \text{ s}$ の3つのモデルを用いる(図1)。用いたモデルの各層の床面積は $40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ とし、建物全体の高さは $H = T_u / 0.02$ により与えられる。建物の密度は $175 \text{ kg/m}^3$ で、全層で等しいとする。

上部構造の減衰は1次周期に対して $\xi_u = 0.02$ となる剛性比例型とした。剛性分布は最上層が最下層の1/2になるように台形分布をする。 $N$ 層のせん断型モデルの各層の剛性 $k_i$ は文献14)より以下で与えられる。

$$k_1 = \frac{{}_s\omega^2 \cdot m_1 \cdot {}_s\phi_1 + k_2({}_s\phi_2 - {}_s\phi_1)}{{}_s\phi_1} \quad (1a)$$

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

$$k_N = \frac{{}_s\omega^2 \cdot m_N \cdot {}_s\phi_N}{{}_s\phi_N - {}_s\phi_{N-1}} \quad (1c)$$

ここで ${}_s\omega$  :  $s$ 次の固有円振動数、 ${}_s\phi_i$  : 第 $i$ 層、 $s$ 次の固有モード、 $N$  : 上部モデルの質点数(=10)、 $m_i$  : 第 $i$ 番目の質量を表す。

上記の10質点の上部構造モデルの下に免震層を設置し、11質点のモデルとして免震モデルの解析を行う(図2)。免震層の密度は $2551 \text{ kg/m}^2$ と仮定し、建物の平面形状( $40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ )から免震層の質量 $m_b$ を計算する。免震周期に対する減衰率は $\xi_b = 0.05$ とした。本論文では天然系積層ゴムと粘性系ダンパーによる免震層を想定する。天然系積層ゴムは線形のバネを、粘性系ダンパーは線形のダッシュポッドでモデル化させた(図3、4)。免震層の剛性 $k_b$ と粘性係数 $c_b$ は上部構造を剛体と仮定した場合の周期 $T_b$ (以下免震周期)を用いて以下の式により算出した<sup>15)</sup>。

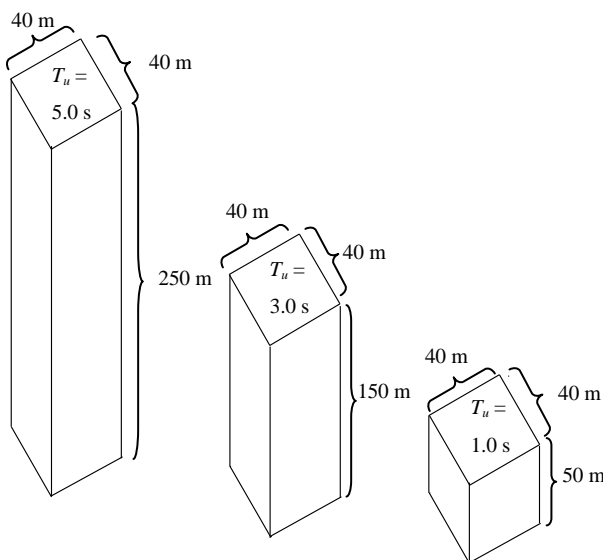


図1 解析に用いた3種類のモデル

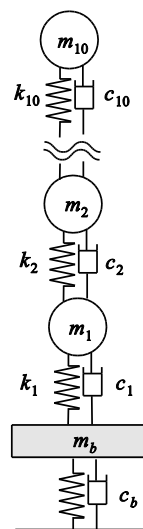


図2 免震を有する11自由度系のモデル

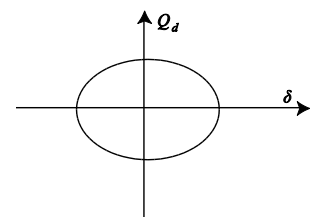


図3 線形ダッシュポッドによる粘性ダンパーのモデル

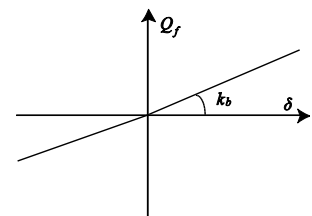


図4 線形バネによる積層ゴムのモデル

$$k_b = \frac{T_b^2}{4\pi^2(M_s + m_b)} \quad (2)$$

$$c_b = 2\xi_b \sqrt{(M_s + m_b)} \quad (3)$$

ここで、 $T_b$ ：免震周期、 $M_s$ ：上部構造の全質量、 $m_b$ ：免震層の質量をあらわす。

本報では、上部構造の固有周期が $T_u = 1.0$  sのモデルには免震周期 $T_f = 3.0$  s、 $4.0$  s、上部構造の固有周期が $T_u = 3.0$  sのモデルに対しては免震周期 $T_f = 4.0$  s、 $6.0$  s、さらに、上部構造の固有周期が $T_u = 5.0$  sのモデルに対しては免震周期 $T_f = 6.0$  s、 $8.0$  sと設定した。以下の表に用いた免震層の設定を示す。

