

# H<sup>∞</sup>制御理論による吊床版橋のアクティブ振動制御

岡 林 隆 敏\* ・ 小 松 正 貴\*\*  
角 本 周\*\*\*

## Active Vibration Control of the Prestressed Concrete Stress Ribbon Bridge Using by H<sup>∞</sup> Control Theory

by

Takatoshi OKABAYASHI\*, Masataka KOMATSU\*\*  
and Meguru TSUNOMOTO\*\*\*

This study presents active vibration control methods for the prestressed stress ribbon pedestrian bridge using by H<sup>∞</sup> control theory. This bridge is modeled by FEM and reduced to the five degree of freedom system. The excitation forces act on the three points on the bridge and a control force operates on one point on the bridge. We consider the dynamics of the actuator. The linear quadratic control and the H<sup>∞</sup> feedback control are investigated. Numerical results are shown that the H<sup>∞</sup> controller is effective compare with the linear quadratic controller.

### 1. はじめに

吊床版橋は、構造が単純な形式であり景観的にも美しいという理由で、近年その架設事例が増加している。しかし、単純な構造形式のため、長径間になると揺れやすく制振対策が必要となるものと考えられる。吊床版橋の振動対策として、動吸振器の設置が考えられるが、吊床版橋は固有振動数が互いに接近しているの、同時に複数個の振動を制御する必要がある。このような振動の制御には、アクティブ振動制御が適している。本研究においては、質量体を移動させることにより制御力を発生させるアクチュエータを想定して構造物の振動を制御するものとする。

一般に構造物は、無限の自由度を有しているが、実際に制御する振動数は、低次振動のみでよい。そこで、アクティブ振動制御系の設計を行うためには、制御対象構造物の低次元化が必要となる。本研究の制御対象となる吊床版橋は、有限要素法に基づいて5自由系に

低次元化したものを用いる。しかし、低次元化モデルで制御を行うと、無視された高次モードが励起されるスピルオーバー現象が生じる。多自由度系の振動制御問題においては、このスピルオーバー現象を解決することが重要であり、様々な研究がなされている。H<sup>∞</sup>制御理論は、不確定性を有するモデルを積極的に取り扱うロバスト制御理論であるため、上記のスピルオーバー問題を解決する有効な方法である<sup>1),2),3),4)</sup>。

H<sup>∞</sup>制御理論による研究は、数多く行われており、最近では、土木構造物への適用例も多く見受けられる<sup>5),6),7),8)</sup>。これらの研究によるとH<sup>∞</sup>制御理論は、LQ制御より優れたロバスト安定性を有していることが実証されている。

本研究では、吊床版橋にH<sup>∞</sup>制御理論を適用し、その有効性を確認したものである。本研究では、制御力を発生させるアクチュエータの動特性をモデル化した。アクチュエータの位相遅れは、振動制御の効果に重要

平成6年4月28日受理

\* 社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

\*\* 大学院修士課程土木工学専攻 (Graduate Student, Department of Civil Engineering)

\*\*\* オリエンタル建設㈱ (Oriental Construction Co., Ltd)

な要因になるためである<sup>10)</sup>。本研究は、数値解析シミュレーションにより最適レギュレータによる制御とH<sup>∞</sup>制御理論による制御とを比較し、それぞれの制御効果の有効性を検討したものである。

2. 制御対象構造物と振動実験

1) 制御対象構造物

制御対象となる構造物は、写真-1に示すようなゴルフ場内に架けられている支間長68.0mのPC吊床版橋である。吊床版橋は、橋台間に張られたPCケーブルにコンクリートを打ち、これを床版としている。このようにこの形式の橋は、吊り構造という形を取っているため、他形式の橋と比べ振動が起きやすく、考慮すべき振動数範囲に固有振動数が多数存在する。対象構造物の諸元を表-1に、概形を図-1に示す。

2) 振動実験

著者らは、この橋梁の振動特性を計測するために、平成5年8月と11月に振動実験を行った。この実験により得られた振動特性を、表-2に示す。\*は制御対象振動数である。比較的低い振動数の範囲に多くの固有振動数が存在していることがわかる。解析と実測の振動数を比較すると実測の固有振動数は、解析値よりやや高い値となった。これは、解析の際考慮されていない高欄剛性等の影響が実験では現れたと考えられる。

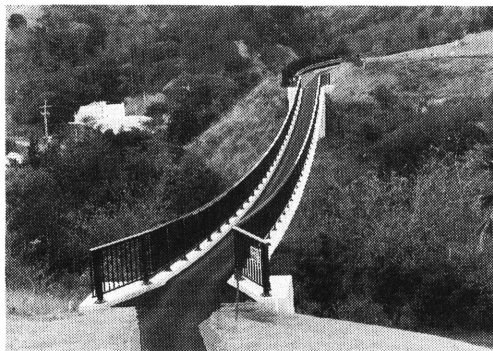


Photo.1 Prestressed concrete stress ribbon bridge

Table 1 Characteristics of the bridge

Structure type	PC Ribbon bridge
Bridge length	80.500 m
Span length	68.000 m
Sag	1.495 m
Bridge width	1.500 m
Live load	100 kg/m <sup>2</sup>

