

塔状建造物のアクティブ振動制御への
 H^∞ 制御理論の適用

APPLICATION OF H^∞ THEORY TO ACTIVE VIBRATION CONTROL OF TALL BUILDING MODELS

岡林隆敏* 小松正貴** 山本 実*** 下田郁夫****

By Takatoshi OKABAYASHI*, Masataka KOMATSU**, Minoru YAMAMOTO***
 and Ikuo SHIMODA****

This paper presents a design method of vibration control of a tall building model subject to random excitations using by the H^∞ control theory. The five story building model reduced to the three degree of freedom system is considered. The excitation force that is El Centro earthquake acts on the base of the structure and the control force operates on the top of the structure. The linear quadric control, the H^∞ state feedback control and the H^∞ out put feedback are investigated. Numerical results are shown that the H^∞ controller is effective compared with the linear quadric controller. Further, when each natural frequency of the structure decreases to half value, the H^∞ control has higher performance than the linear quadric control.

Key Words: vibration control, active control, H infinity control theory, building vibration, earthquake excitation

1. はじめに

土木建造物は、地震荷重、風荷重、交通荷重などの作用を受けるために、近年振動制御の視点から振動を軽減する試みがなされてきた。近年、振動制御理論の発展と制御装置の開発により、アクティブ制御による振動の抑制が検討されている。土木建造物をアクティブ振動制御する場合、次のような問題点が生じる。①一般に土木建造物は、規模が大きいため、制御モデルを構成するために振動モデルに対して低次元化を行う必要がある。②建造物に作用する荷重は、不規則荷重である場合が多く、その特性が時間的に変化する非正常性を有する。③交通荷重が作用する道路橋の振動のように、荷重と構造系が動的に連成する。

このような視点から、土木建造物の振動制御では、外力の抑制と建造物の低次元化が必要になる。近年急速に発達した H^∞ 制御理論^{<1><2><3><4>}は、重み関数を組み込むことにより、外乱抑制とロバスト安定性を考慮した制御が実施できる。 H^∞ 制御理論は、建造物の振動制御問題に適用^{<5><6><7><8>}され、その有効性が報告されている。また、 H^∞ 制御理論の土木建造物への適用も見られる。

著者らは、土木建造物に適した振動制御を実現するために、5層の骨組み建造物を作成し、基礎的な実験^{<9>}を行っている。本研究は模型建造物を対象に H^∞ 制御理論を適用して、振動制御の有効性を検討したものである。制御対象は、5層の骨組み建造物であり、その基盤に地震外力が作用するものとする。制御力は、

* 工博 長崎大学助教授 社会開発工学科 (〒852 長崎市 文教町 1 番14号)

** 長崎大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒852 長崎市 文教町 1 番14号)

*** 長崎大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒852 長崎市 文教町 1 番14号)

**** オイレス工業(株) 技術第2部 (〒252 藤沢市 桐原町 8)

最上部1点のみに作用させるものとする。このような構造物を対象にして、 H^{∞} 制御理論により、状態フィードバックと出力フィードバックの制御則を求め、最適レギュレータ理論との比較を行った。また、構造物の振動数を変化させて、制御則のモデル化に対する制御の効果について考察を行った。

2. 制御対象構造物

制御対象とする構造物は、図-1のような5層の骨組み構造物である。これを5質点系にモデル化し、3次まで振動を制御する。本研究は、図-2に示すような制御実験を想定している。制御モデルの解析と実測による振動数、および減衰定数を表-1に示した。また、振動モードを図-3に示した。

