外乱包含スライディングモード制御によるアクティブ免震*

三 東 儀 洋^{*1}, 鈴 木 隆 典^{*2}, 吉 田 和 夫^{*3}Active Base Isolation Using Disturbance-Accommodating
Sliding Mode ControlNorihiro SANTO^{*4}, Takanori SUZUKI and Kazuo YOSHIDA^{**} Department of System Design Engineering, Keio University,
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 223-8522 Japan

Vibration isolation control of buildings is important for enhancement of safety for large earthquake. The sliding mode control theory which is one of nonlinear control theory has recently received attention in the field of active control. Although the advantage of the SMC method is a simple controller design and is capable of building a robust system against nonlinear characteristics of structures or devices, the disturbance is ignored or cancelled through the matching condition. In this study, a new method of the disturbance accommodating sliding mode control is presented, in which the disturbance is taken into account by augmenting the state space and the sliding mode is defined for the augmented state space. This method is applied to a base isolation control problem of a ten-degree-of-freedom structural model with active base isolator. In order to investigate the performance of the proposed method, computer simulations were carried out, and as a result, the effectiveness of the method was shown.

Key Words: Vibration Control, Nonlinear Control, Flexible Structure, Seismic Motion, Sliding Mode Control, Active Vibration Isolation, Robust Control

1. はじめに

阪神・淡路大震災以降, 建築構造物の振動応答を抑制する手段としてアクティブ制御が注目されている。この制御は構造物の揺れに合わせて能動的に力を加えて振動応答を抑える技術で, パッシブ制御より制御効果が高く, 振動制御の有効な方法として知られている。これまで構造物のアクティブ制御は, 風荷重による振動の制御の方法として用いられてきており, いわゆる制振技術として実用されてきた。一方, アクティブ除振技術は精密機械の振動絶縁技術として実用化されており, 建築構造物の分野では日本で世界初のセミアクティブ免震ビルも誕生している⁽¹⁾。破損防止や安全性向上を図るためアクティブ制御と同様に, アクティブ免震の技術も注目されている。ビルの免震と精密機械の除振における技術的な差異は, 前者の方が大規模なシステムになるために, 非線形性のみならず不確定性が大きいことと, メンテナンスなどの制約が大きいことなどである。したがって, アクティブ免震技術にお

いてはその制御手法が簡単であることが望ましい。

一方, 制御器導出に適用する制御理論は, 主にLQG制御理論や H_∞ 制御理論などの線形制御理論であり, 定常および非定常不規則入力に対する設計法やロバスト性を有する設計法など数多くの研究が行なわれている。このような設計法の有効性は広く知られているが, 制御器の次数が一般に高くなり, 大規模なシステムに対しては実用的ではない面がある。そこで近年注目を浴びているのがスライディングモード制御^{(2),(3)}である。これは, 非線形制御手法の一つであるが, その設計法は比較的容易でロバスト性を有することも知られている。

しかしながら, 従来のスライディングモード制御手法は基本的には外乱が存在しない場合の理論から出発している。外乱が存在する場合でもマッチング条件を満たせば外乱の相殺を行う方法が基本であり, その場合操作量がスライディングモード制御と外乱相殺制御の和になるため, 外乱相殺の誤差の問題や操作量の有効利用性に関しても問題が残る。一方, 不確定外乱の振幅上界値に伴ったゲインを生成する適応ロバストスライディングモード制御⁽⁴⁾のような方法もあるが, 操作量に制限が存在する場合では, 最適な操作量を系に入力することができず, 高い制御性能を保持するのは難しいと思われる。

そのような観点から本研究では外乱の考慮したスライ

* 原稿受付 2001年12月25日。

^{*1} 正員, 慶應義塾大学大学院(〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1)。^{*2} 慶應義塾大学大学院。^{*3} 正員, 慶應義塾大学理工学部。

E-mail: d986203@msr.st.keio.ac.jp

ディングモード制御の確立を行い、スライディングモード制御の本来の利点である操作量の限界までを基本的に利用する手法を提案する。すなわち、本研究では切換超平面に外乱の動特性を考慮した外乱包含スライディングモード制御⁽⁹⁾を提案する。本手法は入力外乱のフィードフォワード情報と制御対象のフィードバック情報を併合した制御系となり、操作量の制限がある状況でも有効な制御が行なえる。そして、履歴型ダンパーなどの非線形特性に対しても、従来のスライディングモード制御と同様のロバスト性能を有している。また、切換超平面の設計においては、外乱の周波数領域を限定する成形フィルタを構築して外乱の動特性を導入し、制御対象のダイナミクスと併合させた拡大系状態方程式から設計を行うので、従来設計と変わることなく簡易である。

