

連結構造物のバリアブルダンパーによる最適震動制御に関する研究

Optimal vibration control of adjacent structures using variable dampers

家村 浩和*, 五十嵐 晃**, 中田 成智***

Hirokazu IEMURA, Akira IGARASHI and Narutoshi NAKATA

*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)
**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)
***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)

Considerable attention has been paid to the joint damper system to reduce the vibration of structures under dynamic loads. In this study, the semi-active vibration control system for adjacent structures using a variable damper is proposed. In this system, the variable damping coefficient is decided on real-time basis based on the optimal control theory. Also a numerical simulation is conducted for a real adjacent structures, and the result shows that this system is more effective than passive vibration control systems.

Key Words : variable damper, semi-active, adjacent structures, the optimal control theory
キーワード: バリアブルダンパー, セミアクティブ, 連結構造, 最適制御理論

1. はじめに

阪神淡路大震災による土木構造物への甚大な被害の経験と教訓を経て、制震技術に対する要求及び期待される能力は近年の建設構造物の巨大化・長大化とあいまって必然的に大きなものとなっている。しかし、現在実用化されているアクティブ制御技術は、主に高層建物の風振動に対する居住性の確保、及び長大橋の主塔の風対策としてのものが中心であり、特に強地震動に対してはまだ研究途上の段階にあるといえる。具体的には、地震に対してアクティブ制御を行う場合、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数多く残されていることを指摘することができる。

このような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、より実現性の高い方式としていわゆるハイブリッド制御や、エネルギー供給が少ないセミアクティブ制御方式に研究の重点が置かれるようになっている。

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⁾が提案されており、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うる有効な形態の一つと言える。

こうした背景を踏まえ本研究では、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ジョイントダンパーシステムに用いたセミアクティブ制御システムである、バリアブルジョイントダンパーシステム

を提案する。さらにバリアブルダンパーの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制御アルゴリズム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し、粘性ダンパーを用いたパッシブ制震システムと比較した震動制御性能の向上、およびこのようなシステムの開発によるメリットを定量的に明らかにしようとするものである。

2. バリアブルジョイントダンパーシステム

2.1 ジョイントダンパーシステム

ジョイントダンパーシステムとは、隣接する構造物間をエネルギー吸収機能を持つダンパー装置で連結したシステムであり、それぞれの構造物の振動特性の違いにより発生する相対変位応答を利用して振動エネルギーを吸収させることにより、それぞれの構造物の地震応答を低減しようとするものである。図-1に概念を表すモデルを示す。

従来の研究においては、エネルギー吸収機構としてオイルダンパーなどのパッシブなデバイスを想定したジョイントダンパーシステムの研究が行われてきた。このようなシステムにおいては、ダンパー装置の特性値を適切に設定することにより初めてその応答低減性能が発揮されることが明らかにされている。

本研究では、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ことにより、パッシブ型のダンパーよりも効率的な応答低減を図るセミアクティブ制御手法を提案する。このようなシステムにおいては、従来のジョイントダンパーシステムにおいて一定値となっていたエネルギー吸収機構の特性を時間的に

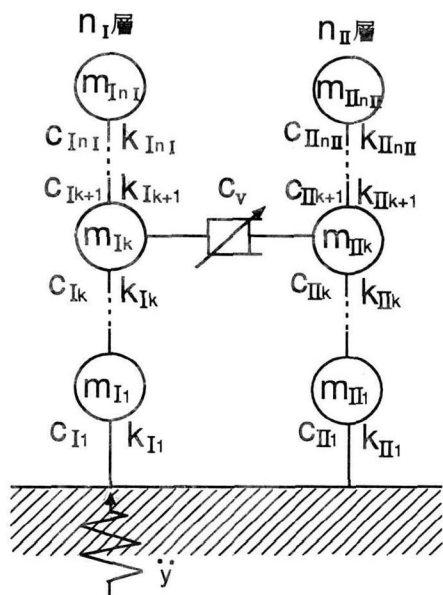


図-1 解析モデル

変化させることができるため、より適応性が高く、結果として振動制御性能の優れたジョイントダンパシステムとすることが可能と考えられる。

2.2 バリアブルダンパー

本研究におけるバリアブルダンパーは、土木構造物への適用を考慮し、大きな減衰力を比較的容易に発生させることができるオイルダンパー型の可変減衰装置を想定することにする。このタイプのバリアブルダンパーは、粘性流体を封入したシリンダ2つをバイパス管で接続し、そのバイパス管に開度を外部指令に基づいて調節する2つのバルブを設置したものである。このバルブ開度を変化させることにより、ダンパーの物理限界の範囲内で任意の粘性減衰係数を得ることができる。なお、開度調節をリアルタイムで行うことができるため、制御の範疇としては、セミアクティブ制御に分類できる。

