建築構造物に対する構造系とセミアクティブ制御系の統合化設計*

平 元 和 彦^{*1}, 松 岡 太 一^{*2}, 砂子田 勝昭^{*3}
福 喜 多 輝^{*4}, 山 崎 一 生^{*5}Integrated Design of Structural and Semi-Active
Control Systems for Civil StructuresKazuhiko HIRAMOTO^{*6}, Taichi MATSUOKA, Katsuaki SUNAKODA,
Akira FUKUKITA and Issei YAMAZAKI^{*6} Department of Mechanical and Production Engineering, Niigata University,
8050 Ikarashi 2-no-cho, Nishi-ku, Niigata, 950-2181 Japan

In this paper we address an integrated design problem of semi-active controlled civil structures with Vibration Control Device (VCD) that has been developed by authors. A new semi-active control law based on a one-step-ahead prediction of the seismic response is proposed. The VCD generates two types of resistance forces, i. e., a damping force proportional to the relative velocity and an inertial force proportional to the relative acceleration between two stories. The damping coefficient of the VCD can be changed with a command signal to an electric circuit connected to the VCD. In the present paper the command signal for changing the damping coefficient of each VCD is assumed to take two values, i. e., the command to take the maximum or minimum damping coefficient. The optimal command signal is selected from all candidates of command signals so that a norm of the one-step-ahead predicted seismic response, calculated by a numerical integration, is minimized. Under the semi-active control law the stiffness distribution between neighboring two stories of the structure, design parameters of the VCDs and those in the semi-active control are optimized so that the seismic responses subject to various recorded and artificial earthquake waves are optimized. Genetic Algorithm (GA) is adopted for the optimal design. A simulation example of a fifteen-story building with three VCDs is presented. With the proposed integrated design method structural parameters and the semi-active control law that achieve the good control performance have been obtained.

Key Words: Integrated Design of Structural and Control Systems, Semi-Active Control, Civil Structures, Optimal Design, Vibration Control, Vibration Control Device, Damping

1. は じ め に

建築構造物の地震外乱に対する振動抑制手法として、可変減衰特性を有するダンパを用いたセミアクティブ制御が期待されてきている⁽¹⁾。可変減衰特性は、MR流体などの機能性流体で実現され、建築構造物に対する実規模のMRダンパも開発されている⁽²⁾。

近年、著者らはボールねじとフライホイールからなる機構に、発電機を組み合わせた振動制御デバイス(VCD: Vibration Control Device)の開発を行っている^{(3)~(5)}。VCDは、通常のダンパと同様に、構造物の隣接する層間に設置されるが、通常のダンパが発生する

層間速度に比例した減衰抵抗力だけでなく、ボールねじおよびフライホイールからなる機構によって、層間加速度に比例した慣性抵抗力も同時に発生可能であるという特徴を有する。発電機に適当な電気抵抗素子を接続することにより、振動エネルギーを熱エネルギーとして外部に消散可能である。さらに、抵抗器の代わりに接続された電気抵抗の大きさを変化させるような回路を接続する事によって、減衰係数が可変なセミアクティブ制御装置としても利用可能である。著者らは、発電機に流れる電流の大きさを制御するような回路により、見かけ上電気抵抗値が変化するようなシステムを開発し、可変減衰特性を実現している⁽⁵⁾。

一方、建築構造物に対するセミアクティブ制御則として様々なものが提案されてきている^{(6)~(14)}が、現在まで未だ決定的な手法は確立されていない。本論文では、数値積分に基づく応答出力の1ステップ予測値に基づくセミアクティブ手法を提案する。この手法は、

* 原稿受付 2009年9月18日。

^{*1} 正員, 新潟大学工学部(☎950-2181 新潟市西区五十嵐2の町8050)。^{*2} 正員, 明治大学理工学部(☎214-8571 川崎市多摩区東三田1-1-1)。^{*3} フェロー, 秋田大学工学資源学部(☎010-8502 秋田市手形学園町1-1)。^{*4} 正員, 清水建設(株)技術研究所(☎135-8530 東京都江東区越中島3-4-17)。^{*5} 学生員, 秋田大学大学院機械工学専攻。

E-mail: hiramoto@eng.niigata-u.ac.jp

を流れる電流の大きさを変化させることで、モータに接続された抵抗値を見かけ上変化させる機能を持つ電気回路を製作し、可変減衰特性を実現している⁽⁵⁾。指令信号は、設計されるセミアクティブ制御則によって生成される。

