

運輸省 正員 米山 治男
京都大学工学部 正員 家村 浩和 山田 善一

1. はじめに フレキシブルな構造物の動的応答を低減する手法として、パッシブ制御、アクティブ制御および両者の長所を取り入れたハイブリッド制御がある。本研究では、これらの各種制御手法を多自由度系曲げ構造物に対して適用すると同時に、各手法の地震時の構造物応答に対する制振効果の比較を行った。パッシブ制御として Tuned Mass Damper(TMD)、アクティブ制御として Active Mass Damper(AMD)、ハイブリッド制御として両者を組み合わせた Hybrid Mass Damper(HMD) を採用した。

2. 卓越振動数を持つ地盤に対するアクティブ制御 ハイブリッド制御、アクティブ制御において、アクティブ制御力を決定するために最適レギュレータ理論を用いる。まず変位 $z(t)$ が、正規ホワイトノイズ加振を受ける1自由度振動系の応答としてモデル化されると仮定する。地盤の状態方程式は仮想的なフィルターへの入力を $w(t)$ として、卓越振動数 ω_g 、減衰定数 ζ_g により次のようになる。

$$\dot{z} = A_z z + G_z w \quad \text{ただし、} z = \begin{pmatrix} z \\ \dot{z} \end{pmatrix}, A_z = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_g^2 & -2\zeta_g\omega_g \end{pmatrix}, G_z = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

また地動 $\ddot{z}(t)$ のもとで、アクティブ制御力 $u(t)$ (m 次元ベクトル) を受ける n 自由度系構造物の運動方程式

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = Du - m\ddot{z} \quad (D: n \times m \text{ 行列})$$

は、次のような状態方程式で表現できる。

$$\dot{x} = Ax + Bu + G\ddot{z}$$

$$\text{ただし、} x = \begin{pmatrix} y \\ \dot{y} \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{pmatrix}$$

$$, B = \begin{pmatrix} 0 \\ M^{-1}D \end{pmatrix}, G = \begin{pmatrix} 0 \\ -M^{-1}m \end{pmatrix}$$

ここで地盤の状態方程式を導入し、地動フィルターと構造物を合わせた全体系に対して状態方程式を作成すると、

$$\dot{\bar{x}} = \bar{A}\bar{x} + \bar{B}u + \bar{G}w(t)$$

$$\text{ただし、} \bar{x}^T = \begin{pmatrix} x^T & z^T \end{pmatrix}, D_z = \begin{pmatrix} 0 & 1 \end{pmatrix} A_z$$

$$, \bar{A} = \begin{pmatrix} A & GD_z \\ 0 & A_z \end{pmatrix}, \bar{B} = \begin{pmatrix} B \\ 0 \end{pmatrix}, \bar{G} = \begin{pmatrix} G \\ G_z \end{pmatrix}$$

この系に対し次の評価関数を最小にするようなアクティ

ブ制御力 $u(t)$ を求める問題を考える。

$$J = E [\bar{x}^T \bar{R}_1 \bar{x} + u^T \bar{R}_2 u]$$

$$\text{ただし、} R_1 = \frac{1}{2} \text{blockdiag}(K, M)$$

$$, \bar{R}_1 = \text{blockdiag}(R_1, 0)$$

$$, R_2 = \text{diag}(r_1, r_2, \dots, r_m)$$

これは最適レギュレータ理論から次の行列 Riccati 方程式

を解くことと等しく、正定対称解 P を求めると

$$\bar{R}_1 - P\bar{B}\bar{R}_2^{-1}\bar{B}^T P + \bar{A}^T P + P\bar{A} = 0$$

最適制御力は次式のように得られる。

$$u(t) = -R_2^{-1}\bar{B}^T P\bar{x}(t) = F_x x + F_z z$$

(F_x : フィードバックゲイン, F_z : フィードフォワードゲイン)

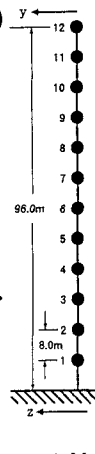


Fig. 1 Model

Table 1 Dimensions of Model

Symbol	Parameter	Remarks
L	96.0m	梁の全長
M	480.0ton	梁の全重量
I	1.0m ⁴	断面2次モーメント
E	21000000.0ton/m ²	ヤング率
ω	5.0ton/m	単位長さあたりの質量
$\alpha 1$	0.01	質量比例減衰係数
$\beta 1$	0.003	剛性比例減衰係数

Table 2 Natural Periods and Participation Factor of Model

Mode	T (sec)	Factor
1	2.33603	16.900
2	0.37781	-9.434
3	0.13656	5.631
4	0.07088	-4.188
5	0.04349	3.478

Table 3 Dimensions of TMD, AMD and HMD

	TMD	AMD	HMD	
Symbol	Parameter			Remarks
m	9.6ton	9.6ton	9.6ton	質量
k	5.5ton/m		7.1ton/m	剛性
$\alpha 2$	0.10			質量比例減衰係数
$\beta 2$	0.15			剛性比例減衰係数

