

振動制御の振動減衰パワーによる解析

長崎大学大学院 学生員○馬渡 あかね

長崎大学工学部 正 員 岡林 隆敏

長崎大学工学部 学生員 小城 知代

1.はじめに

構造物の振動制御を行うためには、動吸振器を設置するパッシブ制御と、フィードバック制御によるアクティブ制御が考えられる。構造物の規模が大きい場合には、いずれの場合においても、構造物に減衰効果を付加して、振動を制御する。このような制振システムの設計を行うためには、外力により導入されるパワー、および減衰により散逸されるパワー⁽¹⁾⁽²⁾の関係を明確にする必要がある。本研究では、構造物に地震外力が作用する場合を事例にして、構造物に作用するパワーと、減衰による散逸パワーの計算を行い、これを可視化した。さらに、構造物に動吸振器を設置することにより、構造物から散逸するパワーの変化について検討したものである。数値計算例として、1自由度系と5自由度系の構造物を取り上げた。

2.運動方程式と振動減衰パワーの定義式

(1) 1自由度系の場合

解析モデルを図-1(a)に示す。 m, c, k は構造物の、 m_a, c_a, k_a は動吸振器の質量、減衰係数、弾性係数であり、各値を表-1に示す。外力 $f(t)$ は、図-2のEl Centro地震波を考える。次の5自由度の場合もこれを用いる。構造物と、動吸振器の運動方程式は、

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = f(t) + u(t) \quad (1) \quad m_a\ddot{y}_a + c_a\{\dot{y}_a - \dot{y}\} + k_a\{y_a - y\} = f_a(t) \quad (2)$$

となる。ここで、制御力は、 $u(t) = -m_a\ddot{y}_a$ である。1自由度系では、構造系の外力によるパワー $W(t)$ と、振動減衰パワー $D(t)$ は、次式で表される。

$$W(t) = f(t)\dot{y} + f_a(t)\dot{y}_a \quad (3) \quad D(t) = c\dot{y}^2 + c_a\{\dot{y}_a - \dot{y}\}^2 \quad (4)$$

(2) 5自由度系の場合

変位ベクトルを $y = [y_1 \ y_2 \ y_3 \ y_4 \ y_5]^T$ と定義すると、質量マトリクス m 、減衰マトリクス c 、剛性マトリクス k を用いて構造物と動吸振器の運動方程式は、次のようになる。

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = f(t) + b_a u(t) \quad (5)$$

$$m_a\ddot{y}_a + c_a\{\dot{y}_a - \dot{y}_s\} + k_a\{y_a - y_s\} = f_a(t) \quad (6)$$

変位 y_s は動吸振器の設置層の変位であり、 b_a は制御力の作用点を表す係数ベクトルである。また、 y を $y = \Phi q$ とモード分解すると、基準座標 q を用いて(5)式は次式で表わされる。

$$\ddot{q} + H\dot{q} + \Omega q = \Phi^T\{f(t) + b_a u(t)\} \quad (7)$$

ここで H 、 Ω は、 $H = [2h_i\omega_i]$ 、 $\Omega = [\omega_i^2]$ を対角要素に持つ行列であり、 ω_i 、 h_i はそれぞれ次の固有円振動数、減衰定数である。また、構造物全体での $W(t)$ および $D(t)$ は、次式で表わされる。

$$W(t) = \{f(t)^T \dot{y}\} + f_a(t)\dot{y}_a \quad (8)$$

$$D(t) = \{y^T \cdot \bar{c} \cdot \dot{y}\} + \dot{y}_a c_a \{\dot{y}_a - \dot{y}_s\} \quad (9)$$

ただし、変位ベクトル $\bar{y}$ は次式である。

$$\bar{y} = [y \ y_a] \quad (10)$$

$\bar{c}$ は、構造物と動吸振器の減衰関係から構成される、減衰係数行列である。

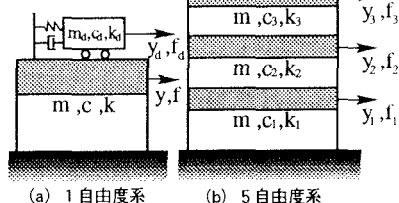


図-1 解析モデル

表-1 構造物と動吸振器の諸元

	1自由度		5自由度
構造物			
m	1.0 tf·sec ² /m	m	5.5 tf·sec ² /m
f	2.0 Hz	E	2.1×10^7 tf/m ²
h	0.02	I	2.0×10^{-4} m ⁴
動吸振器			
m_a	$m/50$	m_a	$(5 \times m)/20$
f_a	1.96 Hz	f_a	0.74 Hz
h_a	0.086	h_a	0.134

