

I - B 476

不規則外力が作用する構造物の減衰パワーによる制振効果の評価

パシフィックC(株) 正 員 馬渡 あかね
長崎大学工学部 正 員 岡林 隆敏
長崎大学大学院 学生員 串山 智恵美

1.はじめに

土木構造物の振動制御においては、様々な装置を付加することで構造物の減衰を高めることになる。このような制御装置により有効な制御力を発生させるには、制御装置を設置した構造物に作用するパワーと、散逸する減衰パワーに着目した設計が必要である。構造物に作用する加速度を確率過程でモデル化した場合、構造物が有する各種パワーは、速度応答の共分散を表現する共分散方程式の解より求めることができる。そこで本研究では、制御装置を設置した5層構造物に、確率過程でモデル化した加速度が作用する場合の制振効果を、パワーの入出力によって評価した。制御装置としては、動吸振器を設置するパッシブ制御、アクチュエータを設置するアクティブ制御を考え、各制御装置の制振効果の比較検討を行った。

2.各制御時の状態方程式と共分散方程式

(1) 解析モデル 図-1に、パッシブ制御時の解析モデルを示す。 $m_i, c_i, k_i (i=1\cdots 5)$ 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。

(2) 地盤層のモデル化 地盤加速度 $\ddot{e}(t)$ は、定常過程 $r(t)$ を形状関数 $g(t)$ で変調した非定常過程と定義し、 $r(t)$ のパワースペクトル密度は、金井・田治見モデルとする。

$$\ddot{e}(t) = g(t) \cdot r(t) \quad (1) \quad S_r(\omega) = \frac{\omega_g^4 + 4h_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4h_g^2 \omega_g^2 \omega^2} S_0 \quad (2)$$

$S_r(\omega)$ はEl-Centro地震波のパワースペクトルでモデル化した。地盤層の状態変数を $Z_I(t) = \{z(t) \ \dot{z}(t)\}^T$ と定義すると、地盤層の状態方程式、観測方程式は、

$$\dot{Z}_I(t) = A_{zI} Z_I(t) + B_{zI} n(t) \cdot g(t) \quad (3) \quad r(t) = C_{zI} Z_I(t) \quad (4)$$

となる。 $n(t)$ は強度 σ^2 である白色雑音過程である。

(3) 系の状態方程式と共分散方程式 パッシブ制御時の構造物—動吸振器—

地盤系の状態変数を $Z(t) = \{\bar{X}(t)^T \ ; \ Z_I(t)^T\}^T$ と定義すると、 $\ddot{e}(t)$ が作用す

る場合の、系全体の状態方程式は次式となる。

$$\dot{Z}(t) = A_Z Z(t) + B_Z n(t) \cdot g(t) \quad (5)$$

$Z(t)$ の共分散 $R_Z(t)$ は、次の共分散方程式より求められる。

$$\dot{R}_Z(t) = R_Z(t) A_Z^T + A_Z R_Z(t) + B_Z B_Z^T \sigma^2 \cdot g(t)^2, \quad R_Z(t_0) = R_{Z0} \quad (6)$$

アクティブ制御時の状態変数を $Z(t) = \{\bar{X}(t)^T \ ; \ Z_I(t)^T\}^T$ とすると、

状態方程式、共分散方程式は(5),(6)式で表される。表-2に、

構造物の振動特性を示す。図-2に、El-Centro地震波波形を示す。

また図-3に、El-Centro地震波の金井・田治見モデルを示す。

3.各種パワーの定義式

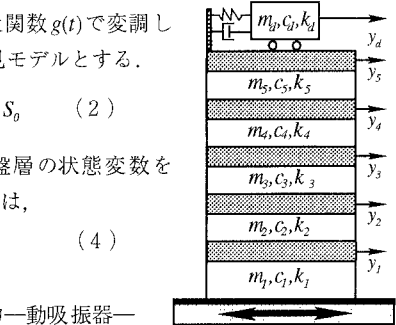
(1) パッシブ制御時 構造物—動吸振器系の速度の分散を $E[\dot{\bar{q}} \cdot \dot{\bar{q}}^T]$ とすると、 i 層目の減衰パワー $E[PD_i]$ は次式で表される。

$$E[PD_i] = E[\dot{y}_i \dot{\bar{c}}_i^T] = \bar{\Phi}_i^T E[\dot{\bar{q}} \cdot \dot{\bar{q}}^T] \bar{\Phi}_i \bar{c}_i^T (i=1\cdots 6) \quad (7)$$

$\bar{\Phi}, \bar{c}$: 構造物—動吸振器系のモード行列、減衰係数行列である。

$\bar{\Phi}_i, \bar{c}_i$: $\bar{\Phi}, \bar{c}$ の i 層目のモード、減衰係数である。全外力のパワー

は、構造物—動吸振器系の質量ベクトル $\bar{b}$ を用いて次式となる。



非定常過程加速度モデル： $\ddot{e}(t)$

図-1 パッシブ制御時の解析モデル

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

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

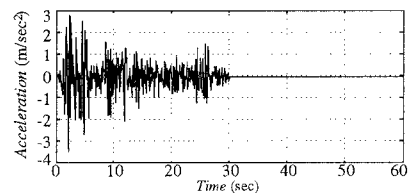


図-2 El-Centro地震加速度応答波形

キーワード：振動制御，パワー解析，不規則外力，パッシブ制御，アクティブ制御

〒852-8521 長崎市文教町1-14 長崎大学工学部社会開発工学科 TEL(FAX) 095-848-9639

$$E[PE_d] = E[\bar{b} \dot{y} C_{zi} Z_i] = \bar{b} \Phi E[\bar{q} \cdot Z_i^T] C_{zi}^T \quad (8)$$