本手法の制御性能の有効性に関しては数値計算により検証する。10自由度アクティブ免震を制御対象とし、有色外乱として5種類の地震動に対する構造物振動応答の時刻歴から振動抑制性能を考察する。また、白色雑音を外乱とする振動伝達率より、本手法が高い周波数領域まで振動絶縁が可能であることを示す。

2. 外乱包含スライディングモード制御系の設計

2・1 基礎モデル 本研究では基礎モデルを図1のようなせん断振動のみを考慮した10自由度のアクティブ免震とする。構造物の1次モードの固有振動数を0.25 Hz、減衰比を2%とし、構造物の高さに比例した曲げ振動は考慮していない。上部架構の減衰定数は内部粘性減衰を想定し、第2層以上のみの非減衰自由振動の1次固有振動数に対して2%と設定する。

運動方程式を相対座標系で導出し、基礎モデルを状態方程式に改めると以下ようになる。

$$\dot{\mathbf{x}}_s = \mathbf{A}_s \mathbf{x}_s + \mathbf{B}_{us} \mathbf{u} + \mathbf{B}_{ws} \ddot{z}$$

$$\mathbf{x}_s = [x_{10} \ x_9 \ \cdots \ x_1 \ \dot{x}_{10} \ \cdots \ \dot{x}_1]^T \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

ただし、

$$\mathbf{A}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{10 \times 10} & \mathbf{I}_{10} \\ -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1} \mathbf{C} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{us} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{19 \times 1} \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \\ m_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{ws} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{10 \times 1} \\ -1 \\ \vdots \\ -1 \\ 10 \end{bmatrix}$$

とする。ここで、 x_i は質点の相対変位、 $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ は、それぞれ質量行列、ばね定数行列、減衰係数行列であり、 m_i 、 k_i 、 c_i ($i=1, \cdots, 10$)は、質量、ばね定数、減衰係数を示す。また、 $\mathbf{u}$ は制御入力、 $\ddot{z}$ は外乱の加速度をそれぞれ表す。

2・2 拡大系状態方程式の導出 本節では外乱の動特性を考慮した拡大系システムを導出する。通常の制御器設計においては、前章で述べたように外乱の周波数特性は無視され、単なる白色雑音として扱われること

が多い。しかし、実際の外乱は有色雑音であるため、これを考慮した設計が必要となる。システム外乱が白色雑音でない場合は成形フィルタの概念を用いて拡大システムを考えると結果的に白色雑音の問題として帰着できる。また、実際の建築構造物の振動特性を考えた場合、主な共振ピークは10 Hz未満の周波数領域で現れるのが一般的である。したがって、外乱の周波数を0.1 Hzから10 Hz未満と限定し、制御対象である実構造物の主な共振周波数を含む周波数帯域内で、外乱に対して積極的に制御するような制御系を設計する。これらを踏まえて、本研究では、外乱 w は白色雑音を入力として図2に示すローパス特性を有する成形フィルタによって生成される有色雑音であると仮定する。次式にローパス特性を有する伝達関数、表1に成形フィルタの諸元を示す。

$$\frac{\ddot{z}(s)}{W(s)} = \frac{\omega_d^2}{s^2 + 2\zeta_d \omega_d s + \omega_d^2} \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

また、入力外乱の状態方程式は以下のように表される。

$$\dot{\mathbf{z}}_{dis} = \mathbf{A}_{dis} \mathbf{z}_{dis} + \mathbf{D}_{dis} w \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

$$\mathbf{z}_{dis} = \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \\ \ddot{z} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{dis} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\omega_d^2 & -2\zeta_d \omega_d \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D}_{dis} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_d^2 \end{bmatrix}$$

