

# ピエゾアクチュエータを用いた可変摩擦ダンパによる 建築構造物のセミアクティブ免震

—第2報, 縮尺セミアクティブ免震建物モデルによる振動制御実験—

Study on Semi-Active Seismic Isolation System with Controllable Friction Damper Using Piezoelectric Actuators

— 2nd Report, Excitation Tests for Semi-Active Seismic Isolation System —

佐藤 栄 児\*・藤 田 隆 史\*\*

Eiji SATO and Takafumi FUJITA

## 1. ま え が き

地震による構造物の応答加速度の低減を目的としてパッシブ免震構造を用いた建築構造物が実用化されている。このパッシブ免震構造では、応答加速度を低減させるために、地盤と構造物の間に大きな相対変位が発生してしまう問題がある。

そこで、この相対変位を低減させるために可変摩擦ダンパを用いたセミアクティブ免震構造が提案されている<sup>1,2)</sup>。これらのセミアクティブ免震における可変摩擦ダンパは、アクチュエータの駆動力で摩擦材を押し付け、摩擦力を発生させる構造である。しかし、この構造では大地震が発生した場合に、アクチュエータの故障や電源の供給が絶たれるなどの異常時において減衰性能を発揮することができない。その場合、免震建築構造物は低減衰となり、過大な相対変位が発生し周辺構造物等への衝突によりさらに大きな被害が発生することが考えられる。

そこで、本研究ではこれらの問題を解決するため、アクチュエータとして信頼性が高く、低電力で大きな力を発生でき、摩擦ダンパの構造が簡単にできる圧電アクチュエータを用い、更にアクチュエータ等の異常時においても減衰効果を発揮できるフェールセーフ機能を有する可変摩擦ダンパを提案する。更に本可変摩擦ダンパによる免震構造物の性能と安全性能について検討する。

本報では、本可変摩擦ダンパを用いたセミアクティブ免震構造物の振動制御実験について報告する。

## 2. 実 験 装 置

### 2.1 可変摩擦ダンパ

今回製作した可変摩擦ダンパを図1に示す。第1報にお

\*防災科学技術研究所

\*\*東京大学生産技術研究所 情報・システム部門

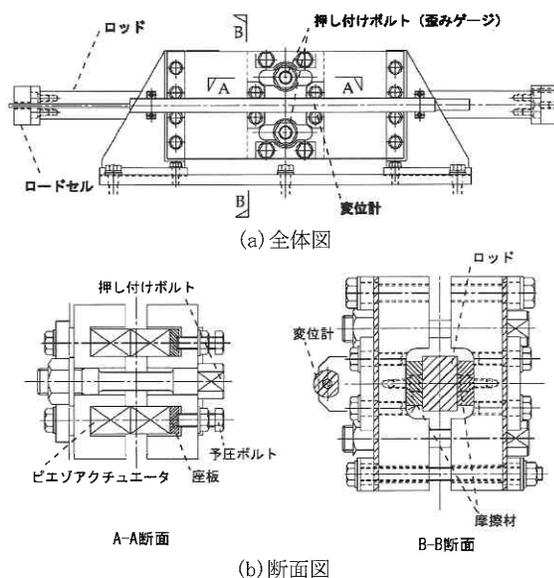


図1 可変摩擦ダンパ

いて、本可変摩擦ダンパの詳細な構造および特性実験結果について報告した<sup>3)</sup>。ここでは簡単に説明する。本可変摩擦ダンパは初期状態において押し付けボルトにより摩擦材をロッドに押し付けて拘束しておき、地震が発生した時に圧電アクチュエータの発生力で摩擦材をロッドから引き離す構造である。この圧電アクチュエータの力を制御することで、摩擦力を可変させる。本可変摩擦ダンパでは、アクチュエータの故障等により発生力が得られなくとも、押し付けボルトによる押し付け力により摩擦力が発生しており減衰力は得られる。本可変摩擦ダンパで用いた圧電アクチュエータは積層型で大きさ  $25 \times 25 \times 36$  mm、定格印加電圧 100 V、定格変位  $30 \mu\text{m}$ 、定格発生力 20 kN のものを使用した。圧電アクチュエータへの印加電圧と摩擦力の関係を図2に示す。

