

5.3.3 実験および解析結果

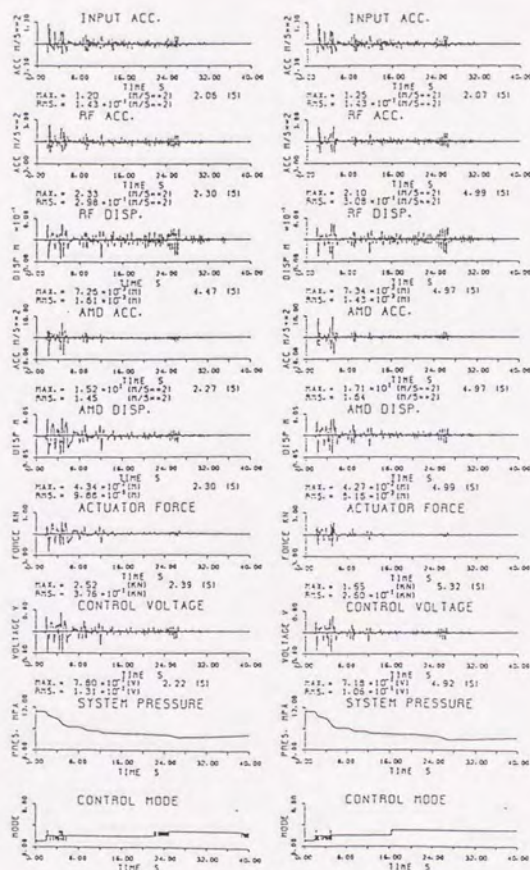
図5.22、図5.23は、エルセントロ・NS波で加振した際の実験値(左)とシミュレーション(右)との比較である。図5.22は制御がアクティブモードのみで行われている場合である。4秒付近の変位によるゲインの切換えやシステム圧力の低下によって制御がf₂に移る時間に若干違いが見られるが、マスダンパの動き、建物モデルの応答、システム圧力の変化等よく一致している。図5.23はパッシブモードに入る場合である。シミュレーションでは2.6秒付近でシステム圧力の低下によってパッシブモードに入っているが、これは切換えがon-off的なものでありシステム圧力の少しの相違がモードの切換えに影響を及ぼしてしまったものである。

図5.24～図5.26はエルセントロ・NS波に対する時刻歴応答である。左から非制振の場合(case1)、パッシブモード1の場合(case2)、ゲイン1のみでのアクティブ制御を行う場合(case3)、可変フィードバックゲイン制御則を用いたアクティブ制御を行う場合(case4)、可変フィードバックゲイン制御とアクティブ・パッシブ切換えを併用した場合(case5)の5種類の実験値の比較である。case3, case4では、システム圧力が低下してアクチュエータが空になる、またはアクチュエータがその変位限界に達するとマスダンパを停止させ非制振の状態にしている。図5.24は0.8 (m/s²)入力の際の応答で、case4, 5ではマスダンパ変位によって何度か制御がファジィ領域に入っており、10秒以降はシステム圧力の低下によってファジィ領域に入っている。しかし、case3, 4, 5でその制振性能にほとんど差はなく、ファジィ領域中でもほとんどゲイン1に近い制御を行っていると思われる。図5.25は1.0 (m/s²)入力の際の応答で、case3では2秒付近でアクチュエータの変位が限界に達し、マスダンパが停止し非制振状態となっているため制振性能が非常に劣化している。しかし、case4, 5ではフィードバックゲインを切換え制御を弱くすることによって、アクティブでの制振を続けている。図5.26は1.5 (m/s²)入力に対する応答で、case4ではゲインの切換えによってアクチュエータの変位に関しては限界に達することなく制御を続けているが、アクチュエータが空になってしまうため27秒付近で非制振となっている。case5では4秒付近で1度パッシブモードに入っている。これは、パッシブモードに切換えるためのマスダンパ変位のしきい値がマスダンパ変位のシステムの限界値よりも小さい

値に設定されているため、結果的にはcase4とcase5はほぼ同等の性能となっている。

図5.27～図5.29は、case1～5について横軸に地震の地動加速度、縦軸に最上階加速度の二乗平均値をとり、実験値をプロットしたものである。図5.27はエルセントロ・NS波に対するものである。case3では入力 $1.0 \text{ (m/s}^2\text{)}$ 以上になると制御を始めて数秒でマスダンパ変位が限界に達するため、その性能は非制振と変わらなくなってしまう。case4では入力 $1.25 \text{ (m/s}^2\text{)}$ ではマスダンパ変位は限界に達しないが、アキュムレータが空になり制振性能が低下している。そして入力が $2.0 \text{ (m/s}^2\text{)}$ になるとマスダンパ変位が限界に達してしまい、さらに性能が低下する。case5では $1.5 \text{ (m/s}^2\text{)}$ 以上の入力では制御がパッシブモードに何度か入るが、変位が小さくなりアクティブモードに戻るため、制振性能はほとんど劣化していない。図5.28は八戸・NS波に対するものである。エルセントロ波と同じくcase5が一番優れた結果となっているが入力 $1.5 \text{ (m/s}^2\text{)}$ に対して性能がP1よりも低下している。これは制御がP2に入ってマスダンパがほとんど停止してしまったからであるが、これはパッシブモードでの切換えを確認するために切換えのしきい値を高く設定したからである。実際にはP2に制御を入れないしきい値設定も可能であり、より大きい入力に対してP1に優る性能をあげることは可能である。図5.29は秋田・NS波に対するものであるが、エルセントロ波と同じくcase5が一番優れた結果となっている。

以上の結果より、マスダンパの作動限界が油圧アクチュエータの変位によって起こる場合についても、可変フィードバックゲイン制御則とアクティブ・パッシブ切換え方式を併用することが、小さい外乱だけでなく大きな外乱に対してもできるだけ高い制振性能をあげるために有効であることが確認出来た。



Experiment Simulation
Elcentro NS

図5.22 エルセントロ (NS波) に対する応答 1.2m/s^2

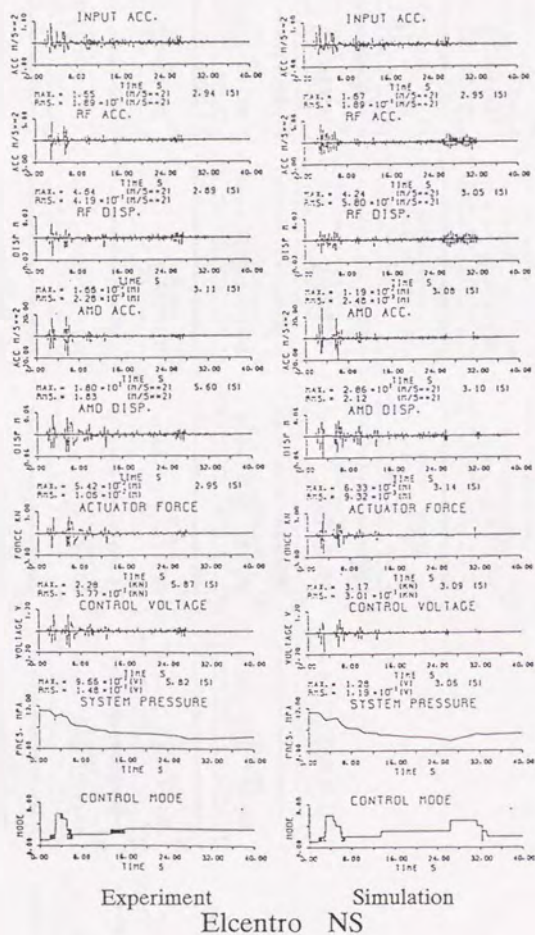


図5.23 エルセントロ (NS波) に対する応答 1.7m/s^2



図5.24 実験による制振性能の比較

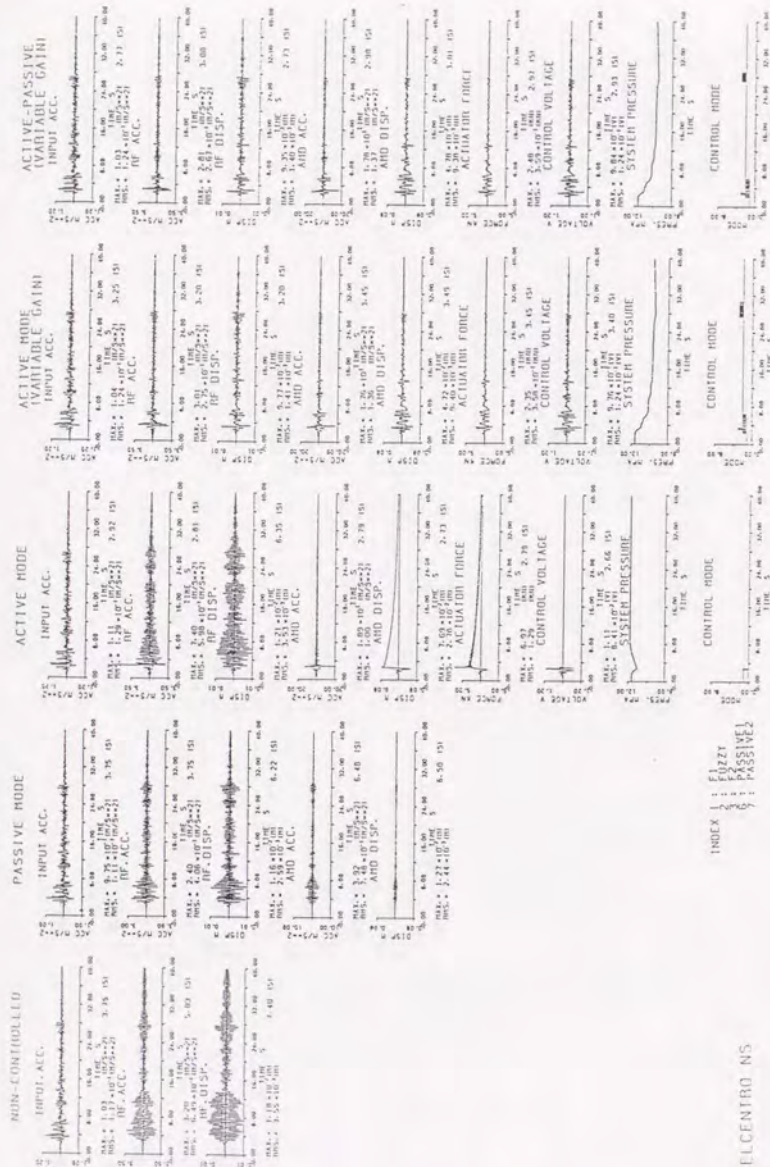


図 5.25 実験による制振性能の比較



図5.26 実験による制振性能の比較

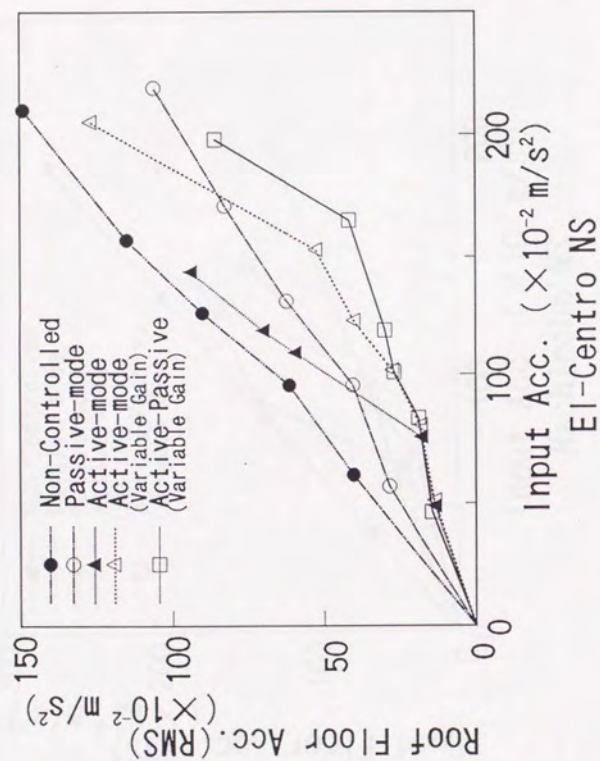


图 5.27 制振性能

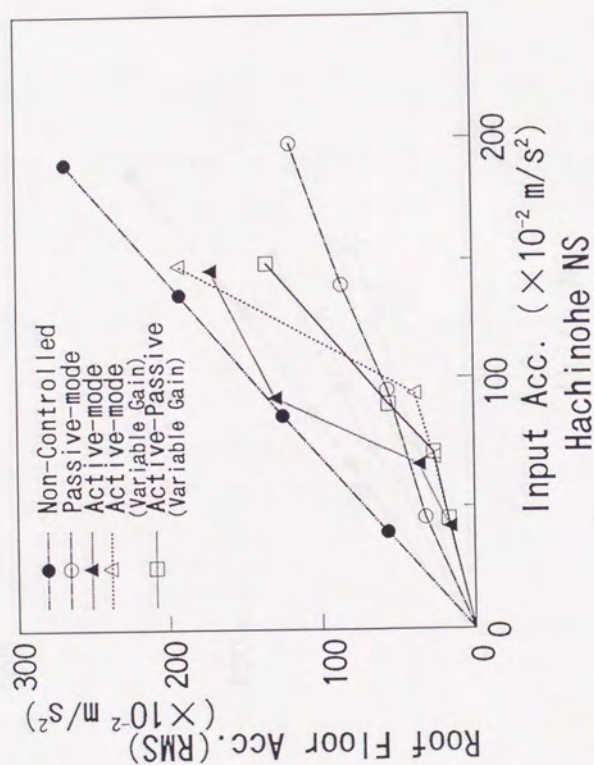


図 5. 28 制振性能

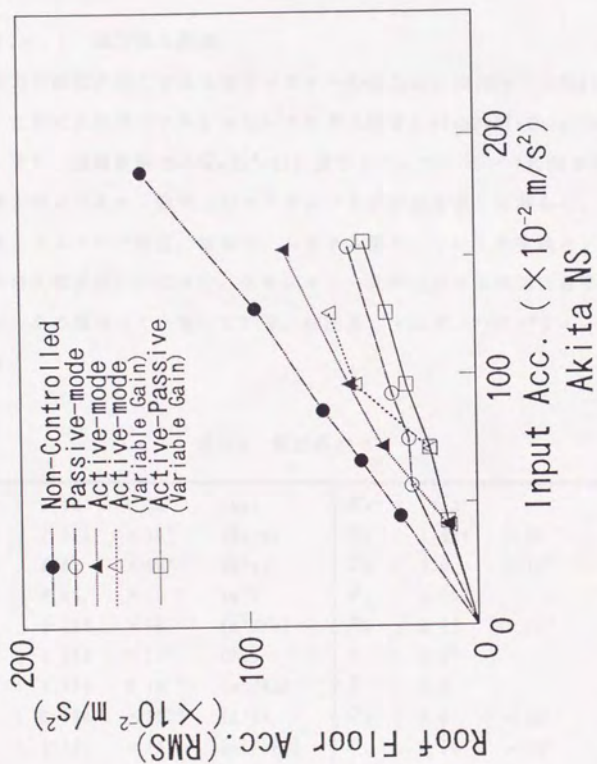


图 5.29 制振性能

5.4 作動限界が油圧アクチュエータの制御力による場合の制御方法

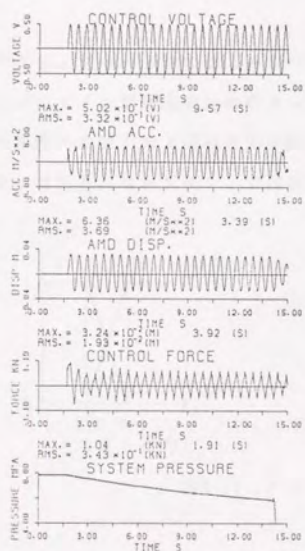
アクティブ・マスダンパの限界としてシステムの圧力低下に加え、アクチュエータの制御力の限界を考慮した系について実験を行った。実験は、アクティブの単一ゲインで制御を行った場合、可変ゲインを使った場合、可変ゲインを使いさらにアクティブ・パッシブ切換えを適用した場合について行いその効果を比較した。

5.4.1 油圧系の設定

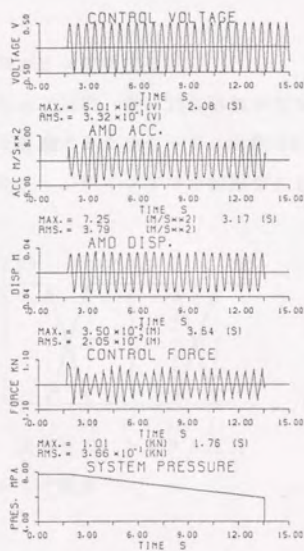
制御力の飽和が起こるよう油圧システムの圧力は7.84(MPa)[=80kgf/cm²]に設定し、これにあわせてアキュムレータのガス圧を5.88(MPa)[=60kgf/cm²]に設定した。また、流量制御弁は Q_m (m³/s)に設定した。マスダンパに関するパラメータは4章と同じであり、建物上のマスダンパを正弦波加振した場合の、マスダンパ加速度、マスダンパ変位、制御力、システム圧力についての実験とシミュレーションとの比較を図5.30に示す。アキュムレータが空になる時間に若干の違いがあるが、その他はよく一致している。油圧系、マスダンパのパラメータを表5.9に示す。

表5.9 油圧系パラメータ

m_d : 1.98	$\times 10^2$	(kg)	K_d : 13.2	(v/m)
c_d : 1.211	$\times 10^3$	(Ns/m)	K_t : 1.281	$\times 10^{-4}$ (v/N)
k_d : 4.59	$\times 10^4$	(N/m)	f_p : 3.0	$\times 10^2$ (N)
a : 3.95	$\times 10^{-4}$	(m ²)	V_t : 0.004	(m ³)
r : 2.115	$\times 10^{-14}$	(m ³ /Pa)	P_o : 8.82	$\times 10^6$ (Pa)
P_{sr} : 1.176	$\times 10^7$	(Pa)	η : 0.90	
b : 3.800	$\times 10^{-2}$	(m ³ /As)	T : 8.0	(s)
K_s : 0.364	$\times 10^{-2}$	(A/v)	Q_m : 5.0	$\times 10^{-5}$ (m ³ /s)
l : 1.270	$\times 10^{-11}$	(m ³ /sPa)	D_1 : 3.50	$\times 10^2$ (N)
			D_2 : 7.00	$\times 10^2$ (N)



Experiment



Simulation

图5.30 正弦波加振实验 (2.0Hz)

5.4.2 制御方法

制御には可変フィードバックゲイン制御則とアクティブ・パッシブ切換えを適用する。フィードバックゲインは最適レギュレータによって決定し、ゲインの切換えは、判断する要素が増加した場合を考慮してファジィ切換えとする。以降にアクティブモードでのゲイン切換え、アクティブモードからパッシブモードへの切換え、パッシブモードからアクティブモードへの切換え、さらにパッシブモードでの切換えの概要を示す。

○ アクティブモードでのフィードバックゲインの切換え

図5.31にゲイン切換えのためのメンバシップ関数、表5.10に制御規則を示す。システム圧力の低下および制御力の限界を考慮するためファジィ変数は P_s 、 P_i/P_s の2つである。なおゲイン1での制御をf1、ゲイン2での制御をf2とする。

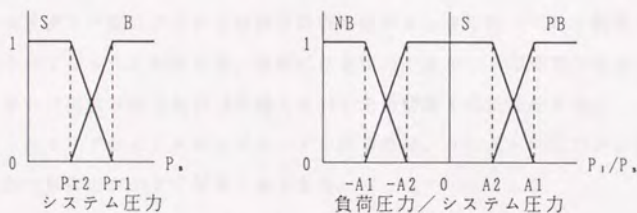


図5.31 メンバシップ関数

表5.10 制御規則表

Rule	P_s	P_i/P_s	CONTROL
R^1	B	S	f 1
R^2	B	NB or PB	f 2
R^3	S	—	f 2

○ アクティブモードからパッシブモードへの切換え

アクティブモードからパッシブモードに切換える条件は、アクティブモードで

の制御が不可能になる時で次の2つである。

1) ポンプ、アキュムレータからの作動油の供給（システム圧力）が限界に達した場合

2) 油圧アクチュエータの制御力が限界に達した場合

したがって、その切換え条件は以下になる。

if $(P_s \leq P_r)$ or $(|P_r| \geq P_s)$ then

パッシブモードに入る

○ パッシブモードからアクティブモードへの切換え

パッシブモードからアクティブモードに戻るのは、システムの圧力が回復してある設定値($P_r + P_y$)まで回復し、さらにアクティブ制御を行っても制御力が限界を越えないと判断された時である。しかし、パッシブモードでは直接制御力を測定することはできない。したがって、制御力の変わりにマスダンパ変位に注目し、P1でのマスダンパ変位が小さくなれば建物の揺れも小さくなっており制御に必要な力も小さくなったと判断する。実際には建物の1次モードの周期である0.4秒間マスダンパ変位が設定値(b_1)を越えないことを切換えの条件とする。

