

構造物振動のアクティブ制御のためのアクチュエータ設計と模型実験

長崎大学大学院○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 正 員 小西保則 長崎大学工学部 学生員 古江照巳

1. はじめに

近年、土木・建築構造物の振動をアクティブコントロールする試みが実用化の段階になりつつある。また、都市高速道路においても、交通荷重による振動から騒音・地盤振動が発生し、これらの対策として、道路橋のアクティブコントロールが試みられた。コンピュータの飛躍的な発達により、制御技術は、アナログ制御からデジタル制御へと発展してきた。本研究では、デジタル最適制御理論により、構造物模型の制振の効果を検討するものである。まず、模型実験を行なう前に、同じ系のコンピュータシミュレーションを行なった。本報告は、コンピュータシミュレーションと、模型実験の関係について検討を加えた。制御対象は5層のラーメン構造を考えている。

2. 構造物模型のモデル化

研究対象にする構造物模型と諸元を図-1、表-1に示す。この系を制御するために、元の構造系を平面骨組構造でモデル化する。次に、水平方向のみの自由度を考えた等価な5質点系にモデル化する。5質点系にモデル化された系の剛性マトリックス K は、元の系の水平方向に、単位の力を加えたたわみ性マトリックス E を用いて求めることができる。

$$K = E^{-1} \quad (1)$$

次に、この系についてモーダル解析を行なう。 $q(t)$ を基準座標、 ϕ を正規化されたモードマトリックス、 $\phi^T M \phi = I$ とする。

外力 $f(t)$ 、制御力 $u(t)$ が作用したときの系の運動方程式は以下ようになる。

$$M \ddot{Y}(t) + C \dot{Y}(t) + K Y(t) = b_1 f(t) + b_2 u(t) \quad (2)$$

基準座標を用いると(2)は、次のように変換できる。

$$Y(t) = \phi q(t)$$

$$\ddot{q}(t) + H \dot{q}(t) + \Omega q(t) = \phi^T b_1 f(t) + \phi^T b_2 u(t) \quad (3)$$

$$H = \begin{bmatrix} 2h_1 \omega_1 & & \\ & \ddots & \\ & & 2h_5 \omega_5 \end{bmatrix} \quad \Omega = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & & \\ & \ddots & \\ & & \omega_5^2 \end{bmatrix}$$

状態量 $X = [q(t) \quad \dot{q}(t)]^T$ を用いると(3)式は、次の状態方程式となる。

$$\dot{X}(t) = A X(t) + F(t) + B u(t) \quad (4)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\Omega & -H \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} 0 \\ \phi^T b_1 f(t) \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \phi^T b_2 \end{bmatrix}$$

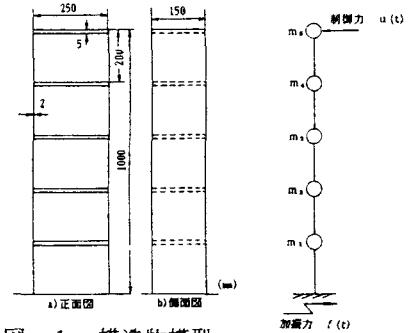


図-1 構造物模型

図-2 構造物系のモデル化

表-1 材料諸元

材質	アルミニウム
弾性定数	$7.0 \times 10^5 \text{ Kg/cm}^2$
単位体積重量	2.744 Kg/cm^3

表-2 構造物模型の振動数と減衰定数

振動次数	振動数 (Hz)	減衰定数
1次	5.92	0.02
2次	17.71	0.02
3次	28.83	0.02
4次	38.84	0.02
5次	46.31	0.02

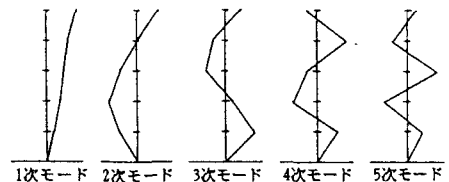


図-3 振動モード

3. 最適レギュレーターの設計

図-4は、外力 $f(t)$ が作用している構造物系に制御力 $u(t)$ を付加した系を表わしている。本報告では外力は、全質点に作用するものとし、また、制御力は第5点だけに施すため、 $\mathbf{b}_1 = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$, $\mathbf{b}_2 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$ となる。図-4のようなフィードバックが施されると

$$u(t) = -\mathbf{G}\mathbf{X}(t) \quad (\mathbf{G}: \text{フィードバックゲインベクトル}) \quad (5)$$