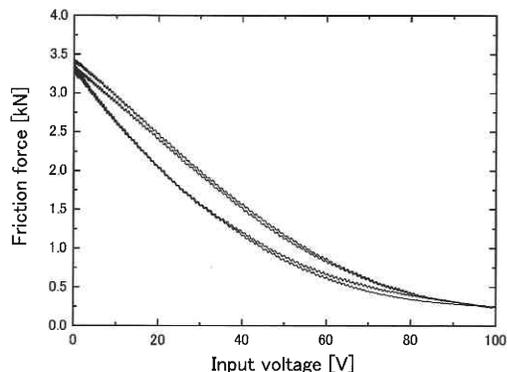


図2 印加電圧と摩擦力の関係

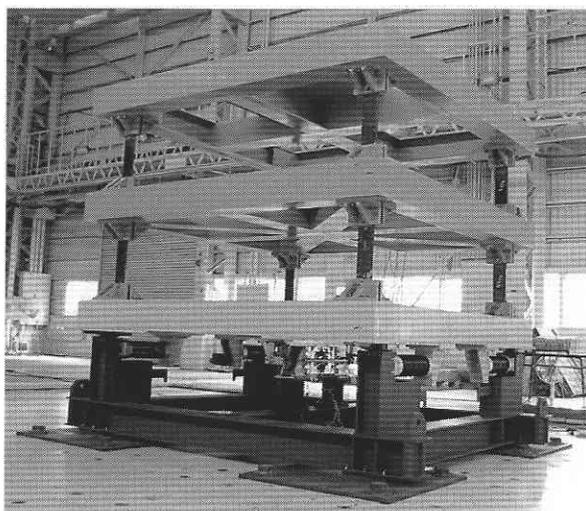


図3 免震建物モデル

2.2 免震建物

振動実験に用いた免震建物モデルを図3に示す。この免震建物モデルは、2層の鉄骨フレーム構造で、免震装置は上部構造の鉛直荷重を支持する4台の転がり支承と、復元力を与えるための4つのコイルばねで構成されている。可変摩擦ダンパは免震層の中央部に設置され、ロッドの両端が上部建物モデルに本体部が基礎に固定されている。鉄骨フレームの総質量は約6450 kgであり、免震系の固有周期は、振動実験及び自由振動より約3秒であった。

2.3 実験システム

制御・計測システムの概要を図4に示す。制御信号は、免震層の相対変位を変位計、可変摩擦ダンパの摩擦力をロードセルにより計測し、その信号をA/D変換しDSPにデジタル信号として取り込む。これらの信号からDSP内で状態量を算出し最適な操作量を導出する。この操作量をD/A変換し圧電アクチュエータ用ドライバに入力する。

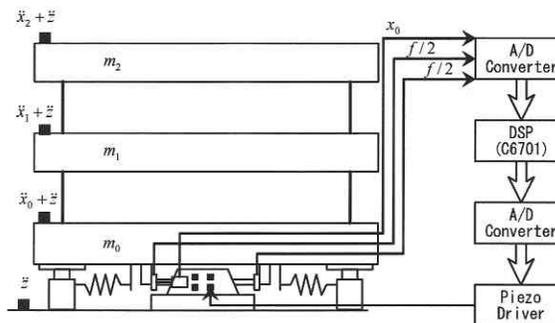


図4 制御システム

このドライバにより入力された信号（電圧）が増幅され、可変摩擦ダンパに組み込まれている圧電アクチュエータに印加され摩擦力を制御する。

計測項目は、入力加速度、各層の応答加速度、免震層の相対変位、摩擦力、操作量等である。

3. セミアクティブ制御則

セミアクティブ制御則として、最適レギュレータと瞬時最適制御則を用いた。また、制御系の設計は2層の免震モデルを単純な一質点系の免震モデルに低次元化し実施とした。

3.1 最適レギュレータ (LQ)