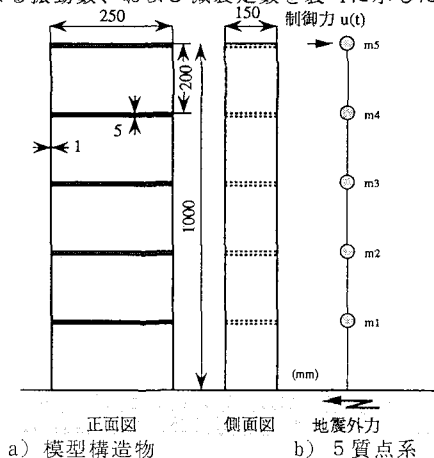


図-1 制御モデル

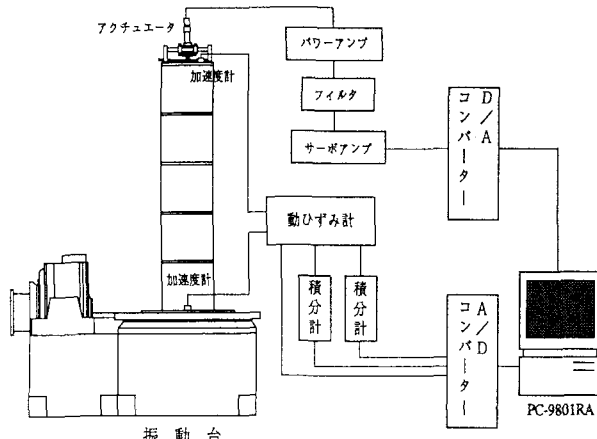


図-2 制御実験装置の概要

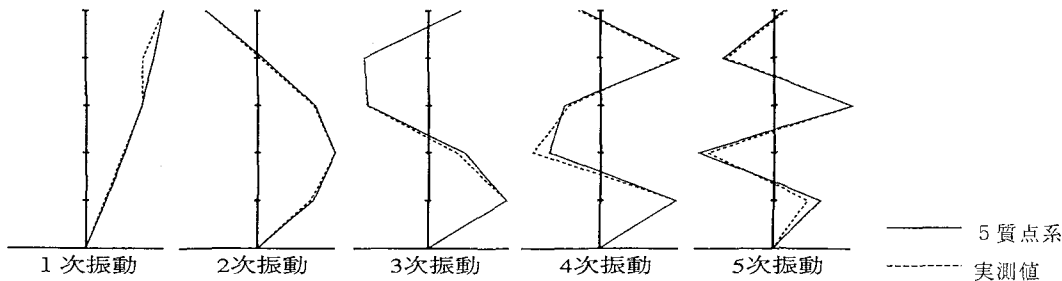


図-3 振動モード

3. 構造系のモデル化と最適レギュレータ

表-1 構造物の振動特性

振動次数	固有振動数 (Hz)			
	有限要素法	5質点系	実測値	減衰定数
1次	2.36	2.43	2.39	0.0064
2次	7.24	7.29	7.52	0.0050
3次	11.98	12.01	12.70	0.0045
4次	15.90	15.92		
5次	18.47	18.48		

構造物の支点に対する相対変位を $\mathbf{y}(t)$ とする。基盤に強制外力 $\mathbf{g}(t)$ が作用し、制御力 $\mathbf{u}(t)$ が図-2のように最上部に作用すると、構造物の運動方程式は次式のように表される。

$$m \ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{c} \dot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{k} \mathbf{y}(t) = \mathbf{b}_1 \mathbf{g}(t) + \mathbf{b}_2 \mathbf{u}(t) \quad (1)$$

ここに \mathbf{m} 、 \mathbf{c} 、 \mathbf{k} は、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。また、相対変位 $\mathbf{y}(t)$ は、基準座標 $\mathbf{q}(t)$ と振動モードマトリックス Φ を用いると、次式で表される。

$$\mathbf{y}(t) = \Phi \mathbf{q}(t) \quad (2)$$

これを(1)式に代入し、さらに、基準座標から構成される状態変数ベクトル

$$\mathbf{x}_r = [q_1 \quad \dot{q}_1 \quad q_2 \quad \dot{q}_2 \quad q_3 \quad \dot{q}_3]^T \quad (3)$$

を用いると(4)式のような状態方程式が得られる。第5質点を観測するとすれば、観測出力は(5)式のようなになる。

$$\dot{\mathbf{x}}_r(t) = \mathbf{A}_r \mathbf{x}_r(t) + \mathbf{B}_r w(t) + \mathbf{D}_r u(t) \quad (4)$$

$$r(t) = \mathbf{C}_r \mathbf{x}_r(t) \quad (5)$$

$$\mathbf{A}_r = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1 & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{a}_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{a}_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_i^2 & -2h_i\omega_i \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \phi_{11} & 0 & \dots & \phi_{13} & 0 \\ 0 & \phi_{11} & \dots & 0 & \phi_{13} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \phi_{51} & 0 & \dots & \phi_{53} & 0 \\ 0 & \phi_{51} & \dots & 0 & \phi_{53} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_r = [\phi_{51} \ 0 \ \phi_{52} \ 0 \ \phi_{53} \ 0],$$

$$\mathbf{B}_r = \mathbf{C}^T \cdot [0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1]^T$$

$$\mathbf{D}_r = \mathbf{C}^T \cdot [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$$