パッシブモードからアクティブモードに戻るのは、システムの圧力が回復しており、かつ制御力が小さくなる時である。

if $((\text{abs}(x_d) < b_1) \text{ for } 0.4(\text{sec})) \text{ and } (P_s > P_r + P_y)$ then

アクティブに戻る

○ パッシブにおける切換え

パッシブモードで考慮すべき限界はマスダンパ変位のみである。したがって、パッシブモードでの切換えは作動限界としてシステム圧力の低下を考えた場合と同じで、その概要は図5.32に示す通りである。切換えの判断に用いるのはマスダンパの変位、および速度の2つである。切換え条件は前節と同様で、マスダンパ変位が過大になったとき、および変位が大きく速度もその速度が50ms続いたときに変位の切換え値を越えてしまうときにP1からP2へ切換える。また、P2からP1への切換えは、一次モード周期(0.4s)の間マスダンパ変位がある値を越えなかったときとする。

切換えの条件は、

- ① $(x_d > PDLIM1) \text{ or } ((x_d > PDLIM2) \text{ and } (\dot{x}_d > PVLIM2))$
- ② $\text{abs}(x_d) < PDLIM3 \text{ for } 0.4(\text{sec})$

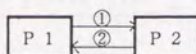


図5.32 パッシブでの切換え

実験で用いたしきい値を表5.11に示す。定格圧力を変えたためシステムの圧力低下に関するしきい値を変更している。また制御力に関するしきい値では、ファジィ領域を小さくするとゲインの切換えが急になり発振をおこすこともあるため、領域を広くとってある。パッシブモードにおける切換えのしきい値は前節と同じ値である。

表5.11 切換えのしきい値

Pr1	: 6.86 (MPa)	P _y	: 0.392 (MPa)
Pr2	: 6.37 (MPa)	PDLIM1	: 0.065 (m)
A1	: 0.8	PDLIM2	: 0.06 (m)
A2	: 0.2	PDLIM3	: 0.01 (m)
b ₁	: 0.01 (m)	PVLIM2	: 0.1 (m/s)

○ フィードバックゲイン

実験で用いたフィードバックゲインは、最適レギュレータでの重みを表5.9に示すように決定した。ゲイン1は建物のみかけの減衰比を1次で17.0%、2次で5.3%にするものとした。ゲイン2はゲイン1に比べ制御入力にかかる重みを大きくし、マスダンパ変位、制御力にも重みをかけて決定した。これによって制御力が小さくなるとともに、使用される油量が減少する。ゲイン2の制振効果は1次で7.5%、2次で3.9%である。

実験で用いたフィードバックゲインは、表5.12に示す通りである。

表5.12 フィードバックゲイン

	λ_1	λ_2	μ_1	μ_2	ν	ξ	α
ゲイン1	1	0.0025	60000	275	0	0	0.89
ゲイン2	1	0.004	60000	400	1	1	5

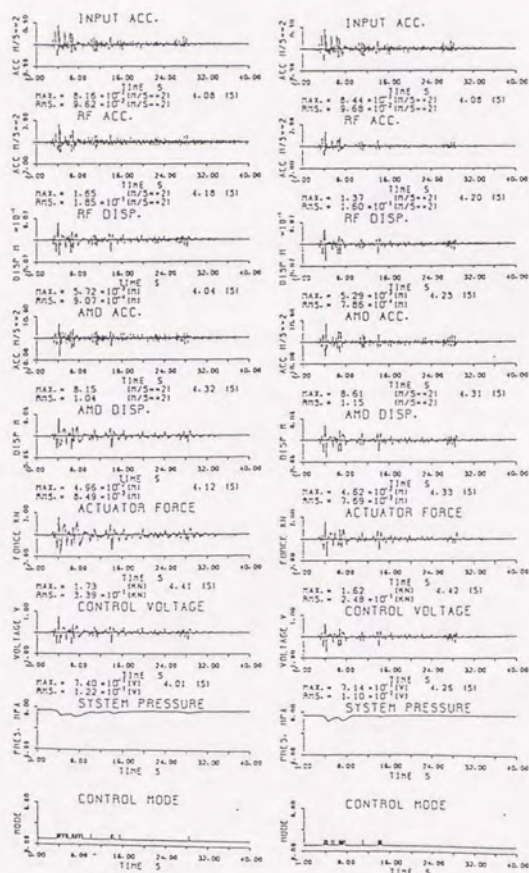
5.4.3 実験および解析結果

図5.33、図5.34は、エルセントロ・NS波で加振した際の実験値(左)とシミュレーション(右)との比較である。図5.33は制御がアクティブモードのみで行われている場合である。4秒付近のゲインの切換えに若干違いが見られるが、マスタダンパの動き、建物モデルの応答、システム圧力の変化等よく一致している。図5.34はパッシブモードに入る場合である。シミュレーションでは実験に比べパッシブモードに入るタイミングが少し早い、システムの圧力があまり低下せず、アクティブモードに戻ってからのゲインの切換えの様子も少し違っている。

図5.35～図5.37はエルセントロ・NS波に対する時刻歴応答である。左から非制振の場合(case1)、パッシブモード1だけ場合(case2)、ゲイン1のみでのアクティブ制御を行う場合(case3)、可変フィードバックゲイン制御則を用いたアクティブ制御を行う場合(case4)、可変フィードバックゲイン制御とアクティブ・パッシブ切換えを併用した場合(case5)の5種類の実験値の比較である。case3, case4では、システム圧力が低下してアクチュエータが空になった場合はマスタダンパを停止させ非制振の状態にし、アクチュエータがその制御力の限界に達した時にはそのまま力を飽和させて制御を続けた。図5.35は $0.8 \text{ (m/s}^2\text{)}$ 入力の際の応答で、case4, 5では制御力のしきい値によって何度か制御がファジィ領域に入っているが、case3, 4, 5でその制振性能にほとんど差は見られない。図5.36は $1.4 \text{ (m/s}^2\text{)}$ 入力の際の応答で、case3, 4ではアクチュエータの制御力が飽和しているが、性能上の悪影響はほとんど見られない。case5では、制御力の飽和によってパッシブモードに入っているが、飽和の程度が小さいためcase3, 4に比べパッシブモードに切換えの方が性能が悪くなっている。図5.37は $2.0 \text{ (m/s}^2\text{)}$ 入力に対する応答である。case3では何度か制御力が飽和した後、システム圧力の低下により非制振状態になっているが、制御力の飽和の度合いが強いときにはマスタダンパ加速度、建物加速度等に衝撃が入っている。case4でも何度か制御力が飽和しているが、ゲインの切換えの効果によって飽和の程度は小さく、さらにシステム圧力も低下はするもののアクチュエータが空になることはなかった。case5では一度パッシブモードに入っているが、制御力の飽和による衝撃が入らないため屋上階加速度の最大値は小さくなっているが、二乗平均値でcase4より性能が悪くなっている。

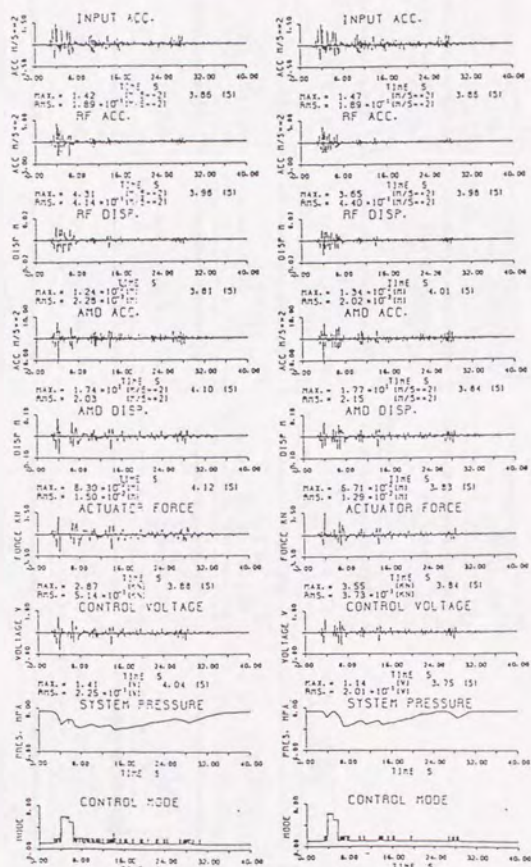
図5.38～図5.40は、case1～5について横軸に地震の地動加速度、縦軸に最上階加速度の二乗平均値をとり、実験値をプロットしたものである。図5.38はエルセントロ・NS波に対するものである。case3では入力が $2.0 \text{ (m/s}^2\text{)}$ のときにシステム圧力が限界になってしまい、性能が極端に悪化している。case4では入力 $1.25 \text{ (m/s}^2\text{)}$ 以上になると制御力の飽和が見られるが、二乗平均値でみた制振性能はほとんど低下しない。case5では、入力が $1.25 \text{ (m/s}^2\text{)}$ 以上では制御力の飽和によってパッシブモードに入るため、case4に比べて若干性能が悪くなっている。図5.39は八戸・NS波、図5.40は秋田・NS波に対するものであるが、いずれもエルセントロ波の場合と同じく二乗平均値で見た制振性能ではcase4が最も良い結果となった。

以上の結果より、マスダンパの作動限界が油圧アクチュエータの制御力によって起こる場合については、可変フィードバックゲイン制御則を用いて制御力はそのまま飽和させることが、小さい外乱だけでなく大きな外乱に対してもできるだけ高い制振性能をあげるために有効であることが確認出来た。ただし、可変フィードバックゲイン制御則を用いても飽和の度合いが強いときには建物の最上階加速度に衝撃を与えることがあるため、実機への適用の際には考慮すべき地震動による飽和の度合いとのトレードオフとなる。



Experiment Simulation
Elcentro NS

図5.33 エルセントロ (NS波) に対する応答 0.8m/s^2



Experiment Simulation
Elcentro NS

図5.34 エルセントロ (NS波) に対する応答 $1.4m/s^2$

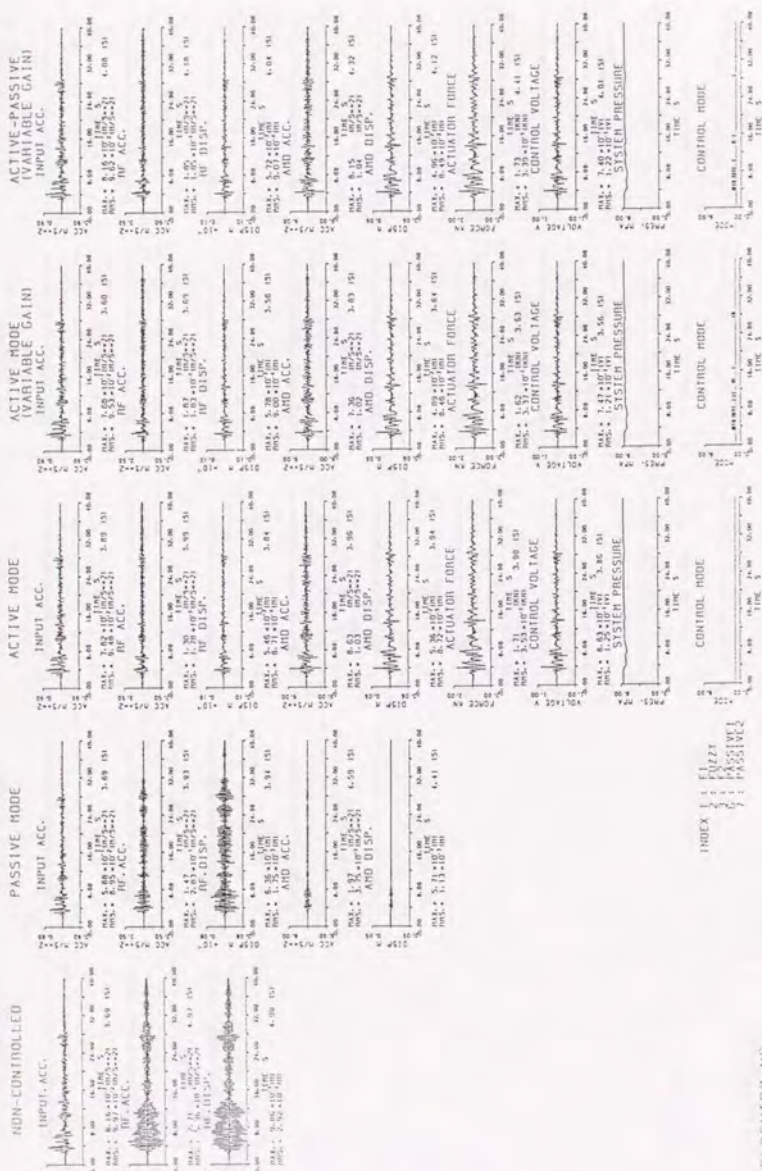
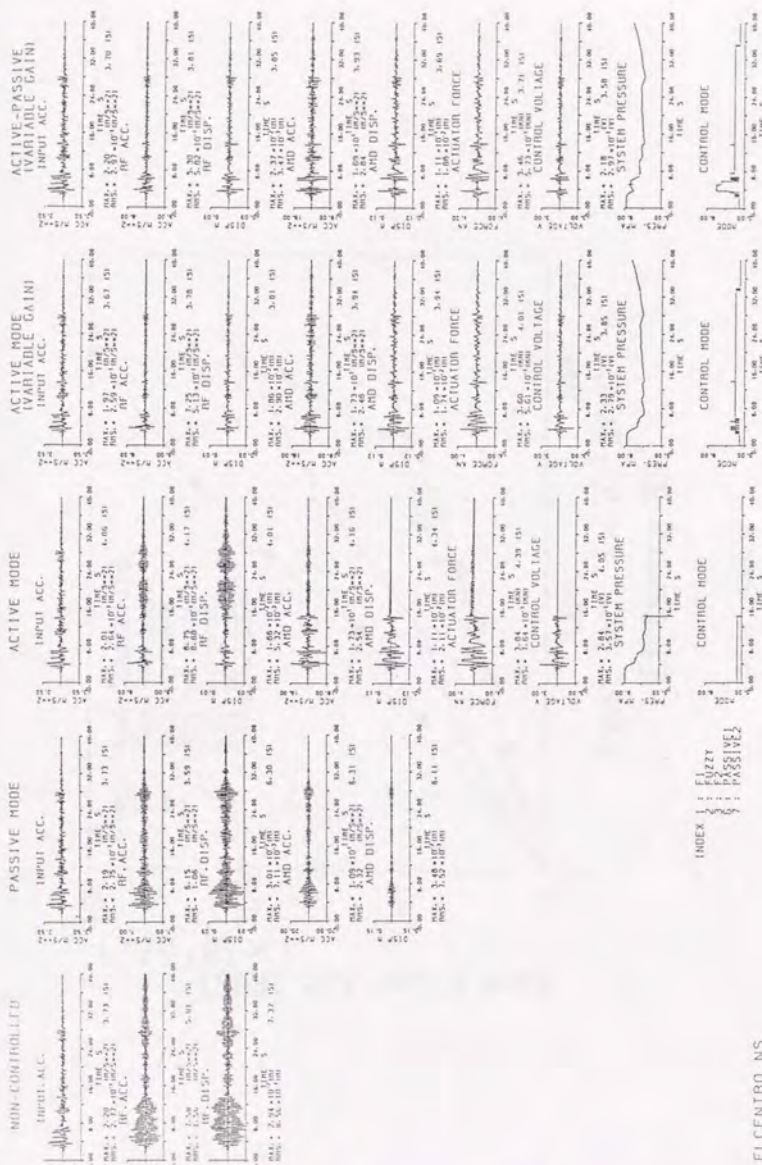


図5.35 実験による制振性能の比較



図5.36 実験による制振性能の比較



図S.37 実験による制振性能の比較

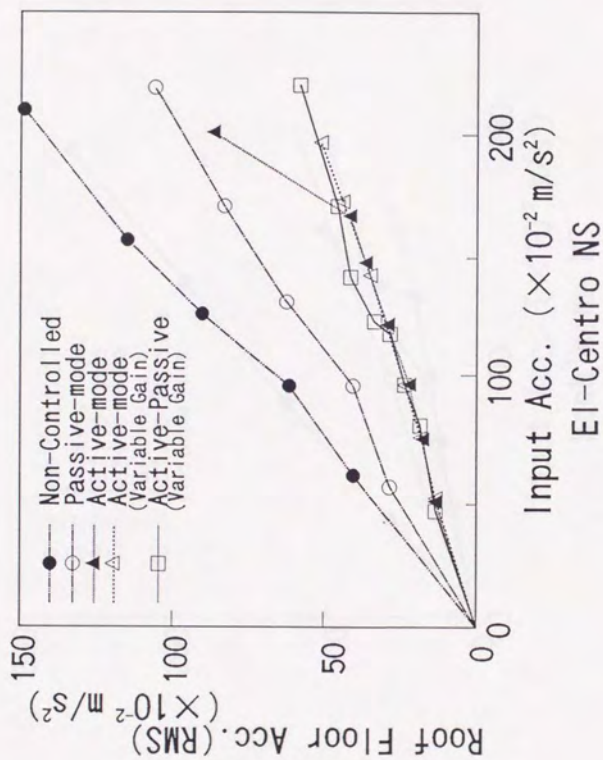


图 5.38 制振性能

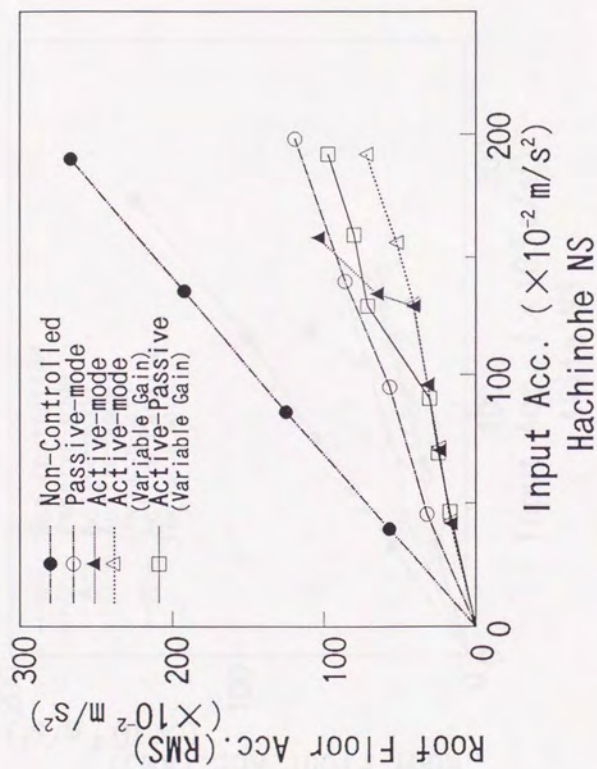


図5.39 制振性能

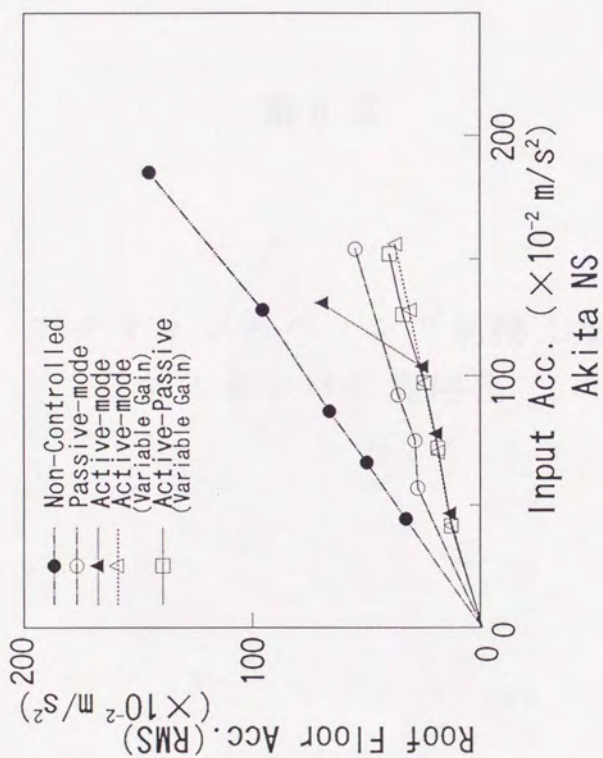
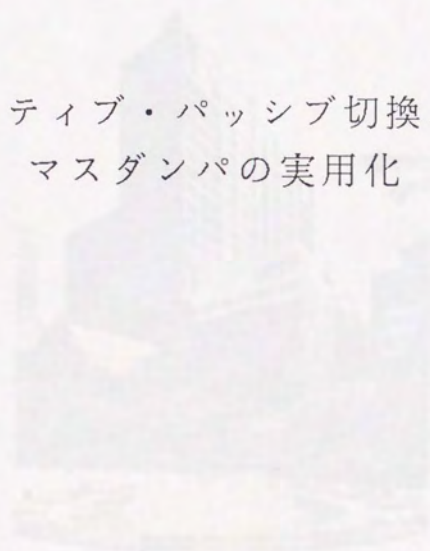


