T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	履歴ダンパーを有するアクティブ免震構造のLQRによる加速度応答制御
Title(English)	LQR-based acceleration response control for active base-isolated structures with hysteretic dampers
著者(和文)	張云浩, 佐藤大樹, 陳引力, 佘錦華, 宮本皓
Authors(English)	ZHANG Yunhao, Daiki Sato, Yinli Chen, Jinhua SHE, Kou Miyamoto
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集， I， ，pp. 553-556
Citation(English)	， I， ，pp. 553-556
発行日 / Pub. date	2026，3
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

2025年度日本建築学会
関東支部研究報告集Ⅰ
2026年3月

履歴ダンパーを有するアクティブ免震構造のLQRによる加速度応答制御

構造ー振動

免震構造　履歴ダンパー　アクティブ制御
アクティブ免震　LQR制御　加速度応答制御

正会員　○　張　云浩[*1]　　正会員　佐藤大樹[*2]
〃　陳　引力[*3]　〃　佘　錦華[*4]
〃　宮本　皓[*5]

1. はじめに

兵庫県南部地震以降，日本でのパッシブ免震構造の適用件数が急増している[1]。近年では，更なる制御性能を引き出すために，アクティブ制御とパッシブ免震構造の組合せ，いわゆるアクティブ免震構造の研究が数多く展開されている。

アクティブ免震構造の優越性の１つは，パッシブ免震構造と比べて，優れた加速度制御性能を実現できる点にある。加速度制御に関する既往研究では，主に吉田らが提案した絶対制震制御法[2]と宮本らが提案した拡張等価入力外乱手法[3] (EEID: Extended EID)及びAD-LQR[4] (LQR considering acceleration and drift. LQR: Linear quadratic regulator)制御法がある。絶対制震制御法[2]は，地震時における建物の絶対加速度をゼロまで制御可能であることを特徴とし，実建物への適用も行われている。拡張等価入力外乱手法は，相対変位および相対速度の制御を主眼に置く従来の等価入力外乱手法に対して，建物の絶対加速度を取り入れた手法である。また，AD-LQRは，構造設計者にも理解しやすい最適制御法であるLQR制御を拡張し，全層の加速度および層間変位を考慮可能とした手法である。関連する研究報告により，これらの方法が加速度制御において優れた性能を有することが既に検証されている。しかし，これらの制御方法はいずれも，制御対象である免震構造が線形システムであることを前提としたものである。日本において，近年の免震構造の90%以上は，非線形免震層を有している[5]。その中，約75%が履歴ダンパーまたは鉛プラグ入り積層ゴム支承を採用している[5]。アクティブ免震構造がこのような強い非線形免震層を持つ場合，前述の加速度制御方法を直接適用することは困難である。そのため，履歴型の非線形特性を有する免震層を持つアクティブ免震構造の加速度制御には，新たな工夫が必要である。

前述の加速度制御方法の中で，AD-LQR制御法は制御構造が比較的簡単であり，設計パラメータと制御性能の関係を構造設計者が直感的に把握しやすいという利点を有する。また，著者らは既往研究[6]において，バイリニアオイルダンパーを有するアクティブ免震構造に対してLQR制御を拡張して適用し，非線形特性を有する制御対象に対してもLQR制御が有効であることを示している。これらの知見を踏まえ，同様に強い非線形特性を有する履歴ダンパーを備えた免震構造に対しても，LQR制御の枠組みを拡張することが有効であると期待できる。

本報は免震層に履歴ダンパーを有するアクティブ免震建物の加速度制御を目的として，従来の線形システム制御のためのLQR制御を拡張し，履歴ダンパーを有するアクティブ免震建物に適用可能なH-LQR (H-LQR: Hybrid LQR)制御法を提案する。また，応答解析により，H-LQR制御を適用した免震建物とパッシブ制御のみの場合の最大応答を比較し，方法の有効性を検証する。

