

減衰力可変ダンパによるセミアクティブ・コントロール を用いた免震構造の基礎的研究

Fundamental Study of Seismic Isolation Systems Using Semi-Active Control by Variable Dampers

藤 田 隆 史*・壁 矢 和 久*・速 水 浩**
Takafumi FUJITA, Kazuhisa KABEYA and Yutaka HAYAMIZU

1. ま え が き

近年、実用化が急速に進展している免震床や免震建物などのパッシブ免震構造により、応答加速度の低減はほぼ満足できる程度まで可能となっている。しかし、現状のパッシブ免震技術では、発生確率の非常に小さい大地震時に生ずる大変位を想定し、大きなマージンスペースを確保しており、その低減が望まれている。

本研究は、減衰力可変ダンパを用いたセミアクティブ・コントロールを導入することにより、上述の問題を解決しようとするものである。セミアクティブの長所はアクティブほどのコストをかけずにパッシブ以上の免震性能を期待でき、信頼性も高い点にある。制御則には最適レギュレータに基づいたものを用い、絶対加速度はパッシブ並みに落とし、相対変位をできる限り抑えることに主眼を置く。また、可変ダンパをブレーキのように使い、免震効果を多少犠牲にしてでも相対変位を確実に許容範囲内に抑え、衝突を回避する機能を持たせることも考える。最終目標として、与えられた許容変位スペース内で最適な免震効果の得られるインテリジェントな免震構造の開発を目指している¹⁾。

2. 最適レギュレータを用いたセミアクティブ制御則

2.1 基礎理論

図1のようなせん断型n質点系モデルを考えると、運動方程式は以下になる。

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + c_2 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \\ + k_1 x_1 + k_2 (x_1 - x_2) + F = -m_1 \ddot{z} \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + c_3 (\dot{x}_2 - \dot{x}_3) \\ + k_2 (x_2 - x_1) + k_3 (x_2 - x_3) = -m_2 \ddot{z} \\ \dots\dots\dots \\ m_n \ddot{x}_n + c_n (\dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}) \\ + k_n (x_n - x_{n-1}) = -m_n \ddot{z} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ただし、

- $m_i (i=1 \sim n)$: i番目の質点の質量
- $x_i (i=1 \sim n)$: 質点 m_i の地面に対する相対変位
- k_1 : 免震装置のばね定数
- c_1 : 免震装置の減衰定数
- F : 可変ダンパによる減衰力
- $k_i (i=2 \sim n)$: 質点 m_i と m_{i-1} の間のばね定数
- $c_i (i=2 \sim n)$: 質点 m_i と m_{i-1} の間の減衰定数
- \ddot{z} : 地動加速度

一方、評価関数 J を一般に次のように設定する。

$$J = \int_0^{\infty} \{ \alpha_1 (\ddot{x}_1 + \ddot{z})^2 + \beta x_1^2 + \gamma u^2 dt \} \quad (2)$$

式(1)より得られるシステムの状態方程式を地動加速度を外乱とみなし(形式的に $\ddot{z}=0$ とおく)

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}u \quad (3)$$

の形に表し、評価関数(2)を次式のように変形する。

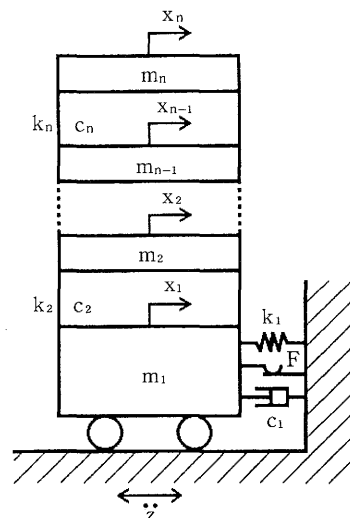


図1 n質点系モデル

*東京大学生産技術研究所 第2部

** (株)竹中工務店 技術研究所

研究速報

$$J = \int_0^\infty \dot{X}^T Q X + 2 \dot{X}^T S u + u^T R u dt \quad (4)$$

ここで式(3)、(4)からなる最適レギュレータ問題を解いて最適操作量 u^* を求めると

$$u^*(t) = -R^{-1}(B^T P + S^T) X \quad (5)$$

となる。ただし P は以下のリカッチ方程式の解である。

$$P(A - BR^{-1}S^T) + (A - BR^{-1}S^T)^T P - PBR^{-1}B^T P + (Q - SR^{-1}S^T) = 0 \quad (6)$$

ところで本研究で用いるのは可変ダンパであり、一般にダンパにより発生する力の方向は免震装置の相対速度 \dot{x}_1 の方向で決まる。すなわちダンパでは相対速度と同方向の力は発生できないので、実際に生ずる単位質量当りの減衰力 $f = F/\Sigma m_i$ は以下の制限を受ける。

