

不規則外力を受ける構造物の FUZZY 制御器による振動制御

岡 林 隆 敏* ・石 松 栄 治**
藤 元 一 栄*** ・山 本 実****

Vibration Control of Structures Subjected with Random Excitations Using Fuzzy Controller

by

Takatoshi OKABAYASHI*, Eiji ISHIMATSU**
Kazue FUJIMOTO*** and Minoru YAMAMOTO****

This paper concerns with the active vibration control for a five story building model using by the Fuzzy controller. The Fuzzy controller can be easily set up by the Fuzzy board on the market. The structural model is controlled by the active mass damper which is driven by the DC servomotor. Numerical simulations and experimental tests are performed for the building model subject with impulse excitations and earthquake excitations. The results are shown that the Fuzzy controller used in the study is effective to reduce the vibration of structure with the frequency up to nearly 5Hz.

1. はじめに

近年、土木・建築構造物は長大化、高層化の傾向にあり、超高層ビルや、長大橋が多数建設されている。構造物の高層化、長大化が進むにつれて地震や風など、動的な外乱に起因する構造物の振動が深刻な問題となっている。そのため、これらの振動を構造物に付加した装置により、積極的に制御しようとするアクティブコントロールの研究が進められ、実用化の段階に入りつつある⁽¹⁾。それにともなって、様々な制御理論や技術が提案され、それらの実験的検討⁽²⁾が試みられている。これらの研究の多くは、現代制御理論に基づく最適振動制御を対象にしたものであるが、最近、構造物の外乱や変動に対してのロバスト性が強いといわれる、Fuzzy 推論を振動制御に応用した Fuzzy 制御の適用⁽³⁾⁽⁴⁾が試みられている。本研究は、Fuzzy 制御による

振動制御を、模型構造物に適用し、その有効性をシミュレーションと実験により検討したものである。Fuzzy 推論による振動制御の研究は、これまで主に、シミュレーション⁽⁵⁾を中心にして進められてきた。しかし、実際に構造物の振動を制御するためには、制御の考え方を実時間において実現する必要がある。最近では、Fuzzy 演算用のボードが市販されるようになり、パーソナルコンピュータにより、容易に Fuzzy 演算をする環境が整備⁽⁶⁾⁽⁷⁾されてきた。本研究では、これらの開発ツールを用いて Fuzzy 制御を実現化する。

本論文では、5層骨組構造物模型を制御対象として、これを5自由度系にモデル化する。この系に対して、パーソナルコンピュータを用いて、Fuzzy 推論に基づく振動制御システムを構成する。つぎに正弦波外力および地震外力が作用した場合、本システムの制御効果

平成4年9月30日受理

*社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

**前田建設工業株 (Maeda Construction, Co., Ltd.)

***戸田建設株 (Toda Construction, Co., Ltd.)

****大学院修士課程土木工学専攻 (Graduate Student, Department of Civil Engineering)

をシミュレーションにより検討する。さらに、その有効性を模型実験により実証する。このとき、Fuzzy 推論は速度フィードバックの部分に組み込まれている。

2. 建造物の振動制御と Fuzzy 推論

2.1 建造物の振動制御

実際の建造物を対象とした制御モデルを考える場合、

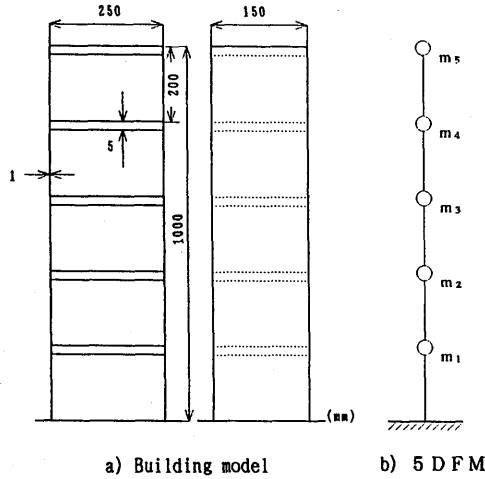


Fig. 1 Control model

構造系を制御に適した自由度の解析モデルに縮小する必要がある。そこで、本研究では、図-1のような5層骨組構造物を制御対象として考え、水平一次元方向にのみ変位を許すモデルを考える。まず有限要素法でモデル化し、さらに5質点系の離散モデルに縮約する。

