

実大連結構造システムのセミアクティブ 最適震動制御実験

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 京都大学大学院博士課程 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)

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ことによって地震応答を低減しようとする連結構造システムに関する研究が進められている。本研究では、連結構造システムにおいて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震動制御手法の有効性と応答低減効果を、実物大連結型構造フレームを用いた実験により検証した。最適制御理論に基づく制御アルゴリズムを用い、高精度でバリアブルダンパーを制御する実験を行った結果、正弦波地動入力時および実地震動波形入力時において、粘性ダンパーによるパッシブ震動制御手法よりも効果的な応答低減が得られた一連の実証実験とその結果を基に、工学的な実現にあたっての問題への対処の方向性について論じた。

Key Words : Semi-active control, adjacent structures, variable damper, full-scale test

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きている。

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連結構造システム¹⁾²⁾があり、これはアクティブ・セミアクティブ制御の実現に当たり考えうる有効な制御方式の一つと言える。

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連結構造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、制御アルゴリズムとして最適制御理論を用いた制震実験を行い、構造物の応答レベルで制震効果の検証を行う。

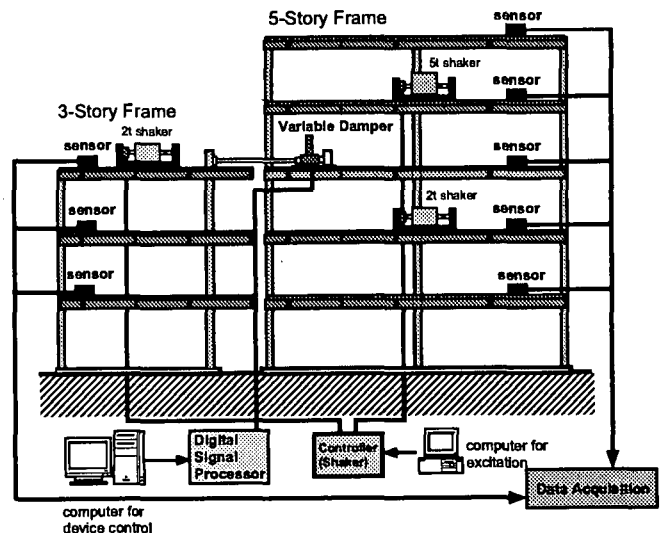


図-1 実大連結構造実験システム (京都大学防災研究所)

2. 実験システム

(1) 試験体フレーム

京都大学宇治防災研究所構内に設置されている実大5層・3層制震実験用フレーム構造物を用いる。バリアブルダンパーは第3層部に設置されており、第3層部のみの単一連結システムである。正弦波入力、および実地震動波形などのランダム波入力時の応答再現は、各フレームに設置された補助質量駆動型の加振装置によって行う。なお、本実験システムの加振装置による地震動入力時の応答再現性は豊岡ら³⁾によりすでに検証されている。各フレームの主な諸元は以下のとおりである。

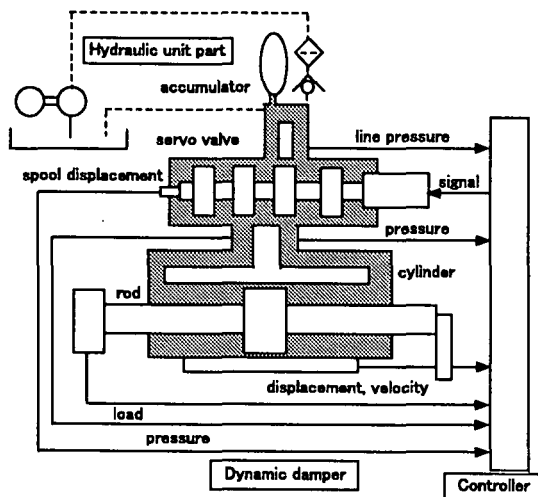


図-2 バリアブルダンパー装置概要

表 1. 試験体フレームおよび加振装置諸元

	5 層フレーム	3 層フレーム
高さ	17.22 m	10.65 m
総重量	163.1 ton	61.2 ton
一次固有振動数	1.78 Hz	2.41 Hz
加振装置	5 ton (4 層部)	2 ton (3 層部)

