

免震・制振用多段積層ゴムに 関する研究

正 木 信 男



①

免震・制振用多段積層ゴムに関する研究

1999年2月

正木信男

目 次

第1章 序論	1
1-1 本研究の背景	1
1-1-1 多段積層ゴム開発の背景	1
1-1-2 多段積層ゴムの基本構造	3
1-2 多段積層ゴムの基本的設計方法	6
1-2-1 積層ゴム設計法	6
1-2-2 多段積層ゴム設計法	12
1-3 従来の研究	16
1-4 本研究の目的	18
1-5 本論文の構成	19
参考文献	21
第2章 多段積層ゴムの復元力特性	25
2-1 緒言	25
2-2 試験体の概要	26
2-3 加力装置と実験方法	29
2-3-1 加力装置の概要	29
2-3-2 加力パターン	30
2-4 復元力特性	32
2-4-1 基本モデルの実験結果	32
2-4-2 安定板の効果	36
2-4-3 安定板と要素積層ゴムの曲げ剛性	40
2-4-4 定変位制御と定荷重制御の比較	41
2-5 結語	43
参考文献	44
第3章 要素積層ゴムの力学特性	45

3.1 緒言	45
3.2 水平復元力の軸力依存性	47
3.2.1 実験の概要	47
3.2.2 実験結果	51
3.3 軸力依存性の理論的検討	58
3.4 回転拘束度の影響	61
3.4.1 試験体	61
3.4.2 実験の概要	61
3.4.3 実験結果	63
3.5 回転拘束の理論的検討	71
3.6 結語	73
参考文献	74
第4章 多段積層ゴムの剛性解析	75
4.1 緒言	75
4.2 既存の解析モデル	77
4.3 非線形はり要素モデル	78
4.4 剛性マトリックスの決定法	81
4.4.1 解析対象	81
4.4.2 剛性マトリックス要素決定のための実験概要	82
4.4.3 実験結果	82
4.4.4 実験式の決定法	87
4.5 多段積層ゴムの復元力特性	91
4.5.1 解析モデル	91
4.5.2 解析結果	92
4.6 結語	98
参考文献	100
第5章 多段積層ゴムの制振装置への適用	101

5.1 緒言	101
5.2 多段積層ゴムを用いたパッシブ型制振装置の開発	103
5.2.1 まえがき	103
5.2.2 多段積層ゴムを用いたマスダンパの基本構造	104
5.2.3 実験モデル	106
5.2.4 実験結果と考察	108
5.2.5 解析モデル	114
5.2.6 静的加力試験	118
5.2.7 実大マスダンパの制振性能について	120
5.2.7 まとめ	122
5.3 多段積層ゴムを用いたハイブリット型制振装置の開発	123
5.3.1 まえがき	123
5.3.2 ハイブリットマスダンパの概要	124
5.3.3 建物の動特性	127
5.3.4 システム同定試験	128
5.3.5 振動制御試験	134
5.3.6 シミュレーションによる制振効果	139
5.3.7 風・地震観測結果	143
5.3.8 まとめ	149
5.4 多段積層ゴムを用いたマスダンパの実用化例	150
5.5 結語	152
参考文献	153
第6章 多段積層ゴムの免震装置への適用	154
6.1 緒言	154
6.2 多段積層ゴムの建築免震装置への適用	155
6.2.1 はじめに	155
6.2.2 免震建物用多段積層ゴム	156
6.2.3 要素積層ゴムの静的加力試験	158

6・2・4	多段積層ゴムの静的加力試験	162
6・2・5	多段積層ゴムの剛性解析	165
6・2・6	実施例	170
6・2・7	まとめ	172
6・3	多段積層ゴムの免震床への適用	173
6・3・1	はじめに	173
6・3・2	静的加力試験	175
6・3・3	動的振動実験	177
6・3・4	まとめ	182
6・4	多段積層ゴムの機器免震装置への適用	183
6・4・1	はじめに	183
6・4・2	高減衰多段積層ゴムを用いた機器免震装置	185
6・4・3	まとめ	187
6・5	結語	188
	参考文献	189
第7章	多段積層ゴムの除振装置への適用	190
7・1	緒言	190
7・2	多段積層ゴムを用いた除振・免震床の開発	192
7・2・1	まえがき	193
7・2・2	供試体	193
7・2・3	静的加力試験	198
7・2・4	正弦波加振および微振動実験	205
7・2・5	まとめ	209
7・3	高減衰ゴムダンパの減衰特性	211
7・3・1	まえがき	211
7・3・2	高減衰ゴムダンパ	212
7・3・3	粘性せん断型ダンパ	213
7・3・4	基本特性実験	214

7・3・5	微小変位振幅特性	216
7・3・6	除振特性解析	221
7・3・7	まとめ	227
7・4	結語	228
	参考文献	229
第8章	結論	230
	発表論文	233
	謝辞	236

図表タイトル一覧

[第1章]

図 1-1	免震装置の分類	1
図 1-2	積層ゴムの構造	2
図 1-3	多段積層ゴムの考え方	4
図 1-4	多段積層ゴムの変形性状	5
図 1-5	多段積層ゴムの適用範囲	5
図 1-6	円形のゴムパッドの受圧面積と自由面積	8
図 1-7	体積弾性係数による補正	9

[第2章]

図 2-1	多段積層ゴムを用いたマスダンパの基本構造	27
図 2-2	加力実験用試験体	28
図 2-3	要素積層ゴム	29
図 2-4	加力実験装置	29
図 2-5	ひずみゲージの位置	30
図 2-6	加力パターン	31
図 2-7	基本モデルの復元力特性	33
図 2-8	基本モデルの鉛直変位特性	33
図 2-9	基本モデルの脚部の鉛直軸力	33
図 2-10	層間変位(基本モデル)	34
図 2-11	多段積層ゴムの変形状態	35
図 2-12	水平復元力特性	36
図 2-13	鉛直変位特性	37
図 2-14	安定板上のひずみ分布	37
図 2-15	水平復元力特性におよぼす安定板の影響	39
図 2-16	鉛直変位特性におよぼす安定板の影響	39
図 2-17	層間変位(PL-16)	39
表 2-1	曲げ剛性	40
図 2-18	水平復元力の比較	42
図 2-19	脚部反力の比較	42

[第3章]

図 3-1	要素積層ゴム	47
表 3-1	要素積層ゴムの主な仕様	48
図 3-2	回転拘束型積層ゴム試験装置	49
図 3-3	積層ゴムの水平復元力の履歴ループ	49

図 3-4(a)	種々の軸力下における要素積層ゴムの見掛けのせん断弾性係数 ($S_2=2.5$)	52
図 3-4(b)	種々の軸力下における要素積層ゴムの見掛けのせん断弾性係数 ($S_2=3.0$)	53
図 3-4(c)	種々の軸力下における要素積層ゴムの見掛けのせん断弾性係数 ($S_2=3.5$)	54
図 3-5(a)	種々の軸力下における要素積層ゴムの損失係数 ($S_2=2.5$)	55
図 3-5(b)	種々の軸力下における要素積層ゴムの損失係数 ($S_2=3.0$)	56
図 3-5(c)	種々の軸力下における要素積層ゴムの損失係数 ($S_2=3.5$)	57
図 3-6	積層ゴム柱内の力の釣り合い	58
図 3-7	積層ゴム二軸偏心試験装置	61
表 3-2	積層ゴム二軸偏心試験装置の試験モード	62
図 3-8	積層ゴム二軸偏心試験装置の実験による要素積層ゴムの変形	63
図 3-9	制振装置用大型多段積層ゴムに用いた要素積層ゴムの軸力依存性	64
図 3-10	回転を拘束した場合の水平復元力特性	65
図 3-11	回転を拘束した場合の鉛直変位特性	65
図 3-12	回転拘束曲げモーメント	66
図 3-13	回転拘束度の定義	67
図 3-14	水平復元力特性への回転拘束度の影響	67
図 3-15	鉛直変位特性への回転拘束度の影響	68
図 3-16	積層ゴムの回転角と回転拘束度の関係	68
図 3-17	二軸偏心試験装置で実験中の要素積層ゴム	69
図 3-18	種々の水平変位下における曲げモーメントと回転角の関係	69
図 3-19	種々の軸力下の曲げ剛性のせん断ひずみ依存性	70
図 3-20	傾斜角を有する積層ゴム柱内の力の釣り合い	71

[第4章]

図 4-1	多段積層ゴムの変形性状	76
図 4-2	要素積層ゴムの復元力特性	76
図 4-3	要素積層ゴムのはり要素モデルへの置換	78
図 4-4	解析対象の多段積層ゴムモデル	81
図 4-5	要素積層ゴム	82
図 4-6	要素積層ゴムの加力実験	83
図 4-7(a)	F_x vs. u_x	85
図 4-7(b)	M vs. u_x	85
図 4-7(c)	F_x vs. θ	86
図 4-7(d)	M vs. θ	86
図 4-7(e)	u_x vs. u_y	87
図 4-8(a)	$\frac{\partial F_x}{\partial u_x}$	89
図 4-8(b)	$\frac{\partial M}{\partial u_x}$	89

図 4-8(c) $\frac{\partial F_x}{\partial \theta}$	90
図 4-8(d) $\frac{\partial \theta}{\partial M}$	90
図 4-8(e) $\frac{\partial F_x}{\partial u_x}$	90
図 4-9 解析モデル	91
図 4-10(a) 変形特性 (実験結果)	93
図 4-10(b) 変形特性 (解析結果)	94
図 4-10(c) 周間特性 (実験と解析)	95
図 4-11 多段積層ゴムの水平復元力特性	96
図 4-12 加力方法の違いによる復元力特性の変化	97

[第5章]

図 5-1 多段積層ゴムを用いたマスダンバの基本構造	104
図 5-2 実験モデル	106
図 5-3 要素積層ゴム	107
図 5-4 振動実験状況	107
図 5-5 主質量の共振曲線	108
図 5-6 マスダンバの共振周期と共振応答倍率(ダンバ付きの場合)	109
図 5-7 マスダンバの共振周期と共振応答倍率(ダンバなしの場合)	110
図 5-8 安定板の応答	111
図 5-9(a) 主質量の応答加速度	112
図 5-9(b) 主質量の応答変位	112
図 5-10 鉛直方向の応答倍率	113
図 5-11 解析モデルの多段積層ゴムの復元力特性(1段当たり)	115
図 5-12 地震床応答模擬波入力に対する応答	117
図 5-13 静的加力試験	118
図 5-14 多段積層ゴムの復元力特性	119
図 5-15 要素積層ゴム試験から求められた多段積層ゴムの復元力特性	119
図 5-16 実大マスダンバにおける入力依存性	120
図 5-17 正弦波入力に対する制振性能(質量比0.01の場合)	121
図 5-18 制振装置を設置した高層ビル	124
図 5-19 ハイブリットマスダンバ	125
表 5-1 ハイブリットマスダンバの主な仕様	125
表 5-2 建物の固有周期と減衰定数	127
表 5-3 建物の同定値	127
図 5-20 地上試験	128
図 5-21 多段積層ゴム	129

表 5-4 多段積層ゴムの主な仕様	129
図 5-22 多段積層ゴムの復元力特性	130
図 5-23 油圧回路	130
図 5-24 ダンピングユニットの減衰力特性	131
図 5-25 制振装置の伝達関数	132
図 5-26 正弦波加振試験(油圧システムの同定)	133
図 5-27 制振システムの概要	134
図 5-28 制振装置(設置後)	136
図 5-29 制御試験結果(1次モード固有振動数加振 Y方向)	136
図 5-30 制御試験結果(2次モード固有振動数加振 Y方向)	137
表 5-5 制振装置の安全対策	137
図 5-31 ハイブリットマスダンバの概念	139
図 5-32 領域のファジー分割	140
図 5-33 パッシブモードでの切替え	141
図 5-34 八戸波に対する制振性能	142
図 5-35 風外力に対する制振性能	142
図 5-36 風に対する応答(Y方向)	143
図 5-37 建物 21 階 Y 方向 rms 絶対速度と平均風速の関係(その1)	144
図 5-38 建物 21 階 Y 方向 rms 絶対速度と平均風速の関係(その2)	145
図 5-39 建物 21 階 Y 方向 rms 絶対速度と平均風速の関係(風向 N の場合)	146
図 5-40 地震応答観測結果(Y方向)	147
図 5-41 建物加速度の応答倍率(Y方向)	148
表 5-6 多段積層ゴムを適用したマスダンバの実用化例	150
図 5-42 電波塔に設置されたマスダンバの例	151
図 5-43 高層建物に設置されたマスダンバの例	151

[第6章]

