

道路橋の交通振動制御のための動吸振器と配置の最適設計

長崎大学工学部○学生員 岩見 章博

長崎大学工学部 正 員 岡林 隆敏

長崎大学工学部 学生員 竹下 渡

1. はじめに

これまで著者らは、1自由度系でモデル化された道路橋を車両が走行するものとして、橋梁に設置する動吸振器の最適設計⁽¹⁾を行ってきた。しかし、ランガー桁橋⁽²⁾のような振動しやすい橋梁では、高次振動まで考慮する必要がある、構造系を1自由度系でモデル化することはできないと考えられる。さらに、複数の動吸振器の設置が考えられる。本研究では、橋梁の高次振動を考慮し、また、配置について考慮した最適化手法を提案する。橋梁はランガー桁橋を対象とし、最適化手法には可変計量を適用して変位応答の分散を最小にするように動吸振器のパラメータを決定した。動吸振器の最適配置も設計変数とする。

2. 運動方程式と不規則応答解析

m 個の動吸振器を取り付けたランガー桁橋上を、1自由度系でモデル化した車両が速度 V で走行する状態を図-1に示した。橋梁を骨組み構造でモデル化すると、ランガー桁橋の j 節点の鉛直変位は、

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^n \Phi_i(vt) q_i(t) \quad (1)$$

で表わすことができる。なお、 $q_i(t)$ は標準座標 $\Phi_i(x_j)$ は、振動モードである。ここでは、桁部分をフーリエ級数により内挿している。 i 次振動の基準座標は、次式となる。

$$\ddot{q}_i(t) + 2h_i \omega_i \dot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = -\frac{1}{M_i} \sum_{k=1}^m m_{dk} \Phi_i^T(b_{dk}) \ddot{d}_k(t) - \frac{m_v}{M_i} \Phi_i^T(vt) \ddot{Z}(t) \quad (2)$$

この、 ω_i 、 h_i と M_i は、橋梁の i 次の固有円振動数、減衰定数、および有効質量である。すでに、報告したように、車両、動吸振器および路面凹凸の方程式は、次式で表わされる。

$$\ddot{Z}(t) + 2h_v \omega_v (\dot{Z}(t) - \dot{y}(vt) - \dot{r}(t)) + \omega_v^2 (Z(t) - y(vt) - r(t)) = 0 \quad (3)$$

$$\ddot{d}_k(t) + 2h_{dk} \omega_{dk} (\dot{d}_k(t) - \dot{y}(b_k)) + \omega_{dk}^2 (d_k(t) - y(b_k)) = 0 \quad (4)$$

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

なお、 ω_v 、 ω_{dk} 、 h_v 、 h_{dk} は、それぞれ、車両と動吸振器の固有円振動数と減衰定数である。

$n(t)$ の特性は、文献(1)に示したものであり、図-2の路面凹凸のパワースペクトル密度を想定している。

橋梁-車両-動吸振器-路面系の状態変数を、

$$X(t) = [q_1(t), \dots, q_n(t), \dot{q}_1(t), \dots, \dot{q}_n(t), d_1(t), \dots, d_m(t), \dot{d}_1(t), \dots, \dot{d}_m(t), Z(t), \dot{Z}(t), r(t)]^T \quad (6)$$

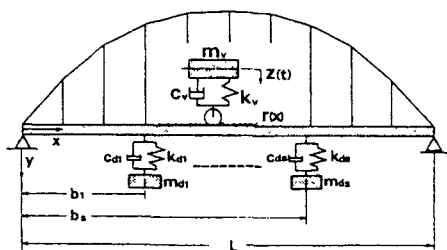


図-1 橋梁-車両-動吸振器系

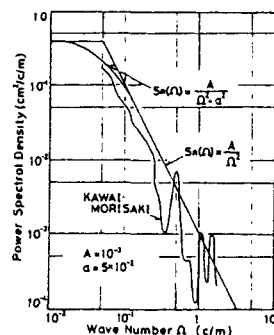


図-2 路面凹凸のパワースペクトル密度

と定義すると、この系は、次の状態方程式で表わせる。

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + N(t), \quad X(0) = X_0 \quad (7)$$

ここに、 $N(t)$ は強度 $Q(t)$ を有する白色雑音ベクトルである。応答 $X(t)$ の共分散は、

$$R_x(t) = E[X(t)X(t)^T] \quad (8)$$

で定義され、これは、共分散方程式より求まる。

$$\dot{R}_x(t) = A_x(t)R_x(t) + R_x(t)A_x^T(t) + Q_x(t) \quad (9)$$

$$R_x(0) = R_{x0}$$

で与えられる。車両を任意の位置 $x=\lambda$ に固定させ、

$t \rightarrow \infty$ とすると、(9)式は定常応答の方程式となる。

$$A_x R_x + R_x A_x^T + Q_x = 0$$

構造形の応答分散は、 $R_x(t)$ の要素として求められる。

3. 最適化問題への定式化

変位応答の共分散は、 $\sigma^2 = E[y(x, t)^2]$ を最小にする動吸振器のパラメータ、振動数、減衰定数、設置位置、

$$\beta = [\omega_{d1}, \dots, \omega_{dm}, h_{d1}, \dots, h_{dm}, b_{d1}, \dots, b_{dm}] \quad (11)$$