次に、最適レギュレータ理論は、2次形式評価関数 J を用いている。

$$J = \int_0^{\infty} [\mathbf{x}(t)^T \mathbf{Q} \mathbf{x}(t) + u(t)^T \mathbf{R} u(t)] dt \quad (6)$$

これより、次の制御力を得る。

$$u(t) = -\mathbf{K} \mathbf{x}(t), \quad \mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \quad (7)$$

このとき \mathbf{P} は、次に示すリカッチの方程式の解である。

$$\mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = \mathbf{O} \quad (8)$$

4. H^{*}制御理論

図-4 のような制御系を考える。外乱 $w(t)$ から制御量 z_1, z_2 までの伝達関数をそれぞれ $\mathbf{M}(s), \mathbf{N}(s)$ とする。

$$\mathbf{M}(s) = \frac{\mathbf{P}(s)}{\mathbf{I} - \mathbf{C}(s)\mathbf{P}(s)}, \quad \mathbf{N}(s) = \frac{\mathbf{C}(s)\mathbf{P}(s)}{\mathbf{I} - \mathbf{C}(s)\mathbf{P}(s)} \quad (9)$$

外乱を抑制するには、 $\mathbf{M}(s)$ をなるべく小さくするような補償器 $\mathbf{C}(s)$ を設計すればよい。また、実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を伴ってくる。安定な制御対象 $\mathbf{P}(s)$ に無視された高次モードの誤差 $\Delta \mathbf{P}(s)$ が入ってくるとする。 $\mathbf{N}(s)$ において、 $\mathbf{P}(s)$ が $\Delta \mathbf{P}(s)$ 変化しても、系が安定であるためには、

$$\| \mathbf{N}(j\omega) \Delta \mathbf{P}(j\omega) \|_{\infty} < 1 \quad (10)$$

となれば、ロバスト安定となることが知られている。評価関数として H^{*}ノルム

$$\| \mathbf{G}(s) \|_{\infty} = \max_{0 \leq \omega < \infty} | \mathbf{G}(j\omega) | \quad (11)$$

を用いる。周波数の低域と高域で重みをかけるフィルタ $\mathbf{W}_1(s), \mathbf{W}_2(s)$ を導入する。図-4 のような一般化プラントを対象にして、 z_1, z_2 なる制御量を用いる。低次モードの制御効果を高め、かつロバスト安定な制御を同時に実現する制御を考える。すなわち、

$$\mathbf{G}_{wz_1}(s) = \mathbf{M}(s)\mathbf{W}_1(s), \quad \mathbf{G}_{wz_2}(s) = \mathbf{N}(s)\mathbf{W}_2(s) \quad (12)$$

としたとき

$$\left\| \frac{G_{wz1}(s)}{\gamma} \right\|_{\infty} < 1$$

$$\left\| G_{wz2}(s) \right\|_{\infty} < 1$$

となる評価関数を満足するような正数 $\gamma > 0$ を与え、制御器 $C(s)$ を設計する。

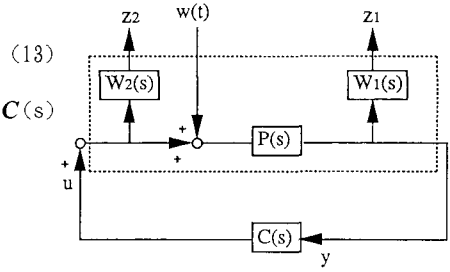


図-4 一般化プラント

5. 状態フィードバックによる H^{∞} 制御理論

外乱抑制とロバスト安定問題を考えるためにフィルターを設計する。このような、ローパスフィルターとハイパスフィルターの伝達関数 $W_1(s)$, $W_2(s)$ を考える。

$$W_1(s) = k_{f1} \frac{\Omega_1^2}{s^2 + 2\zeta_1\Omega_1 s + \Omega_1^2}, \quad W_2(s) = k_{f2} \frac{s^2 + 2\zeta_3\Omega_3 s + \Omega_3^2}{s^2 + 2\zeta_2\Omega_2 s + \Omega_2^2} \quad (14)$$

