

道路橋振動の支点反力最小化規準による振動制御

長崎大学工学部 学生員○ 趙 清
長崎大学工学部 正 員 岡林 隆敏

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、TMD(動吸振器)、桁端ダンパー、アクティブ制御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 - 路面系と各種制御方法

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、応答は次式で記述することができる。

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

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

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

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、 $r(t)$: 路面凹凸、 $\omega_k, \omega_0, h_k, h_0$: 橋梁及び車両の固有振動数と減衰定数、 μ_{k1} : 橋梁の k 次の有効質量と車両の質量比、 $f_k(t)$: 制御力、である。

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 $n(t)$ を入力する路面系でモデル化する。

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

ここで $\beta = 2\pi\nu a$, $\sigma^2 = 4\pi^2\nu A$, $a = 0.05$, $A = 0.027(\text{cm}^2/\text{m})$ 、である。

橋梁の4次振動まで考慮して、基準座標、車両の変位、及び路面凹凸をそれぞれ $\mathbf{q}(t) = [q_1(t) \ q_2(t) \ q_3(t) \ q_4(t)]^T$, $\mathbf{z}(t) = [z(t) \ \dot{z}(t) \ r(t)]^T$ で定義すると、(1),(2),(3),(4)式は次のように状態空間表示することができる。

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

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

ここで $\mathbf{X}(t)$ 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。

$$\dot{\mathbf{R}}_x(t) = \mathbf{A}_x(t)\mathbf{R}_x(t) + \mathbf{R}_x(t)\mathbf{A}_x(t)^T + \mathbf{Q}_x(t), \mathbf{R}_x(t_0) = \mathbf{R}_0 \quad (7)$$

本研究では、橋梁の支点反力が最小になるように、次に示すそれぞれの振動制御装置のパラメーターを決定する。

3. 各種振動制御装置

図-3で示すように、各種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。

a) TMD(動吸振器)の場合

$$f_k(t) = -\mu_{k2} \phi_k(a) \ddot{d}(t) \quad (8)$$

$$\ddot{d}(t) + 2h_d \omega_d \{ \dot{d}(t) - \dot{y}(a, t) \} + \omega_d^2 \{ d(t) - y(a, t) \} = 0 \quad (9)$$

b) 桁端ダンパーの場合

$$f_k(t) = -\frac{2c}{mL} \{ \dot{y}(L_1, t) \phi_k(L_1) + \dot{y}(L_2, t) \phi_k(L_2) \} \quad (10)$$

c) アクティブ制御の場合

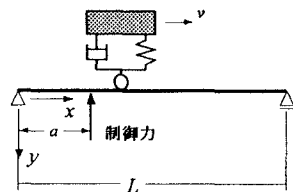


図-1 橋梁 - 車両 - 制御

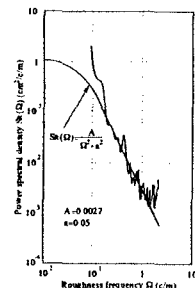
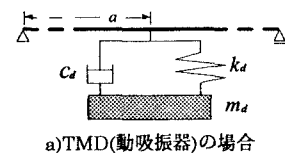
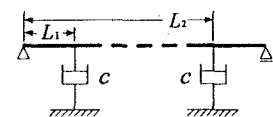


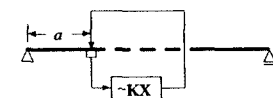
図-2 パワースペクトル密度



a) TMD(動吸振器)の場合



b) 桁端ダンパーの場合



c) アクティブ制御の場合

図-3 振動制御装置

$$f_k(t) = -\frac{1}{m} \phi_k(a) K X(t) \quad (11)$$

ここで、 ω_d, h_d : TMD の固有振動数と減衰定数、 μ_{k2} : 橋梁の k 次の有効質量と TMD の質量比、 c : ダンパーの粘性減衰係数、 K : フィードバックゲインベクトル、である。

4. 各種振動制御装置の効果

図 - 4, 5, 6, 7 は、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、橋梁の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の標準偏差を示したものである。なお、橋梁の応答は、4 次振動まで考慮して計算したものである。

