

(143) ハイブリッド制震機構のエネルギー応答量についての一考察

阿南高専 正会員 笹田修司
 京都大学工学部 正会員 家村浩和 山田善一

1. はじめに

補助質量を用いた制震機構として、パッシブ制御では Tuned Mass Damper (TMD)、アクティブ制御では Active Mass Damper (AMD)、および両者を併合したハイブリッド制御では Active Tuned Mass Damper (ATMD) が挙げられる。ATMD は、TMD をアクティブ化したものであり、アクチュエータへのエネルギー供給停止等によるフェイルセーフの面で、AMD よりも有利であると考えられる。本研究では、1 自由度系モデル(図1)を対象に、これらの制御手法を用いた簡単な数値解析モデル(図2)の動的応答シミュレーションを行い、ハイブリッド制御である ATMD の性能について検討を行った。

2. 解析モデルの基本式

本研究での解析モデルは、図2に示すように、TMD は、対象モデルに補助質量をバネとダッシュポットで取り付けたモデルであり、AMD は、補助質量をアクチュエータのみで取り付けたモデルであり、ATMD は、TMD にアクチュエータを取り付けたモデルである。これらの解析モデルに対する運動方程式は、次式で表される。

$$TMD : M\ddot{Y} + C_{TMD}\dot{Y} + K_{TMD}Y = -\ddot{y}_0 M \mathbb{1} \dots\dots\dots ①$$

$$AMD : M\ddot{Y} + C_{AMD}\dot{Y} + K_{AMD}Y = -\ddot{y}_0 M \mathbb{1} + uU \dots\dots\dots ②$$

$$ATMD : M\ddot{Y} + C_{TMD}\dot{Y} + K_{TMD}Y = -\ddot{y}_0 M \mathbb{1} + uU \dots\dots\dots ③$$

ただし、 $\ddot{Y} = \begin{Bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{Bmatrix}$, $\dot{Y} = \begin{Bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{Bmatrix}$, $Y = \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{Bmatrix}$, $\mathbb{1} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix}$, $U = \begin{Bmatrix} -1 \\ 1 \end{Bmatrix}$, $M = \begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix}$

$$C_{TMD} = \begin{pmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{pmatrix}, K_{TMD} = \begin{pmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{pmatrix}, C_{AMD} = \begin{pmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, K_{AMD} = \begin{pmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \dots\dots ④$$

AMD と ATMD のアクティブ制御力 u は、最適レギュレータ問題による方法を用いて、応答変位と速度の状態量をフィードバックして求める。以下に、この方法の簡単に述べるため、式②、③を次式のように状態方程式として表す。

$$\dot{x} = Ax + uB + \ddot{y}_0 D \dots\dots\dots ⑤$$

ただし、 $x = \begin{Bmatrix} Y \\ \dot{Y} \end{Bmatrix}$, $A = \begin{pmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{pmatrix}$, $D = \begin{Bmatrix} 0 \\ -\mathbb{1} \end{Bmatrix}$, $B = \begin{Bmatrix} 0 \\ M^{-1}U \end{Bmatrix} \dots\dots\dots ⑥$

なお、 C 、 K は、それぞれ、粘性減衰マトリックス、剛性マトリックスを表す。この状態方程式で表される系に対し、最適レギュレータ問題として、重み行列 Q 、 R を用いて次式のように表される評価関数を最小にするアクティブ制御力 u を求める。

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \dots\dots\dots ⑦、ただし、Q = \begin{pmatrix} K & 0 \\ 0 & M \end{pmatrix} \dots\dots ⑧$$

この問題は、リッカチ定常行列方程式 $PA + A^T P + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \dots\dots ⑨$ の正値対称解 P を求めることに等しく、この解より、アクティブ制御力 u は、状態量 x を用いて次式のように求まる。 $u = -RB^T P x \dots\dots\dots ⑩$

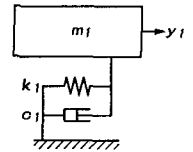
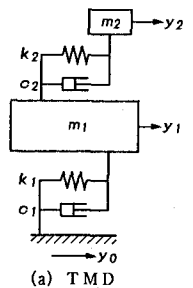
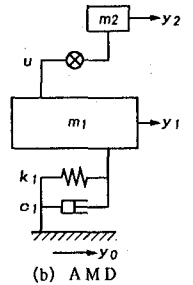