この橋梁の1次から6次までの振動モードを、図-2に示す。○が解析値であり、▲が実測値である。解析と実測は良い一致を示している。

制御対象となる振動数は、人の歩行やカートの通行による振動数で、1.5~3.5Hz程度と考えられる。この橋梁においては、3次から5次振動モードが、制御対象となる振動数である。これらの振動モードの低減を目的として振動制御系の設計を行う。

3) 荷重のモデル化

本研究において用いた荷重は、歩行者が通常的に通過する状況を想定して、3定点で同時に加振する場合を考えている。荷重は、人が膝を屈伸させてある一定の振動数で上下に運動した時を想定している。そこで、作用する荷重を次のような正弦関数でモデル化する。

$$w_i(t) = \frac{1}{2} P \{1 + \sin(2\pi\Omega_i t)\} \quad (i=1, 2, 3) \quad (1)$$

ここで、Pは最大荷重で50kgf、Ω<sub>i</sub>は、歩行者の足が橋梁に接する1秒間当たり回数である。

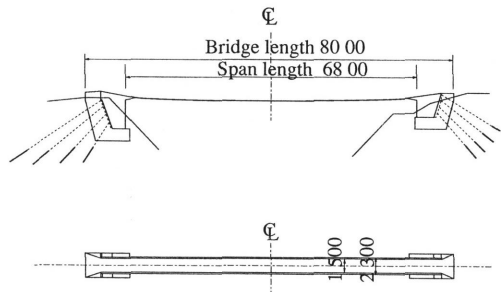


Fig.1 General view of the test bridge

Table 2 Frequencies and damping constants

Order	Frequency (Hz)		Damping
	Analysis	Experiment	Experiment
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		

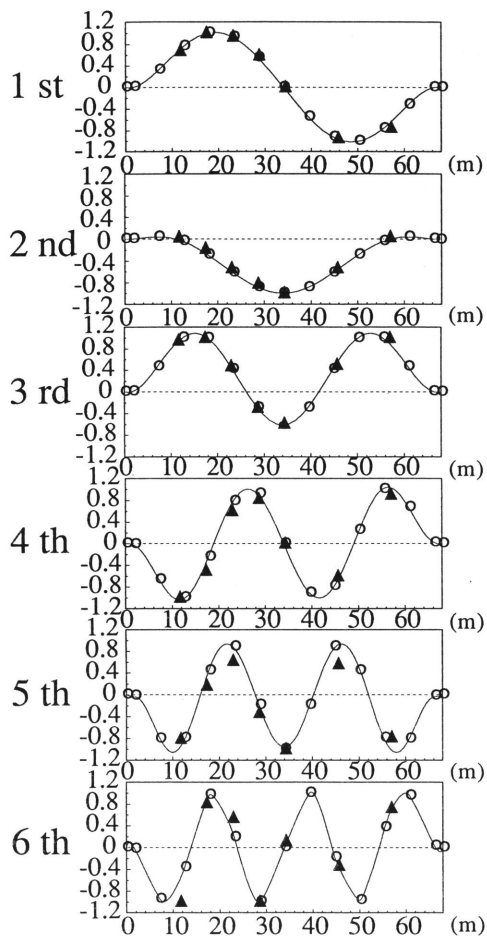


Fig.2 Vibration modes

3. 振動制御の方法

1) 振動制御システム

本研究は、図-3のような実験を想定して、制御系のモデル化を行う。制御力の発生には、写真-2のようなアクチュエータを用いる。アクチュエータの設置位置は、制御対象となる3次から5次モードにおいて節にならない2L/8点 (L=68.0m) に設置する。

振動制御を行う際には、アクチュエータの動特性も重要な問題となる。これは、アクチュエータの位相遅れにより、構造物を加振する恐れがあるためである。従って、このように現象を表現するためにアクチュエータのモデル化も行い制御系を設計する必要がある。本研究では、アクチュエータの動特性も制御系に組み込み、実験に対応した制御系の設計のモデル化を行った。