解析を行う上でのバリアブルダンパーに関する基本的特性として、以下のような仮定を行うものとする。

- バリアブルダンパーは、設定された減衰特性を保持するだけで加力能力や剛性は一切持たない。
- バリアブルダンパーは、構造物の振動状態に応じて駆動させるため十分高速な応答性を持つ。
- バリアブルダンパーは、構造物の振動エネルギーを熱エネルギーに変換し瞬時に開放する。

この装置に使用されるエネルギーは、バルブの開閉に使用される電力のみであり、小さなエネルギーでシステムを稼動することができる。すなわちこの制御法は、セミアクティブ制御の範疇に入るものである。

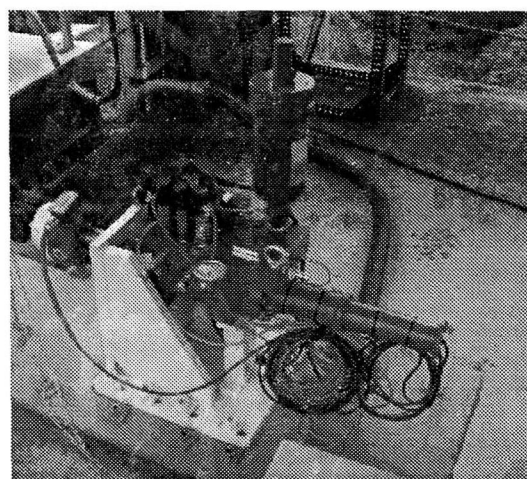


写真-1 バリアブルダンパーの例

例として、著者らによる実物大実験のために開発された、実際のバリアブルダンパー装置（日立製作所製）を写真-1に示す。

2.3 制震システム

図-1に、せん断型の n_I 層のI系構造物と n_{II} 層のII系構造物を k 層部で連結したジョイントダンパーモデルを示す。I系、II系の質量マトリクス、減衰マトリクス、剛性マトリクスをそれぞれ $\mathbf{M}_h, \mathbf{C}_h, \mathbf{K}_h (h = I, II)$ とすると、系全体の質量マトリクス、剛性マトリクス、及び連結しない場合の減衰マトリクスは

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \begin{bmatrix} \mathbf{M}_I & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{II} \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} \mathbf{C}_I & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_{II} \end{bmatrix} \\ \mathbf{K} &= \begin{bmatrix} \mathbf{K}_I & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{II} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

となり、これに k 層部でのバリアブルダンパーの減衰係数 C_v を考慮した場合、減衰マトリクス $\mathbf{C}'$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} \mathbf{C}'(k, k) &= \mathbf{C}(k, k) + \mathbf{C}_v \\ \mathbf{C}'(k, n_I + k) &= \mathbf{C}(k, n_I + k) - \mathbf{C}_v \\ \mathbf{C}'(n_I + k, k) &= \mathbf{C}(n_I + k, k) - \mathbf{C}_v \\ \mathbf{C}'(n_I + k, n_I + k) &= \mathbf{C}(n_I + k, n_I + k) + \mathbf{C}_v \end{aligned} \quad (2)$$

$i, j = 1, \dots, n_I + n_{II} \quad (i, j \neq k, n_I + k) \text{ のとき}$

$$\mathbf{C}'(i, j) = \mathbf{C}(i, j) \quad (3)$$

これらを用いて、バリアブルダンパーを装填したときの運動方程式は

$$M\ddot{\mathbf{x}} + C'\dot{\mathbf{x}} + K\mathbf{x} = \mathbf{f} \quad (4)$$

$\mathbf{x}$: 変位ベクトル

$\mathbf{f}$: 外乱ベクトル

と表わされる。

2.4 制御アルゴリズム

制御アルゴリズムとして、まずダンパー結合部に任意の制御力を発生させることのできるアクチュエーターを装填した場合を想定し、最適制御理論より時々刻々の最適制御力を算出する。そして、ダンパー結合部での相対速度を考慮し、ここで求めた最適制御力に対してバリアブルダンパーの特性、すなわち粘性係数を変化させることにより、可能な限り最適制御力に近い減衰力を発生させるものとする。

