

バリアブルダンパーによる連結構造物の セミアクティブ最適震動制御

家村 浩和¹・五十嵐 晃²・中田 成智³

¹フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 Ph.D. 京都大学助教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

³学生員 京都大学大学院修士課程 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

構造物の地震応答を低減するため、振動特性の異なる構造物を減衰機能を持つ装置で連結するジョイントダンパーについての研究が進められている。本研究では、このジョイントダンパーに減衰特性を変えることのできるバリアブルダンパーを用いたセミアクティブ制震システムを提案する。制御アルゴリズム、すなわち可変減衰の時々刻々の更新値の決定に、最適制御理論に基づいたアルゴリズムを用いた場合の有効性を数値シミュレーションにより検証した。その結果、粘性ダンパーを用いたパッシブ制震システムよりも効果的な震動低減が可能であることを示した。また、バリアブルダンパーの変位・復元力特性に着目して考察を行った結果、このシステムは負の擬似剛性が応答低減効果に寄与するものであることを明らかにした。

Key Words : semi-active vibration control system, variable damper, adjacent structure, the optimal control theory

1. はじめに

アクティブ制御に関する研究が本格的に取り組まれるようになった当初より、大地震による構造物の被害の防止あるいは低減が、少なくとも将来的なアクティブ制御技術の目標の一つとして意識されてきたことは明らかである。しかし、地震に対してアクティブ制御を行うにあたっては、エネルギー供給の問題、デバイスの信頼性の問題、および工学的な制約条件に起因する問題等、解決しなければならない課題が多く残されているのが現状である。

このように地震動に対するアクティブ方式の制御が持つ欠点を克服するために、いわゆるハイブリッド制御や、さらに進んでエネルギー供給が少ないセミアクティブ制御方式が実現性の高いものとして、研究の重点が置かれるようになっていく。

また地震応答を低減するシステムとして、隣接する振動特性の異なる構造物をエネルギー吸収機能を持つデバイスで連結したジョイントダンパーシステム¹⁾²⁾があり、これはアクティブ・セミアクティブ制御を実現するに当たり考える有効な形態の一つと言える。

こうした背景を踏まえて、本研究ではセミアクティブ方式のデバイスとして、バリアブルダンパーをこのジョイントダンパーシステムに用いるセミアクティブ制御システムを提案し、可変減衰の値を決定する制御アルゴリズムとして最適制御理論を用いた場合の応答低減効果を数値シミュレーションにより検討する。

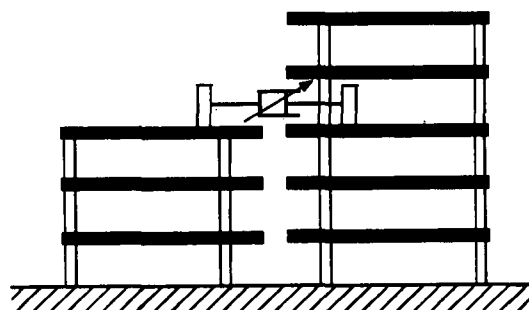


図-1 解析モデル

2. 制震システム

(1) 解析モデル

構造物のモデルとして、図-1に示すような3層フレーム(Ⅰ系構造物)と5層フレーム(Ⅱ系構造物)の3層部をジョイントダンパーで連結したモデルを想定する。

このモデルの総重量は、3層フレームが61.2(ton)、5層フレームが163.1(ton)、固有振動数がそれぞれ2.41(Hz)、1.78(Hz)、1次減衰定数がともに0.005である。なお、この2棟連結構造物は、京都大学宇治防災研究所構内で構築・整備中の実大実験施設²⁾をモデル化したものである。

