

スライディングモード理論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 ○加賀敏明

長崎大学工学部 正 員 岡林隆敏

1. はじめに

スライディングモード理論は、制御力が不連続に変化する可変構造制御理論で、この制御力の利用と位相平面での切換線の指定により、応答をこの線上にスライドさせる理論である。このため制御工学の分野では、 H^∞ 理論などと共に現在最も注目されているもののひとつであり、建築構造物をはじめ、工作機械、弾性ロータリー、宇宙ロボット等に理論的適用がなされてきた⁽¹⁾。本研究では、車両が走行した場合の橋梁振動のアクティブ制御および、ハイブリッド制御にスライディングモード理論を適用した。ここでは、その有効性を検討したので報告する。

2. 橋梁-車両系のハイブリッド制御とアクティブ制御

橋梁-車両系のハイブリッド制御は、図-1のモデルで考える。路面凹凸を含む橋梁上を1自由度でモデル化された車両が走行するときの橋梁、動吸振器および車両の方程式は、

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

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

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

$$\ddot{z}(t) + 2h_0 \omega_0 \dot{z}(t) + \omega_0^2 \{z(t) - y(vt, t) - r(t)\} + \omega_0^2 \{z(t) - y(vt, t) - r(t)\} = 0 \quad (4)$$

ここで、 $y(x, t)$ ： x 点の橋梁の変位応答、 $\phi_k(x)$ ： k 次の振動モード、 $q_k(t)$ ： k 次の基準座標、 $d(t)$ ：動吸振器の変位、 $z(t)$ ：車両の垂直変位、 $\omega_k, \omega_d, \omega_0, h_k, h_d, h_0$ ：それぞれ、橋梁、動吸振器および車両の固有振動数と減衰定数、 μ_{kd}, μ_{kz} ：橋梁の k 次の有効質量 m_k に対する動吸振器の質量 m_d および車両の質量 m_0 との質量比、 $r(t)$ ：路面凹凸、 v ：車両の速度、 $u(t)$ ：制御力である。動吸振器のパラメータ設計は H_2 ノルム法⁽²⁾を用いる。橋梁を3次振動まで考慮し、以下のような状態量を導入すると、

$$q(t) = [q_1 \ q_2 \ q_3]^T, \quad x(t) = [q(t)^T \ \dot{q}(t)^T \ d(t) \ \dot{d}(t) \ z(t) \ \dot{z}(t)]^T \quad (5)$$

(2)(3)(4)式は、次の状態方程式で記述することができる。

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

また、アクティブ制御は図-1のモデルで動吸振器をはずした場合で考える。式については(2)(3)(4)式の(3)式がなくなり、(2)式、右辺の動吸振器の項の代わりに有効制御力 $\phi_k(a)u(t)/m_k$ が加わる。

3. スライディングモード理論

(6)式に対し、スライディングモード理論を適用する。この理論の特徴である制御力の切り替えを行うさいの条件を与える切換関数 δ は、 $x = x(t)$ と置き換えると、 $\delta = Sx$ である。この式のベクトル S は、(6)式の $A(t), B(t)$ を車両が橋梁の midpoint に達した時の A, B を用い、リカッチ方程式の解 P より次式のように求まる。

$$A^T P + PA + Q - PBR^{-1}B^T P = 0, \quad S = B^T P \quad (7)$$

次に、スライディングモードを実現するための条件は、切換関数 δ に対するリアプノフ関数 V を定義し、これより求められる $\dot{V}$ が負の値となることである。状態フィードバックの制御力を $-Kx$ とすると、

$$V = \frac{1}{2} \delta^2, \quad \dot{V} = \delta S A x - \delta S B K x < 0 \quad (8)$$

となる。これより、フィードバックゲインベクトル K の各要素は、

$$k_j = \begin{cases} k_j^+ > (SB)^{-1}(SA)_j & \delta x_j > 0 \\ k_j^- < (SB)^{-1}(SA)_j & \delta x_j < 0 \end{cases} \quad (j=1, \dots, 10) \quad (9)$$