これらの伝達関数は、次の状態方程式より導かれる。

$$\ddot{v}_1 + 2\zeta_1\Omega_1 \dot{v}_1 + \Omega_1^2 v_1 = k_{f1}\Omega_1 r(t), \quad z_1 = \Omega_1 v_1 \quad (15)$$

$$\ddot{\lambda}_1 + 2\zeta_2\Omega_2 \dot{\lambda}_1 + \Omega_2^2 \lambda_1 = k_{f2} u(t), \quad z_2 = \ddot{\lambda}_1 + 2\zeta_3\Omega_3 \dot{\lambda}_1 + \Omega_3^2 \lambda_1 \quad (16)$$

$$\mathbf{v}(t) = [v_1 \ v_2]^T, \quad \boldsymbol{\lambda}(t) = [\lambda_1 \ \lambda_2]^T, \quad \mathbf{z}(t) = [z_1 \ z_2]^T$$

と、改めてマトリックス表示すると、次式が与えられる。

$$\dot{\mathbf{v}}(t) = \mathbf{A}_{w1} \mathbf{v}(t) + \mathbf{B}_{w1} \mathbf{C}_r \mathbf{x}_r(t), \quad \dot{\boldsymbol{\lambda}}(t) = \mathbf{A}_{w2} \boldsymbol{\lambda}(t) + \mathbf{B}_{w2} u(t) \quad (17)$$

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{E}_r \begin{bmatrix} \mathbf{v}(t) \\ \boldsymbol{\lambda}(t) \end{bmatrix} + \mathbf{F}_r u(t)$$

各フィルターを図-5に示した。 ΔP は、5自由度系の構造物と3自由度系の制御系の誤差である。

次に、拡大系の状態変数ベクトルを次のように定める。

$$\mathbf{x}(t) = [\mathbf{x}_r(t) \ \mathbf{v}(t) \ \boldsymbol{\lambda}(t)]^T$$

拡大系の状態方程式は、次のようになる。

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A} \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_1 w(t) + \mathbf{B}_2 u(t) \quad (18)$$

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{C}_1 \mathbf{x}(t) + \mathbf{D}_{12} u(t) \quad (19)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_2 \mathbf{x}(t) \quad (20)$$

ここで、

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_r & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{B}_{w1} \mathbf{C}_r & \mathbf{A}_{w1} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{A}_{w2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_1 = [\mathbf{B}_r \ \mathbf{O} \ \mathbf{O}]^T, \quad \mathbf{B}_2 = [\mathbf{D}_r \ \mathbf{O} \ \mathbf{B}_{w2}]^T$$

$$\mathbf{C}_1 = [\mathbf{O} \ \mathbf{E}_r], \quad \mathbf{D}_{12} = [\mathbf{O} \ \mathbf{D}_{w2}]^T$$

$$\mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{r1} & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{I} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{I} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_{r1} = \begin{bmatrix} \phi_{51} & 0 & \phi_{52} & 0 & \phi_{53} & 0 \\ 0 & \phi_{51} & 0 & \phi_{52} & 0 & \phi_{53} \end{bmatrix}$$

$$w(t) = [0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1]^T \cdot w(t)$$

$$\text{制御量: } \mathbf{z}(t) = [z_1 \ z_2]^T \quad \text{観測量: } \mathbf{y}(t) = [y_5(t) \ \dot{y}_5(t) \ \mathbf{v}(t) \ \boldsymbol{\lambda}(t)]^T$$