を求める。本研究では、これを制約条件のない非線形計画問題に定式化する。最適化手法として、可変計量法を用いた。

k 回目の探索によって求められるパラメータを β^k とする。

$\sigma^2(\beta^k)$ と $\partial(\sigma^2(\beta^k))/\partial \beta^k$ を次式で求める。

$$A_x(\beta^k) R_x^k + R_x^k A_x(\beta^k) + Q_x(\beta^k) = 0 \quad (12)$$

$$A_x(\beta^k) (\partial R_x / \partial \beta^k) + (\partial R_x / \partial \beta^k) A_x(\beta^k)^T = -\partial A_x / \partial \beta^k(\beta^k) R_x - R_x \partial A_x^T / \partial \beta^k(\beta^k) \quad (13)$$

詳細は、文献(1)に示した。

4. 数値計算と考察

数値解析は、表-2に示したランガー桁橋を対象にした。橋梁の振動特性を図-3に示した。車両は1自由度系とし、諸元は、表-2に示したものである。図-4は、着目点 $L/2$ の場合で、重量比1/50の条件で求めた動吸振器を設置した橋梁の応答の標準偏差を示したものである。定常応答理論による動吸振器の効果はあまり現れていない。非定常理論では、応答の最大値を最小にするように、動吸振器を探索するので、動吸振器の効果がよく現れていることがわかる。図-5は、着目点 $L/4$ において設計した、動吸振器を設置した、 $L/4$ 点の応答を示したものである。応答の形状は、着目点により大きく変化するが、非定常理論による動吸振器の効果を見ることができる。

図-6は、重量比による動吸振器の効果を示したものである。質量を増加させると当然のことだが動吸振器の効果は大きくなる。しかし、実際橋梁の動吸振器の重量比は、1/100程度で用いられていることが知られている。

5. おわりに

本報告では、動吸振器を1個の場合について計算を行なった。複数個設置した場合、また参照点(着目点)を複数選びどの点でも最小になる設計基準が必要である。これらの解析結果については、講演当日報告する。

〔参考文献〕(1) 岡林他：走行

車両が作用する道路橋のため動吸振器の最適設計，平成2年土木学会全国大会講演概要集

(2) 岡林他：高次振動を考慮した道路橋の単一走行車両による非定常 r. m. s 応答，1980.4土木学会論文報告集

表-1：車両の諸元

総重量	20.0 t
固有振動数	3.0 Hz
減衰定数	0.03
走行速度	10.0 m/s

表-2：橋梁の諸元

支間長	57.2 m
総重量	182.4 t
減衰定数	0.02

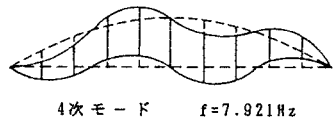
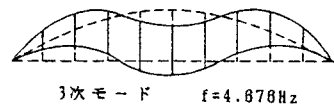
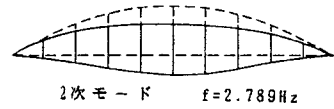
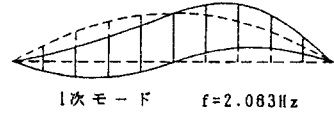


図-3 ランガー桁橋の振動特性

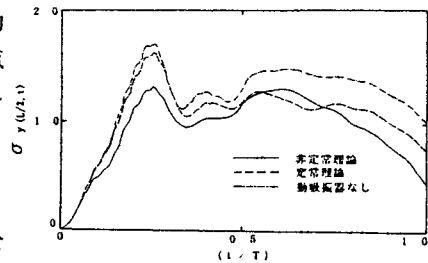


図-4 動吸振器の効果

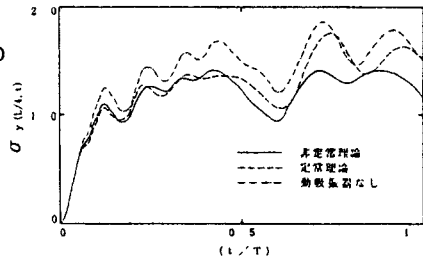


図-5 動吸振器の効果

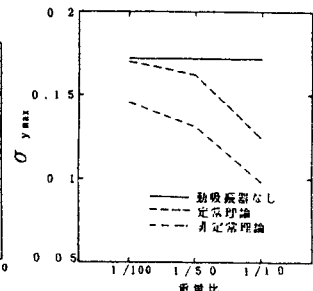


図-6 動吸振器の質量比による影響