表1 免震層の設定

上部構造の周期[s]	免震周期[s]	免震層の減衰率
5.0	8.0	0.05
	6.0	
3.0	6.0	
	4.0	
1.0	4.0	
	3.0	

## 2.2 地震波形の概要

本報で用いる地震波形はコーナー周期 $T_c = 0.64$  s以降の領域で擬似速度応答スペクトル $\rho S_v$ が $100$  cm/s ( $\xi = 5\%$ )となる模擬地震動波形ART HACHINOHE（位相特性：HACHINOHE 1968 EW）を用いる。以下にART HACHINOHEの加速度波形と速度応答スペクトルを図5と図6にそれぞれ示す。

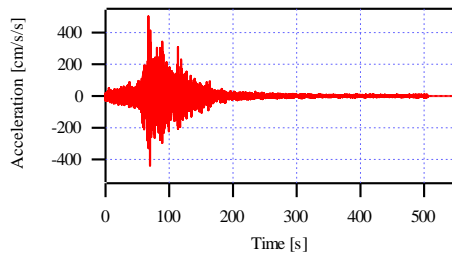


図5 加速度波形

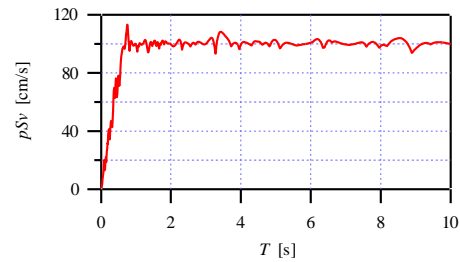


図6 加速度応答スペクトル ( $\xi = 0.05$ )

## 3. 免震モデルの解析結果

3章では免震を付加した11自由度モデルと非免震の10自由度モデル（NBIモデル）の応答を比較する。図7～9に各層の最大加速度、最大層間変形角、最大相対変位を示し、表2に免震を有するモデルの免震層の最大変位を示した。なお、それぞれの図(c)中の $A_i$ とは1層目のせん断力係数を $0.2$ とした $A_i$ 分布（式(4)）より求めたせん断力係数分布である。

$$A_i = 1 + \left( \frac{1}{\sqrt{\alpha_i}} - \alpha_i \right) \frac{2T_u}{1 + 3T_u} \quad (4)$$

ここで $\alpha_i$ は $N$ 層目から $i$ 層目までの重量を建物全体の重量で除した値である。

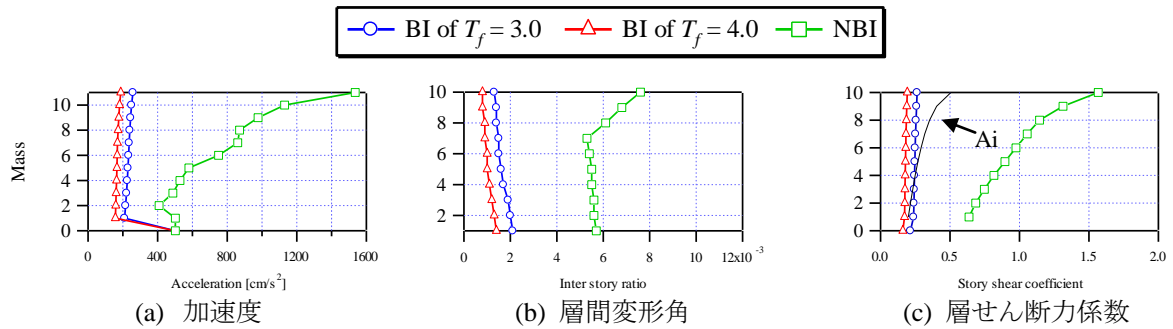


図7 層方向のプロット ( $T_u = 1.0$  s)

