

川田テクノシステム(株) 学生員○ 趙 清
長崎大学工学部 正 員 岡林 隆敏
長崎大学大学院 学生員 加賀 敏明

1. はじめに

都市高速道路では、交通荷重による地盤振動が発生し、その振動の制御が課題⁽¹⁾⁽²⁾となっている。その対策として、動吸振器、桁端ダンパー、アクティブ振動制御装置などの振動制御装置を橋梁に設置し、橋梁の支点反力を抑え地盤振動を制御する技術が適用されている。本研究では、これらの振動制御装置の効果について検討したものである。

2. 橋梁-車両-振動制御装置-路面系の方程式

図-1で示すように、橋梁にばね質点系でモデル化された単一車両が一定速度 v で走行するような場合を考えると、制御系の基礎方程式は次式で表すことができる。

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

$$\ddot{q}_k(t) + 2h_k \omega_k \dot{q}_k(t) + \omega_k^2 q_k(t) = -\mu_{k1} \phi_k(vt) \ddot{z}(t) + f_k(t) \quad (2)$$

$$\ddot{z}(t) + 2h_0 \omega_0 \{\dot{z}(t) - y(vt, t) - \dot{r}(t)\} + \omega_0^2 \{z(t) - y(vt, t) - r(t)\} = 0 \quad (3)$$

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

ここで、 $\phi_k(x)$: 振動モード、 $q_k(t)$: 基準座標、 $z(t)$: 車両の変位、 $n(t)$: 路面凹凸、 $\omega_k, \omega_0, h_k, h_0$: 橋梁、車両の固有振動数と減衰定数、 μ_{k1} : 橋梁の次の有効質量と車両の質量比、 $f_k(t)$: 各振動制御装置の制御力、である。また、路面凹凸は図-2のパワースペクトル密度に基づいて、強度 σ^2 を有する白色雑音 $n(t)$ を入力するものとする。このとき、 $\beta = 2\pi\nu a$ 、 $\sigma^2 = 4\pi^2\nu A$ 、 $a = 0.05$ 、 $A = 0.0027(\text{cm}^2/\text{m})$ 、である。

次に、橋梁の基準座標、車両の変位、路面凹凸をそれぞれ、 $\mathbf{q}(t) = [q_1(t) \cdots q_n(t)]^T$ 、 $\dot{\mathbf{q}}(t) = [\dot{q}_1(t) \cdots \dot{q}_n(t)]^T$ 、 $\mathbf{z}(t) = [z(t) \dot{z}(t) r(t)]^T$ 、で定義すると、制御系の基礎方程式は次のように状態空間表示することができる。

$$\mathbf{X}(t) = [\mathbf{q}(t) \dot{\mathbf{q}}(t) \mathbf{z}(t)]^T \quad (5)$$

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}(t)n(t), \mathbf{X}(t_0) = \mathbf{X}_0 \quad (6)$$

次に、 $\mathbf{X}(t)$ の共分散を $\mathbf{R}_X(t) = E[\mathbf{X}(t)\mathbf{X}(t)^T]$ で定義すると、(6)式に対応する共分散方程式は、次式で表すことができる。

$$\dot{\mathbf{R}}_X(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{R}_X(t) + \mathbf{R}_X(t)\mathbf{A}(t) + \Sigma(t), \mathbf{R}_X(t_0) = \mathbf{R}_0 \quad (7)$$

3. 各振動制御装置

図-3で示すように、各振動制御装置を橋梁に設置すると制御力は、それぞれ次のように表すことができる。

(1) 動吸振器の場合

$$f_k(t) = -\mu_{k2} \phi_k(a) \ddot{d}(t) \\ \ddot{d}(t) + 2h_d \omega_d \{\dot{d}(t) - \dot{y}(a, t)\} + \omega_d^2 \{d(t) - y(a, t)\} = 0$$

(2) 桁端ダンパーの場合

$$f_k(t) = -\frac{2c_d}{m_k L} \{\dot{y}(L_1, t) \phi_k(L_1) + \dot{y}(L_2, t) \phi_k(L_2)\}$$

(3) アクティブ振動制御装置

$$f_k(t) = -\frac{1}{m_k} \phi_k(a) u(t) \quad (11)$$

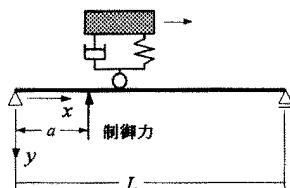


図-1 制御系

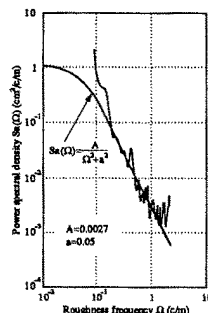
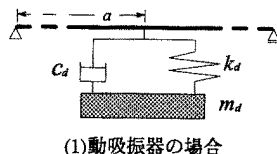
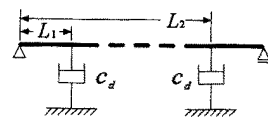