図 6-1 軽量建物免震用多段積層ゴム	156
図 6-2 要素積層ゴム	157
図 6-3 要素積層ゴムの水平復元力特性	158
図 6-4 要素積層ゴムの鉛直変位特性	159
図 6-5 要素積層ゴムの回転変位特性	159
図 6-6 要素積層ゴムに作用する回転拘束曲げモーメント	160
図 6-7 $M-\theta$ 関係	161
図 6-8 要素積層ゴムの曲げ剛性	161
図 6-9 多段積層ゴムの復元力特性	162
表 6-1 多段積層ゴムの水平剛性	163
図 6-10 882 kN用多段積層ゴムの加力試験状況	163

図 6-11	安定板の曲げひずみ分布	164
図 6-12	$\frac{\partial F_x}{\partial u_x}$	166
図 6-13	$\frac{\partial F_x}{\partial \theta}$	166
図 6-14	$\frac{\partial M}{\partial \theta}$	166
図 6-15	$\frac{\partial F_x}{\partial u_x}$	167
図 6-16	$F_x - \theta$ 特性	167
図 6-17	要素積層ゴムの水平復元力特性(解析モデルによる)	168
図 6-18	実施例の建物	170
図 6-19	多段積層ゴムの配置	171
図 6-20	免震床	174
図 6-21	免震床システムの基本構造	174
図 6-22	高減衰多段積層ゴム	175
表 6-2	高減衰多段積層ゴムの仕様	176
図 6-23	加力パターン	176
図 6-24	水平荷重-変位履歴曲線(静的加力実験)	177
図 6-25	水平荷重-変位履歴曲線(動的加力実験)	177
表 6-3	水平等価剛性・等価減衰定数の比較(装置4台分)	178
図 6-26	解析モデル	178
表 6-4	加振ケースと試験結果	179
図 6-27	高減衰多段積層ゴムの解析モデル	180
図 6-28	応答波形の比較	181
図 6-29	応答スペクトル	181
表 6-5	加振レベルの違いによる応答の変化	181
図 6-30	リニアベアリングを用いた3次元免震装置	183
図 6-31	免震装置の設置例	185
図 6-32	免震装置	186
表 6-6	免震装置の主な仕様	186
図 6-33	免震装置の設置状況	187

[第7章]

表 7-1	供試体の曲げ剛性	196
図 7-1	多段積層ゴム	197
図 7-2	実験中の3tonf用多段積層ゴム(スパン280mm)	198
図 7-3	水平復元力特性と沈み込み両(1.5tonf用)	199
図 7-4	水平復元力特性と沈み込み両(3.0tonf用)	200
図 7-5	スパンの影響	201

図 7-6	水平剛性の鉛直荷重依存性	202
図 7-7	鉛直荷重の水平変位依存性	204
図 7-8	振動実験中の供試体	205
図 7-9	水平および鉛直方向の共振曲線	206
図 7-10	水平および鉛直方向の微振動波形例	207
図 7-11	水平および鉛直方向の周波数伝達関数	207
図 7-12	高減衰ゴムダンパ	212
図 7-13	高減衰ゴムダンパの内部構造の例	212
図 7-14	粘性せん断型ダンパ	213
図 7-15	ダンパ加力装置	214
図 7-16	高減衰ゴムダンパの大変位領域の復元力特性	215
図 7-17	微小振幅領域の測定方法	216
図 7-18	ダンパの微小振幅領域における復元力特性(16℃)	217
図 7-19	減衰力特性(16℃)	218
図 7-20	減衰力特性(25℃)	219
図 7-21	多段積層ゴムの水平剛性	222
図 7-22	応答波形(ダンパなしの場合)	223
図 7-23	応答波形(高減衰ゴムダンパを装着)	224
図 7-24	応答波形(粘性せん断型ダンパを装着)	224
図 7-25	解析モデル	225

第1章 序論

1.1 本研究の背景

1.1.1 多段積層ゴム開発の背景

地震や強風時の構造物の振動を低減する目的で、近年、免震・制振技術が急速に発展してきた。特に、1980年以降、積層ゴムを用いた免震技術の発展は著しいものがある(1)。また、免震技術の発展に促させるように、高層ビルやタワーなどの強風時や中小地震時の振動対策として、チューンドマスダンパを利用した制振技術も急速に発展した。これらは、1980年代後半より、コンピュータの処理速度向上やデジタル技術の進展にともなって、現代制御理論を用いたアクティブ制御技術の適用が可能となり、1990年代前半よりアクティブ制振装置の実用化がなされた。

一方、1980年以降、半導体製造工程においては、集積回路の集積度向上にともない、微振動による製品の精度および歩留まりの低下が問題化した。このような問題を解決するために、微振動をおもな対象とした除振技術も発展した。

ここでは、多段積層ゴムの開発の背景について、免震・制振・除振技術に関連させて述べる。

(1) 免震装置

一般に、免震技術は、対象別に、建物免震、床免震および機器免震に分類できる(図1-1)。

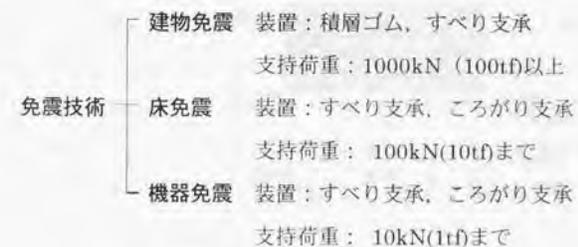


図1-1 免震装置の分類

建築免震技術に用いられる積層ゴムの基本構造は、図 1-2 に示すように、ゴム板と鋼板を交互に積層したものである。ゴム板をより薄くすることにより、積層ゴムに軸力がかかる時の軸力と直交方向の変形を抑制することができ、鉛直方向の変位を小さくすることができる。この結果、鉛直方向剛性を大きくすることが可能となり、荷重支持能力が増大する。一方、水平方向の変形はゴムのせん断変形によるので、ゴム板を薄くすることによって影響されない。上記の特性から積層ゴムが免震装置として多く用いられることになるのであるが、支持荷重が小さい場合より長周期化しようとする場合、積層ゴムの水平剛性 K_H を小さくするためには、式(1-1)で示されるように、

$$K_H = \frac{G \cdot A_v}{h_v} \quad (1-1)$$

積層ゴムの断面積 A_v を小さくするか、ゴムの総高さ h_v を大きくしなければならない(ただし、ゴムのせん断弾性係数 G は変えられないと仮定する)。しかしながら、積層ゴムの断面積を小さくすると許容変形量が低下する。また、積層ゴムのゴム総高さを大きくすることは、積層ゴムの弾性安定性を低下させ所望の支持荷重を載荷できない可能性も予測される(1-2)(1-3)。このように、積層ゴム免震装置を、床免震や機器免震まで、すなわち、支持荷重が小さい対象まで適用しようとする、上記の問題点を解決する必要がある。

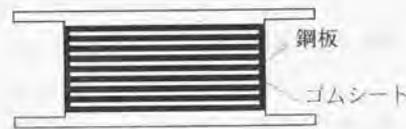


図 1-2 積層ゴムの構造

(2) 制振装置

風や地震動による高層建物の振動を抑制し、居住性を高めるため、最上階近傍にマスダンバ(動吸振装置)を設置した建物やタワーがここ数年建設されるようになって

きている。本論で述べる多段積層ゴム式マスダンバが開発される 1990 年以前には、XY 運動機構を用いたマスダンバ、水槽を用い液体のスロッシングを利用したマスダンバおよび振り子式マスダンバなどが開発され実用化されつつあった。

ところで、高層建物制振用マスダンバは、質量が数千トンから数万トン、周期 2~6 秒におよぶ建物を制振するため、数十トン~数百トン程度の質量を建物と同一の周期 2~6 秒程度で振動させることができ、さらに、摩擦もできるだけ小さいものでなければならない。このような要求に対して、積層ゴムを適用しようとする場合、機械的可動部がなく摩擦も非常に小さくできるが、支持荷重に対して、許容変形量が著しく大きくなり、通常の積層ゴムでは使用できない。したがって、制振装置用デバイスとして、より許容変形量の大きな積層ゴムの開発が課題となっていた。

(3) 除振装置(1-4)

半導体工場の微振動は、製品歩留まりに影響する重要な因子として、空気洗浄度とともに重要視された問題である。超 LSI 工場の振動許容値は、LSI の集積度の向上とともに年々厳しくなっている。また、地震国であるわが国では、弱地震など頻繁に発生しており、これらも工場の稼働率を低下させる要因になっている。これらの問題に対処するため、従来から個々の機器類に防振ゴムや空気ばねを用いた除振装置が利用されてきた。しかしながら、これらの装置は、固有振動数が低くても 1Hz 程度であり、回転機器などの機械振動の除振には有効であるものの、建物振動や地盤から伝達される交通振動などには効果が小さいなどの欠点があった。さらに、地震時には、共振してしまうものもあり解決すべき問題が多くあった。一方、従来の機器免震装置では、免震効果はあるものの装置の摩擦などによって、機械振動や交通振動などいわゆる微振動には効果がないかあるいは小さいという問題があった。このように、除振分野では、微振動から地震動まで効果のある除振・免震装置の開発が望まれていた。機器免震に、図 1-2 に示したような積層ゴムをそのまま適用すると、支持荷重が 10kN (1tf) 程度と小さすぎて変形吸収能力が確保できないという問題点があり、これらを解決した装置の開発が望まれていた。

1.1.2 多段積層ゴムの基本構造

前述の問題点を解決し、免震・制振・除振装置として開発されたのが多段積層ゴムである。ここでは、多段積層ゴムの基本構造について述べる。

鉛直支持荷重が小さい場合やより長周期化しようとする場合、積層ゴムはゴム直径 (d_r) に比較してゴム総高さ (h_r) が高くなり、先に述べたように、免震・制振・除振装置として要求される性能を通常の構造の積層ゴムで満たすことは困難である。

このような場合、図 1-3 に示すように、1 個の積層ゴムを矩形の安定板 (スタビライザー) の四隅に設置された 4 個の積層ゴム柱に面積を等価にしながら分割する。さらに、高さ方向にも、2 分割、3 分割、N 分割としていけば、ここに分割された積層ゴム (以降、要素積層ゴムと呼ぶ) は、直径に対してゴム総高さも適度な数値となり、臨界荷重 (座屈現象が発生する荷重) も大きくなり水平変形に対しても安定となる (図 1-4)。多段積層ゴム全体の水平変形量は、多段積層ゴムの段数を N とすると、要素積層ゴムの許容変位量を δ_0 とすれば、安定板の曲げ剛性が、支持荷重と要素積層ゴムの曲げ剛性に対して十分剛であれば、 $N \cdot \delta_0$ となる。したがって、段数を適度に多くすることにより免震装置として要求される変位吸収能力を満たすことができる (1-5) (1-6)。

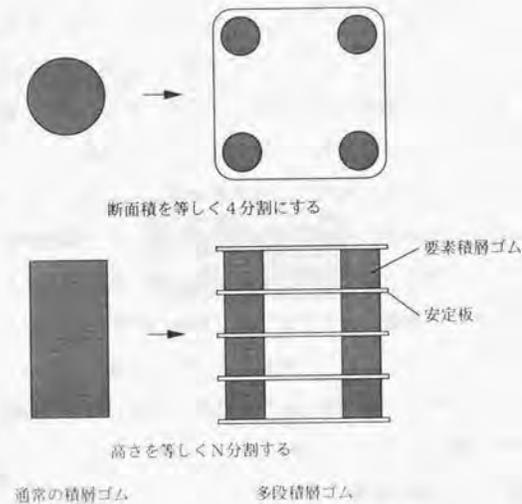


図 1-3 多段積層ゴムの考え方

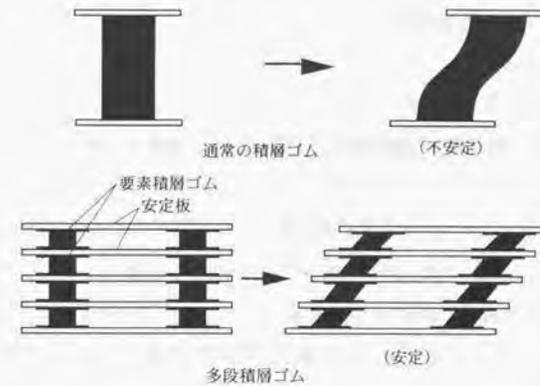


図 1-4 多段積層ゴムの変形性状

このように多段積層ゴムによって、従来の積層ゴムでは困難であった軽量構造物の免震装置や超長周期免震装置が実現できる。図 1-5 に多段積層ゴムと通常の積層ゴムの適用範囲を横軸に支持荷重 (kN)、縦軸に固有周期 (sec) と水平許容変位 (m) として示す。このように、多段積層ゴムの実用化によって、積層ゴムの適用範囲は飛躍的に拡大する。

