

構造物における動的な規則的応答の制御機構に関する基礎的研究

京都大学工学部 正員 山田善一 家村浩和
阿南高専 正員 笹田修司
東京大学大学院 学生員○高田賢一

1. はじめに

近年、構造物の制振機構に関する研究が多くみられ、一部は実用化されつつある。補助質量を用いた制振機構としては、TMDによるパッシブ、AMDによるアクティブ、およびそれらの併合のハイブリッドの三種のコントロール手法が挙げられる。本研究では、1自由度構造物(図.1)に対するこれら三種の制御手法の、簡単な数値解析モデル(図.2)を用いて動的応答シミュレーションを行い、それぞれの手法の特性を明らかにするとともに、ハイブリッドコントロールの性能について検討を行った。

2. アクティブ制御力

図.2で示しているモデルに対し、アクティブ(AMD)、ハイブリッド(ATMD)各制御方式については、センサーから得られた情報を基にしてアクティブ制御力を決定する必要がある。この決定方式は本研究では、最適レギュレータによる方法を用いる。モデルについての運動方程式、状態方程式を表すと以下のようになる。(状態方程式は運動方程式を一括して表している。)

$$\text{運動方程式} \quad TMD \quad ; \quad M\ddot{Y} + C_{TMD}\dot{Y} + K_{TMD}Y = -\ddot{y}_0 M1 \quad \dots\dots(1)$$

$$AMD \quad ; \quad M\ddot{Y} + C_{AMD}\dot{Y} + K_{AMD}Y = -\ddot{y}_0 M1 + uU \quad \dots\dots(2)$$

$$ATMD \quad ; \quad M\ddot{Y} + C_{TMD}\dot{Y} + K_{TMD}Y = -\ddot{y}_0 M1 + uU \quad \dots\dots(3)$$

$$\text{状態方程式} \quad \dot{x} = Ax + uB + \ddot{y}_0 D \quad \dots\dots(4)$$

$$\text{ただし、} x = \begin{pmatrix} Y \\ \dot{Y} \end{pmatrix}, 1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{pmatrix}, D = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ M^{-1}U \end{pmatrix} \quad \dots\dots(5)$$

最適制御のための評価関数として、変位と速度、制御力に関する二次形式の重み行列Q、Rを用いて次式のように表されるものを採用した。

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad \dots\dots(6)、\text{ただし、} Q = \begin{pmatrix} K & 0 \\ 0 & M \end{pmatrix} \quad \dots\dots(7)$$

$$J \text{ を最小にする} u \text{ は、リッカチ定常行列方程式 } PA + A^T P + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad \dots\dots(8)$$

$$\text{の正値対称解を用いて、} u = -RB^T P x \quad \dots\dots(9) \text{ として表せる。}$$

3. 数値計算例

今回用いたモデルの諸量は、表1に示してある。対象構造物の固有周期と減衰定数に基づいて、それに対応するTMDの値をDen Hartogの式によって求めている。入力地震波は、(El Centro, 1940 NS方向成分)である。重み行列Rを変化させたときのAMD、ATMDの変化を変位と制御力について示したのがそれぞれ図.3a、図.3bである。これをみるとAMDでは、重み行列Rに対応して変位・制御力ともに大きく変化しており、Rを小さくしてやればATMDの応答変位以下に抑えることは可能であるが、そのためには大きな制御力を要する。Rを大きくした場合には、制御できずにTMDの制振効果以下になる。それに対してATMDは、Rの値を変化させてもTMDとしての効果が保証されているので、応答変位に大きな変化はなく安定している。また、Rの値に対応した制御力は常にAMDより小さいものとなっている。図.4は、構造物の振動特性が変化したときのATMD、TMDにおける制御効果の変化を、補助質量の固有振動数の変化として描いたものである。ATMDはかなりなだらかな単調曲線であり固有振動数が変化しても制御効果に大きな

