

京都大学大学院	学生員	○塩見 豪
京都大学工学部	正員	五十嵐 晃
京都大学工学部	正員	家村 浩和

1. はじめに

アクティブマスダンパーに線形制御理論を直接適用した場合、地震動入力に比例してマスの変位が大きくなるため、予期したより大きな地震の場合に可動範囲の制約のため期待された能力を発揮できないことになる。本研究では、構造物の上に乗るマスの変位に可動範囲の制約を考慮するため、構造物の振動エネルギーに依存する制御ゲインを用いた非線形制御則を提案すると共に数値シミュレーションによる検討を行った。

2. 補助マスの変位飽和を仮定した制御則の決定

解析のモデルを図1に示す。運動方程式は、

$$\begin{cases} M(\ddot{x} + \ddot{z}) + c\dot{x} + kx = -u & (\text{構造物}) \\ m(\ddot{x} + \ddot{y} + \ddot{z}) = u & (\text{マス}) \end{cases}$$

となるが、ここで制御則を次のように仮定する。

$$\dot{y} = \beta x$$

ここで、 β は構造物の振動エネルギーによって変化する可変ゲインとする。固有振動数入力時の定常応答状態、すなわち $x(t) = X_0 e^{i\omega_0 t}$, $y(t) = Y_0 e^{i\omega_0 t}$, $z(t) = Z_0 e^{i\omega_0 t}$ と仮定した場合の応答振幅に着目する。アクティブマスダンパーでは、補助マスの振幅が大きいくほど制振性能を高くできるため、高い制振性能を実現するためには、補助マスの振幅を構造上可能な最大値に保つことが重要である。マスの振幅が与えられた可動範囲に等しい場合、すなわち、 $|Y_d| = Y_{\max}$ (マスの変位飽和)が成立するような構造物の振動エネルギーと可変ゲイン β の関係に基づき、次式で示される制御則を得ることができる。

$$\dot{y} = \beta(x, \dot{x})x = \begin{cases} \frac{Y_{\max} f_0 \pi \sqrt{2k}}{\sqrt{E}} x = \frac{Y_{\max} \omega_0^2}{\sqrt{\omega_0^2 x^2 + \dot{x}^2}} x & (E > E_s) \\ \frac{Y_{\max} f_0 \pi \sqrt{2k}}{\sqrt{E_s}} x & (0 \leq E \leq E_s) \end{cases} \quad (E = \frac{1}{2} kx^2 + \frac{1}{2} M\dot{x}^2)$$

ただし f_0 は構造物の固有周波数、 k は剛性とする。図2にマス変位と入力振幅、制御ゲイン β と振動エネルギーの関係を示す。この関係に従って制御ゲインを構造物の応答状態に応じて変化させることとする。この場合、構造物の振動エネルギー E が大きい場合には、制御ゲイン β が減少しマスが可動範囲($Y_{\max}$)を超えないようにし、 E が小さくなると β が増加し構造物の振動の減衰を速くする。図2にマス変位と入力振幅、制御ゲイン β と振動エネルギーの関係を示す。ここで、 β に上限($\beta_{\max}$)を設けているのは、 β が過大な場合構造物の絶対変位や、マスの相対変位に固有振動数以外の影響が大きくなり、制御ゲイン β と振動エネルギーの関係を導いた時の仮定が成立しなくなるためである。

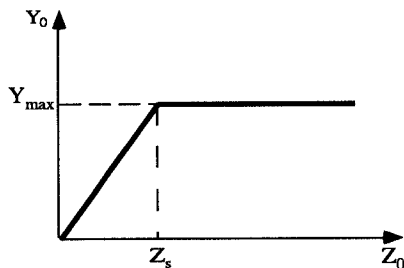
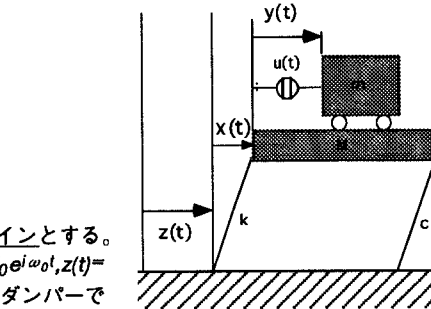
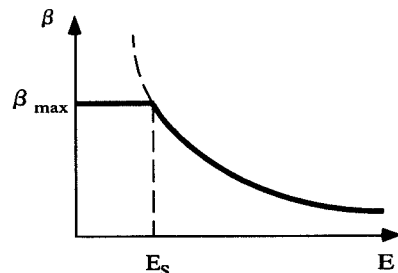
図2-1 マスの変位振幅 Y_0 と入力振幅 Z_0 の関係