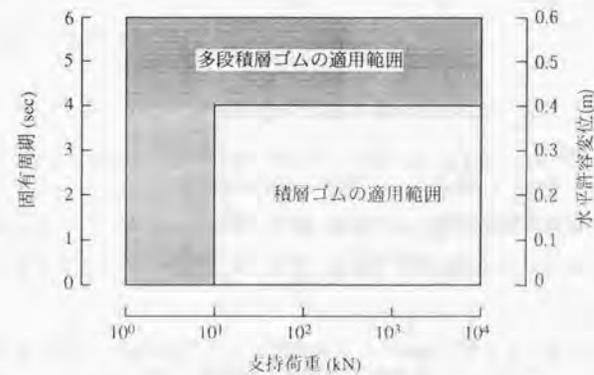


図 1-5 多段積層ゴムの適用範囲

1・2 多段積層ゴムの基本的設計方法

1・2・1 積層ゴム設計法

(1) 基本形状の決定法(1-7)~(1-9)

ここでは、免震装置あるいは制振装置に用いられる積層ゴムの設計方法について述べる。

免震用積層ゴムの設計では、地震応答解析などに代表される動的解析や、地震応答スペクトルなどによって、免震装置の固有周期 T 、臨界粘性減衰比 ζ 、応答変位 S_D および積層ゴム1基で支持する質量 M が設計諸元としてあたえられる。

一方、チューンドマスダンパなどの質量効果型制振装置に用いられる積層ゴムの設計では、主振動系に対する副振動系(チューンドマスダンパ)の質量比 μ 、副振動系の臨界減衰比 ζ_2 および角振動数比 $\frac{\omega_2}{\omega_1}$ などが設計諸元となる。

これらの設計諸元に基づいた免震・制振装置用積層ゴムの構造設計方法を以下に述べる。なお、これからの説明では、積層ゴムに用いられるゴム材料は、減衰の小さい低減衰の天然ゴム系材料を仮定している。したがって、免震・制振装置に必要とされる減衰は、各種ダンパによりえられるものとする。

積層ゴムに支持された振動系の固有周期を T 、質量を M とすると、剛性 K_H は、角振動数 $\omega = \frac{2\pi}{T}$ と質量より、

$$K_H = \omega^2 M \quad (1-2)$$

で求められる。一方、積層ゴムの水平剛性(ばね定数) K_H は、式(1-1)で示しているとおり、 $K_H = \frac{G \cdot A}{h}$ であたえられる。ここで、 G は、ゴム材料のせん断弾性係数で物性値であり材料が選定されれば決まる。通常、積層ゴムに用いられるゴム材料のせん断弾性係数は0.4~0.6MPa程度である。また、 A は積層ゴムの受圧面積、 h はゴムの総高さである。

積層ゴムに加えられる単位面積あたりの荷重すなわち面圧は、長期的な圧縮クリープ量などから決められ、通常これを許容面圧 σ_a と呼んでいる。積層ゴムの受圧面積 A は、許容面圧 σ_a と軸力 P から、

$$A_r = \frac{P}{\sigma_a} \quad (1-3)$$

で求められる。式(1-3)に示されるように、受圧面積は軸力で決まるので、支持荷重(軸力)あるいは振動質量が小さいと受圧面積は小さくなる。次に、ゴムの総高さ h_r は、 $P = M \cdot g$ 、 $\omega = \frac{2\pi}{T}$ であることを考慮すると、

$$h_r = \frac{1}{4\pi^2} \frac{Gg}{\sigma_a} T^2 \quad (1-4)$$

となる。ここで、 g は重力の加速度である。このように、ゴムの総高さ h_r は、固有周期の2乗に、また、面圧に逆比例して大きくなる。したがって、免震・制振装置の固有周期が長くなるほど積層ゴムの形状はよりスレンダーになる。

積層ゴムの断面を円形とすれば直径 d_r は、

$$d_r = \left(\frac{4}{\pi} \frac{M \cdot g}{\sigma_a} \right)^{1/2} \quad (1-5)$$

となる。

通常、免震・制振装置として利用する場合、水平許容変位量も考慮しなければならない。積層ゴムの許容変位量 δ_a は、

$$\delta_a \geq S_D \quad (1-6)$$

でなければならない。一方、許容変位量 δ_a は積層ゴムの破壊が、座屈によるか破断によるかで異なり、

$$\delta_a = \min(\delta_b, \delta_c) \quad (1-7)$$

であたえられる。ここで、 δ_b は破壊モードがせん断破断による変位、 δ_c は座屈による変位である。これらの変位は、厳密には積層ゴムの形状や軸力によって決まるのであ

るが、非常に荒い近似として、それぞれ以下の式で求めることができる。

$$\delta_h = \gamma_h \cdot h, \quad (1-8)$$

$$\delta_c = d, \quad (1-9)$$

ここで、 γ_h はゴムの破断せん断ひずみである。

(2) 積層による効果

積層ゴムの鉛直剛性は免震構造物のロッキング防止のため、ある程度高めておく必要がある。もちろん、鉛直剛性が高ければ水平許容変位量も大きくなる。鉛直剛性は、ゴムと鋼板を交互に積み重ねた積層構造にすることによって高められる。通常の防振ゴムなどでは、ゴム材料はほぼ非圧縮性であるため、軸力を受けるとゴム材料の鉛直変形にともなって半径方向にゴムが変形する。これに対して、ゴムの内部に鋼板などで交互に補強すると（ゴム材料と鋼板は完全に接着され相対変形は生じないようにしておく）、鉛直軸力ともなう半径方向の変形は鋼板によって拘束され、ゴムが放射状に流れない。この結果、鋼板と鋼板の間に挟まれたゴムの内部は、非常に高压に保持され、鉛直剛性が大きくなる。

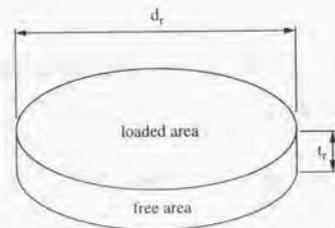


図 1-6 円形のゴムパッドの受圧面積と自由面積

この効果は、鋼板と鋼板の間に挟まれるゴムの受圧面積とその円周部の自由面積の比率（これを1次形状係数 S_1 と呼んでいる、図1-6）の2乗に比例することが、理論解析から示されており、鋼板の変形拘束効果によるゴム1層あたりの見かけの圧縮弾性係数 E_c は、

$$E_c = E_0(1 + 2\kappa S_1^2) \quad (1-10)$$

で求めることができる。ここで、 E_0 はゴム材料の縦弾性係数、 κ はゴム材料の硬度（IRHD）によって決まる定数であり、通常0.7~1.0の数値となる。なお、1次形状係数 S_1 は、直径 d_r 、ゴム1層あたりの厚さを t_r とすれば、

$$S_1 = \frac{d_r}{4t_r} \quad (1-11)$$

となる。式(1-10)では、1次形状係数を限りなく大きくすれば、見かけの圧縮弾性係数も大きくなってしまふ。しかし、ゴムの体積弾性係数 E_∞ を越えることはあり得ないので以下の補正を施す（図1-7）。

$$\frac{1}{E_c'} = \frac{1}{E_c} + \frac{1}{E_\infty} \quad (1-12)$$



図 1-7 体積弾性係数による補正

ここで、 E_c' が体積弾性係数で補正後の圧縮弾性係数である。これより、鉛直剛性は、

$$K_c' = \frac{E_c' \cdot A_r}{h_r} \quad (1-13)$$

で求められる。ただし、 $h_r = n \cdot t_r$ で、 n は鋼板で分割されたゴムの層数である。

したがって、積層ゴムの設計では、式(1-1)の剛性と式(1-6)の許容変位量を確認するだけでなく、最後に安定性を検討しておく必要がある。これは、形状がスレンダーな積層ゴムは、座屈により荷重支持能力を失う恐れがあるからである。

(3) 積層ゴムの安定性

積層ゴムに加えることのできる軸力にも限界があり積層ゴムの形状で決まる。一般に、積層ゴムに加えることのできる最大軸力は臨界荷重と呼ばれる。臨界荷重は曲げせん断はりの理論から求められる。臨界荷重は、水平剛性 $K_H = 0$ となる荷重をいう。

水平剛性の軸力依存性は、曲げせん断座屈理論に基づき解析的に導くことができる。導出の過程は、第3章に譲りここでは結果だけを記すと式(1-14)のようになる。

$$K_H = \frac{P}{l} \left(\frac{\tan\left(\frac{ql}{2}\right)}{\frac{\xi ql}{2}} - 1 \right)^{-1} \quad (1-14)$$

ここで、

$$\xi = \frac{1}{1 + \frac{P}{S_s}} \quad q^2 = \frac{P}{\xi \cdot S_b}$$

であり、 S_s はせん断剛性、 S_b は曲げ剛性、 P は軸力、 l は積層ゴムの総高さであり、積層ゴムの受圧断面を円形(直径、断面積および断面二次モーメントをそれぞれ d, A, I) と仮定し、積層ゴムのゴム1層あたりの厚さを t_r 、鋼板の一枚当たりの厚さを t_s 、層数を n とすれば、

$$S_s = GA \frac{t_r + t_s}{t_r}$$

$$S_b = E_b \cdot I \frac{t_r + t_s}{t_r}$$

$$l = nt_r + (n-1)t_s$$

であたえられる。ただし、 E_b は曲げ変形に関するゴム材料の弾性係数で、鉛直剛性

を算出するのとほぼ同様に、以下の式で求めることができる。

$$E_b = E_0 \left(1 + \frac{2}{3} \kappa S_s^2 \right)$$

$$\frac{1}{E_b} = \frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_\infty}$$

次に、臨界荷重 P_{crit} は式(1-14)において、 $\tan\left(\frac{ql}{2}\right) = \infty$ すなわち、 $\frac{ql}{2} = \frac{\pi}{2}$ とすれば水平剛性 $K_H = 0$ となるので、

$$P^2 + S_s \cdot P - \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 \cdot S_b \cdot S_s = 0 \quad (1-15)$$

$$P_{crit} = \frac{S_s}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{4\pi^2 S_b}{l^2 S_s}} - 1 \right) \quad (1-16)$$

となる。ここで、通常の長柱の場合は、せん断剛性 S_s が大きく、 $\frac{S_b}{S_s} \ll 1$ であるので、式(1-16)の臨界荷重は、

$$P_{crit} = \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 S_b \quad (1-17)$$

となる。また、積層ゴムのようにせん断剛性 S_s が曲げ剛性 S_b と比較して小さい、すなわち、 $\frac{S_b}{S_s} \gg 1$ のときには、

$$P_{crit} = \frac{\pi}{l} \sqrt{S_b \cdot S_s} \quad (1-18)$$

となる。これらの式から、臨界荷重には、せん断剛性 S_s が曲げ剛性 S_b が大きく寄与す

ることがわかる。また、Euler 柱などの長柱では、臨界荷重が式(1-17)のように柱の長さの2乗に逆比例して低下するのに対して、積層ゴムのようにせん断剛性が曲げ剛性と比べて小さい限りでは、柱の長さに逆比例して低下することがわかる。

したがって、積層ゴムの設計では、式(1-18)で臨界荷重を計算し、以下の条件を満たす必要がある。

$$P_v < P_{cm} \quad (1-19)$$

ここで、繰り返しになるが設計のフローを示すと以下のようになる。

式(1-1)の水平剛性と面圧 σ_a から、式(1-3)、(1-4)、(1-5)を用いて、受圧面積 A 、ゴムの総高さ h 、およびゴムの直径 d を決める。次に、1次形状係数 S_1 を仮定し積層ゴムの1層あたりのゴム厚さ t_r を求める。続いて、補強用鋼板の厚さ t_s を定め、ゴムシートの層数 n を

$$n = \frac{h_r}{t_r}$$

で計算し、積層ゴム柱の高さ l を求める。仮定されたゴム材料の物性値から、せん断剛性および曲げ剛性から臨界荷重 P_{cm} を式(1-18)で計算する。さらに、許容変位量を式(1-7)より求める。これらの計算結果に基づき、応答変位 S_D と軸力 P とが、

$$\Delta_a \geq S_D \quad \text{かつ} \quad P < P_{cm}$$

を満足するかを判定する。このとき、判定条件を満足すれば通常の積層ゴムで免震・制振装置を実現できる。

1・2・2 多段積層ゴム設計法

(1) 基本的な設計方法

固有周期が長かつ支持荷重が小さい場合、許容変位量や臨界荷重の問題のため、通常の積層ゴムでは設計が困難になることは、1・1節の本研究の背景で述べたとおり

である。

そこで、ここでは多段積層ゴムの設計方法および設計に関して未解決の問題点とそれらを解決するために実施する実験や新たに本論文で提案する解析方法など関連づけて述べる。

通常の積層ゴムで、水平剛性、許容変位量および臨界荷重の条件を満足できない場合は以下のように多段積層ゴムを設計する。

まず、式(1-3)と(1-4)で求められたゴム柱を、総ゴム高さ h をそのままに、図1-3のように受圧断面積を4分割すると(3分割以上であれば分割数は整数であれば本来分割数に制約はない)、新たなゴム柱の直径は $d_r = \frac{d}{2}$ となる。

