

I-B 24

可変ゲインを用いたアクティブTMDの制御に関する研究

京都大学大学院 学生員 一ツ町展也
 京都大学工学部 正員 五十嵐 晃
 京都大学工学部 フェロー 家村 浩和

1. はじめに

アクティブTMDはアクティブマスダンパ(AMD)に比べて比較的小さな制御力で高い制振効果をあげることができるという利点を有している。しかし、アクティブTMDを制震装置として実用化する場合、単純な線形制御では、地動入力に比例してマスの変位が大きくなることから、種々の大きさの地震動に対して、補助マスの可動範囲の制限を陽に考慮に取り入れて動作させることが難しい。

そこで本研究では、並列型アクティブTMDに対して補助マス変位制約を取り入れた可変ゲイン制御を適用した場合について考察した。ここでは特に、振動低減効果と制御装置の制約等の特性、及び入力的大小とTMDのチューニングパラメータの関係に関して検討した。

2. 変位制約を考慮した非線形制御則

解析モデルを図1に示す。運動方程式は、

$$\begin{cases} m(\ddot{x} + \ddot{z}) + c\dot{x} + kx - c_d\dot{y} - k_d y = -u \\ m_d(\ddot{x} + \ddot{y} + \ddot{z}) + c_d\dot{y} + k_d y = u \end{cases} \quad (1)$$

となる。制御則は次の形で与えられる。

$$\dot{y}(t) = \beta(E)x(t) - \alpha y(t) \quad (2)$$

ここで、 β は建造物の振動エネルギーによって変化する可変ゲインとし、以下のように与える。

$$\beta(E) = \begin{cases} Y_{\max} \omega_0 \sqrt{\frac{k}{2E}} & (E > E_s) \\ Y_{\max} \omega_0 \sqrt{\frac{k}{2E_s}} & (0 \leq E \leq E_s) \end{cases} \quad (3)$$

$$(E = \frac{1}{2} kx^2 + \frac{1}{2} m\dot{x}^2)$$

図2に制御ゲイン β と振動エネルギー E の関係を示す。

α は定数ゲインであり、補助マスの中立位置を可動範囲の中心に保つためのものである。具体的には、 α を加える事により補助マス最大振幅が減少するが、 α を考慮しない($\alpha=0$)の場合と比べ影響が必要最小限となる値を用いる事とする。この制御則をAMDに適用した場合については、文献¹⁾に述べられている。

3. 可変ゲイン制御における制御力特性

ATMDではAMDに比べ比較的小さな制御力で高い制振効果をあげることが期待できる。これを示すため、前述の制御則を用いた場合の制御力を周波数応答特性により評価する。

$x(t)=X_0 e^{i\omega t}$, $y(t)=Y_0 e^{i\omega t}$, $z(t)=Z_0 e^{i\omega t}$, $u(t)=U_0 e^{i\omega t}$ と仮定して制御力の定常応答振幅について解くと、次のように求められる。

$$|U_0| = \frac{(1+\mu)(\frac{\omega}{\omega_0})^2 |Z_0|}{\sqrt{\left\{1 - (1+\mu)(\frac{\omega}{\omega_0})^2\right\}^2 + \left\{(2h+\mu)\frac{\beta}{\omega_0}(\frac{\omega}{\omega_0})\right\}^2}} \sqrt{\left(c_d \omega_0 \frac{\beta}{\omega_0} - \frac{\mu k}{1+\mu}\right)^2 + \left\{\frac{\mu}{1+\mu} \left(k \frac{\beta}{\omega_0} - c \omega_0 (\frac{\omega}{\omega_0}) - \frac{k_d \beta}{(\frac{\omega}{\omega_0})}\right)\right\}^2} \quad (4)$$

式(4)により k_d, c_d の値による制御力振幅の値 $|U_0|$ の変化を評価することができる。

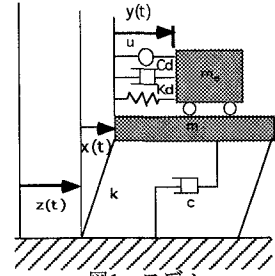


図1 モデル

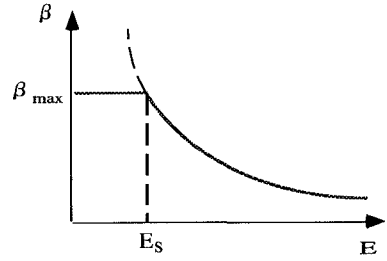


図2 振動エネルギーEと制御ゲイン β の関係

3. ATMDのチューニングパラメータの決定

式(4)より、アクチュエータの必要制御力に最小を与える最適な k_d, c_d が存在することが考えられる。そこで、式(4)より、 $\partial |U_0| / \partial k_d = \partial |U_0| / \partial c_d = 0$ を解くことにより、固有振動数入力時の定常応答状態での制御力振幅に最小を与える k_d, c_d を求めると、次のようになる。ただし、それぞれの式は無次元化表示しており、 k_d は $(\omega_d / \omega_0)^2$ 、 c_d は $h(\omega_d / \omega_0)$ としている。ここで $\omega_d = \sqrt{(k_d / m_d)}$ 、 $h_d = c_d / 2m_d \omega_d$ である。

