132 建築構造物を対象とした構造系とセミアクティブ制御系の統合化設計

Integrated Design of Structural and Semi-active Control Systems for Civil Structures

○正 平元 和彦 (秋田大) 正 松岡 太一 (秋田大) フェロー 砂子田 勝昭 (秋田大)
正 福喜多 輝 (清水建設) 学 山崎 一生 (秋田大院)

Kazuhiko HIRAMOTO, Akita University 1-1 Tegata-gakuen-machi, Akita 010-8502

Taichi MATSUOKA, Akita University

Katsuaki SUNAKODA, Akita University

Akira FUKUKITA, Institute of Technology, Shimizu Corporation

Issei YAMAZAKI, Graduate School of Akita University

In this report we address an integrated design of a 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 vibration control device (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 the stiffness distribution between neighboring two stories and design parameters of VCDs are optimized so that the seismic responses subject to various recorded or artificial earthquake waves are optimized. Simulated annealing method is adopted for the optimization method. A simulation example for a fifteen-story building with three VCD's is presented.

Key Words : VCD (Vibration Control Device), Semi-active control, Civil structures, Predictive method

A1 概要

著者らによって開発中の減衰係数可変の振動制御装置 (VCD: Vibration Control Device) を用いて, セミアクティブ制御を前提とした建築構造物の統合化設計を行う。

VCD は, 図 A1 に示されるような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機構となっており, 隣接層間の層間加速度に比例した慣性抵抗力と, 層間速度に比例した減衰抵抗力の両者を発生可能である。発電機には, 発電機内を流れる電流の大きさを外部指令電圧によって調整可能な電気回路が接続されており, 指令信号電圧を変更する事により, VCD の減衰係数をリアルタイムに調整可能である。VCD の可変減衰機能を用いて, 地震外乱による応答の予測値から計算できる評価指標を最適化するようなセミアクティブ制御系を構成する。このセミアクティブ制御を前提に, 構造物の各層間の剛性分布と予測型制御を行う際に用いる重みを最適化する統合化設計を行い, 地震外乱に対する振動抑制性能の最適化を行う。実際の地震波に対する構造応答に基づいて統合化設計を行うため, 過去に記録された地震波や, 人工地震波を外乱とし, セミアクティブ制御を行ったときの応答出力を用いて性能評価を行う。最適化手法として, 擬似焼きなまし (SA: Simulated annealing) 法を採用する。

A2 シミュレーション結果

図 A2 に示されるような 15 階建構造物に 3 つの VCD を設置した構造に対して, 統合化設計を行う。最適化には, 加速度ピーク値 (PGA) を $4.0 [\text{m/s}^2]$ と正規化した ElCentro NS (1949) 波, Hachinohe NS (1968) 波, JMA Kobe NS (1995) 波および人工地震波である BCJL1 波を用いた。性能の確認のため, 最適化に使用していない BCJL2 波に対する相対変位および各層絶対加速度の RMS 値を図 A3 に示す。地震外乱に対する構造応答を低減することができた。また, 提案するセミアクティブ制御の有効性も合わせて示された。

Fig. A1: Assembly of the VCD

Fig. A2: Fifteen story building with 3-VCDs

Fig. A3: RMS values of relative displacement and absolute acceleration for BCJL2 wave

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。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きている [1]。

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抑制デバイス (VCD: Vibration Control Device) の開発を行っている [2, 3]。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だけでなく、ボールねじとフライホイール機構によって、層間相対加速度に比例した慣性抵抗も同時に発生可能であるという特徴を有する。発電機に適切な電気抵抗素子を接続することで、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、可変減衰特性を表現している。

セミアクティブ制御手法として、今まで様々なものが提案されてきているが、本報告では、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手法を提案する。この手法は、単純ではあるが、従来多く用いられている手法である“規範となるアクティブ制御則 (例: スカイフック制御, 最適レギュレータなど) が発生する制御力を可能な限り模擬するような減衰係数指令値を生成する手法”と比べ、減衰係数がある範囲で可変であるという特性を前提として、振動抑制性能を直接最適化することが可能であり、著者らによってその有用性がシミュレーションレベルで示されている [4]。