(1) 最適制御理論

まず制御モデルのダンパー結合部に、任意の制御力を発生させることのできるアクチュエーターを想定すると制御系の運動方程式は次式 (5) のようになる。

$$M\ddot{\mathbf{x}} + C\dot{\mathbf{x}} + K\mathbf{x} = H\mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (5)$$

H : 制御力位置行列

$\mathbf{u}$: 制御力ベクトル

これを状態方程式表現すれば、次式 (6) のようになる。

$$\dot{\mathbf{X}} = A\mathbf{X} + B\mathbf{u} + D\mathbf{f} \quad (6)$$

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

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

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

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

最適制御理論を用いて次式 (7) 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。

$$J = \int_0^\infty (\mathbf{x}^T Q \mathbf{x} + \mathbf{u}^T R \mathbf{u}) dt \quad (7)$$

ここで与える重み行列 Q , R については次の (2) 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 (8) となる。

$$\mathbf{u} = -G\mathbf{X} \quad (8)$$

$$G = R^{-1}B^T P: \text{最適フィードバックゲイン}$$

行列 P は次の定常リッカチ方程式の解である。

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (9)$$

(2) 重み行列の設定

制御目的の重み行列 Q は非負定な対称行列、制御入力の重み行列 R は正定対称行列である。ここで重要になるのは Q と R の比であり、本システムでは制御力は一つしか考えないため、 R はスカラーで $R=1.0$ と設定する。

Q については、両構造物共に一次のモード振動を制御することを目的とするため、まず基準となる重み行列 $\tilde{Q}$ を次のように設定する。変位の項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, n_{II} の比を乗じたもの、速度の項については、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。

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_i &= q_{Ii} & i &= 1 \sim n_I \\ \tilde{Q}_i &= \frac{n_{II}}{n_I} q_{IIi} & i &= n_I + 1 \sim n_I + n_{II} \\ \tilde{Q}_i &= \frac{1}{\omega_I^2} q_{Ii} & i &= n_I + n_{II} + 1 \sim 2n_I + n_{II} \\ \tilde{Q}_i &= \frac{1}{\omega_{II}^2} \frac{n_{II}}{n_I} q_{IIi} & i &= 2n_I + n_{II} + 1 \sim 2(n_I + n_{II}) \end{aligned} \quad (10)$$

q_{hl} ; h 系構造物の 1 次モードの l 層での変位

ω_h ; h 系構造物の 1 次固有円振動数

上記の変位の重みと速度の重みの関係は、主に着目する 1 次固有円振動数 ω における

$$\delta_v = \omega \delta_d \quad (11)$$

δ_v : 速度応答

δ_d : 変位応答

の関係を仮定して、両者への制御を同等に扱うために設定したものである。

このように設定した基準重み行列 $\tilde{\mathbf{Q}}$ を用い、重み行列 $\mathbf{Q}$ を次のように設定する。

$$\mathbf{Q} = 10^p \times \tilde{\mathbf{Q}} \quad (12)$$

p は制御の強さを決める制御ゲインパラメーターであり、このパラメーターが大きくなると状態量に対する重みが大きくなるため、制御力が大きくなることを意味する。

後に述べるように、種々の p について応答計算を行い、最も応答低減を与える p の値を、本セミアクティブシステムの最適パラメーターと定義する。

(3) 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 u を常に出せるとは限らず、ダンパー結合部での相対速度 $\dot{x}_r$ に比例した粘性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 u_d 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。

図-2 で、第二、第四象限に制御力が存在しないのは、ダンパーであるかぎり相対速度と逆の向きにしか制御力が発生しないためである。なお、実際のダンパーでは第二、第四象限に全く制御力が存在しないわけではないが、本研究で用いるダンパーでは非常に微小であることが性能試験で確認されているため、本研究ではこれを無視している。

