

可変摩擦ダンパを用いたセミアクティブ免震構造の 制動制御に関する研究

Braking Control of Semiactive Seismic Isolation System Using Controllable Friction Damper

嶋 崎 守*・藤 田 隆 史*

Mamoru SHIMAZAKI and Takafumi FUJITA

1. ま え が き

現在のパッシブ免震技術は、免震効果の点では要求をほぼ満たすものとなっているが、応答変位に対してはその低減が望まれている。そのため著者は、可変摩擦ダンパを用いたセミアクティブ免震構造を提案し、免震効果を犠牲にすることなく、応答変位の低減をめざした研究を行ってきた^{1)~3)}。これまでの研究では、可変摩擦ダンパを開発し、本免震構造が従来のパッシブ免震構造と同等の免震効果を有し、応答変位を相当に小さく抑えることが可能であることを実証した。しかし、単一のフィードバックゲインによるセミアクティブ制御では、パッシブ免震構造と同様、入力地震動が大きくなるにつれて応答変位も増大する。したがって、万一応答変位が限界変位を越えるような過大地震動が発生すれば、免震効果が失われるばかりか、周辺との衝突によって大きな被害の出る恐れがある。そこで、複数のフィードバックゲインを系の状態に応じて適当に切換えることにより、過大地震動入力に対しては可変摩擦ダンパを制動装置として使い、免震効果を多少犠牲にしても応答変位を確実に許容変位内に抑え、周辺との衝突を回避するような制動制御が望まれる。本研究は、制動制御によって免震構造の許容変位内での最適な免震効果をめざすものであり、本報では、実験モデルを対象として、解析によりその有効性を検討している。

2. 制 御 系

2.1 解析モデル

解析は、これまで振動実験に用いた免震建物モデル(図1参照)を対象とする。この建物モデルは、総質量5250kgの一層建物で、4個の多段積層ゴムにより免震支持されている。一次の固有振動数および減衰比は、0.54Hz、1.9%、二次は、4.1Hz、0.9%で、許容変位は0.1mである。可変摩擦ダンパ(図2参照)は、一端

が球面軸受を介して建物モデル下面に取付けられた摩擦板への押付力を、振動台上に固定された油圧アクチュエータにより制御して可変減衰を得るもので、最大摩擦力は1基あたり19.6kNであり、これが2基取付けられている。押付力は指令電圧に対し一次遅れ系で近似でき、そのときの時定数は4 msecである。また摩擦係数は0.57である。

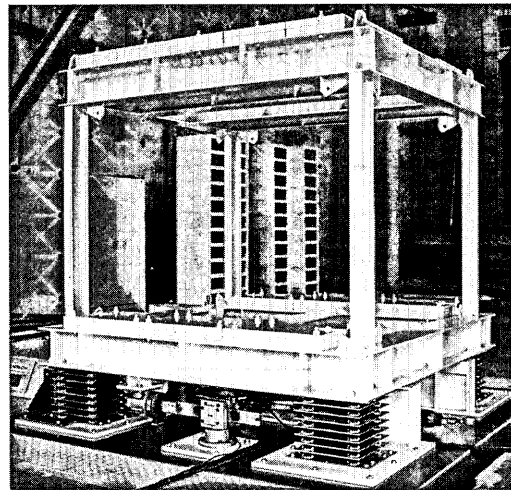


図1 実験建物モデル

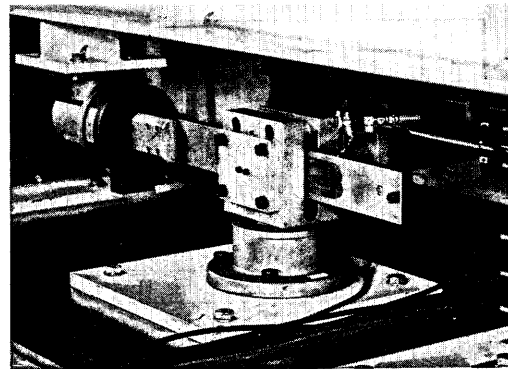


図2 可変摩擦ダンパ

*東京大学生産技術研究所 第2部

研 究 速 報

図3に解析モデルを示す。可変摩擦ダンパのすべりの有無を考慮すると、運動方程式は以下ようになる。

(1) 可変摩擦ダンパのすべりが無い場合 (Phase I)

$$x_1 = const, \dot{x}_1 = 0$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 - k_2 x_1 + k_2 x_2 = -m_2 \ddot{z} \quad (1)$$

