

(30) ファジィ推論を用いた質点系構造物の振動制御に関する研究

A Study on Vibration Control of Particles System Structure by Using of Fuzzy Reasoning

新宮 清志*

Kiyoshi SHINGU

川村 仁**

Hitoshi KAWAMURA

At present, vibration control in architectural engineering is in the limelight. We are interested in a structure that is able to transform its own characteristics. When the damping ratio and spring constant of a structure are changed, the resonance point of the structure is altered. It is said that shifts in the resonance point can affect displacement caused by seismic forces. We produced a small size experimental equipment that has 2 pieces of concentration mass, variable stiffness spring and dampers. This is one of semi active control system. First of all, a mathematical model of the experimental equipment was obtained and vibration control methods were studied on the basis of the results. Usefulness of vibration control of the system is verified by the analyses and the experiments.

Key Words: vibration control, Fuzzy reasoning, semi active control

1. 序論

我が国は、世界有数の地震国であり、古くから大地震による被害を度々こうむり続けている。それ故、地震に対して身の安全を守られる建築物をつくる事が非常に重要な問題である。この地震に対する安全な構造として耐震（柔・剛）構造や免震構造が構築されているが、何れも地震に対して耐えたり逃げたりといった設計思想であり、主体構造はある程度の塑性変形を許容するが崩壊しないといったあるレベルの保障である。これに対して、建築物の高層化が進む中、地震動についての具体的な予測が不可能に近い以上は、受け手の建築物側で応答をコントロール（振動抑制）する事によって、いかなる場合においても建築物の安全を図る制震構造の方策が注目されている。これは、大地震にも強い高度情報化都市の成立への対応策と考えられる。制震構造は、受動型・複合型・能動型の3つのタイプに分類できる。現在、能動型制御力方式が最も多く適用されているが、制御力方式は多くのエネルギーを要したり、施工費の1%も費用が掛かってしまうなどの問題がある。本論では、比較的適用簡単で十分の利得がある能動型構造性能可変方式とし、地震波入力時に最も怖い共振の回避と耐震構造以上の振動抑制効果を得る事を設計指針とした振動制御システムの設計と構築を目的としている。

* 工博 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科、理工学研究科情報科学専攻 (〒274 船橋市習志野台 7-24-1)

** 日本大学大学院生 理工学研究科情報科学専攻

(〒274 船橋市習志野台 7-24-1)

2. 数式モデル

制御対象は、fig-1のような2質点系モデルであり2つの質量が縦に配置され、各質量は4枚の板バネにより連結されており水平方向に自由に振動できるように製作した1スパン・2自由度のラーメン構造物である。また、中央部には剛性の十分ある台の上に構造物の減衰・弾性力を実現させるDCサーボモータを取り付けてある。実際の構造物においては油圧ダンパーや電気粘性流体などによって減衰力や弾性力を実現する事となるが、今回の実験装置においては仮想的にDCサーボモータを制御する事により実現している。モデルの物理定数は、Table.1となる。

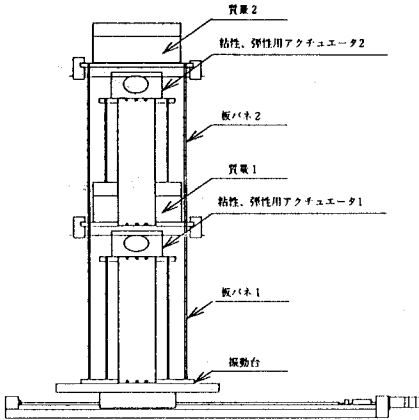


fig.1 質点系モデル

Table1 モデル物理定数

定数		標準状態 (最大値)
質点1	質量 m1	8.88 Kg
	粘性 d1	23.68 N/(m/sec) (76.39)
	バネ定数 k1	4107 N/m (6098)
質点2	質量 m2	7.28 Kg
	粘性 d2	21.44 N/(m/sec)
	バネ定数 k2	4107 N/m