TMD (動吸振器) の場合は、TMD の質量比を 1/10、TMD の固有振動数及び減衰定数をパラメーターとした。桁端ダンパーの場合は、桁端ダンパーの粘性減衰定数及び取り付け位置をパラメーターとした。アクティブ制御の場合は、検出器を橋長の 1/4 の位置に取り付け、制御力が桁端ダンパーの制御力に近い値を取るよう制御力の重み係数 R を設定した。このような条件で最適設計を行い各振動制御装置の有効性を検討した。

図のように各振動制御装置によって効果が異なっている。TMD の場合では、質量比を実用的な限界である 1/10 とした場合でも、支点反力は低下していない。各制御装置を設置した場合、支点反力の応答波形が異なっていることがわかる。各制御装置により、振動を低減させる機構が若干異なっているために、これらの機構についてさらに検討する必要がある。

5. まとめ

橋梁の振動制御のために、TMD(動吸振器)、桁端ダンパー、アクティブ制御を用いて制御効果を調べた。その結果、橋梁の振動に対して桁端ダンパーは TMD よりも良好な制御効果が得られた。しかし桁端ダンパーについては、ダンパー自身は剛性を持たないものと考えていること、支点反力としては鉛直成分のみしか対象としていないこと、及び単純桁である橋梁をはりとして扱っていることなど、問題を極めて単純化して扱っている。また

アクティブ制御については、優れた制御効果が得られたが、設備、費用、維持管理など他に解決すべき問題があると思われる。これらの問題をより緻密に考え制御効果の再検討が必要と考えている。

[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

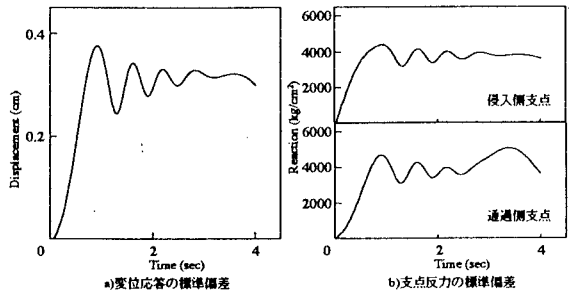


図 - 4 非制御の場合

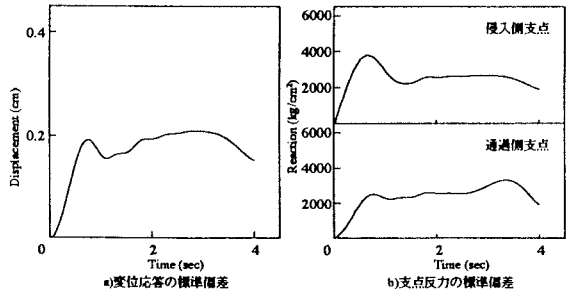


図 - 5 TMD の場合

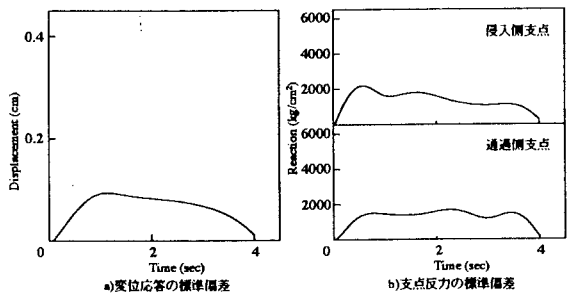


図 - 6 桁端ダンパーの場合

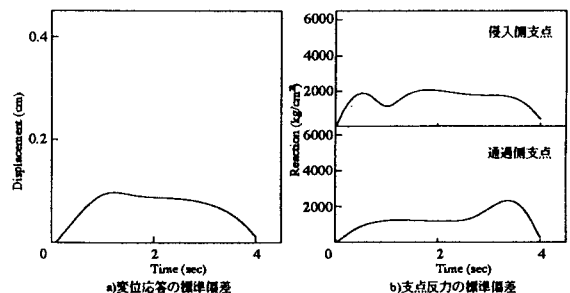


図 - 7 アクティブ制御の場合