

八千代エンジニアリング(株) 正員 片山善郎
長崎大学工学部 正員 岡林隆敏

1. はじめに

交通荷重による道路橋の振動は、橋梁周辺に振動による環境問題を発生させている。この対策の一つとして、振動の原因となる橋梁の振動を制御するために、動吸振器を設置する試みがなされている。著者らは、不規則な橋梁の振動を抑えるための最適動吸振器の設計方法を提案⁽¹⁾した。道路橋の振動では、作用する車両の特性が変化し、また動吸振器を現場で最適調整することは困難な場合が多いと考えられる。そこで、本研究では、動吸振器を基本にして、さらにアクティブな制御を加えるハイブリッド動吸振器(HDD)の有効性について検討した。本研究では、白色雑音が作用する橋梁と、1自由度系でモデル化された走行車両による道路橋にHDDを設置した場合の効果について検討した。

2. 橋梁-HDD系の方程式

HDDの構造を図-1に示した。 m_1+m_2 が動吸振器のダンパーマスであり、 m_2 がアクチュエータによりアクティブに可動する。橋梁とダンパーマス m_1 の変位と速度を、アクチュエータにフィードバックさせている。図-2に、白色雑音外力と車両が走行する道路橋の状態を示した。a点に外力が作用し、b点に動吸振器を設置した場合、x点の橋梁の変位応答は、

$$y(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \phi_k(x) q_k(t)$$

で与えられる。ここに、 $\phi_k(x)$ はk次の振動モード、 $q_k(t)$ は、次式で与えられる基準座標である。

$$\ddot{q}_k(t) + 2h_k \omega_k \dot{q}_k(t) + \omega_k^2 q_k(t) = -\mu_{1k} \phi_k(b) \ddot{d}(t) + \phi_k(a) f(t) / M_k \quad (k=1, n) \quad (2)$$

ここに、 ω_k, h_k, M_k はk次の固有円振動数、減衰定数および有効質量である。 $d(t)$ はダンパーマス m_1 の加速度、 $f(t)$ は道路橋に作用する外力である。走行車両の場合は、 $a=vt$ となる。動吸振器の方程式は、

$$\ddot{d}(t) + 2h_d \omega_d (\dot{d}(t) - \dot{y}(x, t)) + \omega_d^2 (d(t) - y(x, t)) = -\mu_3 u(t) \quad (3)$$

となる。ここで、 $u(t)$ は m_2 の移動により発生する制御力である。 ω_d, h_d, μ_3 は、動吸振器の固有円振動数、減衰定数、 $m_2/(m_1+m_2)$ の質量比である。車両走行の場合は、車両の方程式と路面凹凸の式⁽¹⁾が追加される。

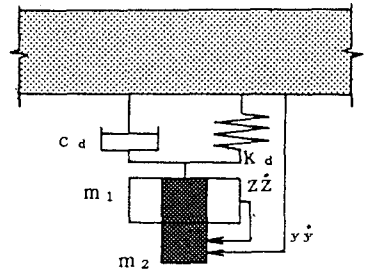
3. 不規則応答と制御則

橋梁1次振動のみを考慮した、橋梁-車両-動吸振器-路面系の状態変数、次式で与えられる。

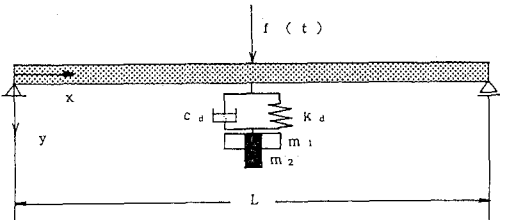
$$\dot{X}(t) = [q_1 \dot{q}_1 d \dot{d} z \dot{z} r]^T \quad (4)$$

ここに、 z と r は車両変位と路面凹凸である。この状態変数により、系は次式で表される。

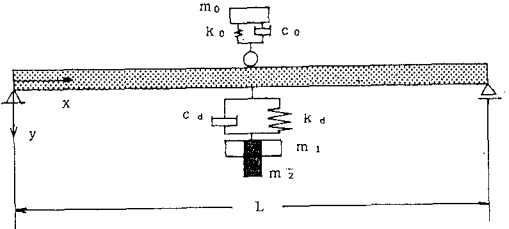
$$\dot{X}(t) = \mathbf{A}X(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{D}(t)n(t) \quad (5)$$



(1) 図-1 ハイブリッド動吸振器の構造



a) 不規則外力が作用する道路橋



b) 走行車両が作用する道路橋

図-2 橋梁-HDD橋

表-1 橋梁、車両および路面凹凸の特性

	重量	振動数	減衰定数	支間長
橋梁	106.6(t)	2.94(Hz)	0.02	40(m)
車両	20.0(t)	3.00(Hz)	0.03	
路面凹凸のスペクトル	$S(\Omega) = A/\Omega^2 + a^2, A=0.001, a=0.05$			

