

# 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1報, 可変摩擦ダンパの特性実験—

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

— 1st Report, Experiments for Characteristics of Controllable Friction Damper —

佐藤 栄児\*・藤田 隆史\*\*

Eiji SATO and Takafumi FUJITA

## 1. ま え が き

地震時における地盤と構造物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)</sup>。しかし、従来提案されている可変摩擦ダンパは、大地震時においてアクチュエータの故障など想定される異常時において、減衰性能を十分に発揮することができない。その場合、建築構造物は低減衰の免震機構となり、相対変位が非常に大きくなるため周辺の構造物への衝突等によりさらに大きな被害が出ることが予想される。そこで、アクチュエータとして信頼性が高く、小型でも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。本研究では、提案した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、説明することを目的とする。本報では、実験用として製作した可変摩擦ダンパの特性実験結果と、得られた特性を用い実験用免震構造物を対象とした数値解析結果について報告する。

## 2. 可変摩擦ダンパ

既往の可変摩擦ダンパは、アクチュエータで摩擦材を押し付け、この力を制御することにより摩擦力を可変させるものである<sup>2)</sup>(以下、拘束型可変摩擦ダンパという)。拘束型可変摩擦ダンパの構造を図1に示す。

この拘束型可変摩擦ダンパでは、アクチュエータの故障などが起きた場合、摩擦力が発生せず減衰力が得られなくなる。この問題を解決するため、この様な異常状態においても、減衰効果が得られるフェールセーフ機能を有する可変摩擦ダンパ(以後、解放型可変摩擦ダンパという)を考

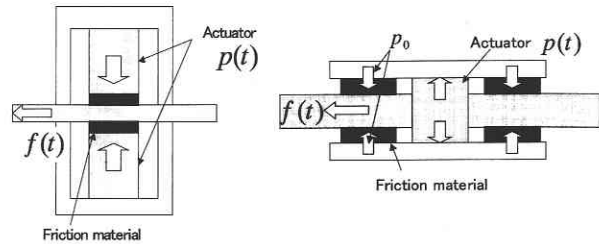


図1 拘束型可変摩擦ダンパ 図2 解放型可変摩擦ダンパ

案した。その構成を図2に示す。解放型可変摩擦ダンパは、初期状態で摩擦材を押し付けて拘束しておき、地震が発生した時にアクチュエータで摩擦材を引き離す。この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。この解放型可変摩擦ダンパでは、アクチュエータの故障等が発生して  $p(t) = 0$  となっても、初期押し付け力に  $p_0$  より摩擦力が発生しており、減衰力は得られる。

今回製作した解放型可変摩擦ダンパを図3に示す。2本の押し付けボルトにより初期押し付け力  $p_0$  を発生させ、4カ所に合計8個を設置したピエゾアクチュエータにより解放力を発生させる機構となっている。この2本の押し付けボルトには、歪みゲージが貼られており、事前の引っ張り試験により校正を行い、摩擦材押し付け力の計測用センサーとしても用いる。ピエゾアクチュエータは積層型で大きさ  $25 \times 25 \times 36$ 、定格印加電圧 100 V、定格変位  $20 \mu\text{m}$ 、定格発生力 20 kN のものを使用した。ピエゾアクチュエータの必要個数については、事前の解析により必要発生力を算出し求めた。ピエゾアクチュエータの発生力と発生変位を、予圧ボルトを用いて調整する。

