

(141) ハイブリッド制震装置の定点理論に基づくフィードバック制御

九州電力 正員○本郷 克浩
 京都大学工学部 正員 家村 浩和
 京都大学工学部 正員 五十嵐 晃

1. はじめに

地震などの不確定外力を受ける構造物の動的応答を低減する手法として、パッシブとアクティブのハイブリッド法であるATMD (Active Tuned Mass Damper)がある。本研究では、チューニングに必要なパラメータの陽な解を得ることのできる制御則を新たに提案し、最適ゲイン・最適同調振動数・最適減衰率ならびに制震効果について検討を行った。さらに、振動台実験により制震効果を検証した。

2. 定点理論に基づく制御則

図1に示すような直列型ハイブリッド制震装置を設置した1自由度系モデルに地動外力が作用するときの運動方程式は

$$\begin{cases} m(\ddot{x} + \ddot{z}_0) + kx - c_d\dot{y} - k_d y = 0 \\ m_d(\ddot{x} + \ddot{y} + \ddot{z}_0) + c_d\dot{y} + k_d y = u(t) \\ m_s(\ddot{x} + \ddot{y} + \ddot{z}_s\ddot{z}_0) = -u(t) \end{cases} \quad (1)$$

制御力として絶対加速度をフィードバックする。

$$u(t) = -G(\ddot{x} + \ddot{z}_0) = -mg(\ddot{x} + \ddot{z}_0) \quad (2)$$

地盤が調和振動をすると仮定すると主振動系の共振曲線は、次式により与える事ができる。

$$\left| \frac{X}{Z_0} \right|^2 = \frac{[-f^4 + (\mu + g + 1)\xi^2 f^2]^2 + [2\eta\xi f(\mu + g + 1)f^2]^2}{[f^4 - \{(\mu + g + 1)\xi^2 + 1\}f^2 + \xi^2]^2 + [2\eta\xi f\{1 - (\mu + g + 1)f^2\}]^2} \quad (3)$$

TMDの最適パラメータを求める方法でよく知られているように式(3)は減衰率によらない2つの定点を通ることがわかる。この定点は次式を解く事により求めることができる。

$$\lim_{\eta \rightarrow \infty} \left| \frac{X}{Z_0} \right|^2 = \lim_{\eta \rightarrow 0} \left| \frac{X}{Z_0} \right|^2 = \alpha^2 \quad (4)$$

この定点において共振曲線の値を等しくすることで、最適ゲイン・最適同調振動数比が求められる。

・最適ゲイン

$$g_{opt} = \frac{2 - \mu(\alpha^2 - 1)}{\alpha^2 - 1} \quad (5)$$

・最適同調振動数比

$$\xi_{opt} = \frac{\alpha\sqrt{\alpha^2 - 1}}{\alpha^2 + 1} \quad (6)$$

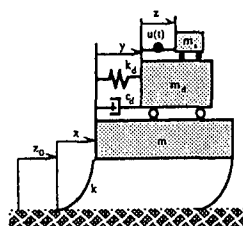


図1 1自由度モデル

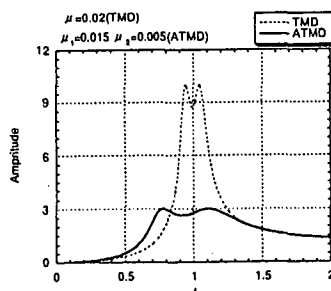


図2 主振動系の共振曲線

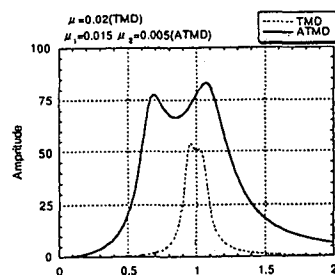


図3 TMDの共振曲線

表1 パラメータの最適値

	Mass Ratio	Frequency Ratio	Damping	Gain	Response Peak
	μ	ξ_{opt}	η_{opt}	g_{opt}	α
TMD	0.02	0.985	0.0857	—	10.05
ATMD	$\mu_s=0.015$ $\mu_d=0.005$	0.849	0.2738	0.235	3.00

最適減衰率についてはTMDの場合式(7)で与えられる。そこでゲインがゼロの場合に式(7)と矛盾しないように式(8)で与えた。

$$\eta_{opt} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3\mu}{2(\mu+1)}} \tag{7}$$