図 5.40 制振性能

第 6 章

アクティブ・パッシブ切換え型 マスダンパの実用化



6.1 高層建物の概要

マスダンパが設置されている高層建物の全景を図6.1に、概要を図6.2に示す。この建物は都内にあり、地下5階、地上20階で1993年8月に竣工した。高さ約130 m、総重量約40000 tonで、スーパーフレーム構造を用い、10階以上が片もち梁のように横にせりだしている。アクティブ・マスダンパが屋上階に設置され、風や地震による建物の振動の制振を行う。制御は $x-y$ 二次元で、その対象は1, 2次モードである。以後、長辺方向を x 方向、短辺方向を y 方向と呼ぶことにする。



図6.1 高層建物全景

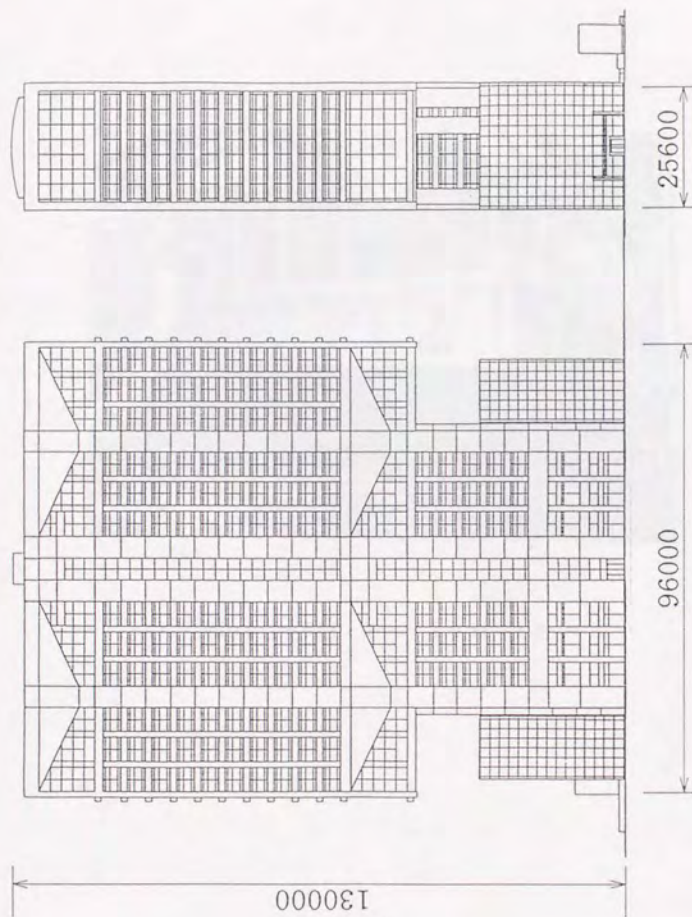


图 6.2 高层建筑物概要

6.2 アクティブ・マスダンパの概要

図6.3にアクティブ・マスダンパの全景を、図6.4にその模式図を示す。



図6.3 アクティブ・マスダンパ全景

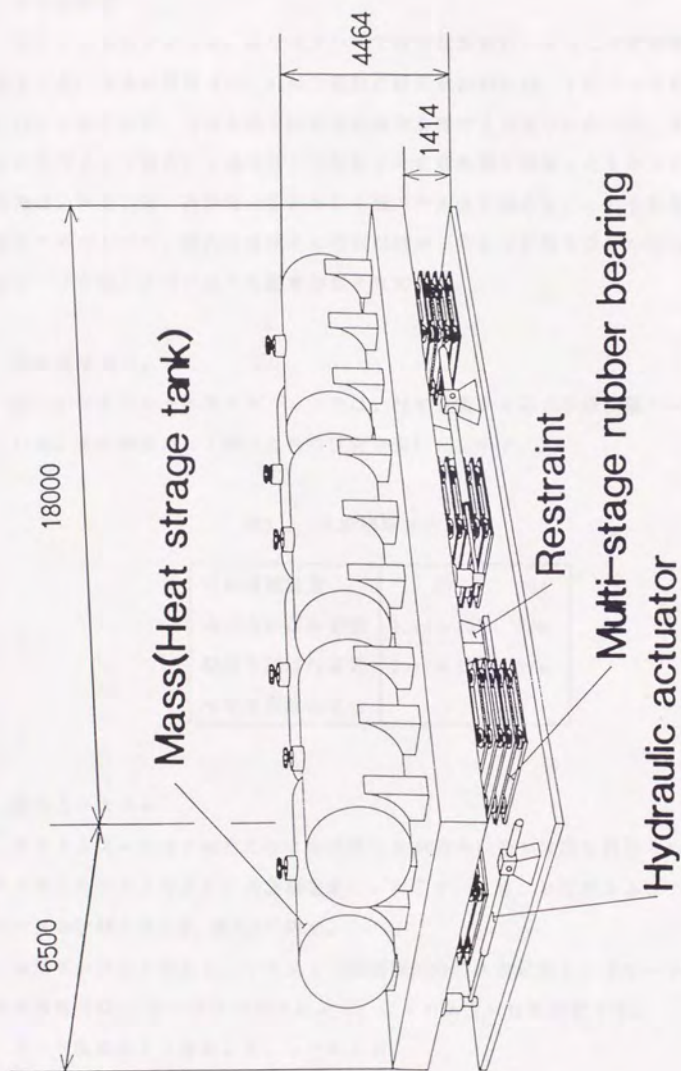


図6.4 アクティブ・マスダンパ

アクティブ・マスダンパのそれぞれの要素について説明する。

①付加質量

図6.4 にもあるように、本マスダンパでは付加質量の一部として蓄熱槽を利用している。全体の質量は194.9tonで建物の総質量の約0.5%、1次モード質量の約0.65%にあたるが、これを総て鉄板等の単なる錘でまかなうかわりに、床面積の有効利用という観点から通常屋上に設置される蓄熱槽を利用したものである。蓄熱槽は、料金の安い夜間電力を利用して槽内の液体を凍らせ、これを昼間に利用するためのもので、槽内には球状の容器が詰まっており振動を受けた際にもスロッシングを起こさないような配慮がなされている。

②多段積層ゴム

図6.4 にあるように本マスダンパでは、付加質量を6基の多段積層ゴムで支えている。多段積層ゴム1基あたりの性能を表6.1 に示す。

表6.1 多段積層ゴム仕様

定格積載質量	33	ton
水平方向ばね定数	1.43×10^5	N/m
鉛直方向ばね定数	2.10×10^5	N/m
水平方向許容変位	1.0	m

③油圧システム

アクチュエータは1軸当たり2本の計4本が向かい合って取り付けられている。アクチュエータ1本あたりの仕様を表6.2 に示す。また、油圧源およびアキュムレータの仕様を表6.3、表6.4に示す。

油圧ポンプは4台あり、アクティブ制御開始時に4台駆動し、リリース弁からの漏れ量 (Q_L) とシステム圧力により、以下のように台数調整する。

ポンプ駆動後10秒毎にチェックを入れ、

- 1) システム圧力が P_T 以下にならないときは1台ずつ停止していく。
- 2) 図6.5 に示すように、システム圧力が P_T 以下になった後、

$Q_L \leq Q_1$	1 台追加
$Q_L > Q_1$	現状維持
$Q_L > Q_2$	1 台停止
$Q_L > Q_3$	2 台停止
$P_s \geq P_{sr}$	1 台を残して停止（アクティブ時） 全ポンプ停止（パッシブ時）

ただし、

P_{sr} : システム定格圧力

ポンプ台数

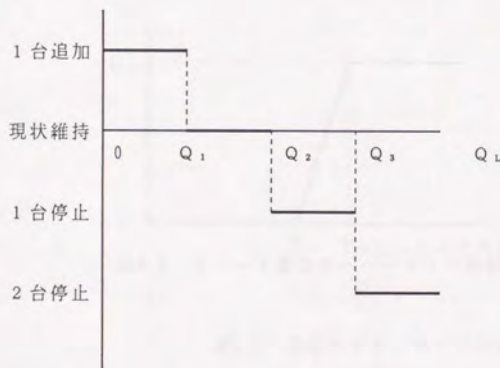


図6.5 リリーフ弁からの漏れ量とポンプの運転

なお、実際にポンプが油を送りはじめるのは、駆動指令後約5秒後である（インバータの安定を待つため）。

また、油圧ポンプとアキュムレータ間にあるリリーフ弁のオーバーライド特性は、図6.6示すように近似される。したがって、ポンプ1台からアキュムレータに入る油量は次式であらわされる。

$$Q = \begin{cases} Q_m & (P_s < P_p) \\ Q_m \times \frac{P_R - P_s}{P_R - P_p} & (P_p \leq P_s \leq P_R) \\ 0 & (P_s \geq P_R) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (6.1)$$

ただし、

- Q : ポンプからアキュムレータに入ってくる油量 (m³/s)
 Q_m : ポンプの定格流量 (m³/s)
 P_R : リリーフ弁の設定圧力 (Pa)
 P_p : リリーフ弁からの漏れが始まる圧力 (Pa)

漏れ

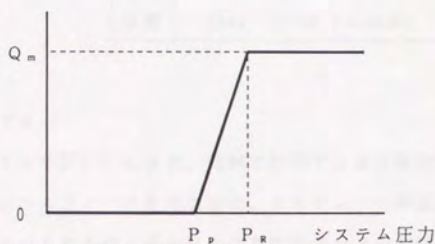


図6.6 リリーフ弁のオーバーライド特性

表6.2 油圧アクチュエータ仕様

支持方式	両ロード、トラニオン支持方式
定格圧力	1.372 MPa (140 kgf/cm ²)
ストローク	±1.0 m
作動油	水-グリコール系作動油
使用温度	-10～80 °C
最大出力	147 kN

表6.3 油圧源仕様

油圧ポンプ	30 kW×4台
パイロットポンプ	11 kW
作動油	水-グリコール系作動油
使用圧力	1.372 MPa (140 kgf/cm ²)
吐出量	350 l/min

表6.4 アキュムレータ仕様

方式	気液分離式ブラダ形
容量	2400 l(120 l×20本)

④制御システム

制御システムを図6.7に示す。実機で計測する値は建物の1, 6, 10, 16, 屋上階およびマスダンパの絶対加速度、マスダンパの設置階に対する相対変位、相対速度、ロードセルから得られるアクチュエータの制御力およびシステムの圧力である。10階は2次モードの腹、6, 16階は3次モードの腹にあたる。絶対加速度データはアンプによって積分され、絶対速度、絶対変位をアナログ値で出力することができる。アンプには積分の際の位相補正も施されており、そのアンプの特性を図6.8、図6.9に示す。図6.8が速度に関する特性、図6.9が変位に関する特性であるが、建物の1次モードにあたる0.4 Hzでの位相のずれは速度、変位とも3度以下になっている。センサから得られたこれらの測定値をA/Dコンバータでデジタル値に変換し、モーダルフィルタによってモード座標に変換した後フィードバックゲインを乗じて制御電圧を計算している。これを、D/Aコンバータによってアナログ値に変換し、アンプで増幅してアクチュエータへの出力としている。また、アクティブ・パッシブの切換えやパッシブモードでのリリーフ弁の切換えも同じコンピュータからI/Oボードを通じて出力する。

なお、処理は32ビットCPU(80486DX)を積んだファクトリーコンピュータによって行い、内部タイマによって時間管理を行った。制御のサンプリングタイ

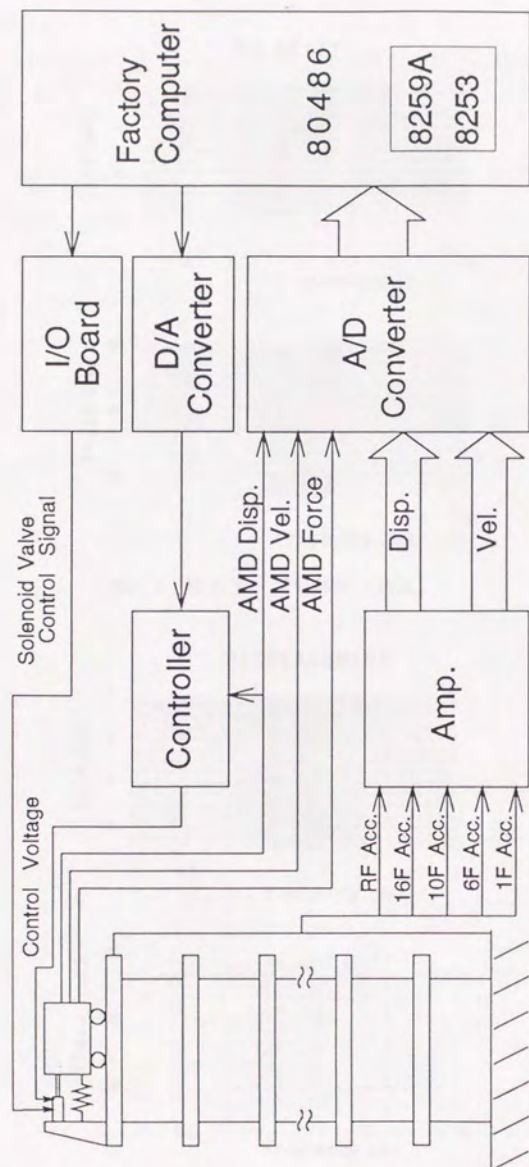


図 6.7 制御システム

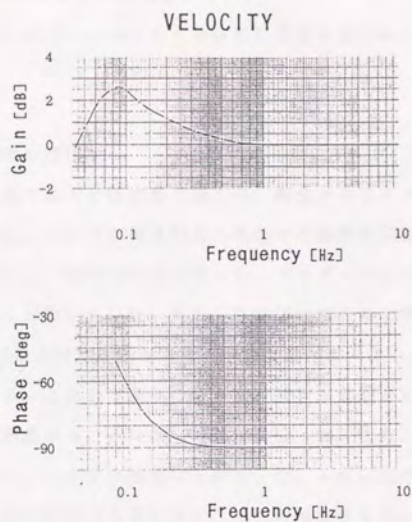


図6.8 積分アンプの特性（速度）

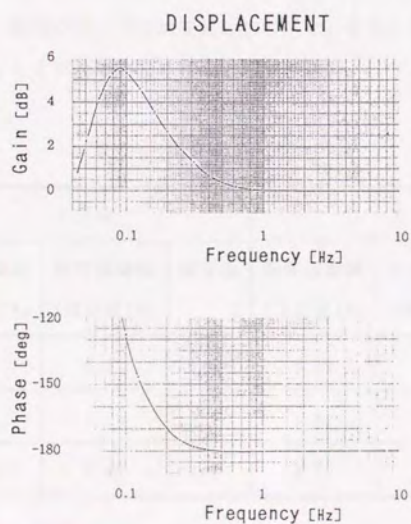


図6.9 積分アンプの特性（変位）

6.3 建物およびマスダンパの同定

制御系の設計およびシミュレーション解析に先立ち建物およびマスダンパの同定を行った

6.3.1 高層建物の同定

高層建物は設計値では19質点系で表され、剛性マトリクスは 19×19 のフルマトリクスである。10月の東京地方の地震での建物の振動データをもとに、この設計値を再検討し、建物の同定を行った。マスダンパはパッシブモードになっていたが、ほとんど動いていないため、非制振状態として扱った。図6.10、図6.11がx、y方向の地動加速度からセンサ設置階(6, 10, 16, 21階)までの伝達関数である。これから建物の各方向の固有振動数がわかり、設計値の剛性マトリクスを比例倍することによって同定を行った。また、センサ設置階の時刻歴応答から建物の1~3次の減衰比を同定した。4次以上の高次モードについては測定データからは判断できないため、1次の減衰比を基にした剛性比例とした。

このようにして得られた建物の1~3次の固有振動数(実測値、同定値)、減衰比を表6.5に、建物のモード形状を図6.12に示す。また、実測値と同定値によるシミュレーションとの比較を図6.13、図6.14に示す。

表6.5 建物のパラメータ

	X 方向			Y 方向		
	固有振動数 (実測値)Hz	固有振動数 (同定値)Hz	減衰比 %	固有振動数 (実測値)Hz	固有振動数 (同定値)Hz	減衰比 %
1 次	0.42	0.42	1.2	0.39	0.39	0.6
2 次	1.22	1.15	2.0	1.31	1.31	1.4
3 次	2.76	2.72	1.2	2.76	2.65	2.0

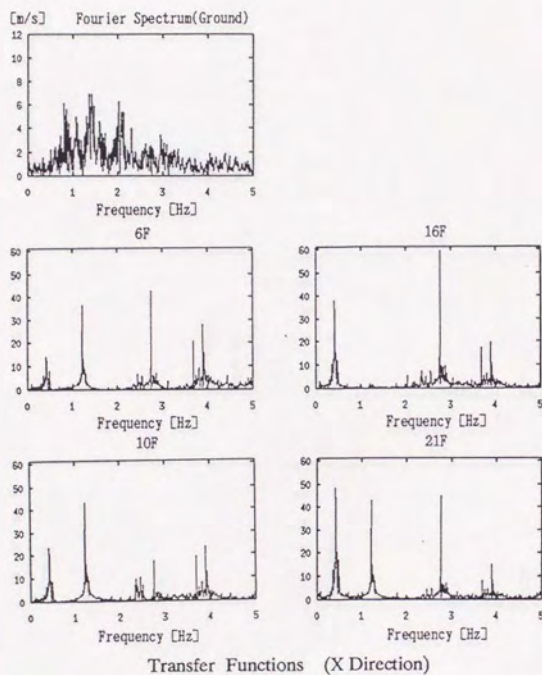


図6.10 伝達関数 (x 方向)

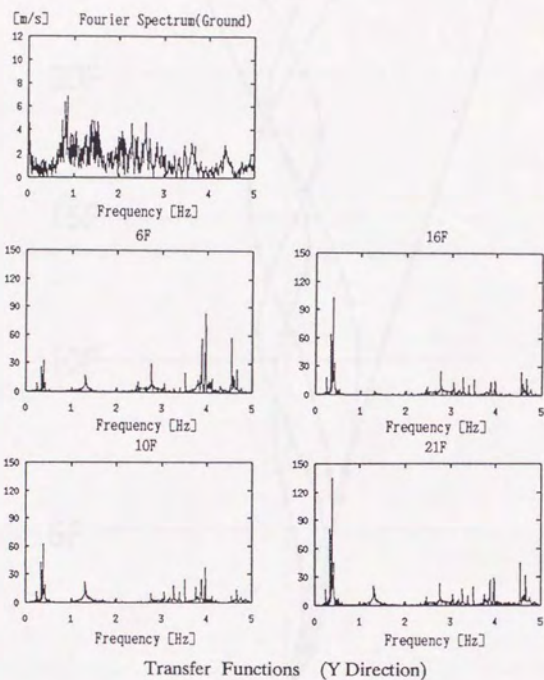


図6.11 伝達関数 (y 方向)

