

京都大学工学部 正会員 家村浩和
 京都大学工学部 正会員 五十嵐晃
 九州電力株式会社 正会員○本郷克浩

【1.はじめに】

地震などの不確定外力をう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。その際の制御則として最適制御理論を用いた場合、そのチューニングに必要なパラメータは制御力に依存する最適値が存在することが知られているが、試行錯誤により求めるしか方法がなかった。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。

【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震外力が作用するときの運動方程式は

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

制御力として絶対加速度をフィードバックする。

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

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、次式により与えることができる。

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

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(4)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ことにより求めることができる。

$$\lim_{\eta \rightarrow 0} \left| \frac{X}{Z_0} \right|^2 = \lim_{\eta \rightarrow 0} \left| \frac{X}{Z_0} \right|^2 = \alpha^2 \quad (5)$$

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

$$g_{opt} = \frac{2 - \mu(\alpha^2 - 1)}{\alpha^2 - 1} \quad (6)$$

・最適同調振動数比

$$\xi_{opt} = \frac{\alpha\sqrt{\alpha^2 - 1}}{\alpha^2 + 1} \quad (7)$$

最適減衰率についてはTMDの場合式(8)で与えられる。そこでゲインがゼロの場合に式(8)と矛盾しないように式(9)で与えた。

$$\eta_{opt} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3\mu}{2(\mu + 1)}} \quad (8)$$

・最適減衰率

$$\eta_{opt} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3}{\alpha^2 + 1}} \quad (9)$$

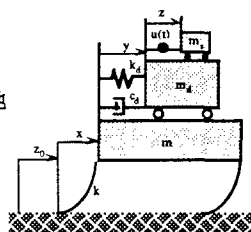


図1 1自由度モデル

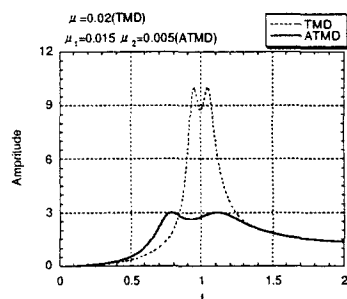


図2 主振動系の共振曲線

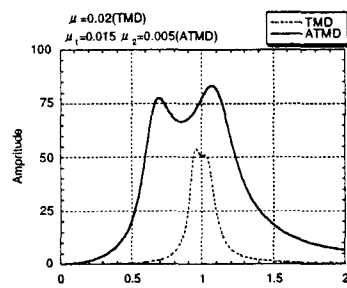


図3 TMDの共振曲線

表1 パラメータの最適値

	Mass Ratio μ	Frequency Ratio ξ_{opt}	Damping η_{opt}	Gain g_{opt}	Response Peak α
TMD	0.02	0.985	0.0857	—	10.05
ATMD	$\mu_1=0.015$ $\mu_2=0.005$	0.849	0.2738	0.235	3.00

【3.定常応答解析】

実際にこれらのパラメータにしたがって計算してみると表1ようになる。これによると最適減衰率は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に比べて、低振動数側によっている。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。

表2 モデルの諸元

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

【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とした。

時刻歴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%だが、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.まとめ】

本研究では、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。この制御則ではチューニングに必要なパラメータを陽な形で得ることができる。また、この制御則により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。

実験による制震効果の確認については別途報告の予定である。

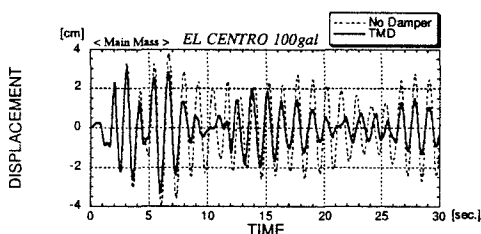


図4 TMD付加の場合の時刻歴

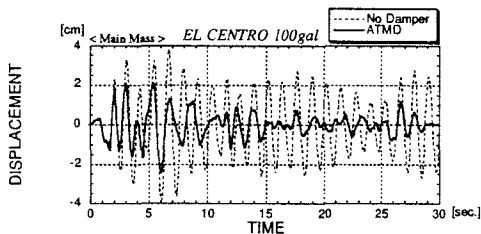


図5 ATMD付加の場合の時刻歴

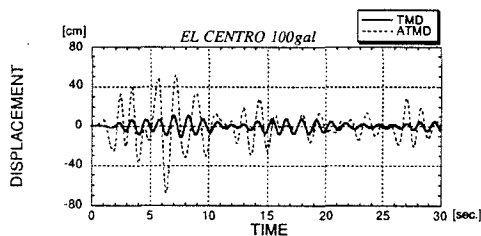


図6 TMD部分の時刻歴

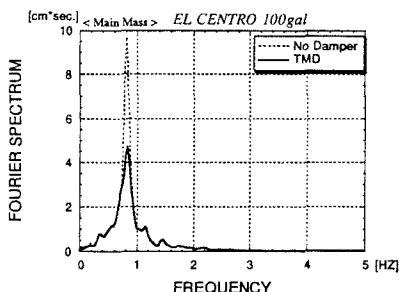


図7 TMD付加の場合のフーリエスペクトル

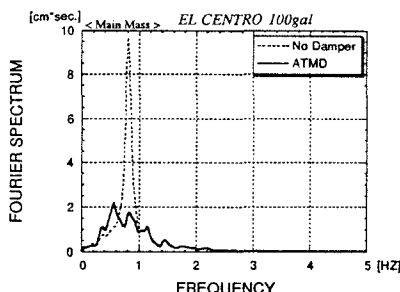


図8 ATMD付加の場合のフーリエスペクトル