本報告では、前述の 1 ステップ予測値に基づくセミアクティブ制御を前提に、構造系の剛性分布と、VCD のパラメータ (慣性質量および可変減衰係数の最大値) の最適設計を行う。振動制御問題に対する従来の統合化設計では、制御則はアクチュエータを有するアクティブ制御であり、制御対象の設計パラメータである構造系の質量、減衰、剛性特性やセンサ・アクチュエータ配置が、そのアクティブ制御を前提として最適設計されていた。この意味で、本研究は従来の統合化設計をセミアクティブ制御に拡張したものであるといえる。

本予測型手法も含むセミアクティブ制御則を用いて統合化設計を行う場合、セミアクティブ制御が減衰係数の調整によって行われることにより必ず現れる制御の非線形性などのため、従来提案されている線形制御則を前提とした傾斜法や BMI の LMI への近似等の収束性がある程度確保される統合化設計手法は適用が困難になる。本報告では、決定論的な意味での収束性は保証できないが、種々の最適化問題に対してその有用性が示されているメタヒューリスティクス手法の一つである擬似焼きなまし (SA: Simulated annealing) 法を用いて最適設計を行う。種々の記録された地震波または人口地震波に対しセミアクティブ制御を実行して求められる応答出力を用いて、建築構造物の振動抑制性能を評価する際多く用いられる評価指標を最適化する。15 階建ての構造物に VCD を設置した設計例を検討し、シミュレーションを行う。

本報告の構成は、以下の通りである。第 2 節では、VCD を設置した構造物の数学モデルを示す。第 3 節で、本報告で用いる予測型セミアクティブ制御則について説明する。第 4 節では統合化設計手法を示し、第 5 節で 15 階構造の例題に提案手法を適用し、その有効性を示す。第 6 節で本報告のまとめを行う。

本報告で用いる記号は以下の通り。 t : 時刻, $\mathcal{R}^m$: m 次元実

Fig. 1: Schematic Diagram of the VCD

Fig. 2: Assembly of the VCD

ベクトルの集合, $\mathcal{R}^{m \times n}$: $m \times n$ 実行列の集合, A^T : 行列 A の転置, $\text{RMS}(a(t)) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T b^2(t) dt}$: 区間 $[0, T]$ での信号 $b(t)$ の RMS 値。

2 構造系のモデル

2.1 VCD の作動原理

VCD のモデル図を図 1 に示す。VCD は、通常のダンパと同様に、構造物の隣接する 2 つの階層間に設置される。図 1 において、 $q_i(t)$, m_i^{VCD} and $d_i^{VCD}(t)$ は、それぞれ i 層絶対変位, i 番目の VCD (VCD_i) の等価慣性質量および可変減衰係数である。隣接 2 層の相対運動により、 VCD_i が発生する抵抗力 $f_i^{VCD}(t)$ は、以下のようである。

$$f_i^{VCD}(t) = m_i^{VCD}(\ddot{q}_i(t) - \ddot{q}_{i-1}(t)) + d_i^{VCD}(t)(\dot{q}_i(t) - \dot{q}_{i-1}(t)) \quad (1)$$

著者らは、式 (1) のような抵抗力特性を有する VCD を開発している [2, 3]。その組立図を図 2 に示す。VCD は、ボールねじ、フライホイール、モータおよびそれに接続される電気回路から構成されている。ボールねじとフライホイールからなる機構は、2 層間の相対加速度に比例した慣性力を発生する。可変減衰特性は、モータに接続された電気回路によって実現される。この電気回路は、外部からの指令信号に応じて、回路内を流れる電流の大きさを (許容範囲内で) 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。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 が設置された構造物を考える。それぞれの VCD の等価慣性質量および可変減衰係数を m_i^{VCD} , $d_i^{VCD}(t)$ ($i = 1, \dots, n_{VCD}$) とする。構造物の運動方程式は次式で表される。