2.2 VCD を設置した構造物のモデル n_{VCD} 個の VCD が設置された n 自由度構造物を考え、その運動方程式を次式で定義する。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{D}(t)\dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{q}(t) = \mathbf{a}\ddot{\mathbf{w}}(t) + \mathbf{b}(t)\dot{\mathbf{w}}(t) + \mathbf{c}\mathbf{w}(t), \quad (3)$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_0 + \sum_{i=1}^{n_{VCD}} m_i^{VCD} \mathbf{M}_i, \quad \mathbf{D}(t) = \mathbf{D}_0 + \sum_{i=1}^{n_{VCD}} d_i^{VCD}(t) \mathbf{D}_i, \\ \mathbf{a} = \mathbf{a}_0 + \sum_{i=1}^{n_{VCD}} m_i^{VCD} \mathbf{a}_i, \quad \mathbf{b} = \mathbf{b}_0 + \sum_{i=1}^{n_{VCD}} d_i^{VCD}(t) \mathbf{b}_i$$

$\mathbf{q}(t) = [q_1(t), \dots, q_n(t)]^T \in \mathcal{R}^n$ および $\mathbf{w}(t) \in \mathcal{R}^{n_w}$ は、それぞれ各層絶対変位ベクトルおよび地震外乱変位ベクトルであり、行列 $\mathbf{M}, \mathbf{D}, \mathbf{K} \in \mathcal{S}^n$, $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c} \in \mathcal{R}^{n \times n_w}$ は、それぞれ質量、減衰、剛性および影響係数行列である。行列 $\mathbf{M}_0, \mathbf{D}_0, \mathbf{a}_0, \mathbf{b}_0$ および $\mathbf{c}$ は、構造そのものの質量、減衰および影響係数行列であり、 $\mathbf{M}_i, \mathbf{D}_i, \mathbf{a}_i, \mathbf{b}_i, i = 1, \dots, n_{VCD}$ は、VCD_{*i*} によって加えられる質量、減衰および影響係数行列の変更分である。行列 $\mathbf{D}$ および $\mathbf{b}$ は、VCD の可変減衰特性により、時変行列であることを注意する。式 (3) の状態方程式表現は以下のようになる。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}_x(t) \\ \mathbf{z}(t) = \mathbf{C}_z\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_z\mathbf{u}_z(t) \end{cases}, \quad (4)$$

$$\mathbf{x}(t) := \begin{bmatrix} \mathbf{q}(t) \\ \dot{\mathbf{q}}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_x(t) := \begin{bmatrix} \mathbf{w}(t) \\ \dot{\mathbf{w}}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_z(t) := \begin{bmatrix} \mathbf{w}(t) \\ \dot{\mathbf{w}}(t) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A} := \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times n} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{D} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} := \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times 3n_w} \\ \mathbf{M}^{-1}[\mathbf{c} \mathbf{b} \mathbf{a}] \end{bmatrix}$$

ベクトル $\mathbf{z}(t) \in \mathcal{R}^{n_z}$ は、制御性能を評価するための出力ベクトルであり、各層絶対変位や層間変位などをその要素として考えることができる¹。この出力 $\mathbf{z}(t)$ を用いて、次節で 1 ステップ予測型セミアクティブ制御則を構築する。式 (4) の係数行列 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}_z, \mathbf{D}_z$ は、VCD の可変減衰特性 ($d_i^{VCD}, i = 1, \dots, n_{VCD}$) により、時変行列になりうる事に注意する。本論文では、VCD の減衰係数は、以下の範囲で変化するものと仮定する。

$$\underline{d}_i^{VCD} \leq d_i^{VCD} \leq \overline{d}_i^{VCD}, \quad i = 1, \dots, n_{VCD} \quad (5)$$

ここで、 $\underline{d}_i^{VCD} \geq 0$ および $\overline{d}_i^{VCD} \geq 0$ ($\underline{d}_i^{VCD} \geq \overline{d}_i^{VCD}$) は、VCD_{*i*} の最大および最小減衰係数である。

¹後に示す理由により、加速度は評価に入れないこととする。

3. 予測型セミアクティブ制御

前述の VCD の可変減衰特性を利用して、構造物に対するセミアクティブ制御を行う。本論文では、地震外乱に対する構造系の応答予測値に基づくセミアクティブ制御則を提案する。本制御則は、最適な可変減衰係数の指令値を数値積分法から得られる（一般には微小時間となる）1 ステップ先の構造系の応答予測値から決定する。応答予測値は、センサによって得られる現在のデータから計算することが可能である。設定された減衰係数指令値のすべての組み合わせの候補に対して応答予測値を計算し、その中から、振動抑制性能が最適となるものをリアルタイムに選択する。