(18),(19)式のシステムにおいて、外乱 $w(t)$ から制御量 z_1, z_2 までの伝達関数をそれぞれ $G_{wz1}(s)$ 、

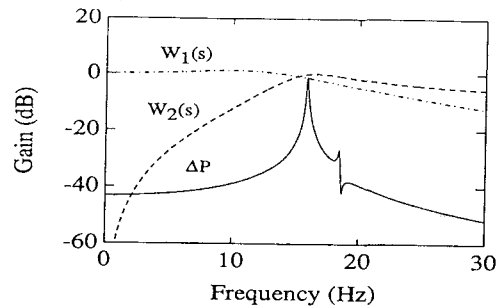


図-5 システム誤差と重み関数

$$\mathbf{A}_F = \mathbf{A} - \mathbf{B}_2 \mathbf{D}_{12}^T \mathbf{C}_1$$

$$\mathbf{A}_F^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_F + \mathbf{P} (\mathbf{B}_1 \mathbf{B}_1^T / \gamma^2 - \mathbf{B}_2 \mathbf{B}_2^T) \mathbf{P} + \mathbf{C}_1^T (\mathbf{I} - \mathbf{D}_{12} \mathbf{D}_{12}^T) \mathbf{C}_1 + \varepsilon \mathbf{I} = \mathbf{O}$$

$$\varepsilon > 0 \text{ に対して } \mathbf{P} \text{ は正定解}$$

$$\mathbf{F} = -\mathbf{B}_2^T \mathbf{P} - \mathbf{D}_{12}^T \mathbf{C}_1$$

図-6 状態フィードバックゲインの決定法

$G_{wz2}(s)$ とし、(13)式の H^∞ ノルムを満足するような γ を定め、制御力 $u(t)$ を決定する。

$$u(t) = Fx(t) \tag{21}$$

最適フィードバックゲイン F は、図-6の手順⁽²⁾で求められる。

6. 出力フィードバックによる H^∞ 制御理論

出力フィードバックによる H^∞ 制御理論は、観測量 $y(t)$ のみが観測可能な場合、外乱 $w(t)$ から、制御量 $z(t)$ までの伝達関数 $G_{wz}(s)$ が $\|G_{wz}(s)\|_\infty < \gamma$ を満たすような最適な補償器 $K(s)$ を決定するものである。このとき補償器 $K(s)$ は以下の状態方程式で定義されているものとする。

$$\dot{S}(t) = A_H S(t) + B_H y(t), \quad u(t) = C_H S(t) \tag{22}$$

上記の補償器のパラメータの設計を行う。これは、図-7に示す手順⁽²⁾で求められ、 A_H 、 B_H 、 C_H が得られる。 ϵ 、 μ は、それぞれ P および Q を正定マトリックスとする正数である。

ここで、状態変数ベクトルを

$$X_d(t) = [x(t)^T \quad S(t)^T]^T$$

とおいて、改めてマトリックス表示すると、出力フィードバックにおける状態方程式、観測方程式、および制御力 $u(t)$ はそれぞれ次式ようになる。

$$\dot{X}_d(t) = A_d X_d(t) + B_{d1} w(t) + B_{d2} u(t) \tag{23}$$

$$Y_d(t) = C_d X_d(t) \tag{24}$$

$$u(t) = C_H S(t) \tag{25}$$

ここに、それぞれのマトリックスは次式である。

$$A_d = \begin{bmatrix} A & O \\ B_H C_2 & A_H \end{bmatrix}, \quad B_{d1} = [B_1 \quad O]^T, \quad B_{d2} = [B_2 \quad O]^T, \quad C_d = \begin{bmatrix} C_2 & O \\ O & I \end{bmatrix}$$

$$Y_d(t) = [y(t)^T \quad S(t)^T]^T$$

7. 数値解析と考察

(1) 地震外力と構造物の応答

構造物に作用する外力として、図-8に示すようなEl Centro地震加速度波形(N-S成分)を用いた。図-9 a)に、構造物の最上部における変位の周波数応答を示す。点線が、振動制御を行わない場合の構造物の応答で、実線がレギュレータ理論により構造物の振動制御を行った場合の応答である。また、図-9 b)は、El