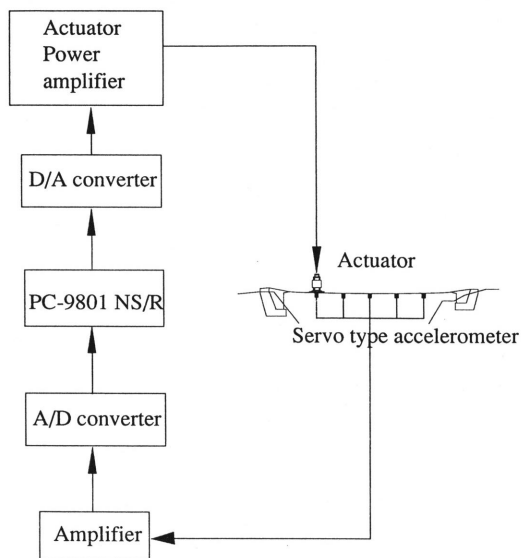


Fig.3 Vibration control system

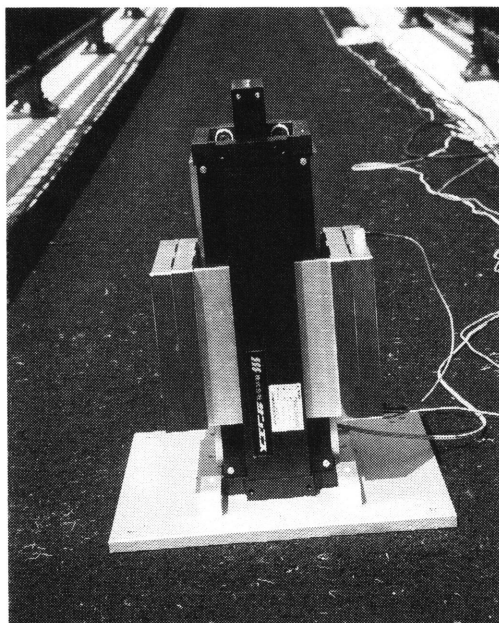


Photo.2 Actuator

2) アクチュエータのモデル化<sup>10)</sup>

アクチュエータの質量体の変位と速度を次のように定義する。

$$x_a(t) = \begin{bmatrix} x_a(t) & \dot{x}_a(t) \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

これを2次遅れ系と考えると、次のような状態方程

式が得られる。

$$\dot{x}_a(t) = A_a x_a(t) + B_a e(t) \tag{3}$$

$$u(t) = C_a x_a(t) + B_a e(t) \tag{4}$$

$$A_a = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_a^2 & -2h_a\omega_a \end{bmatrix}, B_a = \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha \end{bmatrix}$$

$$C_a = m_a \begin{bmatrix} \omega_a^2 & 2h_a\omega_a \end{bmatrix}, D_a = -m_a \alpha$$

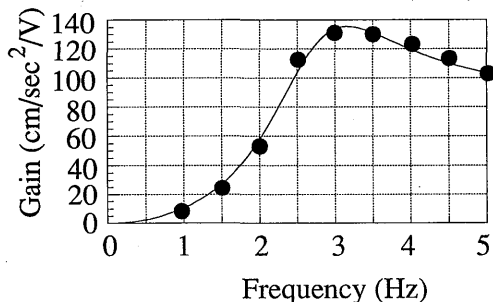
ここで、 $u(t)$ は制御力、 $e(t)$ はアクチュエータの指令入力、 $m_a$ はアクチュエータの質量、 $\alpha$ は加速度変換係数である。質量体の移動による加速度により制御力が発生する。

アクチュエータの動特性を、図-4に示した。図-4のような実測値に曲線適合を行い、2次遅れ系を1自由度系とみなした等価な減衰定数と等価な固有振動数を求めた。その結果、等価な減衰定数と固有円振動数は、 $h_a=0.303$ と、 $\omega_a=17.93$  (rad/s) となった。

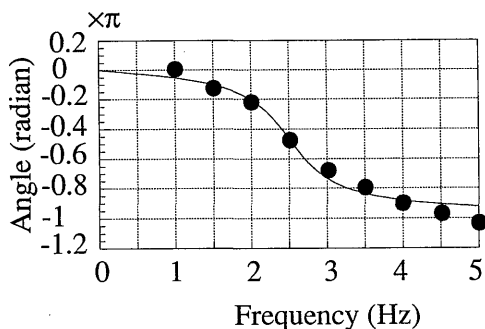
4. 構造-アクチュエータ系の運動方程式と振動制御

1) 構造系の運動方程式

構造物は、無限の自由度を持つが、制御を行う際に



(a) Gain



(b) Phase

Fig.4 Dynamics of actuator

は、振幅レベルの高い低次モードに対して制御モデルを構成する。今、図-4のように吊床版橋を5自由度系に低次元化すると、構造物の運動方程式は次式となる。

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = f(t) + u(t) \tag{5}$$

$y(t)$ は各点の変位、 $u(t)$ は制御力、 $f(t)$ は作用する外力である。 $m$ 、 $c$ 、 $k$ は、それぞれ、質量マトリックス、減衰マトリックス、剛性マトリックスである。