このことから、バリアブルダンパーを用いた震動制御では、アクティブ制御とは異なり、スピルオーバーなど好ましくない現象が存在していたとしても励振することはないことが確認される。

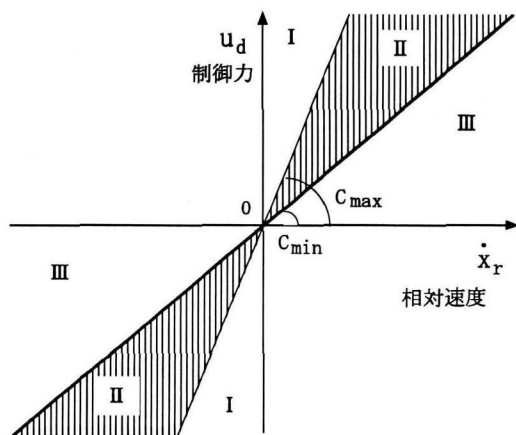


図-2 制御制約

(4) 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 $\dot{x}_r$ 、最適制御力 u 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。

$$C_v = \begin{cases} C_{max} & (\text{I}; \frac{u}{\dot{x}_r} > C_{max}) \\ \frac{u}{\dot{x}_r} & (\text{II}; C_{min} < \frac{u}{\dot{x}_r} < C_{max}) \\ C_{min} & (\text{III}; \frac{u}{\dot{x}_r} < C_{min}) \end{cases} \quad (13)$$

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. 解析モデルの概要

本研究では、構造物のモデルとして写真-2、図-3 に示す京都大学宇治防災研究所構内の連結型制震実験施設の実大鋼製フレーム架構をモデル化したものを用いる。この実験施設は3層鉄骨フレーム (I系構造物) と5層鉄骨フレーム (II系構造物) の2つの構造物からなり、3層部をダンパー装置により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163.2(ton)で、その他の構造物パラメーターは、自由振動実験から得られた同定結果に基づいたマトリクスを用いる。表-1に3層フレーム (I系構造物) の質量 $\mathbf{M}_I$ 、減衰 $\mathbf{C}_I$ 、剛性マトリクス $\mathbf{K}_I$ 、固有振動数 $\mathbf{f}_I$ を示す。なお、一次固有振動数は3層フレーム (I系) が2.41(Hz)、5層フレーム (II系) が1.78(Hz) で、一次減衰定数はともに0.005である。



写真-2 実大構造実験施設

表-1 3層フレーム構造の諸元

$$M_I = \begin{bmatrix} 19.25 & 0 & 0 \\ 0 & 19.10 & 0 \\ 0 & 0 & 22.82 \end{bmatrix} (\text{ton})$$

$$C_I = \begin{bmatrix} 109.03 & -59.27 & 2.85 \\ -59.27 & 118.30 & -51.60 \\ 2.85 & -51.60 & 67.12 \end{bmatrix} (\text{kNs/m})$$

$$K_I = \begin{bmatrix} 73436 & -54920 & 9673 \\ -54920 & 87621 & -41401 \\ 9673 & -41401 & 35567 \end{bmatrix} (\text{kN/m})$$