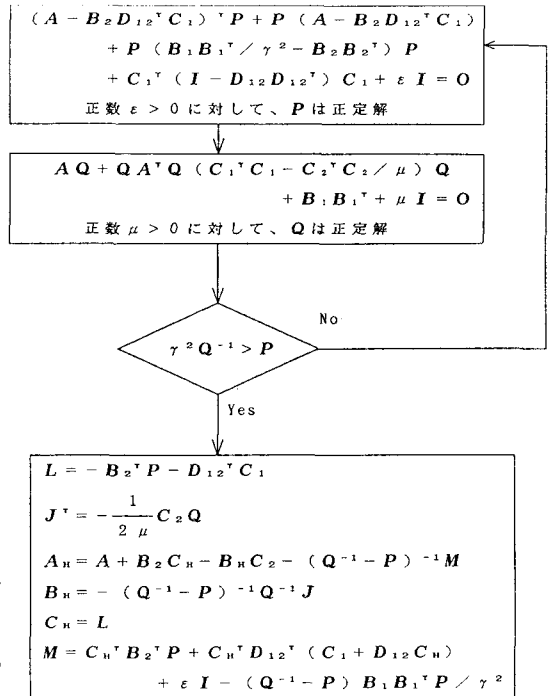


図-7 出力フィードバックゲインの決定法

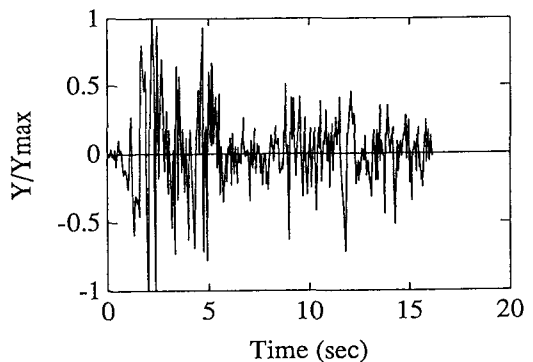


図-8 El Centro地震加速度波形(N-S成分)

Centro 地震外力を受けた場合の構造物の最上部における変位の時間歴応答である。点線が制御なしの場合で、実線がレギュレータ理論により制御をかけた場合であり、これを制御なし応答の最大値で基準化した。図-9 c)に対応する制御力を示す。制御力は、この最大値(U_{max})で基準化して表示したものである。ここでは、(8)式における重みパラメータを $R=1$ 、 $Q=10I$ とした。この値は、 R 、 Q の値を変化させて最適と思われるものを用いた。本研究では、最適レギュレータ理論に対して H^∞ 制御理論による制御効果について考察した。

(2) H^∞ 制御理論による振動制御

状態フィードバックによる H^∞ 制御理論の最適パラメータは、繰り返し計算の結果 $\gamma=2.0$ 、 $\varepsilon=0.03$ となった。図-10 a)はこのパラメータにおける変位の周波数応答を示す。点線が、制御をかけない場合の応答で、破線がレギュレータ理論により制御をかけた場合の応答、実線が H^∞ 制御理論により制御をかけた場合の応答である。このように、 H^∞ 制御理論による制御を行った場合、最適レギュレータ理論より低いレベルの周波数応答が得られている。図-10 b)の実線に示す変位の時間歴応答も、図-9 b)のレベルよりも低くなっている。次に、制御力に関してみると図-9 c)と図-10 c)のように、ほぼ同じ程度であり、それらの標準偏差は、図-9 c)において $\sigma=0.19$ 、図-10 c)において $\sigma=0.21$ である。

次に、出力フィードバックによる H^∞ 制御理論について検討した。最適パラメータは、 $\gamma=2.0$ 、 $\varepsilon=0.01$ 、 $\mu=0.25$ となった。このときの変位の周波数応答を図-11 a)に示す。レギュレータ理論の周波数応答に比べ、出力フィードバックの周波数応答はレベルが下がっている。図-11 b)に示す変位の時間歴応答においても、レギュレータ理論のレベルよりも低い応答を示した。図-11 c)に示す制御力に関しては、レギュレータ理論、 H^∞ 制御理論とともに同程度であり、図-10 c)の制御力の標準偏差は、 $\sigma=0.24$ である。