VCD の可変減衰係数は、本来式 (5) の範囲内で連続的な値を取りうる。本論文では、提案する予測型セミアクティブ制御における予測や選択に要する時間の短縮と制御則の簡単化のため、VCD への指令信号を次式のような 1 ビット信号に量子化する。

$$d_i^c(t) = \begin{cases} \underline{d}_i^{VCD} \\ \overline{d}_i^{VCD} \end{cases}, \quad i = 1, \dots, n_{VCD} \quad (6)$$

式 (6) の量子化により、 n_{VCD} 個の VCD が取りうる可変減衰係数の組み合わせの総数は $2^{n_{VCD}}$ 個になる。本論文では、それらすべての組み合わせに対し、以下の評価指標が最小となるような減衰係数の組み合わせを最適指令値とする。

$$J_p := \sqrt{\mathbf{z}^T(t_0 + \Delta t) \mathbf{Q}_w \mathbf{z}(t_0 + \Delta t)} \quad (7)$$

ここで、 $t_0, \Delta t > 0$ はそれぞれ現在時刻および予測長さである。さらに、 $\mathbf{Q}_w \geq 0, \mathbf{Q}_w \in \mathcal{S}^{n_z}$ は、評価値 J_p を計算する際の重み行列であり、設計者によって決定可能である。すなわち、本制御則は、式 (6) のすべての組み合わせの中から、現在時刻 t_0 の Δt 後の出力予測値の重みつきユークリッドノルム（式 (7) J_p ）が最小になるような減衰係数指令値を選択するものである。

式 (7) の予測値 $\mathbf{z}(t_0 + \Delta t)$ は、以下の手順で計算できる。式 (4) より、出力予測値 $\mathbf{z}(t_0 + \Delta t)$ の予測のためには、 $\mathbf{x}(t_0 + \Delta t)$ および $\mathbf{u}_z(t_0 + \Delta t)$ が必要になる。そこで、 $\mathbf{u}_z(t_0 + \Delta t)$ を以下のように近似的に求める。

$$\mathbf{u}_z(t_0 + \Delta t) \simeq \mathbf{u}_z(t_0) + \Delta t \dot{\mathbf{u}}_z(t_0) \quad (8)$$

ここで、 $\dot{\mathbf{u}}_z(t_0)$ は、以下の関係を用いて近似的に求められる。

$$\dot{\mathbf{u}}_z(t_0) = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{w}(t_0) \\ \dot{\mathbf{w}}(t_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{w}}(t_0) \\ \ddot{\mathbf{w}}(t_0) \end{bmatrix} \quad (9)$$

実際には、データの有限差分などで微分を近似する必要があり、その場合は適切な信号処理（ノイズ除去）

が必要になる。一方、状態ベクトルの予測値 $\mathbf{x}(t_0 + \Delta t)$ は、以下のように求められる。

$$\mathbf{x}(t_0 + \Delta t) \simeq \mathbf{x}(t_0) + \Delta t \dot{\mathbf{x}}(t_0) \quad (10)$$

ここで、 $\dot{\mathbf{x}}(t_0)$ は、状態方程式 (4) の数値積分を得る過程で求めることができる。数値積分法としては、Euler 法、Runge-Kutta 法など種々の方法を用いることができる。これより、出力予測値 $\mathbf{z}(t_0 + \Delta t)$ は、以下のようになれる。

$$\mathbf{z}(t_0 + \Delta t) \simeq \mathbf{C}\mathbf{x}(t_0 + \Delta t) + \mathbf{D}_z \mathbf{u}_z(t_0 + \Delta t) \quad (11)$$

予測出力値 $\mathbf{z}(t_0 + \Delta t)$ を用いて、式 (7) の評価関数 J_p が計算される。本論文では、式 (6) の量子化の下で、すべての減衰係数の組み合わせ ($2^{n_{VCD}}$ 個) に対して式 (7) J_p を計算し、その値が最小となる可変減衰係数の組み合わせを選択する。なお、加速度の予測値を評価するためには、外乱変位の 3 回微分値が必要となり、前述のような信号処理がなされた場合でも、ノイズの影響から得られる値の信頼性に問題が生ずる可能性が高い。したがって、ここでは出力 $\mathbf{z}(t)$ の要素に各層の加速度が関連する項は入れないこととする。この場合は、外乱予測は式 (9) で十分である。

MR ダンパなど現在利用できるセミアクティブ制御装置と同様に、VCD にも指令信号から減衰係数が変化するまでの間に遅れが存在する。すなわち、VCD の可変減衰係数 $d_i^{VCD}(t)$ は、その指令信号値 $d_i^c(t)$ 、 $i = 1, \dots, n_{VCD}$ に完全に追従できるわけではない。本論文では、VCD の減衰係数指令からの遅れを次式のような 1 次遅れ型と仮定する。

$$\frac{d(d_i^{VCD}(t))}{dt} = -\frac{1}{T_d} d_i^{VCD}(t) + \frac{1}{T_d} d_i^c(t), \quad i = 1, \dots, n_{VCD} \quad (12)$$