2. 構造モデルと制御系の概要

本章では，研究対象とする構造モデル(Fig. 1)と制御系を説明する。

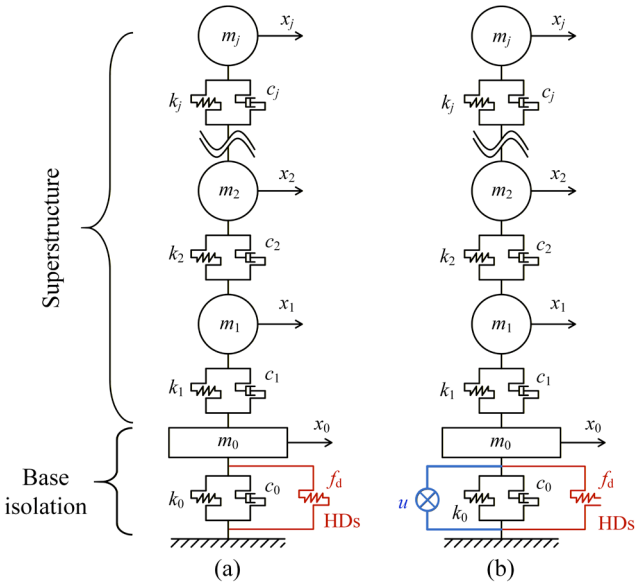


Fig. 1. Mathematical model: (a): without and (b) with active control devices.

LQR-based acceleration response control for active base-isolated structures with hysteretic dampers

ZHANG Yunhao,　SATO Daiki,　CHEN Yinli,　SHE Jinhua,
MIYAMOTO Kou

本研究では，多自由度線形せん断モデル(Fig. 1)を研究対象とする。免震層には，線形天然ゴム支承，履歴ダンパーおよびアクティブ制御装置が配置されている。運動方程式は，次式により与えられる。

$$M\ddot{x}(t)+C\dot{x}(t)+Kx(t)+Ef_{\mathrm{d}}(t)=-ME_{\mathrm{g}}\ddot{x}_{\mathrm{g}}(t)-Eu(t) \quad (1)$$

ここで，$x(t)$ は応答変位ベクトル，$f_{\mathrm{d}}(t)$ は履歴ダンパーのダンパー力，$\ddot{x}_{\mathrm{g}}(t)$ は地震加速度，$u(t)$ はアクティブ制御力，M は質量マトリックス，C は減衰係数マトリックス，K は剛性マトリックス，$E_{\mathrm{g}}=[1\ \ 1\ \ \cdots\ \ 1]^{\mathrm{T}}$，$E=[1\ \ 0\ \ \cdots\ \ 0]^{\mathrm{T}}$ である。

式(1)を次式に表される状態方程式に変換する。

$$\dot{z}(t)=Az(t)+Bu(t)+Bf_{\mathrm{d}}(t)+B_{\mathrm{g}}\ddot{x}_{\mathrm{g}}(t) \quad (2)$$

ここで，

$$\begin{cases} z(t)=\left[x(t)\quad \dot{x}(t)\right]^{\mathrm{T}}, \quad A=\begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}, \\ B=\left[0\quad -M^{-1}E\right]^{\mathrm{T}}, \qquad B_{\mathrm{g}}=\left[0\quad -E_{\mathrm{g}}\right]^{\mathrm{T}}. \end{cases} \quad (3)$$

であり，$z(t)$ は状態ベクトル，A はシステムマトリックス，B は制御入力マトリックス，B_{g} は地震入力マトリックスである。

本論文では，制御系は次式の制御則を持つフィードバック制御を用いる。

$$u(t)=Kz(t) \quad (4)$$

ここに，K はフィードバックゲイン，K_{D} は変位フィードバックゲイン，K_{V} は速度フィードバックゲインである。

2. 履歴型ダンパーのモデル化

履歴型ダンパーのダンパー力は Bouc–Wen モデル [7]で表現できる。

$$f_{\mathrm{d}}(t)=rk_{\mathrm{e}}x_0(t)+(1-r)k_{\mathrm{e}}w(t) \quad (5)$$

ここで，k_{e} は履歴ダンパーの弾性剛性係数，$r=k_{\mathrm{y}}/k_{\mathrm{e}}$ は降伏後剛性比，x_0 は免震層変位である。$w(t)$は履歴変数であり，以下に示す非線形微分方程式から得られる ($w(0)=0$)。

$$\dot{w}(t)=\varpi(\dot{x}_0,w)=\dot{x}_0(t)-\beta\left|\dot{x}_0(t)\right|\left|w(t)\right|^{n-1}w(t)-\gamma\dot{x}_0(t)\left|w(t)\right|^{n} \quad (6)$$

