

瞬時最適化制御則による道路橋交通振動のアクティブ制御

長崎大学大学院 学生員 〇尾口 慎也

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

近年、高速道路周辺で交通荷重による環境振動が深刻な問題となっている。そのため、道路橋に発生する振動制御¹⁾²⁾が必要になる場合が考えられる。本研究では、道路橋に単一車両が走行する場合において、最適レギュレータ理論と瞬時最適化理論³⁾をアクティブ制御とハイブリッド制御に適用し、橋梁の振動制御について検討したものである。本論文では、これらの制御の有効性について報告する。

2. 橋梁-車両-路面系の方程式

図-1に示すように、 $x=a$ 点にアクチュエータが設置された橋梁に、ばね質点系でモデル化された単一車両が、一定速度 v で走行する場合を考える。 x 点の変位応答は、基準座標 $q_s(t)$ と振動モード $\phi_s(x)$ により

$$y(x,t) = \sum_{s=1}^n \phi_s(x) q_s(t) \quad (1)$$

で与えられる。橋梁の基準座標と車両および動吸振器の運動方程式は、次式で表される。

$$\ddot{q}_s(t) + 2h_s \omega_s \dot{q}_s(t) + \omega_s^2 q_s(t) = -\mu_n \phi_s(vt) \ddot{z}(t) - \mu_n \phi_s(a) \ddot{d}(t) \quad (2)$$

$$\ddot{z}(t) + 2h_o \omega_o (\dot{z}(t) - \dot{y}(x,t) - \dot{r}(t)) + \omega_o^2 (z(t) - y(x,t) - r(t)) = 0 \quad (3)$$

$$\ddot{d}(t) + 2h_d \omega_d (\dot{d}(t) - \dot{y}(a,t)) + \omega_d^2 (d(t) - y(a,t)) = u(t)/m_d \quad (4)$$

ここに、 $\phi_s(x)$: s 次振動モード、 $q_s(t)$: s 次基準座標、 $z(t)$: 車両の変位、 $d(t)$: 動吸振器の変位、 $\omega_s, \omega_o, \omega_d, h_s, h_o, h_d$: それぞれ橋梁、車両および動吸振器の固有振動数と減衰定数、 μ_n : 橋梁の s 次の有効質量と車両質量比、 μ_n : 橋梁の s 次の有効質量と動吸振器質量比、 $r(t)$: 路面凹凸、 $u(t)$: 制御力である。これらより、(1)(2)(3)(4)式の状態空間表示は次式となる。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t) &= [q_s(t) \quad \dot{q}_s(t) \quad d(t) \quad \dot{d}(t) \quad z(t) \quad \dot{z}(t)]^T \\ \mathbf{r}(t) &= [r(t) \quad \dot{r}(t)]^T \end{aligned} \quad (5)$$

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{D}(t)\mathbf{r}(t) \quad (6)$$

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \quad (6)$$

3. 最適化制御則

1) 最適レギュレータ制御則

全状態量がフィードバックできるとして、制御力を次式で表わす。

$$u(t) = -\mathbf{K}(t)\mathbf{x}(t) \quad (7)$$

非定常の場合フィードバックゲイン行列は、次のリカッチ方程式で計算できる。

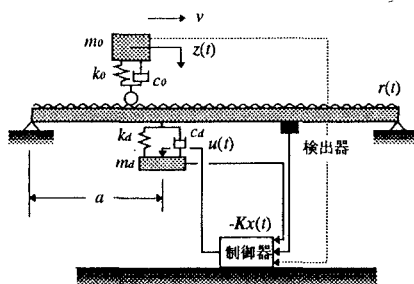


図-1 橋梁-車両-動吸振器-路面系

$$\begin{aligned} \mathbf{K}(T-\tau) &= \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}(T-\tau) \\ -\frac{d}{d\tau} \mathbf{P}(\tau) &= \mathbf{P}(\tau) \mathbf{A}(\tau) + \mathbf{A}(\tau)^T \mathbf{P}(\tau) \\ &\quad - \mathbf{P}(\tau) \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}(\tau) + \mathbf{Q} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\mathbf{P}(T) = 0 \quad (9)$$

定常の場合、(9)式は $\tau \rightarrow \infty$ となり、連立方程式になる。

2) 瞬間最適化制御則

(6)式を、差分化し制御則の導入にラグランジェの未定乗数法を用いることにより、フィードバック制御は次式で実現できる。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_k &= (\mathbf{I} + \mathbf{P}_{k+1} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}_{k+1}^T \mathbf{Q})^{-1} \\ &\quad \times (\mathbf{T}(k-\mathbf{I}) + \mathbf{P}_{k+1} \mathbf{D}_1 \mathbf{r}_k) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\mathbf{u}_k = -\mathbf{K}_k \mathbf{x}_k \quad (11)$$