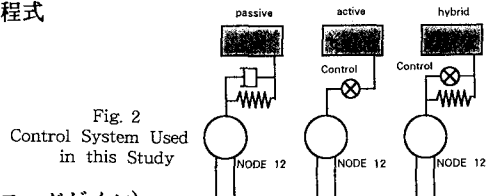


Fig. 2 Control System Used in this Study

3. 数値計算例 解析対象として、12 自由度の曲げ構造モデルを採用した (Fig.1, Table1)。モデルの固有周期、刺激係数を Table2 に示す。節点 12 において制御を行うとして、各制御手法のモデル図は Fig.2 のようになる。用いた TMD の固有周期は構造物の 1 次振動に対応しており、減衰係数は周波数応答関数から最適値を決めた (Fig.3)。同様に HMD の固有周期も構造物の 1 次振動に対応している。TMD、AMD、HMD の所見を Table3 に示す。入力地震動として構造物の 1 次振動に対応した模擬地震動 ($\omega_g = 2.7(\text{rad/sec})$, $\zeta_g = 0.2$) を作成し (Fig.4)、各制御手法を用いたときの構造物の応答を節点 12 について計算した。なお解析を周波数領域で行い、Parzen のスペクトルウィンドウを用いてフーリエスペクトルの平滑化を行っている。

Fig.5 に構造物の振動エネルギーの平均値と制御力の標準偏差の関係を AMD と HMD について描いた。アクティブ制御力が小さいとき、HMD は AMD より小さな制御力で大きな制振効果が期待できる。AMD に比べ HMD の場合に曲線が急激なカーブを描いている理由を調べるため、HMD と AMD とで振動エネルギーが同じで制御力の大きさが違う場合 (a)、制御力の大きさが同じで振動エネルギーが違う場合 (b) の 2 つについて解析した。HMD は 2 つの場合があるためそれぞれを (a)、(b) と表記する。変位応答では (Fig.6)、TMD より AMD、HMD の制振効果が大きいことがわかる。さらに加速度応答では (Fig.7)、TMD、AMD、HMD(a) は構造物の 1 次振動にのみ制振が行われているが、HMD(b) は 2 次振動にまで制振効果が現れている。これは制御力の比較 (Fig.8) からわかり、HMD を用いればアクティブ制御力が小さいうちは同調振動数に対応した制御を行い、アクティブ制御力を大きくすると同調振動数以上の高次振動に対しても制御を行うことが可能であることを示している。

4. あとがき パッシブ制御、アクティブ制御、ハイブリッド制御の比較からハイブリッド制御の優位性を示せた。今後は加力装置の動作遅延時間の問題を考慮していく必要がある。

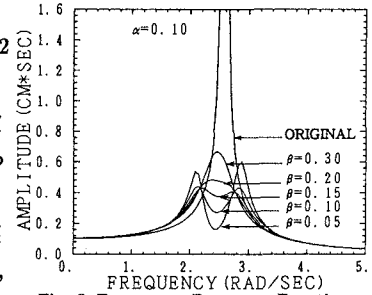


Fig. 3 Frequency Response Function

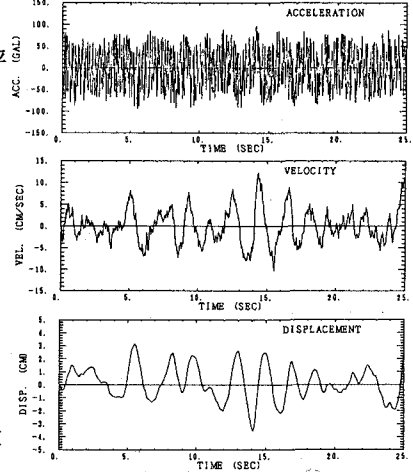


Fig. 4 Simulated Ground Motion (KG*CM)

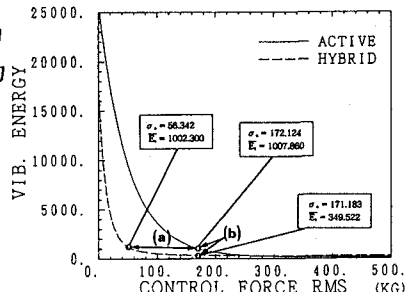


Fig. 5 Selected Design Points for Comparison

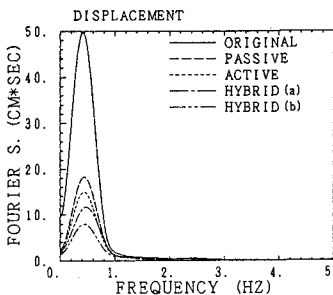


Fig. 6 Fourier Spectrum of Simulated Displacement

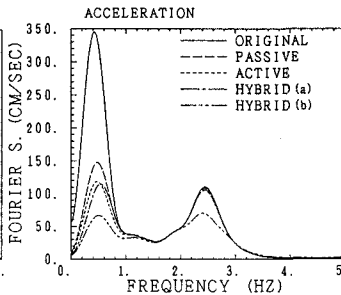


Fig. 7 Fourier Spectrum of Simulated Acceleration

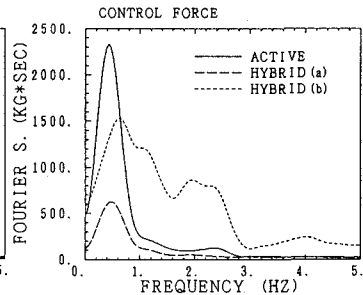


Fig. 8 Fourier Spectrum of Simulated Control Force