$$M\ddot{q}(t) + D(t)\dot{q}(t) + Kq(t) = a\ddot{w}(t) + b(t)\dot{w}(t) + cw(t), \quad (2)$$

$$M = M_0 + \sum_{i=1}^{n_{VCD}} m_i^{VCD} M_i, \quad D(t) = D_0 + \sum_{i=1}^{n_{VCD}} d_i^{VCD}(t) D_i,$$

$$a = a_0 + \sum_{i=1}^{n_{VCD}} m_i^{VCD} a_i, \quad b = b_0 + \sum_{i=1}^{n_{VCD}} d_i^{VCD}(t) b_i,$$

$q(t) = [q_1(t), \dots, q_n(t)]^T \in \mathcal{R}^n$ および $w(t) \in \mathcal{R}^{n_w}$ は、それぞれ各層絶対変位ベクトルおよび外乱ベクトルであり、行列 $M, D, K \in \mathcal{S}^n$, $a, b, c \in \mathcal{R}^{n \times n_w}$ 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 M_0, D_0, a_0 および b_0 は、構造そのものの質量、減衰および影響係数行列であり、 $M_i, D_i, a_i, b_i, i = 1, \dots, n_{VCD}$ は、 i 番目の VCD 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 D および b_1 は、VCD の可変減衰特性により、時変行列であることに注意する。式 (2) の状態方程式表現は以下になる。

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu_x(t) \\ z(t) = C_z x(t) + D_z u_z(t) \end{cases}, \quad (3)$$

$$x(t) := \begin{bmatrix} q(t) \\ \dot{q}(t) \end{bmatrix}, u_x(t) := \begin{bmatrix} w(t) \\ \dot{w}(t) \end{bmatrix}, u_z(t) := \begin{bmatrix} w(t) \\ \dot{w}(t) \end{bmatrix},$$

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

ベクトル $z(t) \in \mathcal{R}^{n_z}$ 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 $z(t)$ 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 (3) の係数行列 A, B, C_z, 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。本報告では、VCD の減衰係数は、以下の範囲で変化するものと仮定する。

$$\underline{d_i^{VCD}} \leq d_i^{VCD} \leq \overline{d_i^{VCD}}, i = 1, \dots, n_{VCD} \quad (4)$$

ここで、 $\overline{d_i^{VCD}} \geq 0$ および $\underline{d_i^{VCD}} \geq 0$ ($\overline{d_i^{VCD}} \geq \underline{d_i^{VCD}}$) は、それぞれ i 番目の VCD の最大および最小減衰係数である。

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。本報告では、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による（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ものである。応答予測値は、センサによって得られる現在のデータと外乱の予測値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、その中で定義された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 の可変減衰は、本来式 (4) のような連続的な値を取りうる。本報告では、提案する予測型セミアクティブ制御における予測に要する時間の短縮と制御則の簡単化のため、VCD への指令信号を次のような 1 ビット信号に量子化する。

$$d_i^c(t) = \begin{cases} \overline{d_i^{VCD}} \\ \underline{d_i^{VCD}} \end{cases}, i = 1, \dots, n_{VCD} \quad (5)$$

式 (5) 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数は $2^{n_{VCD}}$ 個になる。本報告では、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。

$$J_p := \sqrt{z^T(t_0 + \Delta t) Q_w z(t_0 + \Delta t)} \quad (6)$$

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、 $Q_d \geq 0, Q_d \in S^{n_z}$ は、評価値 J_p を計算する際、その成分を重視するかを決定する重み行列であり、設計者によって決定可能である。すなわち、本制御則は、式 (5) 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 (6) の予測値 $z(t_0 + \Delta t)$ は、以下の手順で計算できる。式 (3) より、出力予測値 $z(t_0 + \Delta t)$ の予測のためには、 $x(t_0 + \Delta t)$ およ