(2) バリアブルダンパー装置

本実験で用いるバリアブルダンパー装置はオイル式であり、2つのシリンダをつなぐバイパス管にサーボバルブが内蔵されている。このサーボバルブの開度を制御コンピュータからの外部指令で制御し、バルブを流れるオイルの流量の調節とシリンダ間の圧力損失量の変化により、要求する荷重を発生させるという機構になっている。サーボバルブの開度はリアルタイムで変化させることができるため、高精度の制御が実現可能である。種々のバルブ開度における性能試験を行い(図3)、最小二乗法での回帰分析により導かれたダンパー動特性関係式(荷重-相対速度-バルブ開度関係)は、次式で表される。

$$F(h, v_r) = \text{sgn}(v_r) \left\{ \left(\frac{159.232}{h^2} + 307.2 \right) v_r^2 + 0.6 \right\} \quad (\text{kN}) \quad \text{ここで、} \quad (1)$$

ここに、

$F(\text{kN})$: 荷重, h : バルブ開度, $v_r(\text{m/s})$: 相対速度

図4にピストン速度-荷重平面におけるバリアブルダンパーの制御可能領域を示す。実験では、リアルタイムで計算される要求制御力が制御可能領域内にある場合には、計測された相対速度を基に式(1)から求められたバルブ開度を指令値として与える。制御可能領域外の場合は、可能な限り要求制御力に近い荷重が発生するように可能最大値または最小値を設定する。すなわち、図4の(I)の領域では $h=0.05$ 、(III)の領域では $h=0.8$ を指令値としてバリアブルダンパーに与える。

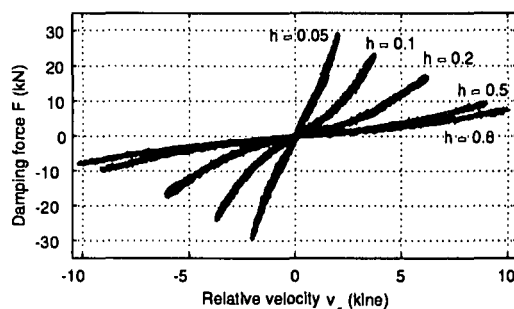


図-3 速度-荷重関係(バルブ開度一定性能試験)

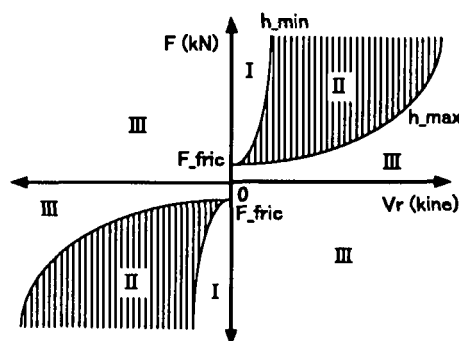


図-4 バリアブルダンパー制御可能領域

バリアブルダンパーの制御には DSP を用い、サンプリング周波数 2kHz で行う。ダンパーおよび構造フレームの応答をリアルタイムで取り込むことができるため、種々のアルゴリズムを採用することが可能なシステムとなっている。

3. 制御アルゴリズム

(1) 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(2)のように表わす。

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{D}\mathbf{f} \quad (2)$$

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

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

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

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

最適制御理論を用いて次式(3)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。

$$J = \int_0^\infty (\mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt \tag{3}$$

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 (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 (4) のように表わされる。

$$\mathbf{u} = -\mathbf{G}\mathbf{X} \tag{4}$$

$\mathbf{G}$; 最適フィードバックゲイン

(2) 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)、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。

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_i &= q_{5i} && i = 1 \sim 5 \\ \tilde{Q}_i &= \beta q_{3i} && i = 6 \sim 8 \\ \tilde{Q}_i &= \frac{1}{\omega_i^2} q_{5i} && i = 9 \sim 13 \\ \tilde{Q}_i &= \frac{1}{\omega_i^2} \beta q_{3i} && i = 14 \sim 16 \end{aligned} \tag{5}$$