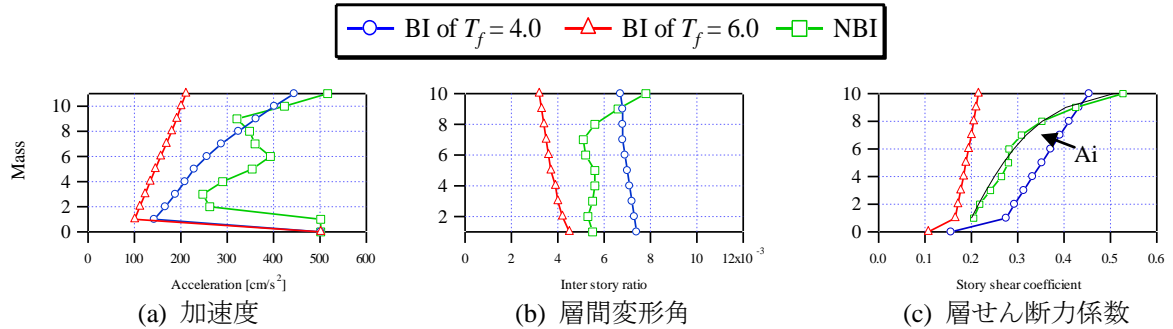


図8 層方向のプロット ( $T_u = 3.0$  s)

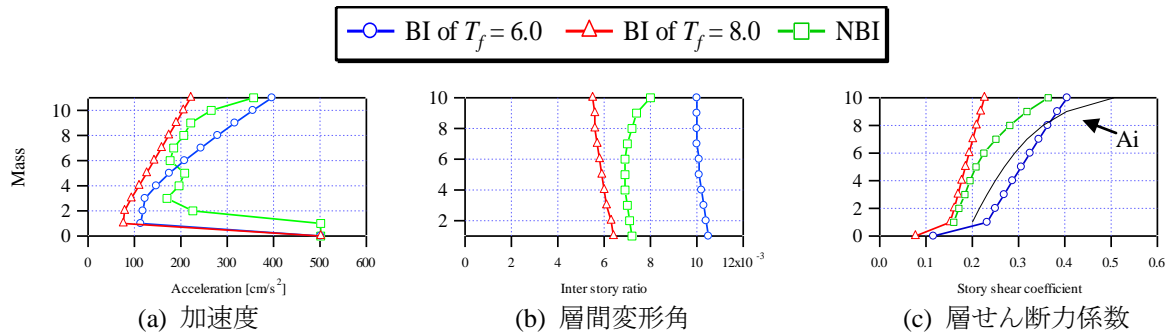


図9 層方向のプロット ( $T_u = 5.0$  s)

図7~9のBIとNBIモデルの結果を比較すると  $T_u = 1.0$  sのモデルでは免震層を付加することにより、最大加速度、層間変形角、層せん断力係数を抑えることができていくことがわかる。しかし、 $T_u = 3.0$  sと  $T_u = 5.0$  sのモデルを見ると、 $T_u$ と  $T_f$ の値が近いモデルである  $T_u = 3.0$  s、 $T_f = 4.0$  sと  $T_u = 5.0$  s、 $T_f = 6.0$  sについては、 $T_u = 3.0$  s、 $T_f = 4.0$  sでは免震層を付加することにより最大加速度、層間変形角、層せん断力係数は低減するものの、層間変形角については免震層~9層目まではNBIモデルの方が小さく、層せん断力係数については、1層~9層目ではNBIモデルの方が小さくなっていることがわかる。また、 $T_u = 5.0$  s、 $T_f = 6.0$  sのモデルでは最大加速度、層間変形角、層せん断力係数についてはNBIモデルの方が全層で小さい値になっている。

全体として、 $T_u$ の値が大きくなると、最大加速度と層せん断力係数が低減していく傾向にある。しかし  $T_u$ に対して  $T_f$ が十分に大きい値でないと、免震層を付加することにより、応答が悪化する傾向がある。次に免震層の変形について検討する。表2に免震層の最大変位を表す。