び $u_z(t_0 + \Delta t)$ が必要になる。そこで、 $u_z(t_0 + \Delta t)$ を以下のように近似的に求める。

$$u_z(t_0 + \Delta t) \simeq u_z(t_0) + \Delta t \dot{u}_z(t_0) \quad (7)$$

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

$$\dot{u}_z(t_0) = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} w(t_0) \\ \dot{w}(t_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{w}(t_0) \\ \ddot{w}(t_0) \end{bmatrix} \quad (8)$$

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。これより、状態ベクトルの予測値 $x(t_0 + \Delta t)$ は、以下のように求められる。

$$x(t_0 + \Delta t) \simeq x(t_0) + \Delta t \dot{x}(t_0) \quad (9)$$

ここで、 $\dot{x}(t_0)$ は、状態方程式 (3) の数値積分によって求められる。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出来る。これより、出力予測値 $z(t_0 + \Delta t)$ は、以下のように得られる。

$$z(t_0 + \Delta t) \simeq Cx(t_0 + \Delta t) + D_z u_z(t_0 + \Delta t), \quad (10)$$

さらに、式 (6) の評価関数 J_p も計算することが可能である。本報告では、式 (5) 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 (6) 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、地震波加速度の 3 回微分値が必要となり、ノイズの影響から得られる値の信頼性には問題があるため、ここでは予測値 $z(t)$ の要素に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 (8) 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。従って、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。本報告では、VCD の減衰係数指令からの遅れを次のような 1 次遅れ型と仮定する。

$$\frac{d(d_i^{VCD}(t))}{dt} = -\frac{1}{T_d} d_i^{VCD}(t) + \frac{1}{T_d} d_i^c(t), i = 1, \dots, n_{VCD} \quad (11)$$

ここで、 $T_d > 0$ は時定数である。なお、本報告で提案する予測型セミアクティブ制御においては、式 (11) の遅れを考慮して最適指令値を選択する。

4 統合化設計

3 節でのセミアクティブ制御則の下で、本報告では構造物の層間剛性分布と VCD の設計変数を最適化する。最適化の手法としては、種々の過去に記録された地震波や、人工的に作成された地震波を外乱として用い、外乱に対する応答を最適化するような層間剛性分布を探索する。評価関数として、層間変位と各層絶対加速度を評価する以下を用いる。

$$J = \sum_{i=1}^{n_e} J_i, J_i = \sum_{j=1}^4 w_j^i J_j^i, w_j^i \geq 0, i = 1, \dots, n_e, j = 1, \dots, 4, \quad (12)$$

$$J_1^i = \max_k \left(\frac{\text{RMS}(^c r_k^i(t))}{\text{RMS}(^{hd} r_k^i(t))} \right), \quad (13)$$

$$J_2^i = \max_l \left(\frac{\text{RMS}(^c a_l^i(t))}{\text{RMS}(^{hd} a_l^i(t))} \right), \quad (14)$$

$$J_3^i = \max_k \left(\frac{\max_{0 \leq t \leq T_f} |^c r_k^i(t)|}{\max_{0 \leq t \leq T_f} |^{hd} r_k^i(t)|} \right), \quad (15)$$

$$J_4^i = \max_l \left(\frac{\max_{0 \leq t \leq T_f} |^c a_l^i(t)|}{\max_{0 \leq t \leq T_f} |^{hd} a_l^i(t)|} \right), \quad (16)$$

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

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。

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。 $r_{k,i}^j, d_{f,i}^j$ および $T_{f,i}^j, i=1, \dots, n_e$ は、それぞれ層間変位、1 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 c および hd は、それぞれ VCD 設置時に、可変減衰係数を提案する制御則で切替えてセミアクティブ制御を行った場合と、すべての減衰係数値をその最大値に固定した場合を表す。評価 $J_j^i, i=1, \dots, n_e, j=1, \dots, 4$ において、最大値の計算は VCD 設置層以外の層について行い、VCD 設置層については、VCD 設置層での変形を大きくして他の層の振動をより抑制するというコンセプトから、VCD 未設置時との応答比較から、未設置時の層間変位を超えた場合に働くペナルティ関数を導入した。なお、上記の評価は、基準 (式 (13)-(16) の分母) を無制御時 (本報告の場合は VCD 未設置時) としたものが、建築構造物の振動抑制性能の評価にしばしば用いられている [5, 6]。