ここで、 $T_d > 0$ は時定数である。本論文で提案される予測型セミアクティブ制御においては、式 (12) の遅れを考慮して最適指令値を選択する。

提案するセミアクティブ制御手法では、制御出力のごく近い未来の予測値に基づいて、VCD に対する最適な指令信号をリアルタイムに選択する。予測出力値は、式 (4) の数学モデルを用いて求められる。本手法に限らず、すべてのセミアクティブ制御は、(アクティブ制御とは異なり) エネルギーを外部から投入しないので、モデル化誤差が存在する状況下でも制御系は不安定化せず、その意味ではロバスト安定である。しかし、提案法も含み、モデルベースのセミアクティブ制御手法^{(7)~(13)}の振動抑制性能は、対象の数学モデルの正確さに依存して変化するため、モデルベースのセミ

アクティブ制御手法では、適用される制御則が、(ロバスト安定性ではなく) ある程度のロバスト制御性能を確保しているかどうか問題となる²⁾。

ここでは、提案する予測型セミアクティブ制御手法に、振動抑制性能に関するロバスト性を簡単に持たせることができることを示す。はじめに、式 (6) のように二値に量子化した指令信号のすべての組み合わせを、 $\mathbf{c}_j^{VCD} = [d_1^c(t), \dots, d_{n_{VCD}}^c(t)]^T$, $j = 1, \dots, 2^{n_{VCD}}$ のようにベクトル表記し、指令信号ベクトル $\mathbf{c}_j^{VCD}$ に対応する式 (7) の評価関数の値を $(J_p)_j$, $j = 1, \dots, 2^{n_{VCD}}$ とおく。さらに、 $\mathbf{c}_j^{VCD}$, $j = 1, \dots, 2^{n_{VCD}}$ の中で、すべての VCD に対して最大減衰 $\bar{d}_i^{VCD}$, $i = 1, \dots, n_{VCD}$ を取らせるような指令信号ベクトルを $\mathbf{c}_{\max}^{VCD} = [\bar{d}_1^{VCD}, \dots, \bar{d}_{n_{VCD}}^{VCD}]^T$ と対応する評価関数値を $(J_p)_{\max}$ と定義する。本セミアクティブ制御においては、指令信号ベクトル $\mathbf{c}_j^{VCD}$ から、制御出力ベクトルの予測値 $\mathbf{z}_j(t_0 + \Delta t)$, $(J_p)_j$, $j = 1, \dots, 2^{n_{VCD}}$ を計算する。通常では、 $(J_p)_j$ が最小になるような $\mathbf{c}_j^{VCD}$ がリアルタイムに選択されるが、ここでは、制御系にロバスト性を持たせるための一手法として、スカラー α ($0 \leq \alpha < 1$) に対し、 $(J_p)_{\max}$ を $\alpha(J_p)_{\max}$ とおき直した上で、上記の指令信号のリアルタイム選択を行う方法を提案する。この設定の下で α を小さくしていくと、選択の過程で指令信号 $\mathbf{c}_{\max}^{VCD}$ に対する評価値 $(J_p)_{\max}$ は実際より $1/\alpha$ 倍過大評価されるため、指令信号 $\mathbf{c}_{\max}^{VCD}$ が選択される確率はより高くなる。 $\mathbf{c}_{\max}^{VCD}$ が選択される確率が高まれば、振動抑制性能は、最大減衰固定時 (すべての VCD の可変減衰係数を、その最大値 $\bar{d}_i^{VCD}$, $i = 1, \dots, n_{VCD}$ に常に固定した場合) に近づいていく。理論的には、 $\alpha = 0$ で、本予測型セミアクティブ制御アルゴリズムは最大減衰固定時と完全に同一になるが、実際には、ある値を境にして常に $\mathbf{c}_{\max}^{VCD}$ が選択される事になると考えられる。一般に、可変減衰デバイスを用いたセミアクティブ振動制御においては、可変減衰係数の最大値 $\bar{d}_i^{VCD}$, $i = 1, \dots, n_{VCD}$ は特に問題となっている振動モード (建築構造物では 1 次モードの場合が多い) の減衰が十分に確保されるように選択され、さらに、最大減衰時の性能は、構造系の数学モデルに依存せずに発揮可能であることに注意すると、本セミアクティブ制御則は、スカラー α の値を調整するだけで、制御系の性能を最大減衰時のそれに任意に近づけることができる (ロバスト制御性能を確保できる) という点で、従来のモデルベースのセミアクティブ手法より優れていると言える。