ここで、1次形状係数 S_1 を定め(通常は20~40の範囲)、4本のゴム柱のゴム層数 n とゴムシートの厚さ t_r を決定する。この時、積層ゴムの直径が小さくなっているにも関わらず、1次形状係数を通常の積層ゴムと同じくするのは、多段積層ゴムの鉛直剛性を通常の積層ゴムと同等にするためである。結果として、ゴムシートの厚さはより薄くなり層数は増加する。

次に、安定板を介して4本のゴム柱を N 段に分割すると、4本の積層ゴム柱は $4N$ 個の要素積層ゴムができる。この要素積層ゴムの水平剛性、鉛直剛性および許容変位量をそれぞれ k_H 、 k_V 、 δ_a とすれば、多段積層ゴムの水平剛性 K_H と鉛直剛性 K_V と許容変位量 Δ_a の間に、理想的には、

$$K_H = \frac{4 \cdot k_H}{N} \quad (1-20)$$

$$K_V = \frac{4 \cdot k_V}{N} \quad (1-21)$$

$$\Delta_a = N \cdot \delta_a \quad (1-22)$$

の関係がある。しかし、上記の関係が成立するためには、安定板が剛で、要素積層ゴムの取り付け間隔(スパン)が十分大きく、かつ要素積層ゴムに作用する軸力が多段積層ゴムのすべてで同じという仮定が必要となる。

(2) 安定板の効果

実際の多段積層ゴムでは安定板が剛かつスパンを十分大きくとることはできない、そこで安定板の剛性の大きさやスパンの長さが、どの程度になれば、式(1-20)~(1-22)の関係を満たすかを検討する必要がある。先にも述べたとおり、これらの条件を完全に満足させようとする、安定板は極端に厚くなり、いたずらに重量が増し最適な設計ではない。

したがって、安定板の剛性とスパンの長さの変形特性や復元力特性への影響を考慮できる解析モデルが必要とされる。式(1-20)と(1-21)で示される多段積層ゴムの水平剛性と鉛直剛性は構造上えられる上限と考えられ、現実の多段積層ゴムの剛性はこの式の値より小さくなるのが予測される。安定板の剛性が小さい場合に、多段積層ゴムの水平剛性が低下するメカニズムはよくわかっていない。このメカニズムの説明として、安定板の要素積層ゴムの曲げモーメントによる回転に対する拘束効果が弱くなり、結果として復元力が低下するが考えられる。すなわち、積層ゴムは回転が拘束された状態でせん断変形させるとき最も水平剛性が高く、上端あるいは下端が回転すると軸力の一部が水平方向に分力として現れ、見かけの剛性が低下すると推定されるからである。

安定板の効果は、同一形状の要素積層ゴムと異なるの剛性を有する安定板を用いた静的加力実験で検証できる。この実験では、要素積層ゴムはすべて同じサイズであるので、復元力特性の変化はほとんどすべて安定板に起因すると考えられる。したがって、上述の実験により安定板の剛性と多段積層ゴムの復元力特性の関係が定量的に把握される。

(3) 要素積層ゴムの設計方法

しかしながら、実際の多段積層ゴムでは、水平変形にともなって各要素積層ゴムに作用する軸力が変化することが予想される。もし、多段積層ゴム内部の軸力の変化が大きいと、要素積層ゴムでも、式(1-14)の水平剛性の軸力依存性を考慮することになり設計が煩雑になる。これら为了避免のために、多段積層ゴムの段数 N の決定では、要素積層ゴムの水平剛性の軸力依存性が、定格軸力 P の2倍の軸力の範囲内でほとんどない形状にすることが望ましい。もちろん、段数を大きくとることは、許容変位量と水平剛性の軸力依存性の観点から望ましいが、あまり段数を増加させることは適

切な設計とは言えない。したがって、多段積層ゴムの設計では、許容変位量を満足させ、かつ要素積層ゴムの水平剛性の軸力依存性を無視できる必要最小限の分割数(段数)を求めることが重要である。

積層ゴムの水平剛性の軸力依存性は、面圧、1次形状係数および2次形状係数 S_2 の3つのパラメータで検討されている。ここで、2次形状係数は、第3章でも触れるように積層ゴムの形状(フラットかスレンダーか)を決める工学(実用)的因子であり、

$$S_2 = \frac{d_r}{h_r} \quad (1-23)$$

で定義される。建築用免震装置として使用される積層ゴムでは、通常 $S_2 > 5$ であれば、水平剛性の軸力依存性は無視でき、積層ゴムの破壊もゴムのせん断破断によるとされている。もちろん、実使用の条件よりはるかに大きな軸力を載荷させれば水平剛性の軸力依存性も認められ座屈現象も生じる。

なお、2次形状係数と細長比 λ との間には、

$$\lambda = \frac{4}{S_2} \quad (1-24)$$

の関係が成り立つ。

一般に、積層ゴムの λ は1内外であり、かなり特殊な柱であると言うことができよう。水平剛性の軸力依存性がない最小の S_2 から、段数 N は、

$$N = \frac{h_r}{d_r} S_2 \quad (1-25)$$

で決まる。

そこで、要素積層ゴムの組み合わせ加力試験により、回転拘束度と水平復元力特性の影響を定量的に調べ、これらの結果を(2)の安定板の効果で述べた解析モデルに反映できれば任意の段数、スパンおよび軸力における多段積層ゴムの復元力特性を予測することが可能となり式(1-20)~(1-22)に示した簡易式と比較して精度の高い設計が可能となる。

1.3 従来の研究

多段積層ゴムは、新たに開発されたものであり、多段積層ゴムを対象とした研究は従来ほとんどない。したがって、ここでは、積層ゴムの力学特性、終局耐力に関する研究について述べる。

従来、免震装置として各種の装置が考案され、その一部が実用化されたが、本格的な免震装置が実用化し普及したのは積層ゴムが開発されてからである。

積層ゴムによる免震装置の研究は、わが国では1980年代初期から開始され、藤田らと多田らの研究がその端緒となると思われる^{(1-10),(1-11)}。藤田らは、変電機器などの重量物の免震を実現するために、積層ゴムを用いた免震装置の研究をおこなった。この研究で、地震応答解析から、免震装置として支持荷重に対して、水平方向に2秒程度の剛性と、0.2m前後の変位吸収能力が必要であることを示し、これらの条件を満たす積層ゴム製作した。さらに、積層ゴムを用いた振動台実験によって免震効果を実証した⁽¹⁻¹²⁾。その後、藤田らは、支持荷重980kN(10tf)に対して、水平方向に約2秒となる剛性と0.21mの変位吸収能力を有する積層ゴムを試作し、種々の軸力下における水平方向の剛性と変位吸収能力および鉛直方向変位(沈込量)の変化を静的加力試験より研究した。この研究より、軸力の増加とともに、積層ゴムの水平剛性、変位吸収能力が低下していくこと、および鉛直変位量が増加していくことを確認している。特に、軸力を2倍の1960kN(20tf)まで引き上げると、変位吸収能力が、軸力980kNの場合、約0.2mあったものが、半分の0.1mに低下したことを示した。このことから、試作した積層ゴムが、免震装置として使用できるもっとも軽量用であると結論づけた⁽¹⁻¹³⁾。さらに、笠井らは、この積層ゴムをレーザー関連の研究施設の床に設置し、免震・除振装置への適用の可能性を示した⁽¹⁻¹⁴⁾。

免震建物の開発の初期段階では、積層ゴムとダンパの併用構造が研究され、各種のダンパの力学特性の研究が進められた。これらの研究から鋼材を用いた弾塑性ダンパ、鉛ダンパ、オイルダンパおよび粘性ダンパなどが実用化された。

免震建物の普及段階では、減衰機能を内在させた積層ゴムの研究が多くなされた。このなかで、ゴム材料自体に減衰を持たせた高減衰積層ゴム(HRD, high damping rubber bearing)や、積層ゴムの中心部の穴に鉛プラグをさし込み、鉛の塑性抵抗を利用して減衰を得る鉛プラグ入り積層ゴム(LRB, lead rubber bearing)がそれぞれ実用

化された^{(1-15)~(1-17)}。

免震建物の安全性を検証するため、積層ゴムの終局耐力に関する研究が1980年中頃より開始された。終局耐力の研究では、積層ゴムの引張・せん断および圧縮・せん断の二軸応力状態の破断特性の解明がなされた^{(1-18),(1-19)}。また、藤田らによって積層ゴムの各種の応力状態における破断特性を破断局面(縦軸に軸応力、横軸にせん断ひずみ)で整理する手法が提案された⁽¹⁻²⁰⁾。

免震性能を精密に予測するための、積層ゴムの復元力特性のモデリングに関する研究もなされた。これら一連の研究では、高減衰積層ゴムや鉛入り積層ゴムの解析モデルが提案され^{(1-21)~(1-25)}、振動台実験と解析結果との比較からモデリングの妥当性が検証された。

より長周期の免震装置開発のため、積層ゴムの高面圧下の力学特性の研究が進められた。この研究では、積層ゴムの安定性についても多くの検討がなされ、水平復元力の面圧依存性、座屈特性など解明が行われた⁽¹⁻²⁶⁾。これらの特性を厳密に解析することは、ゴム材料の非線形性と幾何学的非線形性から困難である。したがって、実用的な解決策として、積層ゴムの直径/ゴム総高さなるパラメータ(2次形状係数)を導入し、2次形状係数と許容軸力との関係を定めたり⁽¹⁻²⁷⁾、座屈に関する許容変位を剛はり回転ばねの簡易モデル^{(1-28),(1-29)}から解析的に算出する試みがなされた。

積層ゴムの曲げ剛性に関する研究は、座屈特性や許容変形量を定める上で重要であるにも関わらず、従来ほとんど行われていなかった。数少ない例として、ゴムブロックの曲げ剛性を解析的に求めたGent⁽¹⁻³⁰⁾の研究や、Stantonによる積層ゴムの曲げ変形特性実験がある程度である⁽¹⁻³¹⁾。また、わが国でもゴムブロックの曲げ剛性を測定した例が2~3例ある程度であった^{(1-32)~(1-34)}。

この他、積層ゴムの力学特性を解明するための解析的研究として、伝達マトリックスを用いた簡易解析⁽¹⁻³⁵⁾や、有限要素法を用いたゴムの大变形解析など⁽¹⁻³⁶⁾がなされた。

1・4 本研究の目的

本研究の対象である多段積層ゴムは、新たに提案された構造の積層ゴムであり、力学特性は未知である。そこで、本研究では、多段積層ゴムの力学特性を系統的に把握する目的で、

- 異なる曲げ剛性の安定板を有する多段積層ゴムの加力実験をおこない、安定板の曲げ剛性の多段積層ゴムの復元力特性におよぼす影響を検討する。
- 要素積層ゴムの力学特性（水平復元力特性、曲げ剛性、面圧依存性など）に注目し、積層ゴムの水平復元力特性におよぼす回転拘束度の影響について実験的な検討をおこなう。このとき回転拘束度は、積層ゴムの上端・下端の回転をゼロに固定するための曲げモーメントを回転拘束モーメントとし、実際に積層ゴムの上端・下端に作用している曲げモーメントとの比で定義する⁽¹⁻³⁷⁾。さらに、回転拘束度の影響を材料力学的に解明するため、藤田ら⁽¹⁻³⁸⁾および飯塚⁽¹⁻³⁹⁾の研究に基づいて解析的な検討をおこなう。
- これらの検討をもとに、要素積層ゴムの各種依存性を考慮できる力学モデルを求め、多段積層ゴムの水平復元力特性におよぼす軸力・安定板の剛性・段数の影響を解析的予測できる手法を提案する。さらに、解析的にえられた結果と加力実験で得られた結果と比較することにより解析手法の妥当性を検証する。
- 以上の基礎的実験を基に、多段積層ゴムの制振装置への実用化研究をおこなう。研究では、スケールモデルを用いた振動台実験により、多段積層ゴムの動特性を把握する。さらに、実大高層建物制振装置用多段積層ゴムの大変形特性実験から基本特性を検討した後、制振装置の加振実験から制振効果の検証をおこなう。
- 次に、免震装置への実用化研究をおこなう。研究では、周期4秒の免震建物の実用化を目指し、建築免震用多段積層ゴムの加力実験をおこなう。また、高減衰多段積層ゴムを用いた床免震装置の振動台実験をおこない、免震効果の検証をおこなう。
- 最後に、多段積層ゴムの除振装置への適用の可否について、天然ゴム系多段積層ゴムを用いた除振装置モデルにより、微振動に対する除振効果を加力実験および振動台実験により検討する。また、除振装置に適したダンパ（減衰材）の微小変位振幅領域における減衰特性についても検討する。

