

京都大学工学研究科 フェロー 家村 浩和
 京都大学工学研究科 正会員 五十嵐 晃
 京都大学工学研究科 学生員 ○ 鈴木 陽介

1 はじめに 建造物の地震応答を低減する手段として、擬似負剛性セミアクティブ制御手法を用いた制震システムが提案されている。実際のMRダンパーを擬似負剛性制御デバイスとして用いるための制御システムを構築するとともに、リアルタイムハイブリッド試験により建造物に適用した場合の応答低減効果を実験的に検証する。

2 制御手法 次式のような荷重 $F(t)$ を発生する振動制御デバイスを考える。

$$F(t) = K_D x(t) + C_D \dot{x}(t) \quad (1)$$

ここに、

$x(t)$: デバイスのストローク変位

$K_D (< 0)$: 見かけ上の負剛性

$C_D (> 0)$: 見かけ上の粘性

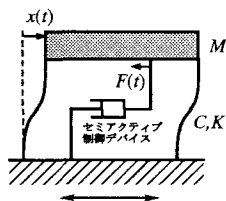


図1 擬似負剛性制御の例

このようなデバイスを建造物に設置すれば、負剛性の効果と粘性によるエネルギー吸収により、建造物の加速度応答を低減する効果が期待される。

擬似負剛性制御とは、MRダンパーなどのセミアクティブ制御デバイスをこのような目的に用いる際の物理的な制約を考慮した上で、式(1)で表されるような見かけの負剛性と正の粘性を併せ持った荷重を発生させることにより建造物の応答を制御しようとする手法を指す。図2は、変位-復元力関係と速度-復元力関係を理想的な状態および実現可能な状態について示したものである。アクティブ制御装置によって実現できる理想的な履歴に対して、セミアクティブ制御装置では速度-復元力関係図の第二、第四象限で荷重を発生させることが出来ない。'擬似'という言葉は、このような装置の制約範囲内で実現できる負剛性のことを指すために用いている。

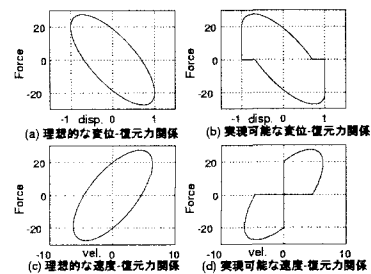


図2 負剛性および擬似負剛性の荷重応答特性

制御力を決定するために必要な計測情報はダンパーの相対変位ストロークと相対速度のみであるため、アクティブ制御アルゴリズムに比べ、実際の建造物への適用に有利である。その上、固有周期を長くし、減衰を付加することによりエネルギー吸収効果を高めるという力学的な目的は、制御システムを設計する際にも他の高度な制御手法に比べて明確である等の利点を有している。

3 MRダンパー 擬似負剛性を実現するために使用したMRダンパーは、三和テッキ社製MRD-60kN-100(最大ストローク±50mm、最大定格荷重60kN)であり、構造を図3に示す。このMRダンパーは、ピストン(ロッド)、シリンダ、電磁石が設置されたバイパス流路、MR流体の4部分より構成されている。本ダンパーでは2つの圧力室はピストンで完全に区切られており、ピストンが移動した場合のMR流体の流動は別に設けたバイパス部のみを介して行われる。バイパス部の外側に電磁石が設置されており、MR流体流動方向に垂直な磁束を作用させる構造となっている。

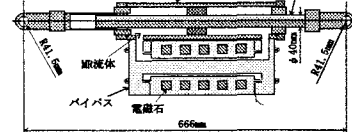


図3 MRダンパー

正弦波加振試験における変位-復元力関係を図4に示す。これによると本ダンパーは印可電流を増加させることにより降伏荷重が増加する摩擦型の履歴形状を描くことが分かる。本論文では式(2)でMRダンパーの特性を定義した。

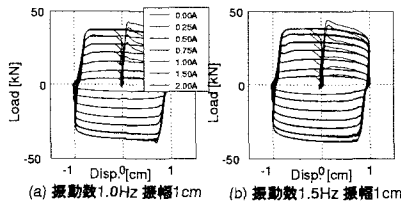


図4 正弦波加振試験

$$f(x, \dot{x}, A) = (22.40A + 0.70) \tanh\left(\frac{x}{1.16} + \frac{\dot{x}}{1.90}\right)$$

f : 荷重 (kN), x : 変位 (cm) $+0.60\dot{x}$ (2)
 $\dot{x}$: 速度 (kine), A : 指令電流 (A)