建造物の振動制御を行うためには、一般に制御しようとする振動次数と同等のセンサーを設置し、得られた観測量から、状態フィードバックを構成する。ここでは、建造物の速度を観測して、速度フィードバックを考える。

現代制御理論に基づいた状態フィードバックでは、評価関数により最適フィードバックゲインを決定する。本研究では Fuzzy 理論を用いてフィードバックゲインを決定し、振動制御を行う。

2.2 Fuzzy 制御

Fuzzy 推論を行うためには、Fuzzy 推論のルールとそれに対応するメンバーシップ関数が必要となる。表-1に、実験に用いる Fuzzy 推論のルールを示し、図-2にルールに対するメンバーシップ関数を示す。ルールの VER と MOV は 1, 2, 3 次振動の速度と対応する制御力を表している、メンバーシップ関数は、7つのラベルに等分割し、設定されている。

Table 1 Rules of Fuzzy control

	Signal	1	2	3	4	5	6	7
Condition	VER	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
Conclusion	MOV	PL	PM	PS	ZR	NS	NM	NL

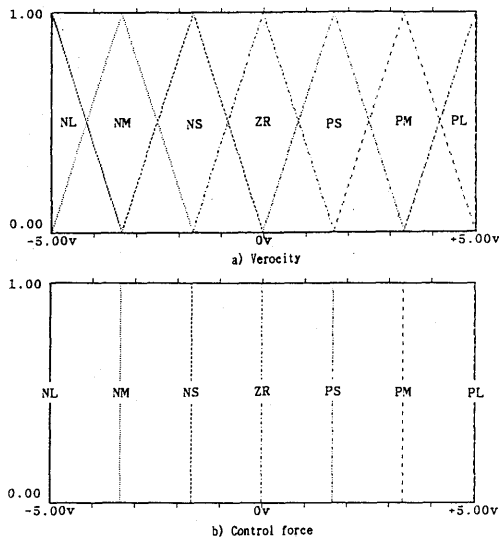


Fig. 2 Membership function

3. 建造物の振動制御と制御則

3.1 制御対象の状態方程式

外力 $f(t)$ を受ける n 質点系の運動方程式は、水平方向を $y(t)$ とすると、次式で表わされる。

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = f(t) \tag{1}$$

ここに m, c, k は、質量マトリックス、減衰マトリックス、剛性マトリックスである。物理座標 $y(t)$ は、モード座標 $q(t)$ を用いると

$$y(t) = \Phi q(t) \tag{2}$$

となる。 Φ はモードマトリックスである。(2)式を用いると(1)式は次式で表せる。

$$\ddot{q}(t) + H\dot{q}(t) + \Omega q(t) = \Phi^T f(t) \tag{3}$$

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

ここに h_i, ω_i はそれぞれ i 次の減衰定数、固有円振動数である。さらに状態変数

$$X(t) = [q_1(t) \dot{q}_1(t) \dots q_n(t) \dot{q}_n(t)]^T \tag{4}$$

を用いると、(3)式は次のような状態方程式で表せる。

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BF(t) \tag{5}$$

ここに A は $(2n \times 2n)$ 次元の係数マトリックス、 $F(t)$ は $2n$ 次元の外力ベクトルである。

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ & \ddots \\ 0 & A_n \end{bmatrix} \quad F(t) = \begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_1^2 & -2h_1\omega_1 \end{bmatrix} \quad F_1(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ \phi_1^T f(t) \end{bmatrix}$$

また m 次元の観測量 $Y(t)$ は、 $(m \times n)$ 次元のモードマトリックスから構成される、観測マトリックス C を用いて

$$Y(t) = CX(t) \quad (7)$$

で表すことができる。

次に時間刻みを h として(5)式を差分表示する。状態遷移マトリックスに、無条件安定なアルゴリズムをもつ padé 近似を用いると

$$e^{Ah} = (I - Ah/2)^{-1}(I + Ah/2) \quad (8)$$

(5)式は次のような差分式となる。

$$X_{n+1} = (I - Ah/2)^{-1}(I + Ah/2)X_n + (I - Ah/2)^{-1}(F_{n+1} + F_n)h/2 \quad (9)$$

