

減衰パワーによるパッシブおよびアクティブ振動制御の制振効果の評価

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 串山 智恵美

1.はじめに

構造物の振動制御を行う場合、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。大規模な構造物に制御装置を設置する場合、制御装置の出力パワーの調整が最適設計の目安となる。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、5層構造物に地震外力が作用する場合を事例にして、構造物および制御装置から散逸する減衰パワーと、導入されるパワーの関係を明確にした。さらに、制御則としてアクティブ制御、また、動吸振器をアクティブ制御したハイブリッド制御を考え、各制御則の制振効果をパワーの入出力によって比較検討した。

2.解析モデルと運動方程式

図-1に、解析モデルと、ハイブリッド制振システムを示す。構造物は総重量約270tf、高さ20mの5層構造物であり、最上部にアクティブ制御された動吸振器を設置している。 $m_i, c_i, k_i (i=1\cdots 5)$ は構造物の、また、 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。表-1に、構造物と、動吸振器の諸元を示す。 E, I は構造物のヤング係数、断面2次モーメントであり、 f_d, h_d は動吸振器の振動数、減衰定数である。

(1) アクティブ制御された場合の運動方程式

構造物の基礎に地震加速度 $\ddot{e}(t)$ が作用する場合、構造物の変位、および外力ベクトルを次式のように定義する。

$$y = \{y_1(t) \cdots y_5(t)\}^T, f = \{m_1 \cdots m_5\}^T \ddot{e}(t) = b \ddot{e}(t) \quad (1)$$

y をモーダル解析し、振動モード Φ を用いて $y = \Phi q$ と表せば、基準座標 q を用いて、運動方程式は、次式のように表される。

$$\ddot{q} + H \dot{q} + \Omega q = \Phi^T \{b \ddot{e}(t) + b_d u_a(t)\} \quad (2)$$

ここで $u_a(t)$ は制御力であり、状態変数 $X = \{q^T \dot{q}^T\}^T$ を用いて、

$$u_a(t) = -KX(t) \quad (3)$$

で表される。ここで、係数行列 K は、次のリカッチ方程式

$$Q - PB_2R^{-1}B_2^TP + PA + A^TP = 0 \quad (4)$$

の解、 P より求められるフィードバックゲインである。

(2) ハイブリッド制御された場合の運動方程式

構造物の運動方程式は(2)式となり、構造物に作用する制御力は、 $u_p(t) = -m_d \ddot{y}_d$ で表される。動吸振器の運動方程式は、

$$m_d \ddot{y}_d + c_d \dot{d} + k_d d = m_d \ddot{e}(t) + u_{hb}(t) \quad (5)$$

となる。 d は5層目に対する、動吸振器の相対変位である。

$u_{hb}(t)$ は動吸振器に作用する制御力で、構造物と動吸振器の状態変数 $\bar{X} = \{X^T; \dot{y}_d \dot{y}_d\}^T$ より、

$$u_{hb}(t) = -\bar{K}\bar{X}(t) \quad (6)$$

で表される。また動吸振器の最適値は、質量比 μ を用いて、古典的方法により1次振動数 f_1 に最適同調するように、次式より計算した。

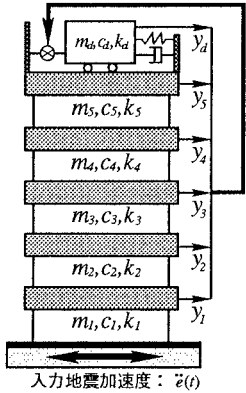


図-1 解析モデルと制振システム

表-1 5層構造物と動吸振器の諸元

	構造物 (各層)		動吸振器
m	5.5 tf·sec ² /m	m_d	$(5 \times m)/20$
E	2.1×10^7 tf/m ²	f_d	0.74 Hz
I	2.0×10^4 m ⁴	h_d	0.134

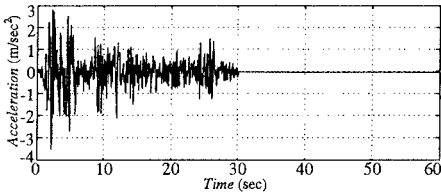


図-2 El-Centro地震加速度応答波形

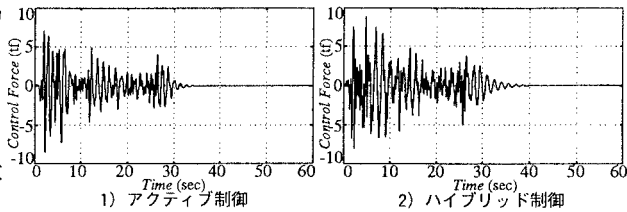


図-3 制振システムの制御力

$$f_d/f_l = 1/(1+\mu), \quad h_d = \sqrt{3\mu/8(1+\mu)} \quad (7)$$

図-2に、地震外力として用いた、El-Centro地震加速度波形を示す。図-3に、地震外力に対して各制御装置から発生する制御力を示す。表-2に、構造物の振動特性を示す。