・最適減衰率

$$\eta_{opt} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3}{\alpha^2+1}} \tag{8}$$

3. 定常応答解析

式(5)～(8)に従ってこれらのパラメータを具体的に計算した例を表1に示す。これによると最適減衰率は同等の質量比を持つTMDに比べて大幅に増大していることがわかる。これは制震効果の増大により、単位時間当たりに消費しなければならないエネルギー量が増大したことによると考えられる。一方、最適同調振動数比においてはTMDと比較して、低振動数側にシフトしている。これは質量比の大きなTMDに見られる傾向と一致している。

次に共振曲線の計算結果を図2、図3に示す。主振動系の共振曲線を見ると、共振点付近の応答は低減されるが、主振動系の固有振動数よりも小さな振動数を持つ外乱に対しては応答振幅が増大することがわかる。また、TMD部分の共振曲線を見ると、共振点付近の通過帯域はTMDの場合よりも増大しており広帯域の外乱に対してはTMD部分の応答振幅を拡大できることが予想される。

4. 地震応答解析

表2のような諸元を持つ構造物に対して行った地震応答解析の結果を図4～図8に示す。質量比はTMDの場合2%、ATMDの場合TMD部分が1.5%、可動マスが0.5%とした。また期待する応答値の指標 α は3とし

表2 モデルの諸元

M	3920 (kg)
K	100 (kg/cm)
C	0.8 (kg sec/cm)

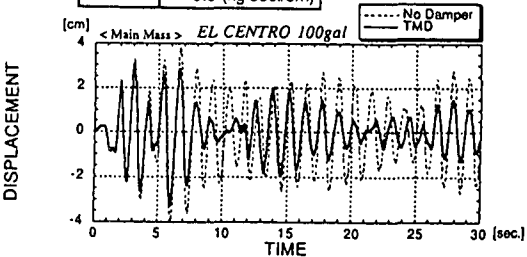


図4 TMD付加の場合の時刻歴

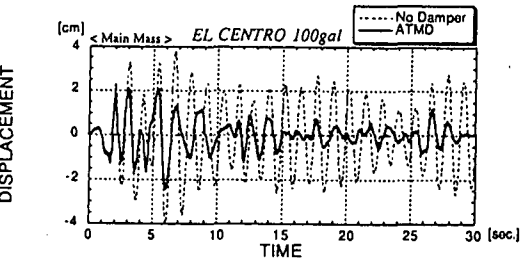


図5 ATMD付加の場合の時刻歴

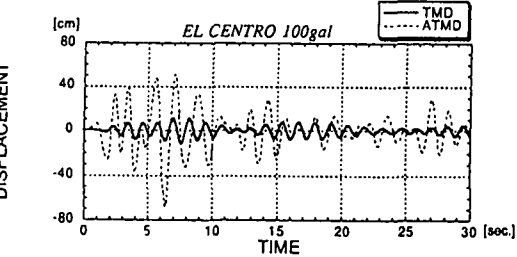


図6 TMD部分の時刻歴

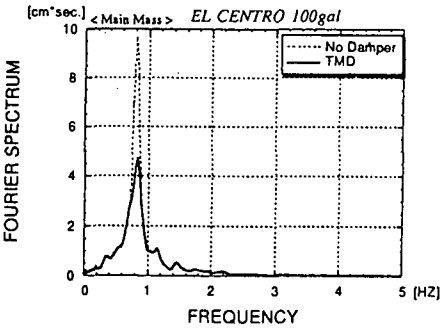


図7 TMD付加の場合のフーリエスペクトル

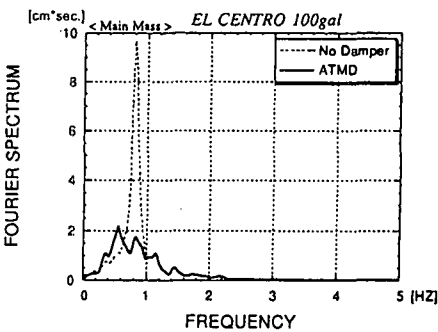


図8 ATMD付加の場合のフーリエスペクトル

た。使用した地震動入力は最大値100galに調整したEl Centro記録のNS成分である。

時刻暦応答を見ると無制震の場合構造物が大きく共振する3秒から10秒、13秒から20秒、26秒から30秒でATMD付加の場合の方がTMD付加に比べて応答が大幅に低減されている。またTMD部分の応答はATMDの場合、かなり大きくなっており、TMD部分の動きを拡大することによって制震効果が増大するものと考えられる。フーリエスペクトルを見ると主振動系の固有振動数付近の応答は無制震時に比べて、TMD付加の場合50%であるが、ATMDの場合15%にまで制御されている。しかし、0.5Hz付近の応答は、ATMDの場合増幅されている。