シミュレーションでは、この関係より応答計算を行う。

3.2 制御側

外力として、構造物の基盤に作用する地震力 $g(t)$ を考える。また、構造物の最上階に単一で作用する制御力 $u(t)$ を考える。この場合、(1)式の $f(t)$ は次のようになる。

$$f(t) = b_1 g(t) + b_2 u(t) \quad (10)$$

地震力は全質点に作用し、また制御力は最上点に作用するものであるから

$$b_1 = [1 \cdots \cdots 1 \quad 1]^T \quad (11)$$

$$b_2 = [0 \cdots \cdots 0 \quad 1]^T$$

となる。これを用いると(5)式は

$$\dot{X}(t) = AX(t) + B_1 g(t) + B_2 u(t) \quad (12)$$

となる。このとき B_j は

$$B_j = [B_{ji}] \quad (j=1,2)(i=1, \dots, n) \quad (13)$$

$$B_{ji} = \begin{bmatrix} 0 \\ \phi_j^T b_i \end{bmatrix}$$

となる。

ここで、制御力 $u(t)$ を速度フィードバックとして構成する。状態空間表示で表される各次振動の応答速度 $\dot{q}_1(t)$, $\dot{q}_2(t)$, $\dot{q}_3(t)$ を検出し、これに比例した力を構造物の最上階にフィードバックさせる。

$$u(t) = -K \begin{bmatrix} \dot{q}_1(t) \\ \dot{q}_2(t) \\ \dot{q}_3(t) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$K = [k_1 \quad k_2 \quad k_3]$$

ここで K は各次振動に対する最適なゲインを与える

フィードバックゲインベクトルである。本研究では(14)式の部分を Fuzzy 演算により実行させている。各次振動の応答速度を入力情報とする Fuzzy 推論を行ない、それぞれに対応するゲイン k_1 , k_2 , k_3 を決定する。制御力 $u(t)$ は、各モード毎に、Fuzzy 推論を図-3のように並列処理をして求めている。

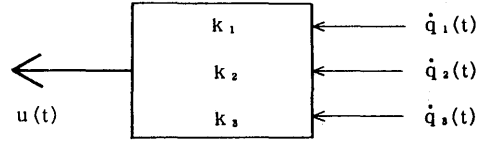


Fig. 3 Parallel process

4. 構造物模型とアクチュエータの特性

4.1 構造物模型と振動特性

制御対象とする構造物は図-1のような5層骨組構造の構造物模型である。この構造物模型は1次の固有振動数を2Hz付近に、3次の固有振動数を10Hz付近に設定し、また実験での制御効果を明瞭にするために、減衰が小さくなるよう設計、製作した。

この構造物模型の概形と寸法を図-1に示した。材質はアルミニウム(密度: 0.0028 kg/cm^3 , 弾性定数: $7.0 \times 10^9 \text{ kg/cm}^2$)を用いており、接合部には同材料の補剛材を用いて各部材を連結している。また構造物模型の最上階には振動制御用のアクチュエータを取付けており、その重量を含めた構造物模型の総重量は 4.716 kgf になる。

制御対象は、まず5層骨組構造物を平面骨組構造物と考え有限要素法でモデル化し、さらに5質点に縮小した。このモデルの固有振動数を実測値とともに表-2に示す。また制御モデルと実測値の固有振動モードを1次から3次まで図-4に示す。解析値と実測値は良い一致を示しており、モデル化の妥当性が確認された。

4.2 アクチュエータの構造

本研究では、質量体を加速度運動させて制御力を発生させている。この実験で用いるアクチュエータの構造を図-5に示した。実験のアクチュエータは写真-1である。構造物の振動方向に設置した2本のガイド上を質量体が直線往復運動をすることによって、構造物に制御力を生じさせる機構になっている。アクチュエータの設置位置は、制御する各次振動の振動モードの節にならないような位置とし、また少ない制御力で効果的に制御が効くように、比較的振幅の大きくなる位置を選定する。したがって、これらの振動モードを

Table 2 Frequencies and damping constants

Order	Natural frequency (Hz)			Damping
	FEM	5 DFM	Experiment	
1	2.369	2.430	2.390	0.0064
2	7.247	7.290	7.520	0.0050
3	11.98	12.01	12.7	0.0045
4	15.90	15.92		
5	18.47	18.48		