²⁾この考察はすべてのモデルベースのセミアクティブ制御において成立するが、(著者らの知る限り) 現在までに提案されているモデルベースのセミアクティブ制御系の振動抑制性能のロバスト制御性能について、陽に議論された研究報告例は存在しない。

4. 統合化設計

3節でのセミアクティブ制御則の下で，統合化設計を行う．構造系の設計変数を，層間剛性 $k_i, i=1, \dots, n$ と，VCD の等価慣性質量 m_i^{VCD} ，可変減衰の最大減衰係数 $\bar{d}_i^{VCD}, i=1, \dots, n_{VCD}$ と定義する．これらの設計変数は，以下の範囲で調整可能であるとする．

$$(k_i)_l \leq k_i \leq (k_i)_u, i=1, \dots, n \quad (13)$$

$$(m_i^{VCD})_l \leq m_i^{VCD} \leq (m_i^{VCD})_u, i=1, \dots, n_{VCD}, \quad (14)$$

$$(\bar{d}_i^{VCD})_l \leq \bar{d}_i^{VCD} \leq (\bar{d}_i^{VCD})_u, i=1, \dots, n_{VCD} \quad (15)$$

ここで，下付文字 u, l は，設計変数それぞれの上下限を表し，それらの上下限値は，設計者によって設定される．制御系の設計変数として，式(7)中の重み $\mathbf{Q}_w \geq 0$ を対角行列としたときの対角要素 $[\mathbf{Q}_w]_{ii}, i=1, \dots, n_z$ を考える． $[\mathbf{Q}_w]_{ii}, i=1, \dots, n_z$ にも，以下のような上下限からなる不等式条件を設定する．

$$0 \leq ([\mathbf{Q}_w]_{ii})_l \leq [\mathbf{Q}_w]_{ii} \leq ([\mathbf{Q}_w]_{ii})_u \quad (16)$$

統合化設計問題を，種々の記録された地震波や，人工地震波に対する応答出力から計算される次式の評価関数 J を最適化するような設計変数を求める問題と定式化する．

$$J = \lambda J^s + (1 - \lambda) J^h, 0 < \lambda < 1, \quad (17)$$

$$J^s = \sum_{i=1}^{n_e} J_i^s, J_i^s = \sum_{j=1}^4 g_i^j (J_i^s)_j, g_i^j \geq 0, \quad (18)$$

$$i=1, \dots, n_e, j=1, \dots, 4,$$

$$(J_i^s)_1 = \sum_{k=1}^n \left(\frac{\text{RMS}(^s r_k^i(t))}{\text{RMS}(^h r_k^i(t))} \right), \quad (19)$$

$$(J_i^s)_2 = \sum_{k=1}^n \left(\frac{\text{RMS}(^s a_k^i(t))}{\text{RMS}(^h a_k^i(t))} \right), \quad (20)$$

$$(J_i^s)_3 = \sum_{k=1}^n \left(\frac{\max_{0 \leq t \leq T_f^i} |^s r_k^i(t)|}{\max_{0 \leq t \leq T_f^i} |^h r_k^i(t)|} \right), \quad (21)$$

$$(J_i^s)_4 = \sum_{k=1}^n \left(\frac{\max_{0 \leq t \leq T_f^i} |^s a_k^i(t)|}{\max_{0 \leq t \leq T_f^i} |^h a_k^i(t)|} \right), \quad (22)$$

$$J^h = \sum_{i=1}^{n_e} J_i^h, J_i^h = \sum_{j=1}^4 h_i^j (J_i^h)_j, h_i^j \geq 0, \quad (23)$$

$$(J_i^h)_1 = \sum_{k=1}^n \left(\frac{\text{RMS}(^h r_k^i(t))}{\text{RMS}(^0 r_k^i(t))} \right), \quad (24)$$

$$(J_i^h)_2 = \sum_{k=1}^n \left(\frac{\text{RMS}(^h a_k^i(t))}{\text{RMS}(^0 a_k^i(t))} \right), \quad (25)$$

$$(J_i^h)_3 = \sum_{k=1}^n \left(\frac{\max_{0 \leq t \leq T_f^i} |^h r_k^i(t)|}{\max_{0 \leq t \leq T_f^i} |^0 r_k^i(t)|} \right), \quad (26)$$

$$(J_i^h)_4 = \sum_{k=1}^n \left(\frac{\max_{0 \leq t \leq T_f^i} |^h a_k^i(t)|}{\max_{0 \leq t \leq T_f^i} |^0 a_k^i(t)|} \right) \quad (27)$$

