

I-449

オブザーバーを用いた構造物のアクティブ振動制御

（株）長 大 正 員 古江照巳
長崎大学工学部 正 員 岡林隆敏
長崎大学大学院 学生員 奥松俊博

1. はじめに

近年、土木・建築構造物の振動をアクティブに制御しようとする試みが、実用化の段階に入り、様々な技術が提案されている。これらの制御対象の特徴は、作用する外力により複数の振動モードが励起されたことにあり、少ない制振装置（アクチュエータ）により、このような振動を制御する必要がある。現代制御理論による最適制御では、全状態量をフィードバックするために、各振動次数に対応する観測点を確保しなければならない。

本研究は、オブザーバーの理論を用いて、少ない観測点のデータから多自由度系の振動制御の有効性を検討したものである。まず、制御対象のオブザーバーを設計し、その有効性を確認する。次に、オブザーバーにより推定された状態変数を用いて、不規則外力が作用する構造物の最適振動制御について検討した。

2. 対象構造物と構造物のモデル化

制御対象を図-1のような5層ラーメン構造とし、最上部の応答加速度を検出して、最上部に力を加えて振動を制御する。制御モデルは、構造物模型を有限要素法でモデル化して、これら5自由度系に置換する。構造物の解析モデルと実測による振動数を表-1に示した。振動制御は、3次振動までとした。また、実測による減衰定数を表-1に示した。模型はアルミニウム製であるので、減衰は非常に小さいものとなっている。図-2は、この構造物模型の振動モードである。計算では、アクチュエータの重量0.711kgを付加した場合である。5質点系モデルと実測結果は、良い一致を示している。

3. 構造物の解析モデルと応答解析

各質点に作用する外力を $H(t)$ とすると、系の運動方程式は、

$$M\ddot{Y}(t) + C\dot{Y}(t) + KY(t) = H(t) \quad (1)$$

となる。ここに、 M 、 C および K は、質量行列、減衰行列および剛性行列である。モーダル解析を用いて、基準座標を $Q(t)$ 、モード行列を Φ とし、状態変数を $X(t) = [Q(t)^T, \dot{Q}(t)^T]^T$ とすると、運動方程式(1)式は状態空間表示される。

$$\dot{X}(t) = AX(t) + F(t), \quad Y(t) = CX(t) \quad (2)$$

ここに、 $Y(t)$ は観測量、 B は観測行列である。

本研究では、応答解析を次のようなPade近似⁽¹⁾を用いて行なう。系の状態移行行列を、次式で表わすと、

$$\exp(Ah) = (I - Ah/2)^{-1} (I + Ah/2) \quad (3)$$

応答は、次のような差分表示となる。

$$(I - Ah/2) X_{j+1} = (I + Ah/2) X_j + (F_{j+1} + F_j) h/2 \quad (4)$$

ここに、 h は時間刻みである。

4. オブザーバーの設計と振動制御

構造物モデル(2)式と同次元の状態量を直接推定するものが、全次元オブザーバーである。推定量 $\hat{X}(t)$ は、

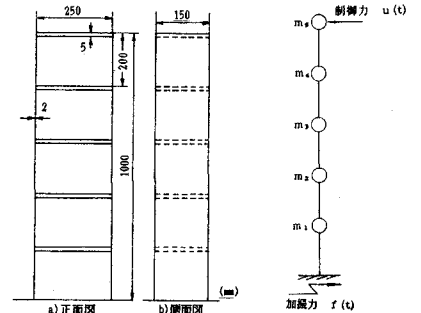


図-1 構造物模型と5質点系モデル

表-1 制御モデルの振動特性

振動次数	固有振動数 (Hz)			減衰定数 α
	有限要素法	5質点系	実測値	
1次	2.37	2.37	2.39	0.0064
2次	7.25	7.17	7.52	0.0050
3次	12.0	11.7	12.7	0.0045
4次	15.9	15.6		
5次	18.5	18.4		