$$f = \begin{cases} f^* & (f^* \cdot \dot{x}_1 > 0) \\ 0 & (f^* \cdot \dot{x}_1 \leq 0) \end{cases} \quad (7)$$

ただし、 f^* は操作量が u^* のときのダンパの減衰力である。よって、実際の制御は次式に従って行われる。

$$u = \begin{cases} u^* & (f^* \cdot \dot{x}_1 > 0) \\ 0 & (f^* \cdot \dot{x}_1 \leq 0) \end{cases} \quad (8)$$

ここで、ハードウェアとして可変摩擦ダンパと可変粘性ダンパについて考えた場合を以下に示す。

a) 可変摩擦ダンパの場合

$$f = \mu P \cdot \text{sgn}(\dot{x}_1), u = P \quad (9)$$

ただし、 μ ：可変摩擦ダンパの摩擦係数

P ：可変摩擦ダンパの単位質量当りの押付け力

b) 可変粘性ダンパの場合

$$f = 2 \xi \omega \dot{x}_1, u = \xi \quad (10)$$

ただし、 ξ ：可変粘性ダンパの減衰比

ω ：免震装置の固有円振動数

2.2 シミュレーションによる検討

ここでは、一質点系モデル ($n=1$ の場合) におけるパッシブ、アクティブ (f に制限がない)、セミアクティブの免震性能の比較を行い、さらに可変ダンパのハードウェアについて検討を加える。

系の運動方程式、評価関数は以下のように書くことができ、制御則は基礎理論のとおりである。

$$\ddot{x}_1 + 2 \xi_1 \omega_1 \dot{x}_1 + \omega_1^2 x_1 + f = -\ddot{z} \quad (11)$$

ただし、 $\omega_1 = \sqrt{k_1/m_1}$, $\xi_1 = c_1/2\sqrt{m_1 k_1}$, $f = F/m_1$

$$J = \int_0^\infty \{ \alpha_1 (\ddot{x}_1 + \ddot{z})^2 + \beta x_1^2 + \gamma u^2 \} dt \quad (12)$$

ここで評価関数の相対変位重み β を変化させ、絶対加速度評価の場合と相対変位評価の場合の双方についてシミュレーションを行い、免震性能の比較をした。シミュレーションは時間刻み0.001秒のルンゲ・クッタ法で行い、制御のサンプリングタイムは0.01秒とした。また、諸パラメータ値は既存のパッシブ免震床を想定し以下のとおりに設定した ([] 内はパッシブの場合)。

$\omega_1 = 1.795$ (固有周期3.5秒)