相対変位 $y(t)$ は、基準座標 $q(t)$ と振動モードマトリックス $\Phi$ を用いると次式で表される。

$$y(t) = \Phi q(t) \tag{6}$$

(6)式を(5)式に代入し、さらに基準座標 $q(t)$ から構成される状態変数ベクトルを

$$x_r(t) = \begin{bmatrix} q_1(t) & q_2(t) & \dots & q_n(t) & \dot{q}_1(t) & \dot{q}_2(t) & \dots & \dot{q}_n(t) \end{bmatrix}^T$$

とすると、(7)式のような状態方程式が得られる。

$$\dot{x}_r(t) = A_r x_r(t) + B_{r1} f(t) + B_{r2} u(t) \tag{7}$$

$$y(t) = C_r x_r(t) \tag{8}$$

$$A_r = \begin{bmatrix} 0 & I \\ \Omega & \Lambda \end{bmatrix}, B_{r1} = \begin{bmatrix} \Phi^T m \Phi \end{bmatrix}^{-1} \Phi^T$$

$$B_{r2} = \begin{bmatrix} \Phi^T m \Phi \end{bmatrix}^{-1} \Phi^T \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T, C_r = \begin{bmatrix} \Phi^T & 0 \end{bmatrix}$$

ここで、 $A_r$ はシステムマトリックス、 $B_{r1}$ は外力係数マトリックス、 $B_{r2}$ は制御力係数マトリックス、 $C_r$ は観測マトリックスである。 $\Omega$ 、 $\Lambda$ はそれぞれ $-\omega_i^2$ 、 $-2h_i\omega_i$ から構成される。

2) 構造-アクチュエータ系の運動方程式

アクチュエータの状態変数 $x_a(t)$ を含む状態変数を次のように置く。

$$X(t) = \begin{bmatrix} x_r(t) & x_a(t) \end{bmatrix}^T \tag{9}$$

これを用いると次式のようなアクチュエータの動特性を組み込んだ制御系の運動方程式が得られる。

$$\dot{X}(t) = A_{ra} X(t) + B_{ra1} w(t) + B_{ra2} e(t) \tag{10}$$

ここで、

$$A_{ra} = \begin{bmatrix} A_r & B_{r2} C_a \\ 0 & A_a \end{bmatrix}, B_{ra1} = \begin{bmatrix} B_{r1} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{ra2} = \begin{bmatrix} B_{r2} D_a \\ B_a \end{bmatrix}$$

である。

3) レギュレータ理論<sup>9)</sup>

最適レギュレータ理論により、2次形式評価関数 $J$ を用いて最適フィードバックゲインを設計する。

$$J = \int_0^{\infty} [X(t)^T Q X(t) + e(t)^T R e(t)] dt \quad (11)$$

$Q, R$  は重みマトリックスであり、 $Q$  は非負定 ( $Q \geq 0$ )  $R$  は、正定 ( $R > 0$ ) な対称マトリックスである。

評価関数  $J$  の第1項は、 $X(t)$  の応答に関する項目であり、 $Q$  の増大は、即応性の増大をもたらす。第2項は、制御に必要なエネルギーを表しており、 $R$  の増大は制御入力  $e(t)$  の減少を示している。最適制御理論は、この  $J$  を最小にするような制御入力  $e(t)$  を決定することである。

このような制御入力  $e(t)$  は、次式で与えられる。

$$e(t) = -KX(t) \quad (12)$$

ここで、 $K$  は、最適フィードバックゲインであり、

$$K = R^{-1} B_{ra2}^T P \quad (13)$$

となる。 $P$  は、次に示すリカッチ方程式の正定解である。

$$P A_{ra} + A_{ra}^T P - P B_{ra2} R^{-1} B_{ra2}^T P + Q = 0 \quad (14)$$

5. H<sup>∞</sup>制御理論<sup>1),2),3),4)</sup>

1) H<sup>∞</sup>制御理論について

従来のLQ (Linear Quadratic) 制御においては、評価関数として2次形式評価関数を用いていた。しかし、H<sup>∞</sup>制御理論では、伝達関数の周波数応答のゲインの最大値を用いる。この最大値がH<sup>∞</sup>ノルムといわれ、ある伝達関数  $G(s)$  のH<sup>∞</sup>ノルムは、図-5のように表される。