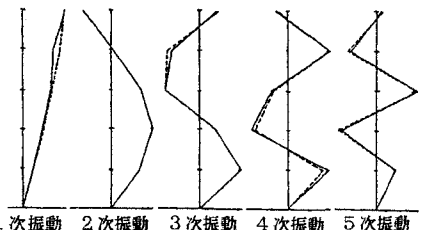


図-2 構造物モデルの振動モード

$$\dot{\hat{X}}(t) = A\hat{X}(t) + G(Y(t) - W(t)) + F(t) \quad (5)$$

で与えられる。 G はオブザーバーのゲインマトリックスである。 G は極配置法⁽²⁾により決定する。

最小次元オブザーバーは、観測値以外のオブザーバーの方程式を構成し、これから状態量を推定するものである。係数は、ゴピナスの方法⁽²⁾で求める。

$$\dot{\omega}(t) = \hat{A}\omega(t) + SF(t) + GY(t) \quad (6)$$

$$\hat{X}(t) = \hat{C}\omega(t) + DY(t)$$

オブザーバーにより振動の最適制御を行なうためには、(2)式において、 $F(t)$ の代わりに、制御力を改めて考える。

$$F(t) = BU(t) + EF(t) \quad (7)$$

制御力は、最適規則より、次のようになる。

$$U(t) = -K\hat{X}(t), \quad K = R^{-1}B^TP \quad (8)$$

P は、リカッチの方程式より求められる。

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

ここに、 R と Q は重み関数である。

オブザーバーとして、(5)式あるいは(6)式を用いて状態量を推定する。オブザーバーによる制御システムを図-3に示した。

5. 数値計算結果と考察

この計算は、実際に制御を行なうためのシミュレーションを想定しているので、制御対象として3自由度までを考えることにする。

図-5は、図-4のような不規則外力が作用した場合の、各次数の変位応答の結果とオブザーバーによる推定結果を示したものである。

$$\lambda_1 = -0.17 \pm 31.13i$$

$$\lambda_2 = -0.30 \pm 63.52i$$

の極配置を設定した結果である。図から明らかなように、シミュレーションと推定結果は、図上では識別できない程度に一致しており、オブザーバーの有効性が確認できた。

図-6は、不規則外力が作用したときの構造物の5

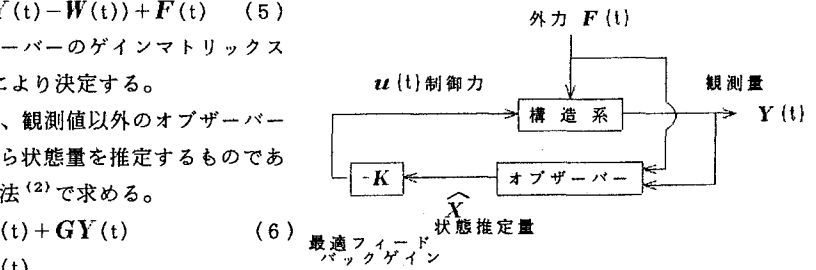


図-3 オブザーバーによる最適制御

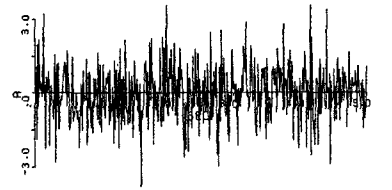
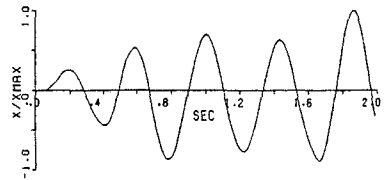
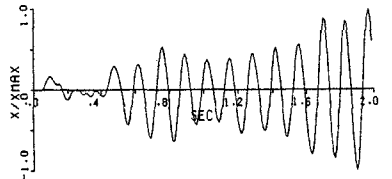


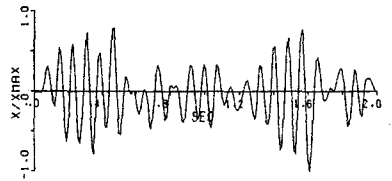
図-4 不規則外力



a) 1次振動



b) 2次振動



c) 3次振動

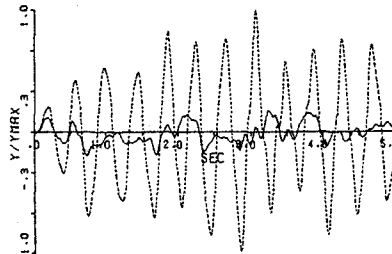


図-6 振動制御の効果

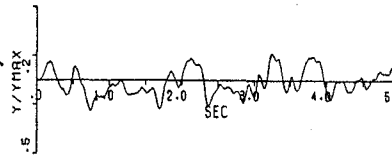


図-7 最小次元オブザーバーによる制御

図-5 オブザーバーの効果

質点目の変位応答と、状態変数を直接フィードバックさせた場合の結果を示したものである。制御は、5質点目に制御力をフィードバックさせている。図より、振動制御の効果が現れている。次に、5質点目の変位と速度が観測できたものとして、最小次元オブザーバーを構成し、制御を行なったものが図-7である。直接フィードバックした場合と同じ結果を示し、オブザーバーによる制御の有効性が確認できた。

〔参考文献〕(1)清水、渡辺他：日本機械学会論文集（第1部）43巻368号（昭和52年4月）、(2)吉田、川路他：メカニカルシステム制御、オーム社、1988年