ここで，β，γ および n は本モデルの挙動を支配する無次元量である。$n\to\infty$ とすると，理想弾塑性のバイリニア型履歴曲線が得られる。履歴ダンパーの降伏変位 x_{y} が定まると，β および γ は次式により求められる。

$$\beta=\gamma=\frac{1}{2x_{\mathrm{y}}^{n}} \quad (7)$$

質量が 1 kg の一自由度モデルで Bouc-Wen モデルの履歴ループを示す。固有周期は 5 秒，固有減衰定数は 0.05 である。履歴ダンパーの降伏変位は 3 cm，降伏後せん断力係数は 0.02 である。地震波は擬似速度スペクトルが $S_{\mathrm{pV}}=120$ cm/s の Art Kobe を用いる。n が異なる場合の履歴ループを Fig. 3 に示す。r が異なる場合の履歴ループを Fig. 4 に示す。これらの図より，Bouc–Wen モデルは，パラメータの設定により，各種の履歴ダンパーの履歴特性を表現可能であることが分かる。

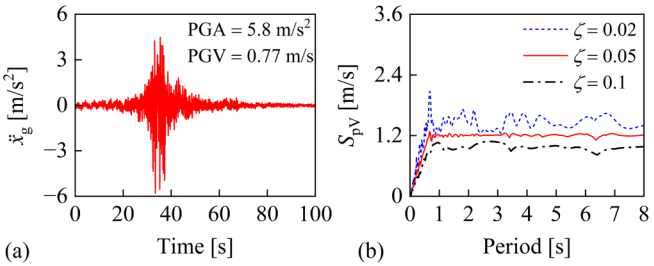


Fig. 2. Art Kobe wave: (a) accelerogram and (b) pseudo velocity response spectrum

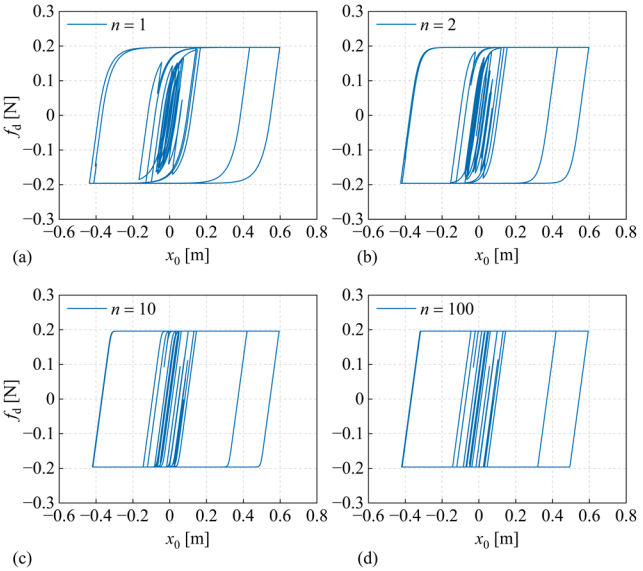


Fig. 3. Hysteretic loops for different values of the exponent, n ($r = 0$).

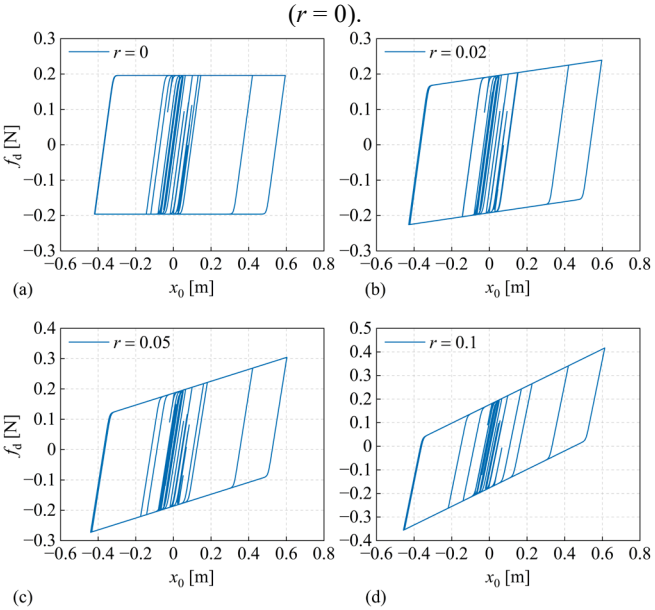


Fig. 4. Hysteretic loops for different values of r (n = 10).