ここで、 $w(t)$ はスカラーの白色雑音として、以下の様な性質を持つ。ただし、 $E[\cdot]$ は数学的期待値を、 $\delta(\cdot)$ はDiracのDelta関数を表す。

$$E[w(t)] = 0$$

$$E[w(t)w^T(\tau)] = W(t)\delta(t-\tau)$$

以上のことより、式(1)のシステム状態方程式と式(3)の成形フィルタ状態方程式を結合することにより、拡大系の状態方程式は次のようになる。

$$\dot{\mathbf{x}}_m = \mathbf{A}_{sm} \mathbf{x}_m + \mathbf{B}_{usm} \mathbf{u} + \mathbf{B}_{wsm} w \quad \cdots \cdots \cdots (4)$$

$$\mathbf{x}_m = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_s \\ \mathbf{z}_{dis} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{sm} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_s & \mathbf{B}_{ws} \mathbf{C}_{dis} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_{dis} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_{usm} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{us} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{wsm} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{D}_{dis} \end{bmatrix}$$

Fig. 1 10-DOF structure model possessing an active base isolator

上の状態方程式を基礎として、切換超平面の設計およびスライディングモード制御器を導出し、外乱のダイナミクスを包含したスライディングモード制御系を設計する。

2・3 零点を利用する切換超平面の設計 本研究では、この切換変数 S の設計に伝達関数 $S(sI - A_{sm})^{-1} B_{usm}$ の零点を利用する設計法を採用する⁽²⁾。切換超平面を設計するときには、前節で導いた拡大系システムを使い、零点が安定になるような切換変数 S 、つまりシステムが希望のシステム零点を持つような出力行列 S を最適制御理論に基づく制御則 F として選ぶ。求める切換超平面は、

$$S = F = B_{usm}^T P \quad \dots\dots\dots (5)$$

である。ただし、 P は任意の正定行列 Q を与えて、以下の Riccati 方程式の解とする。

$$PA_{sm} + A_{sm}^T P - PB_{usm} B_{usm}^T P + Q = 0 \quad \dots\dots (6)$$

なお切換超平面の設計で Riccati 方程式を解くが、その時の目的関数として最上階の絶対速度を採用し、次式に示す評価関数を用いる⁽⁶⁾。ただし、ここでは定常制御問題として扱う。

$$J(u) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left\{ \int_0^T [\dot{x}^T(t) Q \dot{x}(t) + ru^2(t)] dt \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、

$$Q = c^T c, \quad r = B_{usm}^T c^T c B_{usm}$$

$$c = [0_{1 \times 10} \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0]$$

とする。一般に、絶対速度を評価関数とする場合は絶対系の状態ベクトルでないと表現できない。すなわち、状態変数で表現できない評価関数を設定する場合は、本研究のように外乱を包含した拡大系システムが必要となる。本手法では評価関数を絶対系で表現することが可能となると同時にフィードフォワード制御を併合した制御系が構築できる。また、システム全体を絶対座標

系で表現し、評価関数に絶対速度を取る方法も存在するが、建築構造物を制御対象とする場合、データとして得られた地震動外乱の加速度を速度と変位に変換した後に、制御システムへ入力する必要がある。これは制御を行う過程で、数値計算上の誤差が増加するなどの問題点があり、良い方法であるとは言い難い。したがって、一般に地震動外乱を加速度波形としシステムに入力する場合、系全体を相対座標系で記述して拡大系状態方程式を導出したのち、評価関数に絶対速度を採用する方法が得策だと考えられる。

2・4 外乱包含スライディングモードコントローラの設計 前章で導いた切換超平面を用いて、図3のような外乱包含スライディングモード制御コントローラを設計する。本研究では制御則を切換面 $\sigma_c = Sx_m = 0$ を導くような設計を行なう。その際、リアプノフ関数 V を利用してコントローラを導出する。

$$V = 0.5 \sigma^T \sigma = 0.5 x_m^T S S x_m \quad \dots\dots\dots (8)$$

$V \rightarrow \infty$ において切換面 $\sigma_c = Sx_m = 0$ に収束する条件は

$$\dot{V} = \sigma^T \dot{\sigma} \leq 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

であり、状態方程式

$$\dot{x}_m = A_{sm} x_m + B_{usm} u \quad \dots\dots\dots (10)$$

を用いると次式が得られる。

$$\dot{V} = \lambda(U - G) = \sum_{i=1}^m \lambda_i (u_i - G_i) = \sum_{i=1}^m \dot{V}_i \quad \dots\dots (11)$$