入力地震波に対する2質点系モデルの応答を考慮するとモデルの振動系を表現する状態方程式は、質量 m 、粘性減衰係数 d 、ばね定数 k 、質点系モデルの層間変位 x 、振動系イナーシャ J 、電機子イナーシャ J_M 、制動係数 f 、電機子抵抗 R_s 、誘起電力定数 K_e 、電機子電圧 E_M 、トルク定数 K_T 、シャフト直径 r として添字1、2を各質点のものとして式(1)となる。更に、可変要素系として所望の構造型状を実現させるアクチュエータ・等価ブレース系の状態方程式は、式(2)となる。

$$\dot{X}_p = A_{p(t)} X_p + B_{p1(t)} U_p + B_{p2} W \quad (1) \quad \dot{X}_c = A_c \cdot X_c + B_c \cdot U_c \quad (2)$$

但し、 W (外乱地震加速度)

$$X_p = [x_1 \quad \dot{x}_1 \quad x_2 \quad \dot{x}_2]^T, \quad X_c = [x_1 \quad \dot{x}_1 \quad x_2 \quad \dot{x}_2]^T, \quad U_p = [E_{M1} \quad E_{M2}]^T, \quad U_c = [E_{M1} \quad E_{M2}]^T$$

$$A_{p(t)} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -k_{1(t)}/m_1^* & -d_{1(t)}/m_1^* & k_{2(t)}/m_1^* & d_{2(t)}/m_1^* \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ k_{1(t)}/m_2^* & d_{1(t)}/m_2^* & -k_{2(t)}/m_2^* & -d_{2(t)}/m_2^* \end{bmatrix}$$

$$B_{p1(t)} = \begin{bmatrix} 0 & -K_{e1}/m_1^* & 0 & K_{e1}/m_2^* \\ 0 & 0 & 0 & -K_{e2}/m_2^* \end{bmatrix}^T \quad B_{p2} = [0 \quad m_1/m_1^* \quad 0 \quad m_2/m_2^* - m_1/m_2^*]^T$$

$$m^* = m - J/r^2, \quad d^* = d - K_e K_T / R_s r^2 - f/r^2, \quad K_s^* = K_s / R_s r, \quad M = m_1^* m_2^*$$

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -K_{e1} K_{T1} / R_{M1} J_{M1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -K_{e2} K_{T2} / R_{M2} J_{M2} \end{bmatrix} \quad B_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ r_1 K_{T1} / R_{M1} J_{M1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & r_2 K_{T2} / R_{M2} J_{M2} \end{bmatrix}$$