(2) 可変摩擦ダンパのすべりがある場合 (Phase II)

$$m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + (k_1 + k_2) x_1 - k_2 x_2 + 2\mu(m_1 + m_2) p \operatorname{sgn}(\dot{x}_1) = -m_1 \ddot{z}$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - c_2 \dot{x}_1 + c_2 \dot{x}_2 - k_2 x_1 + k_2 x_2 = -m_2 \ddot{z} \quad (2)$$

(3) Phase I と Phase II の切換え条件⁴⁾

$$|m_1 \ddot{z} - c_2 \dot{x}_2 + (k_1 + k_2) x_1 - k_2 x_2| > 2\mu(m_1 + m_2) p \quad (3)$$

のとき、Phase I から Phase II へ切換わり

$$\dot{x}_1 = 0 \quad \text{かつ、}$$

$$|m_1 \dot{x}_1| \leq 4\mu(m_1 + m_2) p \quad (4)$$

のとき、Phase II から Phase I へ切換わり。

また、可変摩擦ダンパ (油圧アクチュエータ) の動特性は以下のように表せる。

$$T\dot{p} + p = Ku \quad (5)$$

ただし、 m_1, x_1 は建物モデル下部スラブの質量、変位、 m_2, x_2 は建物モデル上部スラブの質量、変位、 c_1, k_1

は積層ゴムの減衰係数、ばね定数、 c_2, k_2 は建物モデルの柱の減衰係数、ばね定数、 μ は可変摩擦ダンパの摩擦係数、 T, p および K は油圧アクチュエータの時定数、建物モデル単位質量あたりの押付力およびゲイン、 u は操作電圧、 \ddot{z} は地震動の入力加速度である。

2.2 セミアクティブ制御場

2.1節より、システムは5次系となるが、今回の解析においても振動実験と同様、実用上の制御則として、建物モデルを剛体とみなし、システムを低次元化して状態量を減らす方法を用いる²⁾。したがって、運動の自由度は、建物モデル全体の重心の変位のみになる。

制御系は最適レギュレータを用いて構成する。制御系はシステムを線形化して設計する。運動方程式は以下ようになる。

$$m\ddot{x} + c_1\dot{x} + k_1x + 2mf = -m\ddot{z} \quad (6)$$

また、可変摩擦ダンパの動特性は以下のように表す。

$$T\dot{f} + f = \mu Ku^* \quad (7)$$

評価関数は、絶対加速度、相対変位および操作電圧を考慮した次式で定義する。

$$J = \int_0^\infty [a(\ddot{x} + \ddot{z})^2 + \beta x^2 + u^{*2}] dt \quad (8)$$

ここで、 m, x は建物モデル全体の質量、変位、 f は可変摩擦ダンパの発生する単位質量あたりの摩擦力、 u^* は式(6)~(8)からなる最適レギュレータ問題を解いて得られる最適操作量である。

可変摩擦ダンパによるセミアクティブ制御では、制御対象に加える力の方向は相対速度の方向に依存するので、実際の操作量は以下の条件にしたがう。

$$u = \begin{cases} |u^*| & \dot{x} \cdot u^* > 0 \\ 0 & \dot{x} \cdot u^* \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

2.3 ファジィ推論によるフィードバックゲイン切換え

制動制御でのフィードバックゲインの切換えにはファジィ推論を適用する。ファジィ変数には応答速度および応答変位をとる。表1に制御規則を示す。また、各ファジィ変数のメンバーシップ関数を図4に示す。それぞれ

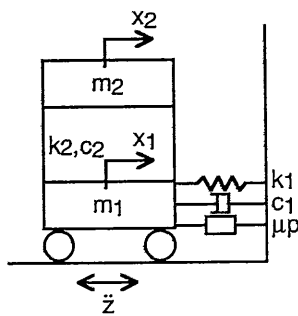


図3 解析モデル

表1 制御規則

Rulé	X	\dot{X}	u
1	NB	----	H
2	NM	NB,NM,PB	H
3	NM	S,PM	N
4	S	NB,PB	H
5	S	NM,S,PM	N
6	PM	NB,PM,PB	H
7	PM	NM,S	N
8	PB	----	H

NB: Negative Big, NM: Negative Medium, S: Small, PM: Positive Medium, PB: Positive Big, N: Normal Gain, H: High Gain

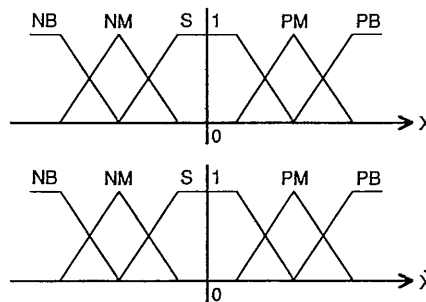


図4 メンバーシップ関数

の制御規則での適合度は、各ファジィ変数のメンバーシップ関数値の積によって定義され、それらの重み付き平均値をもって全体の推論結果とする。これらから、入力空間に対して、出力は図5のようにファジィ分割される。なお今回の解析では、2種類のフィードバックゲイ