$$f_I = \begin{bmatrix} 2.42 & 7.38 & 12.63 \end{bmatrix}^T (\text{Hz})$$

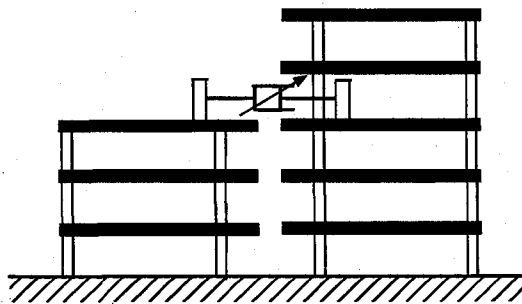


図-3 解析モデル

また、本解析で用いるバリアブルダンパーのパラメータは次のように設定する。

$$C_{max} = 1000.0 (\text{kN} \cdot \text{s/m})$$

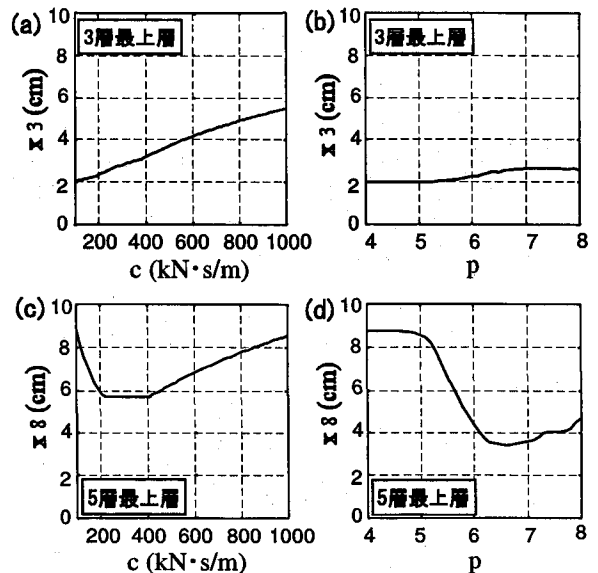
$$C_{min} = 100.0 (\text{kN} \cdot \text{s/m})$$

なお、比較対象として粘性ダンパーを用いたパッシブ制御を取り上げる。ここでは、パッシブ制御に関しては減衰係数 C を、セミアクティブ制御に関しては制御ゲインパラメーター p をパラメーターとして扱うことにする。

4. 解析結果

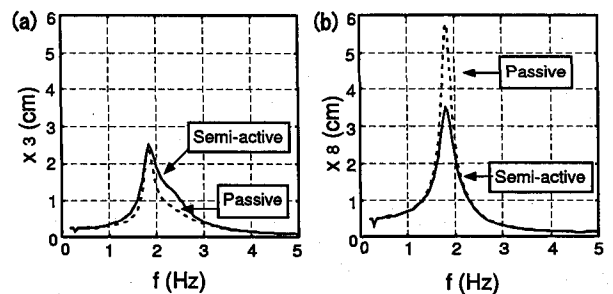
4.1 周波数領域での制震効果

まず、入力として調和外力を用いた解析を行い、セミアクティブ制御の制震効果について検討する。なお、解析モデルが線形系でないため、周波数応答関数を用いるのではなく、振幅 50(gal) の調和外力を入力した



((a),(c):パッシブ制御 (b),(d):セミアクティブ制御)

図-4 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-5 最適周波数応答曲線

ときの一定時刻 (15sec) 以降の定常応答の変位振幅の最大値を、最大周波数応答と呼ぶこととし、周波数応答の示標として表示することにする。

パッシブ制御では粘性係数 $C (\text{kN} \cdot \text{s/m})$ を、セミアクティブ制御では制御ゲインパラメーター p を横軸にとり、振動数 f が 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を図-4 に示す。

図-4 の (a),(b) より、3層フレーム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-4 の (c),(d) より、5層フレームの最上層ではそれぞれに最適なパラメーターの値 ($C = 220.0 (\text{kN} \cdot \text{s/m})$, $p = 6.4$) が存在する。これは、5層フレームに対しては、パッシブ、セミアクティブ、どちらのジョイントダンパーシステムでも効果的に周波数応答を低減することができるが、3層フレームでは連結しない場合に比べて応答は大きく

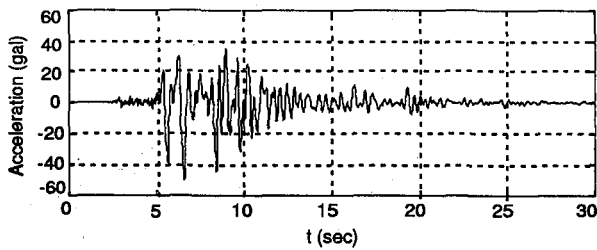


図-6 入力加速度波形

表-2 最適パラメーター

最適化示標	パッシブ $C(kN \cdot s/m)$	セミアクティブ p
最大変位応答	280.0	6.2
最大絶対加速度応答	230.0	6.1
変位応答 RMS 値	260.0	6.0
吸収エネルギー	220.0	6.4

なることを意味する。しかし、系全体を1つのシステムとして考える場合、どちらも効果的に周波数応答を低減していると考えられる。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-5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な低減が可能であると考えられる。

