

I-620

アクチュエータの動特性を考慮した塔状構造物のアクティブ振動制御

日本公営(株) 正 員○山本 実
長崎大学工学部 学生員 木戸正敏

長崎大学工学部 正 員 岡林隆敏
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、制御力 $u(t)$ 、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ようになる。

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

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

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_b 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。

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。

$$\ddot{g}(t) + 2\tau f_p \dot{g}(t) = e(t) \quad (4)$$

$$\ddot{z}(t) + 2h_a \omega_a \dot{z}(t) + \omega_a^2 z(t) = g(t) \quad (5)$$

$$\dot{X}_o(t) = A_o X_o(t) + B_o e(t) \quad (6)$$

$z(t)$ はアクチュエータの変位であり、 h_a 、 ω_a はそれぞれアクチュエータの減衰定数、振動数に対応するパラメータである。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(4)式により、事前に位相を遅らせている。(6)式は(4)式を行列表示したものである。(8)式を用

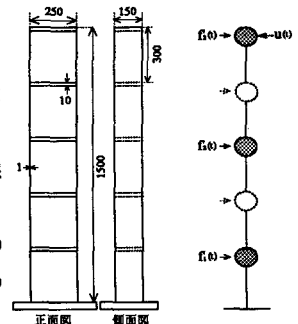


図-1 構造物模型 図-2 制御モデル

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

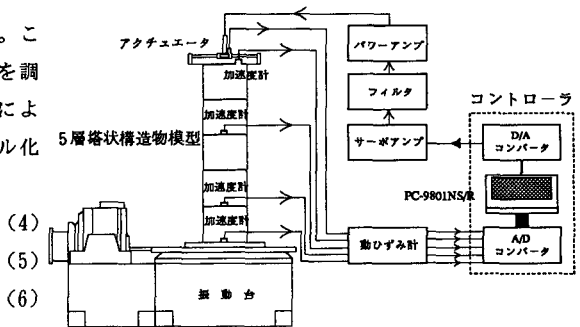


図-3 振動制御システム

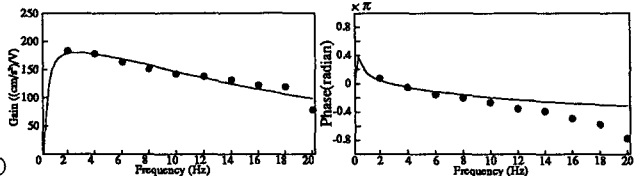


図-4 出力系の動特性

いてカーブ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。

$$u(t) = -m_a \ddot{z}(t) \quad (7)$$

m_a はアクチュエータのダンパマスの質量を表す。さらに(1)式、(6)式を組み合わせ(7)式を代入すると次のようになる。

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_b(t) \\ \dot{X}_o(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_b & -m_a B_{b1} \\ O & A_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_b(t) \\ X_o(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} O \\ B_o \end{bmatrix} e(t) + \begin{bmatrix} B_{b2} \\ O \end{bmatrix} w(t) \quad (8)$$

$$\dot{X}(t) = AX(t) + B_1 e(t) + B_2 w(t) \quad (9)$$

このとき $e(t)$ は次式のとおりになる。

$$e(t) = -KX(t) \quad (10)$$

(10)式における K は、(9)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表せる。

$$K = [k_b \quad k_o] \quad (11)$$

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秒前後の応答波形に対してのみ、制御効果は小さい。

図-7は実験結果である。ただし、

これは(11)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3秒前後の波

形は若干異なるが、全体的な傾向はよく一致している。

図-8a) b)に出力系を考慮していない、これまで行ってき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。これは図-6 b)と同様の結果である。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。

図-8 a) b)に出力系を考慮していない、これまで行ってき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。これは図-6 b)と同様の結果である。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。

図-8 a) b)に出力系を考慮していない、これまで行ってき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。これは図-6 b)と同様の結果である。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。

図-8 a) b)に出力系を考慮していない、これまで行ってき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。これは図-6 b)と同様の結果である。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。

図-8 a) b)に出力系を考慮していない、これまで行ってき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。これは図-6 b)と同様の結果である。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

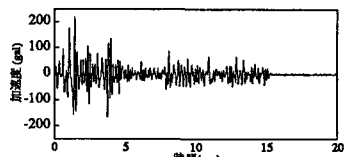


図-5 振動台の加速度応答波形

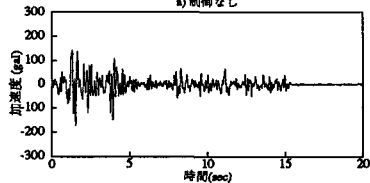
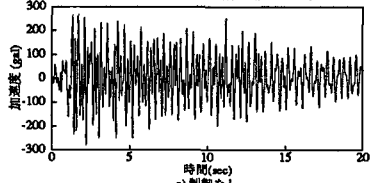


図-6 出力系を考慮した振動制御シミュレーション結果

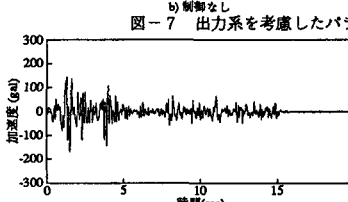
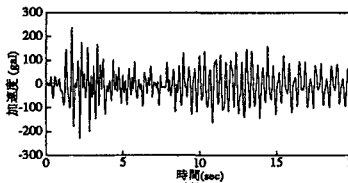


図-7 出力系を考慮したパラメータを用いた振動制御実験結果

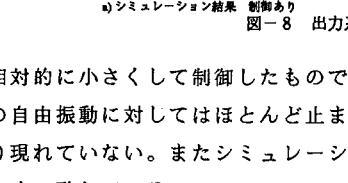
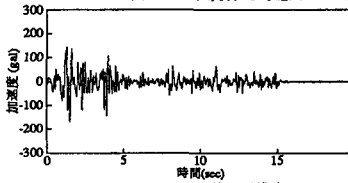


図-8 出力系を考慮しない振動制御