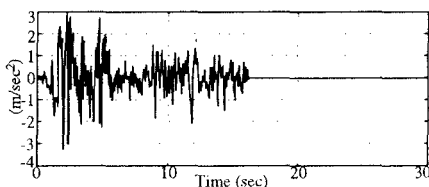


図-2 El Centro地震波形

3.減衰係数行列の同定と動吸振器の最適同調パラメータ

振動減衰パワーを求めるためには、減衰係数行列 c が必要である。しかし、値を実際に求めることは不可能である。そこで、構造物のモード減衰 h_n から同定する。すなわち、実験で求まる h_n で構成される H の式、

$$H = (\Phi^T) \cdot c \cdot (\Phi) \quad (11)$$

より c が求まる。動吸振器の減衰定数 h_d 、固有振動数 f_d は、構造物と動吸振器の質量比 μ を用いて、次式で与えられる。

$$h_d = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}}, \quad f_d = f / (1+\mu) \quad (12)$$

4.数値解析結果

(1) 1自由度

減衰パワーの30秒間の計算結果を、図-3に示す。制御時には約5秒間で、70%のエネルギーが散逸しており、その大部分は動吸振器からである。また、減衰エネルギーの解析結果を図-4(a)に示す。制御時には、構造物から約20%、動吸振器から残り80%のエネルギーが散逸する。(b)図より、エネルギーの収束値は、約 5.8×10^5 (J) であり、制御時には非制御時の約2倍の早さで収束値に到達する。

(2) 5自由度

構造物の振動特性を、表-2に示す。1次振動を制御するための h_d と f_d は、表-1に示した。吸収エ

ネルギーと散逸エネルギーの1分間の解析結果を、基準化して図-5に示す。非制御時には、吸収エネルギーが散逸する時間が長い。制御時には、その大部分を動吸振器から急速に散逸することが分かる。次に、制御時と非制御時の散逸エネルギーを比較した。この計算結果を基準化して、図-6に示す。制御時には、

約16秒間の地震外力の作用が止まると、ほぼ同時にエネルギーの散逸が終わるが、非制御時には、その後もエネルギーを散逸していることが分かる。

5.まとめ

本研究により、制振構造物のエネルギーの大半は動吸振器より急速に散逸することが分かった。大規模な構造物の場合、モード減衰から減衰係数行列を同定する過程において、検討しなければならない点がいくつかある。今後、この解析手法を、大規模な有限要素法モデルに拡張することを考えている。

【参考文献】

- (1) W.C.Hurty, M.F.Rubinstein: Dynamics of Structures, 1964, Prentice-Hall, Inc.
- (2) R.H.Lyon, R.G.Dejong: Theory and Application of Statistical Energy Analysis, 1995, Butterworth-Heinemann.

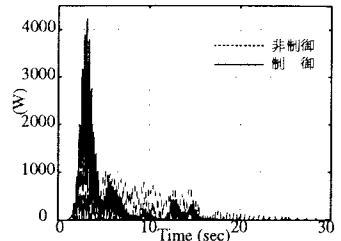


図-3 減衰パワー変化

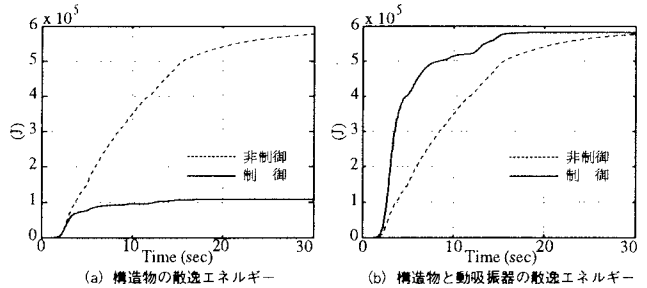


図-4 散逸エネルギー解析

表-2 5自由度系の振動特性

	1次	2次	3次	4次	5次
振動数 (Hz)	0.774	2.260	3.563	4.577	5.220
減衰定数	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05

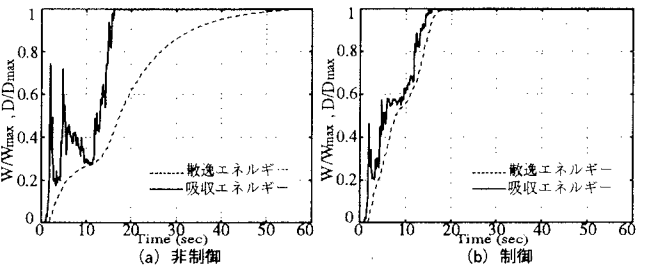


図-5 散逸エネルギーと外力の仕事

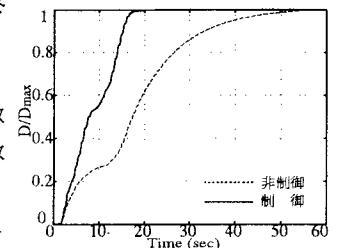


図-6 散逸エネルギー解析