

I - B 478

走行車両による道路橋交通振動のための動吸振器の最適設計

オリエンタル建設(株) 正 会 員 ○林英次郎

(株)PAL構造 正 会 員 徐 建年

長崎大学工学部 フェロー 岡林隆敏

1. はじめに

従来、動吸振器の最適設計は構造物の1点の振動レベルを最小にするように設計されてきた。しかし、構造物が多自由度系の場合、構造物全体の振動レベルが低下するような動吸振器の最適設計法を考える必要がある。そこで、本研究では構造物全体の応答を平均的に低減させることを目的とし、構造物全体の応答の最大値を評価関数に考え、不規則振動論に基づく動吸振器の最適設計法を提案する。本手法を、走行車両によるランガー橋振動制御のための動吸振器の最適設計に適用し、数値シミュレーションによりその有効性を検証した。

2. 橋梁 - 動吸振器 - 車両系の運動方程式と路面凹凸のモデル化

図-1に示すような、橋梁 - 動吸振器 - 車両系について考える。橋梁を2次元骨組構造によりモデル化して得られる離散振動モードを、主桁について、フーリエ級数により連続振動モード $\phi(x)$ で近似する。この振動モード $\phi(x)$ と規準座標 $q(t)$ を用いて、橋梁の主桁部の変位 $y(x, t)$ は、規準座標を用いて次式のように表せる。

$$y(x, t) = \phi(x) q(t)^T \quad (1)$$

$$\ddot{q}_k(t) + 2h_k \omega_k \dot{q}_k(t) + \omega_k^2 q_k(t) = \phi_k(vt) P_v(t) / m_k + \phi_k(b) P_d(t) / m_k \quad (2)$$

ここに、 m_k は橋梁の k 次の有効質量、 ω_k, h_k は橋梁の固有円振動数および減衰定数、 $P_v(t), P_d(t)$ は車両の接地力と動吸振器の制御力である。また、 $P_v(t), P_d(t)$ および車両と動吸振器の運動方程式は次のようになる。

$$P_v(t) = -m_v \ddot{z}(t), \quad \ddot{z}(t) + 2h_o \omega_o (\dot{z}(t) - \dot{y}(vt, t) - \dot{r}(t)) + \omega_o^2 (z(t) - y(vt, t) - r(t)) = 0 \quad (3)$$

$$P_d(t) = -m_d \ddot{d}(t), \quad \ddot{d}(t) + 2h_d \omega_d (\dot{d}(t) - \dot{y}(b, t)) + \omega_d^2 (d(t) - y(b, t)) = 0 \quad (4)$$

ここに、 m_v, m_d と $z(t), d(t)$ は、車両および動吸振器の質量と変位、 ω_o, h_o と h_v, h_d は、車両および動吸振器の固有円振動数と減衰定数、さらに $r(t)$ は路面凹凸である。また、路面凹凸は、図-2の実測の路面凹凸のパワースペクトル密度に基づいて次のようにモデル化する。

$$\dot{r}(t) = -\beta r(t) + n(t) \quad (5)$$

ここに、 $\beta = 2\pi\nu a, \sigma^2 = 4\pi^2\nu A, a = 0.05, A = 0.001(\text{cm}^2/\text{m})$ である。なお、表-1に橋梁の諸元を、図-3に振動モードと振動数を4次まで示した。

3. 橋梁 - 動吸振器 - 車両系の共分散方程式

橋梁 - 動吸振器 - 車両 - 路面系の状態変数を

$$X(t) = [q(t)^T \quad \dot{q}(t)^T \quad d(t) \quad \dot{d}(t) \quad z(t) \quad \dot{z}(t) \quad r(t)]^T \quad (6)$$

で定義すると、式(2), (3), (4), (5)より橋梁 - 動吸振器 - 車両 - 路面系は、次のような白色雑音 $n(t)$ を外力とする確率微分方程式で表現することができる。

$$\dot{X}(t) = A_X(t)X(t) + B_X(t)n(t), \quad X(0) = X_0 \quad (7)$$

ここで、着目点 x 点における橋梁変位の分散応答は

$$E[y(x, t)^2] = \phi(x) R_{X_x}(t) \phi(x)^T, \quad R_{X_x}(t) = E[q(t) q(t)^T] \quad (8)$$

となり、共分散行列 $R_{X_x}(t)$ は、次式のような共分散方程式で表すことができる $R_{X_x}(t)$ の要素として与えられる。

キーワード：振動制御・交通振動・動吸振器・最適設計・不規則振動論

連絡 先：長崎大学工学部（〒852-8521 長崎市文教町1-14 TEL095-847-1111）

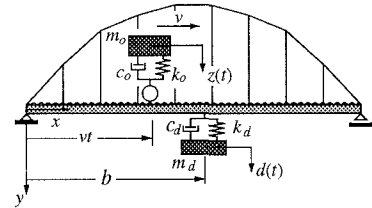


図-1 橋梁 - 動吸振器 - 車両系

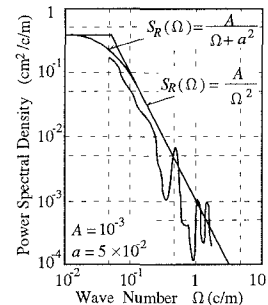


図-2 路面凹凸のパワースペクトル密度

表-1 ランガー桁橋の諸元

形式	補剛桁橋
支間	L (m)
ライズ	f (m)
桁全重量	W_b (ton)
格間数	9

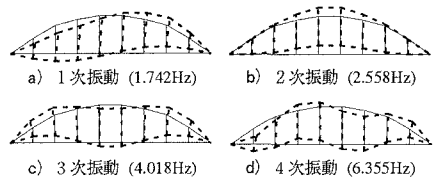


図-3 ランガー橋の振動特性

$$\dot{R}_X(t) = A_X(t)R_X(t) + R_X(t)A_X^T(t) + Q_X(t), \quad R_X(0) = R_{X0} \quad (9)$$