q_{nl} ; n 層フレームの 1 次モードの第 l 層での変位
 ω_n ; n 層フレームの 1 次固有振動数

ここで、 β は 5 層フレーム応答に対する 3 層フレーム応答の重みの比率であり、パラメータとして扱うことにする。変位の項と速度の項の関係については、

$$\delta_v = \omega \delta_d \tag{6}$$

δ_v : 速度応答スペクトル
 δ_d : 変位応答スペクトル

なる関係があることを考慮し、速度の項を変位に置き換えると、それぞれの項を同等に扱っていることがわかる。

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。

$$\mathbf{Q} = 10^p \times \tilde{\mathbf{Q}}, \mathbf{R} = 1.0 \tag{7}$$

式 (7) における p を制御ゲインパラメーターとして扱う。

4. 実験結果

最適制御理論を用いた連結構造物のセミアクティブ制御手法の実験による制震効果を検討するため、比較

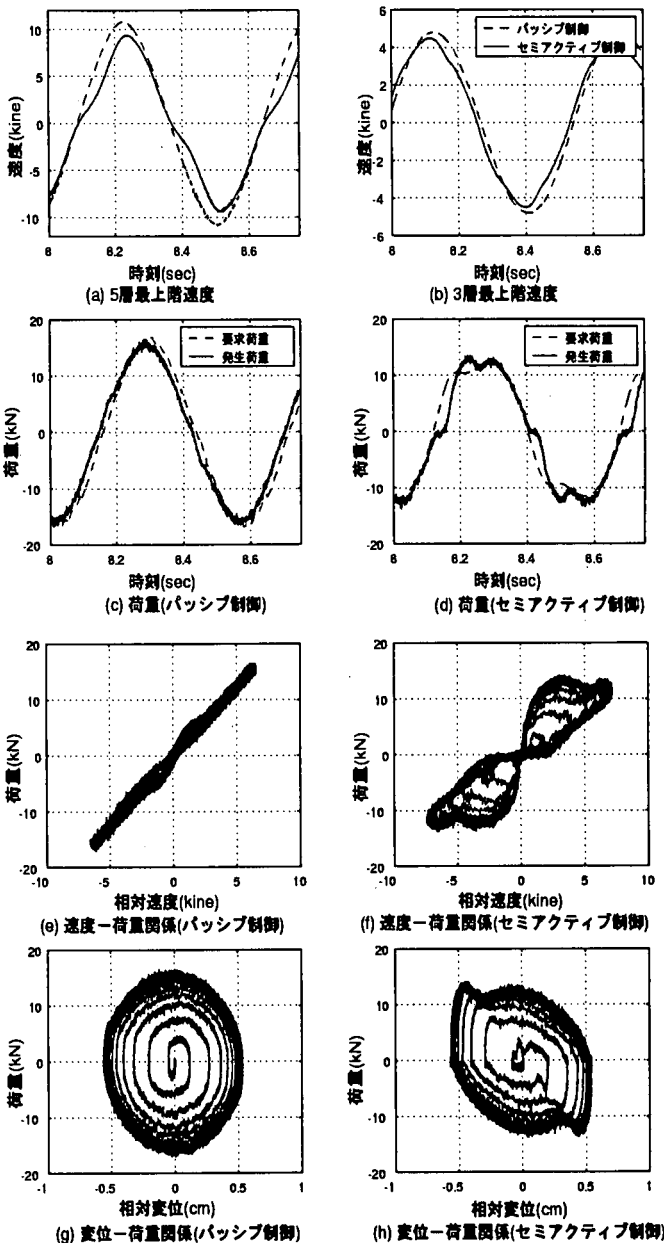


図-5 正弦波入力時の応答特性

対象として線形粘性ダンパーを用いたパッシブ制御実験も行った。パッシブ制御のパラメータである連結粘性係数、セミアクティブ制御のパラメータである制御ゲインパラメータ p 、重み比率 β は本実験システムの解析モデルを用いた数値解析により、連結時の構造系全体の一次固有振動数 1.8(Hz) 付近の振動数を持つ正弦波入力に対し 5 層フレーム最上層の速度応答を最小にする値を求め、実験で用いた。

なお、実験ではバリアブルダンパーの制御精度を向上させるため、機械的特性から生じる不安定現象を解消するためのいくつかの補償 (フィードフォワード、偏差フィードバック) を制御プログラムに与え、高精度でのバリアブルダンパーの制御を実現した。

図 5 に構造系全体の一次固有振動数に近

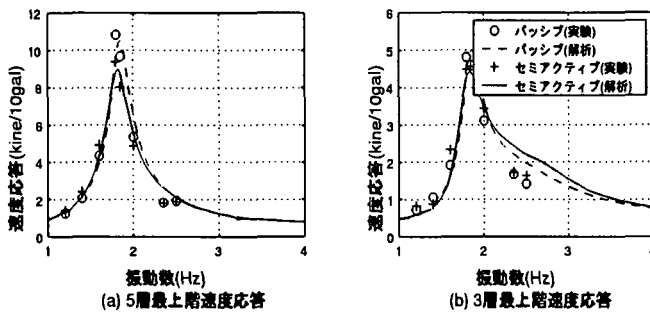


図-6 周波数応答の比較

い1.8(Hz)(10gal)の正弦波地動を入力した時の応答を示す。この図が示すように、粘性ダンパー型において、ダンパー履歴形状を十分な精度で制御できており、また最適制御のケースにおいても、速度の位相に対し要求制御力の位相が進むにも関わらず、要求荷重へのダンパー発生荷重の追従がほぼ達成されていることが確認できる。応答を比較すると、3層最上階での速度応答でほとんど差はないものの、5層最上階に関しては粘性ダンパー型パッシブ制御に比べ、最適制御型セミアクティブ制御の方が効果的に応答を低減している結果となっている。速度-荷重関係を見てわかるように、セミアクティブ制御ではダンパーの制御可能領域を有効に用いて効果的に減衰特性を変化させたため、応答低減を実現したものと考えられる。