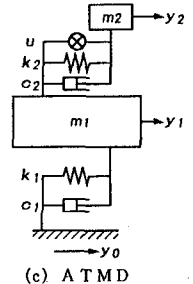
図1 対象モデル



(a) TMD



(b) AMD



(c) ATMD

図2 解析モデル

また、時刻 t における解析モデル全体でのエネルギーの釣合い方程式は、運動方程式 (式①、②あるいは③) の各項に \dot{Y} を掛け、時刻 t まで積分することにより、次式のように得られる。

$$W_K + W_C + W_E = E_a + E_u \quad \dots\dots\dots ⑩$$

ここに、 W_K : 運動エネルギー $= \frac{1}{2} \dot{Y}^T M \dot{Y}$ 、 W_C : 粘性減衰エネルギー $= \int_0^t \dot{Y}^T C \dot{Y} dt$

W_E : 歪エネルギー $= \frac{1}{2} Y^T K Y$ 、 E_a : 地震入力エネルギー $= - \int_0^t \ddot{y}_0 \dot{Y}^T M \mathbb{1} dt$

E_u : アクティブ制御力による入力エネルギー $= \int_0^t u \dot{Y}^T U dt$

なお、対象モデル自体の運動エネルギー W_K' 、粘性減衰エネルギー W_C' 、歪エネルギー W_E' は、次式のように表される。

$$W_K' = \frac{1}{2} m_1 (\dot{y}_1)^2, \quad W_C' = \int_0^t c_1 (\dot{y}_1)^2 dt, \quad W_E' = \frac{1}{2} k_1 y_1^2 \quad \dots\dots\dots ⑪$$

3. 数値計算例

今回用いた解析モデルの諸量は表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 、 c_2 は、Den Hartogの最適同調および最適減衰となる次式を満たすように求めた値である。

$$\sqrt{\frac{m_2}{k_2}} / \sqrt{\frac{m_1}{k_1}} = \frac{1}{(1+\mu)}, \quad \left(\frac{c_2}{c_c}\right)^2 = \frac{3\mu}{8(1+\mu)^3} \quad \dots\dots\dots ⑫ \quad \text{ただし、} \mu = \frac{m_2}{m_1}, \quad c_c = 2m_2 \sqrt{\frac{k_1}{m_1}} \quad \dots\dots ⑬$$

入力地震波としては、EL CENTRO記録(1940 NS方向成分, max. 341.7gal)および、HACHINOHE記録(1968 NS方向成分, max. 264.1gal)を用いた。また、以下では、AMD, ATMDの重み R を $R = 0.04$ として解析を行っている。

表-1 解析モデルの諸量

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	1.96 (kgf·sec/cm)
k_1	968 (kgf/cm)
k_2	44 (kgf/cm)

図3、図4は、質点1の変位と制御力の時刻歴をそれぞれ示したものである。図3より、各制御方法の最大変位結果を、無制御の結果と比べると、EL CENTRO記録の場合、TMDで約60%、AMDで約48%、ATMDで約50%に低減されており、HACHINOHE記録の場合、TMDで約45%、AMDで約38%、ATMDで約42%となっている。また、これらの時刻

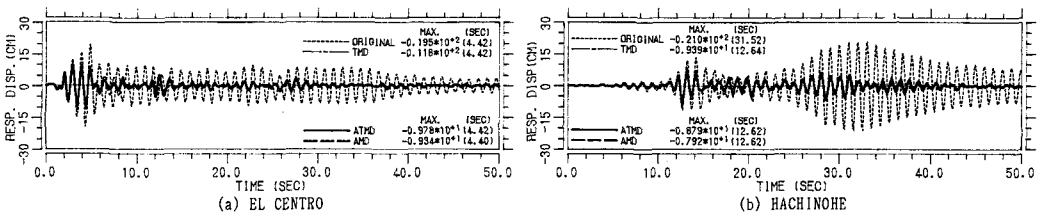


図3 質点1の変位 (y_1)

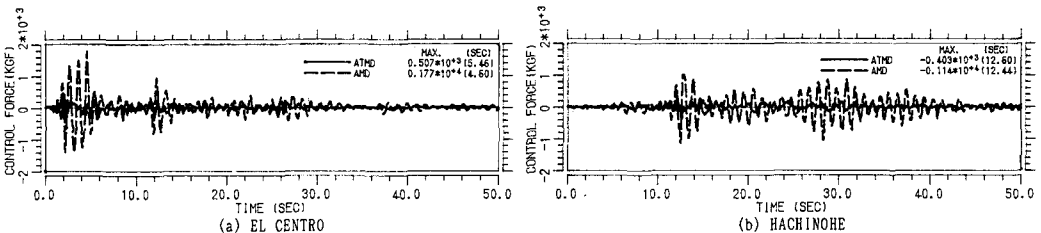


図4 制御力 (u)