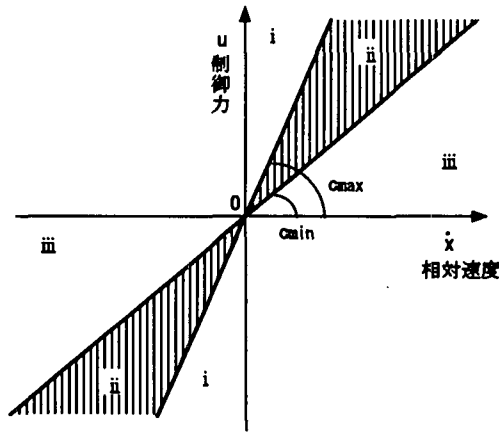


図-2 制御制約

(2) 制御アルゴリズム

バリアブルダンパーを制震装置として用いるにあたっての制御アルゴリズムとして、ダンパー結合部での最適制御力を最適制御理論により求め、バリアブルダンパーの可変減衰を変化させることにより、得られた最適制御力に最も近い力を減衰力として発生させる方法を考える。

a) 最適制御理論

まずモデルの運動方程式を状態方程式表現し、次式(1)のように表わす。

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{D}\mathbf{f} \quad (1)$$

ここで、

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}; \text{システム行列}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{H} \end{bmatrix}; \text{制御力配分行列}$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{M}^{-1} \end{bmatrix}; \text{外力配分行列}$$

$$\mathbf{X} = \begin{Bmatrix} \mathbf{x} \\ \dot{\mathbf{x}} \end{Bmatrix}; \text{状態変数ベクトル}$$

最適制御理論を用いて次式(2)の2次形式の評価関数を最小にするような最適制御力を求める。

$$J = \int_0^t (\mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt \quad (2)$$

状態量 $\mathbf{X}$ 、制御力 $\mathbf{u}$ に対する重み行列 $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{R}$ の設定については次の b) で定義することにする。最適制御力 $\mathbf{u}$ は、状態量 $\mathbf{X}$ をフィードバックする形で表現され、次式(3)のように表わされる。

$$\mathbf{u} = -\mathbf{G}\mathbf{X} \quad (3)$$

$\mathbf{G}$; 最適フィードバックゲイン

b) 重み行列の設定

$\mathbf{Q}$ については両構造物ともに一次のモード振動の制御を目的とするため、変位についてはそれぞれの一次モードでの各層の変位(最上層を1.0に設定したもの)に層数 $n_I (=3)$ 、 $n_{II} (=5)$ の比を乗じたもの、速度については、変位に対する重みをそれぞれの一次固有振動数 ω の二乗で除したものを与えることにする。

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_i &= q_{Ii} & i &= 1 \sim 3 \\ \tilde{Q}_i &= \frac{n_{II}}{n_I} q_{IIi} & i &= 4 \sim 8 \\ \tilde{Q}_i &= \frac{1}{\omega_i^2} q_{Ii} & i &= 9 \sim 11 \\ \tilde{Q}_i &= \frac{1}{\omega_i^2} \frac{n_{II}}{n_I} q_{IIi} & i &= 12 \sim 16 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、

q_{Ii} ; h 系構造物の1次モードの i 層での変位

ω_i ; h 系構造物の1次固有振動数

このように設定した $\tilde{\mathbf{Q}}$ に対して重み行列 $\mathbf{Q}$ を次のように設定する。

$$\mathbf{Q} = 10^p \times \tilde{\mathbf{Q}}, \mathbf{R} = 1.0 \quad (5)$$

なお、 p を制御ゲインパラメーターとして扱う。

c) 制御制約

バリアブルダンパーを制震装置として想定する場合、求められた最適制御力を常に出せるとは限らず、ダンパー結合部での相対速度に比例した減衰力として表現できる力のみがバリアブルダンパーが発生可能な制御力となる。そこで、バリアブルダンパーの減衰係数の最大値 C_{max} 、と最小値 C_{min} を設定し、その間で任意に変化させることができると仮定し、バリアブルダンパーが発生可能な制御力は、相対速度-制御力平面上で図-2に示す斜線の領域のみとする。