ここで， n_e は，最適化において応答を計算する地震波の数である． r_k^i, a_k^i および $T_f^i, i=1, \dots, n_e$ は，それぞれ $k-(k-1)$ 層間変位， k 層絶対加速度および i 番目の地震波の継続時間である．上付き文字 $s, h, 0$ は，セミアクティブ制御を行った場合，最大減衰固定時および VCD 未設置時を表す．また， $0 < \lambda < 1, g_i^j \geq 0, h_i^j \geq 0, i=1, \dots, n_e, j=1, \dots, 4$ は，各評価間の重要度を設計者が決定するための重みである．

評価関数 J のうち， J^s の構成要素 $J_i^s, i=1, \dots, n_e$ は，番号付けられた地震波 i に対して，構造に VCD を設置したときの各層層間変位および絶対加速度の RMS 値やピーク値をセミアクティブ制御時と最大減衰固定時で計算し，それらの比を取ってから各層で総和を取ったもの(式(19)-(22))の重み付和である．したがって， $J_i^s, i=1, \dots, n_e$ が小さければ， i 番目の地震波に対し，VCD を設置した場合において，セミアクティブ制御を行ったときの最大減衰固定時に対する性能改善の度合は大きいといえる(セミアクティブ制御の効果が大きい)．また， J^h の構成要素 $J_i^h, i=1, \dots, n_e$ は，同様の量を最大減衰固定時と VCD 未設置時で求め，両者の比を取って各層総和を計算したものである． $J_i^h, i=1, \dots, n_e$ を小さくすることは，地震波 i に対して VCD を設置し，減衰係数を最大値に固定した場合の性能改善の度合を VCD 未設置時を基準として大きくすることを意味する．式(17)の評価関数 J は，最大減衰固定時に対するセミアクティブ制御の効果を表す J^s と，VCD 未設置時に対する VCD を設置した最大減衰固定時の効果を表す J^h の重み付和であり， J を小さくするような最適設計を行うことで，VCD を設置すること自体の効果と，VCD を用いたセミアクティブ制御の効果の両方の目的を考慮した設計を行うことができる．

本最適化問題は，提案する切替を伴う予測型制御則の性質や評価関数の形から，評価関数と設計変数の関係を陽に記述することができない．したがって，定式化された最適設計問題を(一般に収束性や効率に関して良好な性質を持つ)傾斜法を用いて解く場合，解を得るために必要となる評価関数の設計変数に関する感度は，設計変数値を微小変動させて求められた評価値を用いて，有限差分を計算することでしか求めることができない．このため，本節で設定された最適設計問題のように，設計変数の数が比較的多く，応答計算のためのシミュレーションを多数回行う必要がある場合，感度を求めるための計算量は膨大となり，傾斜法の適用は困難となる．本論文では，定式化された統合化設

Fig. 3 Fifteen story building with 3-VCDs

Table 1 Nominal structural parameters of the fifteen story building ($i = 1, \dots, 15$)

Story	$m_i \times 10^3$ [kg]	$k_i \times 10^6$ [N/m]
15	882	291
14	470	294
13	470	305
12	470	313
11	470	352
10	480	412
9	485	427
8	485	435
7	485	448
6	485	483
5	500	544
4	505	561
3	505	580
2	505	644
1	900	1098

計問題の最適化手法として、感度情報を必要としない手法の一つで、種々の問題に対してその有効性が示されている遺伝的アルゴリズム (GA) を用いる。

5. 設計例

設計例として、図3に示すような3つのVCDを設置した15階建ての構造物を考える。各層質量、層間剛性 $m_i, k_i, i = 1, \dots, n$ のノミナル値を表1に示す。式(3)の構造減衰は、比例減衰 $\mathbf{D}_0 = \beta \mathbf{K}$ ($\beta > 0$) を仮定し、比例定数 β は、1次モードの減衰が約2%となるように、 $\beta = 0.01$ とした。RC構造を前提とすると、本設計例のような高層の構造物に関するこの設定は標準的である。3つのVCDの設計変数ノミナル値を、それぞれ

$$m_j^{VCD} = 9.0 \times 10^6 [\text{kg}], \quad \overline{d_j^{VCD}} = 3.6 \times 10^7 [\text{Ns/m}], \\ \underline{d_j^{VCD}} = 0, \quad j = 1, 2, 3$$