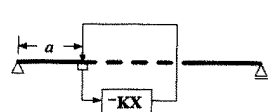
図-2 パワースペクトル密度



(1) 動吸振器の場合



(2) 桁端ダンパーの場合



(10) (3) アクティブ振動制御装置の場合

図-3 各振動制御装置のモデル化

4. 各振動制御装置の最適設計

(1) 動吸振器・桁端ダンパーの場合

- ① 設計変数に初期値を与える
- ② 係数マトリクス $A(t)$ の作成
- ③ 共分散方程式の連立微分方程式を解く
- ④ $E[Q_y(x, t)^2]$ が最小になるまで計算を繰り返す
- ⑤ $E[Q_y(x, t)^2] \rightarrow \min$ のときの設計変数が最適値

5. 各振動制御装置の制御効果

図-4, 5 非制御の場合と各振動制御装置を橋梁に設置した場合の、橋梁支間中点の変位応答の標準偏差、及び橋梁両端の支点反力応答の標準偏差を示したものである。それぞれの軸の単位は、時間(s)、変位(cm)、反力(kg)である。

動吸振器を設置する場合は、動吸振器の質量比を橋梁の $1/3$ とし、固有振動数と減衰定数を最適設計の設計変数とした。

桁端ダンパーを設置する場合は、ダンパーの取り付け位置を $L_1/L = 1/10$ とし、ダンパーの粘性減衰定数を最適設計のパラメータとした。

アクティブ振動制御装置を設置する場合は、制御力が桁端ダンパーの値に近くなるように重み行列を設定した。

図-4から、各振動制御装置の制御効果とともかなりの制御効果が確認できる。

図-5から、動吸振器の制御効果が桁端ダンパーとアクティブ振動制御装置の制御効果よりも小さいことが確認できる。

6. まとめ

橋梁の振動を制御するために、動吸振器、桁端ダンパー、アクティブ振動制御装置を橋梁に設置し、その制御効果を調べた。

制御効果に関しては、アクティブ振動制御装置、桁端ダンパー、動吸振器という順で効果がある。

次に、各振動制御装置の実現可能性に関しては、動吸振器、桁端ダンパー、アクティブ振動制御装置の順で可能性がある。

これらのことを考慮することにより、現実的に有効な制御装置を検討したい。

[参考文献] (1)比江島、藤野：土木学会論文集、No.465/I-23, pp.107~116, 1993.4 (2)岡林、竹下：構造工学論文集、Vol.39A, pp.671~680, 1993.3

(2) アクティブ振動制御装置の場合

- ① 最適レギュレータ理論を用いる
- ② 重み行列 Q, R に値を与える
- ③ Riccati 方程式の連立微分方程式を解く
- ④ フィードバックゲイン $K = R^{-1}C^T P$ を求める
- ⑤ このときの制御入力 $U = -KX$ が最適制御入力

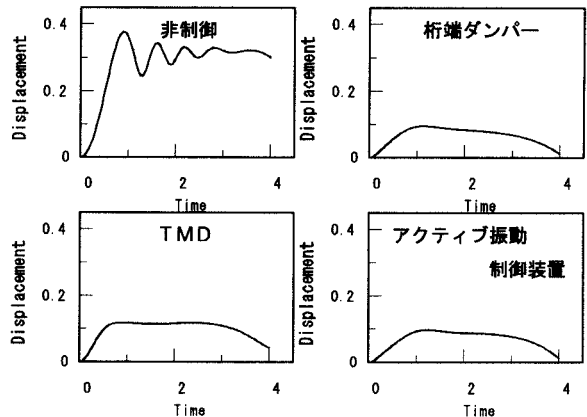


図-4 橋梁支間中点の変位応答の標準偏差

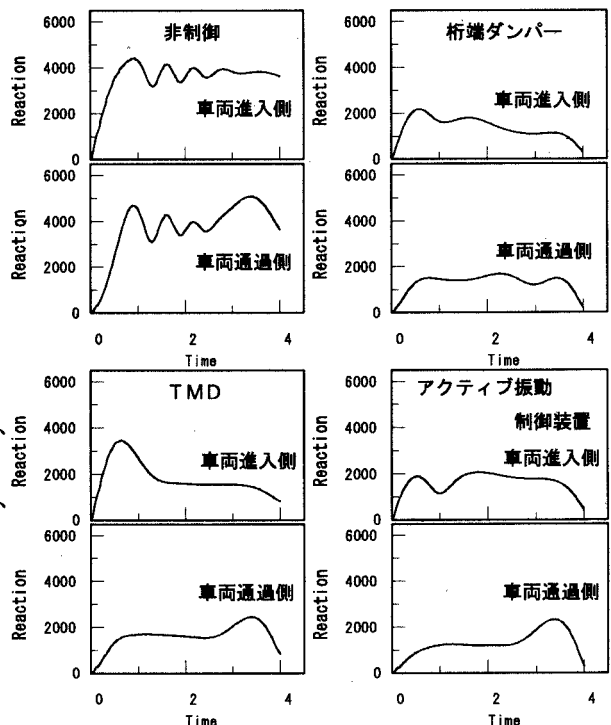


図-5 橋梁両端の支点反力応答の標準偏差