

地震外力を受ける構造物のアクティブ振動制御の実現

長崎大学工学部 学生員○奥松俊博 長崎大学工学部 正員 岡林隆敏
 長崎大学工学部 学生員 山本 実

1. はじめに

動的な外力の作用する構造物に対して、能動的に振動を制御する制振技術が土木分野においても実用化されつつある。長大構造物は一般に外力作用時には低次振動成分が卓越し、そのような振動次数の抑制が振動制御の目的となる。また実際に振動制御を行う場合、制御するための全ての情報が得られるとは限らない。現代制御理論¹⁾に基づいて振動制御を行う場合、全状態量をフィードバックする必要がある。本研究は、制御対象となる各振動モードが観測できる位置に設置した数個のセンサーからの限られた観測量により、全ての状態量を推定するオブザーバーを用いて複数の振動モードのアクティブ制御実験を行い、その有効性を実証するものである。図-1にオブザーバーを用いたアクティブ振動制御システムを示した。

2. 制御対象構造物とそのモデル化

制振対象構造物は図-2a)に示す5層塔状構造物である。これを5質点系とし振動解析した結果、固有振動数と振動モードは表-1、図-3にみられるように実測値とよい一致を示している。モデルの減衰定数は実測により0.5%前後であることが確認された。次に構造物の複数の低次振動を制御対象とするために、図-2b)のように更に簡略化した3質点系とし制御モデルを構成する。地震力 $f(t)$ は各質点に作用し制御力 $u(t)$ は最上点に作用させるものとする。外力 $g(t)$ をうける系の運動方程式(1)はモード変換(2)を行うことにより(3)式で表せる。

$$M\ddot{y}(t) + C\dot{y}(t) + Ky(t) = g(t) \quad (1)$$

$$y(t) = \Phi q(t) \quad (2)$$

$$\ddot{q}(t) + H\dot{q}(t) + \Omega q(t) = \Phi^T g(t) \quad (3)$$

状態変数 $X(t)$ により(3)式は(5)式のような状態方程式で表される。

$$X(t) = [q_1(t) \dot{q}_1(t) \cdots q_n(t) \dot{q}_n(t)]^T \quad (4)$$

$$\dot{X}(t) = AX(t) + Bu(t) + DF(t) \quad (5)$$

ここに A は $(2n \times 2n)$ 次元のシステム行列、 B 、 D は制御力の係数ベクトルおよび外力の係数行列であり、 $F(t)$ は次に示すような $2n$ 次元の地震力ベクトルである。

$$F(t) = [0 \ f(t) \ \cdots \ 0 \ f(t)]^T \quad (6)$$

また $2k$ 次元の観測量 $Y(t)$ は、 $(2k \times 2n)$ 次元の観測マトリックス C を用いて、次の出力方程式として表すことができる。

$$Y(t) = CX(t) \quad (7)$$

制御力 $u(t)$ は、オブザーバーによる状態推定量 $\hat{X}(t)$ に最適ゲイン行列 K を介して、次式より生成される。

$$u(t) = -K\hat{X}(t) \quad (8)$$

K は最適レギュレータ理論¹⁾を用いてリカッチの方程式(9)を解くことにより得られる。 R と Q は最適パラメータを決定するための重み行列であり、この値を変化させることにより、系の特性を実験的に変化させることができる。

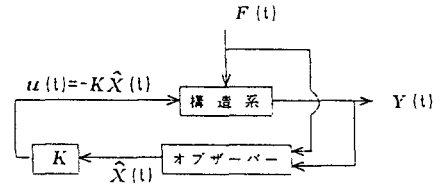


図-1. オブザーバーを用いたアクティブ振動制御

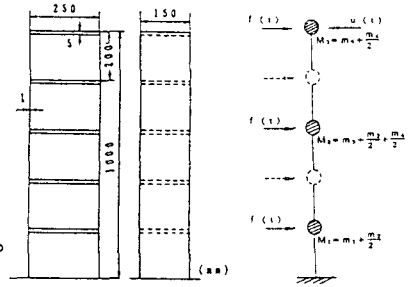


図-2. 構造物模型と制御モデル

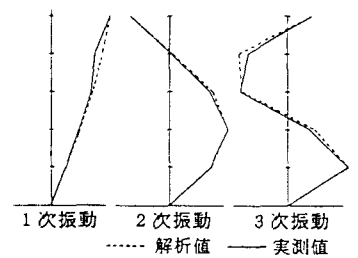


図-3. 振動モード

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
	解析値	実測値	
1次	2.43	2.39	0.0064
2次	7.29	7.52	0.0050
3次	12.0	12.7	0.0045