5. 実験システム

本研究では図9のように各層の質量が34.3kgの鋼製4層フレーム供試体にTMD、ATMDを取り付けて実験を行った。表3に、供試体の諸元を示した。本実験で用いた制震装置は図10のようにACサーボモータと可動マスを内蔵している。TMDの実験では、この制震装置を供試体第4層から吊り下げた。このときTMDは定点理論により供試体の1次振動に同調するように設計してある。ATMDの実験では、TMDの状態内で蔵されたモータを動かし、能動的にTMDの振動を増幅することで制震効果の増大を図る事ができる。それぞれの制震装置のパラメータは表4のようになる。

また第2節で述べた制御理論は構造物の1次モードを制御することを目的としている。そこで多自由度構造物の制御では1次モードに相当する加速度が必要であるが、それは直接計測することができない。本実験ではモーダルフィルタ¹⁾を用いてこれを求め、あわせてスピルオーバー対策とした。さらにシステム全体の安定性を保つことに配慮して以下のような制御則を用いた。

$$u(t) = -G_1(\ddot{x} + \ddot{z}_0) + G_2\dot{z} + G_3z = -m_1g_{opt}(\ddot{x} + \ddot{z}_0) + G_2\dot{z} + G_3z \tag{9}$$

フィードバックゲイン G_1, G_3 については、所定の効果が得られかつ可動マスのストロークが所定のストローク限度内(±10cm)に収まるという条件下でゲインを数値シミュレーションにより求めた。

6. 実験結果

実験に用いた地震波はEl Centro記録NS成分で、その最大加速度を30galにスケール化したものである。また制震効果を表す指標である α は3とした。TMD、ATMDを設置した場合の第4層速度応答の時刻暦を図11、図12に示す。TMDに比べATMDでは、6秒から19秒の間のモデルが大きく共振する部分で応答振幅の減少が顕著に現れている。特に9秒から12秒、16秒から18秒ではモデルの応答は極めて小さく、高い制御効果を示している。

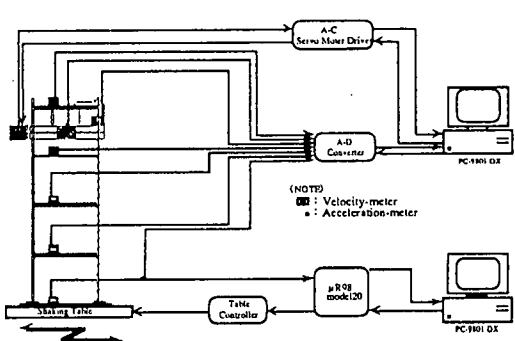


図9 実験システム

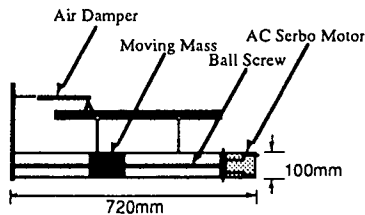


図10 TMD、ATMD

表3 供試体の諸元

MODE	Natural Period(sec.)	Damping Ratio(%)	Participation Factor
1	0.671(0.662)	0.40	(1.241)
2	0.226(0.229)	3.58	(0.333)
3	0.140(0.149)	4.42	(0.183)
4	-(0.122)	-	(-0.079)

表4 制震装置のパラメータ

	Mass Ratio μ	Frequency Ratio ξ_{opt}	Damping η_{opt}	Gain g_{opt}	Response Peak α
TMD	0.11	0.925	0.193	—	4.38
ATMD	$\mu_1=0.067$ $\mu_2=0.043$	0.849	0.274	0.183	3.00

次に振り子部分の第4層に対する相対的な応答を図13に示す。ATMDの場合可動マスにより振り子の振動を拡大するためTMDに比べてかなり大きくなっている。また可動マスの変位に関しては図14に示す通り、所定の範囲に収めることができています。最後に第4層応答速度のフーリエスペクトルを図15および図16に示す。ATMDの場合、最大値ではTMDとほぼ等しいが本研究で用いたモデルの1次固有振動数に相当する1.5Hzでは無制御時に比べて11%、TMDで制御した場合に比べると50%にまで応答が低減する制御効果を示している。

