

I-634

 H^∞ 制御則による吊床版橋の高次モードの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
佐賀市役所 正 員 栗山佳寛 オリエンタル建設(株) 正 員 角本 周

1. はじめに

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、その架設事例は多い。しかし、構造が単純であるために長径間なものになると揺れやすく、振動対策が必要となる場合がある。吊床版橋の固有振動数は接近しており、振動制御を行う際には複数の振動モードを同時に制御しなければならない。このような制御にはアクティブ振動制御の適用が有効である。本研究では、このアクティブ振動制御の中でも近年注目されている H^∞ 制御理論⁽¹⁾を適用し、その制振効果をレギュレータ理論⁽²⁾と比較検討した。特に、フィルタの特性、アクチュエータの動特性が制御効果に及ぼす影響について考察を加えた。

2. 制御対象構造物

制御対象となる構造物は、ゴルフ場内に架設されている支間長 $L=68.0\text{m}$ 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」による振動である。人の歩調を $1.5\text{Hz} \sim 3.5\text{Hz}$ 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。本論文では、アクチュエータの動特性⁽³⁾も考慮した。その周波数特性を図-4に示す。

3. 制御系の運動方程式

制御系の運動方程式にアクチュエータの運動方程式を組み込むと(1)式が得られる。そのときの指令入力 $e(t)$ となる。

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_r(t) \\ \dot{X}_a(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_r & B_r C_a \\ 0 & A_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_r(t) \\ X_a(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_r \\ 0 \end{bmatrix} w(t) + \begin{bmatrix} B_r D_a \\ B_a \end{bmatrix} e(t) \quad (1)$$

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

ここで、 $X_r(t), X_a(t)$ 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^∞ 制御理論は、外乱と制御力に対し周波数領域で重みをつける。外乱に対しては(3)式のようなバンドパスフィルター、制御力に対しては(4)式のようなハイパスフィルターにより重みをつけた。

$$\frac{Z_1(s)}{R(s)} = \frac{(s^2 + 2\zeta_3\Omega_3s + \Omega_3^2)k_f k_p \Omega_1^2}{s^4 + 2(\zeta_1\Omega_1 + \zeta_2\Omega_2)s^3 + (\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + 4\zeta_1\zeta_2\Omega_1\Omega_2)s^2 + 2(\zeta_1\Omega_1 + \zeta_2\Omega_2)s + \Omega_1^2 + \Omega_2^2} \quad (3)$$

$$\frac{Z_2(s)}{U(s)} = \frac{(s^2 + 2\zeta_5\Omega_5s + \Omega_5^2)k_p}{s^2 + 2\zeta_4\Omega_4s + \Omega_4^2} \quad (4)$$

ここで、 $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4, \zeta_5, \Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4, \Omega_5$ はフィルタの特性値である。(3)(4)式をそれぞれ $W_1(s), W_2(s)$ とし、それを図-5に示す。 ΔP はモデル誤差である。(1)式とフィルタの方程式を含む拡大系の状態方程式は、次のようになる。