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (9)$$

$$K = R^{-1}B^T P \quad (10)$$

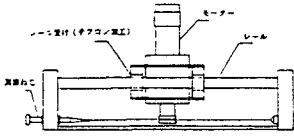


図-4. アクチュエータの概形

3. 振動制御システム

制御力を付加するための装置として図-4に示すアクチュエータを製作した。これは

構造物の振動方向に設置したレール上をモータを兼ねた質量体が加速度運動することで

制御力を発生する機構となっている。アクチュエータの動特性は図-5に示すように20Hzの範囲内においてはほぼ一定の力(約70g/v)を出力することが確認されている。本研究において実現したアクティブ制振システムを図-6に示す。構造物最上階と振動台に設置したセンサーから最上階の相対速度および地震加速度を検知しコントローラでオブザーバーにより状態量 $X(t)$ を推定する。ここでオブザーバーのゲインは極配置法により決定した。

4. 振動制御実験とその効果

本実験ではオブザーバーの極を $\lambda_1 = -4.72 \pm 47.01i$, $\lambda_2 = -7.48 \pm 79.40i$ に設定している。入力にはEl Centro地震波を用いて、これを15秒間出力させる。図-7は入力地震加速度波形でその最大値で基準化したものである。このときの振動台の加速度波形を図-8に示した。この波形で加振した場合の構造物最上階の加速度応答を図-9に示した。a)は制御のない場合である。b)は($R=1, Q=I$)に重みを設定して制御をかけた場合である。このとき、最大応答において約50%の加速度の減少となっている。パルス状の力に対しての制振効果に検討の余地はあるが、全体時間にわたり確実な制振効果を得ている。次に $R=2$ に変更すると、c)のような加速度応答になる。

5. おわりに

本研究では、オブザーバーを用いたアクティブ振動制御実験システムを実現し、その効果を確認することができた。最適パラメータを求めるための重みの決定次第では系が収束しにくくなるが、適当な値を選ぶと安定した系が得られる。

[参考文献] 1) 入門現代制御理論、啓学出版、1987年

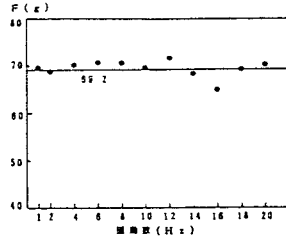


図-5. アクチュエータの動特性

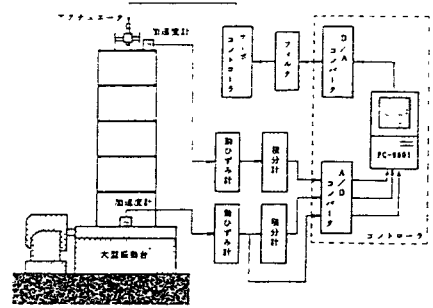


図-6. アクティブ振動制御システム

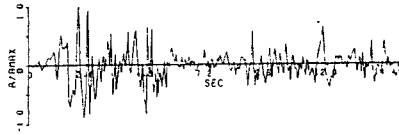


図-7. エルセントロ波形

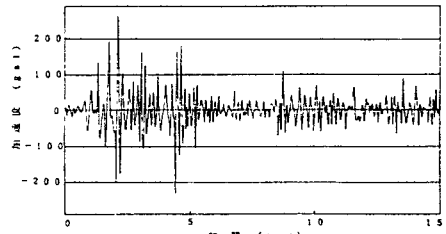
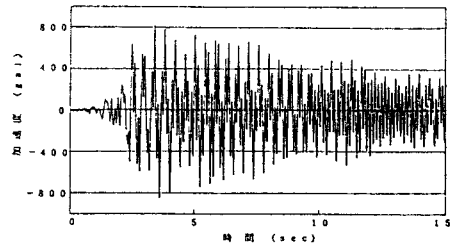
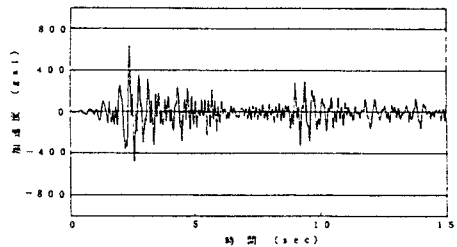


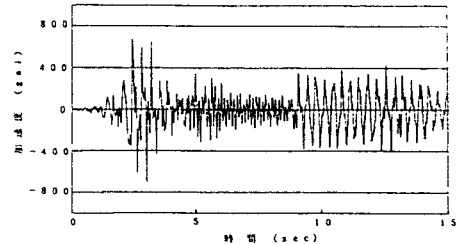
図-8. 振動台の加速度波形



a) 制御のない場合



b) $R=1, Q=I$ の場合



c) $R=2, Q=I$ の場合

図-9. 振動制御の効果