4.2 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-6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)にスケーリング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、パッシブ制御では粘性係数 $C(kN \cdot s/m)$ 、セミアクティブ制御では制御ゲインパラメーター p をパラメーターとし、それぞれの評価示標において最適なパラメーター値を表-2に、その応答値を図-7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

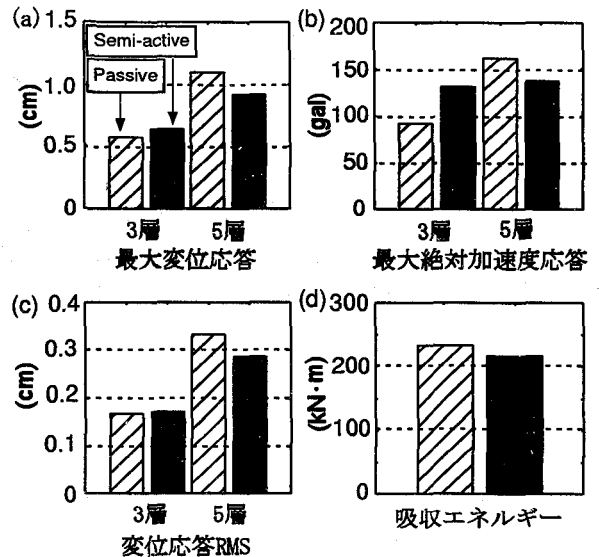


図-7 地震波入力時の応答特性

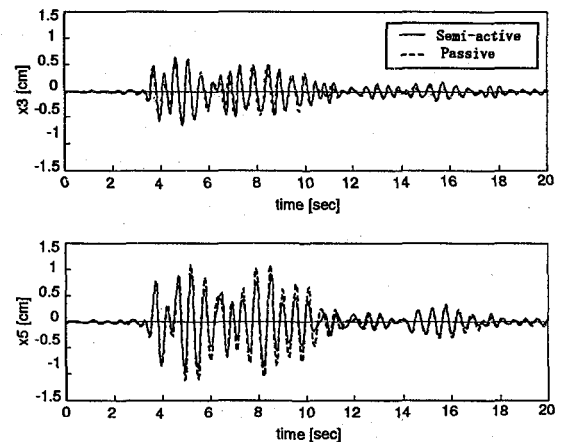


図-8 変位応答時刻歴

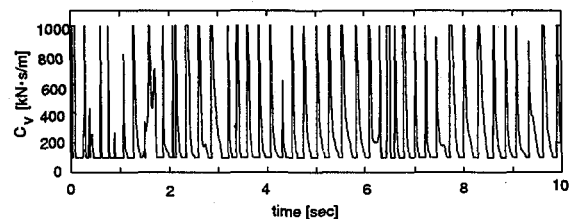


図-9 C_v の時刻歴波形

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。

なお、最大応答変位、最大応答加速度、変位応答 RMS 値での評価と逆になる理由は、パッシブ制御では系全

体の振動エネルギーを可能な限りダンパー部で吸収しようとするものであるが、本研究で用いる制御アルゴリズムを用いたセミアクティブ制御では、バリアブルダンパーの減衰係数を可変にすることによって、系全体の振動エネルギーを効率的に分担し、システム全体で見た最大応答を低減するものであるからであると考えられる。

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。

また、図-8には、パッシブ、およびセミアクティブそれぞれの場合で、最大変位応答を最小にするパラメータを用いたときの変位の時刻歴応答、図-9には、このときのバリアブルダンパーの減衰係数の時刻歴変化を示す。3層の最上層での応答 x_3 はほとんど変わらないが、5層の最上層での応答 x_5 はセミアクティブ制御の方が制御できていることがわかる。これは、図-9からもわかるように、パッシブ制御における粘性係数の最適値 $C = 280.0(kN \cdot s/m)$ の付近で効果的にダンパーの減衰を可変にすることによる結果だと考えられる。

5. 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を等価剛性・等価減衰係数を用いて等価線形化を行い、複素固有値の側面から提案制御手法の応答低減メカニズムについて考察した。