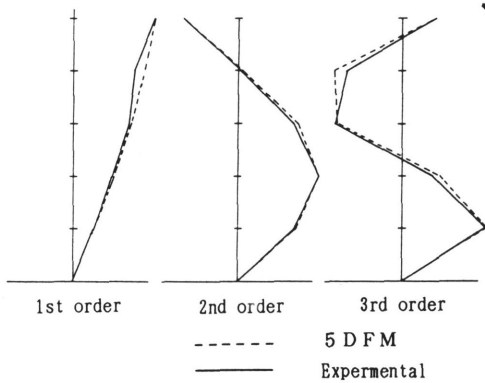


Fig. 4 Vibration modes

考慮してアクチュエータは最上階に設置した。

製作したアクチュエータの動特性を求めた。測定結果から、アクチュエータの動特性は、各振動周波数に対して一定の力を発生することが確認できた。単位入力電圧に対する出力は、約70gf/Vである。

5. 制御実験装置とコントローラの構成

本研究に用いる振動制御実験装置のシステムを図-6に示した。また、構造物振動の制御実験の状況を写真-2に示した。各部分について以下説明する。

(1) 観測部

振動制御実験は5層骨組構造物模型を制御対象とし、電磁式振動台上に固定する。構造物の振動状態を観測するセンサーには、ひずみゲージ式加速度計 AS-2GB (共和電業) を用いる。実験では、計6個の加速度計を使用するが、それら全てが同等の感度を持つように動ひずみ計で校正した。感度、すなわち、単位の加速度に対する出力電圧は、この場合は0.4G/Vに設定している。

(2) A/D, D/A 変換

数値演算処理、アクチュエータのコントローラに、NEC製の32ビットパーソナルコンピュータ PC-9801

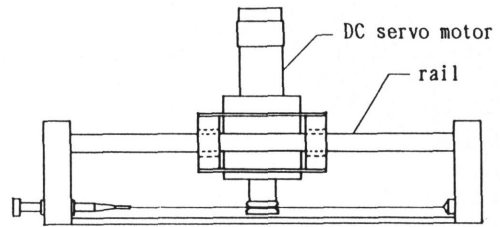
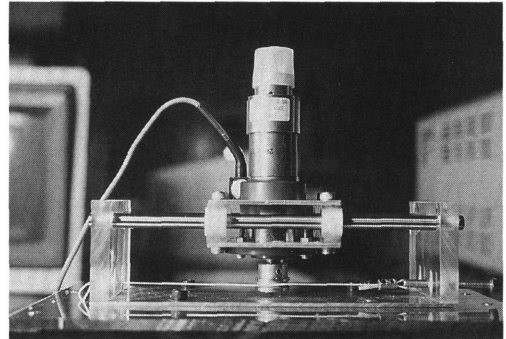


Fig. 5 Schematic diagram of actuator



Phot. 1 Actuator

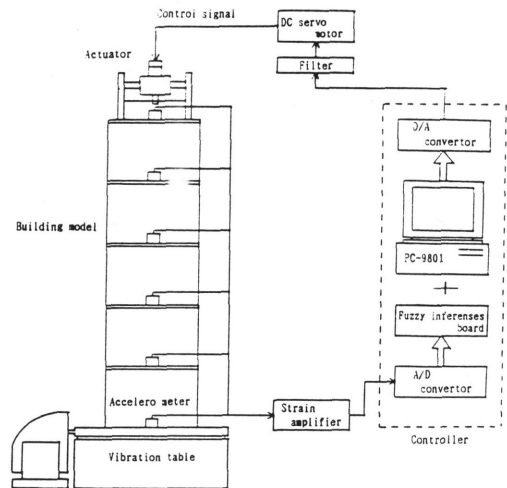


Fig. 6 Block diagram of control system

DAを用いている。観測値の取り込み、制御力の出力値を処理するためにA/D、D/A変換ボードを用いる。A/D変換ボードには、最大出力16チャンネル、分解能12ビットのANALOG-PRO II (カノープス電子株)を用い、D/A変換ボードには出力4チャンネル、分解能12ビットのDAJ-98 (カノープス電子株)を用いる。

(3) コントローラの構成

振動状態にある構造物の観測信号は、構造物の各層

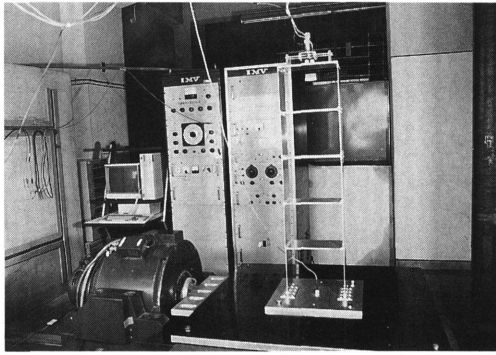


Photo. 2 Set up of structural vibration control

と地盤から検出される加速度である。これらのアナログ信号を A/D 変換器によりデジタル信号に変換しパーソナルコンピュータにとりこむ。コンピュータ内の数値演算処理において、加速度はモード変換により各振動モードの加速度に変換する。さらにこれを積分して各振動モードの速度とする。