d) 可変減衰の決定

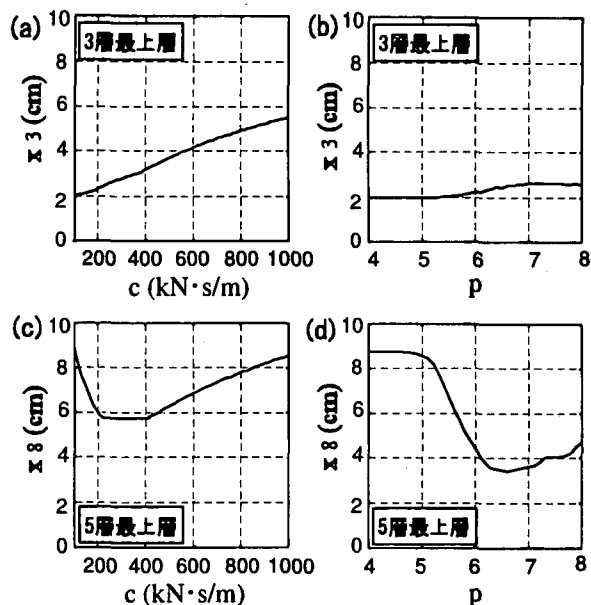
可変減衰の決定においては、図-2にその時刻におけるダンパー結合部での相対速度、最適制御力をプロットし、領域 i、ii、iii に応じ次のように場合分けを行う。

$$C_v = \begin{cases} C_{max} & (i; \frac{u}{\dot{x}_r} > C_{max}) \\ \frac{u}{\dot{x}_r} & (ii; C_{min} < \frac{u}{\dot{x}_r} < C_{max}) \\ C_{min} & (iii; \frac{u}{\dot{x}_r} < C_{min}) \end{cases} \quad (6)$$

このように求めた可変減衰の値をバリアブルダンパーに時々刻々与えることにより、フィードバック制御系を構成するものとする。

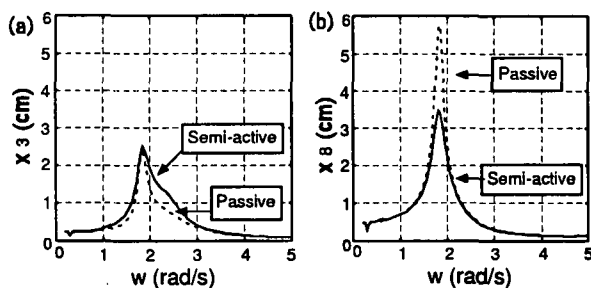
3. 解析結果

ここでは、前章で示した解析モデル、及び制御アルゴリズムを用いた場合の制震効果を粘性ダンパーを用いたパッシブ制御と比較することにより検討する。な



((a),(c):パッシブ制御 (b),(d):セミアクティブ制御)

図-3 最大周波数応答



((a):3層フレーム最上層 (b):5層フレーム最上層)

図-4 最適周波数応答曲線

お、以下ではバリアブルダンパーの減衰係数の最小値および最大値を、それぞれ $C_{min} = 100.0(kN \cdot s/m)$ 、 $C_{max} = 1000.0(kN \cdot s/m)$ として解析を行う。

(1) 調和外力に対する制震効果

パッシブ制御では粘性係数を、セミアクティブ制御では制御ゲインパラメーターを横軸にとり、0.2～5.0(Hz)の50(gal)の調和外力を入力したときの最大周波数応答(一定時刻(15sec)以降の定常応答の振幅の最大値)を図-3に示す。図-3の(a),(b)より、3層の最上層の最大周波数応答はパッシブ制御、セミアクティブ制御共にパラメーターの増加に伴って大きくなるが、図-3の(c),(d)より、5層の最上層ではそれぞれに最適なパラメーターの値が存在する。そこで、パッシブ制御、セミアクティブ制御で各々について最適なパラメーターを用いたときの周波数応答曲線(最適周波数応答曲線)を図-4に示す。