ここに λ^T および G は $m \times 1$ 次元のベクトルで各 i 番目の要素が λ_i , G_i で表される。 u_i は i 番目の制御力である。具体的には

$$\lambda = \lambda^T S B_{usm} \quad G = -(S B_{usm})^{-1} S A_{sm} x_m \quad \dot{V}_i = \lambda_i (u_i - G_i) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$\dot{V} \leq 0$ において、チャタリングの影響が無い連続系制御コントローラを次式のように与える。

$$u_i = G_i - k_i \lambda_i \quad \text{or} \quad U = G - \bar{k} \lambda^T \quad \dots\dots (13)$$

ここで示す $k_i \geq 0$ は切換面からのずれを補正するためのゲインである。また、 $\bar{k}$ は対角要素 $k_1, k_2, \dots, k_r$ から構成

Table. 1 Shaping filter parameters			
state variables z	$\dot{z}$	$\ddot{z}$	$\dddot{z}$
natural frequencies ω (rad/s)	$\omega_d = 5.024$		
damping ratio ζ	$\zeta_s = 0.707$

Fig. 2 Frequency range of disturbance

Fig. 3 Schematic diagram of controller with feedforward link

される対角行列である。式(12)を式(10)に代入すると $\dot{V} = -\sigma^T k \sigma \leq 0$ となる。

そして、さらに式(13)を効果的な制御則とするために以下のようにする。

$$u_i = G_i - k_i \frac{\sigma}{\|\sigma\| + \delta} \quad \dots\dots\dots (14)$$

上式の右辺の第二項は図4のような平滑な関数による非線形項である。 δ は切換面 $\sigma_c = Sx_m = 0$ の境界面の厚さを示し、チャタリング現象を除去するための平滑化定数である。

ここまでは制御器の一般的な設計手順を述べた。しかし、実際には外乱の大きさによってアクチュエータなどの制御力を制限する必要がある。本研究では、このような物理的条件を考慮に入れて制御力を制限する。つまり飽和型の制御器設計について考える⁽⁷⁾。制御系設計で制御対象が建築構造物の場合、非制御であってもシステムの安定性が保たれる。たとえば、一般的な土木・建築構造物は構造減衰のクーロン摩擦や散逸減衰の地下散逸減衰などにより振動が自然減衰する。つまり非制御の状態、 $u_i = 0$ として式(11)と式(12)を次式のように表すことができる。

$$\dot{V}_m = -\lambda_i G_i \quad \dots\dots\dots (15)$$

そのとき、時間 t において $\dot{V}_i \leq \dot{V}_m$ または $\dot{V}_i \leq 0$ を満たすように、制御状態をリアプノフの意味で安定な状況に誘導する、つまり $\dot{V}_i \leq 0$ を得る。これらのことを踏まえて、式(13)と式(14)を以下のように改めて設定する。

$$u_i = \begin{cases} u_i^* & \text{if } |u_i^*| < \bar{u}_{i\max} \\ \bar{u}_{i\max} \operatorname{sgn}[u_i^*] & \text{if } |u_i^*| > \bar{u}_{i\max} \end{cases} \quad (16)$$

$$u_i^* = \alpha_i G_i - k_i \frac{\sigma}{\|\sigma\| + \delta}$$

ここで、 $0 < \alpha_i \leq 1$ として $\pm \bar{u}_{i\max}$ ($i=1,2,\dots,r$) は制御力 u_i の上下限を意味する。また、 α_i と $\bar{u}_{i\max}$ は設計パラメータで、制御性能と構造物応答との間にトレードオフの関係が存在する⁽⁸⁾。式(16)は飽和型制御入力进行を意味することになり、パラメータの仕様ではBang-Bang型の制御

Fig. 4 Smoothing function

器ともなる。

本研究では、以上のような制御系設計をおこなうことで外乱の情報を考慮に入れた制御システムが構築できる。現実的には、アクチュエータの性能を超える指令値が出力される場合が多く、他の制御器では制御力が飽和状態となり、システム不安定から制御性能が低下することがある。しかし、本手法は従来のスライディングモードが有するロバスト性と外乱動特性を考慮に入れた制御器の設計により、振動応答を劣化させることなく制御性能を最大限まで利用できる。