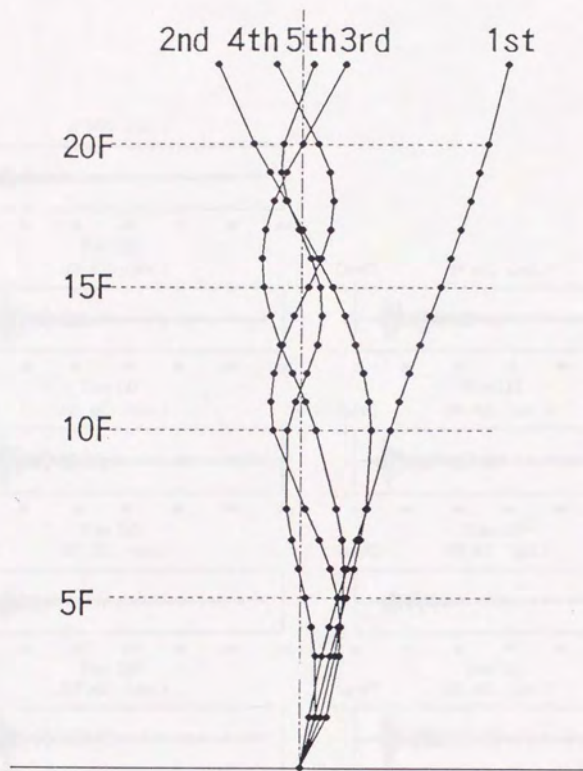
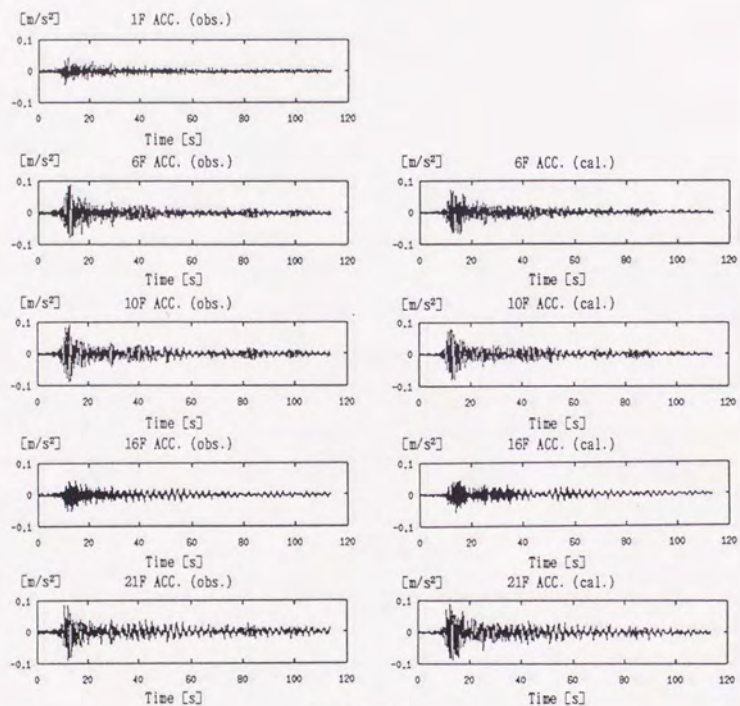
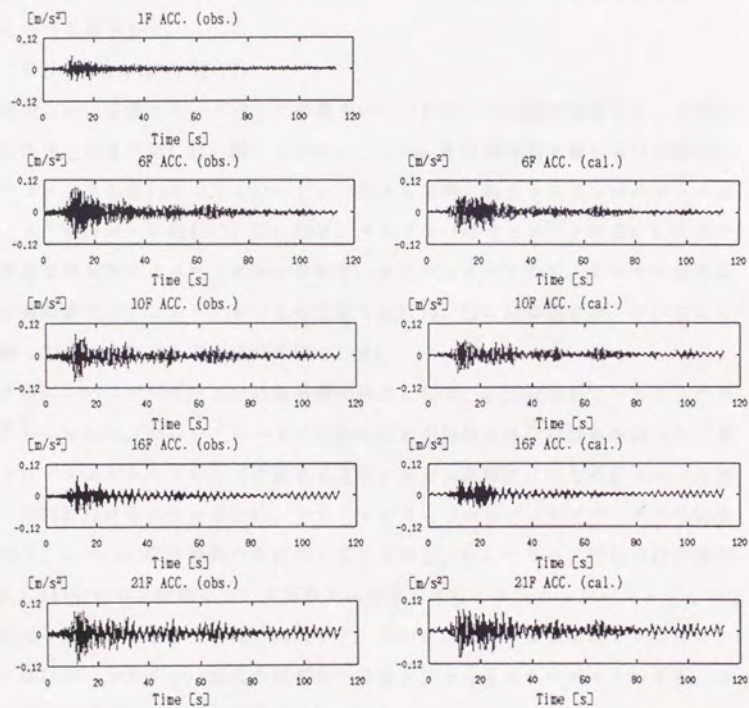


図5.12 建物のモード形状（1～5次）



X Direction

図6.13 地震による振動の時刻歴応答 (x 方向)



Y Direction

図6.14 地震による振動の時刻歴応答 (y 方向)

6.3.2 マスダンパの同定

地上での正弦波加振実験により、マスダンパのパラメータの同定、およびパッシブモードの性能確認を行った。まず、マイナーフィードバックの値であるが、変位フィードバックはマスダンパのドリフトがなく、中立点へ速やかに復帰する値として、

$$K_d = 2.0 \quad (\text{V/m})$$

を採用した。荷重フィードバックはマスダンパの加速度波形の高調波成分が十分抑えられる値として、

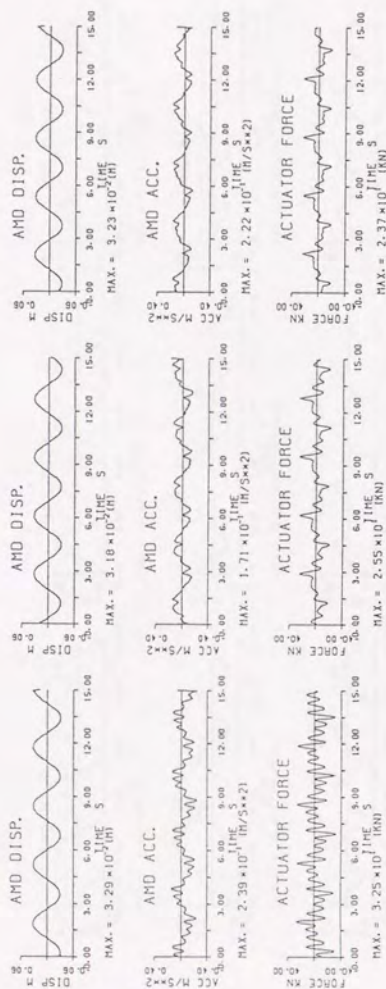
$$K_f = 2.04 \times 10^{-6} \quad (\text{V/N})$$

を採用した。荷重フィードバックの値をいくつか変えて正弦波加振を行った時の波形改善の効果を図6.15、図6.16に示す。また、正弦波掃引実験および同定されたパラメータを用いたシミュレーションによって得られたマスダンパのボード線図（x, y 方向）を図6.17、図6.18に、マスダンパのパラメータを表6.6に示す。正弦波加振実験によるマスダンパの動き、アクチュエータの力、システム圧の変動の実験値とシミュレーションとの比較を図6.19、図6.20に示すが、すべてよく一致しておりモデルの妥当性が確認された。

さらに、パッシブモードの減衰機構の同定として、正弦波加振でマスダンパを変位をさせた後、パッシブモードに切換えて自由減衰させその性能を調べた。実機ではアキュムレータからの作動油を遮断する弁に衝撃防止のためのスローリターンが取り付けられているため、アクティブモードからパッシブモードへの切換えでは、0.15(s) 間は減衰力を発生しないものとした。リリーフ圧力の設定値が0.0, 5.88(MPa)の2種類について実験およびモデルによるシミュレーションとの比較を行った結果を図6.21、図6.22に示す。弁の切換えによる衝撃はモデル化されていないが、マスダンパ変位や減衰力をみると、十分妥当なモデルといえる。なお、本マスダンパの油圧の回路図を図6.23に示す。

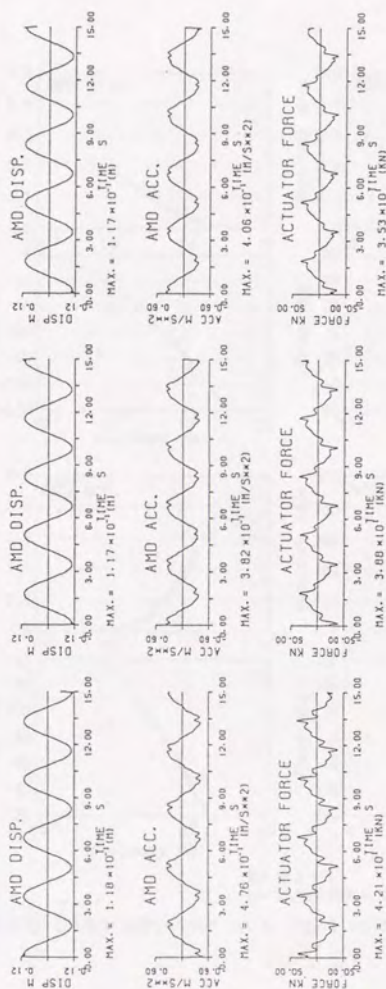
表6.6 マスダンバパラメータ

m_d : 1.949×10^5 (kg)	V_t : 2.4 (m ³)
c_d : 2.44926×10^4 (Ns/m)	P_g : 1.029×10^7 (Pa)
k_d : 8.54979×10^5 (N/m)	P_R : 1.372×10^7 (Pa)
a : 3.5×10^{-2} (m ²)	P_p : 1.2348×10^7 (Pa)
r : 2.5×10^{-11} (m ³ /Pa)	P_T : 1.274×10^7 (Pa)
P_{gr} : 1.372×10^7 (Pa)	η : 0.95
Q_s : 3.3333×10^{-2} (m ³ /s)	T : 8.0 (s)
I_R : 3.0×10^{-2} (A)	Q_m : 1.5×10^{-3} (m ³ /s)
K_s : 0.3×10^{-2} (A/v)	Q_1 : 0.00167 (m ³ /s)
K_d : 2.0 (v/m)	Q_2 : 0.0033 (m ³ /s)
K_t : 2.041×10^{-6} (v/Pa)	Q_3 : 0.005 (m ³ /s)
f_p : 6.86×10^3 (N)	
l : 1.8×10^{-10} (m ³ /sPa)	
c_d^* : 7.34778×10^4 (Ns/m)	D_3 : 4.6648×10^5 (N)
D_1 : 1.715×10^4 (N)	T_s : 0.15 (s)
D_2 : 1.715×10^5 (N)	



$$\begin{aligned}
 K_d &= 2.0 \quad \text{v/m} & K_d &= 2.0 \quad \text{v/m} \\
 K_i &= 5.102 \times 10^{-7} \quad \text{v/N} & K_i &= 1.020 \times 10^{-6} \quad \text{v/N} \\
 &0.33 \text{ Hz, } 0.3\text{V}
 \end{aligned}$$

図6.15 マイナーフィードバック実験



$K_d = 2.0$ v/m
 $K_i = 0.0$ v/N

$K_d = 2.0$ v/m
 $K_i = 5.102 \times 10^{-7}$ v/N

$K_d = 2.0$ v/m
 $K_i = 1.020 \times 10^{-6}$ v/N

0.33 Hz, 1.0V

図6.16 マイナードバック実験

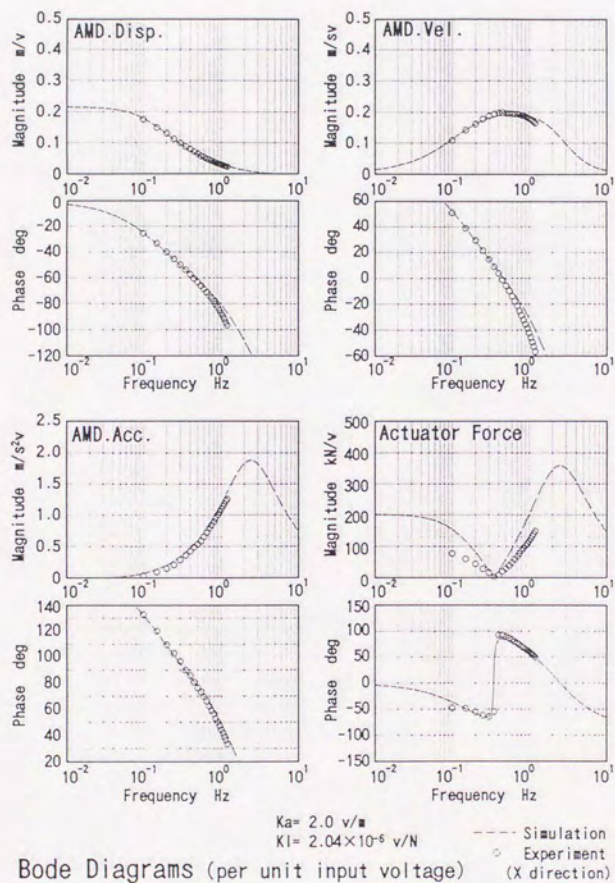


図6.17 ボード線図 (x方向)

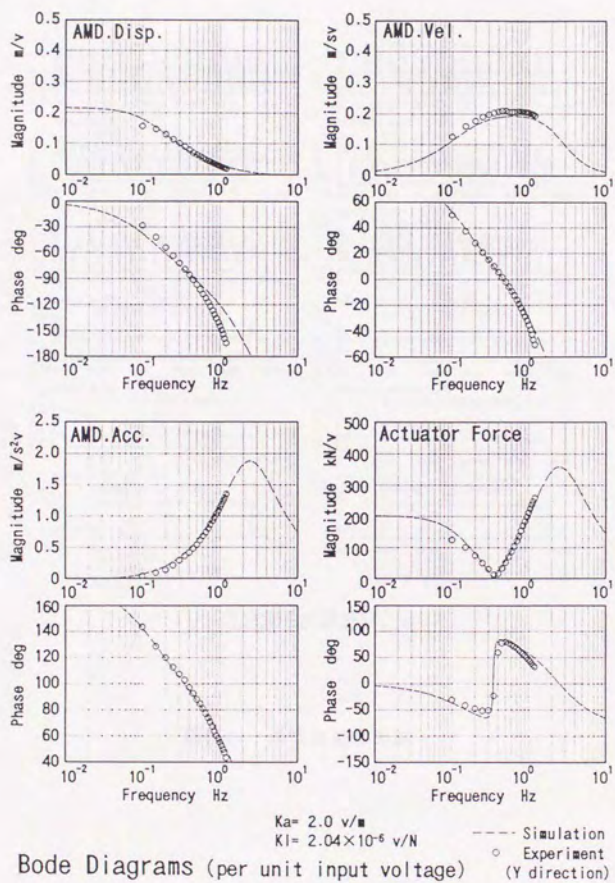
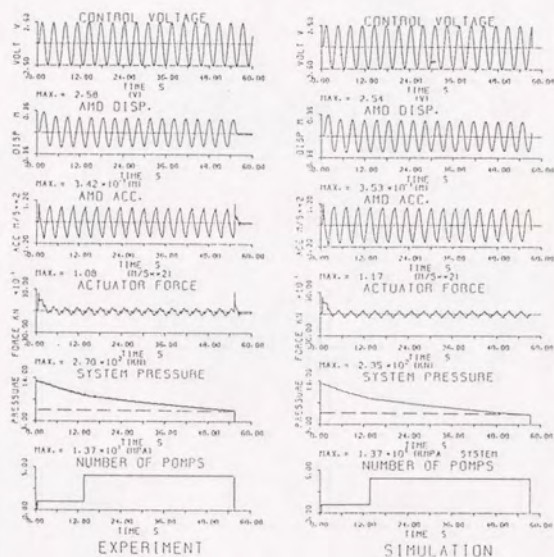
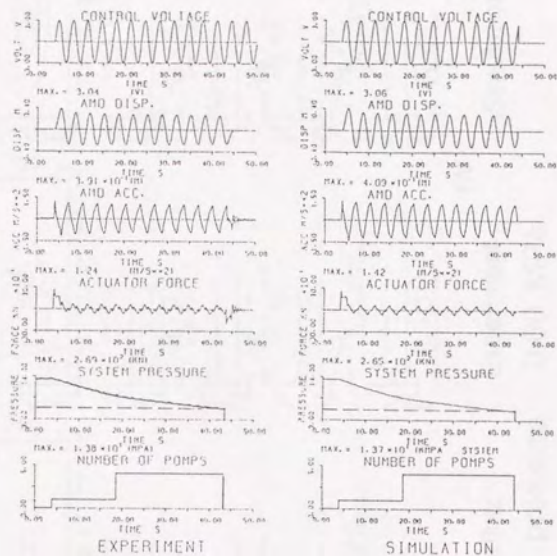


図6.18 ボード線図 (y方向)



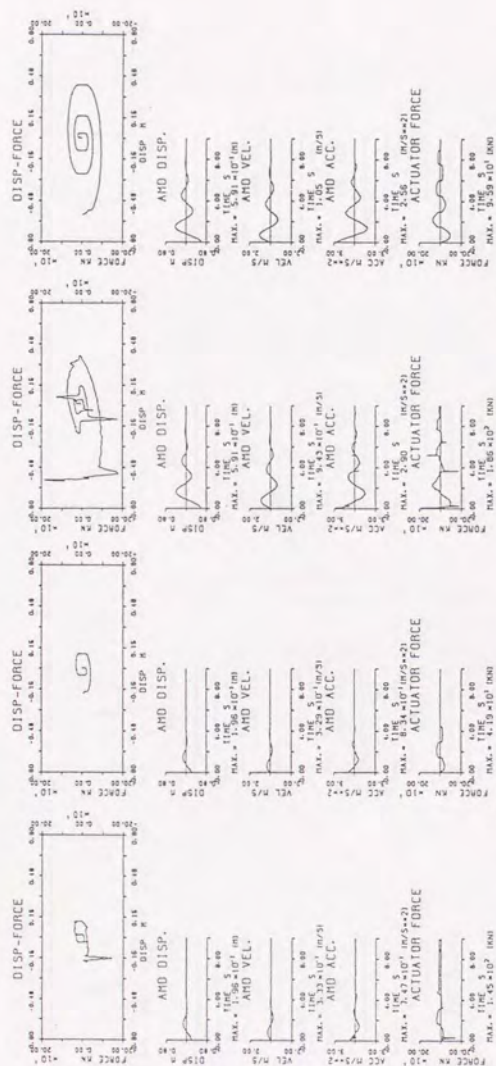
0.33Hz 2.5V

图6.19 正弦波加振实验



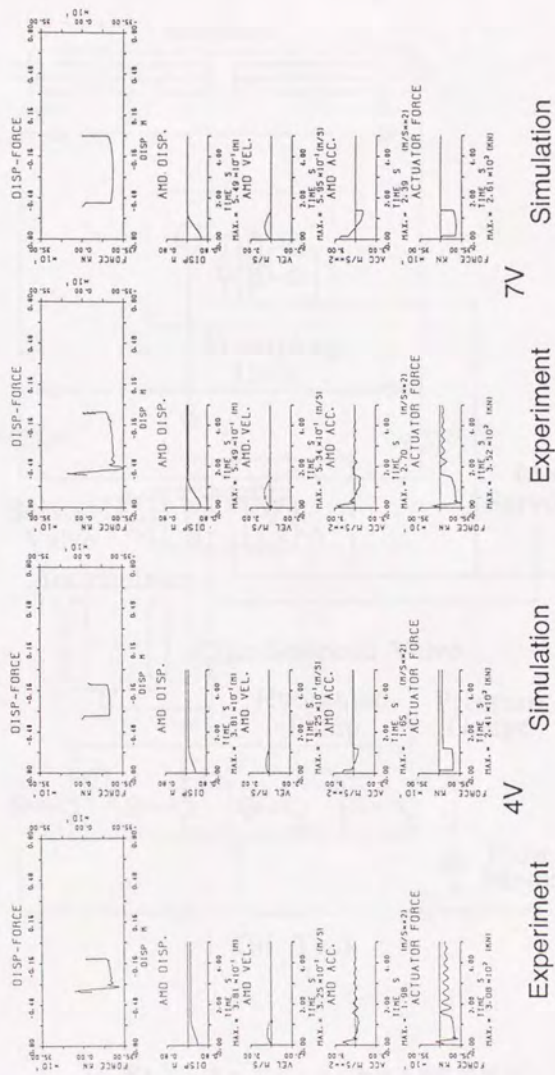
0.33Hz 3.0V

图6.20 正弦波加振实验



Relief pressure 0.00 MPa

图 6.21 减衰机构实验



Relief pressure 5.88 MPa

図6.22 減衰機構実験

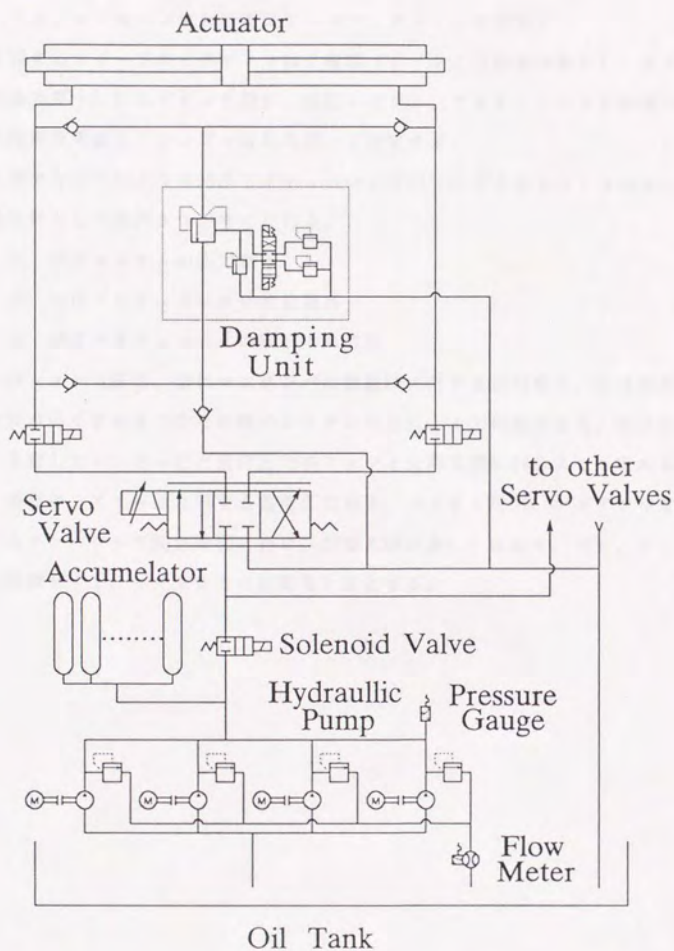


図6.23 本マスダンパにおける油圧回路図

6.4 振動制御実験

6.4.1 制御の切換えについて

① アクティブモードにおけるフィードバックゲインの切換え

使用するフィードバックゲインは2種類（ゲイン1（制振効果大）、ゲイン2（制振効果小））のゲインを基に、油圧システム、アクチュエータの制限による作動限界を考慮してファジィ推論を用いて決定する。

