

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 フェロー 家村 浩和
 京都大学大学院 学生員 ○奥村 昌好

1. はじめに

アクティブTMDを制震装置として用いる場合、制振効果を損なわない限り、アクチュエータの発生する必要のある制御力レベルは可能な限り小さいことが望ましい。このために、ATMDの復元力バネ係数および減衰係数を可変としたデバイスを用いることにより、補助質量の駆動するアクチュエータの負担力を大幅に低減できることが考えられる。そこで、これを実現するための可変剛性・減衰の最適パラメータの決定法を提案するとともに、補助質量の変位制約を考慮した可変ゲイン型制御則と共に用いた場合の有効性を、数値シミュレーションにより検討した。

2. 変位制約を考慮した非線形制御則

主構造物—アクティブTMD系をモデル化した解析モデルを図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。ここに、 m 、 c 、 k はそれぞれ質量、減衰係数、剛性であり、下添字 d はATMDに関するパラメータであることを表している。ここでATMD補助質量の変位制約 $|y(t)| \leq Y_{\max}$ を考慮した制御則を、次の形で与える。

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

β は構造物の振動エネルギー E により変化する可変ゲインであり、次式で与えるものとする。

$$\beta(E) = \min \left(Y_{\max} \omega_0 \sqrt{\frac{k}{2k}}, \beta_{\max} \right) \quad (3)$$

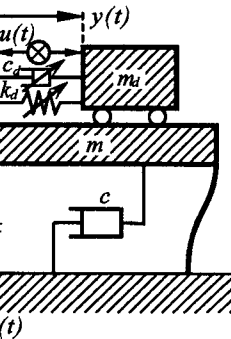


図1 解析モデル

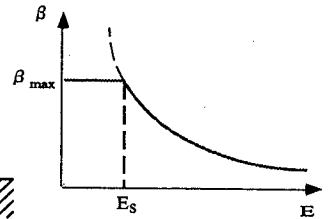


図2 可変ゲインと振動エネルギーの関係

$$\text{ここに、} E = \frac{1}{2} k x^2 + \frac{1}{2} m \dot{x}^2, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

図2に制御ゲイン β と振動エネルギー E の関係を示す。著者ら¹⁾は、この可変ゲイン制御則と組み合わせを想定し、一定振幅調和入力に対するATMDの最適バネ係数および減衰係数を導いている。このようなATMDを用いた応答制御の有効性は数値シミュレーションにより既に確認しているが、地震動のような非定常性の強い入力の場合には、これらのパラメータを固定値として算出するための妥当な調和入力を想定することが困難である。また、非定常入力に対しては、それに対応して適切なバネ係数および減衰係数のパラメータもまた時変となるはずである。したがって、このような場合にはATMDの特性パラメータを応答状態に応じて適応的に時々刻々変化させる、適応型制御を用いるアプローチが効果的であることが予想される。

3. 可変剛性・減衰要素を持つATMDへの適用手法

前節での議論に基づき、バネ要素および減衰要素を特性可変とした場合について考え、時間とともに変化する応答状態に応じて、アクチュエータの制御力を各時刻において常に最小とするように、剛性 k_d と減衰係数 c_d を時々刻々変化させるものとする。この方法により従来の剛性・減衰係数固定型のATMDの制御力よりも小さな制御力で所定の制振性能を発揮できるはずである。その際の可変剛性・減衰係数の決定法として、ここでは次の方法を提案する。調和入力と定常応答を仮定して導かれた可変ゲイン制御時の最適剛性および減衰係数を、振動エネルギー E の関数として表すと、次式のようになる。

Akira IGARASHI, Hirokazu IEMURA, Masayoshi OKUMURA

$$k_d^* = \frac{\mu}{1+\mu} \left(k - c\omega_0 \frac{1}{Y_{\max}} \sqrt{\frac{2E}{k}} \right), \quad c_d^* = \frac{\mu}{1+\mu} \frac{k}{\omega_0} \frac{1}{Y_{\max}} \sqrt{\frac{2E}{k}} \quad (4)$$

各時刻における振動エネルギー E に応じ、式4で与えられる k_d^* 、 c_d^* により k_d と c_d の値を更新する。式4により与えられる k_d^* は、振動エネルギーに対する変化が比較的小さく、10%程度が典型的な変動範囲であるのに対し、 c_d^* は振動エネルギーの変化による変動幅が大きい。また、対応して算出される御力振幅の変化は、 c_d の値に敏感であるので、制御力の低減には特に c_d を可変とする効果の寄与が大きいものと考えられる。