構造系の設計変数として、層間剛性 $k_i, i=1, \dots, n$ を定義する。 k_i は、以下の範囲で調整可能であるとする。

$$k_i^l \leq k_i \leq k_i^u, i=1, \dots, n \quad (17)$$

ここで、 $k_i^u, k_i^l > 0, i=1, \dots, n$ は、それぞれ剛性 k_i の上下限値である。

さらに、制御系の設計変数として式 (6) 中の重み $Q_w = Q_w^T \geq 0$ の要素を考える。例えば、 Q_w をその対角要素が 0 以上の値を取るような対角行列として、それらの対角要素を設計変数とすることで、式 (12) を小さくするような (予測出力値から計算される) 可変減衰係数決定のための評価値 J_p 中の重みを調整可能である。

本最適化問題は、提案する切替型制御則の性質や、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出来ない。したがって、定式化された最適設計問題を (収束性に関して良好な性質を持つ) Newton 法などの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パラメータに関する感度は、変数値の微小変動させて評価値を計算し、有限差分を求めることによってしか求めることができない。このため、特に設計変数の数が多くなる場合、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である。したがって、本報告では感度情報を必要としない最適化手法の一つであり、(決定論的な意味での収束性は保証されないものの) 種々の問題に対する応用でその有効性が示されてきている擬似焼きなまし法 (SA: Simulated annealing) を用いることとする。

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 階建ての構造物について考える。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 (2) の構造減衰は、 $D_0 = 10^{-5} K$ とした。3 つの VCD の設計値を、 $m_j^{VCD} = 9.0 \times 10^6$ [kg], $d_j^{VCD} = 3.6 \times 10^7$ [Ns/m], $d_j^{VCD} = 0, j=1, 2, 3$ とおく。構造系設計変数である層間剛性の上下限値は、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 $z(t)$ (式 (3)) の成分として、各層絶対変位および速度、層間変位及び速度を考える。制御系設計変数として、式 (6) の評価値 J_p を計算する際の重み $Q_w > 0$ を対角行列と定義し、それらも同時に最適化する。対角要素の上下限は、それぞれ 10 および 0.1 とする。最適化に際し応答計算を行う地震波として、加速度ピーク値 (PGA) を 4.0 [m/s²] に正規化した El Centro NS (1949) 波、BCJL1 波、Hachinohe NS (1968) 波、JMA Kobe NS (1995) 波を用い、順に式 (12) における $i=1, 2, 3, 4$ ($n_e=4$) と割り当てる。

結果を表 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 (図 4) としたときの各層の応答の RMS 値、ピーク値を図 5, 6、可変減衰係数値と VCD が発生する抵抗力を図 7, 8 に示す。応答値や抵抗力は、セミア

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

クティブ制御時 (SA) と VCD の減衰係数を最大値に固定した場合 (HD) とで比較している。そのときの応答の RMS 値およびピーク値を表 3, 4 に示す。これらの表には、VCD 未設置時 (NC) における応答計算値も合わせて示している。これらの結果から、VCD は地震外乱を効果的に抑制する能力を有するとともに、セミアクティブ制御が、最大減衰固定時と比較して、層間変位を同程度に維持しながら絶対加速度値を低減していることが読み取れる。最適化に用いた他の地震波の場合においても、おおむね同様の結果が得られ、提案手法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のセミアクティブ制御系設計について検討を行った。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と VCD の設計パラメータを擬似焼きなまし法を用いて最適化する手法を提案した。最適化では、種々の記録された地震波や人工地震波に対して、セミアクティブ制御された構造系の応答を使用した。15 階建ての構造物に対してシミュレーションを行い、提案手法の有効性を示した。