3章でも述べたように油圧アクチュエータを用いたアクティブ・マスダンパの作動限界として次の3つが考えられる。

- ① 油圧システムの圧力低下
- ② 油圧アクチュエータの変位限界
- ③ 油圧アクチュエータの制御力の限界

①はシステム圧力、②はマスダンパの設置階に対する相対変位、③は制御力から計算される負荷圧力とその時のシステム圧力によって判断できる。①と③を同時に考慮したシステム圧と負荷圧力のファジィ分割を図6.24のように定める。また、現在のシステム圧に対する負荷圧力の比、システム圧力、マスダンパ変位におけるメンバシップ関数を図6.25に、切換え則を表6.7に示す。なお、ゲイン1での制御を f_1 、ゲイン2での制御を f_2 とする。

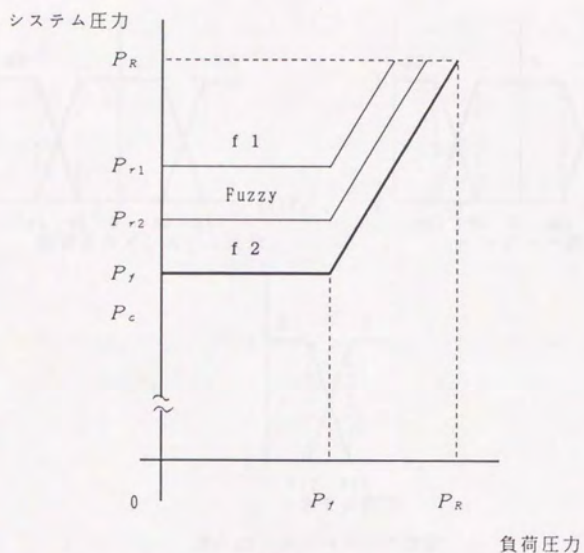


図6.24 領域のファジィ分割

ただし、

- P_R : リリーフ弁の設定圧力 (Pa)
- P_c : シーケンサによるアクティブ限界圧力 (Pa)
- P_f : ソフトウェアでのアクティブ限界圧力 (Pa)

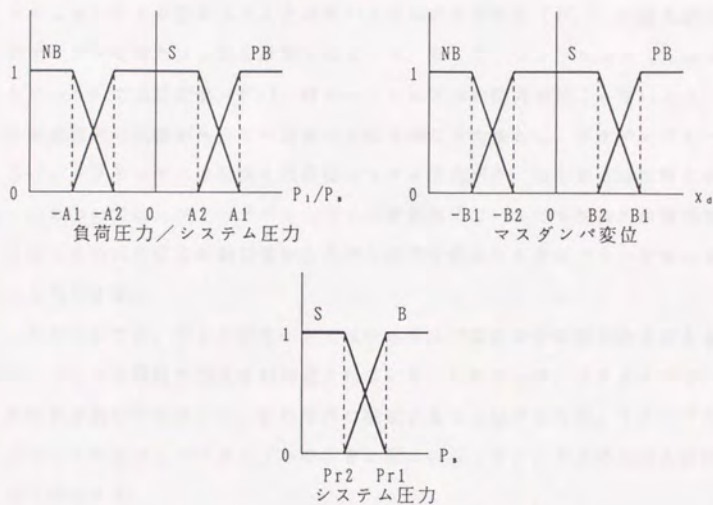


図6.25 メンバシップ関数

表6.7 制御規則表

Rule	P_1/P_s	P_s	x_d	CONTROL
R^1	NB or PB	—	—	f 2
R^2	S	S	—	f 2
R^3	S	B	NB or PB	f 2
R^4	S	B	S	f 1

② アクティブモードからパッシブモードへの切換え

アクティブモードからパッシブモードに切換える場合は、油圧系が作動限界になるときで次の3つである。

- 1) アキュムレータからの作動油の供給（システム圧力）の限界
- 2) 制御力の限界
- 3) アクチュエータ変位の限界

1)については、ハードウェア（油圧のシーケンサ）での限界設定値（ P_c ）は、アキュムレータが空になることが無いようにそのガス圧（ P_g ）の最大値に少しのマージンを持たせた値に設定されている。そこで、ソフトウェア（AMDコントローラ）での設定値（ P_f ）はハードウェアでの限界が起らないよう、 P_c に接点信号の誤差が入らない程度の余裕を持たせた値とし、アクティブモードからパッシブモードへの切換え条件はシステム圧力が P_f 以下になった時とする。

2)については、フィードバックゲインを切換えていっても制御力が限界を越えた時つまり負荷圧力の絶対値がシステム圧力を越えたときにパッシブモードへ移るものとする。

3)については、パッシブモードではマスダンパ変位をその限界内で抑えるために、さらに3段階の切換えが用意されている。したがって、アクティブモードでの限界を油圧アクチュエータの限界に設定することはできない。そこでアクティブモードからパッシブモードへのしきい値はパッシブモードでの切換えの判断を行う値とする。

以上、1)、2)、3)のいずれかの条件が満たされた時、パッシブモードに切換えるものとする。

$(P_s \leq P_f) \text{ or } (|P_f| \geq P_s) \text{ or } (ABS(X_d) > XD_LIM) \text{ then}$

パッシブ・モードに入る

③ パッシブモードからアクティブモードへの切換え

パッシブモードからアクティブモードへの切換えは、パッシブ1の状態からのみとする。切換えの条件はシステム圧力が十分回復し、アクチュエータ変位、制御力が過大にならないと判断されたときである。システム圧力に関しては、ある設定値（ $P_f + P_r$ ）まで回復したときにアクティブモードに戻すことにする。 P_r の値はあまり頻繁に切換えが入らないようにシミュレーションで検討して決定する。アクチュエータ変位、制御力に関しては5章でも述べたようにパッシブ1でのマスダンパ変位に注目し、マスダンパ変位の一周期間（2.5秒）の最大値があるしきい値を越えない時に、アクティブモードに戻す。アクティブモードに移るときには、衝撃を与えないようマスダンパ速度が一定値以下になるのを待って、制御電圧を一定時間（ T_d ）をかけて出していく。

if ((abs(xd)<d₁) for 3.0(sec)) and (P₁>P_f+α)) then

アクティブに戻る

④ パッシブモードにおける切換え

パッシブモードで考慮すべき限界はマスダンパ変位のみである。ただし、マスダンパはx y 平面を動くため、実際の限界は多段積層ゴムの変位限界 (x_g) である。3つの圧力設定値をP₁, P₂, P₃として、それぞれの状態をP1、P2、P3と呼ぶことにする。切換えは多段積層ゴムの変位に注目したクリスプ切換えでその概要は図6.26に示す通りである。基本的にはP1とP2、P2とP3間の切換えだが、急な大入力の際にも変位限界を越えないよう、P1からP3に直接移ることもできる。なお、切換えの判断に用いるのは多段積層ゴムの変位、および変位の正方向への速度の2つである。ただし、パッシブモードにおける減衰機構は摩擦ダンパと同じでマスダンパが変位したまま止まってしまうことが考えられるため、このような場合には外力による加振の強さをみるため最上階加速度を使って判断する。また、P2、P3に入るのは比較的大きな地震の時だけであり、P2、P3にはほとんど制振効果がなく、マスダンパ変位を抑えるだけのものであるため、パッシブ間で頻繁に切換えを行う必要は無いと思われる。したがって、P2やP3からP1への復帰は、十分安全な状態になってからとする。パッシブモードでの切換えの条件は以下に示す通りである。

- ① (xg>PDLIM1) or ((xg>PDLIM2) and (x_g[˙]>PVLIM2))
- ② (xg>PDLIM3) or ((xg>PDLIM4) and (x_g[˙]>PVLIM4))
- ③ (xg>PDLIM5) and (x_g[˙]>PVLIM5)
- ④ abs(xg)<PDLIM6 for 3.0(sec)
- ⑤ abs(xg)<PDLIM7 or (abs(x_g[˙])<0.1 and abs(x_s[˙])<PALIM) for 10.0(sec)

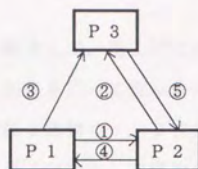


図6.26 パッシブモードでの切換え

⑤ その他

停電時等、ポンプを駆動することはできないが、コンピュータは正常に作動する時には、パッシブモードのみでのコントロール（設定圧力の切換え）を行う。

以上が切換えの概要である。切換えのしきい値を表6.8 に示す。

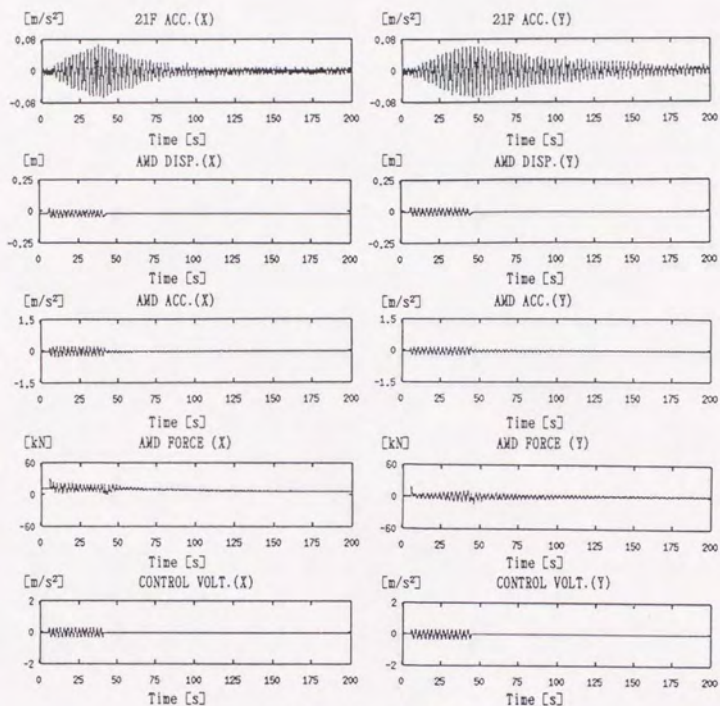
表6.8 切換えのしきい値

Pr1 : 1.127×10^7	(Pa)	XD_LIM : 0.6	(m)
Pr2 : 1.078×10^7	(Pa)	PDLIM1 : 0.8	(m)
A1 : 0.95		PDLIM2 : 0.5	(m)
A2 : 0.5		PDLIM3 : 0.8	(m)
B1 : 0.3	(m)	PDLIM4 : 0.5	(m)
B2 : 0.2	(m)	PDLIM5 : 0.65	(m)
C1 : 10.0	(V)	PDLIM6 : 0.1	(m)
C2 : 10.0	(V)	PDLIM7 : 0.1	(m)
d1 : 0.1	(m)	PVLIM2 : 0.8	(m/s)
α : 4.9×10^5	(Pa)	PVLIM4 : 1.6	(m/s)
T _a : 0.1	(s)	PALIM : 0.1	(m/s ²)

6.4.2 制御実験

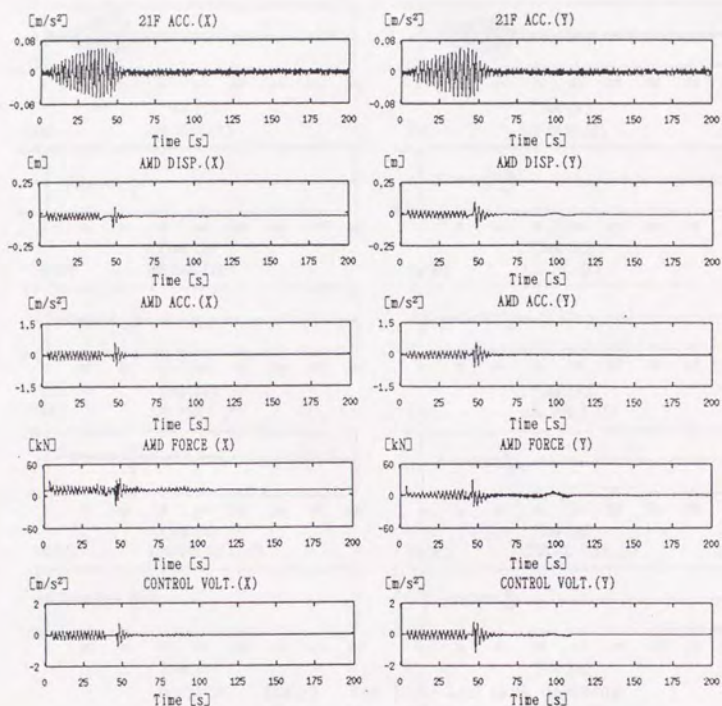
実大建物における制御実験として、屋上階に設置したマスダンパを起振機として使い建物を加振した後、制御を行って振動を抑える実験を行った。実験結果を図6.27～図6.34に示す。加振は建物の1, 2次の固有振動数での正弦波加振で、フィードバックゲインではゲイン1として建物のみかけの減衰を1, 2次とも約7%にするもの(7%ゲインと呼ぶ)と、10%にするもの(10%ゲインと呼ぶ)と、15%にするもの(15%ゲインと呼ぶ)の3種類を採用した。ゲイン2には建物のみかけの減衰を1, 2次とも約4%にするものを採用した。図6.27～図6.30までは建物の1次の固有振動数(x方向0.42Hz, y方向0.39Hz)で最上階加速度が 0.07 m/s^2 程度になるまで加振した後、1度自由減衰させてから制御を行ったものである。図6.27は非制振のままで自由減衰させた場合で減衰の小さいy方向などでは加振後2分以上経過してもまだ振動が残っている。図6.28は7%ゲインの場合、図6.29は10%ゲインの場合、図6.30は15%ゲインの場合だが、いずれも制御を始めて数波で完全に振動を抑えている。建物加速度、マスダンパ変位、アクチュエータの制御力をみるとフィードバックゲインをあげると強い制御がかかり、振動の抑制にかかる時間が短くなっていることがわかる。

図6.31～図6.34は2次の固有振動数(x方向1.22Hz, y方向1.31Hz)で最上階加速度がx方向 0.07 m/s^2 , y方向 0.12 m/s^2 程度になるまで加振した後、1度自由減衰させてから制御を行ったものである。図6.31が非制振、図6.32が7%ゲイン、図6.33が10%ゲイン、図6.34が15%ゲインの場合であるが、1次モードの場合と同様2次モードに関しても制御の効果がよくあらわれている。



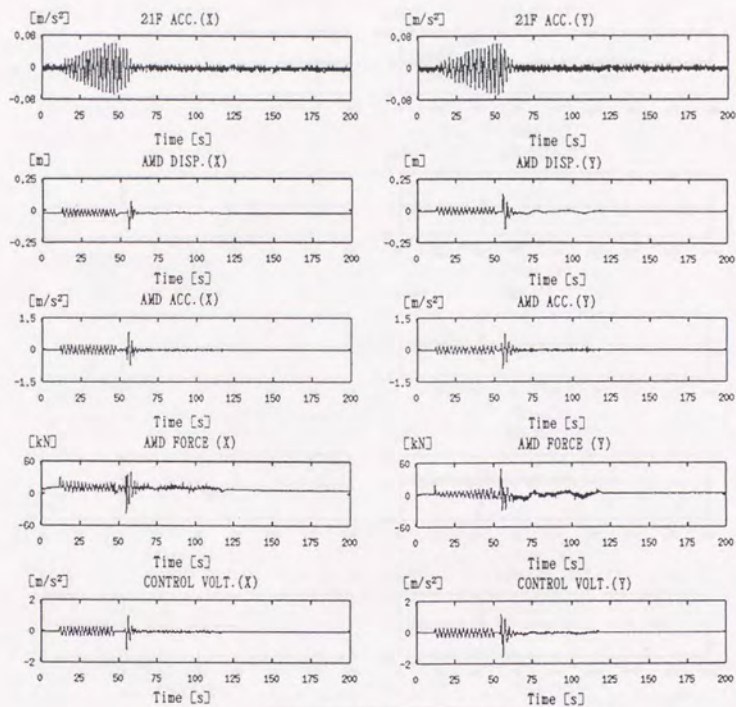
Non Controlled

図6.27 制御実験（1次モード） 非制振



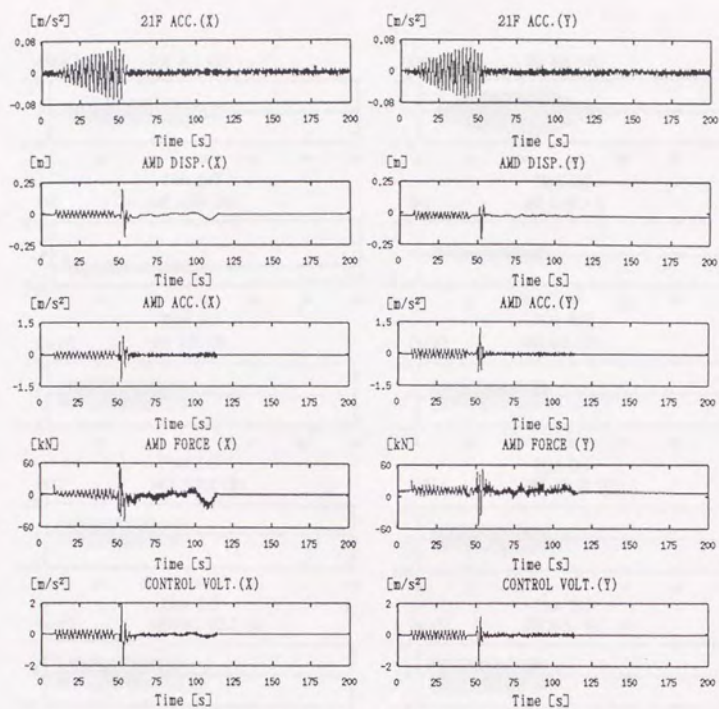
Active Gain1 : 1st 7% 2nd 7% damping
Gain2 : 1st 4% 2nd 4% damping

図 6.28 制御実験 (1 次モード) 7%ゲイン



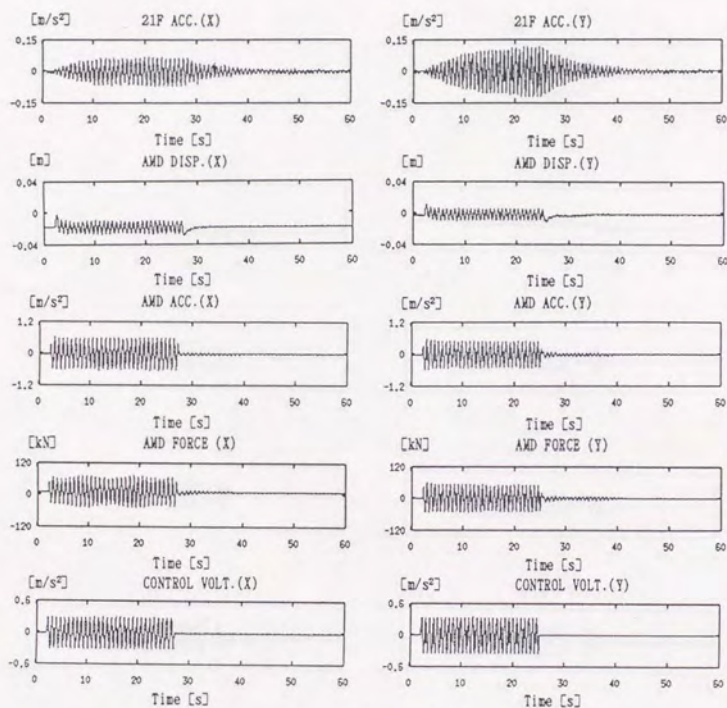
Active Gain1 : 1st 10% 2nd 10% damping
 Gain2 : 1st 4% 2nd 4% damping

図6.29 制御実験（1次モード） 10%ゲイン



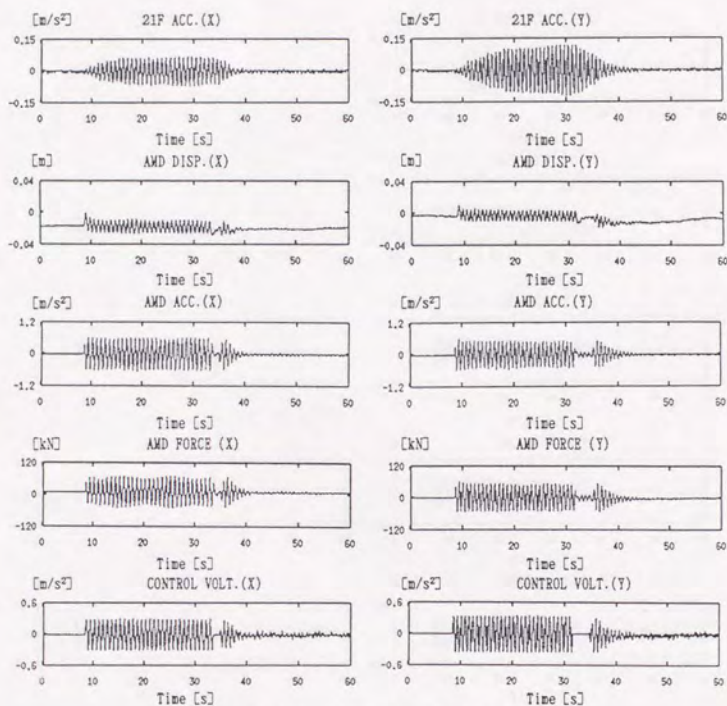
Active Gain1 : 1st 15% 2nd 15% damping
Gain2 : 1st 4% 2nd 4% damping