4. シミュレーションによる可変剛性・減衰要素導入効果の検証

具体的な仮想構造物を想定し、剛性・減衰係数を可変とした制御によるパラメータ固定の場合と比較した制御力の低減を検証する。対象とする構造物の特性パラメータを表1に、また想定したATMDおよび制御パラメータを表2に示す。入力として、兵庫県南部地震神戸海洋気象台記録NS成分を用いた。入力加速度、および数値計算により得られた構造物の応答、補助質量の応答をそれぞれ図3、4、5に示す。また、可変剛性および減衰の時刻歴をそれぞれ図6、7に示す。図8に制御力の時刻歴を、 k_d ・ c_d が固定のケースと比較して示す。可変剛性および可変減衰の効果により、制御力が減少していることがわかる。

表1 対象構造物のパラメータ

m	34.19 (ton)
ω_n	11.2 (rad/sec)
h	0.02
T_0	0.561 (sec)

表2 ATMDと制御のパラメータ

μ	0.0117
$Y_{\max}$	5.0 (cm)
α	6.83 (1/sec)
$\beta_{\max}$	112.0 (1/sec)

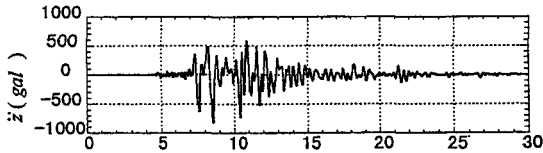


図3 JMA 神戸記録 (NS 記録)

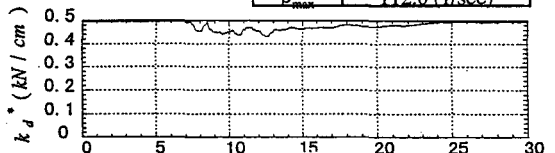


図6 神戸波入力時の可変剛性 k_d^* の時刻歴

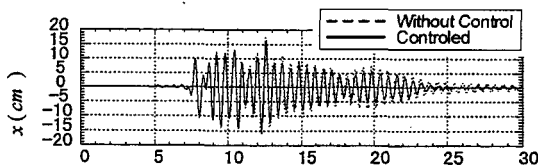


図4 構造物の応答変位 x

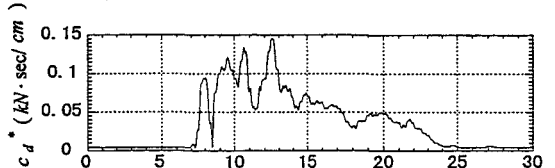


図7 神戸波入力時の可変減衰 c_d^* の時刻歴

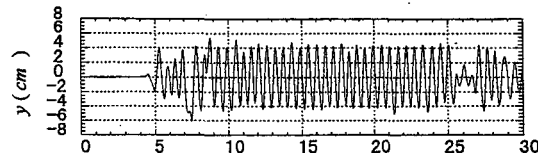


図5 補助質量の相対変位 y

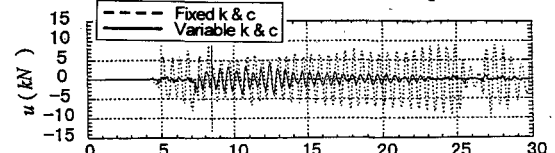


図8 アクチュエーターの制御力 u

5. 考察

制御力の大きさを剛性・減衰係数が可変の場合と固定の場合で比較すると、神戸記録NS成分入力では最大振幅で約32%、平均振幅で約78%低減されている。同様にEl Centro記録を入力とした場合には、制御力が最大振幅で約60%、平均振幅で約78%低減されることを示す結果が得られている。これらの結果より、固定係数を用いたATMDに比べ、可変剛性・減衰要素を導入したATMDではより効率的な振動制御の実現が可能であることが示されている。しかしながら、神戸記録のように大きな最大加速度が発生するが継続時間の短いタイプの入力に対しては、制御力の低減効果は低下する傾向が見い出されている点には注意を要する。これは、入力を調和外力と仮定して最適パラメータを導くアプローチの限界によるものと考えられる。

【参考文献】 1) 一ツ町展也・五十嵐晃・家村浩和：可変ゲインを用いたアクティブTMDの制御に関する研究、第51回年次学術講演会講演概要集、1996年9月。