

道路橋の交通振動制御のための動吸振器の最適配置について

長崎大学大学院○学生員 竹下 渡

長崎大学工学部 正 員 岡林隆敏

長崎大学工学部 正 員 小西保則

1. はじめに

交通荷重による道路橋の振動は、地盤振動、騒音等の環境問題や、疲労等の障害を発生させる。そこで、橋梁の振動を制御するために、道路橋に動吸振器を設置する方法が試みられている。古典的な動吸振器の最適設計の理論は、1自由度系に調和外力を作用させる仮定に基づいている。しかし、道路橋は、不規則路面凹凸を有し、さらに多自由度系の振動を考慮する必要があるため、古典的な方法を適用することはできない。

本研究では、動吸振器の最適設計の問題に可変計量法⁽¹⁾を適用し、橋梁の変位の分散が最小になるような、動吸振器の振動数、減衰定数、配置を決定する手法を提案する。橋梁は、鉸桁橋を対象とし、幅員方向の応答を考慮するために、有限帯板法⁽²⁾によるモデル化を行なった。

2. 橋梁-動吸振器-車両-路面系の運動方程式と不規則応答解析

図-1に示したように、鉸桁橋を有限帯板法⁽²⁾でモデル化する。図-2のように、 (b_i, λ_i) 点に s 個の動吸振器を設置した橋梁上を、単一車両が $x=a$ 上を走行するものとする、基準座標 $P(t)$ は、次式から求められる。

$$\ddot{P}(t) + H\dot{P}(t) + \Omega P(t) = L^{-1}(-m_0 \ddot{Z}(t) X_v^T S(a, vt)^T - \sum m_{d_i} \ddot{d}_i(t) X_{d_i}^T S(b_i, \lambda_i)^T) \quad (1)$$

ここに、 H, Ω は、橋梁の減衰行列、固有円振動数行列であり、 L, S, X_v, X_{d_i} は、質量行列を対角化した $(n \times n)$ 行列、変位関数及び車両と i 個目の動吸振器に関するモード行列である。車両と動吸振器の方程式は次式で与えられる。

$$\ddot{Z}(t) + 2h_0 \omega_0 (\dot{Z}(t) - \dot{w}(a, vt, t) - \dot{r}(t)) + \omega_0^2 (Z(t) - w(a, vt, t) - r(t)) = 0 \quad (2)$$

$$\ddot{d}_i(t) + 2h_{d_i} \omega_{d_i} (\dot{d}_i(t) - \dot{w}(b_i, \lambda_i, t)) + \omega_{d_i}^2 (d_i(t) - w(b_i, \lambda_i, t)) = 0 \quad (3)$$

ここに、 $Z(t)$ は、車両の変位であり、 h_0, ω_0 は、車両の減衰定数と固有円振動数、 $d_i(t)$ は、 i 個目の動吸振器の変位、 h_{d_i} と ω_{d_i} は、 i 個目の動吸振器の減衰定数と固有円振動数である。路面凹凸 $r(t)$ は、強度 σ^2 の白色雑音過程 $n(t)$ 入力とする確率微分方程式となる。路面凹凸のスペクトルは、図-3である。

$$\dot{r}(t) + \beta r(t) = n(t) \quad (4)$$

(1)(2)(3)(4)式で示された変数を、状態空間 $X(t)$ で表示する。

$$X(t) = [P(t)^T, \dot{P}(t)^T, d_1(t), \dots, d_s(t), \dot{d}_1(t), \dots, \dot{d}_s(t), Z(t), \dot{Z}(t), r(t)]^T \quad (5)$$

橋梁-動吸振器-車両-路面系は、次のような確率微分方程式となる。

$$dX(t) = A_X(t)X(t)dt + G_X(t)dW_X(t) \quad (6)$$

ここに、 $dW_X(t)$ は、平均値0強度 $Q_X(t)$ を有するWiener過程ベクトルである。 $X(t)$ の共分散は定義より $R_X(t) = E[X(t)X(t)^T]$ (7) で表わされる。この $R_X(t)$ の時間的変化は、次の共分散方程式により求めることができる。なお、初期条件は、 R_{X0} である。

$$\dot{R}_X(t) = A_X(t)R_X(t) + R_X(t)A_X(t)^T + G_X(t)Q_X(t)G_X(t)^T \quad (8)$$

$$R_X(t_0) = R_{X0}$$

4. 最適化手法について

変位応答の分散 $\sigma_w^2 = E[w(x, y, t)^2]$ を最小にするように、次のパラメータを決める。

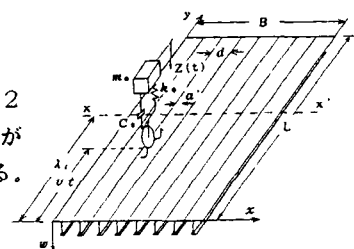


図-1. 橋梁-車両系

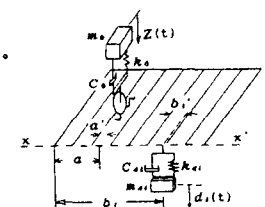


図-2. 車両-動吸振器系

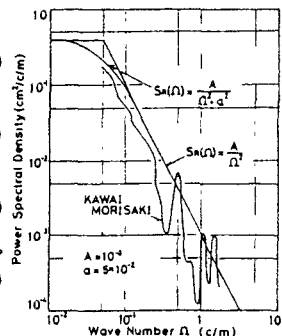


図-3. 路面スペクトル

表-1. 橋梁の諸元

総重量	1003.5ton
支間長	39.20m
幅員	23.85m

$$\alpha_k = [h_{d1}, \omega_{d1}, b_1, \lambda_1, \dots, h_{ds}, \omega_{ds}, b_s, \lambda_s] \quad (9) \quad \text{表-2. 車両の諸元}$$

