

非定常外力を受ける構造物の最適アクティブ制御

長崎大学工学部 学生員 ○山本 実
 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、実用の段階に入り、様々な技術が提案されている。しかし、制御理論は、状態フィードバックのみを想定したものが多い。土木構造物に作用する外力は、地震荷重や走行車両による荷重を考えると、不規則な外力であり、さらに、強い非定常性を有している。従って、定常理論に立脚した制御理論で不十分な場合がある。制御する振動を平均的に抑え込むのか、最大応答を低下させるかによっても、制御則あるいは各種のパラメーターが変化する。このように制御の質を、コントローラーを用いて改善する試みがすすめられている。

本研究では、振動の最大応答を低減させる方法について考察を加えた。また、必要な状態量全てが観測できない場合を想定して、オブザーバーにより状態推定⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾を行ない、最適振動制御をシミュレーションにより検討したものである。

2. 制御対象

制御対象とする構造物は、図-1のような5層の骨組構造である。これを、5質点系の離散モデルに縮約し、3次振動までを制御の対象とする。このモデルの解析による振動数と実測による結果を、表-1に示した。両者は良い一致を示している。表には、実測による3次振動までの減衰定数も併記した。1次から3次振動までの振動モードを図-2に示した。点線が解析による結果で実線が実測によるものである。これらの結果は、最上層に制振装置を設置した場合のものである。

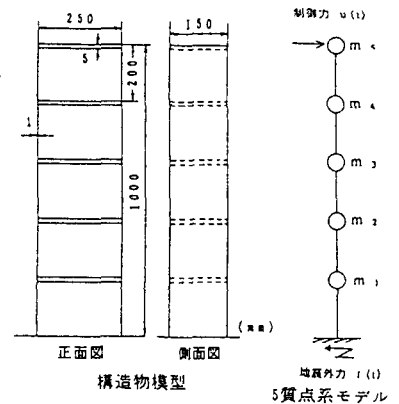


図-1 構造物模型と制御モデル

3. 最適フィードバックゲイン

構造系の運動方程式は、状態空間表示すると、つぎのように表わせる。

$$\dot{X}(t) = AX(t) + Bu(t) + F(t)$$

$$Y(t) = CX(t)$$

ここに、 $X(t)$ は、基準関数から構成される

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

状態変数である。 $Y(t)$ は、観測ベクトル、 C はモードベクトルより構成される行列である。ここに係数行列は、

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & 0 \\ & a_2 \\ 0 & a_3 \end{bmatrix} \quad a_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_1^2 & -2h_1\omega_1 \end{bmatrix}$$

制御力 $u(t)$ は、フィードバックゲイン行列により

$$u(t) = -KX(t)$$

で与えられる。ここに、 K は次式で表わせる。

$$K = R^{-1}B^TP$$

P は、Riccatiの方程式から得られる。

表-1 構造物模型の振動特性

(2) 振動次数	固有振動数 (Hz)			減衰定数
	有限要素法	5質点系	実測値	
1次	2.369	2.430	2.39	0.0064
2次	7.247	7.290	7.52	0.0050
3次	11.981	12.01	12.7	0.0045
4次	15.90	15.92		
5次	18.47	18.48		

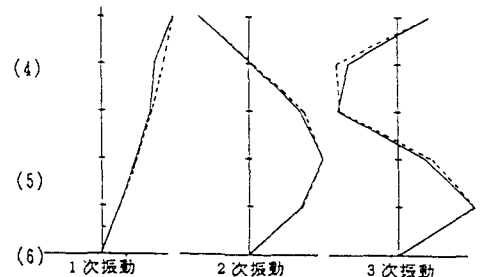


図-2 制御モデルの振動特性

$$A^T P + P A + Q - P B R^{-1} B^T P = 0 \quad (7)$$

ここで、 Q と R は、制御系の評価関数の重み行列である。

4. オブザーバーを用いた最適制御

ここでは、最小次元オブザーバーを考える。最小次元オブザーバーは次式で表わすことができる。

$$\dot{\hat{\omega}}(t) = \hat{A}\hat{\omega}(t) + \hat{B}u(t) + \hat{F}(t) + \hat{G}Y(t) \quad (8)$$

$$\hat{X}(t) = \hat{C}\hat{\omega}(t) + \hat{D}Y(t) \quad (9)$$

オブザーバーの極は、極配置法により決定する。オブザーバーの設計法については、文献(1)を参考にした。オブザーバーを用いた最適制御では(5)式の $X(t)$ の代わりに $\hat{X}(t)$ を用いる。