## 3. 実験装置および計測システム

図4に実験状況を、図5に実験装置および計測システム

\*独立行政法人 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

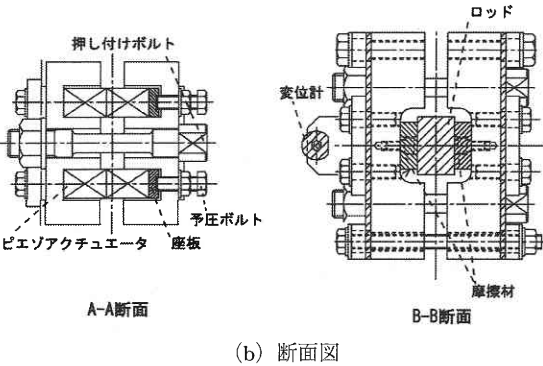
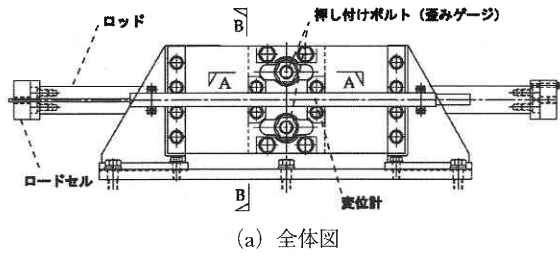


図3 解放型可変摩擦ダンパ

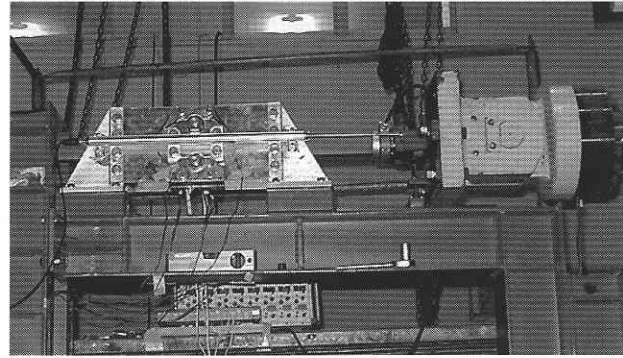


図4 実験状況

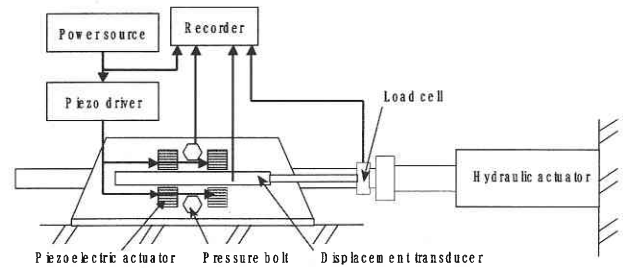


図5 実験装置および計測システム

を示す。ロッドの片側に取り付けられた油圧アクチュエータにより加振する。摩擦力はロッドと油圧アクチュエータの間に取り付けたロードセルで計測する。変位については、可変摩擦ダンパに装着されている変位計より計測する。ピエゾアクチュエータによる解放力は押し付けボルトの歪み量より計測する。ピエゾアクチュエータへの印加電圧は、ピエゾアクチュエータ用ドライバに入力する指令電圧より計測する。

#### 4. 実験および結果

実験条件を表1に示す。加振波形はすべて三角波とし、振幅は摩擦ダンパの最大変位である 15 cm とした。摩擦力の速度依存性について検討するため加振速度は4種類のものを用いた。

##### 4.1 摩擦力の速度依存性

図6は、ピエゾアクチュエータへの印加電圧が 0 [V] の時の加振速度ごとの摩擦力を示している。この結果から摩擦力はロッドの摺動速度に依存せず一定であることがわかる。このことは、ピエゾアクチュエータへの印加電圧が 25 [V], 50 [V], 75 [V], 100 [V] の場合、つまり摩擦材の押し付け力が増加した場合についても同様であった。また押し付け力を一定とし、摩擦係数を推定した結果、0.25 と求めた。

##### 4.2 ピエゾ発生力と摩擦力

図7は、各速度での加振時に、ピエゾアクチュエータの

表1 実験条件

| 加振波形 | 振幅<br>[cm] | 速度<br>[cm/s]   | ピエゾ印加電圧<br>[V] |                      |
|------|------------|----------------|----------------|----------------------|
| 三角波  | 15         | 6,12,<br>18,24 | 一定             | 0,25,50,<br>75,100   |
|      |            |                | ランプ            | 100-0                |
|      |            |                | 正弦波            | 100p-p<br>(1Hz, 2Hz) |