図1 モデル

図2-2 振動エネルギー E と制御ゲイン β の関係

3、地震応答解析に基づく制御則の改善

提案する制御則を用いた自由振動応答解析結果の例を最初に示す。比較のために、従来の最適レギュレータ法(LQ制御)を用いたときの応答計算もあわせて行った。パラメータは、 $M=0.09(\text{kg})$, $m=0.0036(\text{kg})$, $k=7.474(\text{kgf/cm})$, $h(\text{減衰定数})=0.0087$ を用いた。また $Y_{\max}=10$, $\beta_{\max}=50$ として構造物の変位の初期値は5(cm)とした。図3に応答結果を示す。左から順に、構造物の変位、マスの変位(非線形制御)、マスの変位(LQ制御)を示している。

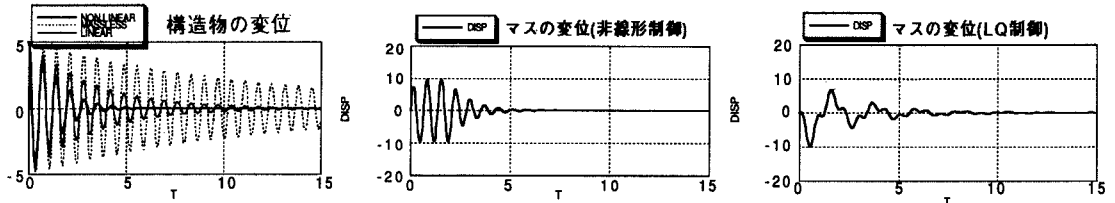


図3 自由振動応答解析結果

マスの変位は、ある時刻までは、 $|Y|=Y_{\max}$ で振動し、 β が一定になると構造物の減衰と共に減衰していき、図2-2に示されるような非線形な制御が行われていることがわかる。LQ制御は、非線形制御のときとマスの可動範囲が同じとなるように評価関数の重みを設定し、比較を行った。マスの変位の応答を比較すれば明らかに提案する制御則の方が、マスが可動範囲内を最大限動くことができるために有効な制御を行っている。構造物の変位の応答を比較してみると、提案する制御則の方が制振効果が大きいことがわかる。

次に振動系にEl-Centro地震波を入力した場合の応答解析結果を図4に示す。パラメータは先と同じとする。ただし、 $Y_{\max}=5.0$, $\beta_{\max}=30.0$ とする。

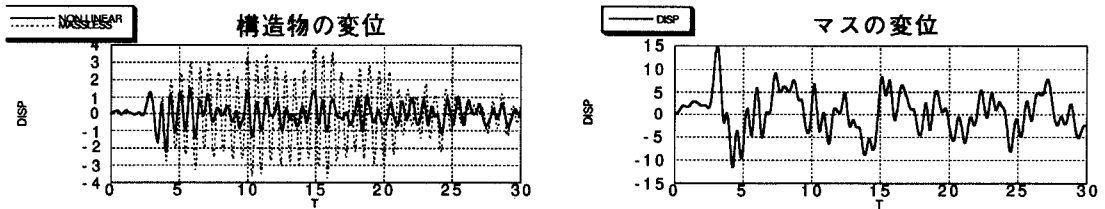


図4 El-Centro波入力の場合の応答解析結果

構造物は制振されているが、マスの変位は初めに仮定した可動範囲を超えてしまっている。これは、最初、構造物の固有振動数を持つ調和外力入力として制御則を決定したが、先にも述べたとおりマスの変位は、他の振動数成分も同時に寄与するために生じたと考えられる。これを解決するためには制御則を $\dot{y}=\beta x-\alpha y$ として(α :定数)過大なマス変位の発生を防ぐことが有効であることが見出されている。例として、 $\alpha=10$ とした場合の応答結果を図5に示す。

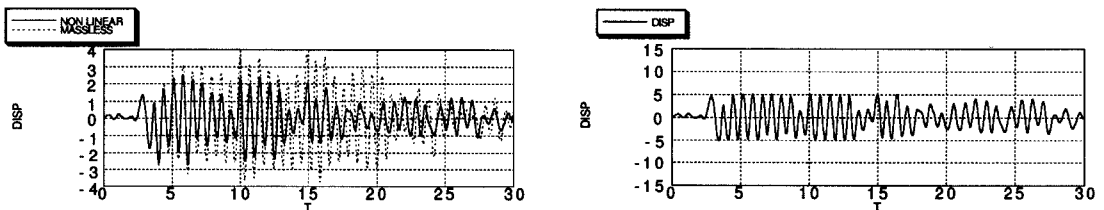


図5 $-\alpha y$ を考慮した場合の応答解析結果

α の効果によりマスは可動範囲内におさまっていることがわかる。しかし、図4と図5を見比べれば歴然としているが、そのぶん構造物の制振効果は落ちることがわかる。従って、 α の決定に際しては、入力の性質を勘案し、構造物の制振効果がマスの変位かのどちらを優先するかを目安にすれば良いであろう。

4、おわりに

本研究で提示した制御則は、LQ制御に比べ、かなり有効な制御を行うことがわかった。また、時間依存性を持つ地震動入力に対しても制御則を少し修正することにより、マスを可動範囲におさめて、制振できることが解析によりわかった。