ンの切換えによって制動制御を行うが、数種類のフィードバックゲインを用いる場合でも、同様にして本推論法を適用することができる。

3. 解 析 結 果

解析には入力地震動として、エルセントロ NS 波および秋田 NS 波を用いた。解析結果を図6, 7に示す。図中の実線で示したパッシブは、系が15%の線形減衰を有する場合のパッシブ応答で、パッシブ免震には最適な減衰であるが、実際に15%の線形減衰を建物に与えるのは困難な点が多い。この理想的なパッシブ免震系では、十分な免震効果を発揮するが、地震動の入力速度が25kine程度で許容変位に達してしまう。また、図中の破線で示したパッシブは、可変摩擦ダンパの発揮できる最大摩擦力で、かつ一定にした場合のパッシブ応答で、可変摩擦ダンパを制動装置として用いる場合の最大的能力を示すものである。たとえばエルセントロ NS 波の場合、入力速度が150kine程度で許容変位に達する。したがって、

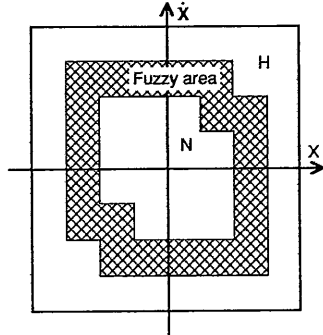


図5 入力空間のファジィ分割

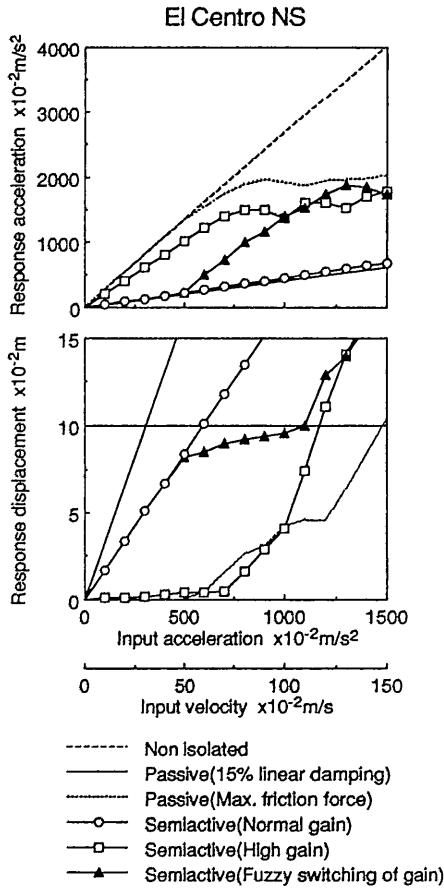


図6 制動制御結果(エルセントロ NS 波入力)

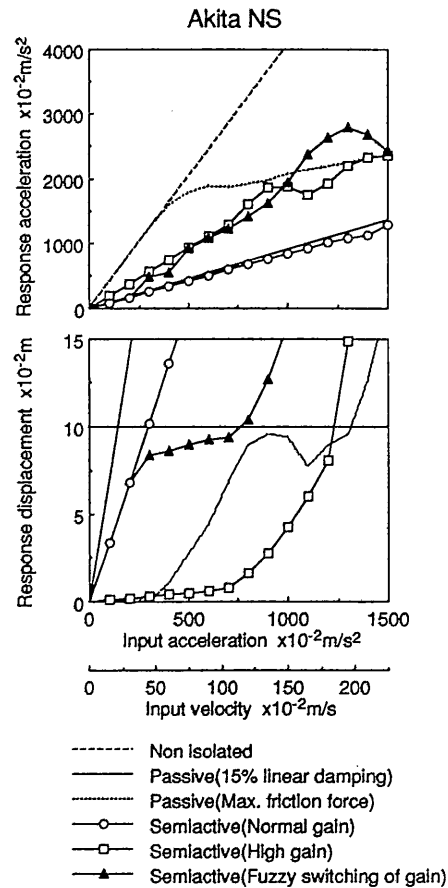


図7 制動制御結果(秋田 NS 波入力)