1・5 本論文の構成

本論文は全8章より構成されている。各章の概要は以下のとおりである。

第1章は序論である。本研究の背景と多段積層ゴムの基本的設計方法を述べ、既往の研究を整理し、本研究の目的と位置づけを示している。

第2章では、多段積層ゴムの復元力特性と題し、大型の制振装置（マスダンバ）に使用される多段積層ゴムを例にとり、多段積層ゴムの水平復元力特性、鉛直変位特性などにおよぼす安定板の効果を実験的に検討している。

第3章では、要素積層ゴムの力学特性と題し、第2章の多段積層ゴムで用いられた要素積層ゴムの復元力特性を、新たに開発した二軸偏心試験装置を用いて、実験的に調べている。特に、積層ゴムの復元力特性におよぼす回転拘束度（通常の積層ゴムの復元力特性の評価は、積層ゴムの上下のフランジが常に平行を保つように行われている）の影響を調査している。これらの実験から、回転拘束度が低下すると積層ゴムの水平復元力が低下することを示している。

第4章では、非線形はりモデルを用いた剛性解析と題し、多段積層ゴムの復元力特性を要素積層ゴムの力学特性と安定板の剛性から解析に求める試みをおこなっている。本解析では、要素積層ゴムをはりと仮定して、解析モデルを非線形はり要素としている。

さらに、非線形はりモデル⁽¹⁻⁴⁰⁾の剛性マトリックスの各要素を第3章で示した二軸偏心試験装置を用いて実験的に決定する手法も提案している。剛性解析を第2章の多段積層ゴムについておこない、復元力特性を求めている。これらの解析結果は、実験結果と比較され解析手法の妥当性を検証している。

第5章では、多段積層ゴムの制振装置への適用と題し、タワー用制振装置の実用化を想定し、振動質量5ton、周期2秒、許容変形量0.6mの多段積層ゴムを用いた制振装置を製作し、振動台実験から多段積層ゴムの動的特性を把握している。さらに、多段積層ゴムと油圧アクチュエータを用いた振動質量200tonのアクティブマスダンバの開発についても述べている。

第6章では、多段積層ゴムの免震装置への適用と題し、軽量建物の免震装置への多段積層ゴムの実用化について述べている。本章では、建物の水平固有周期が4秒の定格支持質量150tonと90tonの2種類の多段積層ゴムを製作して、これらを加力実験

し復元力特性を求めている。また、第4章で提案した解析手法から求められた結果と比較し、解析手法の妥当性を再度検証している。さらに、高減衰多段積層ゴムを用いた免震床を提案し、振動台実験から免震効果を実証している。また、文化財保護を目的とした免震装置に用いられた高減衰多段積層ゴムの実施例についても言及する。

第7章では、多段積層ゴムの除振装置への適用と題して、多段積層ゴムの微振動除振性能の検証、除振装置に適したダンパ材料についての実験的検討をおこなっている。

第8章は、結論である。ここでは、各章でえられた研究成果を要約し本論文の結論とする。

第1章の参考文献

- (1-1) 藤田隆史, 免震技術の現状と将来, 機論, 51-461, C(1985), 1-7.
- (1-2) A.N.Gent, Elastic stability of rubber compression springs, J.Mech. Engng.Sci.,Vol.6,No.4,318-326,1964.
- (1-3) R.A.Schapery and D.P.Skala, Elastic stability of laminated elastomeric columns, Int. J. Solids Structures, 1976,Vol.12,401-417.
- (1-4) 藤田隆史, 超 LSI 工場の振動問題—微振動防振技術と免震技術—, 日本機械学会誌, 第89巻, 第809号, 昭和62年(1987), 427-432.
- (1-5) 藤田隆史・森文男・正木信男・水津洋二, 免震・除振床用多段積層ゴムの実験的研究, 機論, 53-490, C(1987), 1147-1152.
- (1-6) R.I.スキナー・W.H.ロビンソン・G.H.マックベリ, 免震設計入門, 1996, 鹿島出版会.
- (1-7) J.M.Kelly, Earthquake-Resistant Design with Rubber,(1993),Springer-Verlag.
- (1-8) A.G.Thomas, The design of Laminated Bearings I ,Proceedings of International Conference on Natural Rubber for Earthquake Protection, 1982, 229-246.
- (1-9) C.J.Derham, The design of Laminated Bearings II ,Proceedings of International Conference on Natural Rubber for Earthquake Protection, 1982, 247-257.
- (1-10) 藤田隆史・藤田聡・芳沢利和, 積層ゴムによる重量機器の免震支持(第1報, 実大免震支持装置についての基礎実験), 機論, 50-454, C(1984), 933-941.
- (1-11) 藤田隆史・藤田聡・芳沢利和・鈴木重信, 積層ゴムによる重量機器の免震支持(第2報, 免震支持された系についての振動実験と応答解析), 機論, 51-561, C(1985), 17-24.
- (1-12) 藤田隆史・津田博史・鈴木重信, 重量機器免震用積層ゴムの静的加力実験(第1報 積層ゴム単独の場合), 生産研究, 38-3, (1986), 144-147.
- (1-13) 藤田隆史・津田博史・鈴木重信, 重量機器免震用積層ゴムの静的加力実験(第

- 2報 バックアップ機構がある場合), 生産研究, 38-3, (1986), 148-151.
- (1-14) 笠井洋昭・栗原雅樹・宮田弘市・山手勇樹, 防振・免震床の開発, 機論, No.860-5, (1986), 50-51.
- (1-15) 藤田聡・藤田隆史・佐々木恒夫・藤本滋・成川昇・鶴谷千明, 産業施設に適した建屋免震装置の基礎的研究(第1報, 履歴ダンバを用いた場合の免震性能), 機論, 53-491, C(1987), 1401-1409.
- (1-16) 藤田聡・藤田隆史・佐々木恒夫・藤本滋・成川昇・鶴谷千明, 産業施設に適した建屋免震装置の基礎的研究(第2報, 粘性ダンバを用いた場合の免震性能), 機論, 53-491, C(1987), 1410-1416.
- (1-17) 藤田聡・藤田隆史・佐々木恒夫・藤本滋・成川昇・鶴谷千明, 産業施設に適した建屋免震装置の基礎的研究(第3報, 免震性能に及ぼすエネルギー吸収装置の影響), 機論, 53-496, C(1987), 2529-2536.
- (1-18) 藤田隆史・藤田聡・鈴木重信・芳沢利和, 建物免震用の積層ゴムに関する実験的研究(第1報, 50トン用積層ゴムの静的加力実験), 機論, 53-485, C(1987), 71-76.
- (1-19) 藤田隆史・藤田聡・鈴木重信・芳沢利和, 建物免震用の積層ゴムに関する実験的研究(第2報, 100トン用積層ゴムの静的加力実験), 機論, 53-485, C(1987), 77-81.
- (1-20) 藤田隆史・藤田聡・鈴木重信・芳沢利和, 建物免震用の積層ゴムに関する実験的研究(第1報, 100トン用積層ゴムの破断実験), 機論, 54-507, C(1988), 2618-2623.
- (1-21) 藤田隆史・鈴木重信・藤田聡, 建築免震用の高減衰積層ゴムに関する研究(第1報, 履歴復元力の基本特性と解析モデル), 機論, 56-523, C(1990), 658-665.
- (1-22) 鈴木重信・藤田隆史・嶋崎守, 建築免震用の高減衰積層ゴムに関する研究(第2報, 破断限界), 機論, 56-523, C(1990), 667-672.
- (1-23) 鈴木重信・藤田隆史・藤田聡・嶋崎守, 高減衰積層ゴムを用いた免震建物の地震応答に関する研究, 機論, 57-536, C(1991), 1129-1136.
- (1-24) 鈴木重信・藤田隆史・藤田聡, 高減衰積層ゴムを用いた建物免震システムの終局耐力に関する研究(第1報, 終局耐力の解析方法), 機論, 57-544, C(1991),

- 3769-3776.
- (1-25) 鈴木重信・藤田隆史, 高減衰積層ゴムを用いた建物免震システムの終局耐力に関する研究(第2報, 実大免震システムの終局耐力に関する研究), 機論, 58-545, C(1992), 62-67.
- (1-26) 多田英之・高山峯夫他, 積層ゴムアイソレータの限界耐力に関する実験的研究, 福岡大学集報, 47, (1991).
- (1-27) 日本建築学会編, 免震装置設計指針, (1993), 日本建築学会.
- (1-28) C.H.Koh and J.M.Kelly, A simple mechanical model for elastomeric bearings used in base isolation, Int. J. Mech. Sci., Vol.30, No.12, 933-943, 1988.
- (1-29) 飯塚真臣, 圧縮軸力・水平力同時作用下における免震用積層ゴムの大変形マクロモデル, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), B, (1992), 721-722.
- (1-30) A.H.Gent and E.A.Meinecke, Compression, Bending, and Shear of Bonded Rubber Blocks, POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE, Vol.10, No.1, 48-52, 1970.
- (1-31) J.F.Stanton, Stability of Laminated Elastomeric Bearings, Journal of Engineering Mechanics, Vol.116, No.6, June, 1990.
- (1-32) 赤坂隆・加々美茂・長谷川淳・繁昌学, 免震積層ゴムの横剛性と座屈強度, 日本ゴム協会誌, 66, 1(1993), 76-89.
- (1-33) 林篤・豊田将文・神保憲二・大迫勝彦・蓮田常雄・町田重美・梶原恵治, 天然ゴム系積層ゴムの曲げ変形特性に関する基礎研究(その1) 実験概要と基本特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), B-2, (1996), 699-700.
- (1-34) 豊田将文・山本浩二・国弘仁・蓮田常雄・中沢俊幸・渡部憲, 天然ゴム系積層ゴムの曲げ変形特性に関する基礎研究(その2) 実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), B-2, (1996), 700-701.
- (1-35) 松田泰治・塩尻弘雄, 伝達マトリックス法による積層ゴムの簡易解析, 構造工学論文集, Vol.39B, (1993), 203-209.
- (1-36) J.C.Simo and J.M.Kelly, Finite element analysis of the stability of multilayer elastomeric bearings, Engng. Struct., Vol.6, July, 162-172, 1984.

- (1-37) 正木信男, 積層ゴムの水平復元力特性におよぼす回転拘束度の影響, 土木学会
第 51 回年次学術講演会講演梗概集, 1-B, (1996), 112-113.
- (1-38) 藤田聡・藤田隆史, 重量機器免震用積層ゴムの静的加力実験—第 3 報 剛性につ
いての理論的研究)—, 生産研究, 38-4, (1986), 189-191.
- (1-39) 飯塚真臣, 積層ゴムの剛性マトリックス (Haringx 理論に基づく定式化), 日
本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), B-2, (1995), 619-620.
- (1-40) O.C. ツィエンキーヴィッツ, マトリックス有限要素法, (1984), 451-452, 培
風館.