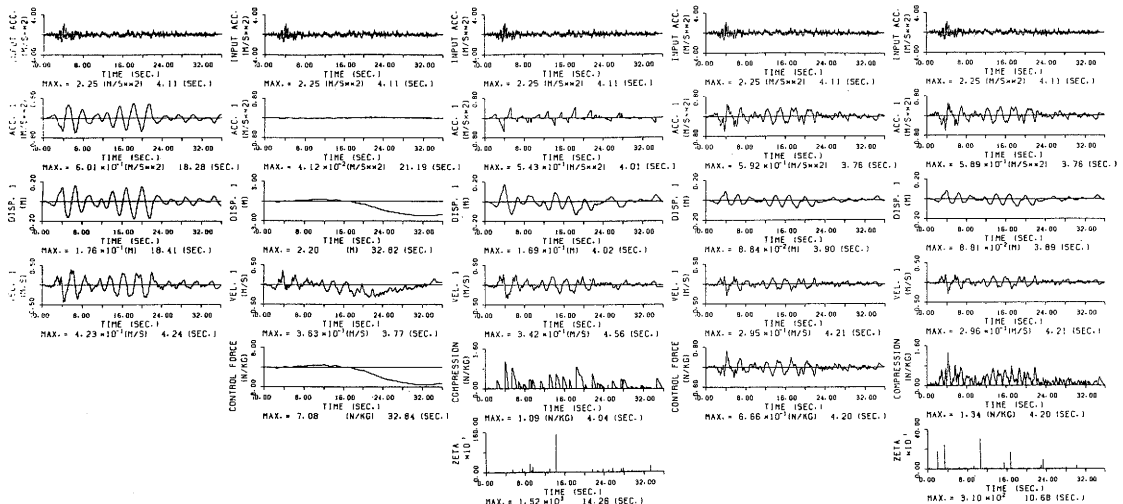
$\xi_1 = 0.01[0.15]$

$\mu = 0.5[0]$

$\alpha_1 = 1, \beta = 10^{-6}, \gamma = 10^{-6}$ (絶対加速度評価のとき)

$\alpha_1 = 1, \beta = 5, \gamma = 10^{-6}$ (相対変位評価のとき)

図2はシミュレーションによる応答波形例 (八戸NS波入力の場合) である。まずパッシブと絶対加速度評価



①パッシブの場合

②アクティブの場合

③セミアクティブの場合

④アクティブの場合

⑤セミアクティブの場合

(絶対加速度評価)

(絶対加速度評価)

(相対変位評価)

(相対変位評価)

図2 一質点パッシブ/アクティブ/セミアクティブ免震系の応答波形

のアクティブ、セミアクティブの比較をする (①～③)。これを見ると、アクティブの質点の絶対加速度はパッシブの1/10以下になっており、非常に優れた免震性能を示しているが、セミアクティブの場合は若干良くなる程度であり、応答波形もアクティブとはかなり異なっている。しかし、アクティブにおける質点の相対変位はパッシブの10倍以上になっており、絶対加速度と相対変位は相反することがわかる。

次に、相対変位評価について見てみる (④, ⑤)。この場合はアクティブとセミアクティブの制御成績に差異はほとんど認められず、共に絶対加速度はパッシブ並みに低減され、かつ相対変位は半減されている。

以上より、本研究のように相対変位の低減に主眼を置く場合には、アクティブで必要となる制御力のほとんどがダンパで実現可能な減衰力であり、可変ダンパによるセミアクティブで十分であると言える。

最後に可変ダンパのハードウェアについて検討する。セミアクティブの応答波形中のCOMPRESSIONは可変摩擦ダンパを用いた際の単位質量当りの押付け力、ZETAは可変粘性ダンパを用いた際の減衰比を示している。⑤によれば摩擦ダンパの押付け力の最大値は1.34N/kgであり、これは油圧アクチュエータなどで容易に実現できる程度の力である。一方、粘性ダンパの減衰比の最大値は臨界減衰比をはるかに超える値 (310) であり、可変オイルダンパなど既存のハードウェアでの実現は困難なものと考えられる。

したがって、本研究では可変ダンパとして可変摩擦ダンパを採用することとする。

3. 可変摩擦ダンパによるセミアクティブ制御

3.1 解析モデル

解析モデルとしては建物の免震を想定して二質点系モデル ($n=2$ の場合) を考え、さらにここではアクチュエータの動特性と摩擦ダンパのすべりの有無による静/動摩擦の切換えも考慮する。

系の運動方程式は静/動摩擦の切換えを考慮すると以下になる²⁾。

(1) 摩擦ダンパのすべりが無い場合——Phase I

$$x_1 = \text{const.}, \dot{x}_1 = 0 \quad (13)$$

$$\ddot{x}_2 + 2\zeta_2\omega_2\dot{x}_2 + \omega_2^2(x_2 - x_1) = -\ddot{z} \quad (14)$$

(2) 摩擦ダンパのすべりがある場合——Phase II

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 + 2\zeta_1\omega_1\dot{x}_1/(1-\rho) \\ + 2\rho\zeta_2\omega_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)/(1-\rho) \\ + \omega_1^2x_1/(1-\rho) + \rho\omega_2^2(x_1 - x_2)/(1-\rho) \\ + \mu P \cdot \text{sgn}(\dot{x}_1)/(1-\rho) = -\ddot{z} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\ddot{x}_2 + 2\zeta_2\omega_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + \omega_2^2(x_2 - x_1) = -\ddot{z} \quad (16)$$