となり、次の閉ループ系の状態方程式が得られる。

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{G})\mathbf{X}(t) + \mathbf{F}(t) \quad (6)$$

ここに $\mathbf{G}$ は最適レギュレータ理論により決定される。

2次形式評価関数 J を次のように定義する。

$$J = \int_0^{\infty} [\mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} + u^T \mathbf{R} u] dt \quad (7)$$

この J を最小にするときの $\mathbf{G}$ を決定する。 $\mathbf{Q}$, $\mathbf{R}$ は重み行列であり、経験的に決定されるものである。

$$\mathbf{Q} = \mathbf{I} \ (10 \times 10), \quad \mathbf{R} = \mathbf{R} = 1 \quad (8)$$

J を最小にするためには、リカッチ方程式(9)の正定な解を求めると $\mathbf{G}$ は次のようになる。

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

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

4. 解析結果と考察

(9)(10)式より $\mathbf{G}$ を求め、(6)式に適用した場合の応答のシミュレーションを行なった。図-5は初期変位 1 cmを与えた場合の第5点の変位応答である。図-6はa)に示される不規則外力を与えたときの第5点の変位応答を表わしている。いずれも制御のない場合とある場合についてのシミュレーションである。横軸は時間 4(sec)であり、縦軸は変位(cm)である。

過渡応答(図-5)のa)、b)を比較すると、制御した場合、最大振幅は約50%低減され、減衰時間を見ると、制御なしの場合の1/10程で振動が減衰している。不規則外力を施した場合の応答の図-6を見ると、最大応答が50~70%低下し、制振が図られていることがわかる。

5. まとめ

本報では制振のシミュレーションを施し、その効果を確認した。模型実験とアクチュエータについては、講演当日報告する。

(参考文献)

- (1) 機械システムのダイナミクス入門、日本機械学会
- (2) 白石昌武: 入門現代制御理論、啓学出版、1991. 10

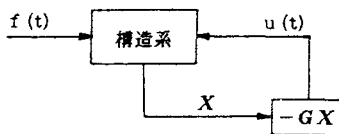


図-4 制御系

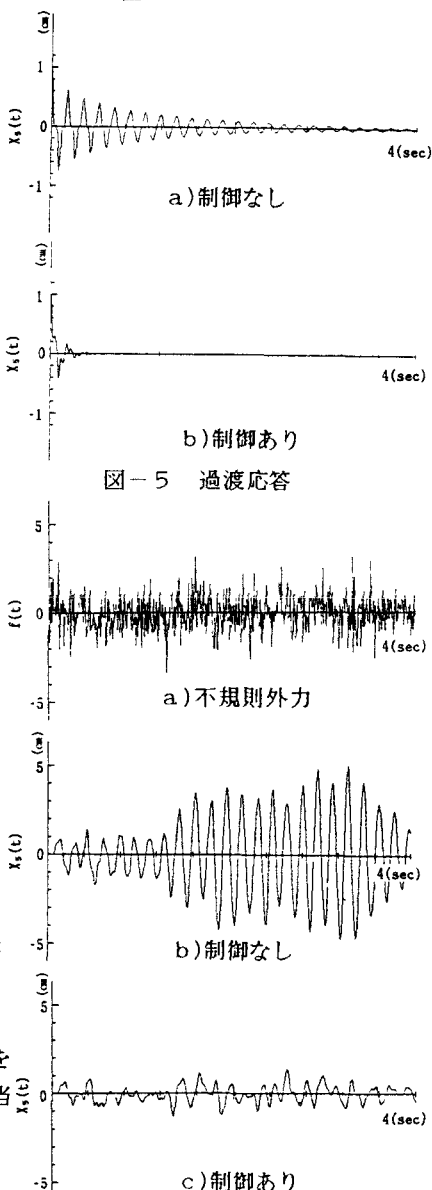


図-6 不規則外力による応答