これを式で表すと

$$\|G(s)\|_{\infty} = \max_{\omega=0 \sim \infty} |G(j\omega)| \quad (15)$$

となる。

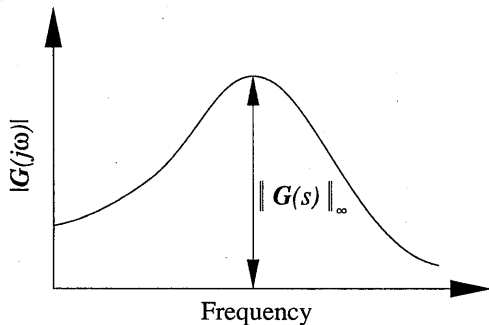


Fig.5 H<sup>∞</sup>norm

いま、図-6のような制御系を考える。 $P(s)$  は制御対象であり、 $H(s)$  はフィードバック補償器である。

このとき外乱  $w(t)$  から制御量  $z_0(t)$  までの伝達関数を

$$M(s) = \frac{P(s)}{I - H(s)P(s)} \quad (16)$$

とする。図-6の外乱  $w(t)$  から制御量  $z_1(t)$  までの閉ループ系伝達関数を、なるべく小さくするような  $H(s)$  を設計すると外乱抑圧制御問題となる。

ここで、低周波数領域において高ゲインを持つ重み関数を  $W_1(s)$  とすると、外乱抑圧に関する評価関数は、適当な値  $\gamma$  を用いて次式で表される。

$$\|W_1(s)M(s)/\gamma\|_{\infty} < 1 \quad (17)$$

この評価関数を満たす  $H(s)$  を求める。

2) ロバスト制御

実物構造物モデルを制御モデルに縮約する際、低次元化による誤差が伴う。ロバスト制御設計問題とは、安定な制御系に不確定な誤差が生じたときでも十分な制御効果を発揮するような補償器を設計して制御を行うものである。

今、安定な制御対象  $P(s)$  に無視された高次モードの誤差  $\Delta$  が入ってくるとする。

$$P(s) = P(s) + \Delta P(s) \quad (18)$$

このとき、 $\Delta P(s)$  の上限を重み関数  $W_2(s)$  を用いて次式のように定義する。

$$|\Delta P(j\omega)| \leq |W_2(j\omega)| \quad (19)$$

ここで、外乱  $w(t)$  から制御量  $z_2(t)$  までの伝達関数は、

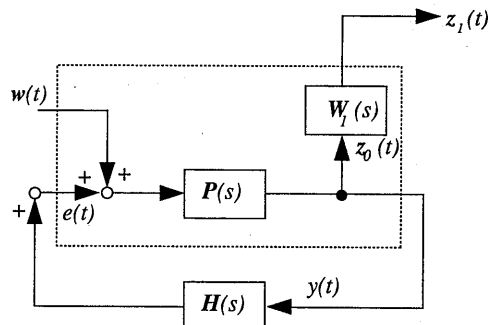


Fig.6 Disturbance rejection controller

$$N(s) = \frac{H(s)P(s)}{I - H(s)P(s)} \quad (20)$$

となる。ロバスト安定条件は、スモールゲインの定理より次式で定義される。

$$\|\Delta P(s)N(s)\|_{\infty} < 1 \quad (21)$$

(20)式を用いると(21)式は、(22)式となり、この式を満たす  $H(s)$  を設計するとロバスト安定な制御系が設計できる。

$$\|W_2(s)N(s)\|_{\infty} < 1 \quad (22)$$

3) 混合問題

図-7のような混合問題の一般化プラントを考え、制御量  $z_1(t)$ ,  $z_2(t)$  を用いて応答の低減とロバスト安定化を同時に行う。このときの評価関数は、次式で表される。

$$\left\| \frac{W_1(s)M(s)/\gamma}{W_2(s)N(s)} \right\|_{\infty} < 1 \quad (23)$$

これを満たすことにより、低次モードの制御効果を高めかつ、ロバスト安定な制御系が設計できる。

6.  $H^{\infty}$ 制御理論による状態フィードバック

1) フィルターの設計

外乱抑圧問題とロバスト安定問題を考えるために、周波数領域において重みを持つ2つのフィルターを設計する。

外乱抑圧に対しては、(24)式のような低周波数領域で重みを持つローパスフィルター、制御入力に対しては、(25)式のような高周波数領域で重みを持つハイパスフィルターを用いる。

$$W_1(s) = \frac{Z_1(s)}{Y(s)} = \frac{k_{f1}\Omega_1^2}{S^2 + 2\zeta_1\Omega_1 S + \Omega_1^2} \quad (24)$$