図6.30 制御実験（1次モード） 15%ゲイン



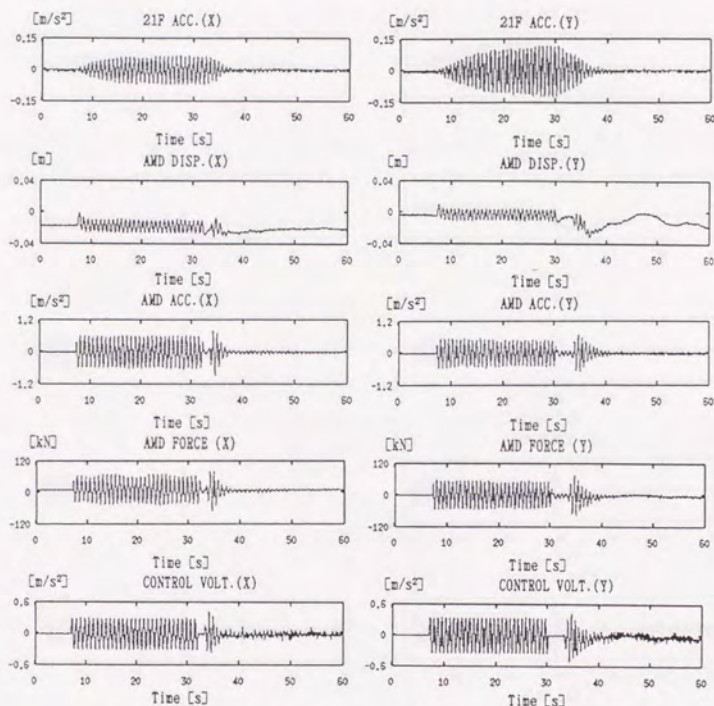
Non Controlled

図6.31 制御実験（2次モード） 非制振



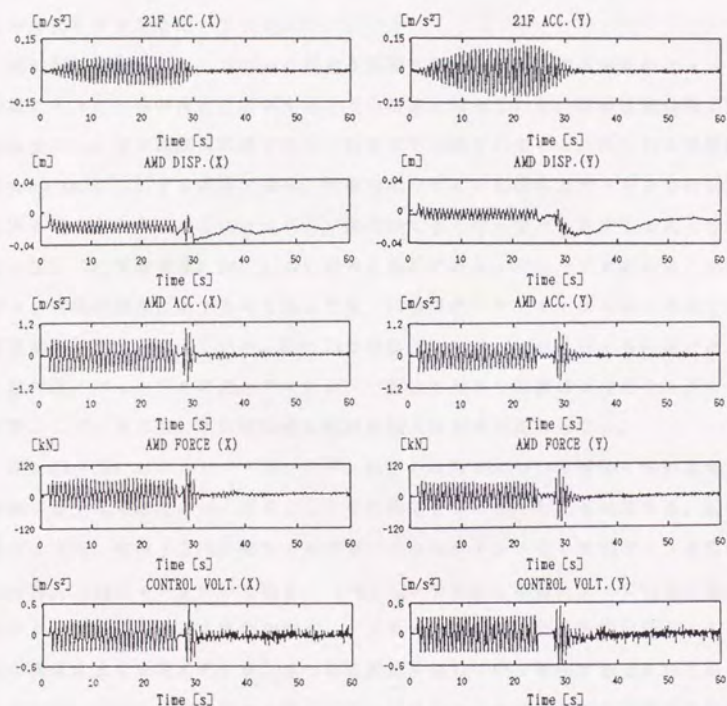
Active Gain1 : 1st 7% 2nd 7% damping
 Gain2 : 1st 4% 2nd 4% damping

図6.32 制御実験 (2次モード) 7%ゲイン



Active Gain1 : 1st 10% 2nd 10% damping
 Gain2 : 1st 4% 2nd 4% damping

図6.33 制御実験（2次モード） 10%ゲイン



Active Gain1 : 1st 15% 2nd 15% damping
 Gain2 : 1st 4% 2nd 4% damping

図6.34 制御実験 (2次モード) 15%ゲイン

6.5 シミュレーションによる制振性能の解析

前節の制御実験によって正弦波加振に対する制振効果の確認を行うことができたが、実際の風や地震に対する性能はシミュレーションで確認するしかない。図6.35～図6.38はエルセントロ波に対するシミュレーションの結果を示す。ゲイン1には15%ゲインを用いている。

図6.35は地動速度0.01 (m/s)に対する応答である。制御は途中何度かファジィ領域に入っているがほとんどゲイン1での制御になっている。制振性能は最上階加速度のrms値で非制振状態の約50～60%まで低減されている。図6.36は地動速度0.05 (m/s)に対する応答である。制御力でのゲイン切換えでゲイン2での制御に入る場合があり、さらにマスダンパ変位が大きくなってパッシブ1に入っている。図6.37は地動速度0.20 (m/s)に対する応答である。パッシブ2に入ってからマスダンパ変位が限界に達するのを防いだ後、32秒付近でアクティブモードに戻り残留振動を速やかに抑えている。図6.38は地動速度0.50 (m/s)に対する応答である。4秒付近でパッシブ3に入ってからマスダンパ変位を抑えその後ほとんどマスダンパは静止しているため、制振性能は非制振状態とほとんど変わらない。

図6.39～図6.41エルセントロ、八戸、秋田の地震波について横軸に地動速度、縦軸に最上階加速度のrms値をとってその応答をプロットしたものである。図は左がx方向、右がy方向に関するもので、上からゲイン1として7%ゲインを用いた場合、10%ゲインを用いた場合、15%ゲインを用いた場合となっている。横軸はそれぞれ切換えによって制御がパッシブモードに入り、制振性能が低下する外乱の大きさまでを考えている。3つの地震波を通じて同じ傾向があらわれており、y方向はx方向に比べ建物の1次の減衰が半分であるため、非制振に対する性能はx方向よりも良いものとなっている。また、ゲイン1での制振効果に関しては建物最上階加速度の二乗平均値でみると、エルセントロでは非制振の50～60%程度だが、八戸(y方向)では30%以下に低減されており、外乱によって違いを生じている。さらに、ゲイン1の強さによる性能の差異であるが、ゲイン1を強くすることによって小外乱に対する性能をより高めることができるが、パッシブモードへの移行による性能の低下が早くなっている。したがって、実用上のゲイン1の選定は考慮する外乱の大きさの頻度とのトレードオフとなる。なお、小外乱に対するゲイン1の性能の違いを詳しくみるため、八戸波を 0.5×10^{-2} (m/s)で入

力した時の建物最上階加速度および変位の比較を図6.42に示す。左から7%ゲイン、10%ゲイン、15%ゲインの応答であるが、15%ゲインは7%ゲインに比べ建物変位で約60%、建物加速度で約75%まで低減されている。建物変位に比べ加速度での制振性能が悪いのは、加速度では3次モードの影響が1、2次と同等なレベルで入っており、制御は1、2次モードを対象としているため、これを強めても3次モードの応答は低減されないからである。

図6.43～図6.46は風外力に対する応答である。本建物では風による振動はほとんどy方向にしか起こらないため、解析はy方向のみとする。風の強さは再現周期1、10、100、500年の風を考えることにし、風と直角方向の自動振動を考えるものとする。なお、建築学会の指針^{5*)}では風の再現周期とその風速は建物のある東京・日比谷では表6.9のように対応する。風外力は建物モデルの風洞実験から動的天秤法を用いて解析を行い、最終的には建物の1、2次モードに対するモード外力として与えられる。^{5*)},^{6*)}

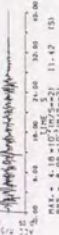
表6.9 風の再現期間とその風速

再現期間(年)	1	10	100	500
頂部風速(m/s)	24.0	35.1	42.0	48.3

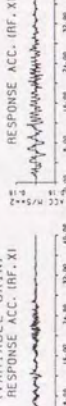
図6.43が再現周期1年の風に対する応答である。制御力による切換えでファジィ領域に入ることもあるが、建物の最上階加速度では最大値rms値とも非制振の50%以下に抑えている。建物の最上階変位では建物のモードとは無関係な長周期成分が入っており制御でこれを抑えることはできない。したがってその最大値、rms値とも非制振と変わらない値になっているが、波形を見ればわかるように建物の1次の固有振動数の振動は低減されている。図6.44は再現周期10年の風に対する応答である。ファジィ領域に入る割合が増えているが建物の最上階加速度では最大値rms値とも非制振の50%程度に抑えている。図6.45は再現周期100年の風に対する応答である。ゲイン2での制御にも何度か入っているが、パッシブモードに移ることはない。また、油圧ポンプは常に4台駆動となっている。図6.46は再現周期500年の風に対する応答である。制御力の飽和で1度だけパ

ッシブモードに入り、またシステム圧力の低下によりほとんどがファジィ領域での制御となっているが、建物の最上階加速度のrms 値でも非制振の50%程度に抑えている。図6.47は横軸に風の風速、縦軸に建物最上階加速度のrms 値をとってプロットしたものであるが、風に対する制振性能はその強さにかかわらずほぼ一定の値を保っている。なお、風応答のシミュレーションでは解析を行った800秒のうち、後半600秒 をとりだしたものである。

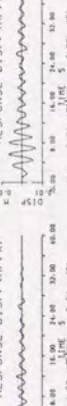
GROUND ACC. (X)



ACTIVE-PASSIVE
VARIABLE GAIN
RESPONSE ACC. (RF, XI)



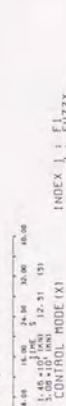
NON-CONTROLLED
RESPONSE ACC. (RF, XI)



RESPONSE DISP. (RF, XI)



AND DISP. (X)



CONTROL FORCE (X)



INDEX : FUZZY
: PASSIVE
: PASSIVE

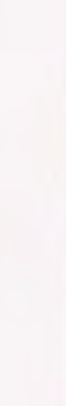
FORCE-PRES. (X)



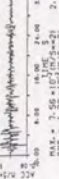
SYSTEM PRESSURE



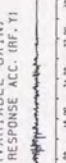
NUMBER OF PUMPS



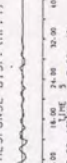
GROUND ACC. (Y)



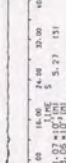
ACTIVE-PASSIVE
VARIABLE GAIN
RESPONSE ACC. (RF, Y)



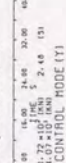
NON-CONTROLLED
RESPONSE ACC. (RF, Y)



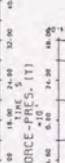
RESPONSE DISP. (RF, Y)



AND DISP. (Y)



CONTROL FORCE (Y)

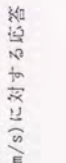


INDEX : FUZZY
: PASSIVE
: PASSIVE

FORCE-PRES. (Y)



SYSTEM PRESSURE



NUMBER OF PUMPS



図6.35 エルセントロロ(0.01m/s)に対する応答

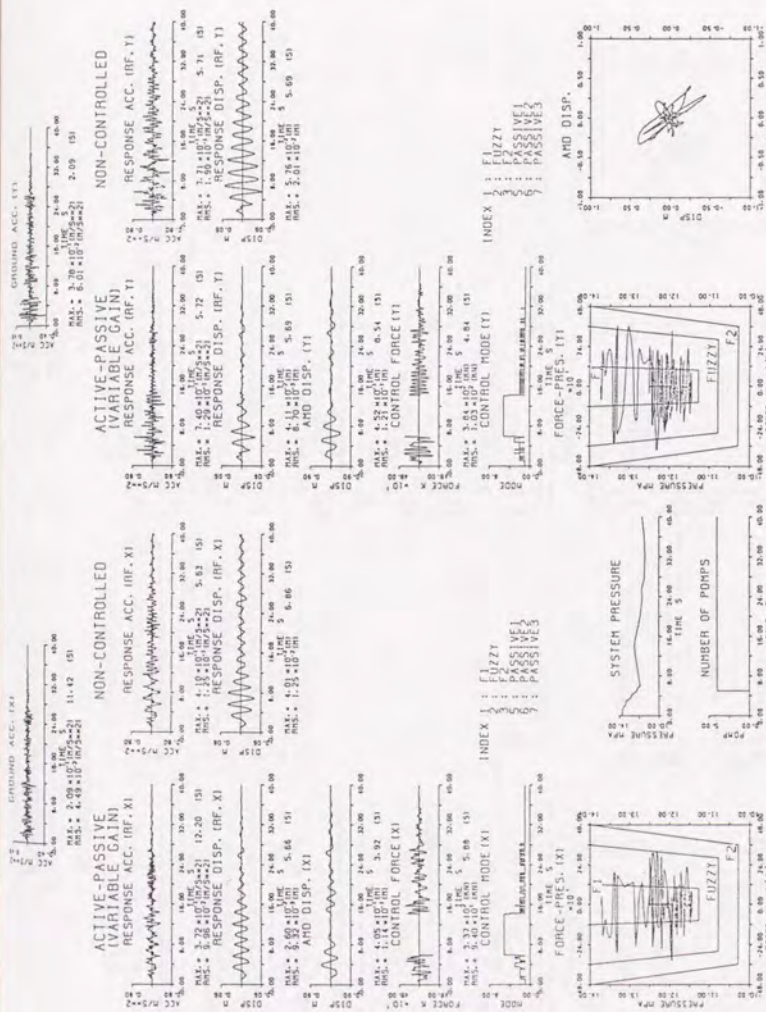


図5.36 エルゼントロ (0.05m/s) に対する応答

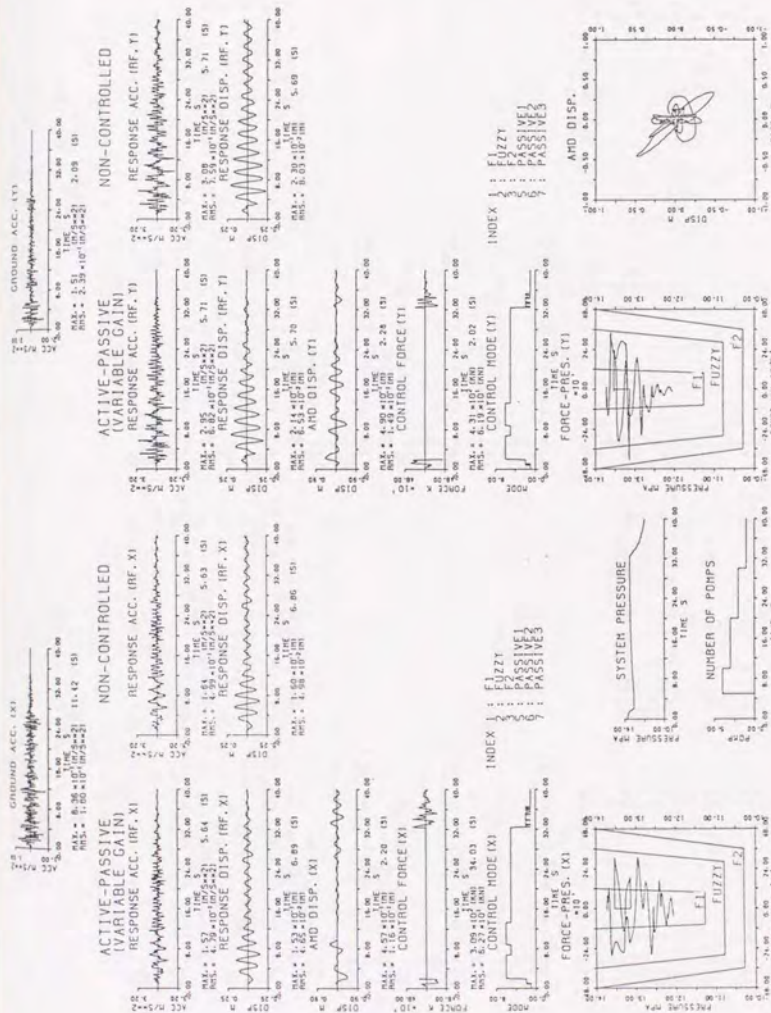


図6.37 エルセントロ (0.20m/s) に対する応答

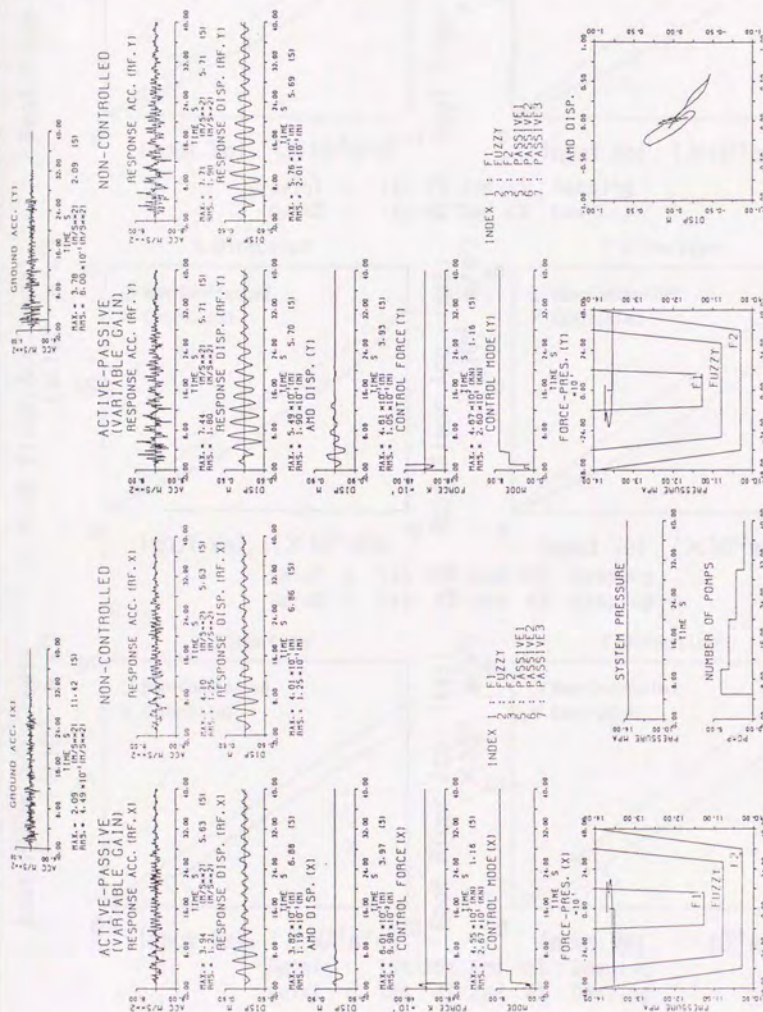
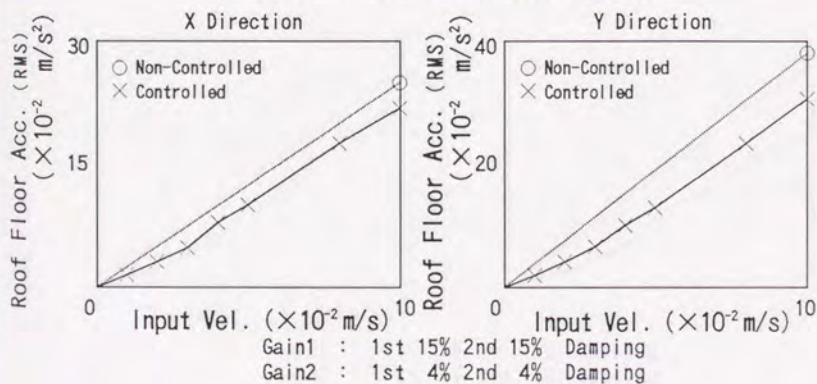
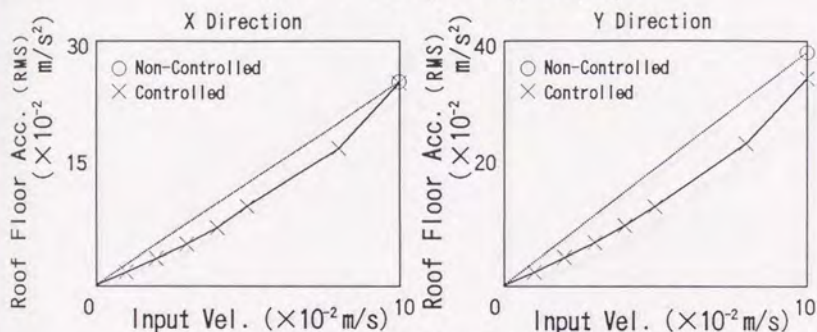
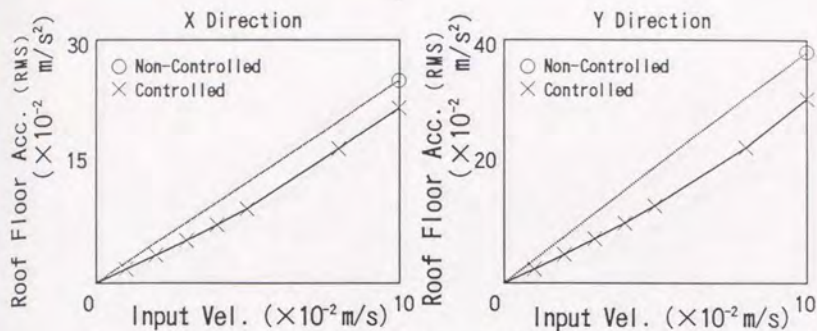
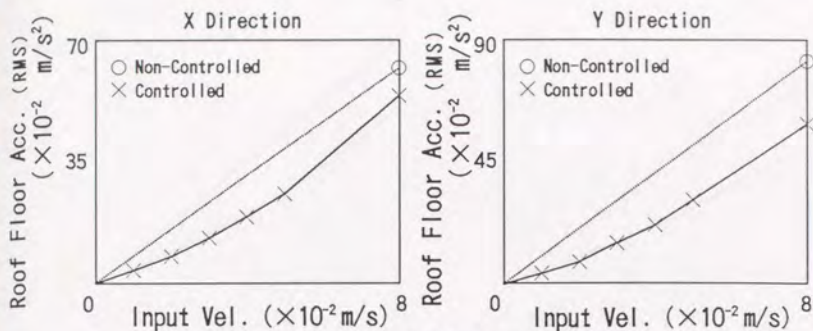