2・5 VSSオブザーバ・スライディングモード制御併合系の設計 本来、すべての状態変数が直接測定可能であればよいが、現実にはそのような状況は少ない。そこで、本研究では制御入力と観測出力から状態変数を推定するために、ロバスト性を有するVSSオブザーバを適用する。なお観測量として、地盤の加速度と構造物第1層の相対変位および構造物第10層の絶対加速度の3つの値を用いる。VSSオブザーバで推定した状態ベクトルを $\hat{x}_s$ とするとオブザーバの切換関数 σ_c は次式で与えられる。

$$\sigma_c = S\hat{x}_m \quad \dots\dots\dots (17)$$

VSSオブザーバとスライディングモード制御併合系は次式のようになる。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{\hat{x}}_m \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_{sm} & 0 \\ KC_{sm} & A_{sm} - KC_{sm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ \hat{x}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{usm} \\ B_{usm} \end{bmatrix} u \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ B_{usm} \end{bmatrix} U + \begin{bmatrix} B_{usm} \\ 0 \end{bmatrix} z \quad \dots\dots\dots (18) \\ U &= -\rho \frac{H(C_{sm}x_m - C_{sm}\hat{x}_m)}{\|H(C_{sm}x_m - C_{sm}\hat{x}_m)\| + \delta_k} \end{aligned}$$

とする。

ここで、 U は非線形入力項、 $\tilde{n}$ は非線形項の大きさを決める係数、 K はカルマンフィルタゲインし、 $H = [I_{1 \times 3}]$ と設定する。平滑化定数 δ_k は、有限の切換速度に起因して発生する高周波振動、すなわちチャタリングの抑制に効果を持つ。また、本稿ではスライディングモードコントローラとVSSオブザーバによるロバスト性を検証のため、次章の3・1で示す解析モデルの履歴特性は観測器設計に考慮していないことを付け加えておく。

3. 数値計算による検討

3・1 解析モデル 本研究では、数値計算の解析モデルに、表2に示すような実建築構造物の慶應義塾大学工学部新棟のパラメータを用いる。

構造物モデルのダイナミクスは次式のようになる。

$$M(\ddot{x} + \ddot{z}) + C\dot{x} + Kx + F_r + F_v u = 0 \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$x_s = [x_{10} \ x_9 \ \dots \ x_1 \ \dot{x}_{10} \ \dots \ \dot{x}_1]^T$$

$$M = \begin{bmatrix} m_{10} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & m_9 & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & m_1 \end{bmatrix}, \quad F_{os} = \begin{bmatrix} 0_{9 \times 1} \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} c_{10} & -c_{10} & \cdots & 0 \\ -c_{10} & c_{10} + c_9 & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & c_2 + c_1 \end{bmatrix}, \quad z = \ddot{z}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_{10} & -k_{10} & \cdots & 0 \\ -k_{10} & k_{10} + k_9 & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & k_2 + k_1 \end{bmatrix}, \quad F_u = \begin{bmatrix} 0_{9 \times 1} \\ 1 \end{bmatrix}$$

ここで, x_i は質点の相対変位で, M, C, K, F_u は, それぞれ質量行列, ばね定数行列, 減衰係数行列, 制御入力行列であり, m_i, k_i, c_i ($i=1, \dots, 10$) は, 質量, ばね定数, 減衰係数を示す. また, u は制御入力, $\ddot{z}$ は外乱の加速度をそれぞれ表す. F_r はヒステリシスの復元力ベクトルを表し, 第1層の運動方程式のみを相対座標系で導出すると以下ようになる.

$$m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{z}) + (c_1 + c_2)\dot{x}_1 - c_2\dot{x}_2 + k_2(x_1 - x_2) + F_r = 0 \quad (20)$$

ただし, $F_r = k_1 x_1 + F_{os}$ とする. k_1, F_{os} の特性は図5に示される.

