

I-464 補助質量を用いたハイブリッド制震機構に関する基礎的研究

阿南高専 正 員 笹田修司

京都大学工学部 正 員 山田善一 家村浩和

東京大学大学院 学生員 高田賢一

1. はじめに

近年、構造物の制震機構に関する研究が多くみられ、実用化されつつある。補助質量を用いた制震機構としては、パッシブ制御のTMD、アクティブ制御のAMD、およびそれらの併合のハイブリッド制御のATMDの3種類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3種類の制御手法の、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

本研究では、図2で示しているモデルに対し、アクティブ制御(AMD)、ハイブリッド制御(ATMD)の各制御方式については、最適レギュレータによる方法を用いており、センサーから得られた状態量をフィードバックしてアクティブ制御力を決定する必要がある。この方法は、モデルについての運動方程式、状態方程式を表すと以下ようになる。

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

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

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

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

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

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に示すようなものである。補助質量の質量比 μ は5%であり、表中の K_2 は、最適同調となる次式を満たすように求めた値を示している。

$$\sqrt{\frac{m_2}{k_2}} / \sqrt{\frac{m_1}{k_1}} = \frac{1}{(1+\mu)} \quad \dots\dots(10)、\text{ただし、} \mu = \frac{m_2}{m_1} \quad \dots\dots(11)$$

なお、入力地震波は、El Centro(1940 NS方向成分, max 342gal)である。

図3(a)、(b)は、AMD、ATMDの重み行列Rを変化させたときの質点1の最大変位と最大制御力についての変化をそれぞれ示したものである。これを見ると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の制震効果以下になる。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、ATMD、TMDのバネ剛性 k_2 を変化させたときの質点1の最大変位の変化を示したものである。ATMDはかなりなだらかな単調曲線でありバネ剛性 k_2 を変化させても制御効果に大きな変化がないのに対して、TMDは下に凸な曲線となっており、このことからATMDは、同調誤差の影響を受けにくいことが予想される。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おらず、今後は、実験装置の開発と振動実験を行い、実機の開発に向けて進めていく予定である。

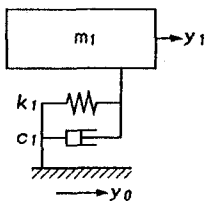


図1 対象モデル

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)

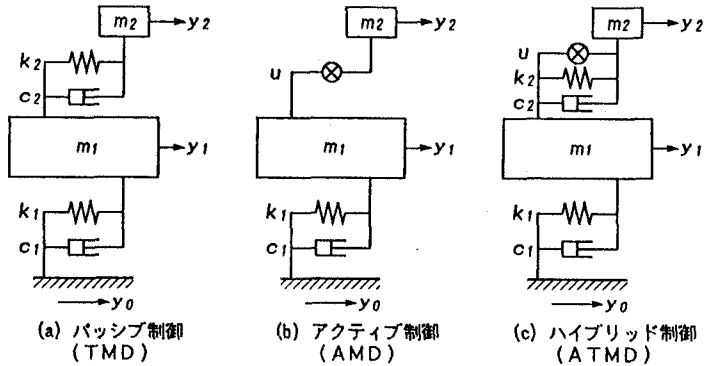
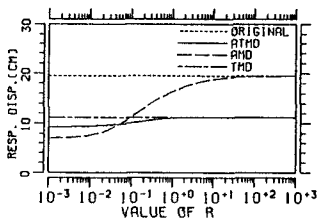
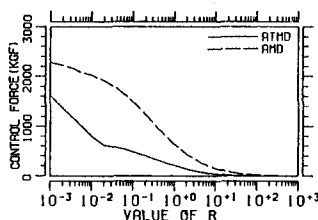


図2 制震機構を付加した解析モデル



(a) 最大変位



(b) 最大制御力

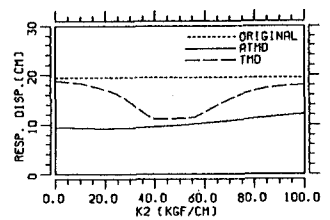
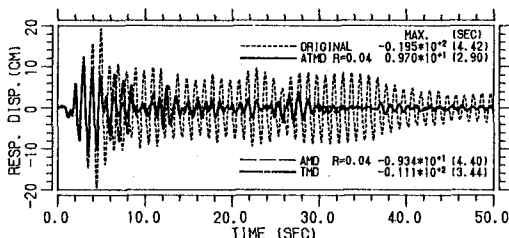
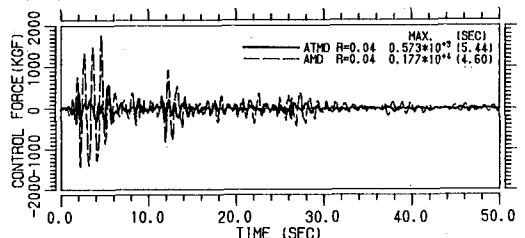


図4 バネ剛性 k_2 の影響
(最大変位)



(a) 応答変位



(b) 制御力

図5 各制御方式の比較