3. 制御方策

数式モデルより、振動系・標準状態、性状可変状態時のボード線図はfig.2、fig.3となる。これよりモデルの振動特性として次のような事柄が明確となった。

[1] バネ定数、減衰係数を構造物モデルの持つ拘束条件下で変化させることでゲイン特性を変化させることが可能

である。また、この変化により共振点も変化しピークゲインの抑制が可能となる。

[2] バネ定数、粘性減衰係数を大きくする事により、1次モードでは振幅が大きく、2次モードでは振幅が小さくなる。

[3] 1次モードの共振点付近では質点1の層間変位が大きく、2次モードの共振点付近では質点2の層間変位が大きくなる。

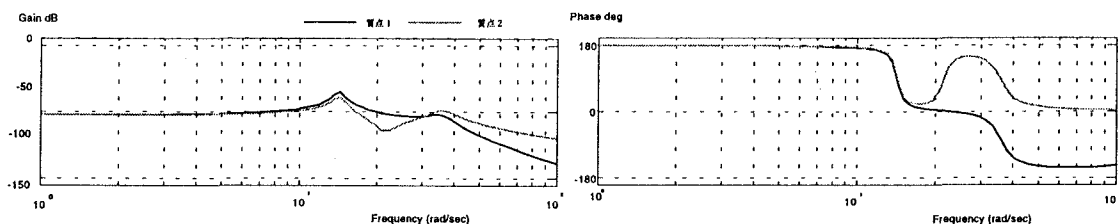


fig.2 標準状態時ポート線図

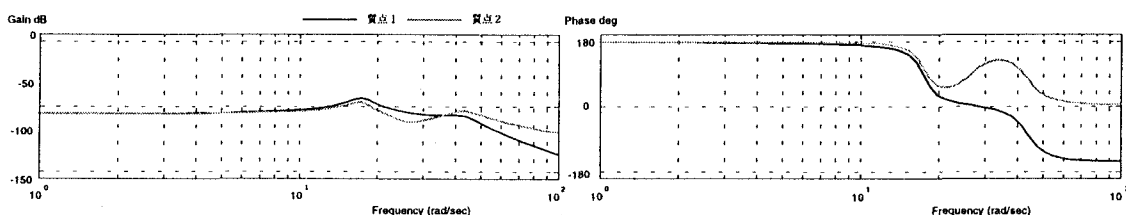


fig.3 性状可変状態時ポート線図

一般的に質点系構造物は、上層部、下層部とを位置付けた場合に地盤に近い下層部より上層部の地盤に対する応答加速度が大きい振動特性を持つ。その為、上層部の地盤に対する相対変位は下層部に比べて大きな応答を示す。今回、制御方策として、地震外乱を抑制する構造型状をサーボモータを制御して実現させる方策を用い、構造型状を制御則とする。

4. ファジィ推論

制御方策においての問題は、所望の構造型状及び操作量の切り替え信号の決定である。構造物の振動状態から判断し決定するわけだが、その確定的な判断は困難である為、本論ではファジィ推論を用いて対応する事とする。

今回、検出信号である層間速度・変位より演算された振幅比と速度を前件部、所望の性状係数（ばね定数）を後件部の三角型ファジィ変数として、直接法により推論し面積法により非ファジィ化を行う¹⁾。fig.4の振動モードタイプに見られる様に振幅比と検出速度の関係及びfig.2、3のような既知のゲイン・位相特性からモデルの振動モード状態がおおよそながら判別可能である。

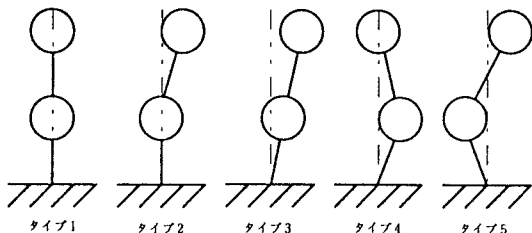


fig.4 振動モードタイプ

Table2 制御規則

D \ G							
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
ZO	PM	PS	PS	PS	PM	PB	PB
PS	PS	PS	ZO	ZO	PB	PB	PB
PM	PS	PS	PM	ZO	PB	PB	PB
PB	PS	PM	PB	ZO	PB	PB	PB

この判別に基付き制御規則是Table 2と定めた。所望の構造物性状は、アナログ回路で構成した可変ゲインのPDコントローラーによりアクチュエータを操作し実現している。ファジィ推論により決定した構造的性状となるよう計算機によって制御系のフィードバックゲインを調整する事により振動制御を行う。

5. システム構成

システム構成は、制御対象となる2質点系モデル、制御器となる質点形駆動装置・振動台駆動装置、推論・実行部となる計算機によってfig. 5の様に構成される。振動台は、計算機上で計算した任意波形で振動可能である。本論では、最大加速度 $1000.0(\text{mm}/\text{sec}^2)$ 、振動数 $1.0\sim 10.0(\text{Hz})$ の正弦波を時間で掃引させる地震外乱を入力させる。この外乱入力により各質点はせん断型振動系として振動を始め、質点の変位、速度はポテンシオメータ、タコジェネレータにより検出されA/Dコンバータボードにより数値変換して計算機上で相対変位、速度の換算が行われる。振動台の変位、速度についても同様に、取り込む事ができるようになっている。構造物の剛性・減衰特性は、アナログ回路で構成した可変ゲインのPDコントローラーにより実現している。計算機は、ファジィ推論により決定した剛性・減衰特性になるようにこの制御系のフィードバックゲインを調整する事により制御を行う。

