

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
京都大学大学院 学生員 ○塩見 豪

1. はじめに

これまでの線形制御理論を中心に研究されてきたアクティブマスダンパーにおいては地震動入力に比例してマスの変位が大きくなるため、その可動範囲を超えてしまうという欠点を有していた。

そこで本稿では、構造物の上に乗るマスの変位に可動範囲という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な制御則を提案する。

2. 補助マスの変位飽和を仮定した制御ゲインとエネルギーの関係

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。アクティブマスダンパーでは、補助マスの振幅が大きい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。

また、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して、制御則を決定していくこととする。これらのことを考慮して、すなわち、 $|Y_0| = Y_{\max}$ (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 の関係を求めると、

$$\beta = \frac{Y_{\max} f_0 \pi \sqrt{2k}}{\sqrt{E}} \quad (E = \frac{1}{2} kx^2 + \frac{1}{2} M\dot{x}^2)$$

となる。ただし f_0 は構造物の固有周波数、 k は剛性とする。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 が小さくなりマスが可動範囲 ($Y_{\max}$) を超えないようにし、 E が小さくなると β が大きくなり構造物の減衰を速くする。

3. 全エネルギー領域を考慮に入れた非線形制御則

上述の制御則を用いた場合の構造系モデルの周波数応答曲線を β/f_0 について変化させたものを図2に示す。これを見ると、 β の値を大きくすると構造物の絶対変位は高周波数領域では大きくなり、マスの相対変位は、固有振動数以外の影響が大きくなる。2で求めたゲイン β とエネルギーの関係は、構造物の固有振動数入力として考察してきたことから、 β の値に上限 ($\beta_{\max}$) を設定するべきであることがわかる。そこで制御則を次のように定める。

$$\dot{y} = \beta x = \begin{cases} \frac{Y_{\max} f_0 \pi \sqrt{2k}}{\sqrt{E}} x & (E > E_s) \\ \frac{Y_{\max} f_0 \pi \sqrt{2k}}{\sqrt{E_s}} x & (0 \leq E \leq E_s) \end{cases}$$

図3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。

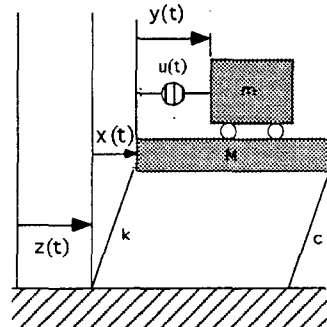


図1 モデル

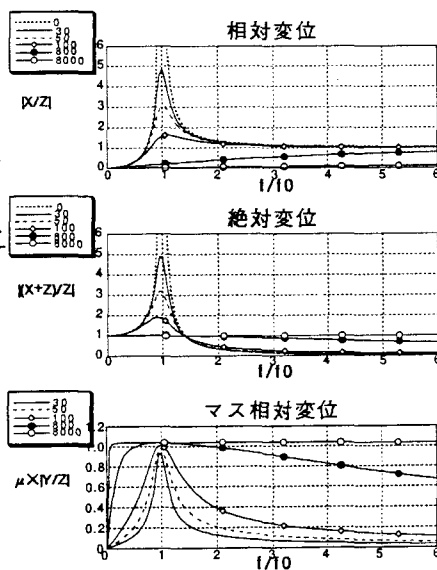


図2 共振曲線

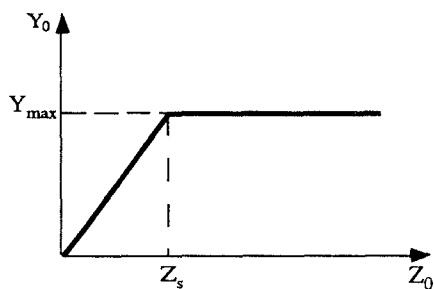


図3-1 マスの変位振幅 Y_0 と入力振幅 Z_0 の関係

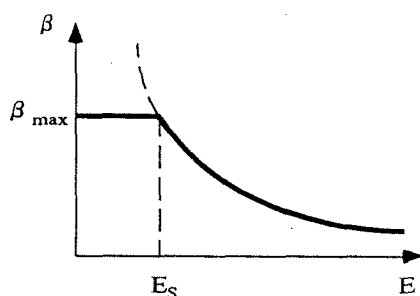


図3-2 振動エネルギーEと制御ゲイン β の関係

4. 応答解析による検証

提案する制御則を用いた、自由振動応答のシミュレーションの例を示す。応答計算には、平均加速度法を用いた。従来の線形制御則との比較のために、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。

パラメータとして、 $M=0.09(\text{kg})$, $m=0.0036(\text{kg})$, $k=7.474(\text{kgf/cm})$, $h(\text{減衰定数})=0.0087$ 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 $5(\text{cm})$ とした。

図4に応答結果を示す。上から順に、構造物の変位、マスの変位、構造物の振動エネルギーの変化、そして最後に制御ゲイン β の変化を示している。

最初、構造物の

エネルギーが大きいときは、ゲイン β は小さい値で、エネルギーが減少すると共に β も大きい

値に変化し、 $\beta_{\max}$ に達すると、その後は一定となり、図3-2の通りに変化している。

マスの変位は、この β の変化により、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、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大きいことがわかる。

また、構造物の変位の初期値を $10(\text{cm})$ 、すなわち2倍にして、マスの変位を比較すると、非線形制御の場合は可動範囲を超えないが、LQ制御の場合は先の2倍の応答となり、可動範囲を超えてしまい、さらにゲインを小さくすることが必要になる。

5. おわりに

調和外力の場合のみならず地震動のような外力による強制振動についても、本手法による制御は有効であることが確かめられている。シミュレーションおよび検討結果については講演時に発表する。

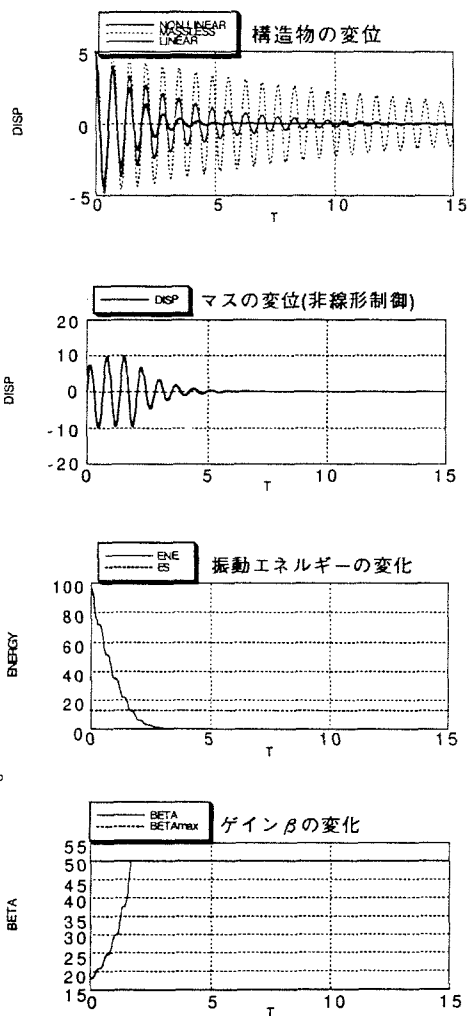


図4 応答解析結果