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

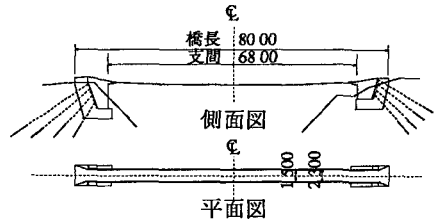


図-1 吊床版橋一般図

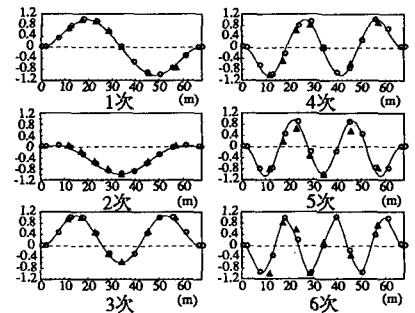


図-2 振動モード図

表-1 振動特性

次数	振動数	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

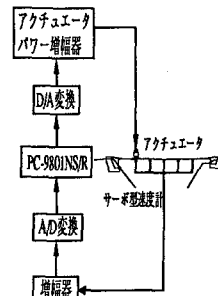


図-3 実験システム図

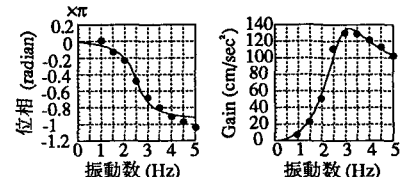


図-4 アクチュエータ特性

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

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

ここで、 $X(t)$ は、 $X_1(t), X_2(t), \xi(t), \lambda(t)$ で構成されるマトリックスで $\xi(t)$ は、 $\xi_1(t), \xi_2(t), \xi_3(t), \xi_4(t)$ 、 $\lambda(t)$ 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。

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

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、指令入力 $e(t)$ 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

本論文は、図-3のような制御実験を想定しシミュレーションを行った。シミュレーションは、橋梁の2L/8点、4L/8点、5L/8点をそれぞれ、3次、5次、4次の振動数で加振し、定常状態になったところから自由減衰させる。これを、レギュレータ理論と H^∞ 制御理論を用いて制御を行う。シミュレーションは、アクチュエータの動特性を考慮し制御系のパラメータを設計する。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50kgf程度である。 H^∞ 制御理論の設計パラメータは、 $\gamma=0.113$, $\varepsilon=0.001$ である。

このときの、制御対象2L/8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また、2L/8点の時間歴変位応答は、図-7、図-8となり、それぞれレギュレータ理論と H^∞ 制御理論である。波線が制御なし、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である。このとき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と比べ振幅のレベルは下がっている。しかし、 H^∞ 制御理論は、外乱の特性を考慮したフィルターを組み込んで制御を行っているため制御効率が良く、同じ50kgf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た。

6. まとめ

同じ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,電会誌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.

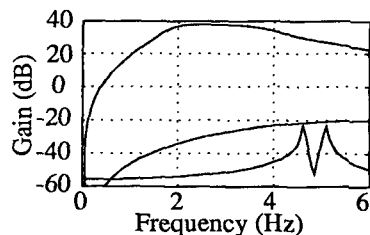


図-5 フィルターの整形

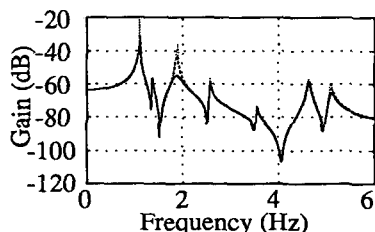


図-6 周波数変位応答

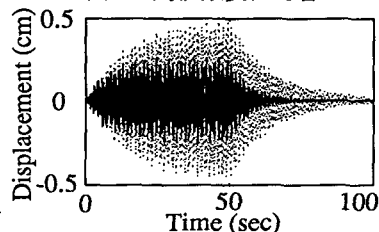


図-7 時間歴応答 (レギュレータ理論)

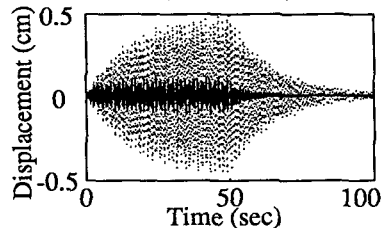


図-8 時間歴応答 (H^∞ 制御理論)

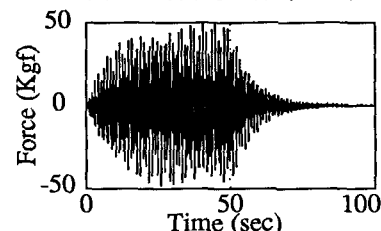


図-9 制御力 (レギュレータ理論)

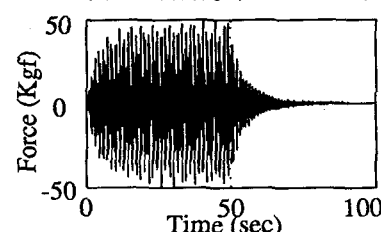


図-10 制御力 (H^∞ 制御理論)