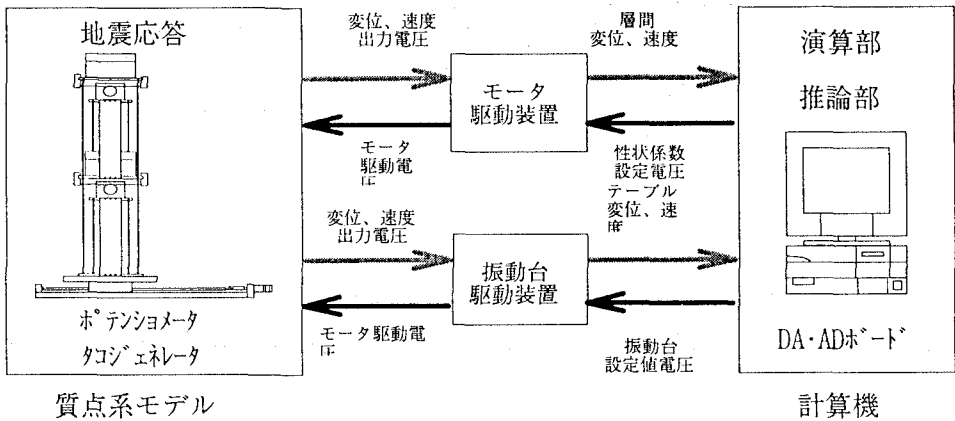


fig.5 システム構成

6. シミュレーション

システムの運動方程式の計算は、4次のRunge-Kutta法を用いて計算刻み幅 5msec で行った。また、状態方程式は、零次ホールドにより離散化を行った。外乱地震波の周波数は0秒の時 0Hz 、40秒のとき 7Hz となるように設定する。

今回、ファジィ制御時と非制御時の質点1、質点2の層間応答変位をシミュレートした。ここで、入力地震波としてfig. 6の正弦波周波数掃引波とfig. 7のランダム周波数掃引波(Matlab におけるC言語一乱数関数と周波数掃引波の合成ノイズ)をそれぞれ目標入力加速度を $2\text{m}/\text{sec}^2$ とした時の各質点の応答をfig. 8, 9, 10, 11に示す。

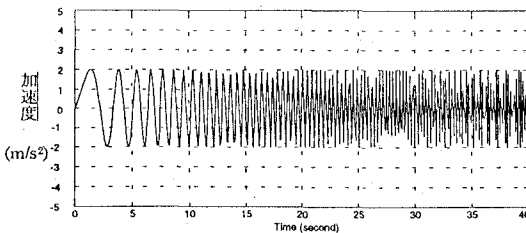


fig.6 正弦波周波数掃引波

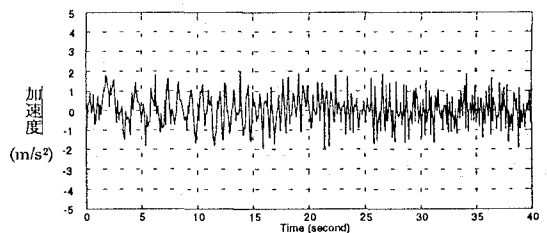
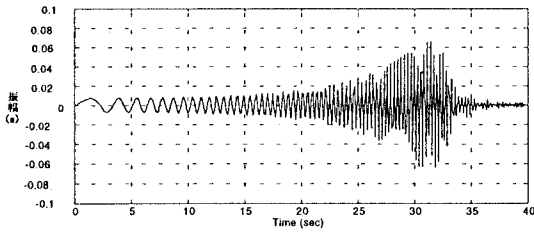
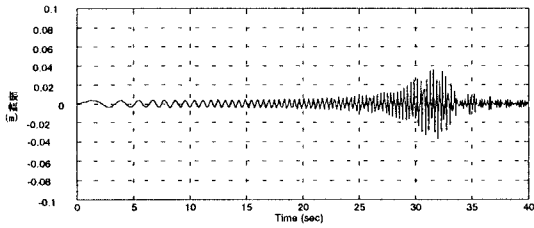