Table 2: Optimal and nominal stiffness parameters

Story	$k_i \times 10^6$ [N/m] (Optimal)	$k_i \times 10^6$ [N/m] (Nominal)
15	461	291
14	508	294
13	258	305
12	185	313
11	455	352
10	535	412
9	388	427
8	639	435
7	646	448
6	386	483
5	317	544
4	460	561
3	684	580
2	329	644
1	603	1098

Fig. 4: BCJL2 wave (PGA=4.0 [m/s²])

文 献

- [1] H. Sodeyama, K. Suzuki and K. Sunakoda, 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, 105–109, 1997.
- [2] T. Matsuoka, K. Hiramoto, K. Sunakoda, T. Ohtake and P.N. Roschke, Numerical Simulation of 3-story Structure with Vibration Control Device, Proc. 4th International Conference on Earthquake Engineering, in CD-ROM, 2006.
- [3] T. Ohtake, K. Sunakoda and T. Matsuoka Study on Vibration Control Device Using Power Generator, Proceedings of ASME PVP 2006, #PVP2006-ICPVT-11-93534, 2006.
- [4] K. Hiramoto, T. Matsuoka, K. Sunakoda, A. Fukukita and I. Yamazaki, Semi-active Control of Civil Structures with a One-step-ahead Prediction of the Seismic Response, Proceedings of ASME PVP 2009, #PVP2009-77637, 2009.
- [5] S. Narasimhan, S. Nagarajaiah, E.A. Johnson and H.P. Gavin, Smart Base-isolated Benchmark Building, Part I: Problem Formulation. Structural Control and Health Monitoring, Vol. 13, (2006), 573–588.
- [6] D.A. Shook, P.N. Roschke, P.Y. Lin and C.H. Loh, Semi-active Control of a Torsionally-responsive Structure, Engineering Structures, Vol. 31, (2009), 57–68.

Fig. 5: RMS values of relative displacement and absolute acceleration

Fig. 6: Peak values of relative displacement and absolute acceleration

Fig. 7: Variable damping coefficient of each VCD

Fig. 8: Resistance force of each VCD

Table 3: RMS values of relative displacement and absolute acceleration for BCJL2 wave

Quantity	NC_{RMS}	SA_{RMS}	HD_{RMS}	SA_{RMS} NC_{RMS}	SA_{RMS} HD_{RMS}
r_1 [mm]	93.69	22.22	23.40	0.24	0.95
r_2 [mm]	159.89	33.30	32.70	0.21	1.02
r_3 [mm]	71.44	14.46	14.56	0.20	0.99
r_4 [mm]	99.58	18.66	19.35	0.19	0.96
r_5 [mm]	137.45	25.88	26.38	0.19	0.98
r_6 [mm]	107.88	20.26	20.99	0.19	0.97
r_7 [mm]	61.83	11.37	11.80	0.18	0.96
r_8 [mm]	60.39	10.68	11.00	0.18	0.97
r_9 [mm]	96.61	16.17	16.67	0.17	0.97
r_{10} [mm]	66.92	10.69	11.30	0.16	0.95
r_{11} [mm]	77.43	11.10	11.57	0.14	0.96
r_{12} [mm]	189.53	23.90	25.19	0.13	0.95
r_{13} [mm]	122.38	14.18	14.98	0.12	0.95
r_{14} [mm]	51.83	5.50	5.80	0.11	0.95
r_{15} [mm]	41.93	4.38	5.14	0.10	0.85
<hr/>					
$\ddot{q}_1$ [m/s ²]	10.58	1.01	1.05	0.10	0.96
$\ddot{q}_2$ [m/s ²]	18.07	0.93	1.03	0.05	0.90
$\ddot{q}_3$ [m/s ²]	19.67	1.00	1.16	0.05	0.86
$\ddot{q}_4$ [m/s ²]	20.03	2.84	4.82	0.01	0.59
$\ddot{q}_5$ [m/s ²]	19.58	2.32	4.05	0.12	0.57
$\ddot{q}_6$ [m/s ²]	17.74	2.24	3.24	0.13	0.69
$\ddot{q}_7$ [m/s ²]	16.77	1.99	3.05	0.12	0.65
$\ddot{q}_8$ [m/s ²]	16.70	2.43	3.94	0.15	0.62
$\ddot{q}_9$ [m/s ²]	19.06	2.52	3.64	0.13	0.69
$\ddot{q}_{10}$ [m/s ²]	19.68	1.92	2.46	0.10	0.78
$\ddot{q}_{11}$ [m/s ²]	17.83	3.29	5.17	0.18	0.64
$\ddot{q}_{12}$ [m/s ²]	21.22	3.11	4.45	0.15	0.70
$\ddot{q}_{13}$ [m/s ²]	18.24	2.47	3.35	0.14	0.74
$\ddot{q}_{14}$ [m/s ²]	17.04	2.37	3.00	0.14	0.79
$\ddot{q}_{15}$ [m/s ²]	21.94	2.29	2.69	0.10	0.85