表-2 5層構造物の振動特性

振動次数	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

3. 各種パワーの定義式

(1) アクティブ制御された場合

構造物の減衰パワー $PD_a(t)$ 、および外力によるパワー $PE_a(t)$ は次式で表される。

$$PD_a(t) = \dot{y}^T c \dot{y}, \quad PE_a(t) = \dot{b}^T \ddot{y} + u_a \dot{y} \quad (8)$$

ここで c は構造物の減衰定数行列である。

(2) ハイブリッド制御された場合

構造物全体の振動減衰パワー $PD_{hb}(t)$ 、外力によるパワー $PE_{hb}(t)$ は次式で表される。

$$PD_{hb}(t) = \dot{y}^T c \dot{y} + c_d \dot{d}^2 \quad (9)$$

$$PE_{hb}(t) = \dot{b}^T \ddot{y} + \{m_d \ddot{d} + u_{hb}\} \dot{d} \quad (10)$$

4. 数値計算結果

(1) 減衰パワー計算結果

図-4 1), 2)に、アクティブ、ハイブリッド制御された構造物の全減衰パワーを示す。

制御力の最大値を 8.8tf に調整してある。各制御則でパワーの最大値および散逸形態に大きな差は見られない。両者とも、数秒間の間に、全体の約70%を散逸し、その後急速に散逸量は減少する。やがて30秒後に地震の作用が終了し、それと同時にパワーの散逸も終わり、構造物の振動が停止する。

(2) エネルギー計算結果

図-5 1), 2), 3)に、非制御時、制御時の構造物の散逸エネルギーを示す。エネルギーの散逸量は、アクティブ制御の場合は、非制御時の約27.7%、ハイブリッド制御の場合は約24.7%に減少している。このことから、各制御則とも、非制御時より構造物の振動が少なくなることが確認できる。またエネルギーの散逸時間は、制御後は約30秒であり、非制御時の1/2に短縮される。さらに各制御則を比較すると、アクティブ制御より、ハイブリッド制御の散逸量が約90%少なく、より高い制振効果が確認できる。

また、図-6 1), 2), 3)に、外力による仕事と散逸エネルギーを示す。制御後、構造物に導入される仕事の量は増加する。この増加量は、制御装置から発生する仕事である。各制御則で比較すると、アクティブ、ハイブリッド制御時で $2.75 \times 10^5 \text{J}$ 、 $1.73 \times 10^5 \text{J}$ であり、後者が少量である。すなわち、ハイブリッド制御では、アクティブ制御時の約1/2の出力パワーで、同程度の制振効果を発揮することが可能である。

5. まとめ

非制御時と比較して、制振された構造物のエネルギー散逸量は大量に減少し、散逸時間は大幅に短縮する。各制御則では、ハイブリッド制御の散逸量が最も低減しており、高い制振効果が得られた。また、制御装置の設置により、構造物に導入される仕事の量は、非制御時よりも増加することが確認できた。

【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.

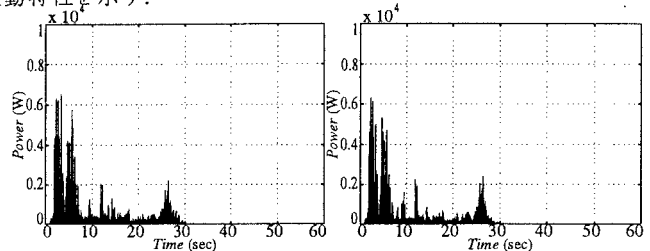


図-4 5層構造物の減衰パワー計算結果

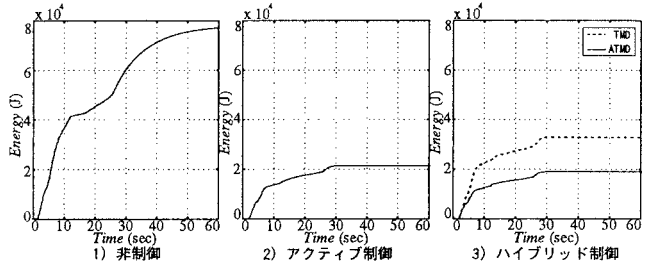


図-5 散逸エネルギー計算結果

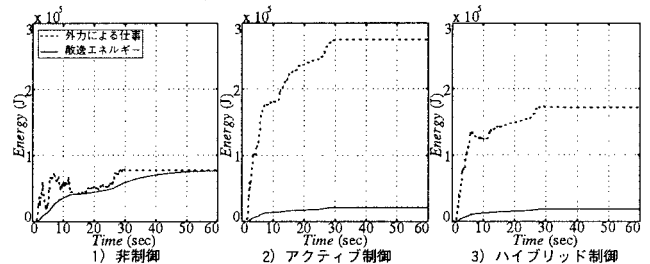


図-6 外力による仕事と散逸エネルギー