

減衰パワーによる免震・制振構造物の制振効果の評価

長崎大学工学部 学生員○串山智恵美
長崎大学工学部 正 員 岡林 隆敏
長崎大学大学院 学生員 馬渡あかね

1. はじめに

構造物の振動制御とは、構造物に付加装置を取り付けることにより、構造物の振動エネルギーを散逸させることであると考えることができる。そこで本研究では、構造物に地震外力が作用した場合を事例とし、免震装置と、動吸振器⁽¹⁾をそれぞれ設置した構造物の減衰パワー⁽²⁾⁽³⁾の計算を行った。さらに、それぞれの制御方法による、減衰パワー、および散逸エネルギーの変化を検討したものである。数値計算例として、5層構造物を取り上げた。

2. 構造物のモデル化

(1) 免震構造と制振構造モデル 図-1に、免震・制振構造物の解析モデルを示す。(a)は、免震装置で支持された免震構造物、(b)は、5層目に動吸振器を設置した制振構造物である。 m, c, k_i は構造物、 m_b, c_b, k_b は免震装置、 m_d, c_d, k_d は動吸振器の質量、減衰係数、バネ定数である。

(2) 免震構造物の運動方程式 構造物の変位、外力ベクトルを $y=[y_1 \cdots y_5]^T, f=[f_1 \cdots f_5]^T$ 、免震装置の変位、外力を y_b, f_b とし、これを用いて構造物-免震装置全体の変位、外力を次式のように定義する。

$\bar{y}=[y_b \vdots y]$ (1) $\bar{f}=[f_b \vdots f]$ (2)

これより、構造物-免震装置の運動方程式は、次式のようになる。

$\bar{m}\ddot{\bar{y}}+\bar{c}\dot{\bar{y}}+\bar{k}\bar{y}=\bar{f}(t)$ (3)

$\bar{m}, \bar{c}, \bar{k}$ は構造物-免震装置全体の質量、減衰、剛性行列である。

$\bar{y}=\Phi\bar{q}$ とモード分解すると、次式のように状態空間表示できる。

$\dot{\bar{q}}+\bar{H}\dot{\bar{q}}+\bar{\Omega}\bar{q}=\bar{\Phi}^T\bar{f}(t)$ (4)

(4)式により、構造物-免震装置の振動解析を行った。ここで $\bar{H}, \bar{\Omega}$ は、 $[2h_i\omega_i], [\omega_i^2]$ ($i=1\sim 6$)を対角要素に持つ行列であり、 ω_i, h_i は、 i 次の円振動数、減衰定数である。表-1に、構造物と各制御装置の諸元を示す。また表-2に、構造物の振動特性を示す。免震装置の設置により、1次の振動数は0.310Hzに低下する。

(3) 制振構造物の運動方程式 動吸振器の変位、外力を y_d, f_d とすると、構造物、動吸振器の運動方程式は次式となる。

$m\ddot{y}+c\dot{y}+ky=f(t)+b_d u_d(t)$ (構造物) (5)

$m_d\ddot{y}_d+c_d\{\dot{y}_d-\dot{y}_s\}+k_d\{y_d-y_s\}=f_d(t)$ (動吸振器) (6)

u_d は構造物に伝わる制御力であり、 $u_d=-m_d\ddot{y}_d$ となる。また $y=\Phi q$ とすると、(5)式は次式のように状態空間表示できる。

$\dot{q}+H\dot{q}+\Omega q=\Phi^T\{f(t)+b_d u_d(t)\}$ (7)

(7)式により構造物の振動解析を行った。また、動吸振器の最適値は、質量比 $\mu(=1/20)$ を用いて、古典的方法により、構造物の1次振動に同調するように、次式により計算した。

$f_d=f_1/(1+\mu), h_d=\sqrt{3\mu/8(1+\mu)}$ (8)

また図-2に、地震外力として用いたEl Centro地震波を示す。

3. 減衰パワーの定義

(1) 免震構造の場合 免震構造物における、外力によるパワー $PE_b(t)$ と、振動減衰パワー $PD_b(t)$ は次式で表される。

$PE_b(t)=\dot{\bar{y}}^T\cdot\bar{f}(t)$ (9) $PD_b(t)=\dot{\bar{y}}^T\cdot\bar{c}\cdot\dot{\bar{y}}$ (10)

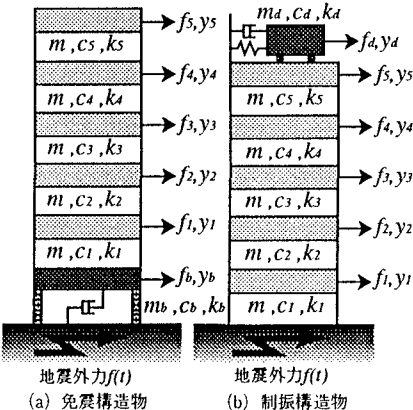


図-1 解析モデル

表-1 解析モデルの諸元

構造物		免震装置		動吸振器	
m	$5.5 \text{ gf}\cdot\text{sec}^2/\text{m}$	mb	$5.5 \text{ gf}\cdot\text{sec}^2/\text{m}$	md	$(5\times m)/20$
E	$2.1\times 10^9 \text{ gf}/\text{m}^2$	hb	0.05	hd	0.134
I	$2.0\times 10^4 \text{ m}^4$	kb	$143 \text{ gf}/\text{m}$	fd	0.74 Hz