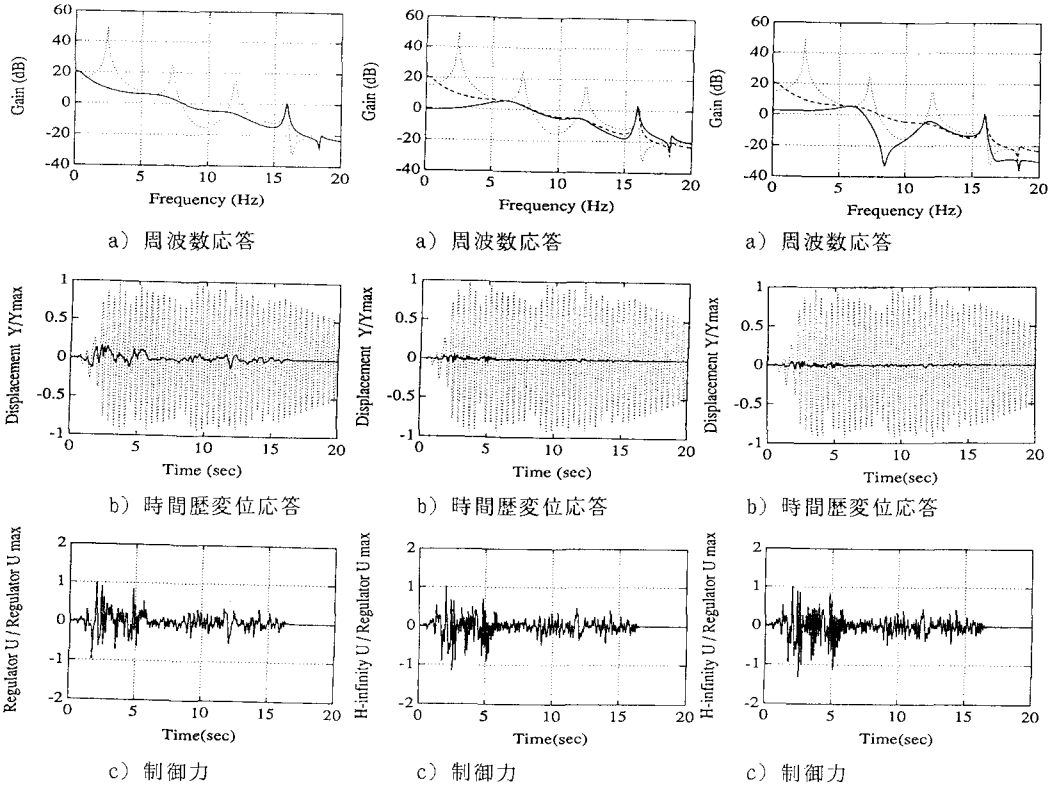


図-9 レギュレータ理論

図-10 状態フィードバックによる H^∞ 制御理論

図-11 出力フィードバックによる H^∞ 制御理論

(3) 構造系の振動特性の変化に対する検討

ロバスト安定性の効果を調べるために、前述の構造特性でパラメータを設計し、次に構造モデルの固有振動数を各次数とも1/2に変化させた。それぞれ、最適レギュレータと出力フィードバックに対する変位の周波数応答を図-12に示す。点線が制御なし、破線がレギュレータ理論、実線が H^∞ 制御理論である。構造系の周波数特性を変化させたことにより、レギュレータ理論と H^∞ 制御理論の周波数応答は図-9 a) から図-12 のように変化している。図-13 にレギュレータ理論と H^∞ 制御理論により制御した構造系の変位応答を示した。また、図-14に、それぞれの制御力を示した。 H^∞ 制御理論を適用した場合は、図-14のように若干制御力が大きくなっている。標準偏差で比べるとレギュレータ理論の制御力は $\sigma=0.20$ 、 H^∞ 制御理論の制御力は、 $\sigma=0.26$ となっている。しかし、このことを考慮しても、図-13から見られるように H^∞ 制御理論を適用した場合が制御効果が大きいことが分かる。ここで、レギュレータ理論による制御を行った場合の応答の標準偏差は $\sigma=0.11$ であり、 H^∞ 制御理論の場合は $\sigma=0.04$ である。