第 2 章 多段積層ゴムの復元力特性

2.1 緒言

本章では, 制振装置用大型多段積層ゴムの例として, 多段積層ゴムの復元力特性におよぼす安定板と加力方法の影響について実験的に検討する。

多段積層ゴムの水平剛性 K_H は要素積層ゴムの水平剛性 k_H と段数 N を用いて, 近似的に $K_H = \frac{4 \cdot k_H}{N}$ (要素積層ゴムの 1 段あたり 4 個使用の場合) で求めることができる。一方, 要素積層ゴムの許容変位量を δ_u とすれば, 多段積層ゴムの許容変位量は $N \cdot \delta_u$ となるので, 段数を適度に多くすることにより変位吸収能力は多くできる。しかしながら, これらの略算式は, 多段積層ゴムの安定板が十分剛であるとの仮定に基づくものである。ところが, 実際の多段積層ゴムの安定板は弾性体であり, 多段積層ゴムが水平変形すると, 軸力と要素積層ゴムの水平剛性により曲げモーメントが発生し変形する。

そこで, 本章では超高層建物の強風時の建物振動を抑制し居住性向上を目的とした振動質量 100ton, 周期 4sec, 変位吸収能力 1m の実大マスダンバに使用される大型多段積層ゴムの用いて, 主に安定板の変形特性と効果について注目した大変形加力試験を実施している(2.1)~(2.6)。

加力試験では, 試験体を上記の多段積層ゴムの一部を切り出した平面フレームモデルとし, 曲げ剛性の異なった 3 種類の安定板と同一形状の要素積層ゴムで多段積層ゴムの構成し, 一定の軸力を載荷させながら変形特性 (水平復元力特性, 鉛直変位特性, 多段積層ゴムの各段における相対変位, 安定板に生じる曲げひずみなど) におよぼす安定板の曲げ剛性の影響を検討している。さらに, 実際のマスダンバに用いられる場合の条件を想定して, 多段積層ゴムの変形時に, 上端が完全に拘束され多段積層ゴムの上端と下端が完全に平行を保つ場合 (定変位加力) とそうでない場合 (定荷重加力) について, 水平復元力特性と要素積層ゴムに加わる鉛直軸力の違いなどについても調べている。

2・2 試験体の概要

本試験体は図2-1と図2-2に示すように、振動質量100ton、周期4秒、ストローク1mのマスダンバを支持する三角形に構成した多段積層ゴムの一部を取り出したものである。多段積層ゴムのこのように三角形にし、要素積層ゴムの1段あたり3個を使用しているのは、多段積層ゴムの水平剛性をより低くし、制振装置の固有周期を長くするためである。試験体は要素積層ゴムの1段あたり2個用い、

- ① 厚さ22mmの平板を溝形鋼(150×75×6.5×10)で補強した安定板(以後、基本モデルと呼ぶ)を介して、12段積み重ねたものである。安定板の平板はマスダンバの設置上の制約から、中心部1000mmに渡って両端から50mm切り欠いている。また、補強材の溝形鋼は要素積層ゴムのごく近くまでのばし、要素積層ゴムに接する端部を斜めに切り欠いた。その他、安定板の効果を確認するため、
- ② 厚さ22mmの平板のみの場合(PL-22と略記)と
- ③ 厚さ16mmの平板のみの場合(PL-16と略記)

の試験体も製作し合計3ケースとしている。安定板の材質は日本工業規格のSS400とした。要素積層ゴムの取り付け間隔、いわゆるスパンは各試験体ともに1800mmとした。これは三角形の本多段積層ゴムが45°方向に1200mm変形した場合でも、変形量がスパンを越えないように配慮したためである。試験体をこのように2次元構造にしたことにより、安定板の変形特性を明確に観察でき、また安定板のひずみを測定することにより、曲げモーメントの分布の観察が容易になる。さらに、後節で述べるように、平面フレームへのモデル化ができ、解析モデルとの比較が可能になる。なお、試験体には面外方向への座屈を防止する目的で、3段おきにガイドプレートを取り付けこの中に溝を切って、この溝に鋼管を通した。溝は、変形方向に長くなっており大変形時にも追従できるように工夫している。

要素積層ゴムは図2-3に示すように、直径190mm、厚み2mmの天然ゴム板と厚み0.6mmの金属板で交互に29枚積層し、加硫接着し一体化したもので、フランジ間の高さは98.8mmである。従って、本多段積層ゴムの総高さは1449.6mmである。要素積層ゴムの水平ばね定数の設計値は、287kN/mであり、1段あたり3個の要素積層ゴムの12段積み重ねた三角形多段積層ゴムが振動質量25tonを支持するとき、

水平固有周期が4秒となるようにしている。要素積層ゴムの1次形状係数 S_1 は23.75、2次形状係数 S_2 は3.28であり、建築免震用積層ゴムの2次形状係数は5前後でややスレンダな形状となっている。また定格軸力を支持したときの面圧(単位受圧面積あたりの圧力)は、2.94MPaである。

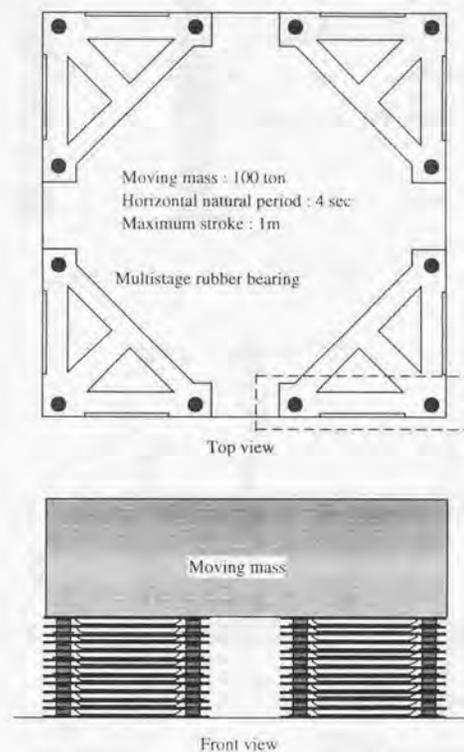


図2-1 多段積層ゴムを用いたマスダンバの基本構造

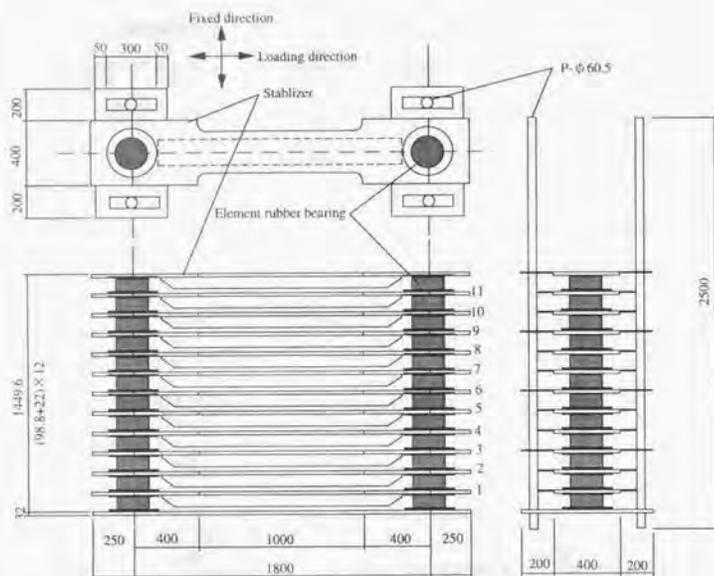


図 2-2 加力実験用試験体

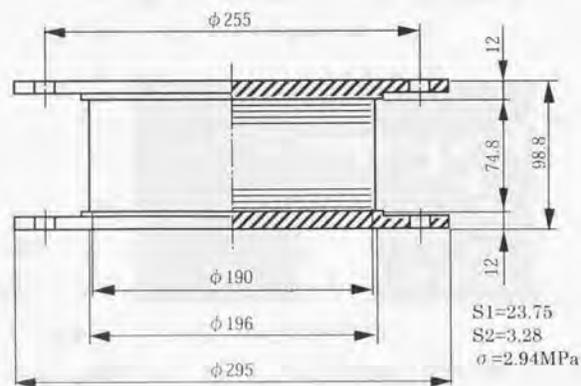


図 2-3 要素積層ゴム

2・3 加力装置と実験方法

2・3・1 加力装置の概要

加力装置を図 2-4 に示す。試験体上部にフレームを介して最大荷重 9800kN (100tonf) の油圧アクチュエータを 2 本設置し、軸力と回転拘束のための曲げモーメントを発生できるようにしている。一方、水平方向には最大荷重 68.6kN (7tonf) の油圧アクチュエータを荷重計を介して取り付けて試験体に水平変形が加えられるようにしている。また、試験体の上部一カ所に水平変位測定用の長ストローク変位計が、さらに、層間変位計が各段間に設置されている。軸方向変位測定用として鉛直加力用アクチュエータの近傍に変位計が 2 カ所設置されている。軸方向変位を 2 カ所測定することにより、軸方向の変形量と試験体の回転角を求めることができる。また、試験体を摩擦の非常に小さいテフロン支承で支持し、試験体の最下部にロードセルを接続することにより水平荷重を測定した。

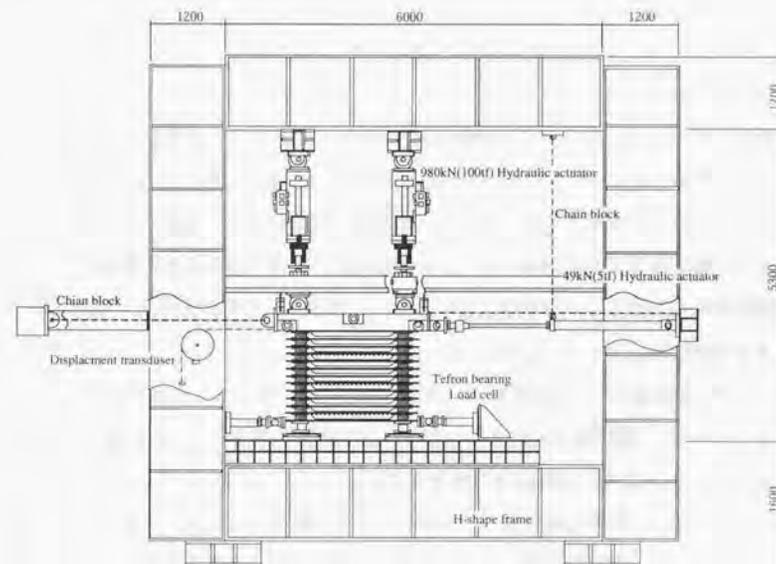


図 2-4 加力実験装置

さらに、要素積層ゴムの下部に当たる2ヶ所に軸力測定用のロードセルを取り付け、多段積層ゴムの水平変位にともなう軸力変動を測定した。その他、1、3、6、9、11段目の安定板のひずみを計測している。安定板上のひずみ計測位置を図2-5に示す。

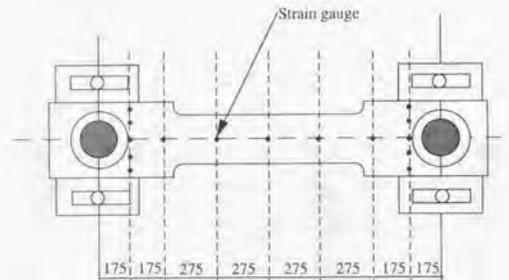


図2-5 ひずみゲージの位置

2・3・2 加力パターン

(1) 定変位制御

試験体の水平方向加力パターンを図2-6に示す。加力はランプ波形とし、最初±10cmを2回繰り返す、その後±30cmを2回、±50cmを2回繰り返す、最後に設計変位の+100cmまで変形させた。さらに、試験体の安全余裕度を確認するため、設計変位の1.2倍に相当する+120cmまで変形を加えた。軸方向加力は多段積層ゴムの実際の使用状況を考慮して、試験体上部の2カ所で測定される鉛直変位 δ_{v1} 、 δ_{v2} が等しくなるようかつ軸力が一定となるようにした場合を基本とした。

このとき、鉛直軸力は、多段積層ゴムの定格支持荷重に相当する156.8kN(16tonf)とした。さらに、鉛直軸力に対する安全余裕度を確認する目的で、鉛直軸力196kN(20tonf)について、+120cmまで変形を加えた。

定変位制御の場合、鉛直方向の軸力を保持したまま試験体上部を平行に保つようにするため($\delta_{v1} = \delta_{v2}$)左右の油圧アクチュエータの荷重配分を水平変位の増加にともなって調整している。さらに、油圧アクチュエータが水平変位にともなって傾斜するので、軸方向の分力が一定になるように角度補正も実施している。

(2) 定荷重制御

多段積層ゴムの上部おもり部の構造が十分剛でない場合、水平変形にともなって多段積層ゴムの上端部が回転することが考えられる。そこで、回転を特に拘束しない場合について復元力特性がどのように変化するか検討した。実験では、左右の鉛直方向の油圧アクチュエータの軸方向の分力が常に等しくなるように制御した。この時、鉛直軸力は、多段積層ゴムの定格支持荷重に相当する156.8kN(16tonf)とし、水平変位は±30cmとした。