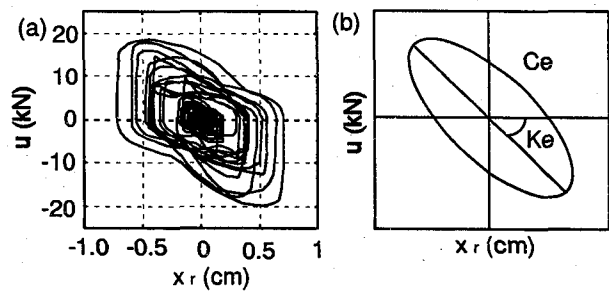
5.1 等価剛性係数・等価減衰係数

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-10(a)に示す。この図-10(a)を図-10(b)のように線形系に近似し、平均的な割線剛性係数を等価剛性係数 K_e として求めると、 $K_e = -2500.0(kN/m)$ と読み取れ、等価剛性係数が負であることがわかる。

等価粘性係数 C_e については、履歴特性から等価剛性による復元力を引いた履歴特性と、粘性係数をパラメータにして求めた履歴特性とを比較し、復元力がゼロになる2点と変位がゼロになる2点がほぼ一致する履歴特性を与える粘性係数の値を等価減衰係数として繰り返し計算により求めると $C_e = 160.0(kNs/m)$ となる。

5.2 負剛性に関する知見

隣接構造物を負の剛性を持った部材で連結することにより地震時の震動を制御するシステムに関する研究



((a):解析による変位-復元力特性 (b):線形近似モデル)

図-10 バリアブルダンパーの履歴-復元力特性

表-3 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

が橋ら²⁾によって行われている。これは、負の擬似剛性を与えることによって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により非共振状態を保つという制御手法である。

これと同様に考えると、本論文で提案する制御手法は、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持った部材で連結した場合と等価な効果を与えることによって、系全体の地震時の震動を制御するシステムであると推測される。

次に等価剛性・等価減衰係数を用いて複素固有値解析を行い、複素モード減衰定数、およびモード固有振動数による評価を行う。

5.3 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-3に示す。

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。

5.4 応答低減メカニズムに関する考察

バリアブルダンパーの変位-荷重履歴に着目すると、隣接構造物を見かけ上負の剛性と減衰を持つ構造部材で連結したかのような挙動を示し、これは橘らの研究に見られるような負の擬似剛性をバリアブルダンパーに持たせたのと同様の効果を持つと言える。言い換えれば、最適制御理論に基づく制御の場合、バリアブルダンパーがあたかも負の剛性と減衰を持った構造部材として挙動するように、可変減衰を変化させていると考えられる。

このことは、等価剛性および等価減衰係数を用いて複素固有値解析を行った結果によって裏付けられている。すなわち、本研究で提案する制御アルゴリズムでバリアブルダンパーを用いたセミアクティブ制御では、系全体を長周期化するとともに、粘性ダンパーと同じく連結部でのエネルギー吸収作用によって、系全体の応答を低減することが特徴である、新しい制震システムであるといえる。

6. 結論

本研究で得られた結果をまとめれば、次のようになる。

- 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、リアルタイムの可変減衰の決定に最適制御理論を適用した新しいセミアクティブ制御手法を提案した。
- 本システム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。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。
- 本制御システムの動作原理は、バリアブルダンパー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。

なお著者らは本論文でも触れた実大構造試験施設を用いて、提案するバリアブルジョイントダンパーシステムに関する実大実験を実施している。この検証実験の結果については、追って発表の予定である。

謝辞

本研究は、日本学術振興会の平成9～11年度未来開拓学術研究推進事業「大地震対応のインテリジェント制震構造の開発」（代表者：家村浩和）の一環として行われたものである。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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.
- 3) 家村浩和, 五十嵐晃, 豊岡亮洋, 加振装置による構造物の地震時挙動の再現に関する検討, 構造工学論文集 Vol.45A, 1999
- 4) 背戸一登, 富波佳均, 松本幸人, 土居文夫, 並立する弾性構造物のモデル化法と振動制御法(超々高層ビル実現のための基礎研究), 日本機械学会論文集(C編) 61巻 585号, pp.145-151, 1995.
- 5) 小堀鐸二, 制震構造—理論と実際, 鹿島出版会, 1993.

(1999年9月17日受付)