$n(t)$ は、平均値0強度 σ を有する白色雑音過程である。

走行車両による橋梁の振動制御では、車両と路面凹凸の変数は観測できない。そこで、観測量を

$$Y(t) = [q_1 \dot{q}_1 d \dot{d}]^T \quad (6)$$

に限定した場合の準最適化を考える。観測量 $Y(t)$ は、

$$Y(t) = CX(t) \quad (7)$$

と表すことができる。ここでは最小ノルム法⁽²⁾によりフィードバックゲインマトリックスを求める。この場合、制御力は、

$$u(t) = -r^{-1}P(t)C^T(CC^T)^{-1}Y(t) \quad (8)$$

となる。ここに、 $P(t)$ は、次のRiccati方程式より得られる。

$$A^T P(t) + P(t)A - P(t)B r^{-1} B^T P(t) + Q = 0 \quad (9)$$

このような制御力が作用する。橋梁の制振の効果を橋梁の変位応答の共分散により評価する。応答の共分散 $R(t) = E[X(t)X(t)^T]$ は、共分散方程式より求められる。

$$\dot{R}(t) = A^*(t)R(t) + R(t)A^*(t) + D(t)D(t)^T \sigma^2 \quad (10)$$

ここに、 $A^*(t)$ は、(8)式を組み込んだ場合の、状態方程式の係数行列である。

4. 数値計算と考察

図-3、図-4は、白色雑音が作用した場合の、支間中点の変位応答の標準偏差を示したものである。動吸振器のパラメータを最適調整した場合⁽³⁾と、動吸振器の振動数と減衰定数を橋梁のそれらに一致させた場合について計算した。橋梁と動吸振器の質量比は1/50であり、動吸振器質量 m_1 と駆動部 m_2 の質量比は1/2としている。計算結果は、橋梁が静止している状態から、定常状態になる過渡応答を示した。動吸振器が最適調整されていない場合でも、アクティブ制御のための制御力を大きくすると、効果的な制振の結果が示されている。

図-5、図-6は、車両が $v=10$ (m/sec)で不規則路面凹凸上で走行した場合の、支間中点の非定常変位応答の標準偏差を示したものである。図中にある、動吸振器設置は、著者らが報告⁽²⁾した、最適調整されたものを設置した場合である。アクティブ制御の場合の動吸振器の振動数と減衰定数は、橋梁のそれらのものを一致させている。 r が大きくて、アクティブな制御力が小さい場合は、最適調整された動吸振器を設置したものより、HDDの方が効果が現われていない。 r を小さくして、アクティブな制御力を大きくすると、HDDの効果が現われることが図より分かる。

5. まとめ

HDDの効果を示すことができたが、パッシブな力とアクティブな力の比について今後検討する必要がある。

[参考文献] (1)岡林他、構造工学論文集、Vol.38A、PP.805~813、1992年。(2)榎木他、確率システム制御の基礎、日新出版、1975年、(3)G.B.Warburton, Earthquake Eng. and Struc. Dyna., Vol.10, 1982

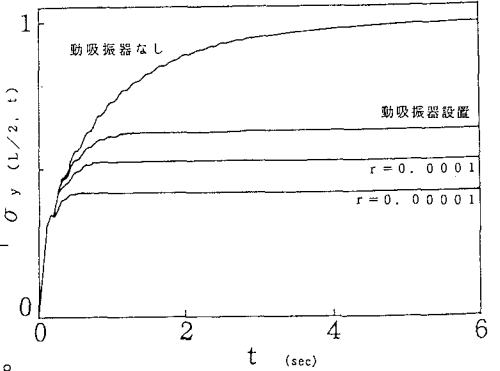


図-3 最適調整した動吸振器の場合

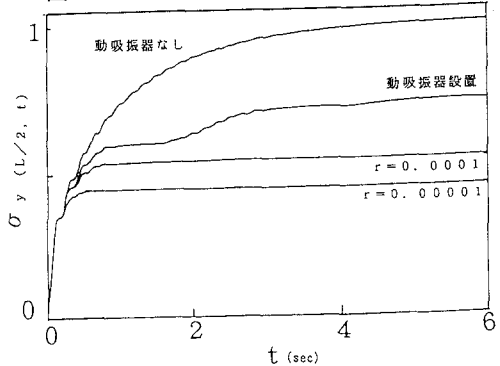


図-4 最適調整されていない動吸振器の場合

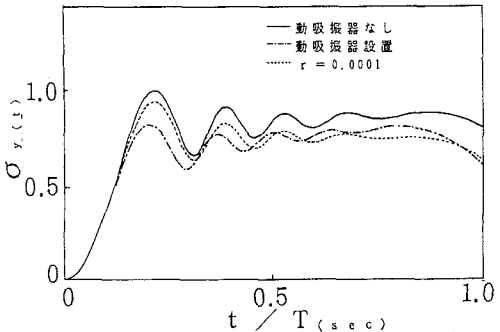


図-5 HDDの効果, $r = 1.0^{-4}$

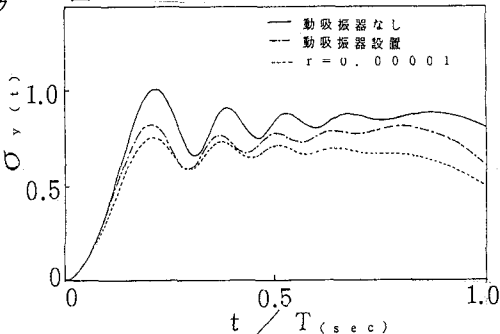


図-6 HDDの効果, $r = 1.0^{-5}$