(4) Fuzzy 推論ボード

Fuzzy 制御システムを実時間で、実現するために、Fuzzy 推論をハードウェアで実行させる Fuzzy 推論ボードを利用する。本研究では Fuzzy 推論ボード FB-3098 (オムロン株式会社製) を用いた。これは、高度な推論機構をパーソナルコンピュータで高速に実行させるために開発されたものである。

推論方式は MAX-MIN 合成論理積を採用し、確定演算方式は重心法を用いている。すなわち、まず各ルールごとの結論(出力)を MAX 値による切断によって計算する。次に結論部ラベルごとにそのラベルを出力する各ルール出力の最大値を求め、Fuzzy 出力を作成する。最後に Fuzzy 出力から重心法によって確定値を計算し、Fuzzy 推論の出力信号とする。

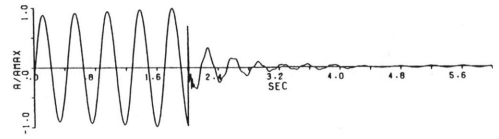
(5) コントローラの応答性

構造物の 3 次振動までを制御の対象として制御システムを構成した。このシステムでは、Fuzzy 制御のコントローラにパーソナルコンピュータを用いる。そのためコントローラの演算速度を考慮すると、このシステムが制御可能である振動数には上限がある。そこでコントローラの応答周波数を測定した結果、33.3Hz であることを確認した。

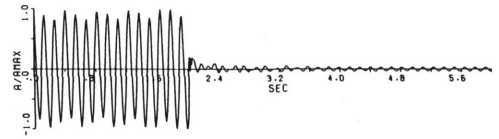
6. 数値解析と考察

6.1 シミュレーションによる制御効果の検討

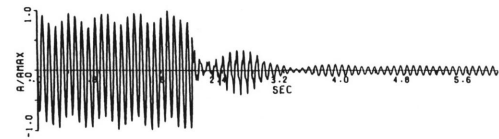
シミュレーションでは、外力に対する構造物の最上部の応答速度を求めた。図-7 は時刻刻みを 0.005 とし、1 次、2 次、および 3 次振動でそれぞれ構造物を共振



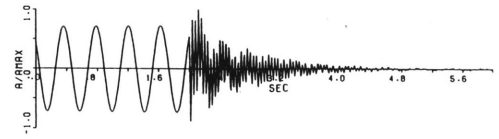
(a) 1st order vibration



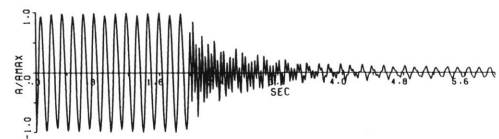
(b) 2nd order vibration



(c) 3rd order vibration

Fig. 7 Effect of vibration control ($\Delta t=0.005$)

(a) 1st order vibration



(b) 2nd order vibration



(c) 3rd order vibration

Fig. 8 Effect of vibration control ($\Delta t=0.01$)

させ、十分に定常振動状態になった後に、制御をかけた場合の応答を示したものである。応答波形は 200 秒間計算した後の 6 秒間を表示している。横軸は時間を、縦軸は応答速度である。1 次、2 次振動の場合、ほぼ完全に制御できている。3 次振動の場合は、無制御時に比べ制御時には応答速度が約 10% まで低減されている。正弦波外力では、1 次、2 次および 3 次振動まで十分に制御効果が現れている。

次に、時刻刻みを 0.01 に変更して、シミュレーショ

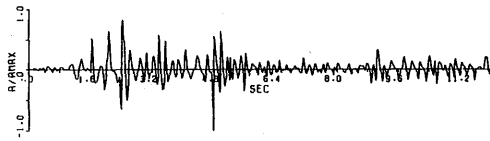
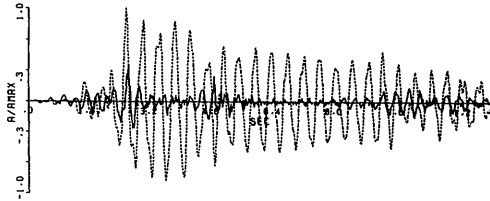