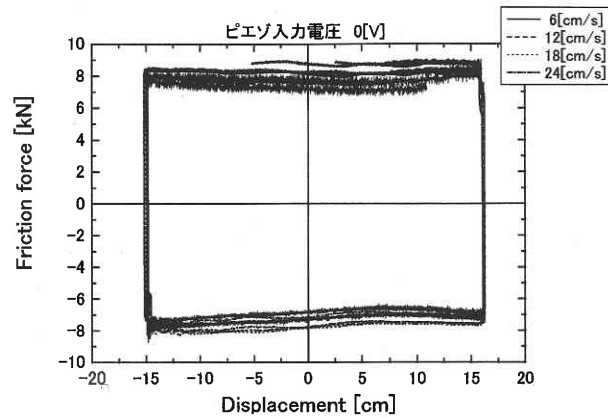


図6 摩擦力の速度依存性に関する試験

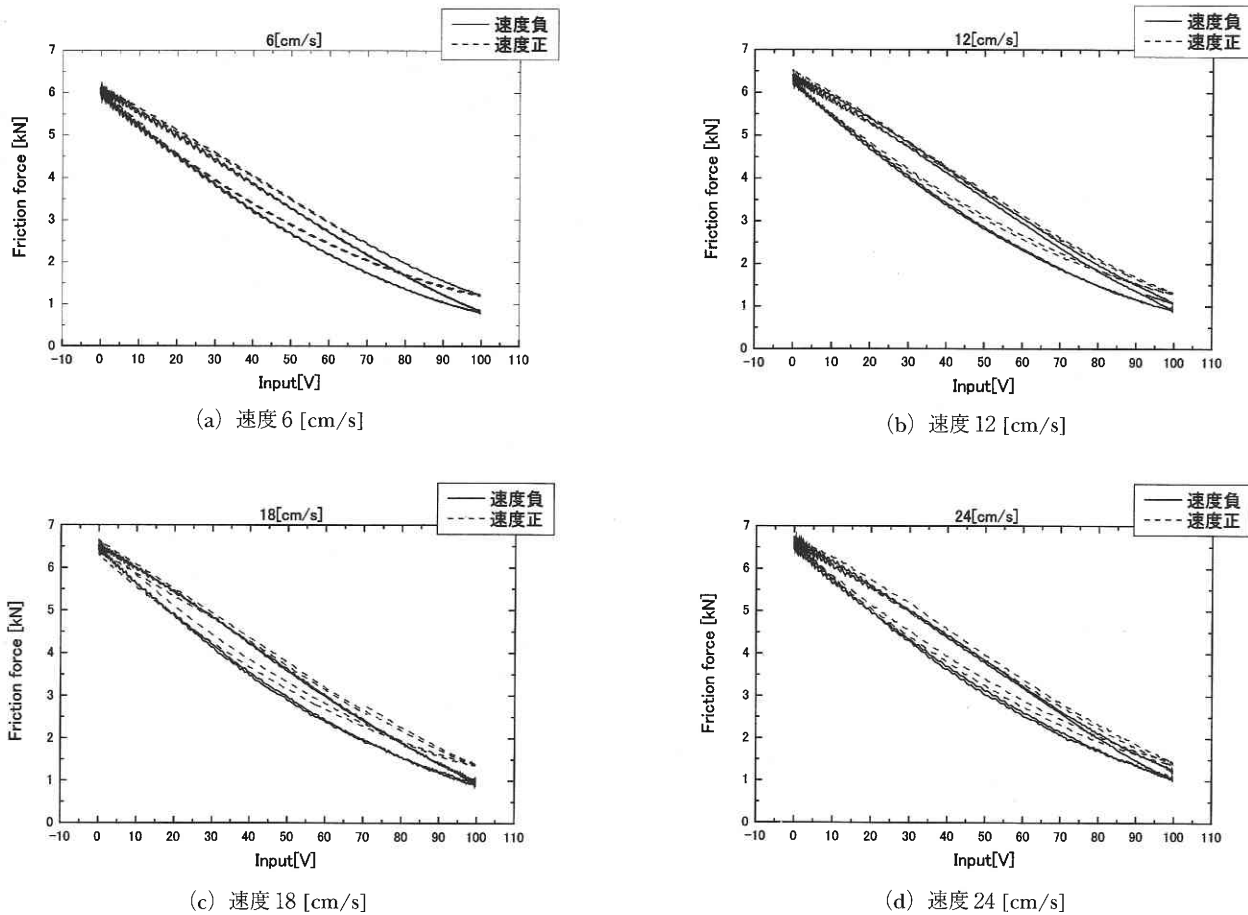


図7 ピエゾアクチュエータの印加電圧と摩擦力の関係

印加電圧を 0 [V] から 100 [V] まで正弦波で変化させたとき、ピエゾアクチュエータの印加電圧と摩擦力との関係を示す。今回製作した解放型可変摩擦ダンパは、摩擦力の変動幅が 1 [kN] から 6.5 [kN] となり、当初想定していた変動幅に比べ若干小さくなった。これは摩擦材の剛性やその他の摩擦材を押し付けている各部の剛性による影響と思われる。しかし、今後実施を予定している実験建物モデルを用いた振動実験で必要とされる摩擦力は十分に発揮できるものである。

また、ピエゾアクチュエータへの印加電圧と摩擦力の関係には若干のヒステリシスが存在するが、線形近似しても問題ない程度であるので、印加電圧と摩擦力の関係を線形として、今後の解析及び制御実験を行う。

### 5. 数 値 解 析

#### 5.1 摩擦ダンパの近似化

実験結果より、線形近似化したピエゾアクチュエータへ

の印加電圧と摩擦力の関係式は以下のように求まる。

