

一自由度系実験模型に対するAMD制震実験について

阿南工業高等専門学校 正員 ○榎田修司
 徳島大学工学部 正員 平尾 潔
 前田建設工業(株) 岩本 直

1. はじめに アクティブ制震は、センサの信号から必要な制御力をコントローラで計算し、アクチュエータで制御力を発生させて振動制御をするため、センサからの信号にノイズあるいはドリフト等があると、制震力発生に直接的に影響を受ける。システム構成にもよるが、本研究の場合、センサに速度計を用い、変位量を数値積分で求めており、積分により、低振動数域の誤差が増幅されるため、フィルタによって除去する必要がある。アナログフィルタは、高速であるものの、経年的な特性変化があると言われており、デジタルフィルタがロバスト性の上では有利に思われる。そこで、本研究では、図1に示すような、DCサーボモータをアクチュエータとするAMDを取り付けた一自由度実験模型に対し、デジタルフィルタを用いた制震実験を行い、その効果についての比較検討を試みた。

2. デジタルフィルタ FFTを利用したフィルタは、本研究でも後述する結果整理に使用するには有効であるが、数ミリ秒単位の計算には不向きである。これに対して、バタワースフィルタのような、比較的少ない計算ステップで計算できる巡回型フィルタが有効である。しかしながら、現時点では、バタワースフィルタについて検討中であり、便宜上、非巡回型フィルタである移動平均型デジタルフィルタを片側のみ用いたローパスフィルタとハイパスフィルタを組み合わせるバンドパスフィルタ(図2(c))として利用した。なお、本研究で使用した速度計の測定範囲は0.1~70Hz、サンプリング間隔は0.005秒間隔である。

1) ローパスフィルタ: 時刻*i*における出力値 $V_{LP}(i)$ を次式のように、時刻*i*および*i-1*での2個のデータで片側のみ単純移動平均を行ってローパスフィルタとした。

$$V_{LP}(i) = \{V(i) + V(i-1)\} / 2 \quad (1)$$

図2(a)は、ホワイトノイズを入力時の利得特性であり、高域の遮断周波数 f_{ch} は、50Hzである。

2) ハイパスフィルタ: 一般的な移動平均では、各データの荷重平均処理を行い、この結果を現時点のデータから引きハイパスフィルタとする。しかしながら、この方法では、低振動数に対する演算では、かなり多くの演算処理を必要とするため、本研究では、データ数の違う*N*組の片側のみ単純移動平均を荷重平均することで、目的のフィルタを作成した。なお、重み $w(j)$ は、試行錯誤によって求めたものである。

$$V_{HP}(i) = V(i) - \left\{ \sum_{j=1}^N w(j) \times \bar{V}(j) \right\} / \sum_{j=1}^N w(j) \quad (2)$$

$$\text{ただし、} \bar{V}(j) = \sum_{k=0}^{M \times j - 1} V(i-k) / (M \times j), \quad w(j) = 2 \times \sqrt{j/N} \times (1 + (j/N)/3), \quad (j=1, \dots, N) \quad (3)$$

図2(b)は、 $N=20$ 、 $M=16$ の利得特性を示したものであり、低域の遮断周波数 f_{cl} は、0.24Hzである。

3. AMD制震システム 今回用いた実験模型は、図1に示すような鋼製のラーメン模型である。AMDは、DCサーボモータ(60W)の回転をボールネジによって付加質量を水平移動させ、制御力を得るようになっている。また、実験模型の固有振動数、質量比等についてを表1に示す。

図3は、制御システムの流れを示したものであり、先のフィルタは、AD変換直後と計算誤差等の除去のためDA変換直前にも用いている。また、制御力計算については、測定した相対速度とそれを積分して得られる相対変位を用いて、次式で示される評価関数*J*の値を最小にする最適レギュレータ理論を用いて求めた。

$$J = \int_0^{\infty} (X^T Q X + u^T R u) dt \quad (4) \quad \text{ただし、} Q = \begin{pmatrix} K & 0 \\ 0 & M \end{pmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ x \end{pmatrix} \quad (5)$$

ここに、*x* : 相対変位, \dot{x} : 相対速度, *u* : 制御力, *R* : 制御力の重み

4. 実験結果 実験模型を振動台に取り付け、エルセントロ地震波形の時間スケールを1/2に縮めた波形を入力地震動に用いてAMD制震実験を行い、全くフィルタを通さない速度データを記録し、FFTを用いたバンドパスフィルタで0.1~20Hzにカットし、さらに、FFTによる積分、微分を行って結果を整理した。