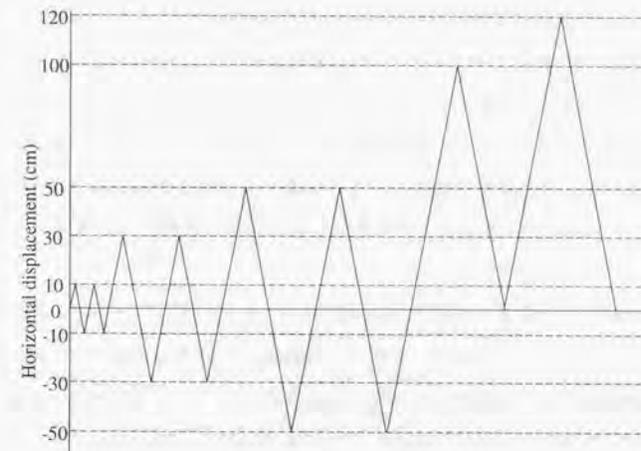


図2-6 加力パターン

2・4 復元力特性

2・4・1 基本モデルの実験結果

基本モデルの安定板を用いた場合の定変位制御実験結果を図 2-7 から図 2-10 に示す。図 2-7 は水平変位-荷重関係を、図 2-8 は水平変位-鉛直変位関係を、図 2-9 は多段積層ゴム脚部の軸力を、図 2-10 は多段積層ゴムの層間変位をそれぞれ示す。また、図 2-11(a)に水平変位 120cm 時の試験体の変形状況の写真を示す。

図 2-7 では、全体の水平変位と脚部の水平反力との関係を変位 1m まで示しているが、荷重-変位関係はほぼ線形な性質を示している。ただし、詳細に観察すると、0.5m 以上の大変形域では荷重増分の低下がみられソフトスプリングの傾向が認められる。実験で求めた試験体の水平ばね定数は、変位振幅±30cm で 47kN/m で、安定板の曲げ剛性が十分剛であると仮定したときの要素積層ゴムの水平ばね定数と多段積層ゴムの段数からの推定値 48kN/m とほぼ一致している。

図 2-8 は、水平変位にともなう鉛直方向の沈み込み量を示している。水平変位と沈み込み量の関係は、放物線の性質をもちその大きさは水平変形 50cm, 100cm でそれぞれ約 5mm と 20mm である。この鉛直変位量は、要素積層ゴム 1 基あたりに換算すると、0.42mm と 1.67mm となる。

図 2-9 は脚部の軸力を示しており、水平変形にともない軸力はほぼ線形的に変化している。正（右）方向に水平変形する場合、右側脚部の荷重は増加し、反対に左側脚部の荷重は減少する。水平変形 1m の時、右側脚部の荷重は 127.4kN (13tonf) に対し、左側脚部の荷重は 29.4kN (3tonf) となり極端に軸力の違いを生じているが、軸力がゼロないし引張り側になることはなかった。この結果は、多段積層ゴムのスパンを決定するための指針となる。

図 2-10 は最大変形 120cm まで加力した場合の、全体水平変位 30cm, 60cm, 90cm, 120cm 時における各段の層間変位分布を示したものである。各水平変位において各段の層間変位の差は最大でも 10% であり、多段積層ゴムの水平変位にともなう層間変位が各段でほぼ均一になっていることを示すものである。このことは、図 2-11(a)に示す変形状況の写真からも確認できる。すなわち、多段積層ゴムの変形は各段においてほぼ均一であり、水平変形にともなう積層ゴムの変形がもっぱらせん断変形であることを示すものと思われる。さらに、基本モデルの安定板を用いた多段積層ゴムでは、

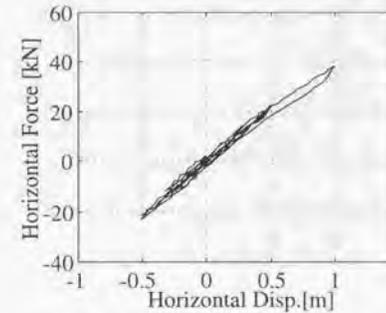


図 2-7 基本モデルの水平復元力特性

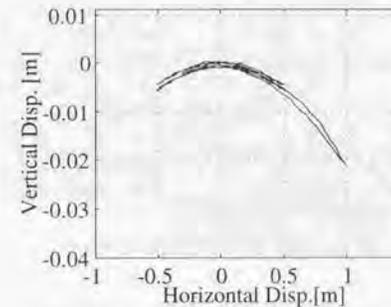


図 2-8 基本モデルの鉛直変位特性

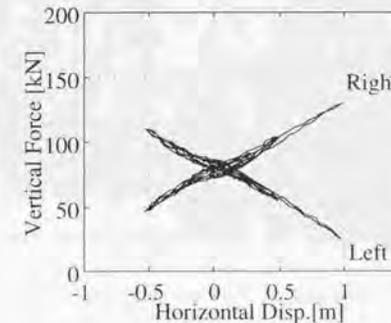


図 2-9 基本モデルの脚部の鉛直軸力

軸力 196kN (20tonf) についても同様の実験を行い、変形能力が 120cm あることを確認している。また、この時の鉛直沈み込み量は 29mm であった。

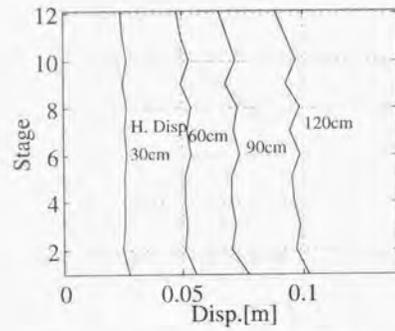


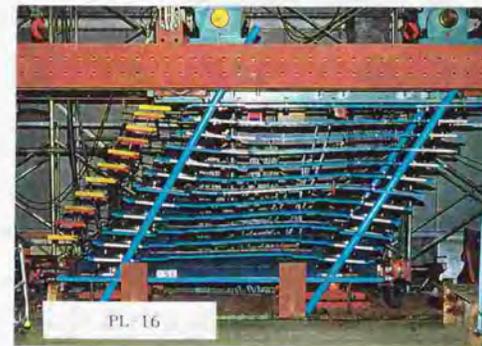
図 2-10 層間変位 (基本モデル)



(a) 基本モデル (Pv=156.8kN, H. Disp=120cm)



(b) PL-22 (Pv=156.8kN, H. Disp=120cm)



(c) PL-16 (Pv=156.8kN, H. Disp=90cm)

図 2-11 多段積層ゴムの変形状態

2・4・2 安定板の効果

(1) 安定板の剛性と変形特性

ここでは、安定板の効果に着目して、安定板の剛性の違いによる多段積層ゴムの変形状について安定板のひずみ測定結果も加えて示す。

図 2-12 と図 2-13 は、軸力 156.8kN、水平変形 50cm 時の水平変位—脚部水平反力、水平変位—鉛直変位の関係をそれぞれ 3 ケースの安定板について示したものである。基本モデル、PL-22、PL-16 と安定板の剛性が低下するにつれ、多段積層ゴムの水平方向剛性は少しづつ低くなり、鉛直方向の沈み込み量も大きくなる傾向が認められる。特に PL-16 の安定板では、水平変位 50cm で約 20mm 程度の鉛直変位となっており、同一軸力の基本モデルの水平変位 100cm における値とほぼ等しい。

図 2-14 は、50cm 変形時の安定板上端の中心線に沿ったひずみを PL-22 と PL-16 について示したものである。これによると、ひずみは各段で一様ではなく、引張り応力側では、6 段目（中段）が一番大きく、1 段目（下段）、11 段目（上段）の順に小さくなっている。また、PL-16 の方が PL-22 よりも中段の値がかなり大きい値になっている。これは、多段積層ゴムが水平変形する際、安定板の剛性が十分でなく、要素積層ゴムの回転を許容し積層ゴム部に曲げ変形生じ安定板が強制変形を受けていると推定される。特に、PL-16 では、安定板のひずみが、軸力 158.8kN、水平変位 50cm で 1000×10^{-6} 程度になっており、水平変位 1m で安定板が塑性変形してしまう可能性がある。

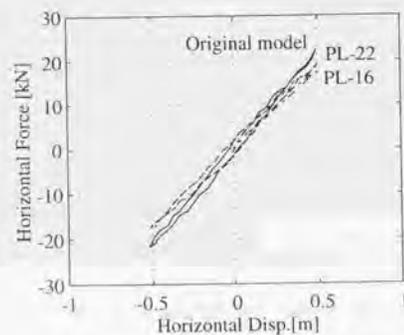


図 2-12 水平復元力特性

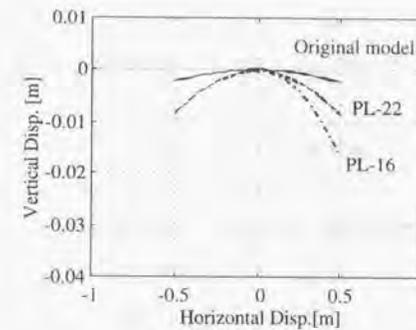


図 2-13 鉛直変位特性

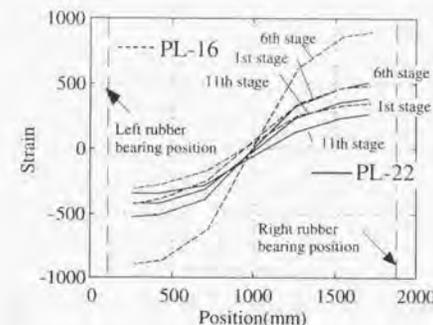


図 2-14 安定板上のひずみ分布

(2) 大変形挙動

鉛直軸力 156.8kN (16tonf)、水平変位 120cm までの大変形時の水平および鉛直方向の変形挙動をそれぞれ図 2-15、図 2-16 に示す。なお、PL-16 の場合には、90cm 変形時に鉛直方向沈み込み量が漸増状態になり荷重保持能力を失ったため、この時点で除荷している。復元力も水平変位 80cm 前後で荷重上昇がなくなっている。また、同じ要素積層ゴムを使用しているにも関わらず、水平剛性は基本モデルの 6 割程度に低減している。さらに、除荷時の荷重レベルは荷重増加時に比較してかなり小さくなっており、荷重変形曲線を囲む面積、いわゆるループ面積が非常に大きくなっている。

など、安定性を欠いた変形状態となっている。

PL-22では、基本モデルと同様に+120cmまで加力することができたが基本モデルと比較して剛性は低下している。また、除荷時の履歴面積も比較的大きくなるなど、やや安定性を欠いた状態となっている。

一方、鉛直方向の沈み込み量は安定板の剛性が低いものほど大きな値となっている。なお、安定板のひずみから、PL-16の場合には90cm変形時には安定板はほぼ塑性化しており、それ以上の変形増加に対し各段の回転拘束効果が頭打ちになっていると考えられる。図2-17はPL-16の場合の各段の層間変位分布を示すが、基本モデルより中間部の変形が大きくなり、水平変形にともなう要素積層ゴムの変形がせん断変形が支配的であったものから曲げ変形が支配的になったことを示すものである。図2-11(b)、(c)にPL-22とPL-16の場合の実験時の最大変位における変形状態の写真を示す。

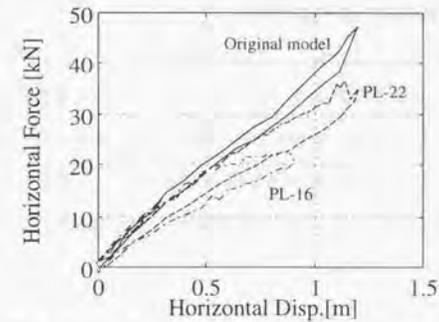


図2-15 水平復元力におよぼす安定板の影響

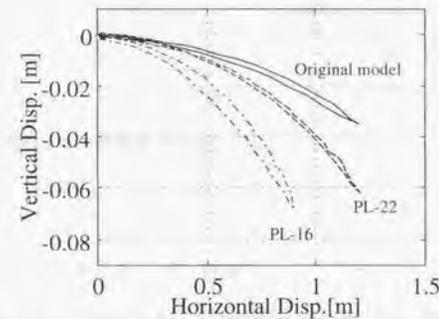


図2-16 鉛直変位特性におよぼす安定板の影響

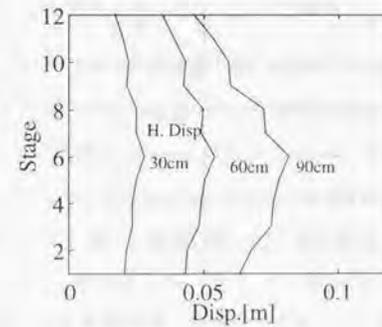


図2-17 層間変位 (PL-16)

2・4・3 安定板と要素積層ゴムの曲げ剛性

基本モデルは、水平変位 120cm まで、層間変位が均一で安定板の剛性が要素積層ゴムの回転を拘束し、水平変位にともなう変形をほぼせん断変形のみにするに十分であったと考えられる。それに対し、PL-22 の場合と PL-16 の場合には、安定板の剛性が十分でなく、要素積層ゴムの回転を拘束する効果が小さかったと推定される。これらの傾向を示す指標として、安定板と要素積層ゴムの曲げ剛性を比較して、表 2-1 に示す。

