

地震動を受ける構造物に対する各種振動制御手法の比較

鳥取大学工学部 正会員 池内 智行
鳥取大学工学部 フェロー会員 上田 茂

鳥取大学工学部 正会員 盛川 仁
鳥取大学大学院 ○学生員 三宅 崇介

1.はじめに

地震動に対する橋梁のアクティブ制御は、現在まだ実用化されていないが、パッシブ制御と比較して制御効率が高いことから、多くの研究者によって開発が進められている。本研究では新たに遺伝的アルゴリズムを用いたアクティブ制御法を考案し、橋梁に適用することを考えた。また、提案した制御法の優位性を確かめるため、最適 LQ 制御法との比較を行った。比較にあたっては、制御の対象とする具体的な 2 質点系モデルを作成し、数値シミュレーションを行って応答を調べることにした。

2.振動制御の対象としたモデル

制御の対象とする構造物は、図-1 に示すような橋梁システムで図-2 のように 2 自由度 2 質点系としてモデル化した。図に示すように桁と支承の間に直接制御力 u を作用させ、応答変位を制御するシステムを考えている。このモデルの諸元を表-1 に示す。実構造物に近い特性とするため、制御力 $u=0$ の状態で 1 次モードの固有周期は 1 秒前後とし、減衰定数は 1 次モード、2 次モードともに 1% とした。これより減衰マトリクスを求め、力の釣り合いから振動方程式をたてると次式ようになる。ここで、 $\ddot{\phi}$ は地動加速度とする。

$$\begin{bmatrix} 46.055 & 0 \\ 0 & 460.550 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_a \\ \ddot{x}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 26.896 & -11.612 \\ -11.612 & 48.332 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{x}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 40000 & -20000 \\ -20000 & 20000 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_a \\ x_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -u \\ u \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -\ddot{\phi} \\ -\ddot{\phi} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

3.遺伝的アルゴリズムを応用した振動制御

図-2 でモデル化された系に GA により最適化された制御力を用い、振動制御を行うことを考えた。制御力は以下のように決定した。まず、質点 a, b の変位、速度それぞれをパラメータとする四次元空間を考える。次に、各パラメータについて区間分割し、それぞれの区間枠内に対して制御力の出力値(100tf, 0tf, -100tf のいずれか)を対応させたテーブルをあらかじめ用意しておく。このテーブルに従って、各時刻の質点 a, b の変位・速度の状態がどの区間枠内に属するか判断し、そこに対応した出力値を制御力として作用させる。GA は、この制御則を決めるテーブルの最適化手法として用いた。すなわち、制御則を決めるテーブルを一つの個体とし、その集団を世代交代させて最適な制御を行うテーブルを決定した。このとき第一世代での各個体の区間枠での出力値は乱数で与えることにした。GA では、どの個体を次の世代に残すかを決定するための評価値が必要となるため、まず(1)式に線形加速度法を適用し、複数の地震波を入力として動的応答解析を行った。次に、応答計算結果から得られる最大応答変位を指標として、個体の評価値を次の式で求めた。

$$C = \frac{1}{n} \sum_{e=1}^n (x_{a_max} + x_{b_max}) \quad (2)$$

ここに、C：評価値、n：評価に用いた入力地震波の総数、 x_{a_max} ：質点 a の最大応答変位、 x_{b_max} ：質点 b の最大応答変位である。

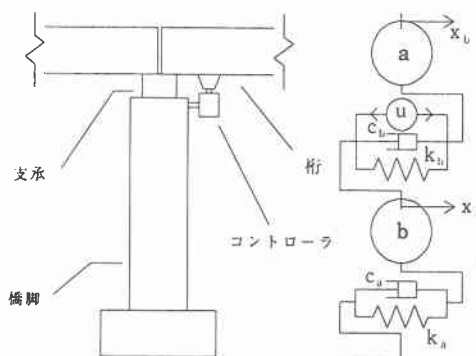


図-1 橋脚システム

図-2 2 質点系のモデル

表-1 モデルの諸元

橋脚(a)の質量(kgf・sec ² /cm)	46.06
桁(b)の質量(kgf・sec ² /cm)	460.55
橋脚の水平バネ定数 k_a (kgf/cm)	20000
支承の水平バネ定数 k_b (kgf/cm)	20000
1次モードの固有周期 T_1 (sec)	1.37
2次モードの固有周期 T_2 (sec)	0.21
1次モードの減衰定数 h_1	0.01
2次モードの減衰定数 h_2	0.01

4.最適 LQ 制御法

最適 LQ 制御法で(1)式を状態方程式の形で書き直すと、次のようになる。

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3) \quad \text{ここに、} A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -86853 & -0.58 & 43426 & 0.25 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 43.43 & 0.25 & -43.43 & -0.10 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.0217 \\ 0 \\ 0.00217 \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} x_a \\ \dot{x}_a \\ x_b \\ \dot{x}_b \end{bmatrix}$$

また、評価関数を以下のようにおく。

$$J = \int_0^{\infty} \{x_a^T \dot{x}_a^T x_b^T \dot{x}_b^T Q x_a^T \dot{x}_a^T x_b^T \dot{x}_b^T + u^T r u\} dt \quad (4)$$