3. 履歴ダンパーを有する建物のためのLQR制御法

本章では，履歴ダンパーを有する建物にも適用できる

ように拡張されたLQR制御法であるH-LQR制御法を提案し，アクティブ制御器のゲインの計算方法を示す。

本論文では，履歴ダンパーを制御対象から分離し，総制御器のパッシブ部分と見なすとともに，アクティブ制御器を総制御器のアクティブ部分と見なす。総制御器はLQR制御法を用いて設計する。すなわち，LQRにより決定された総制御力は，履歴ダンパー力およびアクティブ制御力の加算によって与えられる。

$$u_{\mathrm{T}}(t)=u(t)+f_{\mathrm{d}}(t) \tag{8}$$

ここで，$u_{\mathrm{T}}(t)$ は総制御力であり，以下に示す全層加速度および免震層変位を考慮した性能指標を最小とするように最適化されている。

$$J=\int_0^{\infty}\left[[\ddot{x}_{\mathrm{g}}(t)+\ddot{x}(t)]^{\mathrm{T}}Q_{\mathrm{A}}[\ddot{x}_{\mathrm{g}}(t)+\ddot{x}(t)]+q_{\mathrm{D}}x_0^2(t)+u^2(t)\right]\mathrm{d}t \tag{9}$$

ここで，Q_{A} および q_{D} は重み係数である。式(9)を LQR の標準形に変換すると，次式が得られる。

$$J=\int_0^{\infty}\left[z(t)^{\mathrm{T}}Qz(t)+2z(t)^{\mathrm{T}}Su(t)+Ru^2(t)\right]\mathrm{d}t \tag{10}$$

ここで，$Q=\begin{bmatrix}q_{\mathrm{D}} & \\ & 0\end{bmatrix}+W^{\mathrm{T}}Q_{\mathrm{A}}W$，$S=W^{\mathrm{T}}Q_{\mathrm{A}}\Psi$，$R=\Psi^{\mathrm{T}}Q_{\mathrm{A}}\Psi+1$，$W=\begin{bmatrix}-M^{-1}K & -M^{-1}C\end{bmatrix}$，$\Psi=-M^{-1}E$。

式(10)を最小とする総制御力は，次式より求められる。

$$u_{\mathrm{T}}=K_{\mathrm{T}}z(t) \tag{11}$$

$$K_{\mathrm{T}}=-R^{-1}\left(B^{\mathrm{T}}P+S^{\mathrm{T}}\right) \tag{12}$$

ここで，P は以下のリカッチ方程式の半正定値解である。

$$A^{\mathrm{T}}P+PA-(PB+S)R^{-1}\left(B^{\mathrm{T}}P^{\mathrm{T}}+S^{\mathrm{T}}\right)+Q=0 \tag{13}$$

以下にアクティブ制御器のゲインを求める。

文献6)では，バイリニアオイルダンパーを有する建物に対して，ダンパー力を状態依存マトリックスと状態ベクトルとの積として表現し，それに基づきアクティブ制御器のゲインを求めている。しかし，式(5)に示すように，履歴ダンパーのダンパー力は，内部変数である履歴変数 $w(t)$ を含む非線形関数であり，既存の状態ベクトルのみを用いて状態依存マトリックスと状態ベクトルとの積として表現することはできない。そこで，本研究では，履歴ダンパーの履歴変数を状態ベクトルに導入して，拡張状態を構築することにより，アクティブ制御器のゲインを導出する。

式(5)により，履歴ダンパーのダンパー力は。式(5)により，HDのダンパー力は次式により与えられる。

$$f_{\mathrm{d}}(t)=\begin{bmatrix}\alpha k_{\mathrm{e}} & 0 & (1-\alpha)k_{\mathrm{e}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_0(t)\\ \dot{x}_0(t)\\ w(t)\end{bmatrix}=\Xi\tilde{z}(t) \tag{14}$$

ここで，$\Xi=\begin{bmatrix}\alpha k_{\mathrm{e}} & \underbrace{0\ \cdots\ 0}_{j-1} & \underbrace{0\ \cdots\ 0}_{j} & (1-\alpha)k_{\mathrm{e}}\end{bmatrix}$ は擬似ゲイン，$\tilde{z}(t)=\begin{bmatrix}z(t)\\ w(t)\end{bmatrix}$ は拡張状態である。拡張状態 $\tilde{z}(t)$ により，総制御力とアクティブ制御力は次式になる。

$$u_{\mathrm{T}}=K_{\mathrm{T}}z(t)=\begin{bmatrix}K_{\mathrm{T}} & 0\end{bmatrix}\tilde{z}(t)=\tilde{K}_{\mathrm{T}}\tilde{z}(t) \tag{15}$$

$$u=Kz(t)=\begin{bmatrix}K & 0\end{bmatrix}\tilde{z}(t)=\tilde{K}\tilde{z}(t) \tag{16}$$