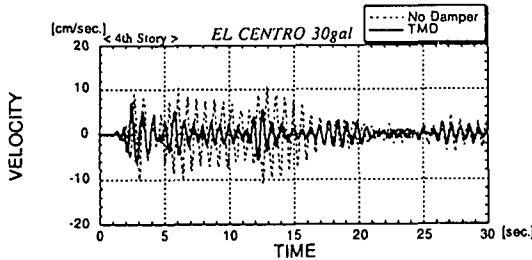


図11 TMD付加の場合の4層速度時刻

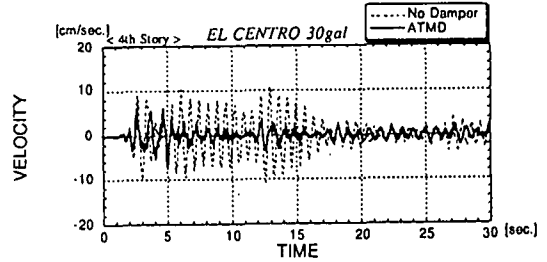


図12 ATMD付加の場合の4層速度時刻歴

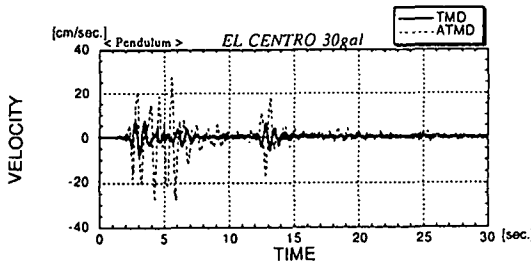


図13 振り子部分の速度時刻歴

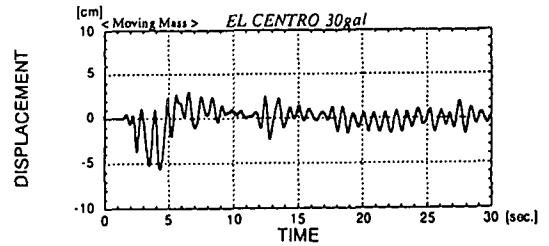


図14 可動マスの変位時刻歴

7. まとめ

(1) 地動外力下における直列型ハイブリッド制震装置の定点理論に基づく制御則を新たに提案した。この制御則では、期待する応答値の指標 α を用いることによりATMDのチューニングのパラメータを陽な形で得ることができる。

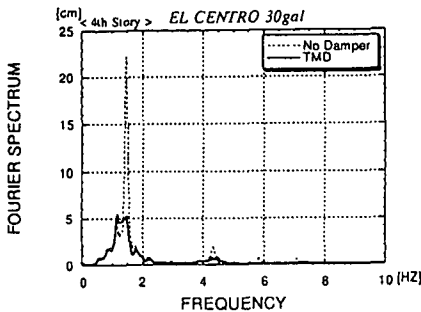


図15 TMDの場合の4層速度応答のフーリエスペクトル

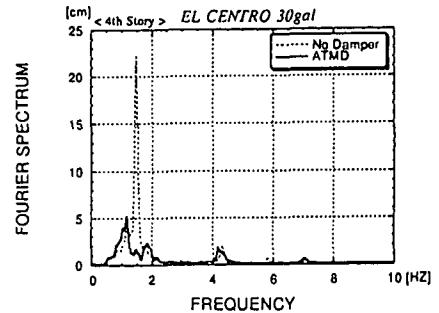


図16 ATMDの場合の4層速度応答のフーリエスペクトル

(2) この制御則により1自由度振動系の数値シミュレーションを行った。地震動外力下において、主振動系の共振点付近の応答を大幅に低減できることが判明した。

(3) 4層フレームモデルを用いた振動台実験を行い、この制御則がモデルの1次振動の低減には極めて有効であることが確認できた。

参考文献

- 1) 小堀鐸二、西村功、坂本光雄：アクティブ二重動吸振器の開発・実用化に関する研究、日本建築学会大会学術講演概要集、平成5年9月。
- 2) 大田裕文、青木猛、開沼史和：スビルオーバー除去のためのモーダルフィルタの構成、計測と制御、昭和61年11月。