最適レギュレータにおいては、系を線形とし制御系を設計しておき、セミアクティブ制御の条件を導入する。よって免震構造物の運動方程式は以下のようになる。

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) + f(t) = -m\ddot{z}(t) \dots\dots\dots (1)$$

ここで  $m$ ,  $c$ ,  $k$  は、それぞれ建物モデルの質量、減衰係数、免震装置のばね定数を、また  $x$  は相対変位、 $f$  は摩擦力を表す。

最適レギュレータにおける評価関数は、次式で定義する。

$$J = \int_0^{\infty} \{ \alpha(\ddot{x}(t) + \ddot{z}(t))^2 + \beta\dot{x}(t)^2 + \gamma x(t)^2 \} dt \dots\dots\dots (2)$$

これより、レギュレータ問題を解くと最適な制御入力は以下のよう求められる。

$$u^* = -F_b X, \quad F_b = R^{-1}(S^T + B^T P) \dots\dots\dots (3)$$

ここで  $X$ ,  $B$  は運動方程式を状態空間表示したときの状態量と入力行列、 $R$ ,  $S$  は2次形式評価関数の重み行列、 $P$  はリカッチ方程式より導出される解を表す。さらに可変摩擦ダンパを用いたセミアクティブ制御では、制御対象に加

える力の向きは相対速度の方向に依存する条件を用いるため、最適な摩擦力は以下のように求まる。

$$f = \begin{cases} u^* & (\dot{x} \cdot u^* > 0) \\ f_{\min} & (\dot{x} \cdot u^* \leq 0) \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

ここでは、可変摩擦ダンパの発生摩擦力が導出された最適な摩擦力に精度良く追従するために摩擦力追従型のマイナーフードバックループを構成している。なお、このフィードバック制御にはPI制御を用いた。

**3.2 瞬時最適制御 (IOC)**

瞬時最適制御は、系が非線形であっても制御系の設計が実施できるため、摩擦ダンパを用いた免震構造の運動方程式を非線形のまま制御系の設計を行う。よって運動方程式は以下ようになる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + \text{sgn}(\dot{x})f = -m\ddot{z} \dots\dots\dots (5)$$

また、可変摩擦ダンパを以下のような線形近似式で近似する。

$$f(t) = b + aE(t) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $E$  は圧電アクチュエータへの印加電圧で、 $a$ 、 $b$  は、圧電アクチュエータの印加電圧と摩擦力の関係より得られる係数である。

瞬時最適制御における評価関数は、次式で定義する。

$$J = q_v \dot{x}(t)^2 + q_d x(t)^2 + q_f f(t)^2 + E(t)^2 \dots\dots\dots (7)$$

これらより、式 (7) の評価関数を最小にするような最適な操作量を求めると以下ようになる。

$$E^*(t) = -\frac{q_f ab}{m^2 + q_f a^2} + \frac{q_v m a \Delta t \text{sgn}(\dot{x}(t))}{2(m^2 + q_f a^2) \left(1 + \frac{\Delta t^2}{6} \omega^2 + \Delta t \zeta \omega\right)} \dot{x}(t) + \frac{q_d m a \Delta t^2 \text{sgn}(\dot{x}(t))}{6(m^2 + q_f a^2) \left(1 + \frac{\Delta t^2}{6} \omega^2 + \Delta t \zeta \omega\right)} x(t) \dots\dots\dots (8)$$

**4. 実 験 結 果**

振動台実験における入力波は、EL Centro NS 波 (1940

Imperial Valley Earthquake) を用い、入力レベルを 100 cm/s<sup>2</sup>, 200 cm/s<sup>2</sup>, 300 cm/s<sup>2</sup> に基準化した。