ただし、 $\omega_1 = \sqrt{k_1/(m_1+m_2)}$, $\zeta_1 = c_1/2\sqrt{(m_1+m_2)k_1}$,

$$\omega_2 = \sqrt{k_2/m_2}, \zeta_2 = c_2/2\sqrt{m_2k_2},$$

$$\rho = m_2/(m_1+m_2), \mu P = F/(m_1+m_2)$$

(3) Phase I と Phase II の切換え条件

$$\begin{aligned} |\ddot{z} + 2\rho\zeta_2\omega_2\dot{x}_2/(1-\rho) + \omega_1^2x_1/(1-\rho) \\ + \rho\omega_2^2(x_1 - x_2)/(1-\rho)| > \mu P/(1-\rho) \end{aligned} \quad (17)$$

のとき, Phase I → Phase II

$$\dot{x}_1 = 0 \text{ かつ}$$

$$\begin{aligned} |(\ddot{x}_1 + \ddot{z}) + 2\rho\zeta_2\omega_2\dot{x}_2/(1-\rho) + \omega_1^2x_1/(1-\rho) \\ + \rho\omega_2^2(x_1 - x_2)/(1-\rho)| \leq \mu P/(1-\rho) \end{aligned} \quad (18)$$

のとき, Phase II → Phase I

アクチュエータの動特性は単位質量当りの押付け力 P について一次遅れとし、次式のように表す。

$$T\dot{P} + P = Ku \quad (T: \text{時定数}, K: \text{ゲイン}) \quad (19)$$

また、評価関数は以下のように設定する。

$$\begin{aligned} J = \int_0^\infty \{ \alpha_1(\ddot{x}_1 + \ddot{z})^2 + \alpha_2(\ddot{x}_2 + \ddot{z})^2 + \beta x_1^2 \\ + \gamma u^2 \} dt \end{aligned} \quad (20)$$

ここで制御則は、式 (15), (16), (19) からなるシステムの状態方程式および式 (20) の評価関数から、前述の基礎理論に基づいて決定する。

3.2 シミュレーション結果と考察

アクチュエータの時定数 T が 0.01 秒と 0.1 秒の場合についてシミュレーションを行い、非免震、パッシブ、アクティブ、セミアクティブの免震性能の比較をした。

シミュレーションの方法は一質点系のときと同様で、諸パラメータ値は既存のパッシブ免震建物を想定し以下のとおりに設定した ([] 内はパッシブの場合)。

$$\omega_1 = 2.513 \text{ (固有周期 2.5 秒)}$$

$$\zeta_1 = 0.01 [0.15]$$

$$\mu = 0.5 [0]$$

$$\omega_2 = 25.13 \text{ (固有振動数 4 Hz)}$$

$$\zeta_2 = 0.03$$

$$\rho = 0.5, K = 1.0$$

$$\alpha_1 = 0.05, \alpha_2 = 1, \beta = 15, \gamma = 0.01 \text{ (T=0.01 秒のとき)}$$

$$\alpha_1 = 0.1, \alpha_2 = 1, \beta = 15, \gamma = 0.001 \text{ (T=0.1 秒のとき)}$$

図 3, 4 は免震性能の比較で、Acc. は建物の最上部の絶対加速度, Disp. は免震装置の相対変位のそれぞれ最大応答値を示している。これによると、セミアクティブにおいて絶対加速度はパッシブより若干優る程度 (非免震の 1/3 ~ 1/7) に低減され、相対変位はパッシブの約 1/2 に抑えられており、要求どおりの良好な結果が得られている。アクティブと比べてもほぼ同等の制御成績である。また、時定数が多少大きくなっても性能の低下はなく、ゲインをうまく選べば T=0.1 秒程度の時間遅れは許され、特別に速応性のあるハードウェアは必要ないと言え