このように、応答と制御力の 2 次形式の和となっており、これを最小にする制御入力を考える。ここに Q は、状態ベクトルにかかる重み係数、 r は入力ベクトルにかかる重み係数である。変位を抑制するため、 $Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ とおいた。また、 $r = 10^{-6}$ とした。これらの重みを用いて最適 LQ 制御法で制御力を求めると以下のように決まる。

$$u = -r^{-1} B^T P x = [-4.956 \quad -35.852 \quad 24.984 \quad -411.433] x \quad (5)$$

ここで、 P : リカッチ方程式 $P B r^{-1} B^T P - P A - A^T P = Q$ の解を示す。そこで、(5)式を(3)式に代入して振動方程式を求め、動的応答解析を行った。

5.比較結果および考察

本研究では、入力地震波として道路橋示方書(耐震設計編)に示してあるタイプⅡ-1-1、タイプⅡ-2-1 タイプⅡ-3-1 の地震波を用いた。図-3 はタイプⅡ-1-1 入力時の各制御手法での質点 a, b の応答変位である。これを見ると、質点 a, b とともに GA を用いた制御を行った方が最大変位を抑制できていることがわかる。このようなシミュレーションを他の 2 つの入力地震波についても行い、各制御手法の振動抑制の効果を調べた。表-2 は、無制御時、制御時(GA, LQ)の各質点の最大応答変位を示したものである。() 内は、各質点の最大応答変位を 0(cm) に抑えたときの振動抑制率 100%として、各制御法における振動抑制率を示している。この表より、本研究に用いた入力地震波において、いずれの制御法を用いても、無制御時と比較して応答変位が小さくなっていることが分かる。各制御手法で比較すると、質点 a, b どちらも入力地震波の種類を問わず GA による制御を行った方が、変位がより大きく抑制されていることが分かる。また、振動抑制率を見ると、最適 LQ 制御法では、全ての入力地震波において 15%~30%程度の振動抑制率となっている。一方、GA を用いた制御法では、30%~60%程度の振動抑制効果が得られた。

に抑えたときの振動抑制率 100%として、各制御法における振動抑制率を示している。この表より、本研究に用いた入力地震波において、いずれの制御法を用いても、無制御時と比較して応答変位が小さくなっていることが分かる。各制御手法で比較すると、質点 a, b どちらも入力地震波の種類を問わず GA による制御を行った方が、変位がより大きく抑制されていることが分かる。また、振動抑制率を見ると、最適 LQ 制御法では、全ての入力地震波において 15%~30%程度の振動抑制率となっている。一方、GA を用いた制御法では、30%~60%程度の振動抑制効果が得られた。

6.まとめ

本研究では、橋梁を対象とした振動制御システムを考え、このシステムに対して GA による振動制御法を提案した。また、新しく提案した GA による振動制御法の優位性を確かめるため、同様の振動制御システムに対して一般的に用いられている最適 LQ 制御法を適用し、比較を行った。各質点の最大応答変位に着目した結果、本研究で用いた橋梁モデルに対しては、GA を用いた制御法の方が、最適 LQ 制御法よりも効果的であることが分かった。

参考文献 1) 柴田 明德：最新耐震構造解析、森北出版、1981、2) 雨宮 好文：機械制御入門、オーム社、1981、3) 坂和 正敏、田中 雅博：遺伝的アルゴリズム、朝倉書店、1995。

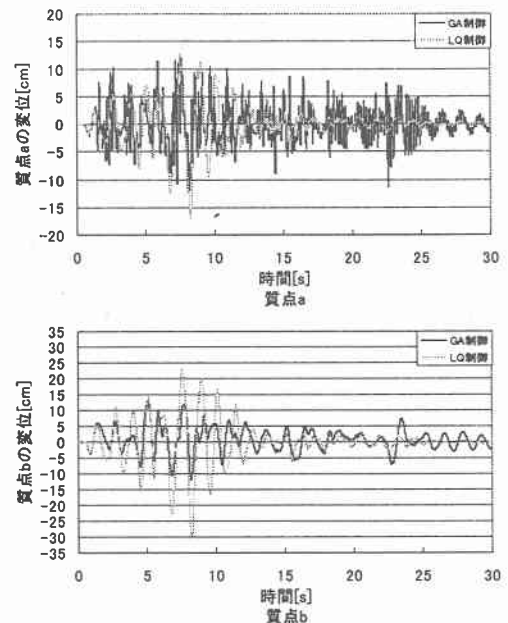


図-3 タイプⅡ-1-1に対する質点 a, b の変位応答

表-2 各制御法による最大応答変位

地震波	質点 a			質点 b		
	無制御	LQ	GA	無制御	LQ	GA
タイプⅡ-1-1	19.7924	16.9901 (14.2)	11.9616 (39.6)	37.7464	30.5676 (16.8)	12.8722 (65.0)
タイプⅡ-2-1	40.977	33.2251 (18.9)	19.1309 (53.3)	80.2386	65.9639 (17.8)	37.0064 (53.9)
タイプⅡ-3-1	48.1866	35.7044 (25.9)	34.8479 (27.7)	94.0437	68.2959 (27.4)	58.0621 (38.3)

単位(cm)