式(14)，(15)および(16)を式(8)に代入することで，アクティブ制御器のゲイン $\tilde{K}$ が得られる。

$$\tilde{K}=\tilde{K}_{\mathrm{T}}-\Xi \tag{17}$$

制御系のブロック線図は Fig.5 で示される。ここで，$C_z=\begin{bmatrix}I & 0\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$，$C_w=\begin{bmatrix}0 & \cdots & 0 & 1\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$，$I$ は単位行列である。

以上により，線形システム制御のためのLQR制御法を，履歴ダンパーを有するアクティブ建物へ拡張することができた。

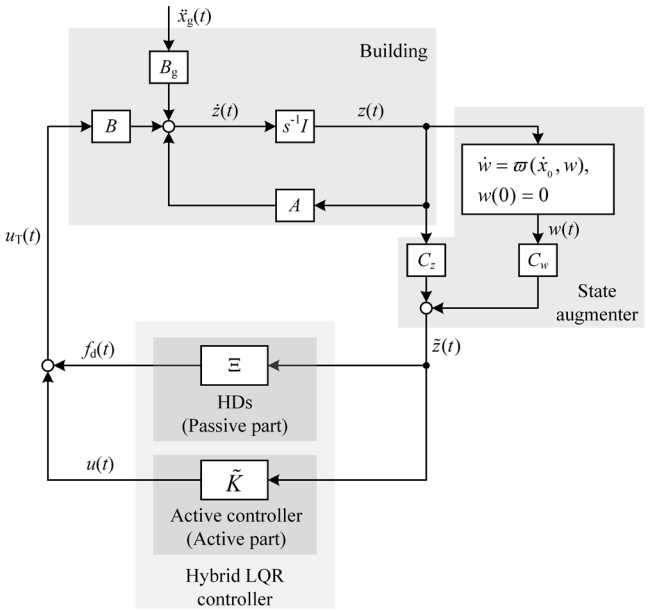


Fig. 5. Block diagram

4. 絶対加速度に対する制御性能

本章では，履歴ダンパーを有するアクティブ免震建物を対象として，H-LQR制御法による絶対加速度の制御性能を示す。

検討用地震波はArt Kobe(Fig. 2)およびHachinohe (Fig. 6)である。Hachinohe波はHachinohe 1968 EWの成分を用いて，ピーク地動速度(PGV)を75 cm/sに基準化した。

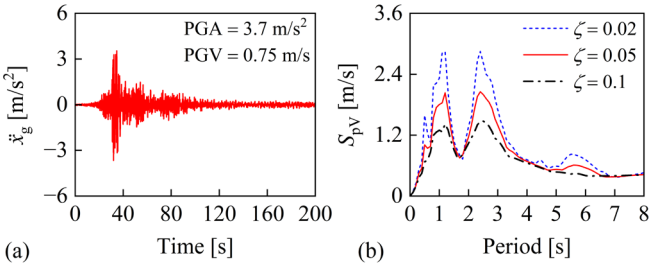


Fig. 6. Hachinohe wave: (a) accelerogram and (b) pseudo velocity response spectrum

応答解析モデルは11自由度線形せん断モデルを用いる。

構造モデルのパラメータ:

上部構造質量 $m_i = 1250000$ kg,

上部構造周期 $T_s = 2$ s,

上部構造減衰定数$\zeta_s = 0.02$,

免震層質量 m_0=1875000 kg,

免震層周期 $T_0 = 4$ s,

免震層減衰定数$\zeta_0 = 0.02$。

履歴ダンパーのパラメータ:

降伏変位 $x_y = 2$ cm,

降伏後せん断力係数$\alpha = 0.02$,

$n = 10$, $r = 0$。

LQR の性能指標は式(9)を用いる。免震層変位の重み係数は $q_D = 10^{15.7}$，全層加速度の重み係数は $Q_A = 10^{14.5}\mathrm{diag}(1, 1, \cdots 1, 37)$ と設定する。

H-LQR制御を適用した場合と履歴ダンパーのみの場合の最大応答の解析結果はFig. 7に示す。H-LQR 制御法により，履歴ダンパーを有する免震建物の全層の絶対加速度を半分以下に低減できることが確認された。一方，免震層の最大変位については，H-LQR 制御を適用した場合でも，パッシブ制御の場合と比べて，ほぼ同程度であった。