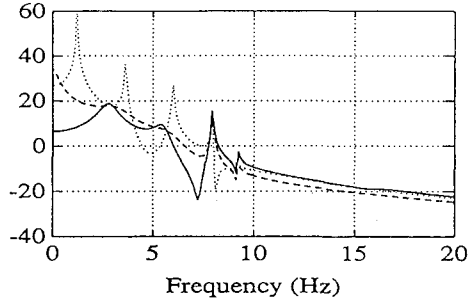
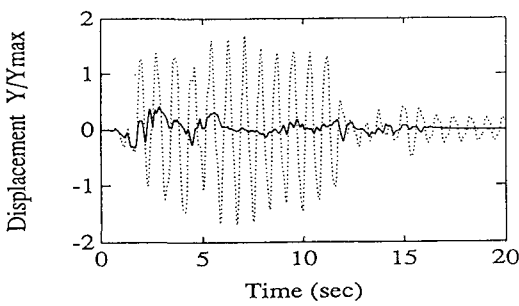
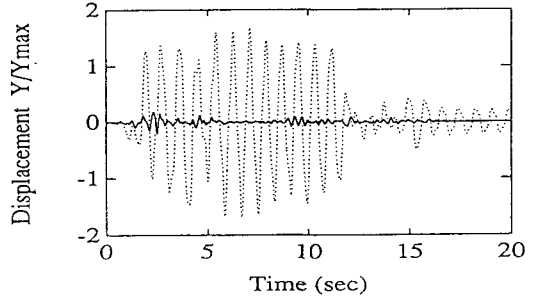


図-12 周波数応答

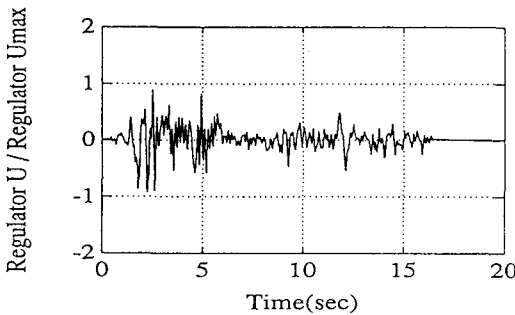


a) レギュレータ理論

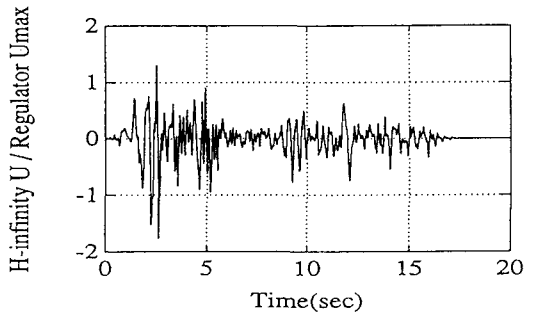


b) H^∞ 制御理論

図-13 時間歴変位応答



a) レギュレータ理論



b) H^∞ 制御理論

図-14 制御力

8. まとめ

外乱抑圧とロバスト安定を考慮した、 H^∞ 制御理論による状態フィードバック、および出力フィードバックの結果と最適レギュレータ理論の結果とを比較した。得られた結果を要約すると次のようになる。

- (1) 5層の塔状構造物模型を5質点系に低次元化し最適レギュレータ理論、 H^∞ 制御理論による状態フィードバック、および出力フィードバック制御の定式化を行い、最適パラメータを決定した。
- (2) H^∞ 制御理論による状態フィードバック制御では、周波数応答、時間歴変位応答においてレギュレータ理論より低いレベルの応答を示した。制御力に関してもレギュレータ理論のものよりも小さな制御力であった。
- (3) H^∞ 制御理論による出力フィードバック制御においても、周波数応答、時間歴変位応答、共にレギュレータ理論のものより低い応答レベルを示した。
- (4) 構造モデルの振動数を $1/2$ に低下させた場合、最適レギュレータ理論、および H^∞ 制御理論による制御効果は変化しなかった。しかし、この場合でも H^∞ 制御理論による制御がレギュレータ理論による制御より効果的であった。

参考文献

- (1) 美多 勉：ロバスト制御，電会誌，vol 110, No. 8, pp. 649~652, 1990年2月
- (2) 三平 満司・美多 勉：状態空間論による H^∞ 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^∞ 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^∞ 最適制御による多自由度系構造物のアクティブ振動制御の振動制御，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^∞ 最適制御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論理的検討，日本機械学会，pp. 177~183, 1991年9月
- (8) 梶原 逸郎、稲垣 亨、長松 昭男ら：モード解析を用いた連続体構造物の H^∞ ロバスト振動制御，日本機械学会，pp. 329~336, 1992年7月
- (9) 奥松 俊博、岡林 隆敏、山本 実：オブザーバを用いた構造物のアクティブ振動制御に関する実験的研究，土木学会誌第47回概要集，pp. 544~545, 1992年

(1993年9月16日受付)