Table 4: Peak values of relative displacement and absolute acceleration for BCJL2 wave

Quantity	NC_{peak}	SA_{peak}	HD_{peak}	SA_{peak} NC_{peak}	SA_{peak} HD_{peak}
r_1 [mm]	285.34	73.91	85.25	0.26	0.87
r_2 [mm]	456.33	102.87	89.56	0.23	1.15
r_3 [mm]	189.57	42.98	42.70	0.23	1.01
r_4 [mm]	246.26	55.59	61.56	0.23	0.90
r_5 [mm]	355.83	75.78	83.00	0.21	0.91
r_6 [mm]	265.96	61.94	67.41	0.23	0.92
r_7 [mm]	165.90	34.63	39.62	0.21	0.87
r_8 [mm]	169.87	34.18	37.85	0.20	0.90
r_9 [mm]	286.69	56.11	61.27	0.20	0.92
r_{10} [mm]	191.17	37.04	39.92	0.19	0.93
r_{11} [mm]	213.65	40.64	43.03	0.19	0.94
r_{12} [mm]	541.97	88.61	92.23	0.16	0.96
r_{13} [mm]	351.02	55.08	57.71	0.16	0.95
r_{14} [mm]	170.10	20.47	21.09	0.12	0.97
r_{15} [mm]	145.33	16.92	19.15	0.12	0.88
<hr/>					
$\ddot{q}_1$ [m/s ²]	33.01	4.35	4.94	0.13	0.88
$\ddot{q}_2$ [m/s ²]	55.13	4.25	4.71	0.08	0.90
$\ddot{q}_3$ [m/s ²]	59.38	4.89	5.12	0.08	0.96
$\ddot{q}_4$ [m/s ²]	57.93	10.70	17.63	0.18	0.61
$\ddot{q}_5$ [m/s ²]	61.66	10.32	13.07	0.17	0.79
$\ddot{q}_6$ [m/s ²]	56.31	9.25	11.31	0.16	0.82
$\ddot{q}_7$ [m/s ²]	48.26	8.74	11.12	0.18	0.79
$\ddot{q}_8$ [m/s ²]	55.40	9.79	13.71	0.18	0.71
$\ddot{q}_9$ [m/s ²]	61.56	9.70	11.73	0.16	0.83
$\ddot{q}_{10}$ [m/s ²]	62.61	7.64	9.70	0.12	0.79
$\ddot{q}_{11}$ [m/s ²]	54.00	12.59	18.35	0.23	0.69
$\ddot{q}_{12}$ [m/s ²]	69.32	11.96	16.63	0.17	0.72
$\ddot{q}_{13}$ [m/s ²]	55.91	9.48	1.23	0.17	0.77
$\ddot{q}_{14}$ [m/s ²]	49.89	9.39	10.64	0.19	0.88
$\ddot{q}_{15}$ [m/s ²]	76.03	8.85	10.02	0.12	0.88