$$\begin{aligned} \left(\frac{\omega_d}{\omega_0}\right)^2 &= \frac{\mu}{1+\mu} \left(1 - 2h \frac{(1+\mu)^2 \left(\frac{|Z_0|}{Y_{\max}}\right)^2 - \mu^2}{2h\mu + \sqrt{(\mu^2 + 4h^2)(1+\mu)^2 \left(\frac{|Z_0|}{Y_{\max}}\right)^2 - \mu^4}}\right) \\ h_d \left(\frac{\omega_d}{\omega_0}\right) &= \frac{\mu}{2(1+\mu)} \frac{(1+\mu)^2 \left(\frac{|Z_0|}{Y_{\max}}\right)^2 - \mu^2}{2h\mu + \sqrt{(\mu^2 + 4h^2)(1+\mu)^2 \left(\frac{|Z_0|}{Y_{\max}}\right)^2 - \mu^4}} \end{aligned} \quad (5)$$

このように最適パラメータが入力振幅 $|Z_0|$ 及び補助マス変位振幅の上限 $Y_{\max}$ の関数として与えられる。

このように定式化した最適パラメータを評価するため、チューニングパラメータの変化と入力振幅の変化に対する制御力振幅の変化を示した例を図3に示す。ただし、グラフ計算にあたっての制御則におけるパラメータは $\beta_{\max} / \omega_0 = 10$ 、 $\alpha = 3$ を仮定している。

これらのグラフより、まず $|Z_0| / Y_{\max} = 0.04$ 付近で制御力振幅の変化形態が変わっているのが読みとれる。これは、線形制御領域と可変ゲイン制御領域との境界であり、境界より小さい値を取る部分（線形制御領域）では制御ゲイン β が $\beta_{\max}$ で制御され、それより大きい値では可変ゲインで制御している。これは図2からも明らかである。

また図3.1より、 k_d については制御力に極小を与える値が存在し、その値は入力振幅 $(|Z_0| / Y_{\max})$ が増加しても制御力振幅に最小を与える最適値は大きく変化せず、極小値を与える $(\omega_d / \omega_0)^2 (= 0.937)$ の値を用いればよいと考えられる。

一方 c_d については、図3.2より制御力振幅に最小を与える最適値が入力振幅の増加とともに大きくなり、 k_d の時のように一点に決定するのが困難となることが分かる。そのため、入力振幅の変化に対してその都度、パラメータを変化させることが望ましい。

通常のTMDのパラメータであれば振動系の質量や剛性を決めると最適パラメータが一意に決まるのに対して、本研究の場合、最適パラメータが入力振幅に依存し、入力振幅の変化に伴い変化する。例えば、減衰係数について $|Z_0| / Y_{\max} = 0.25$ での最適値はTMDの最適値の約20倍になる。

4. おわりに

具体的な時刻歴応答解析結果等については講演時に発表する。ATMDの最適パラメータは入力振幅の関数として与えられるため、この制御手法の最も適切な実装法の検討が今後の課題である。

参考文献

- 1) 五十嵐晃、家村浩和、塩見豪: AMDの可動質量変位制約を考慮した非線形制御則、第3回振動制御コロキウム論演論文集、pp.111-118、1995年8月

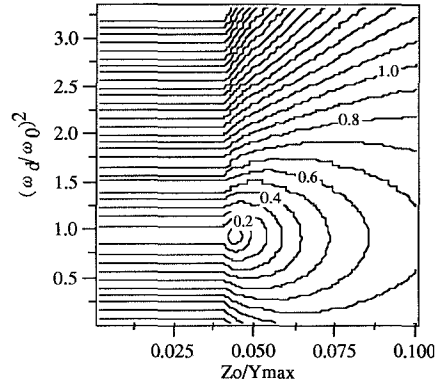


図3.1 入力振幅・ $(\omega_d / \omega_0)^2$ に対する制御力振幅の変化

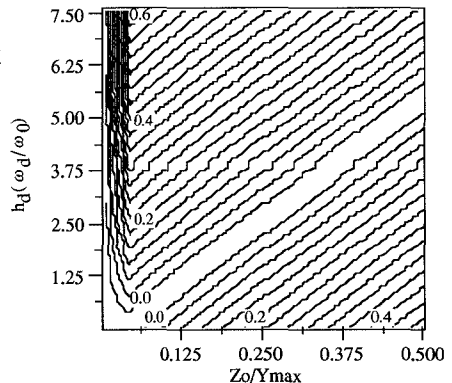


図3.2 入力振幅・ $h_d(\omega_d / \omega_0)$ に対する制御力振幅の変化