

アクチュエータの動特性を考慮した塔状構造物のオブザーバーを用いたアクティブ振動制御

長崎大学大学院 学生員 〇山本 実

長崎大学工学部 正 員 岡林隆敏

長崎大学工学部 学生員 木戸正敏

オイレス工業(株) 正 員 下田郁夫

1. はじめに

土木・建築構造物の長大化に伴う振動問題を克服することが重要な課題となっている現在、振動対策として様々な方法が提案されている。その方法のひとつであるアクティブ振動制御は、振動制御の有効性が確認されすでに実用化の段階に入りつつある。著者らの研究では、最小次元オブザーバーを用いたアクティブ振動制御に関する実験を行ってきたが、地震外力に対する初期の最大応答を十分低減することはできていない。そこで本研究では制御力を出力する部分に着目し、さらにアクチュエータの動特性を考慮することによって制御効果の向上をはかるものである。

2. 制御理論

制御対象構造物は図-1のような5層の塔状構造物であり、図-2のような制御モデルにモデル化する。表-1に構造物の振動特性を示す。

構造系に外力 $w(t)$ が作用する場合の運動方程式を状態空間表示すると

以下になる。

$$\dot{X}_b(t) = A_b X_b(t) + B_{b1} u(t) + B_{b2} w(t) \quad (1)$$

$$Y_b(t) = C_b X_b(t) \quad (2)$$

ここに $X_b(t)$ は基準座標から構成される状態変数である。このとき A_b はシステム行列、 B_{b1} 、 B_{b2} は係数行列、 C は観測行列であり、 $Y(t)$ は観測を表す。 $u(t)$ はフィードバックゲイン行列: K_b により以下のように求められる。

$$u(t) = -K_b X_b(t) \quad (3)$$

K_b は最適レギュレータ理論¹⁾によりリッカチの方程式を解くことで求められる。

次にオブザーバを構成する。最小次元オブザーバーは次式で与えられる。

$$\dot{\hat{\omega}}(t) = \hat{A}_b \hat{\omega}(t) + \hat{B}_{b1} u(t) + \hat{B}_{b2} w(t) + G_b Y_b(t) \quad (4)$$

$$\hat{X}_b(t) = \hat{C}_b \hat{\omega}(t) + \hat{D}_b Y_b(t) \quad (5)$$

オブザーバーの設計法は文献 1) を参考にした。オブザーバーを用いた振動制御では(3)式において $X_b(t)$ のかわりに $\hat{X}_b(t)$ を用いる。本研究では模型最上層の変位と速度を観測して、3次振動までの制御を行うものとする。

3. 出力系の動特性

図-3に実験に用いる振動制御システムを示す。ここでアクチュエータを含めた出力部分の動特性を調べ図-4に示す。このデータに対し最小二乗処理によるカーブフィッティングを行い、出力系のモデル化を行う。以下に出力系の式を示す。

$$\ddot{g}(t) + 2\zeta\omega_n \dot{g}(t) + \omega_n^2 g(t) = e(t) \quad (6)$$

$$\ddot{z}(t) + 2\zeta\omega_n \dot{z}(t) + \omega_n^2 z(t) = g(t) \quad (7)$$

$$\dot{X}_o(t) = A_o X(t) + B_o e(t) \quad (8)$$

$z(t)$ はアクチュエータの変位であり、 ζ 、 ω_n はそれぞれアクチュエータの減衰定数、

ω_n はそれぞれアクチュエータの減衰定数、

円振動数を表す。また $g(t)$ はアクチュエータの入力電圧であり、アクチュエータの位相特性を考慮して(6)式により、事前に位相を遅らせている。(8)式は(6)(7)式を行列表示したものである。(8)式を用いてカーブ

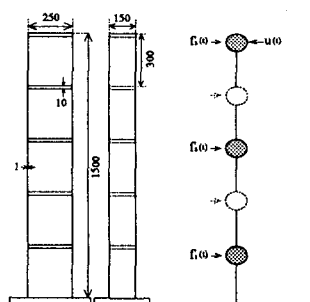


図-1 構造物模型

図-2 制御モデル

表-1 構造物模型の振動特性

振動次数	固有振動数(Hz)	減衰定数
f_1^*	0.925	0.0051
f_2^*	2.750	0.0028
f_3^*	4.750	0.0026
f_4	6.450	0.0023
f_5	7.800	0.0018

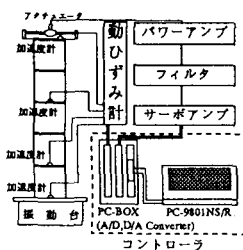


図-3 制御システム

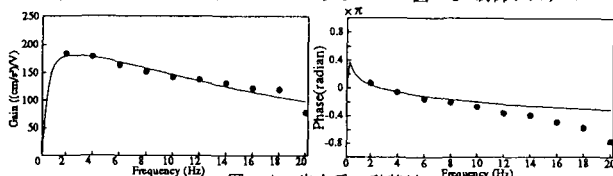


図-4 出力系の動特性

フィッティングを行った。図-4の曲線がそれである。このときのパラメータは $h_a=15.6$ 、 $\omega_a=2\pi f_a$ より $f_a=0.399$ である。