研 究 速 報

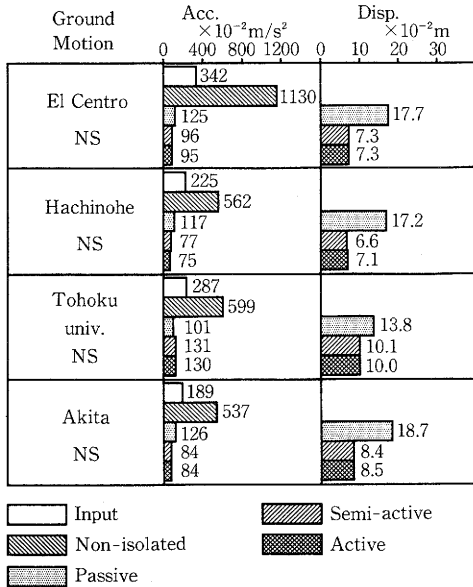


図3 免震性能の比較 (T=0.01秒の場合)

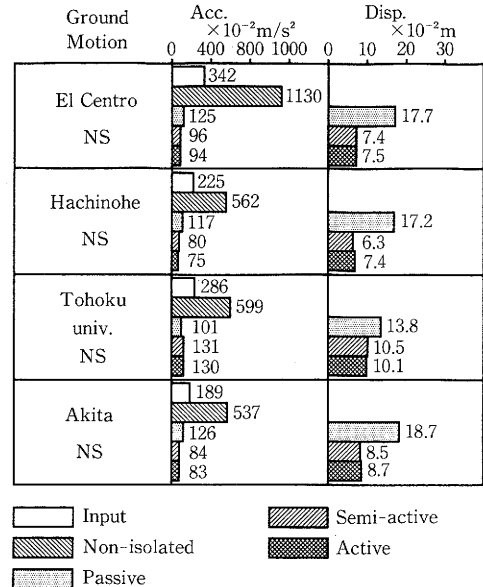


図4 免震性能の比較 (T=0.1秒の場合)

る。

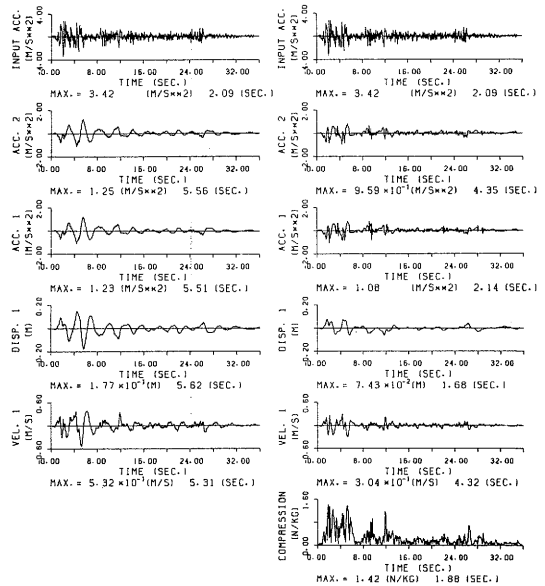
図5はT=0.1秒のときのパッシブ、セミアクティブの応答波形例(エルセントロNS波入力の場合)である。これによると、静/動摩擦の切換え、すなわち可変摩擦ダンパのすべりがなくなり静止するところは、この加速度レベルの地震波ではほとんど見られない。また、セミアクティブに要するアクチュエータの押付け力は、建物質量1t当り0.145tfとなり、油圧アクチュエータで十分実現できることがわかる。

4. あ と が き

本稿では、減衰力可変ダンパを用いたセミアクティブ・コントロールを導入することにより、従来のパッシブ免震並みの免震効果(絶対加速度の低減)を有し、かつ相対変位をパッシブの半分以下に抑えられうることを示した。そして、ハードウェアとしては可変摩擦ダンパを提案した。

しかし、実際の要求は与えられた許容相対変位スペース内で最適な免震性能を得ることであり、系の状態や地震動の大きさに応じてフィードバック・ゲインを適宜変化させる制御がより有効となる可能性がある。そのようなよりインテリジェントな制御則の考案と実験によるその免震性能の実証が今後の課題として残されている。

(1989年5月17日受理)



①パッシブの場合

②セミアクティブの場合
(T=0.1秒)

図5 二質点パッシブ/セミアクティブ免震系の応答波形

参 考 文 献

- 1) 藤田, 建物構造のイノベーション, 生研講習会テキスト, (昭63)
- 2) 藤田・ほか3名, 直線運動機構を利用した免震装置の研究, 機械学会論文集, 50-456, C (昭59)