

I - B159

動吸振器で制御された構造系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
豊福設計 (株) 正 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。土木構造物のように規模の大きい構造物では、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の関係を評価する必要がある。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_d, c_d, k_d 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、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、

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = f(t) + u(t) \quad (1) \quad m_d\ddot{y}_d + c_d\dot{y}_d + k_d(y_d - y) = f_d(t) \quad (2)$$

となる。制御力は、 $u(t) = -m_d\ddot{y}_d$ である。1自由度系では、外力による構造系のパワー $W(t)$ と、振動減衰パワー $D(t)$ は、次式で表わされる。

$$W(t) = f(t)\dot{y} + f_d(t)\dot{y}_d \quad (3) \quad D(t) = c\dot{y}^2 + c_d\{\dot{y}_d - \dot{y}\}^2 \quad (4)$$

(2) 5自由度系の場合

変位ベクトル $y = [y_1 \ y_2 \ y_3 \ y_4 \ y_5]^T$ 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。

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

$$m_d\ddot{y}_d + c_d\{\dot{y}_d - \dot{y}_5\} + k_d\{y_d - y_5\} = f_d(t) \quad (6)$$

変位 y_5 は動吸振器の設置層の変位であり、 b 、 b_d は力の作用点を表わ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。

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

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 i 次の固有円振動数、減衰定数である。構造物全体での $W(t)$ および $D(t)$ は、次式で表わされる。

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

$$D(t) = y^T c y + c_d\{\dot{y}_d - \dot{y}_5\}^2 = q^T H q + c_d\{\dot{y}_d - \dot{\phi} q\}^2 \quad (9)$$

ただし、 ϕ は動吸振器を設置した5層目の振動モードベクトルである。

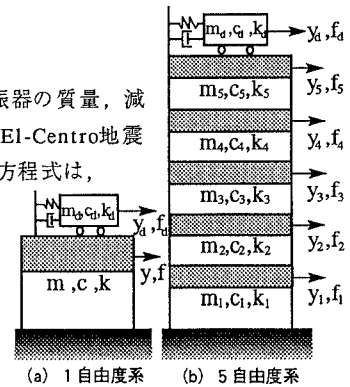


図-1 解析モデル

表-1 構造系と動吸振器の諸元

	1自由度	5自由度
構造物		
m	1.0 tf·sec ² /m	5.5 tf·sec ² /m
f	2.47 Hz	E
h	0.02	I
動吸振器		
m_d	$m/50$	$(5 \times m)/20$
f_d	1.96 Hz	0.74 Hz
h_d	0.086	0.134

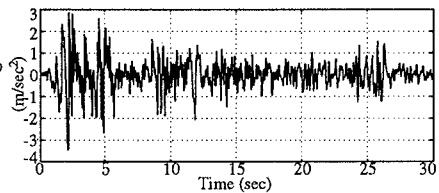


図-2 El-Centro地震波形

キーワード：振動制御 動吸振器 減衰 減衰パワー 散逸エネルギー 地震外力

連絡先：長崎大学工学部 (〒852 長崎市文教町1-14 TEL(0958)47-1111)

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_k から同定する。すなわち、実験で求まる h_k で構成される H の式、

$$H = (\Phi^T) \cdot c \cdot (\Phi) \quad (10)$$

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。

$$h_d = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}}, \quad f_d = f/l + \mu \quad (11)$$

4.数値解析結果

(1) 1自由度

減衰パワーの1分間の計算結果を、図-3に示す。制御時には約10秒間で、65%のエネルギーを動吸振器より急速に散逸する。また、構造物の散逸エネルギーを図-4に示す。制御時には構造物から散逸するエネルギーが、非制御時の約20%に減少しており制御効果を確認できる。制御時の散逸エネルギーを図-5に示す。エネルギーの収束値は、約 4.7×10^5 (J) であり、トータルの約80%を動吸振器より急速に散逸する。

(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。外力による仕事と散逸エネルギーの1分間の計算結果を、図-6に示す。非制御時には、外力が作用しなくなった後もエネルギーを散逸し、 Σ その収束値は 7.6×10^4 (J) である。次に、構造系からの散逸エネルギーを基準化して図-7に示す。30秒間の地震外力の作用が止まると、非制御時には、約80%のエネルギーを散逸し、制御後は、ほぼエネルギーの散逸が終わる。制御時の散逸エネルギーの計算結果を、基準化して図-8に示す。これより、トータルのエネルギーの約30%を構造物から、残り70%を動吸振器から散逸しているのが分かる。

5.まとめ

本研究により、動吸振器を設置した構造物では、外力により取り込まれたパワーが、動吸振器の減衰により散逸する過程を可視化することができた。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.

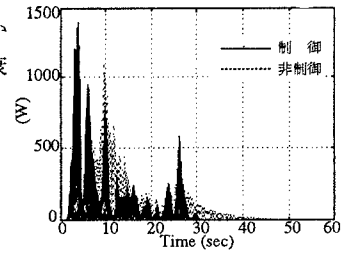


図-3 減衰パワーの変化

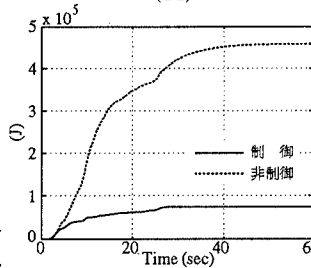


図-4 構造物の散逸エネルギー

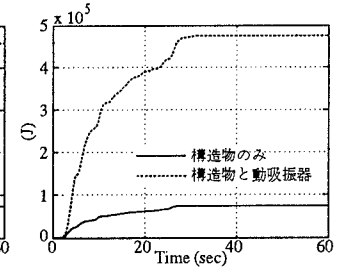


図-5 構造物のみと動吸振器からの散逸エネルギー

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

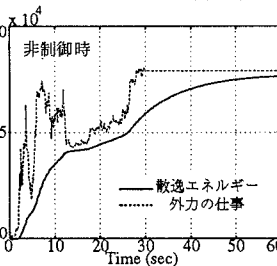


図-6 外力の仕事と散逸エネルギー

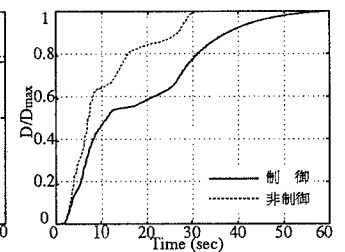


図-7 構造系からの散逸エネルギー

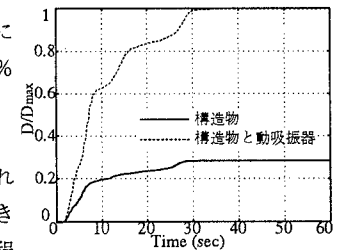


図-8 構造物のみと動吸振器からの散逸エネルギー