この結果から、3層最上層に対しては全般的にセミアクティブ制御の方が応答は大きくなるが、ピークの付近ではほとんど差がなく、5層最上層に対してはピーク

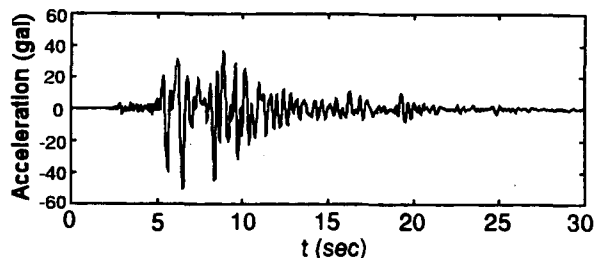


図-5 入力加速度波形

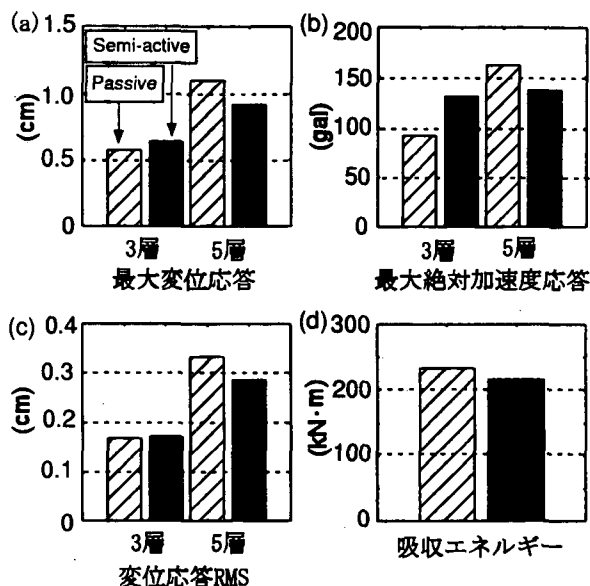


図-6 地震波入力時の応答特性

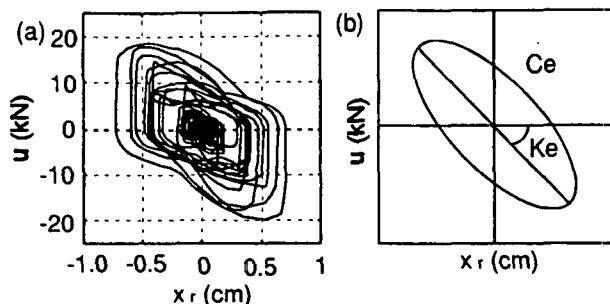
値で約40%と大きく応答を低減しているのがわかる。この結果より、特に共振する周波数成分の調和外力に対してはパッシブ制御よりも、セミアクティブ制御の方が効果的減衰が可能であると考えられる。

(2) 地震動入力に対する制震効果

次に地震動入力時の応答特性に対する制震効果を検討する。ここでは入力加速度波形として、図-5に示す兵庫県南部地震神戸海洋気象台観測加速度波形を最大50(gal)にスケールした地震波を用いる。評価応答特性値として、最大応答変位、最大応答絶対加速度、変位応答RMS値、吸収エネルギーの4つに着目する。

前項と同様、それぞれの評価項目においてパッシブ、セミアクティブ共に最適なパラメーター値とした場合の応答値を図-6に示す。

ダンパー部での吸収エネルギーでは、パッシブ制御の方がセミアクティブ制御に比べて大きくなるものの、それ以外の評価項目では5層フレームに対して効果的に応答を低減しているといえる。特に3層フレームに対しては若干セミアクティブ制御の方が応答は大きくなるが、5層フレーム応答の低減に比べればそのメリットを損う程の差ではない。



((a):解析による変位-復元力特性 (b):線形近似モデル)

図-7 バリアブルダンパーの履歴-復元力特性

これらの結果から、系全体の応答を低減することを目的とした場合、粘性ダンパーを用いたパッシブ制御よりも、バリアブルダンパーを用いたセミアクティブ制御の方が効果的な震動制御が可能であると考えられる。