研究速報

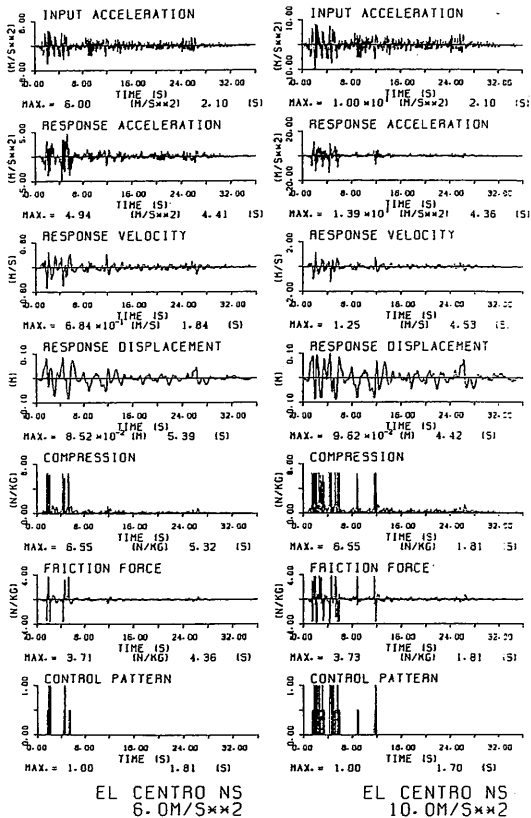


図8 制動制御時の応答波形例

どのような制御をしても、これ以上の入力に対しては応答変位を許容変位内に抑制することができないことを示している。

前述のように、今回の解析での許容変位は0.1mで、2種類のフィードバックゲインの切換えによって制動制御を行った。すなわち、通常は免震効果を重視し、最大の免震効果を発揮するような弱いゲインを用い、地震動入力が大きくなって許容変位を越えるおそれのある場合には、変位抑制を重視した強いゲインを用いた。それぞれのゲインの選定は、弱いゲインには通常のセミアクティブ制御に用いられるゲイン(図中の Normal gain)を用いた。このゲインは、理想的なパッシブ免震系と同等の免震効果を有し、応答変位を半減させるようなものである。このゲインを用いた理由は、セミアクティブ免震ではゲインをいくら弱くしても加速度低減能力には限界があり、それが理想的なパッシブ免震系と同程度だからである。また強いゲインは、今回は制動制御により、入力速度100kine 程度までの地震動に対して応答変位を許容内に抑えるようなゲイン(図中の High gain)を用いた。ただし、可変摩擦ダンパの能力には限界があるの

で、それを越えるような大きな操作量を制御系が要求しても最大値で飽和させる。これら2種類のゲイン切換えでの制動制御により、単一ゲインによるセミアクティブ制御では、双方の地震波に対して、入力速度50kine 程度で許容変位を越えてしまうが、入力速度100kine まで確実に許容内に応答変位を抑制している。しかも、ゲイン切換えが起こるまでは、理想的なパッシブ免震系と同等の免震効果を発揮している。ただ、ゲイン切換えが起こると変位抑制のために免震効果は犠牲になるが、理想的なパッシブ免震や単一ゲインでのセミアクティブ制御では、応答変位が許容変位に達すれば免震効果も低減して行き、やがては周辺との衝突を起こし、応答加速度は非免震の状態よりも大きくなってしまおうと考えられるので、それに比べるとかなりの免震効果があるといえる。

図8はエルセントロ NS 波入力による制動制御時の応答波形である。図中の CONTROL PATTERN は、ゲインに何をを用いているかを示したもので、0のときは Normal gain を、1のときは High gain を示し、0.5のときはファジィ領域であることを示している。同図より、制動制御によって応答変位が許容変位を越えそうになるとゲイン切換えが起こり、無理なく許容内に抑制しているのがわかる。

4. あとがき

免震構造の許容変位内においての最適な免震効果をめざして、複数のフィードバックゲインを用いてゲイン切換えを行う制動制御を提案した。その結果、現在の免震構造の設計基準をはるかに越えるようなレベルの過大地震動にまで、免震効果を重視しながら確実に応答変位を許容変位内に抑えることが可能であることを解析によって確認した。

本報では入力速度100kine までの地震動を考慮し、その結果、2つのフィードバックゲインを選定して制動制御を行った。この手法により、許容変位と設計地震動レベルが与えられれば、フィードバックゲインの数の検討とそれらの選定によって、本研究の目的を達成するような最適な免震構造が実現できると思われる。

(1992年7月3日受理)

参考文献

- 1) 藤田・壁矢・速水, 生産研究, Vol. 41, No 8, (1989), 29.
- 2) 藤田・壁矢・速水・相沢・東野・久保・羽生田・森, 機論, 57-536, C (1991), 1122.
- 3) 藤田・嶋崎・速水・相沢・東野・久保・羽生田, 機論, 58-551, C (1992), 2012.
- 4) F-G. Fan, G. Ahmadi and I. G. Tadjbakhsh, Technical Report NCEER-88-0010, (1988), A-1.