解析モデルは, 第2章で述べた制御系設計の基礎モデルとは異なり, 等価粘性減衰で近似していない履歴特性, つまり, 図5に示すヒステリシス特性が第1層に挿入されるように設定する. これは実際の免震機構において鉛ダンパやスチールダンパを利用していることを考慮するためである. カー変位関係の履歴ループは除荷剛性および降伏後剛性の2種類ばね定数, ならびに降伏荷重特性値を変化させる. そのときの各パラメータは表3とする. 以上のことより解析モデルを状態方程式に改めると

$$\dot{x}_s = A_s x_s + B_{us} u + B_{ws} z + B_{fs} F_{os} \quad (21)$$

となる. ただし,

$$A_s = \begin{bmatrix} 0_{10 \times 10} & I_{10} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}, \quad B_{us} = \begin{bmatrix} 0_{9 \times 1} \\ 1 \\ m_1 \end{bmatrix}$$

$$B_{ws} = \begin{bmatrix} 0_{10 \times 1} \\ -1_{10 \times 1} \end{bmatrix}, \quad z = \ddot{z}$$

とする.

3・2 構造物応答抑制性能の比較 本研究では3・1節で述べた解析モデル, すなわち第1階層に免震装置を有する10自由度免震構造物による数値計算を行い, 時間領域および周波数領域での比較検討をした. 本節で用いる制御器は外乱包含スライディングモード制御

にVSSオブザーバを併合した制御器(以後DA-SMCとする), 従来のスライディングモード制御器にVSSオブザーバを併合した制御器(以後SMCと表示)の2種類について制御性能を調べる.

図6は神戸地震波, 図7はエルセントロ地震波の時刻歴に対する構造物の応答である. (a) 構造物第10層絶対加速度の時刻歴, (b) 制御入力の時刻歴, (c) 構造物第10層絶対加速度のパワースペクトルである. 図8, 図9は神戸地震波とエルセントロ地震波を外乱としたときの構造物免震層の履歴特性を示している. 図6・7において(a)と(c)から第10層絶対加速度の最大値はDA-SMCがSMCに比べて, 振動応答を約20~30%程度抑制している. 各図(b)は制約のある制御入力を表し, DA-SMCとSMCでは操作量の生成の違いがわかる. また図8と図9は各地震動についてのDA-SMCの履歴特性を示している. この図から制御器には考慮に入っていない不確かな外乱が, 免震層つまり構造物の第1層に入力されており, その外乱は履歴特性を有した非線形特性であることがわかる. このようにシステムに不確定要素が存在した状況でもSMCとDA-SMCは

Table 2 Layer parameters of the structure

Layer	Mass [$\times 10^3$ kg]	Spring constant [$\times 10^6$ N/m]	Coefficient of viscous damping [$\times 10^6$ Ns/m]
1	4981.40	68.20	1.80
2	3438.20	2320.00	12.94
3	2490.60	2820.00	19.71
4	1826.40	2020.00	13.34
5	2033.10	1840.00	11.15
6	2050.00	1850.00	11.05
7	2036.90	1600.00	10.55
8	2037.10	1410.00	10.15
9	2066.40	1180.00	8.48
10	2499.90	1020.00	8.71

Fig. 5 Idealized bilinear curve of LRB

Table 3 Specification of the hysteresis model

	Spring constant [$\times 10^6$ N/m]	Yield strength [$\times 10^4$ N]
k_{1e}	133.67	
k_{1p}	13.37	
F_{os}		588

振動応答を低減できており、また DA-SMC に関しては SMC よりさらに最大加速度を小さくしていることが図 6 と図 7 の各 (a) から確認できる。

図 10 は主な地震波 5 つを外乱とした時の制御性能について検討した結果である。(a) は第 10 層の絶対加速度の最大値、(b) は第 10 層の絶対加速度の r.m.s. 値を示し、各地震波に対する構造物振動応答を表している。いずれの地震波の場合においても、DA-SMC が SMC に比べて抑制性能が勝っている。表 4 は各地震波における相対変位最大値の比較である。2 つの制御器による変位差はあまりなく、DA-SMC が変位量を増加させることなく加速度応答を低減しているのがわかる。

次に白色雑音を外乱としたときの振動伝達率を求める。システムに入力する擬似白色外乱の加振外乱帯域を 0.01 Hz から 100 Hz とし、最大値は中小地震波を想定して $1 \text{ [m/s}^2\text{]}$ と設定した。また、数値計算における刻み時間は 2 ms である。図 11 は制御力の時刻歴を示し、図 12 は振動伝達率である。ここでは SMC と DA-SMC は、それぞれの 1 次の固有周期の応答がほぼ等しくなるように設定して、高周波領域での振動抑制性能の違いを調べた。図中の No Control は天然ゴム系積層ゴムのみを用いた免震構造物、No Isolation は非免震を示す。図 11 は制御入力を示し、各制御器のその最大値が同じであることを確認できる。また、図 12 より、SMC が 1 Hz 以上の周波数帯域において振動応答が上昇してい