表2 免震層の最大変位

モデル	免震層の最大変位 (cm)
$T_u = 5.0 \text{ s}$ $T_f = 8.0 \text{ s}$	121.9
$T_u = 5.0 \text{ s}$ $T_f = 6.0 \text{ s}$	103.4
$T_u = 3.0 \text{ s}$ $T_f = 6.0 \text{ s}$	95.8
$T_u = 3.0 \text{ s}$ $T_f = 4.0 \text{ s}$	61.9
$T_u = 1.0 \text{ s}$ $T_f = 4.0 \text{ s}$	63.3
$T_u = 1.0 \text{ s}$ $T_f = 4.0 \text{ s}$	47.8

全体の傾向として $T_u$ と $T_f$ が長くなるにつれて、免震層の最大変位が大きくなる傾向になる。

免震の最大せん断ひずみは、天然ゴム系積層ゴム支承で約340%である<sup>16)</sup>。製品によりばらつきはあるものの、ゴム層厚は150~200 mm程度である<sup>17)</sup>。そのため、免震層の絶対変位が60 cm程度を超えると、最大せん断ひずみを越えてしまい、免震層が損傷してしまう恐れがある。 $T_u=3.0 \text{ s}$ と $5.0 \text{ s}$ の場合免震層の相対変位は60 cmを超過しており、特に $T_u = 5.0 \text{ s}$ のモデルでは100 cm程度にも達する。そのため、上部構造の固有周期が長い建物に免震構造を適用するのは困難が生じる。

そこで、 $T_u = 3.0 \text{ s}$ 、 $5.0 \text{ s}$ のモデルにアクティブ制御を用いて、免震層の相対変位を60 cm以下になるように制御を行う。次章より、アクティブ制御の制御系とコントローラ設計方法について述べる。

#### 4. 制御系の設計

3章で述べたように、長周期の建物では免震構造のみでは振動制御を行うことが困難であるので、免震モデルのうち、免震層の相対変位が60 cm程度を大きく超えていた $T_f=3.0 \text{ s}$ 、 $5.0 \text{ s}$ のモデルを対象にアクティブ制御を併用して地震の制御を行うことを試みる。本報ではLQR制御による状態フィードバック制御を用いる。系全体のブロック線図は図10であり、図中の $K_p$ はLQRにより設計されたコントローラゲインである。

以下にLQR制御を用いたコントローラゲインの設計方法について述べる。

アクティブ制御が加わった際のせん断型モデルの運動方程式は以下の式により与えられる。

$$M\ddot{x}(t) + D\dot{x}(t) + Kx(t) = -M\{1\}\ddot{x}_g(t) + u(t) \quad (5)$$

ここで、 $M$ ：質量マトリックス、 $D$ ：粘性マトリックス、 $K$ ：剛性マトリックス、 $x(t)$ ：各層の相対変位ベクトル、 $\ddot{x}_g(t)$ ：地面の加速度、 $u(t)$ ：制御入力をそれぞれ表す。

その状態方程式は以下の通りである。

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) + B_d \ddot{x}_g(t) \{1\}, \\ y(t) = Cz(t) \end{cases} \quad (6)$$

ここに、上式の $z(t)$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $B_d$ 、と $C$ は以下の通りである

$$z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & I_n \\ -M^{-1}K & -M^{-1}D \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ -M^{-1}E_u \end{bmatrix}, \quad B_d = \begin{bmatrix} 0 \\ -E \end{bmatrix}, \quad C = I_n \quad (7) \sim (11)$$

$$E = -[1 \quad 1 \quad \dots \quad 1]^T, \quad E_u = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (12), (13)$$

ここで、 $I_n$ は $n \times n$ の単位行列を表し、 $E_u$ は制御入力が入力される位置を表し、行列上で1になり、その真下の層では反力として-1が入力されることを表す。上記の式(6)のブロック線図は図10に示した。