fig.7 ランダム周波数掃引波

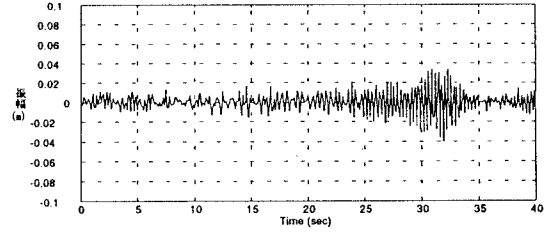


(a)非制御時質点1 応答

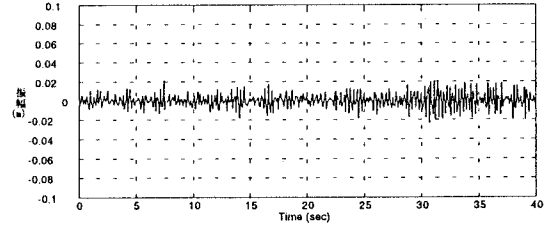


(b)非制御時質点2 応答

fig.8 正弦波入力,非制御時応答

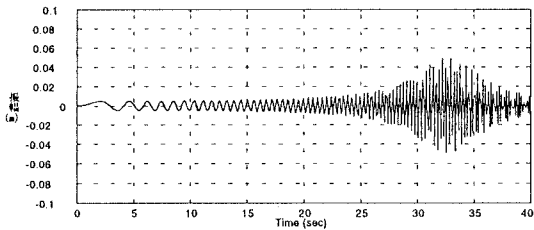


(a)非制御時質点1 応答

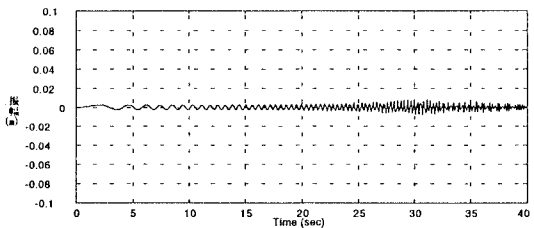


(b)非制御時質点2 応答

fig.10 ランダム波入力,非制御時応答

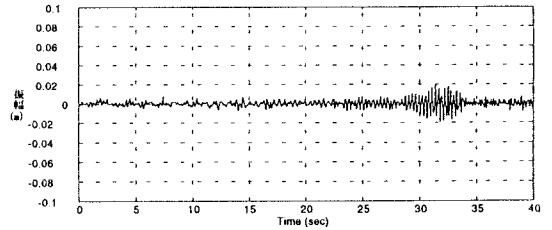


(a)制御時質点1 応答

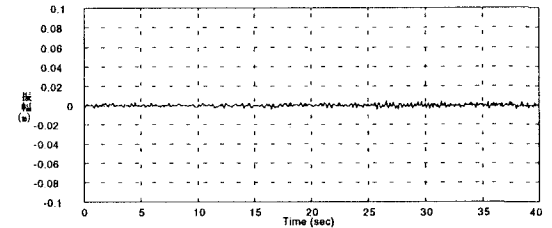


(b)制御時質点2 応答

fig.9 正弦波入力,制御時応答



(a)制御時質点1 応答



(b)制御時質点2 応答

fig.11 ランダム波入力,制御時応答

7. 考察及び今後の課題

シミュレーションの結果より質点2における共振の回避と全体で約20%の振動抑制が図れる事が判明した。

今後、実機による共振回避度・制震効果を基に制御系設計方策と従来の制御規則²⁾との評価・見直しを行い、今以上の効果を図る予定である。

[本研究は、日本大学学術助成金（総合研究：研究代表者・新宮清志）によって行われた。]

参考文献

- 1) 新宮 清志, 上野 祐豪: 「一質点系制御におけるファジィ制御の各種評価法の比較」、日本建築学会大会講演要録集, pp1625-1626, 1993年9月
- 2) 新宮 清志, 伊藤 堅, 入江 邦弘他: 「質点系制御におけるファジィ制御に関する研究」、第10回ファジィシンポジウム講演論文集, 日本ファジィ学会pp287-290, 1994年6月