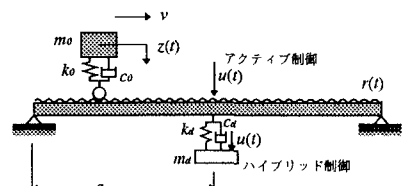


図-1 橋梁-車両-路面系のハイブリッド制御

となる。ここで、 $(SA)_j$ は、 (SA) の j 列の成分である。

4. 数値解析と考察

以上で説明したスライディングモード理論とレギュレータ理論の比較をするため、これらをアクティブ制御およびハイブリッド制御に適用し数値シミュレーションを行った。図 - 2 は、アクティブ制御とハイブリッド制御につきそれぞれ車両を考慮した場合と考慮しない場合の橋梁中点の応答波形の比較図である。橋梁は支間 $40[m]$ 、重量 $100[tonf]$ 、車両は重量 $20[tonf]$ 、速度 $10[m/sec]$ 、動吸振器の重量は橋梁の $1/50$ の $2[tonf]$ である。波形をみると (a) (b) のアクティブ制御では、全体的にスライディングモード理論のほうがレギュレータ理論より制御効果が優れている。特に、(b) の $0 \sim 0.6[sec]$ 、(a) (b) の $1.5 \sim 2.3[sec]$ 、(b) の $3.0 \sim 3.3[sec]$ 、 $3.7 \sim 4.0[sec]$ でスライディングモード理論の特徴である直線的な制御が実現されている。また、ハイブリッド制御の (c) では、レギュレータ理論に比べ前半でやや制御効果が悪く、(d) では、レギュレータ理論との差が僅かしか認められなかった。図 - 3 は、図 - 2 に対応する制御力であり、全てその最大値が $1[tonf]$ になるように設定している。ただし、各スライディングモード理論でのリカッチ方程式の重み係数 R, Q は、それに対応するレギュレータ理論と同じものを使い、制御力の最大値に制限を加えている。図 - 4 は、図 - 2 および図 - 3 に対応するスライディングモード理論の切替関数 δ の波形であり、この波形が縦軸のゼロ点付近にある時にスライディングモードの状態になっている。これは、図 - 2 (a) (b) について述べた直線的な制御が行われている時刻とほぼ一致している。

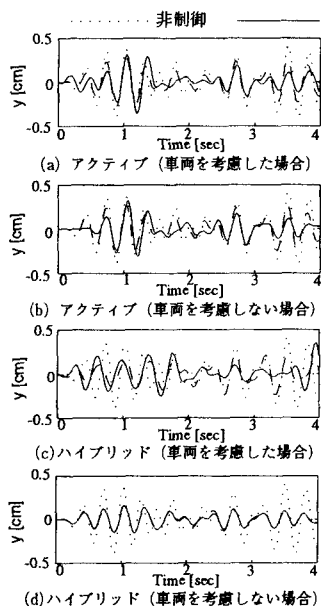


図 - 2 橋梁の変位応答

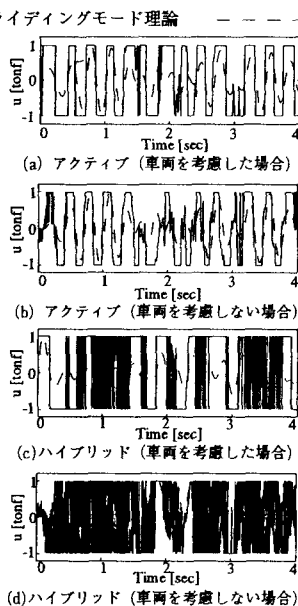


図 - 3 制御力

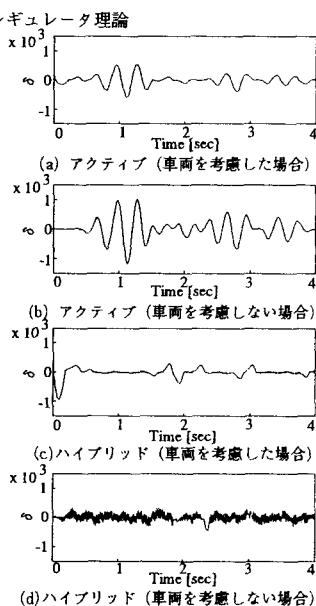


図 - 4 切替関数

5. まとめ

数値シミュレーションの結果、特にアクティブ制御でスライディングモード理論の有効性が確認できた。これは、この理論が橋梁 - 車両系のような時変係数系に有利な理論であると報告されている⁽¹⁾ ことと一致する。今後は、スライディングモード理論を応用したVSSオブザーバを導入することにより橋梁の変位のみから全状態量、特に実際計測することは不可能でもある車両の状態量を推定し、制御を行いたいと考える。

【参考文献】(1)野波建蔵、田宏奇：スライディングモード制御、コロナ社。(2)岡林隆敏、加賀敏明：動吸振器の最適設計に関する考察、橋梁交通振動コロキウム論文集 PART B、pp273-279,1995.11.