Fig. 4 Nominal and optimal stiffness parameters

Fig. 5 Optimal control design parameters

とした。設計変数である構造の層間剛性 $k_i, i = 1, \dots, n$ VCDの等価慣性質量 m_j^{VCD} , 最大減衰係数 $\overline{d_j^{VCD}}$, $j = 1, \dots, n_{VCD}$ の上下限值 (式(13)-(15)) は、それぞれ上記ノミナル値の2倍、0.5倍とする。予測に用いる $\mathbf{z}(t)$ (式(4)) の成分として、各層絶対変位、速度、層間変位および速度を考える。なお、VCDの指令に対する応答遅れを表す式(12)の時定数は、 $T_d = 0.02$ とした。

制御系設計変数である式(7)中の重み行列 $\mathbf{Q}_w$ の対角要素の数は、それぞれ相対変位 (15個)、相対速度 (15個)、絶対変位 (15個)、絶対速度 (15個) の計60個であるが、数が非常に多くなるため、ここでは行列 $\mathbf{Q}_w$ の対角要素が、相対変位、速度、絶対変位、速度のすべてにおいて低層階 (1-5階)、中層階 (6-10階)、高層階 (11-15階) で同じ値を取ると仮定する。したがって、制御系設計変数の数は $60/5 = 12$ 個になる。それらの対角要素の上下限は、1および0とした。最適化において応答計算を行う地震波として、加速度ピーク値 (PGA) を $4.0 [\text{m/s}^2]$ に正規化した El Centro NS (1940) 波、BCJL1 波、Hachinohe NS (1968) 波、JMA Kobe NS (1995) 波を用い、順に式(17)における $i = 1, 2, 3, 4$ ($n_e = 4$) と割り当てる。

統合化設計の結果を図4, 5および表2に示す。結果の有用性を検証するため、地震波を最適設計には用いていない BCJL2 波としたときの各層の応答の RMS 値、ピーク値を図6, 7に示す。ここで、凡例は、NC:

Table 2 Nominal and optimal design parameters of VCDs

Design parameter [Unit]	Nominal	Optimal
m_1^{VCD} [kg]	9.00×10^6	5.04×10^6
m_2^{VCD} [kg]	9.00×10^6	4.78×10^6
m_3^{VCD} [kg]	9.00×10^6	4.78×10^6
d_1^{VCD} [Ns/m]	3.60×10^7	6.79×10^7
d_2^{VCD} [Ns/m]	3.60×10^7	6.78×10^7
d_3^{VCD} [Ns/m]	3.60×10^7	7.04×10^7

VCD 未設置時, HD: 最大減衰固定時, SA: 提案する予測型セミアクティブ制御を行った場合, Energy-based SA: VCD 設置時に, Gavin によって提案された二値切替型セミアクティブ制御を適用した場合⁽⁸⁾を意味し, 括弧内の Nom. str. と Opt. str. は, それぞれノミナル時および統合化設計後を表す。これらの結果から, 以下が言える。

1. ノミナル時および統合化設計後のいずれにおいても, VCD 設置によって, 地震波に対する応答出力は, 相対変位, 絶対加速度両方で小さくなっている。これは, VCD の振動制御デバイスとしての有用性を示している。
2. 統合化設計によって, VCD 設置後の層間変位や絶対加速度は, HD 時, SA 時ともにノミナル時と比較して (特に中層階以上において) 大幅に改善されている。
3. 層間剛性は, VCD を設置した 1-3 階でノミナル時と比較して低くなっている一方, それ以上の階層では高くなっている。これは, 統合化設計によって, 低層階に変形を集中させるとともに, 中層階以上の剛性を高めることで変形や振動を抑えるいわゆるソフトストーリー型の構造⁽¹⁷⁾が結果的に得られたことを意味している。一方, 構造のソフトストーリー化で大きくなる低層階の層間変位は, VCD やそれを用いたセミアクティブ制御によって抑制されている。
4. 図 6, 7 より, 統合化設計された後の構造系に対して, Gavin らのセミアクティブ制御手法³ (Energy-based SA (Opt. str.)) を適用しても, 最適構造の最大減衰固定時 (HD (Opt. str.)) との比較の意味で, 提案するセミアクティブ手法 (SA (Opt. str.)) より良い性能は得られない。この結果は, 適用される制御則を考慮して構造系を設計する統合化設計の重要性を示している。

以上のシミュレーション結果から, 本論文で提案す

る予測型セミアクティブ制御を前提とした構造系と制御系の統合化設計の有効性が示された。

6. お わ り に

著者らによって開発中であるボールねじ, フライホイールおよび発電機からなる振動制御デバイス (VCD) を用いた建築構造物に対するセミアクティブ制御系の統合化設計問題を検討した。出力の 1 ステップ予測値に基づくセミアクティブ制御則を提案した。この制御則を前提として, 建築構造物の層間剛性分布, VCD の設計変数からなる構造系パラメータおよびセミアクティブ制御に現れる制御系設計変数を, GA を用いて同時に最適設計した。15 階建ての構造物に対してシミュレーションを行い, 提案手法の有用性を示した。今後の課題として, 以下を挙げる。