$$f = 6.17 - 0.0528E, \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

$f$  : 摩擦力 [kN]

$E$  : ピエゾ印加電圧 [V], ( $0 \leq E \leq 100$ )

#### 5.2 可変摩擦ダンパによるセミアクティブ免震の数値解析

可変摩擦ダンパを用いたセミアクティブ免震構造の建物モデルを一質点系のモデルとして数値解析を行った。

解放型可変摩擦ダンパを用いた建物モデルによる運動方程式は、以下のようになる。

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) + 2\zeta\omega\dot{x}(t) + \omega^2x(t) + \text{sgn}(\dot{x}(t))F(t) &= -\ddot{z}(t) \\ F(t) &= \frac{\mu(p_0 - p(t))}{m} \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

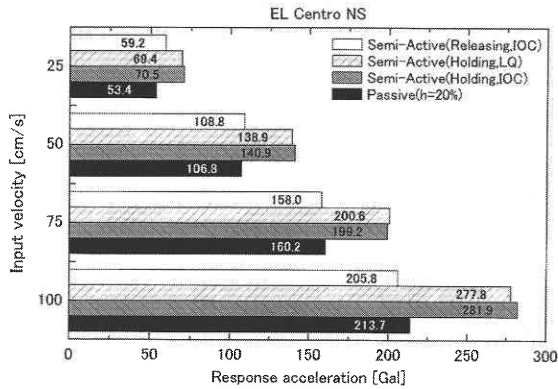


図8 最大応答加速度 (エルセントロ)

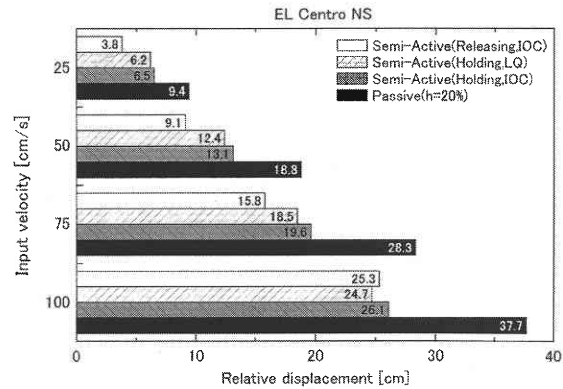


図9 最大相対変位 (エルセントロ)