るのに対して、DA-SMC では外乱包含の効果により振動伝達率を低減できているのが分かる。

4. おわりに

本研究では外乱包含スライディングモード制御を提案し、従来のスライディングモード制御と比較検討を行うことで本制御手法の有効性を示した。

本手法の特徴は、制御入力にはフィードバックの情報だけでなく、外乱の情報を取り入れたフィードフォワード効果を可能としたことである。従来のスライディングモード制御が有する制御系設計の簡易さや非線形特性を含む不確定性に対するロバスト性を保持しつつ、制御性能を向上させることを本手法では可能とした。数値計算で時間領域と周波数領域の観点から検討し、その結果、あらゆる地震波に対しても従来の制御器に比べて最大値と r.m.s. 値を低減できることを確認した。また 1 次固有モードの減衰率を一定にした同条件下における振動伝達率の結果から、従来のスライディングモード制御のように高周波領域で加速度応答を増幅させることなく、高い制御性能が保持できることを示した。

本手法の有効性は示したが、アクティブ制御であることから基本的にエネルギーを必要とするなどの問題点が残されている。今後の課題としては、セミアクティブシステムへの本手法の応用が考えられる。

Fig. 6 Time-history under the kobe earthquake

Fig. 7 Time-history responses under the El-Centro earthquake

Fig. 8 Hysteresis characteristics responses under the kobe earthquake

Fig. 9 Hysteresis characteristics responses under the El Centro earthquake

Fig. 10 Response comparison under the respective earthquakes

Table. 4 Displacement under the respective earthquakes

	Kobe	El Centro	Hachinohe	Taft	Northridge
DA-SMC	1.99	0.96	0.86	0.75	1.30
SMC	2.96	1.21	1.35	1.02	1.77

Fig. 11 Time histories under white noise

Fig. 12 Vibration Transmissibility

文 献

- (1) 吉田・藤尾, 双線形最適制御理論とセミアクティブ免震制御への応用, 機論, 67-656, C(2001), 96-102.
- (2) 野波・田, スライディングモード制御—非線形ロバスト制御の設計理論—, (1994), コロナ社.
- (3) 美多・大須賀, ロボット制御工学入門, (1989), コロナ社.
- (4) 陳芸峰・美多勉, 適応ロバストスライディングモード制御, 電気学会論文誌 C, 113-3, 1993, 203-210.
- (5) 三東・鈴木・吉田, 免震構造物の外乱包含スライディングモード制御, 第43回自動制御連合会講演会, (2000), 69-70.
- (6) 姜・吉田, アクティブ振動制御における評価関数と制御特性, 機論, 58-552, C (1992), 2373-2380.
- (7) Yang, J. N., Wu, J. C. and Agrawal, A., Sliding Mode Control for Nonlinear and Hysteretic Structure, *Proc. Am. Soc. Civ. Eng., J. Engrg. Mech.*, 121-12, (1995), 1330-1339.
- (8) 三東・大垣・渡辺・吉田, スライディングモード制御によるアクティブ免震システム, 日本機械学会「運動と振動の制御 2000」講演論アブストラクト集, No.00-6 (2000), 30.
- (9) 下平・西村, アクチュエータの制約を考慮したアクティブ免震, 日本機械学会 D & D2001 アブストラクト集, No.01-5 (2001), 121.
- (10) 渡辺・吉田, 地震外乱の特性を考慮したフィードフォワード併合制御手法の振動制御ベンチマークの適用, 日本機械学会 運動と振動の制御シンポジウム公演論文集, No. 99-7 (I) (1999), 51-54.
- (11) 三東・渡辺・吉田, スライディングモードによる構造物のアクティブ免震, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B2 構造—II (1998), 623-624.
- (12) 野波・西村・平田, MATLABによる制御系設計, (1998), 東京電機大学出版局.
- (13) 崔・野波・西村, H^∞ 最適制御による多自由度構造物のアクティブ振動制御 (H^∞ 最適制御と周波数成形LQG制御の比較), 機論, 58-553, C(1999), 2859-2865.