- 現在製作中の実規模 VCD を用いた実規模構造物に対する振動制御実験
- 3 節で述べた制御系のロバスト制御性能確保に関する検証
- VCD の構造物への配置も考慮した統合化設計

文 献

- (1) Casciati, F., Magonette, G. and Marazzi, F., *Technology of Semiactive Devices and Application in Vibration Mitigation*, (2006) John Wiley & Sons Ltd.
- (2) Sodeyama, H., Suzuki, K. and Sunakoda, K., Development of Large Capacity Semi-active Seismic Damper using Magneto-rheological Fluid, *Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 126, No. 1 (1997) pp.105-109.
- (3) Sunakoda, K., Matsuoka, T., Hiramoto, K. and Fukukita, A., Electromagnetic Vibration Control Device Applicable to Twin Mode of Semiactive and Passive Types, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 75, No. 758 (2009), in press.
- (4) Ohtake, T., Sunakoda, K. and Matsuoka, T. Study on Vibration Control Device Using Power Generator, *Proc. ASME PVP 2006, #PVP2006-ICPVT-11-93534* in CD-ROM (2006).
- (5) Matsuoka, T., Sunakoda, K., Hiramoto, K. and Ohtake, T., Study on Vibration Control Device Using Power Generator, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 73, No. 735 (2007), pp.2926-2931.
- (6) Karnopp, D., Crosby, M.J. and Harwood, R.A., Vibration Control Using Semi-active Force Generator, *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry*, Vol. 96 (1974), pp. 619-626.
- (7) Dyke, S.J., Spencer, Jr., B.F., Sain M.K. and Carlson J.D., Modeling and Control of Magnetorheological Dampers for Seismic Response Reduction, *Smart Materials and Structures*, Vol. 5 (1996), pp. 565-575.
- (8) Gavin H.P., Control of Seismically Excited Vibration Using Electrorheological Materials and Lyapunov Methods,

³この手法でも, セミアクティブ制御において減衰係数指令値は最大値/最小値の二値で切り替わる事に注意する。

Fig. 6 RMS values of relative displacement and absolute acceleration

Fig. 7 Peak values of relative displacement and absolute acceleration

IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 9 (2001), pp. 27-36.

- (9) Tanaka, T., Watanabe, T. and Seto, K., Semi-active Control Strategy with Nonlinear Predictive Control and Development of MR Damper with Expanded Variable Damping Region, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 72, No. 714 (2006), pp. 340-346.
- (10) Sato, E. and Fujita T., Semi-Active Seismic Isolation System with Controllable Viscous Dampers Using Magneto-Rheological Fluid, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 72, No. 717 (2006), pp. 1428-1434.
- (11) Inoue, N., Watakabe, M., Nishimura, H., Ryujin, H., Nakasone, J. and Nakamura, Y., Response Control Performance of Semi-active Isolation System Using the GS Control for a Two-degree-of-freedom Structure with Magneto-rheological Fluid Damper, *Journal of Structural and Construction Engineering*, No. 609 (2006), pp. 57-64.
- (12) Hiramoto, K., Matsuoka and Sunakoda, K., Design of a Bang-bang Type Semi-active Control System Based on the Theory of Dissipative Systems, *Journal of Structural and Construction Engineering*, No. 621 (2007) pp. 33-39.
- (13) Shook, D.A., Roschke, P.N., Lin, P.Y. and Loh, C.H., Semi-active Control of a Torsionally-responsive Structure, *Engineering Structures*, Vol. 31, (2009), pp. 57-68.
- (14) Fukukita, A., Takahashi, M. and Yoshida, K., Semi-Active Control for Isolated Structure Using Variable Damping Device Based on Response Evaluator of System, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 75, No. 752 (2009), pp. 865-873.
- (15) Hiramoto, K., Matsuoka, T., Sunakoda, K., Fukukita, A. and Yamazaki, I., Semi-active Control of Civil Structures with a One-step-ahead Prediction of the Seismic Response, *Proc. ASME PVP 2009*, #PVP2009-77637, in CD-ROM (2009).
- (16) Hiramoto, K. and Grigoriadis, K.M., Integrated Design of Structural and Control Systems with a Homotopy Like Iterative Method, *International Journal of Control*, Vol. 79, No. 9 (2006), pp. 1062-1073.
- (17) Iwata, N., Hama, T. and Soda, S., Seismic Control of the Soft-first-story Building by Shifting Method in Sliding Mode Control, *Journal of Structural and Construction Engineering*, No. 816 (1999), pp. 83-90.