Fig. 9 Acceleration of vibration table

Fig. 10 Top floor acceleration response of building model ($\Delta t=0.03$)

ンを行った結果を図-8に示す。1次振動は、時間刻み0.005の図-7(a)とほぼ同等の制御効果が得られている。2次振動では、図-7(b)と比べて、若干制御効果が落ちてはいるが、応答速度を約15%まで、低減できている。3次振動に関しては、制御効果が得られていない。これは、時間刻み0.01では、演算のために時間遅れが発生するためであると考えられる。

次にEL-Centro(N-S)地震外力に対する振動制御の効果について検討する。図-8に入力地震波形を示した。この波形は、EL-Centro地震で振動台を加振したときの振動台の加速度波形である。図-9は外力が作用したときの無制御時、制御時の応答速度である。コントローラの応答性を考慮して、応答波形の時間刻みは0.03としている。制御をかけると、無制御時に比べ全領域でかなりの低減が見られる。また最大応答についてみれば、無制御時に対し約30%まで低減している。EL-Centro地震外力は、1次振動、2次振動を含む成分が主要であるため、高次振動の影響が見られない。このため制御効果が顕著に現れている。

6.2 実測による振動制御効果の検討

実験では、構造物模型を振動台で加振する。振動台の波形はパーソナルコンピュータにより発生させている。

まず、構造物をそれぞれの固有振動数の周期のパルス状の力で、自由振動させた場合の制御効果について検討した。図-11は1次振動に対する応答波形であり、縦軸は構造物の最上階の応答加速度(gal)、横軸は時間(sec)を表している。a)は制御のない場合、b)は制御のある場合である。制御効果はよく現れており、外力

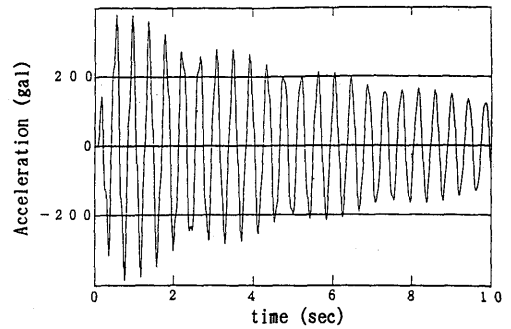
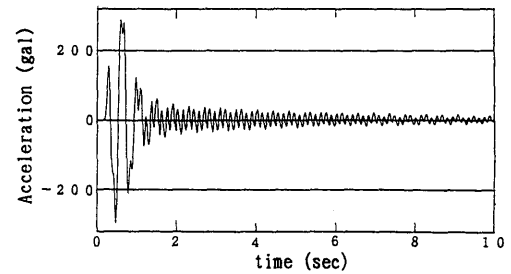
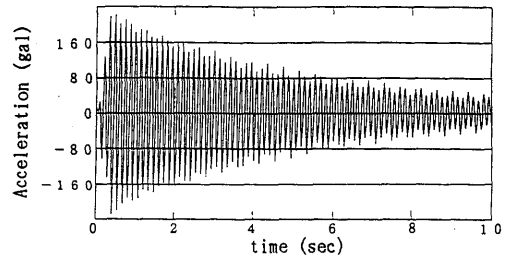
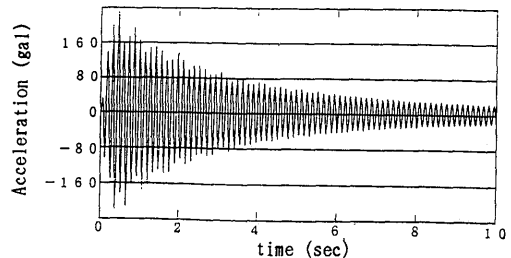
1st order vibration
(a) without control1st order vibration
(b) with control2nd order vibration
(c) without control2nd order vibration
(d) with control

Fig. 11 Effect of vibration control, by experiment

が作用してから約2秒で収束していることがわかる。

c)d)は2次振動数の周期をもつ力に対する応答波形である。無制御、制御時を比較した場合、制御効果は現れているが1次振動ほどの急激な効果は見られない。シミュレーションを示したように、時間遅れによ

