

H[∞]制御理論による吊床版橋にアクティブ振動制御

長崎大学大学院 学生員○小松正貴 長崎大学工学部 正員 岡林隆敏
 長崎大学工学部 学生員 栗山佳寛 オリエンタル建設(株) 正員 角本 周

1.はじめに

近年建設される橋梁は、景観的な要素を考慮したものが多く見受けられる。吊床版橋は、構造が単純で美しい曲線構造をしているため、架設事例も多くなっている。しかし、構造が単純であるために長径間なものになると振動対策が必要となる場合がある。このような場合では振動数が、接近しており振動制御を行う際には複数個の振動モードを同時に制御しなければならない。このような制御系にはH[∞]制御理論^①の適用が有用であるとされている。本研究では、吊床版橋にH[∞]制御理論を適用し、その効果をレギュレータ理論^②と比較検討したものである。

2.制御対象構造物

制御対象となる構造物は、ゴルフ場内に架けられている支間長L=68.0mの図-1に示すような吊床版橋である。この橋梁の振動特性および振動モードはそれぞれ表-1、図-2に示した。制御の対象は、人あるいは、カートによる振動の制御である。人の歩調を1.5Hz~3.5Hzと考えると、この橋梁の場合、主な制御対象となる振動数は3次から5次振動となる。制御系設系において本論文では、アクチュエータ特性^③も考慮しており、その周波数特性は、図-4に示したようになる。

3.制御系の運動方程式

7自由度の構造系にアクチュエータの動特性を組み込むと(1)式が得られ、そのときの入力電圧は、(2)式の $e(t)$ となる。

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_f(t) \\ \dot{X}_a(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_f & B_p C_a \\ 0 & A_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_f(t) \\ X_a(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{f1} \\ 0 \end{bmatrix} w(t) + \begin{bmatrix} B_p D_a \\ B_a \end{bmatrix} e(t), \quad (1)$$

$$e(t) = -G \begin{bmatrix} X_f(t) \\ X_a(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 $X_f(t)$ 、 $X_a(t)$ はそれぞれ制御系、アクチュエータの状態量である。Gは、フィードバックゲインである。

4.H[∞]制御理論について

H[∞]制御理論では、周波数領域での整形を考える。このときのハイパスフィルターとローパスフィルターの状態方程式は次のようになる。

$$\dot{v}_1(t) + 2\zeta_1\Omega_1 v_1(t) + \Omega_1^2 v_1(t) = k_{f1}\Omega_1 r(t) \quad (3)$$

$$z_1(t) = \Omega_1 v_1(t)$$

$$\dot{\lambda}_1(t) + 2\zeta_2\Omega_2 \lambda_1(t) + \Omega_2^2 \lambda_1(t) = k_{p2} u(t) \quad (4)$$

$$z_2(t) = \lambda_1(t) + 2\zeta_3\Omega_3 \lambda_1(t) + \Omega_3^2 \lambda_1(t)$$

ここで、 $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ はフィルターの特性値である。観測量 $r(t)$ から制御量 $z_1(t)$ 、制御力 $u(t)$ から制御量 $z_2(t)$ までのフィルターの伝達関数をそれぞれ $W_1(s), W_2(s)$ とし、それを図-5に示す。 ΔP はモデル誤差である。(1)式と(3),(4)式を含む拡大系の状態方程式は、次のようになる。

$$\dot{X}(t) = AX(t) + B_1 w(t) + B_2 e(t) \quad (5)$$

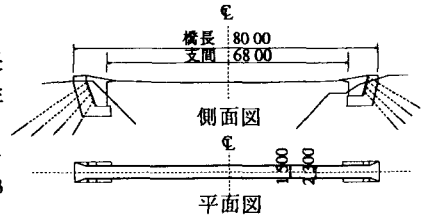


図-1 吊床版橋一般図

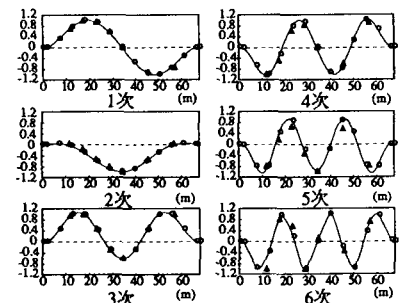


図-2 振動モード図

表-1 振動特性

次数	解析値	実測値	減衰定数
1*	1.0276	1.10	0.0023
2*	1.1968	1.37	0.0083
3*	1.7349	1.89	0.0054
4*	2.3325	2.58	0.0050
5*	3.1541	3.54	0.0058
6	4.0576	4.62	0.0057
7	5.0733		

* 制御対象振動数

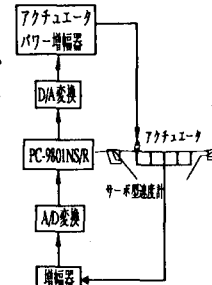


図-3 実験システム図

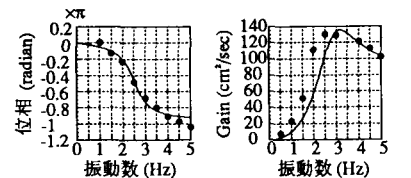


図-4 アクチュエータ特性

$$Z(t) = C_1 X(t) + D_{12} e(t) \quad (6)$$

$$Y(t) = C_2 X(t) \quad (7)$$

ここで、 $X(t)$ は、 $X_f(t)$ 、 $X_d(t)$ 、 $v(t)$ 、 $\lambda(t)$ で構成されるマトリックスで、 $v(t)$ は、 $v_1(t)$ 、 $v_2(t)$ 、 $\lambda(t)$ は、 $\lambda_1(t)$ 、 $\lambda_2(t)$ また、 $Z(t)$ は制御量 $z_1(t)$ 、 $z_2(t)$ より構成されるベクトルである。(5),(6),(7)式に対して、(8)式の H^∞ ノルムを満足するような γ を定め、フィードバックゲイン K を決定する。

$$\left\| \frac{W_1(s) M(s) / \gamma}{W_2(s) N(s)} \right\|_\infty < 1 \quad (8)$$