既往研究では、以下の評価関数 $J$ を最小にする最適制御によるコントローラを設計して建造物の振動制御が行われている<sup>1)</sup>

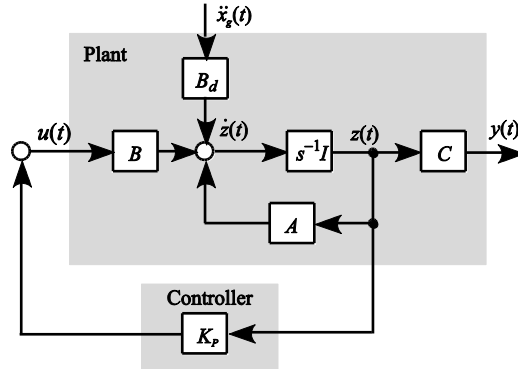


図10 制御系のブロック線図

$$J = \int_0^{\infty} \{z^T(t)Q_1z(t) + u^T(t)R_1u(t)\} dt \quad (14)$$

ここで、 $Q$ と $R$ は重み関数をあらわす行列である。

式(14)は $z(t)$  (相対変位と相対速度) と $u(t)$  (制御入力) の大きさに対して重み関数がかかっているが、建築物の振動制御では、相対変位と相対速度ではなく、層間変形と層間速度を抑えることが損傷を抑えることに重要である。各層の相対変位の絶対値が小さくとも、相対変位としては大きくなる可能性がある。そのため、本研究では、以下の層間変形と層間速度を抑える重み関数を用いる

$$J_1 = \int_0^{\infty} \{z^T(t)\Gamma^{-T}Q_1\Gamma^{-1}z(t) + u^T(t)R_1u(t)\} dt \quad (15)$$

上式において、 $\Gamma$ は

$$\Gamma \begin{bmatrix} \Delta x(t) \\ \Delta \dot{x}(t) \end{bmatrix} = z(t) \quad (16)$$

を満たす変換行列であり、 $\Delta x(t)$ は層間変形をあらわす。

絶対加速度を抑えることにより、層せん断力を小さくし、建物の損傷を守ることができる。そこで、本論文では、上式の評価関数の他に絶対加速度を評価する評価関数 $J_2$ を以下で定義した。

$$J_2 = \int_0^{\infty} \{[\ddot{x}(t) + \ddot{x}_g(t)]^T Q_2 [\ddot{x}(t) + \ddot{x}_g(t)] + u^T(t)R_2u(t)\} dt \quad (17)$$

式(17)は状態 $z(t)$   $\ddot{x}(t) + \ddot{x}_g(t) = Ax(t) + Bu(t)$ を代入することにより、以下の式のように書き換えることが可能である。

$$J_2 = \int_0^{\infty} \{z^T(t)Q_3z(t) + 2z(t)Su(t) + u^T(t)R_3u(t)\} dt \quad (18)$$

ここで、

$$Q_3 = \hat{A}^T Q_2 \hat{A} \quad (19)$$

$$2z(t)Su(t) = z(t)^T \hat{A}^T Q_2 M^{-1} E_u u(t) + u(t)^T E_u^T M^{-T} Q_2 \hat{A} z(t) \quad (20)$$

$$R_3 = E_u^T M^{-T} Q M^{-1} E_u + R_2 \quad (21)$$

である。ここで、 $\hat{A} = [-M^{-1}K \quad -M^{-1}C]$ である。

最適制御の際のコントローラ的设计は層間変位、層間速度を評価した評価関数 $J_1$ と加速度を評価した $J_2$ の和である以下の評価関数 $J_3$ を用いる。

$$J_3 = J_1 + J_2 \quad (22)$$

このときフィードバック制御の制御則は以下の通りである。

$$u(t) = K_p z(t), \quad K_p = -(R_1 + R_3)^{-1} (S^T + B^T P) \quad (23)$$

ただし式(23)の $P$ は以下のリカッチ代数方程式の正定対象解である。

$$\{A - B(R_1 + R_3)^{-1} S^T\}^T P + P \{A - B(R_1 + R_3)^{-1} S^T\} + (Q_1 + Q_3) - PB(R_1 + R_3)^{-1} B^T P - S(R_1 + R_3)^{-1} S^T = 0 \quad (24)$$

### 5. アクティブ制御を併用した免震構造モデル (ABIモデル) の解析結果

5章では(ABIモデル)の解析結果を示す。本報は免震層のみに制御装置を設置した。この時のモデルは図11で表される。コントローラ設計の際に用いた重み関数は以下の通りである。

$$Q_1 = 10^\alpha \begin{bmatrix} 10^\beta I_{1 \times 11} & \\ & 10^\gamma I_{1 \times 11} \end{bmatrix}, \quad Q_2 = 10^\varepsilon \times I_{1 \times 11}, \quad R_1 = R_2 = I_{1 \times 11} \quad (25) \sim (27)$$