図6.38 エルセントロ (0.50m/s) に対する応答

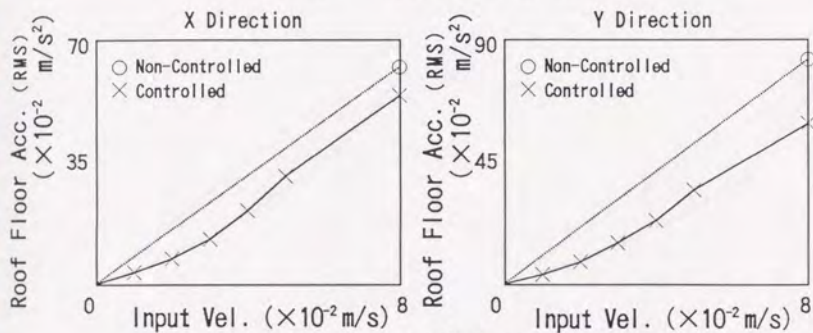


El Centro

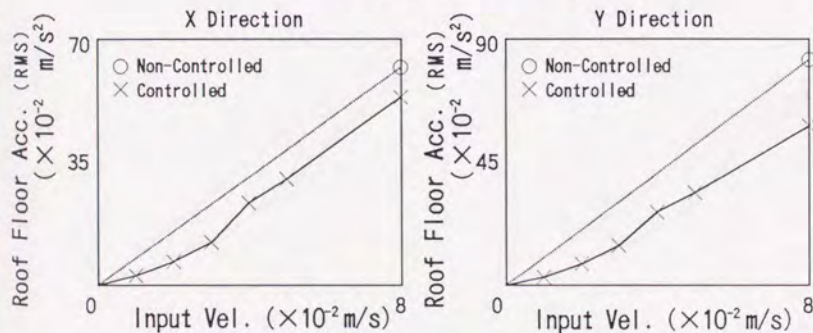
図6.39 制振性能 (エルセントロ)



Gain1 : 1st 7% 2nd 7% Damping
Gain2 : 1st 4% 2nd 4% Damping



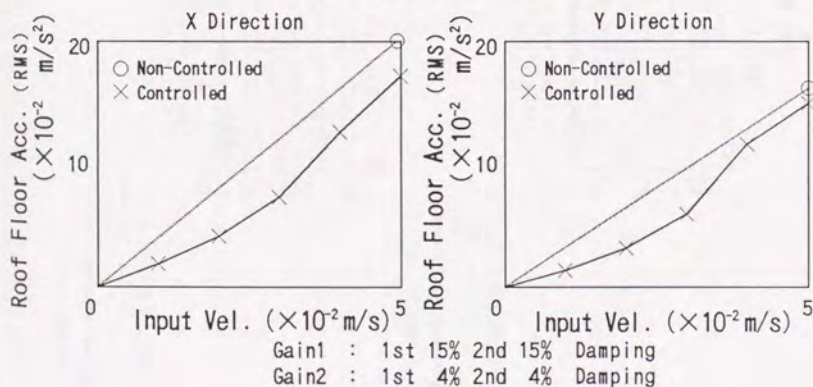
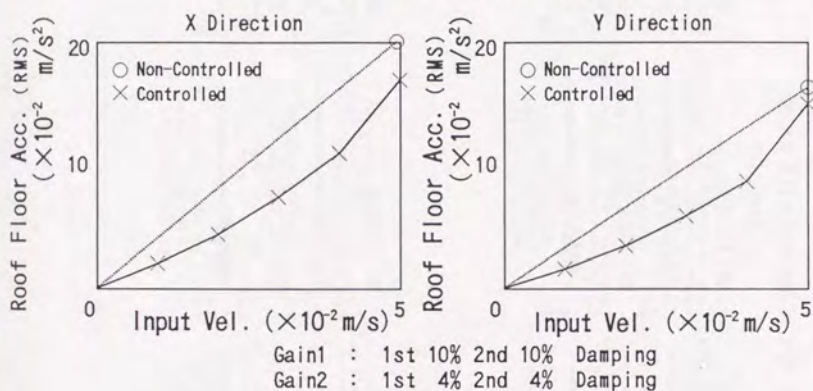
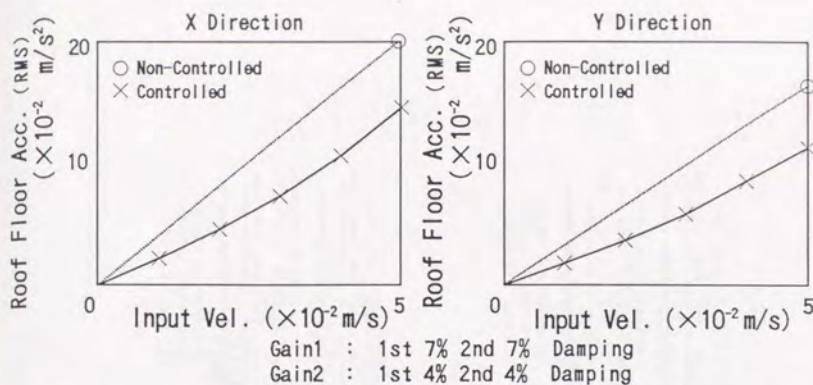
Gain1 : 1st 10% 2nd 10% Damping
Gain2 : 1st 4% 2nd 4% Damping



Gain1 : 1st 15% 2nd 15% Damping
Gain2 : 1st 4% 2nd 4% Damping

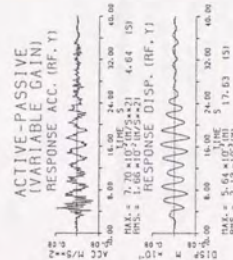
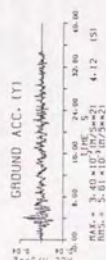
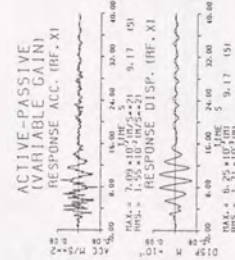
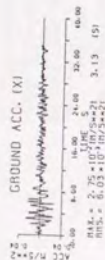
Hachinohe

図6.40 制振性能 (八戸)



Akita

図6.41 制振性能 (秋田)



15%ゲイン

10%ゲイン

7%ゲイン

図6.42 八戸(0.005 m/s)に対する応答



図6.43 風外力（再現周期 1 年）に対する応答



図6.44 風外力（再現周期10年）に対する応答



図6.45 風外力（再現周期100年）に対する応答



図6.46 風外力（再現周期500年）に対する応答

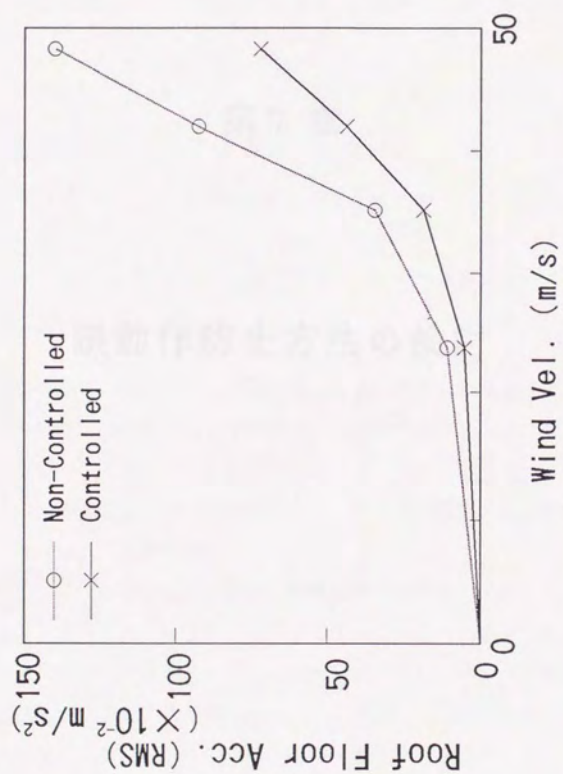


図6.47 制振性能 (風)

第 7 章

誤動作防止方法の検討

7.1 マスダンパのエネルギーを監視する方法

(2.2), (2.12)式より i 次モード ($i=1, 2$)での建物・マスダンパ系の運動方程式は次のようにあらわされる。

$$m^*_{i1} \ddot{q}_i + c^*_{i1} \dot{q}_i + k^*_{i1} q_i = t_{si} \{-m_d(\ddot{x}_d + \ddot{x}_s + \ddot{z})\} - m^*_{i1} \beta_i \ddot{z} + w^*_{i1} \quad \dots\dots (7.1)$$

(7.1) 式の両辺に i 次モードの速度 \dot{q}_i を乗じて $0 \sim t$ 時間内で積分すると、 i 次モードに対応した建物・マスダンパ系のエネルギーの釣合い式が得られる。

$$\begin{aligned} & \int_0^t m^*_{i1} \ddot{q}_i \dot{q}_i dt + \int_0^t c^*_{i1} \dot{q}_i^2 dt + \int_0^t k^*_{i1} q_i \dot{q}_i dt \quad \dots\dots (7.2) \\ & = \int_0^t t_{si} (-m_d \ddot{x}_d) \dot{q}_i dt + \int_0^t t_{si} \{-m_d(\ddot{x}_s + \ddot{z})\} \dot{q}_i dt \\ & + \int_0^t (-m^*_{i1} \beta_i \ddot{z}) \dot{q}_i dt + \int_0^t w^*_{i1} \dot{q}_i dt \end{aligned}$$

(7.2) 式の右辺第一項はマスの慣性力が建物になす仕事(付加質量のエネルギー)をあらわす。制御は1, 2次モードに対して行うためマスダンパの1, 2次モードでの任意の時間間隔 Δt についての付加質量のエネルギーを W とすると、

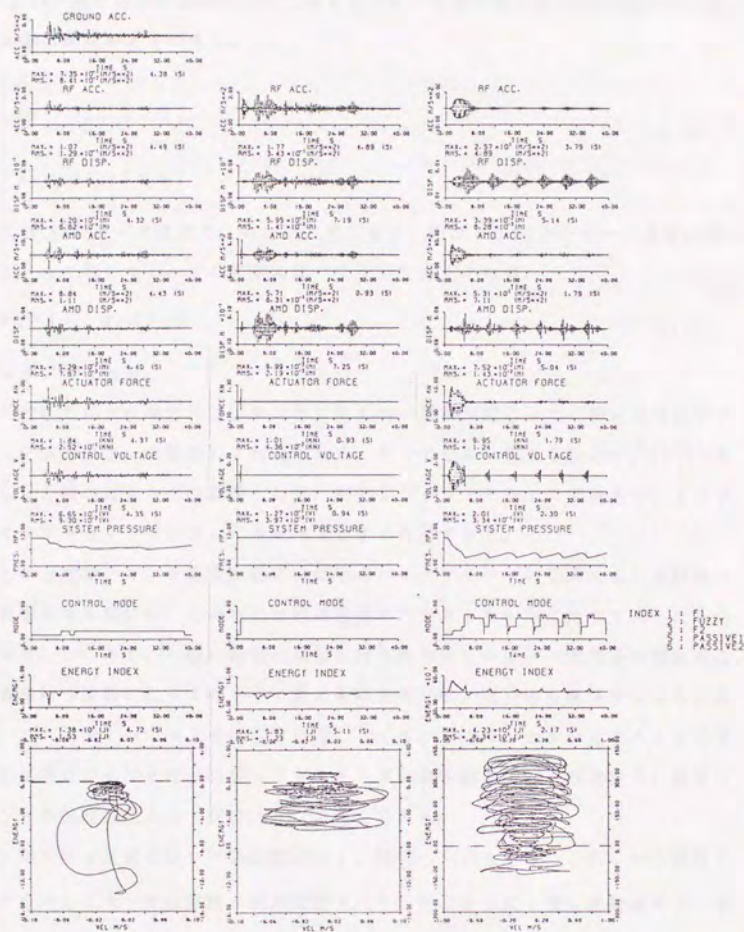
$$W = \sum_{i=1}^2 \int_t^{t+\Delta t} t_{si} (-m_d \ddot{x}_d) \dot{q}_i dt \quad \dots\dots (7.3)$$

ここで制振が正常に行われていれば W はほとんど負の値を示すはずである。ただし、正常な制振が行われていても W が小さな正值をとることがあるので、判定の基準値 E を設け、 W が E 以上となる時は何らかの異常によってマスダンパが建物を加振していると判断して、制御をパッシブモードに切替える。 E の値はシミュレーションによって決定する。

これによって、不測のマスダンパ動作異常の際にもマスダンパが建物を加振しないようなフェイルセーフ機能をソフトウェア的に持たせる事ができる。図7.1に5章の実験で用いた5層モデルでの振動実験のデータから、その時刻歴応答および1, 2次モードでの付加質量のエネルギーを示す。入力エルセントロ・NS波(入力加速度 0.7 m/s^2)である。左が正常な制御の場合、右がマスダンパへの制御電圧の正負が反転した場合、中央がフェイルセーフ機構を組み込んだ系に制御電圧を反転させて入力した場合のシミュレーションである。制御を反転した場合はマスダンパが建物を加振するためそのまま制御を続けると発振してしまうが、アクティブ・パッシブ切換え型のシミュレーションのため、パッシブモードに切

換えが起こりそこでは正常な制振も行っている。フェイルセーフ機構を組み込んだ系では制御を始めてすぐに異常を感知しパッシブモードに入るため建物を加振する事はなくなっている。エネルギーをみると、正常な制御では負の値を示しているが、制御を反転させた場合は建物を加振しているときには正の値を示している。なお、パッシブモードに変わるとマスダンパはエネルギーを吸収するため、負の値を示している。

以上の結果より、マスダンパのエネルギーを監視することによって、たとえ不測の原因によりアクティブ・マスダンパが建物の加振を行ってもすぐにこれを感知し、パッシブモードに切換えることができることが確認できた。



フェイルセーフあり フェイルセーフなし

正常

制御反転

図7.1 エルセントロ (NS波) 0.7 m/s^2 に対する応答

7.2 センサ異常に対する対応

(2.26) 式を建物の速度について考える。センサから得られる相対速度を k 個とした場合次式のようになる。

$$\begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \vdots \\ \dot{q}_k \end{Bmatrix} = [\Phi]^{-1} \begin{Bmatrix} \dot{x}_{j1} \\ \dot{x}_{j2} \\ \vdots \\ \dot{x}_{jk} \end{Bmatrix} \quad \dots\dots (7.4)$$

i 次 ($i < k$) のモード速度 \dot{q}_i について考えると、時間 Δt 間でのモード速度の積分値は、 Δt をそのモードの周期に比べて十分大きくとれば、

$$V_i = \int_i^{i+\Delta t} \dot{q}_i dt \approx 0 \quad \dots\dots (7.5)$$

となるはずである。

$V_i \neq 0$ となった場合には、センサに何らかの異常が起こった（特に信号にオフセット成分が乗った場合）と判断できる、そこでしきい値 X を設けて、 $|V_i| > X$ となった時にはセンサの異常として、制御をパッシブモードに切換えることによってソフトウェアでのフェイルセーフとする事ができる。

上の方法は、センサ異常が起こった場合パッシブモードに切換えるため建物に悪影響は与えないが、その制振性能は当然アクティブモードに比べて劣ったものとなる。ところで、一般に建物の制御を行う場合スビルオーバー対策等の理由から制御を行う次数に比べてセンサの数に余裕を持たせ、冗長性を確保する場合が多い。この場合 1 つのセンサに異常が起こっても、そのセンサを特定することができれば残りのセンサだけを使ってアクティブ制御を続けることができる。異常なセンサの特定方法として次のような方法を考える。

1 階を除く k 個のセンサの設置階を j 、階 ($s=1 \sim k$) とする。これらから積分アンプを通じてセンサ設置階の絶対速度 $\dot{x}_{js} + \dot{z}$ が、さらに 1 階の絶対速度 \dot{z} を減算してセンサ設置階の相対速度 \dot{x}_{js} が得られる。 k 個の相対速度のうち j_m 階の情報を除く ($k-1$) 個の相対速度から求められる i 次モードのモード速度を \dot{q}_{im} とすると $\dot{q}_{i1} \sim \dot{q}_{ik}$ の k 通りのモード速度が得られる。これらを基にそれぞれ V_i を計算し、 $(V_i)_m$ とする。もし、 j_m 階のセンサが異常信号を出し

た場合、 $(V_i)_n$ のみが $\neq 0$ となり、それ以外は $\neq 0$ となるはずである。ゆえに、 k 個の $(V_i)_n$ のうち 1 つだけが $\neq 0$ で残りが $\neq 0$ となった時には、 $(V_i)_i=0$ となった組み合わせが正常なセンサの組み合わせであると判断できる。したがって、これ以後の制御では正常なセンサのみを用いて制御を行えば、冗長性は減るもののアクティブコントロールを続けることができる。ただし、制御に用いるモード速度の計算にはセンサ設置階の絶対速度から 1 階の絶対速度を引いた相対速度を用いているため、1 階の信号にオフセット成分が入るとすべての相対速度にオフセット成分が入ることになり、正常な計算ができなくなってしまう。そこで、 k 個の $(V_i)_n$ がすべて $|(V_i)_n| > X$ となったときは、1 階のセンサが異常であると判断し、アクティブ制御を止めてパッシブモードに切換える。

前節と同じく 5 章の 5 層モデルでの実験データを使ってシミュレーションで検証を行った。制御対象は 2 次モードまで、使用するセンサは 1, 2, 3, 4, 屋上階の 5 つ（相対データとしては 4 つ）、3 次のモード速度を使ってセンサ異常の判断をするものとする。1, 2 次モードを使つての判断も可能であるが、3 次モードに比べて周期が長いのでセンサ異常の判断に時間がかかる。図 7.2～図 7.6 にエルセントロ・NS 波に対する応答を示す。センサチェックのための指標はモーダルフィルタによって計算される 3 次のモード速度を 3 次モードの周期である 0.09×3 秒間積分したものである。上からそれぞれ 2, 3, 4 階、2, 3, 屋上階、2, 4, 屋上階、3, 4, 屋上階、2, 3, 4, 屋上階の相対速度を利用して計算したものである。ただし、実際には正確な積分値ではなく、3 次のモード速度にサンプリングタイム (5 ms) を乗じて加算したものである。センサチェックのための指標は一定時間 (0.4 s) ほどの最大値をとり、この値を判断に用いる。

図 7.2 はすべてのセンサが正常であった場合である。使用するセンサの組み合わせによって多少バラツキを生じるが、その積分値は 1.0×10^{-3} (m) 以下におさまっている。そこで、センサ異常の判断のしきい値 X を $X = 5.00 \times 10^{-3}$ (m) として以降のシミュレーションを行った。図 7.3 は 2 階のセンサ信号にオフセット成分が入った場合である。オフセット成分としては変位、速度の信号に周期 1.0 Hz、振幅 1.0 V (A/D ボードのフルスケール 5.0 V に対して 2 割) の正弦波が入ったものとした。左がセンサ異常に対する対応を組み込んだ系での応答、中央がそのまま制御を行った場合の応答、右はその際のセンサチェックのための指標である。