その他の周波数帯における実験結果と解析結果を図6に示す。パッシブ制御同様、セミアクティブ制御においても実験結果が解析結果と同様の特性を示しており、試験体フレームの同定から加振装置による地震動再現、バリアブルダンパーのモデル化・制御精度までを含めた実大連結構造物のセミアクティブ震動制御システムの一貫した検証がなされたことを確認できる。このシステムを用いた実験によれば、正弦波加振条件のもとでは、パッシブ制御に比べセミアクティブ制御の方が効果的であることが示されている。

図7に示す実地震動波形(Kobe NS成分波 max20gal)入力時の応答を比較しても、3層最上階速度応答ではほぼ変わらないものの、5層最上階に対してはピーク値だけでなく過渡応答においてもセミアクティブ制御の方が効果的に応答を低減していることがわかる。

5. 結論

本研究では、連結構造システムにおいて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最適震動制御手法の有効性・応答低減効果について、実物大連結構造物フレームを用いた実験により検証した。適切なパラメータが設定された最適制御アルゴリズムを用い、高精度でバリアブルダンパーを制御する実験を

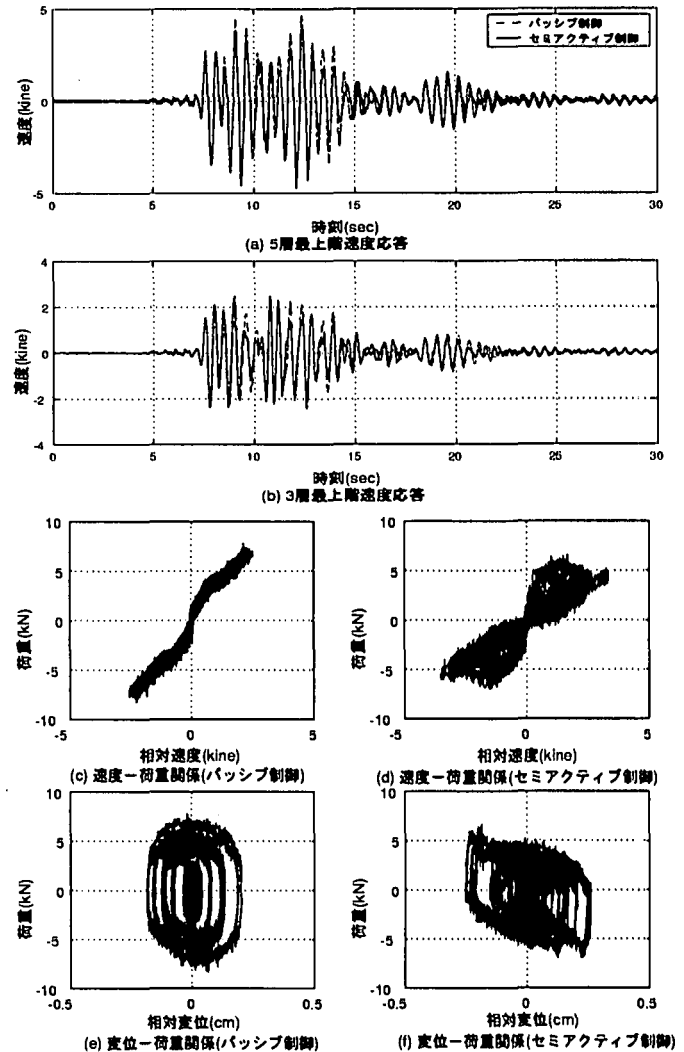


図-7 実地震動波形入力時の応答比較

行った結果、正弦波地動入力および実地震動波形入力の両ケースにおいて、粘性ダンパーによるパッシブ震動制御手法よりも効果的な応答低減が得られることを実大構造物の応答レベルで明示した。

参考文献

- 1) 井川望, 山田祐司, 横山浩明, 橋英三郎, 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) 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) 家村浩和・五十嵐晃・中田成智:「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」、構造工学論文集 Vol.46A, 2000

(2001年5月28日 受付)