本報では $\alpha = 12$ 、 $\beta = 2$ 、 $\gamma = 0$ 、 $\varepsilon = 12$ とした。

表3にABIモデルでの免震層の最大変位、図12と13に $T_u = 3.0$  sおよび5.0 sにおけるABIモデルとBIモデルの結果を示す。

表3 アクティブ制御後の免震層の最大変位

モデル	免震層の最大変位 (cm)
$T_u = 5.0$ s $T_f = 8.0$ s	26.2
$T_u = 5.0$ s $T_f = 6.0$ s	21.6
$T_u = 3.0$ s $T_f = 6.0$ s	22.1
$T_u = 3.0$ s $T_f = 4.0$ s	13.0

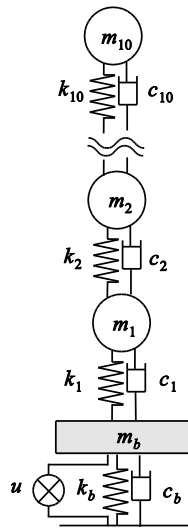


図11 アクティブ制御装置と免震構造を有する建物モデル(ABIモデル)

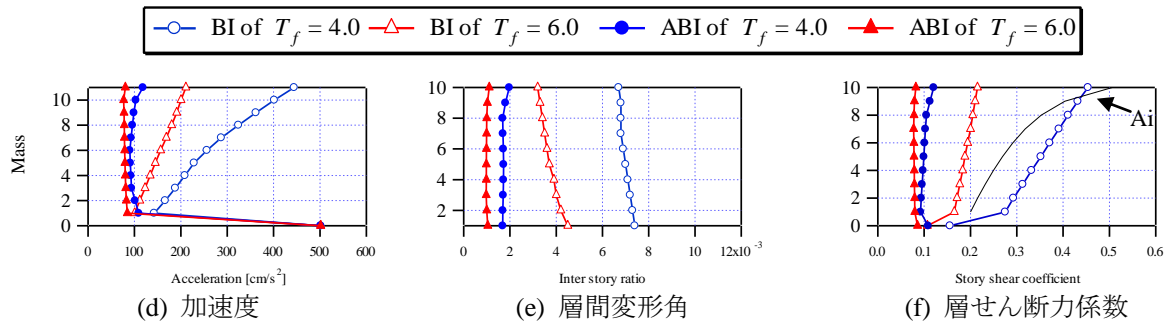


図12 層方向のプロット ( $T_u=3.0$  s)

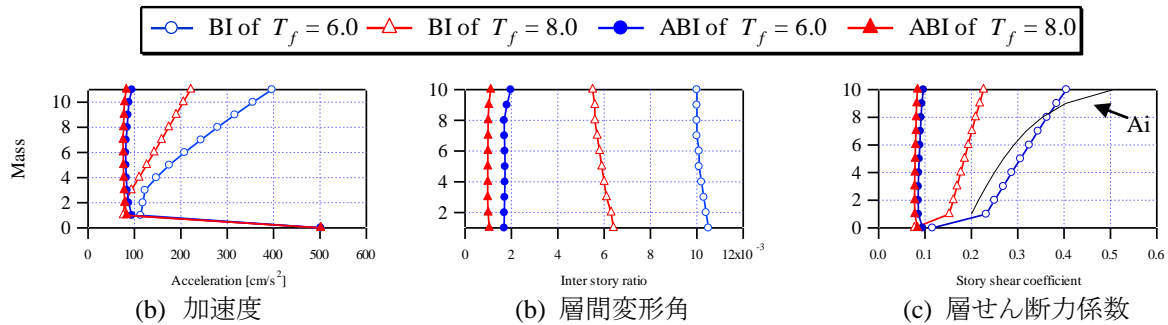


図13 層方向のプロット ( $T_u=5.0$  s)

表3より、アクティブ制御を用いることにより、全てのモデルで免震層の変形を60 cm以下にすることができ、さらに、最大絶対加速度、最大層間変形角も大幅に減少させることができた。

図12より、 $T_u=5.0$  sのモデルについて、 $T_f=8.0$  sのときはアクティブ制御によってBIモデルに対して絶対加速度を62%、層間変形角を80%、最大相対変位を86%低減程度低減していることが確認できる。また、図13より $T_u=3.0$  sのモデルについては、 $T_f=6.0$  sの際は絶対加速度を73%、層間変形角を71%、相対変位を77%低減していることが分かる。また、層せん断力係数も1層目の層せん断力係数を0.2とした際のせん断力分布よりも小さくすることができた。