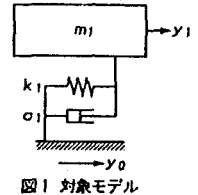


図1 対象モデル

変化がないのに対して、TMDは下に凸な曲線となっており、同調誤差が大きくなると制振効果に大きな変化が現れることがわかる。図. 5は、対象構造物変位を無制御とそれぞれの制御を施した場合についてその変位波形を描いたものである。図中に示した最大変位を見ると、無制御に比べTMDで約57％、AMDで約48％、ATMDで約49％の応答低減効果を示している。また、図. 6は、そのときに要する制御力を描いたものであるが、ATMDは、AMDの約1/3の制御力しか必要とせず効率面での向上が明らかになった。

4. おわりに

以上のような数値シミュレーションの結果、TMDとAMDの長所を兼ね備えたATMDの有効性が示された。なお今回は、制御力の動作時間遅れを考慮にいれていないが、実験装置の開発と振動実験を行い、その影響についての考察が必要である。

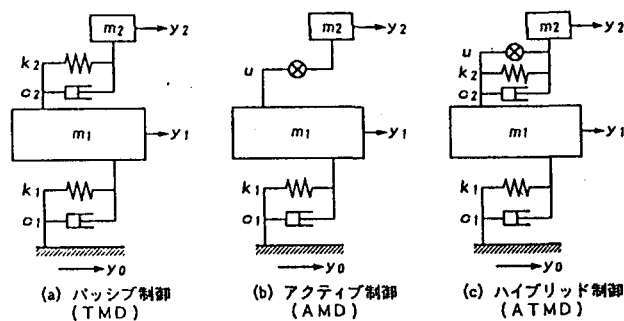


図2 制振機構を付加した解析モデル

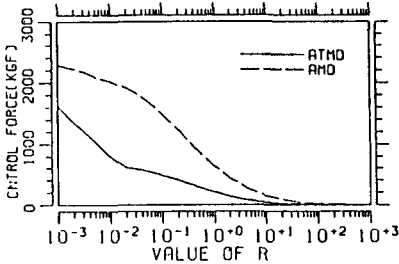


図. 3b 重量比Rの変化の影響 (制御力)

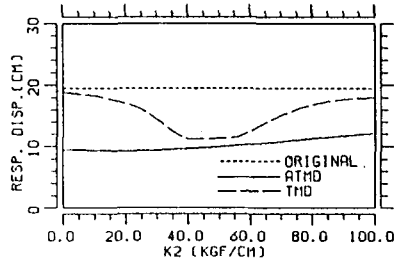


図. 4 構造物の減衰係数の変化の各制御による効果に対する影響

表 1 モデルの諸量

m_1	24.49(kgf·sec ² /cm)
m_2	1.224(kgf·sec ² /cm)
c_1	1.54(kgf·sec/cm)
c_2	1.15(kgf·sec/cm)
k_1	968(kgf/cm)
k_2	44(kgf/cm)

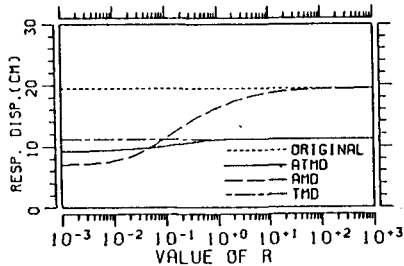


図. 3a 重量比Rの変化の影響 (構造物変位)

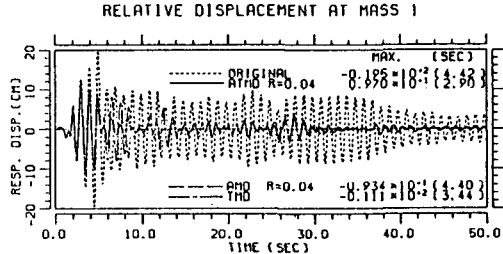


図. 5 各制御方式による制振効果の比較 (構造物変位)

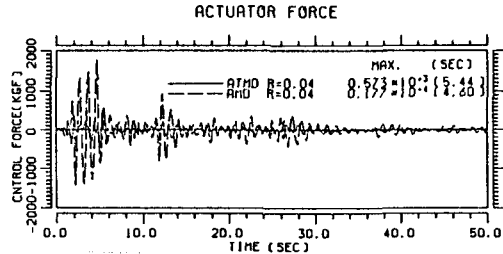


図. 6 各制御方式による制振効果の比較 (制御力)