最適化手法として、可変計量法⁽¹⁾を用いる。k回目の探索により求められるパラメータを α_k とすると $\partial \sigma_w^2(\alpha_k)/\partial \alpha_k$ は、次式で求められる。

$$\dot{C}_x = A_x(\alpha_k) C_x + C_x A_x(\alpha_k)^T + B_x(\alpha_k) R_x + R_x B_x(\alpha_k)^T \quad (10)$$

ここに、 $C_x = \partial R_x / \partial \alpha_k$, $B_x = \partial A_x / \partial \alpha_k$ である。

表-3. 橋梁の振動特性(h=0.02)

	1次	2次	3次	4次	5次
固有振動数(Hz)	2.56	2.83	3.87	7.06	10.13

k回目の探索方向 d_k を次式で決定する。

$$g_k = \nabla \sigma_w^2(\alpha_k), \quad d_k = -H_k g_k \quad (11)$$

H_k の更新式としてDavidon-Fletcher-Powell公式⁽¹⁾を適用する。本論文では、動吸振器のパラメータだけでなく、設置位置を設計変数として最適配置を探索させるようにしている。

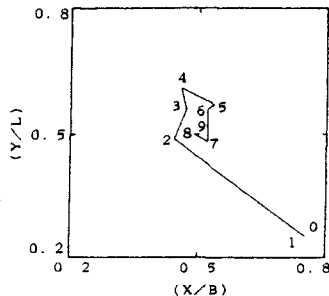


図-4. 配置の収束状況

5. 数値解析と考察

数値解析の対象とした橋梁の諸元を表-1に示した。さらに、車両の諸元と橋梁の振動特性を表-2, 表-3に示した。数値計算は、車両の走行速度を $v=10$ (m/s)、橋梁に対する動吸振器の重量比を1/50、動吸振器を1個設置したものとして行なった。なお、以下で示すCASE1~4は、車両の走行位置と橋梁の応答の着目点の組み合わせである。車両が幅員中央を走行し着目点が幅員中央をCASE1、端点のものがCASE2、幅員のL/4を走行し、着目点が幅員中央をCASE3、端点のものがCASE4である。

図-4は、CASE1の場合における動吸振器の配置位置の収束状況を示したものである。横軸は、幅員長で基準化した横断方向の位置を示し、縦軸は、支間長で基準化した橋軸方向の位置を示している。図では、初期値を最適値から遠いところに設定したにもかかわらず9回ほどで収束している。

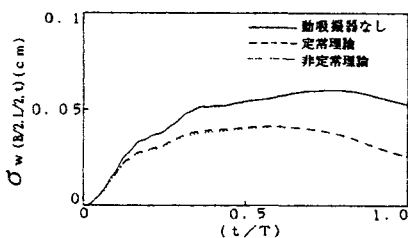


図-5. 非定常応答(CASE 1)

図-5, 6は、CASE1とCASE2の場合の非定常応答である。非定常最大応答を最小にするような動吸振器を設置した場合と定常応答を最小にするような動吸振器を設置した場合の応答の比較を行なった。ここでいう定常応答とは、車両を橋梁上の定点に固定し路面凹凸による加振力を橋梁に加え橋梁-車両-動吸振器系が定常になった場合の応答である。非定常理論による応答と、定常理論による応答はCASE1, 2共に良く一致している。

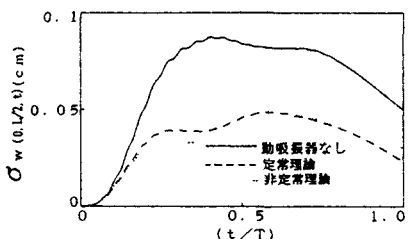


図-6. 非定常応答(CASE 2)

図-7と図-8は、CASE1~4における最適振動数と減衰定数を示したもので、非定常理論と定常理論との比較を行なったものである。

両理論間に若干の差はあるが振動数と減衰定数は一致している。以上より非定常性の弱い橋梁に対しては、定常理論により動吸振器の設計が十分行なえることがわかる。

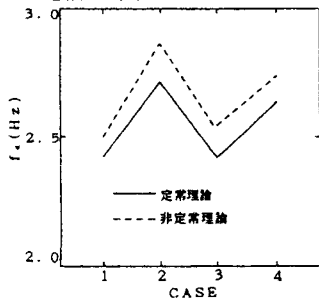


図-7. 最適振動数

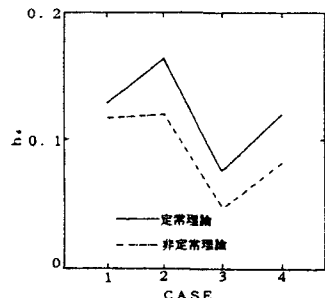


図-8. 最適減衰定数

(参考文献) (1) 岡林他: 走行車両が作用する道路橋のための動吸振器の最適設計, H2. 土木学会全国大会講演概要集

(2) 岡林他: 走行車両による高速道路高架橋の不規則応答解析, H2. 土木学会全国大会講演概要集