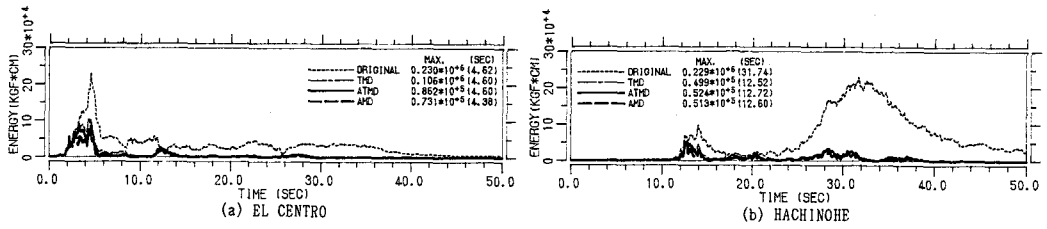


図5 解析モデル全体の振動エネルギー ($W_R + W_E$)

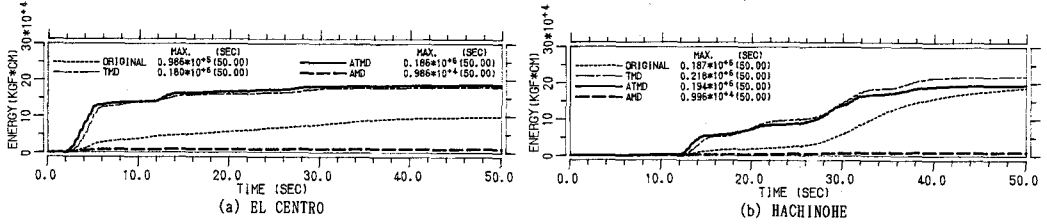


図6 解析モデル全体の粘性減衰エネルギー (W_C)

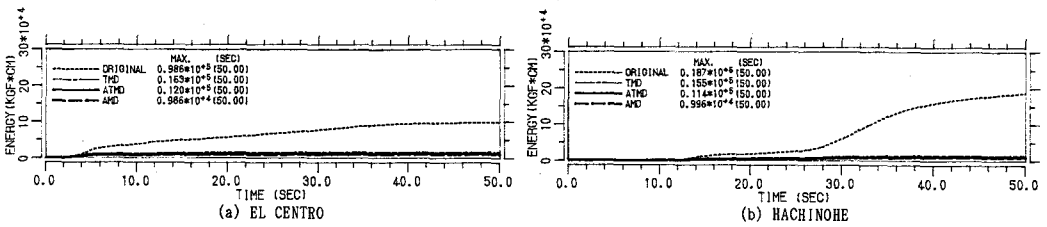


図7 対象モデル自体の粘性減衰エネルギー (W'_C)

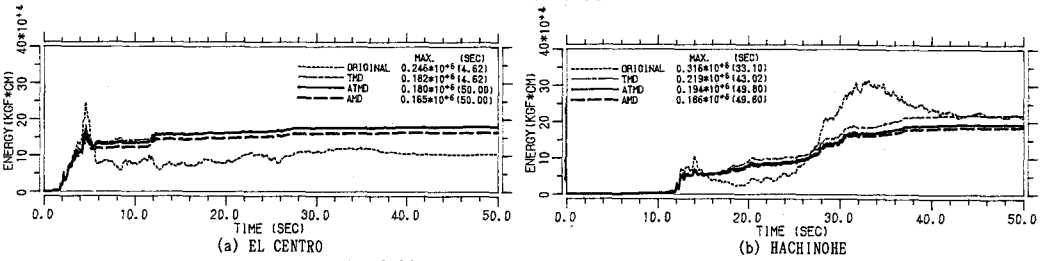


図8 解析モデル全体の地震入力エネルギー (E_a)

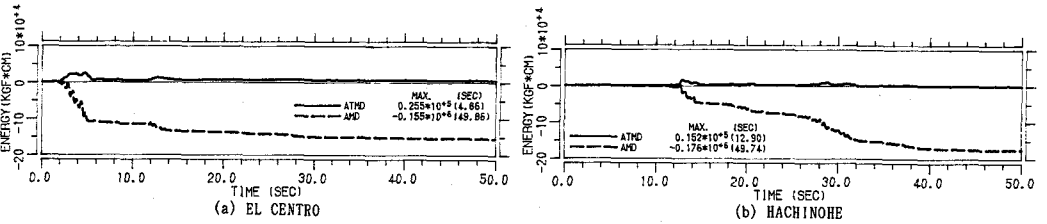


図9 解析モデル全体のアクティブ制御力による入力エネルギー (E_u)