以上より、免震層にアクティブ制御を用いることで、大幅に応答を低減できることが分かった。

#### 4. おわりに

本報では、免震構造とアクティブ制御を併用した際の固有周期と減衰率の変化、さらに、制御入力の大さきについて考慮を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 上部構造の周期が $T_u=3.0$  s、 $5.0$  sの建物に免震構造を付加すると、最大加速度を抑えることができるが、免震層の変位が許容最大せん断ひずみ値を超過するため、免震を適用するのは困難である。
- 2) アクティブ制御を用いることにより $T_u=5.0$  s、 $T_f=8.0$  sのモデルでは、免震のみ取り付けられたモデル（BIモデル）に対して最大絶対加速度を62%減らし、最大層間変位も80%減らし、最大相対変位も86%減らすことができた。また、 $T_u=3.0$  s、 $T_f=6.0$  sのモデルではBIモデルに対して最大絶対加速度を73%、最大層間変位を71%、最大相対変位を77%減らすことができたことから、長周期の建物に対しては免震とアクティブ制御を併用することが有効であることが示された。
- 3) その際の制御入力に対する層せん断力係数は1層目のせん断力係数を0.2とした際の $A_i$ 分布未満にし、建物を制御入力により損傷させることなく、振動を制御することが可能であった。

#### 参考文献

- 1) 背戸一登：産業制御シリーズ11-構造物の振動制御-、コロナ社、2006。
- 2) Spencer Jr B. F., Nagarajaiah S. : State of the Art of Structural control, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 129, 2007, pp.845-856。
- 3) 西谷章、山田聖治：AMDを利用した制御対象の同定に基づく $H^\infty$ 制振システム再設計、日本建築学

- 会構造系論文集、No.516、1999年2月、pp.65-71.
- 4) 吉田和夫、姜聲国、金泰林：多自由度系の振動絶縁のLQG制御と $H^\infty$ 制御、日本機械学会論文集（C編）、Vol.61、No.583、1995年3月、pp.239-244.
  - 5) 背戸一登、富波佳均、松本幸人、土井文夫：並立する弾性構造物のモデル化法と振動制御法（超々高層ビル実現のための基礎研究）、日本機械学会論文集（C編）、Vol.61、No.585、1995年5月、pp.145-151.
  - 6) Zhang H., Wang R., Wang J., Shi Y: Robust rinite frequency  $H^\infty$  static-output-feedback control with application to vibration active control of structural system, ELSEVIER, Mechatronics, Vol.24, 2014, pp.354-366.
  - 7) Wang Y., Lynch J. P., Law K. H. : Decentralized  $H^\infty$  controller design for large-scale civil structures, EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS, Vol.38, pp.377-401.
  - 8) Pourzeynali S., Lavasani H. H., Modarayi A.H.: Active control of high rise building structures using fuzzy logic and genetic algorithms, Engineering Structures, Vol.29, pp.346-357.
  - 9) R.I.スキナー、W.H.ロビンソン、G.H.マックベリー著、川島和彦、北川良和監訳：免震設計入門、鹿島出版会、1996年.
  - 10) Preumont A., Seto K. : Active Control of Structures, WILEY, pp.117-145.
  - 11) Avila S.M., Goncalves P.B. : Hybrid control to mitigate excessive vibrations caused by dynamic loading with random perturbations in tall building, ABCM symposium series in Mechatronics, Vol.1, pp.295-303.
  - 12) 北村春幸、財津和廉、馬谷原伴恵：主架構の塑性化を考慮した制振構造物のエネルギーの釣合に基づく応答評価、日本建築学会構造系論文集、第 599 号、2006 年 1 月、pp.71-78.
  - 13) 佐藤大輔、北村春幸、佐藤大樹、佐藤利昭、山口路夫、脇田直弥、綿貫雄太：履歴ダンパーと粘性ダンパーを併用した制振構造のエネルギーの釣合に基づく応答予測法、日本建築学会構造系論文集、第 699 号、2014 年 5 月、pp.631-640.
  - 14) 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、2009 年 1 月、pp.75-82.
  - 15) 日本建築学会：免震構造設計指針、2013、pp.131~133.
  - 16) 日本ERI高層評定委員会：性能評価を踏まえた免震・制震構造の設計、技報堂出版、2014、pp.98.
  - 17) 社団法人日本免震構造協会：免震部材標準品リスト2009.