図4(a)は、AMDを停止させた非制震時、(b)は制御力の重み $R=0.8$ としてAMDを動作させた制震時の各結果の一例である。無制震時のスペクトル特性が示すように、実験模型は、スペクトルにピークの立つ系であり、制震時の場合と比較すると、この振動数付近の低減が行われている。表2は、フィルタの低域遮断周波数を変化させて各3回の実験を行った結果であり、表中の応答倍率および低減率は、次式により求めたものである。

$$\text{応答倍率} = \frac{\text{最大応答値}}{\text{最大入力値}}, \quad \text{低減率} = (1 - \frac{\text{制震時の応答倍率}}{\text{非制震時の応答倍率}}) \times 100 \quad (6)$$

低減率は、低域遮断周波数を高めるにつれて、僅かではあるが、大きくなる傾向になっており、したがって、低振動数成分の遮断が、制震効果の改善に有効であると考えられる。

5. おわりに 減衰が小さくスペクトルにピークの立つ系のアクティブ制震においては、バンドパスフィルタの遮断周波数が制震効果に影響を及ぼすことが明かとなり、今後、デジタルフィルタの改良と影響について、さらに検討を行う予定である。

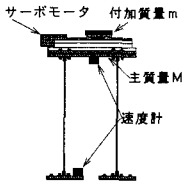


図1 実験模型

表1 実験模型の諸量

主質量 M (kgf·s ² /cm)	0.075544
付加質量 m (kgf·s ² /cm)	0.005429
バネ定数 K (kgf/cm)	25.35
減衰係数 C (kgf·s/cm)	0.006375
質量比 $\mu = m/M$ (%)	7.187
固有振動数 f (Hz)	2.95

注) Cと f は、AMD停止状態での自由振動結果より、 K は部材寸法より求めた。

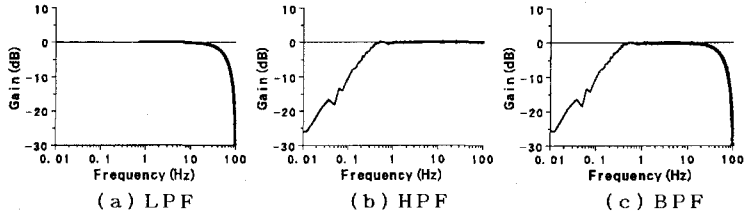
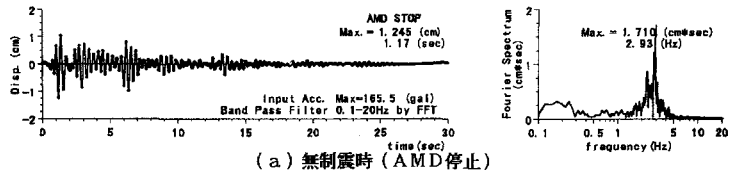
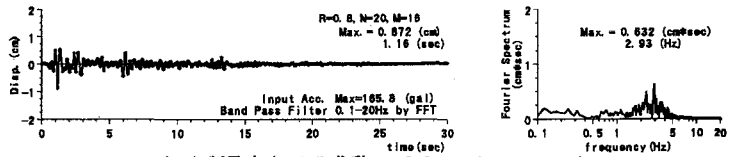


図2 デジタルフィルタの利得特性



(a) 無制震時 (AMD停止)



(b) 制震時 (AMD動作 $R=0.8$, フィルタ $N=20, M=16$)

図4 相対変位の時系列波形とフーリエスペクトル

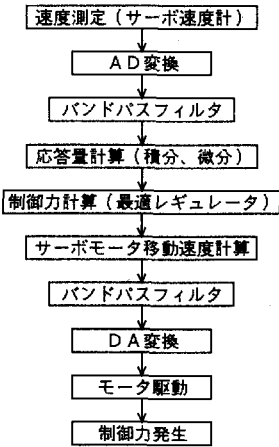


図3 AMD制震システムの流れ

表2 変位低減率 (AMD動作時の重み $R=0.8$)

	最大応答変位 (cm)	最大入力変位 (cm)	応答倍率	応答倍率 平均値	低減率 (%)
AMD STOP	1.245	1.134	1.098	1.098	27.7
	1.248	1.136	1.099		
	1.246	1.134	1.089		
$N=22, M=16$	0.888	1.116	0.785	0.784	28.5
$f_c=0.244\text{Hz}$	0.883	1.117	0.791		
$f_c h=50.12\text{Hz}$	0.887	1.116	0.795		
$N=20, M=16$	0.866	1.109	0.781	0.786	28.6
$f_c=0.244\text{Hz}$	0.872	1.110	0.786		
$f_c h=50.12\text{Hz}$	0.876	1.108	0.791		
$N=18, M=16$	0.870	1.104	0.788	0.784	28.9
$f_c=0.293\text{Hz}$	0.873	1.106	0.789		
$f_c h=50.12\text{Hz}$	0.865	1.116	0.775		
$N=16, M=16$	0.865	1.108	0.781	0.781	28.9
$f_c=0.317\text{Hz}$	0.872	1.112	0.784		
$f_c h=50.12\text{Hz}$	0.865	1.112	0.778		