本研究では、模型最上部の速度と変位を観測して、3自由度系の状態変数を推定している。最小次元オブザーバーは、4次元のオブザーバーになっている。この状況を図-3

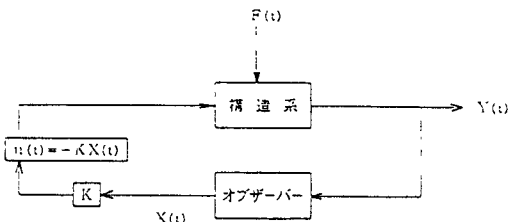


図-3 オブザーバーによる最適制御

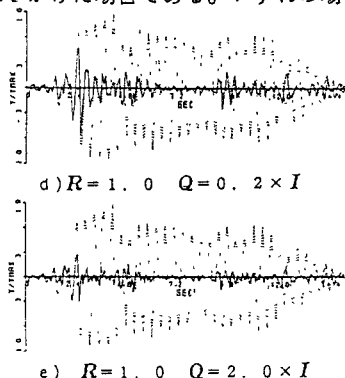
表-2 フィードバック係数: K

R	0.2	1.0	2.0	1.0	1.0	
Q	I	I	I	$0.2 * I$	$2.0 * I$	
K	(1)	-1.147	-1.570	-1.654	-0.334	-2.843
	(2)	0.439	0.986	1.392	0.438	1.392
	(3)	-10.31	-14.22	-15.15	-3.131	-25.54
	(4)	-0.379	-0.915	-1.308	-0.410	-1.263
	(5)	25.83	33.94	34.79	6.715	62.81
	(6)	0.278	0.816	1.186	0.366	1.069

5. 数値解析と考察

著者らの研究⁽²⁾⁽³⁾では、定常理論で設計した最適ゲイン行列では、地震外力を受ける構造物の初期の振動を制御できないことを示した。

そこで、本研究では、 R 、 Q を変化させたとき、このような最大応答を抑え込むゲイン行列について検討した。実験との対応を考えるために、地震外力として、El Centro地震を振動台に加えたときの、振動台の加速度を用いている。これを、図-4に示した。このような外力を加えたとき、 R と Q を変化させて、模型最上部の応答加速度を観測した。 R と Q を変化させたときの、ゲイン行列の変化を表-2に示した。対応する、応答波形を図-5のa)からe)に示した。点線が制御をかけない場合で、実線が制御をかけた場合である。いずれの場合でも、制御の効果が良く現われていることがわかる。最大応答に着目すると、 R 、 Q の値によって、変化していることがわかる。計算した中では、a)とd)の場合が、最大応答が大きく、c)とe)の場合が、これらに比べて小さくなっていることがわかる。



e) $R=1.0 \quad Q=2.0 * I$

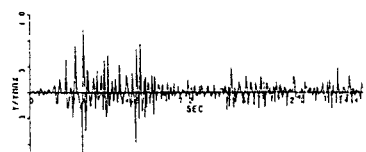
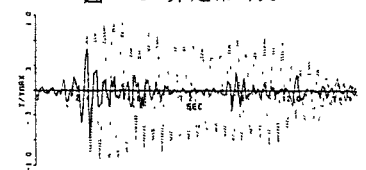
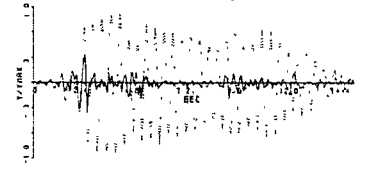


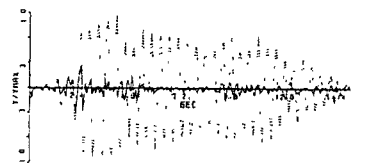
図-4 非定常外力



a) $R=0.2 \quad Q=I$



b) $R=1.0 \quad Q=I$



c) $R=2.0 \quad Q=I$

図-5 応答波形 I : 単位行列

6. まとめ

重み行列 R 、 Q を選ぶことにより、制御の効果が変化することが分かった。地震外力による制御を考える場合、平均的な応答を制御することより、最大応答を低減することが重要である。制御の評価関数として、応答の最大値を最小にする規準から、ゲイン行列を求めることを考えることができる。

〔参考文献〕(1)白石昌武 入門現代制御理論 啓学出版

(2)古江ら 土木学会 第46回概要集, 1991年, PP.936~937

(3)奥松ら 土木学会 第46回概要集, 1991年, PP.938~939