(2) アクティブ制御時 アクティブ制御時の i 層目の減衰パワーは、 Φ, c を用いて(7)式で求められる。全外力のパワーは次式となる。

$$E[PE_a] = E[b \cdot \dot{y} C_{zi} Z_i] + E[u_a(t) \dot{y}_s] \\ = b \Phi E[q \cdot Z_i^T] C_{zi}^T + KE[X \cdot q^T] \phi_s^T \quad (9)$$

$u_a(t)$ はアクティブ制御時の最適制御力、 K は最適制御力を決定するフィードバック係数行列である。

4. 数値解析結果と考察

(1) 減衰パワー計算結果

図-4は、非制御時と制御時の減衰パワー計算結果である。非制御時の実線はパワーの分散、破線はパワーの平均のシミュレーションであり、両者の良好な一致が確認できる。各制御時の実線は制振構造物全体、点線は構造物のみのパワーの分散であり、それぞれ破線のシミュレーションと良好に一致する。構造物のパワー散逸量は、パッシブ、アクティブ制御時で非制御時の約37.9%、29.9%に減少しており、構造物の振動低減が確認できる。また実線と点線の差は、各制御時の制御装置のパワー散逸量である。

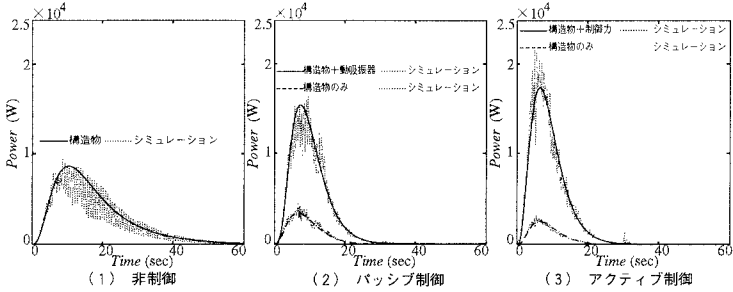


図-4 減衰パワー計算結果

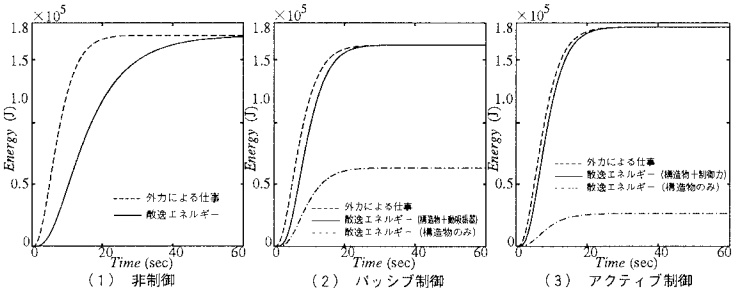


図-5 外力による仕事と散逸エネルギー計算結果

パッシブ、アクティブ制御時で、制振構造物全体の約78.7%、85.0%にあたるパワーを制御装置から散逸していることが分かる。また制御後は、非制御時の約1/2の時間の30秒でパワーの散逸が終了することが分かる。

(2) 外力による仕事と散逸エネルギー 図-5に、外力による仕事と散逸エネルギー計算結果を示す。非制御時の実線、また各制御時の実線は制振構造物全体の、一点破線は構造物のみの散逸エネルギーである。点線は外力による仕事である。非制御時、制御時で外力による仕事の収束値に大きな差は見られない。また外力による仕事と散逸エネルギーの差は、振動を維持する振動エネルギーである。非制御時に比べて、パッシブさらにアクティブ制御時は振動エネルギーが低減していることから、制御後は構造物の振動が少なくなることが確認できる。パッシブ、アクティブ制御時の構造物からのエネルギー散逸量は非制御時の約27.3%、15.0%に減少しており制御装置の制振効果が確認できる。パッシブ、アクティブ制御時の実線と一点破線の差は、それぞれ動吸振器、アクチュエータより散逸するエネルギーであり、パッシブ制御時は系全体の約61.5%、アクティブ制御時は系全体の約69.3%のエネルギーを制御装置から急速に散逸していることが確認できる。

5. まとめ

本研究では、制振構造物に確率過程の地震加速度が作用する場合の各種パワーを定式化した。制御装置を設置した場合、非制御時と比べて構造物の散逸エネルギーは大量に減少し、散逸時間は約1/2に短縮することが分かった。また制振構造物に導入される仕事の量は、非制御時と大きな差は見られない。さらにアクティブ制御時は、パッシブ制御時よりも制御装置のエネルギー散逸量が大量であるため、パッシブ制御時よりも構造物のエネルギー散逸量が減少し、高い制御効果が確認できた。

【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.