4. 評価規準と最適設計法

多自由度系の構造物では、動吸振器の最適設置位置が必要になる。1点の変位に着目した動吸振器の設計法では、構造物全体の振動レベルが低下しているとは限らない。そこで、次のような評価規準を採用する。

①着目点の変位の分散応答

$$PI(1) = \sigma^2(a, t)_{\max} = E[y(a, t)^2]_{\max} \quad (10)$$

②変位の分散の空間・時間応答の最大値

$$PI(2) = E[y(x, t)^2]_{\max} \quad (0 \leq x \leq L, 0 \leq t \leq T) \quad (11)$$

③変位の分散の空間的・時間的 평균

$$PI(3) = \frac{1}{T} \int_0^T \left\{ \frac{1}{L} \int_0^L E[y(x, t)^2] dx \right\} dt \quad (12)$$

多自由度系に設置する動吸振器の最適設計では、設計変数 α として、動吸振器の固有円振動数 ω_d 、減衰定数 h_d と共に、設置位置 b を考える。従って、動吸振器の最適設計問題では分散応答の最大値を最小にするような α を決定する。

$$PI(s)(\alpha) \rightarrow \min(\alpha \rightarrow \alpha^*) \quad (s=1, 2, 3) \quad (13)$$

5. 動吸振器の制御効果

走行車両による橋梁振動の空間・時間応答の標準偏差を、図-4に示した。時間の経過と共に応答のピークがいくつか発生している。以下、応答としては変位応答の標準偏差を示す。図-5は、 $L/2$ 点の応答を評価規準 $PI(1)_{L/2}$ として最適設計した動吸振器を用いた場合の橋梁の応答である。着目点は良く抑え込まれているが、それ以外の点の応答は余り低下していない。空間的応答の情報を参照した評価規準 $PI(2)$ により最適設計された動吸振器を設置した場合の応答を図-6に示す。橋梁全体の応答が平均的に抑えられ、制御効果が表れている。評価規準 $PI(2)$ を用いた場合、空間・時間の最大値を検索するので、最適設計の演算時間が長くなる。そこで、空間・時間応答の平均 $PI(3)$ を考える。図-7は、この評価規準を用いた場合の応答である。 $PI(2)$ による動吸振器に比べ制御効果は小さいが、 $PI(1)$ を用いた場合よりも応答のピークが抑えられており最大値が低下している。表-2に、各種評価規準により求められた動吸振器の最適パラメータと最大応答を示す。最大応答は、 $PI(2)$ の場合、非制御時から83.9%に低下している。また $PI(3)$ では87.7%に低下し、 $PI(1)$ では91.2%までの低下となっている。最も効果的な結果が得られた $PI(2)$ の動吸振器の振動数は、橋梁の2次振動付近に収束し、設置位置は $3L/4$ 点付近となる。

6. まとめ

本研究では、多自由度系の構造物に設置する動吸振器の最適設計のために、構造物振動の空間的情報を参照した評価規準 $PI(2)$ および $PI(3)$ を提案し、その有効性を示した。特に、 $PI(2)$ を用いると、構造物全体の応答レベルを効果的に低下させることができる。動吸振器の最適設計において、不規則振動論による定式化により、様々な条件の下での最適設計が可能であることが確認できた。

【参考文献】 徐，岡林，林：不規則振動論による動吸振器の最適設計，土木学会論文集，No.598/I-44, pp371-379, 1998.7

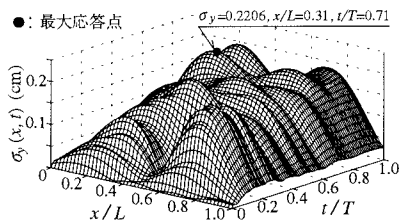


図-4 ランガー橋桁主の空間・時間応答（制御なし）

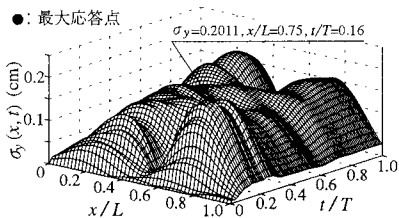


図-5 ランガー橋桁主の空間・時間応答（ $PI(1)_{L/2}$: $L/2$ 点制御）

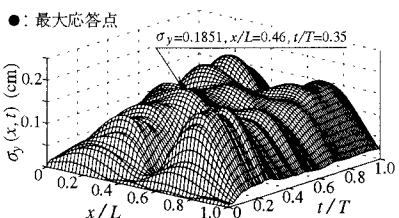


図-6 ランガー橋桁主の空間・時間応答（ $PI(2)$: 時間・空間応答の最大値）

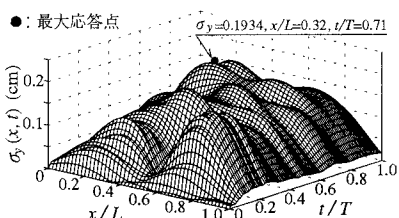


図-7 ランガー橋桁主の空間・時間応答（ $PI(3)$: 時間・空間応答の平均）

表-2 動吸振器の最適パラメータと最大応答

評価規準	振動数 f_d (Hz)	減衰定数 h_d	設置位置 x/L	最大応答 σ_y (cm)
制御なし	—	—	—	0.2206
$L/2$ 点制御 $PI(1)_{L/2}$	2.5539	0.1499	0.50	0.2011
空間・時間の最大値 $PI(2)$	2.1164	0.0936	0.60	0.1851
空間・時間の平均 $PI(3)$	1.6722	0.1374	0.69	0.1934