4. バリアブルダンパーの履歴-復元力特性に着目した考察

ここでは、バリアブルダンパーの変位-復元力特性に着目して、ジョイントダンパーシステムの等価線形化を行い、複素固有値解析により提案制御手法の応答低減メカニズムについて考察した。

(1) 等価剛性係数・等価減衰係数

前節と同様の地震波を入力した場合について計算したバリアブルダンパーの履歴特性を図-7(a)に示す。この図-7(a)を図-7(b)のように線形系に近似し、割線剛性係数を等価剛性係数 K_e 、履歴形状から等価減衰係数 C_e を求めると、

$$K_e = -2500.0(kN/m)$$

$$C_e = 160.0(kN \cdot s/m)$$

となった。図-7に示された履歴ループの傾きからわかるように、等価剛性係数は負の値となる。

(2) 複素固有値解析

ここで求めた等価剛性・等価減衰係数を用いた場合と、粘性ダンパーを用いたパッシブ制御で一次モード減衰比を最も大きくする値 ($C_{opt} = 260.0(kN \cdot s/m)$) の場合の複素固有値解析結果を表-1に示す。

表-1 複素固有値解析結果

	モード減衰比		固有振動数	
	1次	2次	1次	2次
パッシブ	0.048	0.265	1.84	2.40
セミアクティブ	0.166	0.113	1.68	2.05

一次、二次固有振動数は、パッシブ制御よりもセミアクティブ制御の方が低くなっており、擬似的に負の剛性

を与えることで系全体はパッシブ制御に比べてセミアクティブ制御の方が長周期化されている。また、モード減衰比でも2次ではパッシブ制御の方が大きくなっているが、一次ではセミアクティブ制御の方が著しく大きくなっており、特に応答時に支配的となる一次モード振動を低減するためにも、セミアクティブ制御の方が極めて有利であることを示している。

(3) 応答低減メカニズムに関する考察

隣接する構造物を負の剛性を持つ部材で連結することにより、連成系全体の固有周期を変化させ、地震動の卓越周期からずらすことで非共振状態を保つという制御手法に関する研究はすでに橘ら¹⁾によって行われている。この制御手法と同様に、本研究で提案する制御アルゴリズムを用いたセミアクティブ制御手法は、バリアブルダンパーの減衰係数を変化させ、見かけ上負の剛性と減衰を与えることで系全体の震動を制御するシステムであると考えることができる。

5. 結論

本研究ではジョイントダンパーにバリアブルダンパーを用い、可変減衰の決定に最適制御理論を適用したセミアクティブ制御手法を提案した。このときの制震効果を粘性ダンパーを用いたパッシブ制御と数値シミュレーションにより比較検討した結果、調和外力に対して約40%の低減効果が得られ、また地震動入力時の応答特性でも総じて良好な結果が得られた。また、本研究で提案する制御アルゴリズムでは、バリアブルダンパーは見かけ上負の剛性と減衰を持つ構造要素の特性を示すことから、本制御システムの動作原理は、バリアブルダンパーの減衰係数を変化させることによって、減衰に加えてパッシブなダンパーでは実現が困難な負の剛性を、バリアブルダンパーに見かけ上与えることで震動応答を低減するシステムであると考えられる。これらの結果から、バリアブルダンパーを制震装置として用いるセミアクティブ制震システムは、効果的な震動低減性能を発揮することが可能であり、セミアクティブ制御を導入するメリットは大きいと考えられる。

参考文献

- 1) 井川望・山田祐司・横山浩明・橘英三郎、2棟連結による制震システムに関する研究、アクティブ制震シンポジウム論文集、pp.333-340、1992。
- 2) 家村浩和、五十嵐晃、藤原寅士良、ジョイントダンパーによる隣接構造物の震動制御と最大応答の評価、第52回年次学術講演会 I-B156、1997
- 3) 小堀鐸二、制震構造—理論と実際、鹿島出版会、1993。