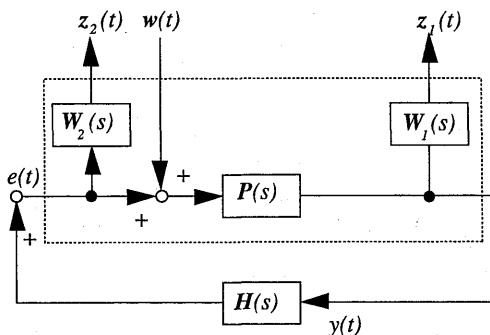


Fig.7 Block diagram of closed loop system

$$W_2(s) = \frac{Z_2(s)}{U(s)} = \frac{(S^2 + 2\zeta_3\Omega_3 S + \Omega_3^2)k_{f2}}{S^2 + 2\zeta_2\Omega_2 S + \Omega_2^2} \quad (25)$$

(24)式を、状態方程式で表すと次式となる。

$$\begin{aligned} \dot{v}(t) + 2\zeta_1\Omega_1 v(t) + \Omega_1^2 v(t) &= k_{f1}\Omega_1 y(t) \\ z_1(t) &= \Omega_1 v(t) \end{aligned} \quad (26)$$

同じく(25)式を状態方程式で表すと、次式となる。

$$\begin{aligned} \ddot{\lambda}(t) + 2\zeta_2\Omega_2 \dot{\lambda}(t) + \Omega_2^2 \lambda(t) &= k_{f2} e(t) \\ z_2(t) &= \ddot{\lambda}(t) + 2\zeta_3\Omega_3 \dot{\lambda}(t) + \Omega_3^2 \lambda(t) \end{aligned} \quad (27)$$

ここで、それぞれのフィルターの方程式をベクトル表示する。

$$\begin{aligned} v(t) &= \begin{bmatrix} v(t) & \dot{v}(t) \end{bmatrix}^T, \lambda(t) = \begin{bmatrix} \lambda(t) & \dot{\lambda}(t) \end{bmatrix}^T \\ z(t) &= \begin{bmatrix} z_1(t) & z_2(t) \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

改めて、(26)、(27)式をマトリックス表示すると、次式が得られる。

$$\dot{v}(t) = A_{w1}v(t) + B_{w1}y(t) \quad (28)$$

$$\dot{\lambda}(t) = A_{w2}\lambda(t) + B_{w2}u(t) \quad (29)$$

$$z(t) = E_r \begin{bmatrix} v(t) \\ \lambda(t) \end{bmatrix} + F_r u(t) \quad (30)$$

図-8は、(24)、(25)式のフィルターを周波数領域で表示したものである。図-8における $\Delta P$ は、実橋を7自由度の構造系とした場合、5自由度系の制御系とのモデル誤差である。ハイパスフィルターはこの上限を越えるように設計する。

2) 拡大系の運動方程式

各フィルターの状態変数ベクトルを含む拡大系の状

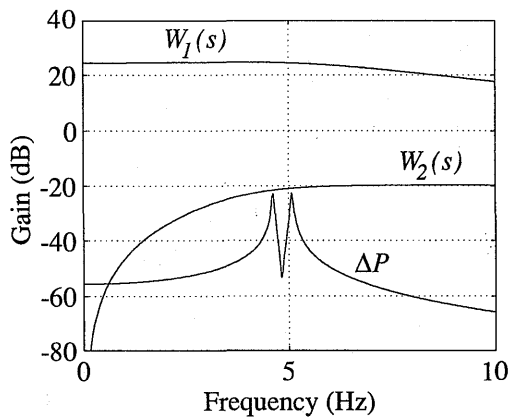


Fig.8 System uncertainty and weighting functions

$$\begin{aligned}
 A_F &= A - B_2 \Theta_F^T D_{12}^T C_1 \\
 A_F^T P + P A_F + P (B_1 B_1^T - B_2 \Theta_F^T B_2^T - \frac{B_2 \Phi_F^T \Phi_F B_2^T}{\epsilon}) P \\
 &+ C_1^T (I - D_{12} \Theta_F^T D_{12}^T) C_1 + \epsilon I = 0 \\
 P &: \text{Positive definite } (\epsilon > 0)
 \end{aligned}$$

$$F = - \left( \frac{\Phi_F^T \Phi_F}{2 \epsilon} + \Theta_F \right) B_2^T P - \Theta_F^T D_{12}^T C_1$$

Fig.9 Feedback gain of H<sup>∞</sup> controller

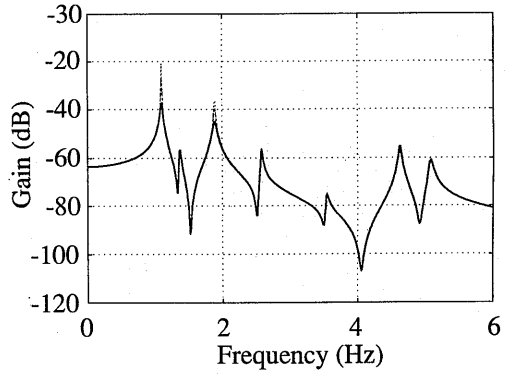


Fig.10 Frequency displacement response

状態変数ベクトルを次のように定義する。

$$x(t) = [X(t) \ v(t) \ \lambda(t)]^T \quad (31)$$

これより、次式のような拡大系の状態方程式が得られる。

$$\dot{x}(t) = A x(t) + B_1 w(t) + B_2 e(t) \quad (32)$$

$$z(t) = C_1 x(t) + D_{12} e(t) \quad (33)$$

ここで、

$$A = \begin{bmatrix} A_{ra} & 0 & 0 \\ B_{w1} C_r & A_{w1} & 0 \\ 0 & 0 & A_{w2} \end{bmatrix}, \quad B_1 = [B_{ra1} \ 0 \ 0]^T$$