ここで、 $W_1(s)$ 、 $W_2(s)$ は、それぞれ(3),(4)式で表わされる重み関数で、それぞれ外乱から観測出力と制御入力までの伝達関数である。フィードバックゲイン K は、次のリカッチ方程式の正定解 P から求められ、入力電圧 $e(t)$ は、(11)式で表わされる。

$$A_F^T P + P A_F + P (B_1 B_1^T - B_2 \Theta_F B_2^T - B_2 \Phi_F^T \Phi_F B_2^T) P + C_1^T (I - D_{12} \Theta_F D_{12}^T) C_1 + \varepsilon I = 0 \quad (9)$$

$$K = (\Phi_F^T \Phi_F / 2 \varepsilon + \Theta_F) B_2^T P + \Theta_F D_{12}^T C_1 \quad (10)$$

$$e(t) = -KX \quad (11)$$

5. 数値解析と考察

本論文のシミュレーションは、図-3のような制御実験を想定したものである。シミュレーションでは、橋梁のL/6点、3L/6点、4L/6点をそれぞれ、3次、5次、4次の振動数で最大50kgfの力が働くように3点加振し、定常状態になったところから自由減衰させる。このときの振動制御を、レギュレータ理論と H^∞ 制御理論で行った。実験ではアクチュエータの特性も制御に関係してくるため、これも考慮している。ここで、アクチュエータの可動部の重量は、30.2kgfであり最大加振力は20kgf程度として制御系のパラメータを設計する。 H^∞ 制御理論の設計パラメータは、 $\gamma=0.06$ 、 $\varepsilon=0.001$ である。

このときの、制御対象L/6点の周波数変位応答は図-6となる。点線が制御なし、波線がレギュレータ理論、実線が、 H^∞ 制御理論で制御を行った場合である。図-7、図-8は、L/6点の時間歴変位応答で、点線が制御なし、実線がそれぞれレギュレータ理論、 H^∞ 制御理論で制御を行った場合の応答波形である。また、その制御力をそれぞれ図-9、図-10に示す。両理論とも制御がない場合に対して振幅のレベルは下がっている。しかし、 H^∞ 制御理論は、低周波数領域で外乱を抑制するフィルターを組み込んで制御系を設計しているため、同じ20kgf程度の制御力に対してレギュレータ理論よりも制御効果が優れている。

6. まとめ

同程度の制御力に対しての制御効果は、周波数形成を考慮した H^∞ 制御理論の方が、レギュレータ理論よりも優れていることが確認できた。

【参考文献】

- (1) 美多, 電気誌, pp649-652, 1990.
- (2) 入門現代制御理論, 啓学出版.
- (3) 川谷, 土木学会論文, No.465, 1993.

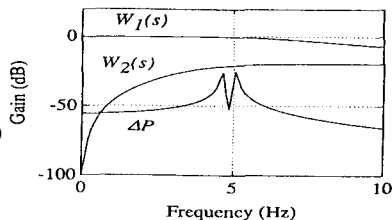


図-5 フィルター整形

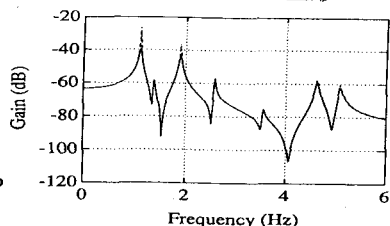


図-6 周波数変位応答

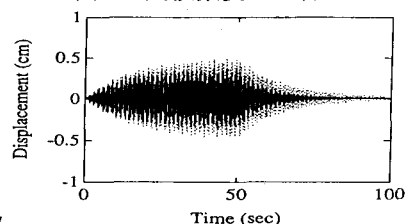


図-7 時間歴変位応答(レギュレータ理論)

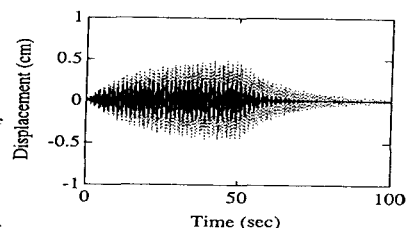


図-8 時間歴変位応答(H^∞ 制御理論)

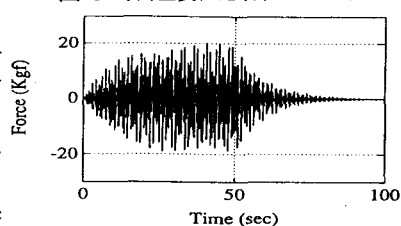


図-9 レギュレータ理論 制御力

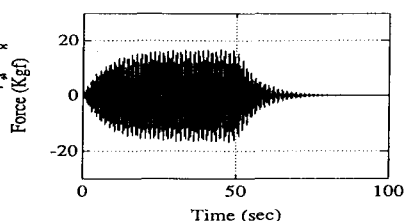


図-10 H^∞ 制御理論 制御力