制御の対象である1, 2次のモード変位, モード速度を求める際にモーダルフィルタを用いるが、2階の計測値にかかる値が小さいためそのまま制御を行っても発散するような事はないが、制振性能の劣化は明らかである。指標をみると2階のセンサを含む組み合わせでは大きい値を示しており、3, 4, 屋上階のセンサのみを用いた場合だけが、正常な値となっている。センサ異常に対する対応を行った場合は、すぐに異常を感知し2階のセンサを使わずに制御することによって、すべてのセンサが正常な場合とほぼ同等の制振性能をあげている。図7.4は4階のセンサに同じオフセット成分が入った場合である。4階の計測値は1, 2次のモード成分を計算する際の係数が大きいためそのままでは発散してしまうが、センサ異常に対応して2, 3, 屋上階のセンサのみで制御を行うことによって正常な制御に戻っている。図7.5は屋上階のセンサに同じオフセット成分が入った場合である。屋上階の計測値も1, 2次のモード成分を計算する際の係数が大きいためそのままでは発散してしまう。センサ異常に対応した場合では異常のあるセンサが屋上階であることは特定できているが、2, 3, 4階のセンサを使っただけの制御が不適切で発振を起こしている。本章で用いたモーダルフィルタの値を表7.1に示すが、2, 3, 4階のセンサを用いた場合は各階の計測値にかかる値が他と比べて大きくなっているのがわかる。図7.6に正常な制御において2, 3, 4階のセンサを用いて求められる1, 2次のモード変位、速度と、5層のセンサを用いて求められる1, 2次のモード変位、速度との比較を示すが、かなりの違いが見られており制御が困難であることがモーダルフィルタの値とシミュレーションから判断できる。図7.7は1階のセンサ信号に同じオフセット成分が入った場合である。すべてのセンサチェックの指標が制限を越えたため1階のセンサ異常と判断しパッシブモードに入っている。

以上の結果より各階のセンサの信号にオフセット成分が入るような異常が起っても、高次の速度成分を計算しこれを積分することによって異常を発見できることがわかった。さらに制御を行う回数に比べセンサの数に余裕がある場合には、異常なセンサを特定しこれを除いたセンサで制御を続けることも可能であることがわかった。ただし、残されたセンサを用いたモーダルフィルタの値が大きくなり制御に不適切と判断される場合には、無理にアクティブ制御を続けずにパッシブモードに切替えた方がよい。

また、1階のセンサが異常な場合にはすべての相対値が異常となるため制御をバ
ッシブモードに切換えるのがよい。

表7.1 モーダルフィルタ

センサ設置階	モード	2 階	3 階	4 階	屋上階
2, 3, 4 , 屋上	1 次	0.1888	-0.0455	0.4939	0.3871
	2 次	0.6489	1.1889	0.1050	-0.9724
2, 3, 4	1 次	2.6971	-3.3804	2.4349	
	2 次	-5.6858	9.5669	-4.7713	
2, 3, 屋上	1 次	-0.4953	0.8031		0.4856
	2 次	0.5132	1.3692		-0.9515
2, 4, 屋上	1 次	0.1545		0.4674	0.3923
	2 次	1.5431		0.7969	-1.1104
3, 4, 屋上	1 次		0.2055	0.3478	0.4162
	2 次		2.0515	-0.3971	-0.8723

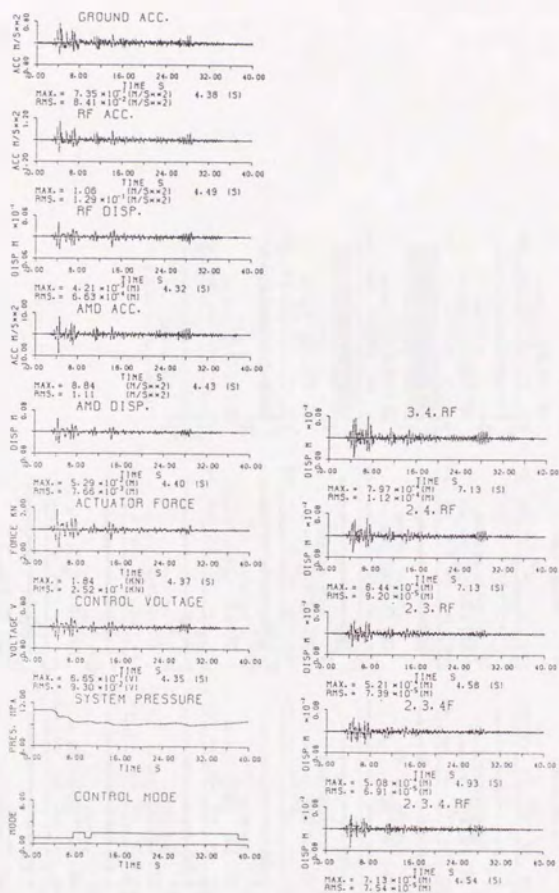


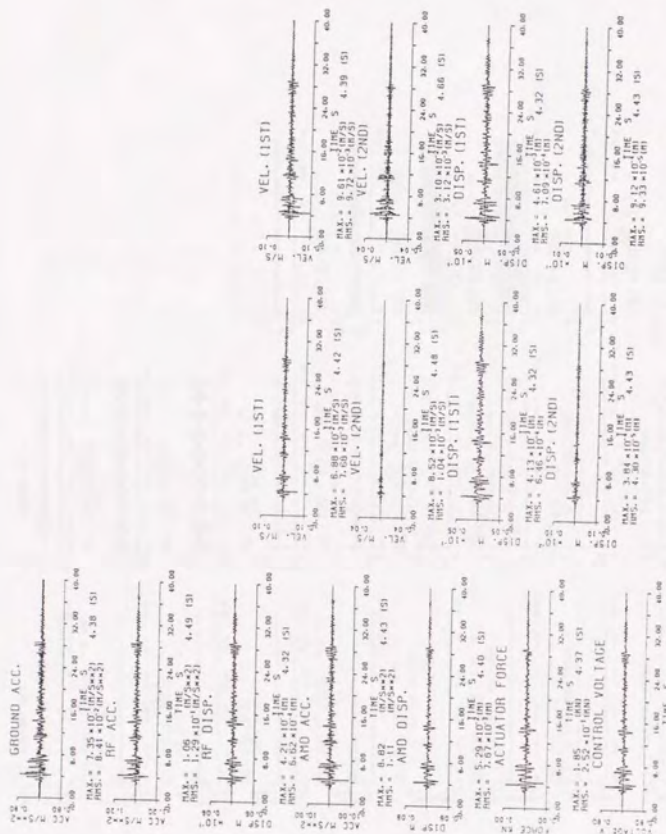
図7.2 センサが正常な場合の応答



図7.4 4階のセンサにドリフト成分が入った場合



図7.5 屋上階のセンサにドリフト成分が入った場合



2, 3, 4F

2~RF

図7.6 モーダルフィルタの信頼性



図7.7 1 階のセンサにドリフト成分が入った場合

第 8 章

結論

油圧アクチュエータを用いたアクティブ・マスダンパに関する実験、シミュレーション解析を通じて以下のような結論を得た。

- 建物、マスダンパ、アキュムレータを含む油圧系をあわせた全体系のモデル化による統合的解析を行い、実験およびその解析からモデル化の妥当性を検証した。
- 油圧アクチュエータを用いたアクティブ・マスダンパについて、外乱が大きくなった場合、または制振性能を高める場合の作動限界として、
 - ① ポンプの能力不足のため、アキュムレータの中に蓄積された作動油が減少して油圧システムの圧力が低下し、システムが停止してしまう、または、マスダンパがほとんど動かなくなってしまう限界
 - ② 油圧アクチュエータのストロークの制限のため、それ以上の変位を出すことができない限界
 - ③ 油圧アクチュエータの制御力が飽和してしまうことによる限界の3つを提起し、これを克服する方法としてアクティブ・パッシブ切換え方式、および可変フィードバックゲイン制御則の提案を行った。
- より大きな外乱入力までアクティブ・コントロールを続け、制振性能の極端な劣化を防ぐ方法として採用した、システムの状態によって複数のフィードバックゲインを切換える可変フィードバックゲイン制御則について、5層の実験モデルの最上階に小型のマスダンパモデルを設置した系を使い、振動台での加振実験を行ってその有効性を確認した。フィードバックゲインの切換え方法としてクリスプ切換え、ファジィ切換えの2つの方法を比較し、建物応答加速度の最大値ではクリスプ切換えがファジィ切換えを凌ぎ、rms値ではファジィ切換えが優っているという結果を得た。
- 実際の高層建物ではすべての階にセンサを付けることは不可能なため、5層モデルにおいて5つのセンサ情報のうち3つだけを用いた制御とすべての情報を用いた場合とを比較した。また、実際の建物でのパラメータ変動を想定し、

故意にパラメータをずらした建物モデルに対して設計した制御系で制御を行い、正しいモデルを用いた場合と比較した。2つの結果にはほとんど違いがなく、マスダンパの実用化の際に考慮すべきセンサ数の低減、および建物のパラメータ変動に対して最適レギュレータを用いて作った制御系が十分ロバストであることを確認した。

- アクティブでの制御が不可能となった時に油圧アクチュエータの作動油の流れを切换え、さらにリリース弁の圧力を切换えることによって、アクチュエータを複数の減衰力を出す摩擦ダンパとして利用するアクティブ・パッシブ切换え方式について、実験モデルでの加振実験を行った。その結果、油圧システムの圧力低下によって作動限界がくる場合と、油圧アクチュエータの変位によって作動限界がおこる場合には、アクティブ・パッシブ切换えが有効であることを確認した。また、油圧アクチュエータの制御力によって作動限界がおこる場合には制御力の飽和の度合いが小さければ、パッシブモードに切换えるよりも可変フィードバックゲイン制御則のみを用いて、力を自然に飽和させてしまう方が制振性能をあげることができ、飽和の度合いが大きいときには建物の加速度に衝撃を与えるため、パッシブモードに切换えた方がよいことを確認した。
- 可変フィードバックゲイン制御則およびアクティブ・パッシブ切换え方式を実際の高層建物に設置されたアクティブ・マスダンパの制御に適用し、その制御実験より、一方向当たり複数のアクチュエータを使った場合や、 x y の2軸同時制御を行った場合など実機レベルでも十分な制振性能をあげることができ、ことを確認した。
- 実機での地震・風に対するシミュレーション解析より、本マスダンパが風・小地震から大地震まで幅広く対応できることが確認できた。
- 実用上有効なフェールセーフ機構として、マスダンパのエネルギーを監視する方法、およびセンサ異常の際の判定方法について提案を行い、シミュレーション解析によって、マスダンパの異常をソフトウェアで判断しパッシブモードへ

移行することが可能であることを確認した。また、センサ信号にオフセット成分が入った場合にはこのセンサを特定することができ、センサ数に冗長性があれば残りのセンサを使って制御を続けることが可能であることも確認した。ただし、1階のセンサ異常の場合や、残されたセンサでの制御が不安定になる場合もあり、このような場合にはパッシブモードに切り換える方がよいことがわかった。

謝辞

参考文献

謝辞

本論文を書くにあたって、多くの有益なご指導、ご鞭撻を賜りました

東京大学生産技術研究所 藤田 隆史 教授

に、心からの感謝の意を表します。先生の助言なしにはこの論文が完成することはありませんでした。

また、お忙しいなか本論文の審査をしていただき、さらに様々なご意見、アドバイスをいただきました、井口 雅一教授、大野 進一教授、吉本 堅一教授、藤野 陽三教授にも、大変感謝しております。

そして、約5年間にわたって共同研究を行い、研究、実験を通じて正木 信男氏をはじめとするブリヂストンの方々にも本当にお世話になりました。また、研究を進めるうえで多くの助言をいただいた北村 春幸氏、山根 尚志氏をはじめとする日建設計の方々、菅野 正氏、河内 宏充氏をはじめとする島津製作所の方々にもこの場を借りてお礼を申し上げます。

藤田研究室で研究をするなかでも、元助手の田川 泰敬氏、重田 達也氏、技官の嶋崎 守氏の職員の方々をはじめとして、諸先輩がた、同期、後輩たち、企業からの研究員の方々、また秘書の方々にも大変お世話になりました。ありがとうございます。

また、生産技術研究所での他の研究室の方々や事務の皆さんにもいろいろお世話になりました。ありがとうございます。

たくさんの方々のお世話になりながら、この論文を完成させることができました。

みなさん、本当にありがとうございました。

鎌田 崇義

参考文献

- 1) 建築物の振動に関する居住性能評価指針 日本建築学会・1991
- 2) Den Hartog, J. P., Mechanical Vibrations, McGraw-Hill, N. Y., 1956
- 3) McNamara, R. J., "Tuned Mass Dampers for Buildings", ASCE, Journal of Structural Division, Vol. 103, Sept. 1977.
- 4) Petersen, N. R., "Design of Large-Scale Tuned Mass Dampers", Proc. of the IUTAM Symposium on Structural Control, held at the University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, June 4-7, 1979
- 5) "Tower Cables Handle Wind, Water Tank Damps It", Engineering News Record, December 9, 1971, p. 23.
- 6) "Lead Hula-Hoops Stabilize Antenna", Engineering News Record, July 29, 1976, p. 10.
- 7) "Hancock Tower Now to Get Dampers", Engineering News Record, October 30, 1975, p. 11.
- 8) Karnopp, D. and Morison, J., "Comparison of Optimized Active and Passive Vibration Absorbers", 14th Annual Joint Automatic Control Conference, Ohio State University, Columbus, Ohio, June, 1973, pp. 932-938
- 9) Yao, J. T. P., "Concept of Structural Control", ASCE, Journal of Structural Division, Vol. 98, July, 1972, pp1567-1574
- 10) Yang, J. N., "Application of Optimal Control Theory to Civil Engineering Structures", ASCE, Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 101, December, 1975, pp819-830

- 11) Martin, C. R. and Soong, T. T., "Modal Control of Multistory Structures", ASCE, Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 104, 1978, pp335-350
- 12) Sae-Ung, S. and Yao, J. T. P., "Active Control of Building Structures", ASCE, Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 104, April, 1978, pp335-350
- 13) Lund, R. A., "Active Damping of Large Structures in Winds", Proc. of the IUTAM Symposium on Structural Control, held at the University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, June 4-7, 1979
- 14) Chang, C. H. and Soong, T. T., "Structural Control Using Active Tuned Mass Dampers", ASCE, Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 106, December, 1980, pp1091-1098
- 15) 藤田 「XY運動機構を用いた高層建物制振用マスダンパの開発と実用化」、生産研究, 42, 5, 1990, pp263-268
- 16) 永田 他「みなとみらい21ランドマークタワーの制振装置」、日本建築学会学術講演梗概集、1990
- 17) 浮田 他「大阪弁天町・ORC 200 シンボルタワーの制振装置」、日本建築学会学術講演梗概集、1992
- 18) 福山 他「屋上ヘリポートを可動マスとしたアクティブ型マスダンパー」、日本機械学会、第3回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集、1993
- 19) 有田 他「超高層ビル用V字型ハイブリッドマスダンパの開発と適用」、日本建築学会学術講演梗概集、1993
- 20) 滝田 背戸 「ソフトウェアサーボによる構造物の振動制御」、日本機械学会論文集 (c), Vol. 52, No. 484, 1986, pp3055-3062
- 21) Kobori, T. et al "Dynamic Intelligent Building as Active Seismic Response Controlled Structure(I)~(IV)", 日本建築学会学術講演梗概集, 1987

- 22) 相沢 他「アクティブダンパーに関する実験的研究(その1)～(その3)」、日本建築学会学術講演梗概集、1987
- 23) 吉田 下郷 西村 「アクティブ動吸振器による不規則振動の最適制御」、日本機械学会論文集(c), Vol. 53, No. 495, 1987, pp2948-2959
- 24) 西村 吉田 下郷 「多自由度系に対する最適アクティブ動吸振器」、日本機械学会論文集(c), Vol. 55, No. 517, 1988, 2321-2319
- 25) 藤田 他「XY運動機構と油圧アクチュエータを用いた高層建物制振用アクティブ・パッシブ切換え型マスダンパの基礎的研究」、日本機械学会論文集(c), Vol. 57, No. 543, 1991, pp3532-3539
- 26) 谷田 他「アクティブとパッシブを組合わせたハイブリッド式制振装置の開発」、日本機械学会論文集(c), Vol. 57, No. 534, 1991, 485-490
- 27) 西村 他「絶対加速度フィードバック制御によるアクティブ動吸振器」、アクティブ制震(振)シンポジウム論文集、1992
- 28) 長門 吉田 「ニューラルネットワークによるアクティブ動吸振器の制御」、日本機械学会論文集(c), Vol. 58, No. 550, 1992, pp1775-1761
- 29) 野波 他「アクティブ動吸振器を用いた多自由度構造物の H_∞ 制御」、日本機械学会論文集(c), Vol. 58, No. 548, 1992, pp1311-1317
- 30) 渡辺 吉田 「 H_∞ 制御理論を用いたアクティブ制振の研究」、日本建築学会学術講演梗概集、1992
- 31) 曾我 他「アクティブマスダンパー(AMD)における制振効果とエネルギー効率」、日本建築学会学術講演梗概集、1991
- 32) 曾根 山本 「制振構造物システムのエネルギー吸収能力の解析的研究」、日本建築学会学術講演梗概集、1993
- 33) 野谷 他「動吸振器群を用いた建築構造物応答の抑制効果」、日本建築学会学術講演

- 34) 西村 他「アクティブ二重動吸振器の開発・実用化に関する研究(その1)~(その7)」、日本建築学会学術講演梗概集、1993
- 35) 西村 他「アクティブ動吸振器の最適化(その1)、(その2)」、日本建築学会学術講演梗概集、1992
- 36) 光田 背戸 「能動的制振装置の最適設計法について」、日本機械学会論文集(c), Vol. 57, No. 534, 1991, pp393-398
- 37) 藤田 鎌田 正木 「多段積層ゴムと油圧アクチュエータを用いた高層建物制振用アクティブ・マスダンパの基礎的研究(第1報)」、日本機械学会論文集(c), Vol. 58, No. 545, 1992, pp87-91
- 38) 藤田 鎌田 正木 「多段積層ゴムと油圧アクチュエータを用いた高層建物制振用アクティブ・マスダンパの基礎的研究(第2報)」、日本機械学会論文集(c), Vol. 59, No. 558, 1993, pp379-385
- 39) 来田 三田 「ハイブリッドマスダンパー(HMD)に関する研究(その8)」、日本建築学会学術講演梗概集、1992
- 40) 藤田 他「大規模実験モデルによる高層建物制振用アクティブ・パッシブ切換え型マスダンパの研究」、日本機械学会論文集(c), Vol. 59, No. 557, 1993, pp36-43
- 41) 藤田 他「制御用モータを用いた高層建物制振用アクティブ・パッシブ切換え型マスダンパの基礎的研究」、日本機械学会、第3回「運動と振動の制御」シンポジウム論文集、1993
- 42) 吉田 渡辺 「大小地震に対する高層建物用ハイブリッドアクティブ動吸振器の提案」、日本機械学会論文集(c), Vol. 58, No. 550, 1992, pp1808-1813
- 43) 辻内 他「アクティブ・マスダンパによる構造物の振動制御」、日本機械学会論文集(c), Vol. 57, No. 536, 1991, pp1137-1142

- 44) 斎藤 他「アクティブ制振構造に関する基礎的研究(その4),(その5)」、日本建築学会学術講演梗概集、1992
- 45) 藤田 他「免震・除振床用多段積層ゴムの実験的研究」、日本機械学会論文集(c), Vol. 53, No. 490, 1987, pp1146-1147
- 46) 藤田 他「多段積層ゴムを用いた高層建物制振用マスダンパの研究(第1報)」、日本機械学会論文集(c), Vol. 56, No. 523, 1990, pp108-113
- 47) 川村 他「多段積層ゴムを用いたTMDの適用」、アクティブ制震(振)シンポジウム論文集、1992
- 48) 川村 他「多段積層ゴムを用いたチューンド・マス・ダンパーの適用(その1)、(その2)」、日本建築学会学術講演梗概集、1992
- 49) 羽生田 他「高層ビル用制振装置のための油圧制御」、日本機械学会、第69期全国大会講演論文集(c)、1991
- 50) 日本油空圧協会、油空圧便覧、オーム社、1975
- 51) (株)日本アキュムレータ技術資料
- 52) 清水、FORTRANによる数値計算プログラム、サイエンス社、1970
- 53) 長松、モード解析、培風館
- 54) Meirovitch, L. and Baruh, H. "On the Problem of Observation Spillover in Self-Adjoint Distributed Parameter Systems", Journal of Optimization Theory and Application, 39-2, 1983, pp269-291
- 55) Blass, M., "Active Control of Flexible Systems", Journal of Optimization Theory and Application, 25-3, 1978, pp415-436
- 56) 藤田 他「可変摩擦ダンパを用いたセミアクティブ免震構造の研究(第1報)」、日本機械学会論文集(c), Vol. 57, No. 536, 1991, pp1122-1128

- 57) Feng, Q. "Experimental and Analytical Study of a Friction Controlable Sliding Isolation System", Doctor Thesis of University of Tokyo, 1992
- 58) 建築物荷重指針 日本建築学会
- 59) 大熊 他「動的天秤データを利用した高層建物の時刻歴風応答解析（その１）～（その６）」、日本建築学会学術講演梗概集、1992
- 60) 吉江 他「高層建物の時刻歴風応答解析（その１），（その２）」、日本建築学会学術講演梗概集、1992