この運動方程式は非線形であり、最適な解放力  $p(t)$  を求める制御則として対象を非線形系として扱うことができる瞬時最適制御則 (IOC) を用いた。評価関数を以下のようにおき、最適な解放力を導出した。

$$J(t) = q_v \dot{x}^2(t) + q_d x^2(t) + q_f F^2(t) + p^2(t) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $q_v \geq 0$ ,  $q_d \geq 0$ ,  $q_f \geq 0$

この評価関数を最小にする最適な解放力は以下のように求まる。

$$p^*(t) = \frac{q_f \mu^2}{m^2 + q_f \mu^2} P_0 - \frac{q_v m \mu \Delta t \operatorname{sgn}(\dot{x}(t))}{2(m^2 + q_f \mu^2) \left(1 + \frac{\Delta t^2}{6} \omega^2 + \Delta t \zeta \omega\right)} \dot{x}(t) - \frac{q_d m \mu \Delta t^2 \operatorname{sgn}(\dot{x}(t))}{6(m^2 + q_f \mu^2) \left(1 + \frac{\Delta t^2}{6} \omega^2 + \Delta t \zeta \omega\right)} x(t) \dots\dots\dots (4)$$

以上より、実証実験用に製作した免震構造物モデルを対象として数値解析を実施した。この実験建物モデルの総質量は 6000 [kg]、免震装置の固有周期は 3 [s] であり、減衰比は 2 [%] である。また、可変摩擦ダンパの動摩擦係数及び静止摩擦係数を実験より求めた 0.25 とし、ピエゾアクチュエータと摩擦力の関係は式 (1) を用いた。

入力地震動としては、エルセントロ NS 波 (1940, Imperial Valley Earthquake), JMA NS 波 (1995, 兵庫県南部地震), 八戸 NS (1968, 十勝沖地震), Taft EW 波 (1952, Arvin-Tehachapi Earthquake) を用い、入力レベルを 25 [cm/s], 50 [cm/s], 75 [cm/s] および 100 [cm/s] とした。ここではエルセントロ NS 波による解析結果のみを示す。

図8は最大応答加速度、図9は最大相対変位を示す。比較のため拘束型可変摩擦ダンパ (Holding) をもちい制御器を最適レギュレータ (LQ) で設計した場合と、制御器を瞬時最適制御 (IOC) で設計した場合のセミアクティブ免震構造および、20%の線形減衰を有するパッシブ免震構造 (Passive, h=20%) の結果も示す。

解放型可変摩擦ダンパ (Releasing) を用いた場合、パッシブ免震とほぼ同程度の免震効果が得られ、相対変位は 1/2 程度に低減させているものもある。また、他の2つのセミアクティブ免震構造と比較して免震性能は向上し変位低減性能も向上している。今回製作した解放型可変摩擦ダンパの能力で十分な変位低減性能が実現できることが解析的に証明できた。

## 6. ま と め

今回提案し製作した解放型可変摩擦ダンパが、ピエゾアクチュエータにより摩擦力を十分な変動幅で可変させることができることを確認した。

また、特性実験から得られた解放型可変摩擦ダンパの同定モデルを用い、今後実施する予定である免震実験建物モデルを用いた振動実験についての事前数値解析により、良好な変位低減性能が得られることを確認した。

(2002年9月13日受理)

## 参 考 文 献

- 1) 藤田, 壁矢ほか, 日本機械学会論文集, 1991, 57巻, 536号, C編, 1122-1128.
- 2) 藤田, 榊ほか, 日本機械学会論文集, 1997, 63巻, 614号, C編, 3467-3471.
- 3) Yang, J.N., Akbarpour, A., and Ghaemmaghami, P., New optimal control algorithms for structural control, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1987 Vol. 133 No. 9, 1369-1386.