4. 各制御則による制御効果についての考察

1) 動吸振器を付加しない場合の制御効果

図-2に、定常最適レギュレータ制御理論、非定常最適レギュレータ制御理論および瞬時最適化制御理論による制御を適用した場合の応答を示した。図-

3は対応する制御則による制御力である。数値シミュレーションの結果、図-2のように、3つの制御則とも応答のレベルは低下しており、制御が有効であることが分かる。3種の制御則による制御効果を比較すると、これらの間には大きな差は認められない。

2) ATMD制御を適用した場合の制御効果

ハイブリッド制御を実施した場合の、制御の有効性について検討した。

図-4に定常最適レギュレータ制御理論、非定常最適レギュレータ制御理論および瞬時最適化制御理論をハイブリッド制御に適用した場合の橋梁の支間中点における変位応答を示した。非制御の場合を点線、動吸振器のみのパッシブ制御の場合を破線で、ハイブリッド制御の場合が実線である。図-5にはそれぞれの制御則に対応する制御力を示した。数値シミュレーションの結果、次のような結果が得られた。瞬時最適化制御理論を適用した場合が、最適レギュレータ制御理論よりも良い制御効果が認められた。

直接アクティブ制御を行った場合とハイブリッド制御を行った場合の制御効果を制御力を同じ程度にして比較した。図-2と図-4の比較から分かるように、この結果、ハイブリッド制御の方が有効であることが確認できた。

5. まとめ

道路橋の振動制御のために、定常最適レギュレータ制御、非定常最適レギュレータ制御、瞬時最適化制御の3種の制御則を適用して制御効果を検討した。ここで解析の対象にしたモデルは、車両が1自由度系、

橋梁は三次振動までである。より現実的なモデルを規定した検討を行いたい。

【参考文献】

- 1) 梶川・沖野、他：動吸振器による高架橋の振動軽減対策，構造工学論文集，No.365/I-3，pp.435-444，1985.4.
- 2) 矢作・吉田：高架橋における交通振動のアクティブコントロール，土木学会論文集，No.365/I-3，pp.435-444，1985.4.
- 3) J.N.Yang, A.Akbarpour and P.Ghaemmagham: New Optimal Control Algorithms for Structural Control, ASCE, Vol.113, No.9, pp.1369-1386, Sept, 1987.

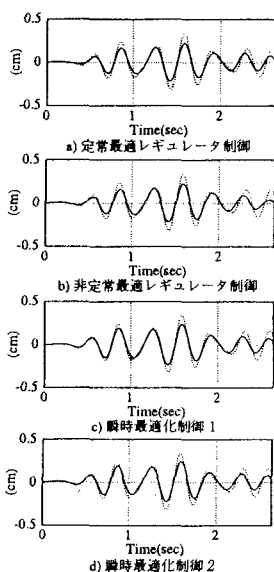


図-2 各制御則による橋梁変位応答

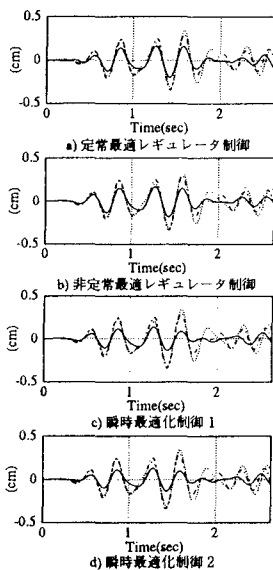


図-4 各制御則による橋梁変位応答(ATMD)

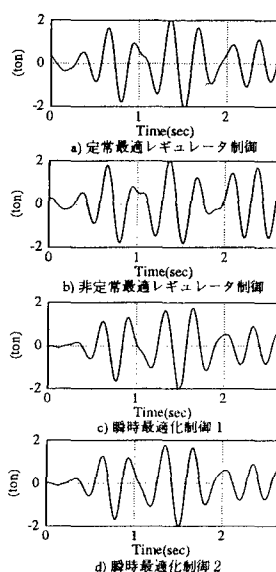


図-3 各制御則による制御力

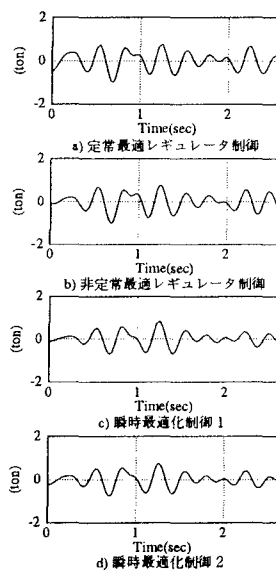


図-5 各制御則による制御力(ATMD)