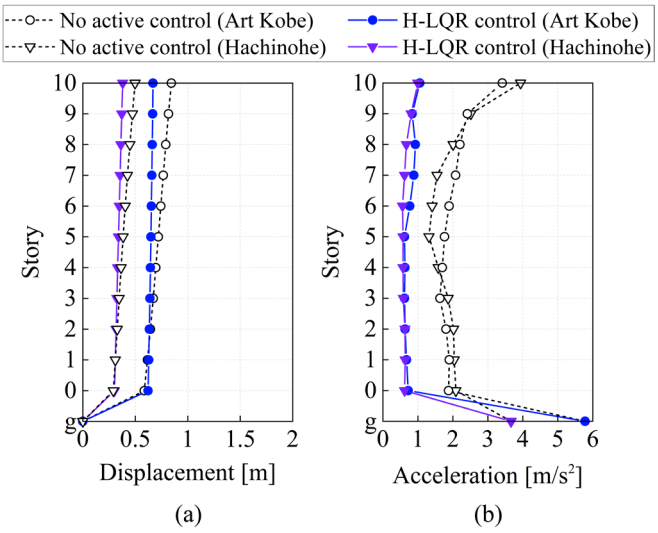


Fig. 7. Response comparison: (a) displacement and (b) acceleration

5. まとめ

本報は，免震層に履歴ダンパーを有するアクティブ免震建物の加速度制御を目的として，従来の線形システムを対象としたLQR制御を拡張し，履歴ダンパーを有するアクティブ免震建物に適用可能なH-LQR制御法を提案した。また，応答解析により，H-LQR制御を適用した免震建物とパッシブ制御のみの場合の最大応答を比較した。以下に得られた知見を示す。

(1) 履歴ダンパーを制御対象から分離し，総制御器のパッシブ部分として扱うことにより，免震層に履歴ダンパーを有するアクティブ免震構造に対しても，LQR制御の適用が可能となった。

(2) 履歴ダンパーの履歴変数を状態ベクトルに導入し，拡張状態を構成することにより，アクティブ制御器のゲインの導出が可能となった。

(3) H-LQR制御法により，履歴ダンパーを有する免震建物の全層の絶対加速度を半分以下に低減できることが応答解析で確認された。一方，免震層の最大変位は，H-LQR制御を適用した場合でも，パッシブ制御の場合とほぼ同程度であった。

Reference

[1] Architectural Institute of Japan. Recommendations for Seismically Isolated Buildings. 2016.

[2] 吉田治，蔭山満，佐野剛志，勝俣英雄，遠藤文明，渡辺哲巳，山中昌之．日本機械学会論文集 2012;78(789):1632-1643.

[3] 宮本皓，佐藤大樹，佘錦華．建築構造物のアクティブ制御に適した等価入力外乱手法の提案．日本建築学会構造系論文集 2019;84(757):361-371.

[4] Miyamoto K, She J, Sato D. A new performance index of LQR for combination of passive base isolation and 501 active structural control. Engineering Structures 2018;157:280-99.

[5] 大宮幸，北村春幸．長周期地震動対策に備えた直近の免震建物の構造特性に関する調査・分析．日本建築学会技術報告集 2019;25(59):61-66.

[6] Zhang Y, Chen Y, Sato D, She J, Miyamoto K. A response-spectra-based design method for LQR control of active base-isolated buildings with bilinear oil dampers. Journal of Sound and Vibration 2026;626:119618.

[7] Omar AS, Al-Fahdawi, Luciana RB, Rachel WS. Semi-active adaptive control for enhancing the seismic performance of nonlinear coupled buildings with smooth hysteretic behavior. Engineering Structures 2019;191:536-48.

∗1 東京科学大学 研究員· 博士(学術)

∗2 東京科学大学 准教授· 博士(工学)

∗3 東京科学大学 助教· 博士(学術)

∗4 東京工科大学 教授· 博士(工学)

∗5 清水建設技術研究所· 博士(工学)

*Researcher, Institute of Science Tokyo, Ph.D [*1]

*Associate Professor, Institute of Science Tokyo, Dr. Eng[*2]

*Assistant Professor, Institute of Science Tokyo, Ph.D[*3]

*Professor, Tokyo University of Technology, Dr. Eng[*4]

*Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr. Eng[*5]