$$B_2 = [B_{ra2} \ 0 \ B_{w2}]^T, \quad C_1 = [0 \ F_r C_a \ E_r]$$

$$D_{12} = F_r D_a$$

である。

(32), (33) 式のシステムに対し、(23) 式を満たすような最適フィードバックゲイン  $K$  を定め、アクチュエータへの指令入力  $e(t)$  を決定する。

$$e(t) = -K x(t) \quad (34)$$

ここで用いられる最適フィードバックゲイン  $K$  は、図-9 の手順で求められる。

### 7. 数値解析と考察

本研究では、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。シミュレーションの方法は、橋梁の 2L/8 点、4L/8 点、5L/8 点をそれぞれの点において最も振幅が大きくなる振動数で定常加振する。本研究においては、2L/8 点、4 L/8 点、5 L/8 点をそれぞれ 3 次、5 次、4 次の振動数で加振した。次に、振幅が定常状態になったところ (50sec) から、加振を止め自由減衰させる。このような状態に、レギュレータ理

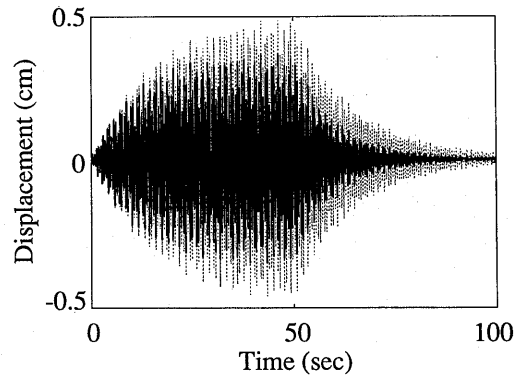


Fig.11 Time history (Optimum regulator)

論または、H<sup>∞</sup>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した。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 程度である。また、レギュレータ理論のフィードバックゲイン設計パラメータは、 $Q=I$ ,  $R=0.01$  であり、H<sup>∞</sup>制御理論のフィードバックゲイン設計パラメータは、 $\gamma=0.06$ ,  $\epsilon=0.001$  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-10 となる。点線が制御なしの応答、破線がレギュレータ理論、実線が、H<sup>∞</sup>制御理論で制御を行った場合の応答である。H<sup>∞</sup>制御理論においては、ローパスフィルターを用いて、5 次振動以下の振動数の共振レベルを低減するように設計している。このため、6 次以降の振動モードに対しては、制御効果が小さくなり、効率の良い制御力を得ることができる。

2L/8 点の時間歴変位応答は、図-11、図-12 となり、それぞれレギュレータ理論と H<sup>∞</sup>制御理論で制御を行った場合の応答を示す。破線が制御なしの応答、実

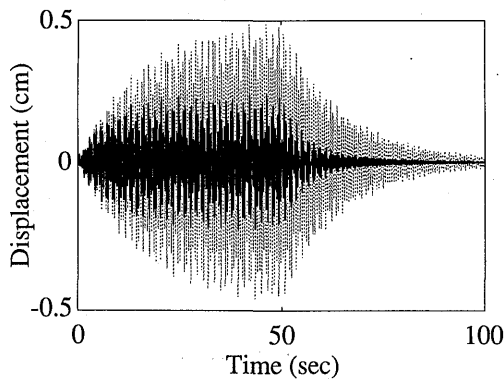
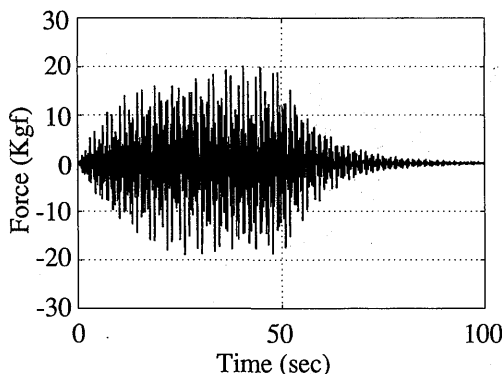
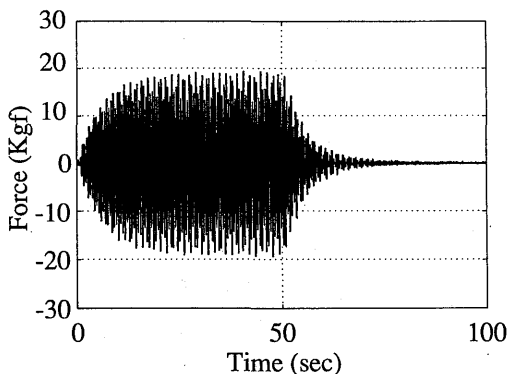
Fig.12 Time history ( $H^\infty$  control)