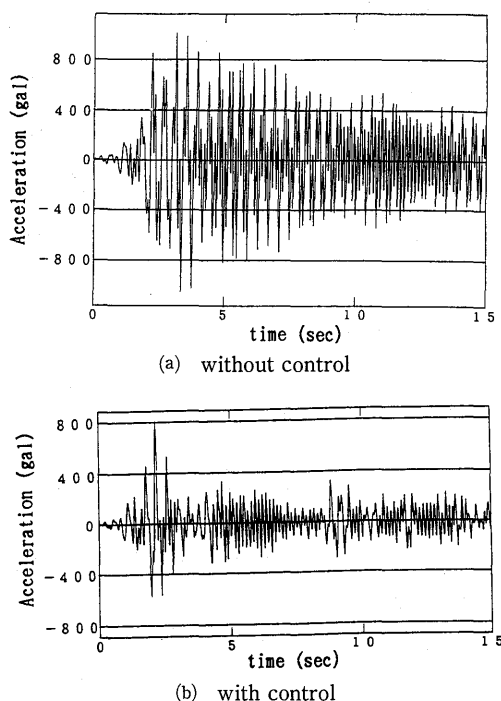


Fig. 12 Top floor acceleration of building model by experiment

る影響が現れている。

次に不規則外力が作用した場合の制御効果を検討する。図-12a)は、EL-Centro地震外力NS成分で加振させたときの構造物の最上階の応答波形である。それに対し、b)は制御をかけた場合の応答波形である。加速度は全体的に約 $\frac{1}{3}$ に低減されていることがわかる。また、FFTアナライザによるパワースペクトル密度を、無制御、制御時のそれぞれについて測定したところ、1次振動数に関しては約7%、2次振動数に関しては約10%まで低下していることが判明した。このように全体的には制御効果はよく現れているが、初期の最大応答の部分においては制御ができていない。したがって初期の部分も制御できるようなパラメータの設定が必要である。

7. おわりに

本研究では、構造物の外乱や変動に対してロバスト性が強いといわれるFuzzy制御を用いて振動シミュレーション、実験を行った。Fuzzy制御は市販のFuzzyボードを使用することにより手軽に取り扱え、容易に制御システムに組み込むことができた。Fuzzy制御の方法としては、Fuzzy推論によりフィードバックゲインを決定し、状態フィードバックを速度に関するのみ行うものとした。

シミュレーションにおける振動制御の効果は、1次、2次振動に関しては、かなりの制御効果が得られた。3次振動に関しては、時間刻み0.01では制御効果は得られず、時間刻み0.005にしたときに制御効果が得られた。これは、時間刻み0.01では、3次の状態量を正確に得られないためだと考えられる。振動波形にEL-Centro地震を用いた、不規則外乱に対する振動制御では、応答波形全体にかなりの制御効果が得られた。

次に、振動実験におけるFuzzy振動制御の効果は、1次、2次振動に関しては、構造物模型の最上階の応答加速度を約20%にまで低減できた。3次振動に関しては、サンプリング周期の限界により、3次の状態量を正確に求められないので、制御効果は得られなかった。地震波に対する不規則外乱に対する制御効果は、応答加速度を全体的に約30%まで低減させる効果が得られた。

以上のように、構造物の振動に対しFuzzy推論を用いた振動制御の有効性が確認できた。Fuzzy制御に関しては、制御方法としてまだFuzzy推論を有効に活用しているとはいえ、今後、外力に対してゲインそのものをFuzzy推論によって求めることを検討したい。

参考文献

- 1) 土木学会：PART A 構造物の振動制御，振動制御コロキウム，1991。
- 2) 岡林隆敏，奥松俊博，古江照巳：オブザーバを用いた構造物の振動制御。長崎大学工学部研究報告，第2巻37号，pp.189-194，1991。
- 3) 亙野良昭，山田稔，河村廣，谷明勲：最大化決定によるファジィ制振システム（2．目標応答を相対変位とした場合），日本建築学会，学術講演梗概集，B，構造I，No.2518，pp.1035-1035，1991。
- 4) 山田登志郎，鈴木宏一：Fuzzy理論による構造物の弾塑性応答制御（その1 解析検討），日本建築学会，学術講演梗概集，B，構造I，No.2519，pp.1036-1037，1991。
- 5) 田中一男：応用をめざす人のためのFuzzy理論入門，ラッセル社，1991。
- 6) 横井与次郎：ファジィ制御とソフトファジコン入門，ラジオ技術社，1990。
- 7) 山川裂：ファジィ応用ハンドブック，図書印刷株式会社，1991。