4. 出力系を組み込んだ状態方程式²⁾

出力系を考慮した場合、制御力は次のようになる。

$$u(t) = -m_a \ddot{z}(t) \quad (9)$$

m_a はアクチュエータのダンパマスを表す。さらに(1)式、(8)式を組み合わせ(9)式を代入すると次のようになる。

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_b(t) \\ \dot{X}_o(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_b & -m_a B_{b1} \\ O & A_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_b(t) \\ X_o(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} O \\ B_{o1} \end{bmatrix} e(t) + \begin{bmatrix} B_{b2} \\ O \end{bmatrix} w(t) \quad (10)$$

$$\dot{X}(t) = A X(t) + B_1 e(t) + B_2 w(t) \quad (11)$$

このとき $e(t)$ は次式のとおりになる。

$$e(t) = -K X(t) \quad (12)$$

(12)式における K は、(11)式を用いて構成されたフィードバック行列であり以下のようになる。

$$K = [k_b \ k_o] \quad (13)$$

またシミュレーションでは振動実験を想定し、図-5のようなEl-Centro

地震で振動台を動かした場合の、加速度応答波形を用いて行っている。

5. 数値解析結果と振動制御実験結果

出力系を考慮した場合の結果を示す。

図-6はシミュレーション結果である。

制御効果は5秒以降がよく現れており、16秒以後の自由振動に対しては止

まっている。初期の2秒前後における

最大応答にのみ制御効果は十分でない

図-7は実験結果である。ただし、これ

は(13)式の K をそのままフィードバック

したのではなく、出力系に対応する

フィードバック行列 k_o を相対的に小さくして制御したものである。応答波形全体にわたって制御効果は

十分に現れており、16秒以後の自由振動に対してはほとんど止まっている。しかし、2秒前後の初期の最大

応答に対して制御効果はあまり現れていない。またシミュレーション結果と比較すると5秒前後の波形は異

なるが全体的な傾向はよく一致している。

図-8a) b)にオブザーバーを用いた振動制御のシミュレーション結果と実験結果を示す。図-8 a)は全体的

に応答のレベルが下がっており十分な制御効果が現れている。これは出力系を考慮していないためであり、

出力系を考慮すれば図-6 b)と同様の結果が得られると考える。図-8 b)を図-7 b)と比較すると、図-7 b)の

ほうがわずかであるが制御効果がよく現れている。しかし、2秒前後における初期の最大応答に対する制御

効果は共に差がなく、全体的な制御効果の傾向に変化は現れていない。

5. まとめ

本研究では、出力系を考慮した振動制御のシミュレーションと実験を行った。出力系を考慮しても制御効

果に対してあまり変化はなかった。これは本研究における出力系の動特性が制御対象としている周波数帯域

においてほとんど平坦であるためと考える。

[参考文献] 1)入門現代制御理論, 啓学出版, 1987年. 2)川谷:土木学会論文集, No. 465 1993. 4

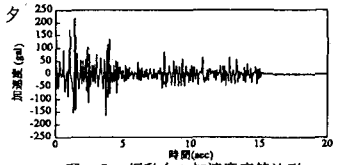


図-5 振動台の加速度応答波形

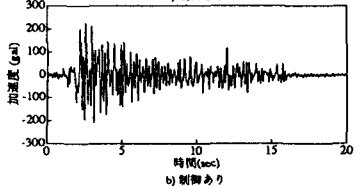
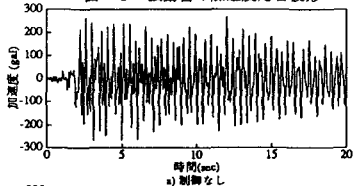


図-6 出力系を考慮した振動制御シミュレーション結果

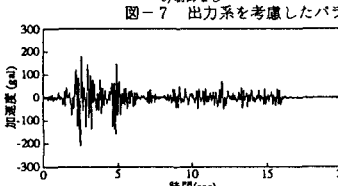
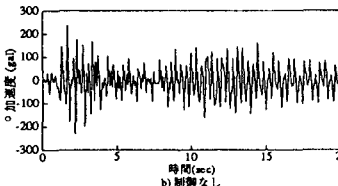


図-7 出力系を考慮したパラメータを用いた振動制御実験結果

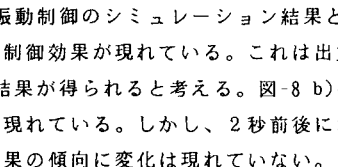
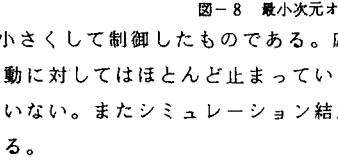


図-8 最小次元オブザーバーを用いた振動制御