表-2 構造物の振動特性

	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

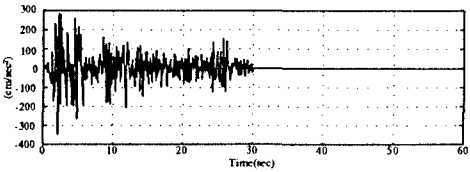


図-2 El Centro地震波形

(2) 制振構造の場合 制振構造物の外力によるパワー $PE_p(t)$ と振動減衰パワー $PD_p(t)$ は次式となる。

$$PE_p(t) = \{\dot{y}^T \cdot f(t)\} + \dot{y}_d \cdot f_d(t) \quad (11)$$

$$PD_p(t) = \{\dot{y}^T \cdot c \cdot \dot{y}\} + c_d \{\dot{y}_d - \dot{y}_s\}^2 \quad (12)$$

4. 免震構造物の解析結果

図 - 3 に、地震外力が作用した構造物の 1 分間の減衰パワーの時間的変化を示した。(a)は、構造物—免震装置と構造物のみの減衰パワーを示したものである。両者の差が免震装置の減衰パワーであり、構造物のみの場合の 1.3 倍の散逸量となっている。このように、免震装置から多量の減衰パワーが散逸している。(b)は、非制御時と制御時において、構造物のみから散逸する減衰パワーを比較したものである。最大値を比較すると、免震構造物の場合は、約 1/2 に減少しており、構造物の応答レベルが低下していることが分かる。また図 - 4 は外力の仕事と散逸エネルギーの関係を示したものである。(a)は、非制御時の両者の関係を示している。(b)には、制御時の外力が免震構造物になった仕事、散逸エネルギーおよび構造物のみの散逸エネルギーを示した。いずれの場合でも、外力が作用しなくなった後、自由振動により、振動エネルギーが減衰パワーにより散逸している。免震装置を付加することにより、免震構造物に取り込まれるエネルギーは増加するが、その大半は免震装置から、減衰パワーとなって散逸している。

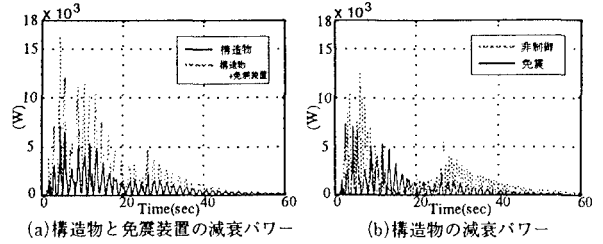


図 - 3 免震構造物の減衰パワー

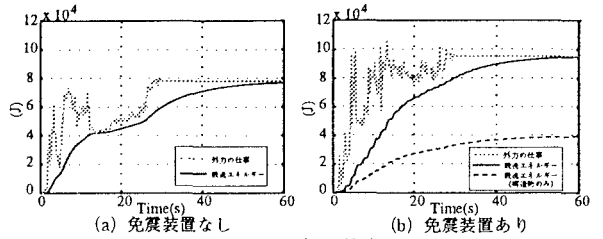


図 - 4 外力の仕事と散逸エネルギー

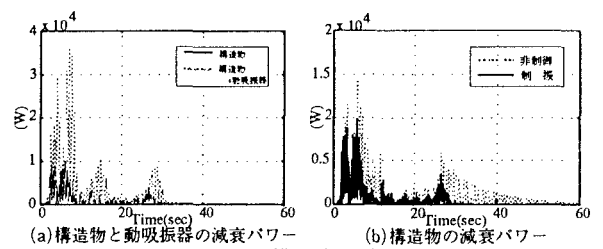


図 - 5 制振構造物の減衰パワー

5. 制振構造の解析結果

図 - 5 は、制振構造物の減衰パワーを示したものである。(a)の制振構造物から散逸する減衰パワーを見ると、動吸振器から大量のパワーが散逸していることが分かる。(b)では、非制御の構造物と制振構造物の構造物のみの減衰パワーを比較した。制振効果のために、制御なしの場合より、減衰パワーが減少している。図 - 3 の免震構造では低い周波数の減衰パワーが散逸しているのに対し、図 - 4 の制振構造では高い周波数のものが散逸している。また、減衰パワーが散逸する時刻が異なることが分かる。また図 - 6 は、外力が制振構造物になった仕事と散逸エネルギー、さらに構造物のみの散逸エネルギーを示したものである。外力の仕事に追従して、エネルギーが散逸していることが分かる。免震構造物と比べると制振構造物が、外力のなす仕事は大きくなっているが、しかし、動吸振器から散逸するエネルギーが大きいために、構造物のみから散逸するエネルギーは同程度になっている。

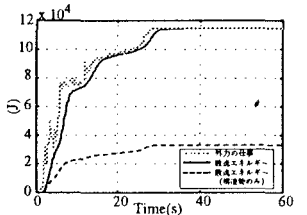


図 - 6 制振構造物の外力の仕事と散逸エネルギー

6. まとめ

免震構造物と制振構造物を①減衰パワー、②外力のなす仕事、③散逸エネルギーから比較した。減衰パワーに着目すると、各種装置で振動制御された構造物の、制御効率を評価することが可能になることが確認できた。現在、不規則振動論の視点から、減衰パワーの定式化を行っている。

【参考文献】(1) 馬渡・岡林・小城：土木学会西部支部研究発表会公演概要集，pp.100~101，1997.3.

(2) W.C.Hurty, M.F.Rubinstein: Dynamics of Structures, 1964, Prentice-Hall, Inc.

(3) R.H.Lyon, R.G.Dejong: Theory and Application of Statistical Energy Analysis, 1995, Butterworth-Heinemann.