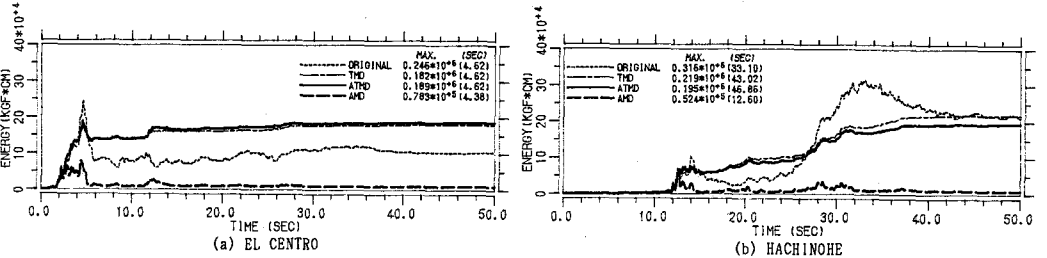


図10 解析モデル全体の入力エネルギー ($E_a + E_u$)

歴の形状は、EL CENTRO記録の場合、6秒～9秒付近で、TMDが、ATMDやAMDに比べ、変位が若干大きいことを除けば、制御方法の差による違いはあまりみられない。一方、図4より、EL CENTRO記録の場合、ATMDの最大制御力は、AMDのその約29%であり、HACHINOHE記録の場合で約35%程度である。また、大きな制御力を加える時間的な長さは、HACHINOHE記録の場合がEL CENTRO記録の場合よりも長い。このことより、地震波によっては、アクチュエータへのエネルギー供給量が、大きく異なるものと思われる。

図5は、解析モデル全体の振動エネルギーを示したものである。時刻歴の形状をみると、無制御では、地震波によって、かなり異なったものとなっている。一方、制御された各モデルでも、地震波によって、それらの形状に若干の差異はあるが、どちらの地震波の場合でも初期の段階でピークとなり、HACHINOHE記録の場合の後半部ではかなり振動エネルギーが低減されている。また、制御方法によって、特にEL CENTRO記録の場合の初期のピークの部分など、振動エネルギーが増大する部分で、バラツキがみられる。このことより、地震波にもよるが、各制御とも、初期の振動エネルギーの低減が、後半部のそれに比べ、それほど大幅な低減を行えないと思われる。

図6、図7は、解析モデル全体と対象モデル自体のそれぞれの粘性減衰エネルギーを示したものである。図6より、解析モデル全体の粘性減衰エネルギーの時刻歴の形状は、無制御、TMD、およびATMDでは、地震波によって、かなりその形状が異なるが、前述の振動エネルギーと合わせてみると、振動エネルギーが大きい部分では比較的急激に、振動エネルギーが小さい部分では徐々に、粘性エネルギーが増加する形状となっている。しかしながら、TMDとATMDでは、特に初期の段階での粘性減衰エネルギーの増加が、無制御に比べかなり大きくなっている。ただし、TMDとATMDの粘性減衰エネルギーの立ち上がりは、ATMDの方が1秒弱ではあるが早い。AMDは、どちらの地震波の場合も、量的に少なく、増加形状も緩やかである。また、図7の対象モデル自体の結果とあわせてみると、TMDとATMDでは、図6の粘性減衰エネルギーの大部分は、制震装置のダッシュポットによるものであり、入力エネルギーの消費が、殆どこの部分で行われていることが明かである。

図8、図9、および図10は、解析モデル全体の地震入力エネルギー、アクティブ制御力による入力エネルギー、およびその和としての入力エネルギーを示したものである。図8より、各制御方式とも、どちらの地震波の場合でも、無制御に比べ、地震入力エネルギーのピークの最大値のみの低減はみられるものの、EL CENTRO記録の場合では、殆ど全域にわたって、HACHINOHE記録の場合には、前半部分で、無制御よりも大きな値となっている。しかしながら、図9に示すように、AMDでは、制御力による入力エネルギーは、負の値になっており、図10に示すように、全体の入力エネルギーを、その和と考えると、結果的に、入力エネルギーが低減されていることとなっている。一方、ATMDでは、図9のエネルギー量は、わずかではあるが、正の値となっている。このことから、ATMDは、AMDのようにモデル全体の入力エネルギーとしての低減により制震を行うのではなく、TMDと同様に、入力エネルギーを粘性減衰エネルギーとして消費していることが明かである。

おわりに

以上、TMDをアクティブ化したATMDの制震特性を把握するため、エネルギー的な側面から、ATMD、TMD、およびAMD等の簡単な数値解析モデルを用いたシミュレーションを行い、基礎的な検討を行った。その結果、今回の解析諸量をもったATMDは、主として装置のダッシュポットの粘性減衰エネルギーによって、入力エネルギーを消費して制震を行っており、AMDのように、制御力によって、全体での入力エネルギーを低減させているのではないことが明かとなった。ただし、装置のダッシュポットの減衰係数等の値によって、ATMDの特性も影響されるため、今後、これらを含めて、定量的な効果を検討していく予定である。

参考文献 山本、相沢、東野、速水、羽生田：二方向アクティブマスダンパーの開発(その5)、日本建築学会講演梗概集、1990年10月