実験結果として、図 5, 6 にそれぞれ最適レギュレータおよび瞬時最適制御の場合の入力加速度と構造物の最大応答加速度および最大相対変位の関係を示す。最適レギュレータでは、免震効果をより向上させる場合 (Semi-Active1)、免震効果と変位低減効果の両方を向上させる場合 (Semi-Active2)、変位低減効果をより向上させる場合 (Semi-Active3) で制御系の設計を行った。また、瞬時最適制御の場合は、免震効果と変位低減効果の両方を向上させる場合 (Semi-Active2)、変位低減効果をより向上させる場合 (Semi-Active3) で制御系の設計を行った。図中の Passive1 と Passive2 は、押し付け力を一定とした摩擦ダンパによるパッシブ免震で、Passive1 の場合は 10 cm/s<sup>2</sup>, Passive2 の場合は 20 cm/s<sup>2</sup> 以上の入力になったときに摩擦ダンパが滑り出すように設定したものである。

また、図 7 に入力レベル 300 cm/s<sup>2</sup> の場合の最適レギュレータ、瞬時最適制御および 10 cm/s<sup>2</sup> トリガーのパッシブ免震の時刻歴波形を示す。図は上から、入力加速度、1 層床 (m0) 応答加速度、免震層相対変位、摩擦力を示す。これらより、セミアクティブ免震は Passive1 と比較した場合、同程度以上の免震効果が実現できており、Passive2 と比較した場合では、応答加速度が約 60% 程度に抑えられている。相対変位に関しては Passive1 の約半分程度まで抑えられている。セミアクティブ免震により免震効果と変位低減効果が向上していることがわかる。また、それぞれの制御手法において、設計により向上させたい効果をより向上できていることが確認できる。

**5. ま と め**

本研究では、信頼性が高く低消費電力で高出力の圧電アクチュエータを用い、かつフェールセーフ機能を有する可変摩擦ダンパを提案し、また本可変摩擦ダンパを用いたセミアクティブ免震構造の振動制御実験を実施した。その結果、提案した可変摩擦ダンパの機構により、セミアクティブ免震が実現でき、パッシブ免震と比較して免震効果の向上と相対変位の低減が可能であることが実証された。更に、セミアクティブ免震の制御系設計において、より向上させたい効果を希望どおり向上できることを実証した。

(2003 年 9 月 29 日 受 理)

**参 考 文 献**

- 1) 藤田, 壁矢ほか, 機論 (C 編) 57 巻 536 号 (1991)
- 2) 藤田, 榊ほか, 機論 (C 編) 63 巻 614 号 (1997)
- 3) 佐藤, 藤田, 生産研究, vol. 54, No. 6, (2002), 18.