4 制御システム 本試験システムでは、オンライン制御された安定化電源装置により電流の供給を行っている。DSP内で制御則に従い電流指令値を決定し、指令信号を安定化電源に送ることによりMRダンパーを制御している。指令電流の決定には以下の手順を用いる。

1. 変位、速度計測値および想定ダンパーの剛性および粘性係数から荷重目標値を計算する。
2. 式(2)を逆算し、目標印可電流値を求める。
3. 目標荷重×計測速度が正のときは、求めた目標電流を出力、負の場合は0Aを目標とする。
4. 計測荷重と目標荷重の差を用いたPID制御を同時に行い、電源装置に指令信号を送る。

擬似負剛性の履歴の実現を確認するために様々な剛性、粘性を与えた擬似負剛性制御による周波数1Hz、振幅1cmの正弦波加振を行った。結果を図5に示す。計測変位、速度から式(2)に従い求めた荷重を比較のために併記した。荷重の正負が反転する領域では立ち上がりが緩やかになっているが、これは図4にも見られる履歴の傾斜および典型的なコイルの自己誘導の影響であり、MRダンパーの設計手法、電源装置の変更など根本的な改善が必要である。

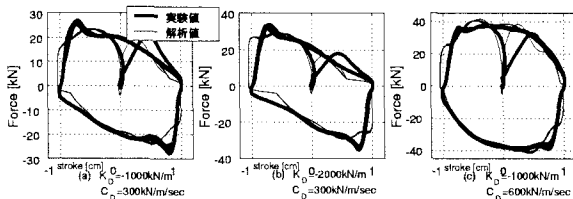


図5 擬似負剛性の履歴の実現

5 1自由度モデルへの適用 1自由度モデルを用いたリアルタイム・ハイブリッド試験を行い、構築した擬似負剛性セミアクティブ制御システムの応答低減効果を検証した。対象モデルは質量 $M = 100\text{ton}$ 、

剛性 $K = 1000\text{kN/m}$ の線形1自由度モデルである。周期は 1.99sec である。ダンパーの付加剛性 $K_D = -1000\text{kN/m}$ 、粘性係数 $C_D = 100\text{kN/m/sec}$ とし、入力にEl-Centro NSを50galにスケーリングしたものを用いた。図6に試験結果を示す。 $F(t) = C_D \dot{x}(t)$ で表される粘性ダンパーの場合の解析値を併記した。変位-復元力関係を見ると、荷重の正負が反転する領域で正の傾きを描いているが、長周期である程度の変位振幅が生じているため全体的な履歴形状は良好な擬似負剛性の形をしている。最大加速度応答は15.6%低減しており、エネルギー吸収を見ても最大値付近で効果的にエネルギー吸収が行われていることが分かる。

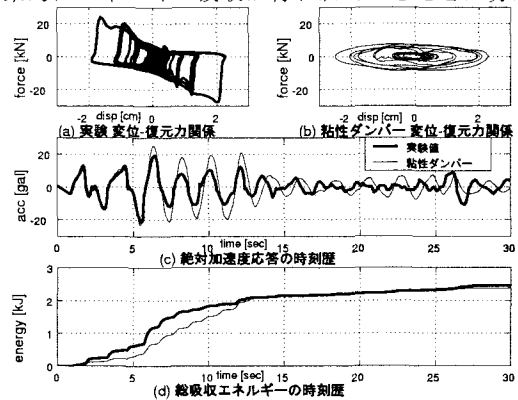


図6 1自由度モデルでの効果の検証

図7に対象モデルにおける質量 $M = 100\text{ton}$ 、剛性 $K = 3000\text{kN/m}$ 、粘性係数 $C = 30\text{kN/m/sec}$ の線形1自由度モデルの場合の変位-復元力関係を示す。固有周期は 1.14sec であり、前のケースよりも短く、変位振幅は小さくなる。入力はそれぞれ100galにスケーリングしている。これによると、荷重の正負が反転する領域で現れている。応答低減効果が著しく低下し、制御の効果を得るためには制御をより正確に行う必要がある。

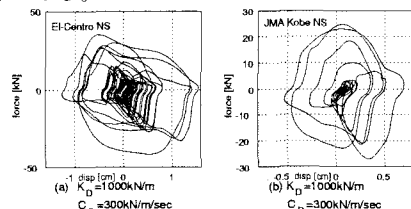


図7 固有周期1.14secのモデルの変位-復元力関係

6 結論 MRダンパーにより構成した擬似負剛性セミアクティブ制御システムは、ほぼ想定された復元力特性を発揮した。本制御デバイスが1自由度構造モデルの地震応答、特に加速度応答を低減できる性能を持つことを示した。