Fig.13 Control force (Optimum regulator)

Fig.14 Control force ( $H^\infty$  control)

線がそれぞれレギュレータ理論,  $H^\infty$ 制御理論で制御を行った場合の応答である。このときのアクチュエータから発生する制御力は、それぞれ図-13, 図-14となる。このように両理論において同じ程度に制御力を設定し、制御効果の比較を行った。

レギュレータ理論においては、制御なしの場合に比

べ70%程度に応答レベルが低減していることがわかる。一方、 $H^\infty$ 制御理論においては制御なしの応答に比べ、50%程度に応答レベルが低減していることがわかる。同程度の制御力に対してこのような差がでる原因は、評価関数の違いが考えられる。つまり、レギュレータ理論の評価関数では、すべての周波数領域において一律に制御を及ぼす結果となる。しかし、 $H^\infty$ 制御理論は、最悪の外乱が入ったときの影響を最小にしようとする考え方に立ち外乱抑制問題を周波数領域で対処している。このため、目的に応じた制御をかけることができ不必要なエネルギーをなくすることができる。以上のような理由で、 $H^\infty$ 制御理論の方が小さな制御力で効果的な制御ができる。

## 8. ま と め

本研究は、評価関数の異なるレギュレータ理論と $H^\infty$ 制御理論とを用い、両理論で制御力を同じ程度に調整したときの制御効果の差異をシミュレーションにより考察検討した。これにより得られた結果を要約すると次のようになる。

(1) 振動制御を行う上で重要な役割を果たすアクチュエータの動特性を考慮し、この特性を組み込んだ制御系を設計した。

(2) 吊床版橋を低次元化し、レギュレータ理論および $H^\infty$ 制御理論の定式化を行い、両理論を比較する上で最適なフィードバックゲインを求めた。

(3) 設計パラメータを変化させ、制御時の制御力を同程度に調整して、レギュレータ理論と $H^\infty$ 制御理論との制御効果の比較を行った。その結果、外乱抑圧問題を周波数領域で対処している $H^\infty$ 制御理論の方がレギュレータ理論に比し良い制御効果を示した。

今回の研究では、 $H^\infty$ 制御理論のもう一つの特徴であるロバスト安定問題については、解析を行っていないが、今後はパラメータ誤差によりスピルオーバーを起こさせ、 $H^\infty$ 制御理論のロバスト性を検証する。

## 参 考 文 献

- 1) 美多 勉：ロバスト制御，電気学会誌，vol. 110，No. 8，pp. 649-652，1990年2月。
- 2) 三平満司・美多 勉：状態空間理論による $H^\infty$ の解法，計測と制御，vol. 20，No. 2，pp. 129-135，1990年2月。
- 3) Francis, B., A.: A Course in  $H^\infty$  Control Theory, Springer-Verlag, 1987.
- 4) Dorato, P. L., Fortuna, and G. Muscato.: Robust Control for Unstructured Perturbations



-An Introduction, Springer-Verlag, 1992.

- 5) 崔 衛民, 野波健蔵, 西村秀和: H<sup>∞</sup>制御理論による多自由度系構造物のアクティブ振動制御, 日本機械学会, No. 910-52, pp. 189-195, 1991年9月.
- 6) 野波健蔵, 西村秀和, 崔 衛民: H<sup>∞</sup>制御理論によるアクティブ動吸振器を用いた多自由度系の振動制御, 日本機械学会, No. 910-52, pp. 196-202, 1991年9月.
- 7) 渡辺 亨, 吉田和夫: 中高層建築のロバストアクティブ制振の理論的検討, 日本機械学会, pp. 177-183, 1991年9月.
- 8) 梶原逸朗, 稲垣 亨, 長松昭男: モード解析を用いた連続体構造物の H<sup>∞</sup>ロバスト振動制御, 日本機械学会, pp. 329-336, 1992年7月.
- 9) 白石昌武: 入門現代制御理論, 啓学出版.
- 10) 川谷亮治: H<sup>∞</sup>制御理論に基づく柔軟構造物のロバスト制振制御, 土木学会論文集, No. 465, 1993年4月.