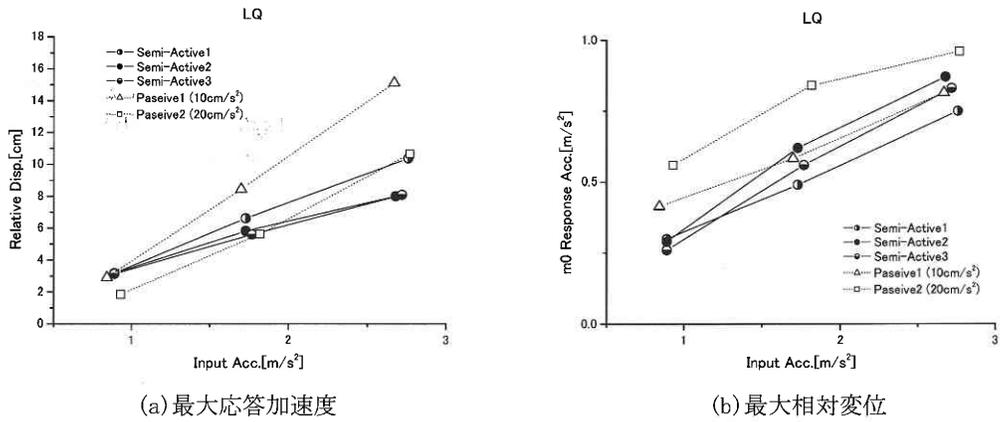


図5 最適レギュレータによるセミアクティブ免震

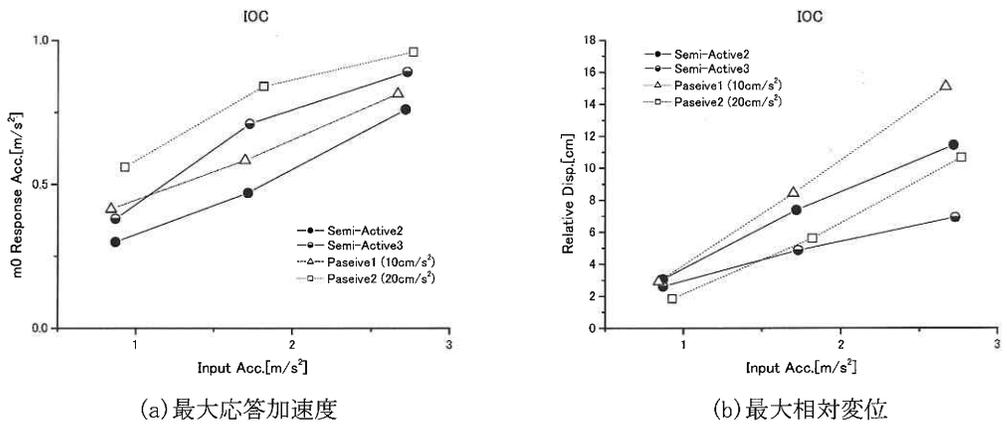


図6 瞬時最適制御によるセミアクティブ免震

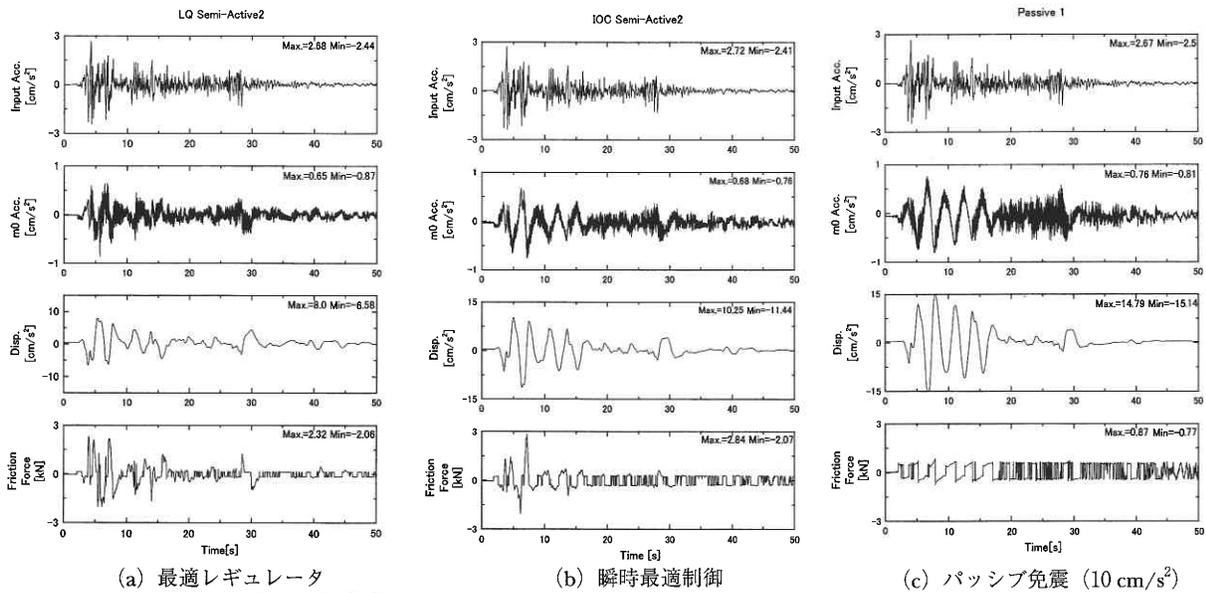


図7 時刻歴応答波形 (エルセントロ 300 cm/s<sup>2</sup>)