表 2-1 曲げ剛性

		Second moment of Area (m^4)	Bending stiffness (kNm^2)	Span (m)
Stabilizing plate	Original Model	331×10^{-8}	681	1.8
	PL-22	22.2×10^{-8}	45.6	
	PL-16	8.73×10^{-8}	17.6	
Element (rubber bearing)		6397×10^{-8}	28.2	0.058

基本モデルの安定板の曲げ剛性は $681kNm^2$ で要素積層ゴムのそれは $28.2kNm^2$ である。したがって、これらを各スパンで除したものを剛度 κ と定義すれば（構造力学においては、剛度 K は $\frac{1}{l}$ で定義されているが、多段積層ゴムの場合は、材質が要素積層ゴムと安定板とで異なるために、曲げ剛性をスパンで除したものを剛度と定義する）。基本モデルの安定板の剛度 K_{orig} は $387.3kNm$ 、要素積層ゴムの剛度 K は $486.2kNm$ となる。一方、PL-22 と PL-16 の曲げ剛性はそれぞれ $45.6kNm^2$ 、 $17.6kNm^2$ であり、剛度は $25.3kNm$ 、 $9.78kNm$ である。

このように、安定板と要素積層ゴムの曲げ剛性を比較すると、基本モデルの安定板のそれは、要素積層ゴムの 24 倍大きく、PL-22 の安定板でも 1.6 倍となっているが、PL-16 では、0.62 倍であった。また、安定板と要素積層ゴムの剛度を比較すると、基本モデルの安定板のそれは、要素積層ゴムの 0.8 倍、PL-22 の安定板では 0.052 倍

PL-16 では、0.02 倍であった。この結果から、要素積層ゴムの曲げ剛性と剛度は、安定板と比較して、意外に大きいことがわかった。このことから、曲げモーメントを安定板のみではなく要素積層ゴムも負担していることが推定される。

なお、基本モデルの曲げ剛性は安定板の補強を考慮した中央点の値を、要素積層ゴムのスパンはゴム部の総高さ（ゴム板厚み×層数）を示した。また、要素積層ゴムの曲げに対する弾性係数 E_b' は第 1 章に示したように、 $E_b' = \frac{E_b \cdot E_0}{E_b + E_0}$ で求めることができる。ここで、 E_0 はゴム材料の体積弾性係数、 $E_b = E_0(1 + \frac{2}{3}\kappa S_1^2)$ 、 E_0 は縦弾性係数、 κ はゴム硬度により決まる定数、 S_1 は 1 次形状係数で $S_1 = \frac{d_r}{4t}$ であたえられる。なお、

d_r は要素積層ゴムの直径、 t はゴム板一枚あたりの厚みである。

本要素積層ゴムの場合、上式に天然系低減衰ゴム（ゴム硬度 IRHD= 40）の値 $E_0 = 1.18GPa$ 、 $E_b = 2.24MPa$ 、 $\kappa = 0.85$ を代入すると、 $E_b' = 0.44GPa$ となる。

2・4・4 定変位制御と定荷重制御の比較

ここでは、鉛直軸力を加える左右 2 台のアクチュエータの軸力を等しくした場合（定軸力制御）と多段積層ゴムの頂部加力はりを水平に保つように鉛直軸力を加えた場合（定変位制御）とを比較して示す。対象としたのは PL-22 の場合であり、水平方向荷重-変位関係を図 2-18 に、左右の脚部の軸力変動を図 2-19 にそれぞれ示す。

これらより、定荷重制御すなわち回転を拘束しない場合のほうが多段積層ゴムの水平剛性がやや低くなる傾向が確認された。また、定軸力制御の場合、左右の脚部の軸力変動は水平変形にともなって直線的に変化しており定変位制御の場合より極端に大きくなっている。このことは、制振装置に多段積層ゴムを用いる場合、上部構造を十分剛に設計することによって多段積層ゴムの回転を拘束することが重要であることを示すものである。

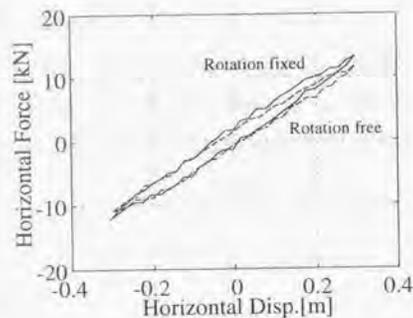


図 2-18 水平復元力の比較

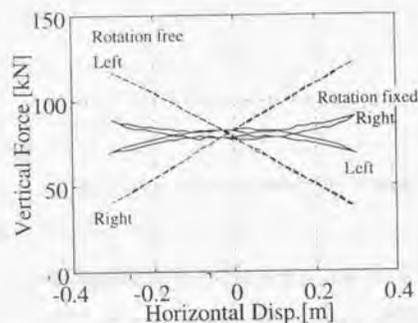


図 2-19 脚部反力の比較

2・5 結語

制振装置用大型多段積層ゴムの大変形加力実験より得られた知見をまとめると以下ようになる。

(1) 安定板の曲げ剛性を変化させた実験により、安定板の曲げ剛性が低下すると、安定板の曲げ変形が顕著となり要素積層ゴムの回転を拘束する効果が減少し、多段積層ゴムの水平方向の剛性が低下し、さらに、鉛直方向の沈み込み量も大きくなることを示した。基本モデル(PL-22 に溝形鋼で補強したもの) および PL-22 のモデルでは、定格軸力 156.8kN (16tonf) で設計変位 1m を十分確保できたのに対して、PL-16 モデルでは約 0.9m で不安定(水平復元力が頭打ちになる傾向)が生じた。

(2) また、加力方法を違えた実験により、安定板の曲げ剛性が十分高い値であっても、多段積層ゴム上部の回転を許容すると、水平方向の剛性が低下することが確認された。さらに、積層ゴム下端の要素積層ゴムに作用する軸力も上端の回転を許容すると水平変位の増加にともない極端に変化することが示された。多段積層ゴムの要素積層ゴムに引張荷重が生じないことを、設計条件とすれば、許容変位が極端に小さくなることがわかった。

(3) 本多段積層ゴムのフレームモデルの場合(スパン 1800mm)、支持荷重 196kN (20tf)、水平変位 1.2m の性能を得るためには、安定板の曲げ剛性として、最低限度として、PL-22 モデルの 45.6kNm²程度を、できれば基本モデルの 681kNm²程度必要であることがわかった。この値は、基本モデルで要素積層ゴムの曲げ剛性の 24 倍、PL-22 の安定板でも 1.6 倍となっていた。

(4) 基本モデルの安定板を用いた多段積層ゴムでは、各段の層間変位は、いずれもほぼ等しかったことより多段積層ゴムの水平剛性は、要素積層ゴムの水平剛性から式(1-20)で求めることが可能である。この場合、安定板の曲げ剛性は、要素積層ゴムと比較して数 10 倍の大きさが必要となる。ただし、安定板の曲げ剛性の要求値は、設計軸力、設計変位、スパンなどに影響を受け、本例の場合はこのような結果となったが、より一般化するには、要素積層ゴムの力学特性と安定板の剛性から多段積層ゴムの復元力特性を解析的に求める手法が望まれる。これらについては、次章以降で述べる。

第2章の参考文献

- (2-1) 浮田高志・辻英一・山浦晋弘・稲田泰夫・小川雄一郎・前林和彦, 大阪弁天町 ORC200 シンボルタワーの制振装置(その1) 建物概要と目標性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸) B, 1992, 953-954.
- (2-2) 稲田泰夫・田村和夫・三田彰・柴慶治・辻英一・浮田高志, 大阪弁天町 ORC200 シンボルタワーの制振装置(その2) 制振システムの概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸) B, 1992, 955-956.
- (2-3) 田村和夫・柴慶治・稲田泰夫・小川雄一郎・前林和彦・山浦晋弘, 大阪弁天町 ORC200 シンボルタワーの制振装置(その3) 制振装置振動実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) B, 1993, 803-804.
- (2-4) 柴慶治・田村和夫・稲田泰夫・来田義弘・岡田敬一・辻英一・浮田高志, 大阪弁天町 ORC200 シンボルタワーの制振装置(その4) 制振効果確認試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) B, 1993, 805-806.
- (2-5) 小川雄一郎・田村和夫・柴慶治・辻英一・浮田高志・稲田泰夫, 大阪弁天町 ORC200 シンボルタワーの制振装置(その5) 強風時応答観測, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海) B, 1994, 959-960.
- (2-6) 柴慶治・田村和夫・深井日出男・前林和彦・辻英一・稲田泰夫, 大阪弁天町 ORC200 シンボルタワーの制振装置(その6) 地震応答観測, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海) B, 1994, 961-962.
- (2-7) 黒木健実・太田俊昭, 構造力学, 1981, 森北出版, 134-163.

第3章 要素積層ゴムの力学特性

3.1 緒言

第2章の多段積層ゴムの復元力特性では, 多段積層ゴムの水平復元力特性におよぼす安定板の効果について実験的に検討し, 安定板の曲げ剛性が小さい場合, 水平復元力特性が低下するほか, 水平変位にともなう鉛直変位も極端に大きくなることを確認した. この現象は, 安定板の要素積層ゴムの回転を拘束する効果が低下したためと推定できるが, これらのメカニズムについては詳細に検討された例はない.

そこで, 本章では, このような多段積層ゴムの復元力特性を把握するために, 構成部材である要素積層ゴムの復元力特性を把握し, 復元力特性の低下および鉛直変位の増大のメカニズム解明を試みることにする.

積層ゴムの復元力特性および変形能力に関しては, すでに多くの理論的・実験的検討がなされている^{(3-1)~(3-3)}. また, 積層ゴムの水平復元力におよぼす鉛直軸力の影響について Haringx をはじめ多くの研究がなされている^{(3-4)~(3-6)}. 水平剛性が鉛直軸力の増加とともに低下していく現象は, 軸力依存性としてよく知られている. この軸力依存性は, 積層ゴムの形状に大きく依存し, 積層ゴムの直径/ゴム部高さの比率(2次形状係数 S_2) が小さくなると, すなわち積層ゴム形状がよりスレンダになるとより顕著になる^{(3-7)~(3-9)}.

一方, 従来積層ゴムは使用目的(おもに建築用免震装置)から, 水平復元力は回転が拘束された状態で測定されている. このような状態で測定された復元力特性は, 上部・下部構造が十分剛である場合には有効であるが, 多段積層ゴムのように, 回転が必ずしも拘束されない場合は, 積層ゴムの水平復元力特性におよぼす回転拘束度の影響を考慮しなければならない.

そこで, ここでは積層ゴムの水平復元力におよぼす鉛直軸力依存性および回転拘束度の影響について, 実験的および理論的に検討する.

鉛直軸力依存性に関する実験では, 多段積層ゴムの使用条件を考慮し, 1次形状係数と2次形状係数の異なる要素積層ゴムを用意し, 種々の鉛直軸力下の水平復元力特性から, せん断弾性係数と損失係数を測定している. また, 理論解析として積層ゴムの曲げせん断はりとは仮定し, 水平剛性の軸力依存性の1次形状係数と2次形状係数の

影響を検討している。

回転拘束度の影響を調べるための実験では、新たに開発された二軸偏心試験装置を用いた。この試験装置を用いることにより、要素積層ゴムに水平・鉛直・回転の変位を同時に付与することができる。実験では、回転を完全に拘束した状態や回転を完全に自由にした状態、およびこれら中間の状態を作りだし、多段積層ゴムに組み込まれた要素積層ゴムの変形状態を模擬することを試みている。

また、回転拘束度の水平剛性におよぼす影響について、同じく、飯塚による曲げせん断はりの理論から、回転角が生じることより水平剛性が低下することを確認している。

3・2 水平復元力の軸力依存性

3・2・1 実験の概要

(1) 試験体

試験体としては従来あまり検討されていなかった比較的にスレンダーな形状とし、図3-1に示す1次形状係数 ($S_1=20, 25, 30$) および2次形状係数 ($S_2=2.5, 3.0, 3.5$) の異なった9種類 (試験体番号A~D) の積層ゴムを製作した。表3-1に試験体のおもな寸法を示す。なお、1次形状係数と2次形状係数の定義を改めて、式(3-1)、(3-2)に示す。

$$S_1 = d_r / (4 \cdot t_r) \quad (3-1)$$

$$S_2 = d_r / (n \cdot t_r) \quad (3-2)$$

ここで、 d_r は積層ゴムの直径、 t_r はゴム板1枚あたりの厚みおよび n はゴム板の枚数である。

試験体に用いた積層ゴムのゴム材料の主な機械的性質は以下のとおりである。

$$\text{硬度 (IRHD)} = 40, \quad \epsilon_b = 6.6$$

$$G = 0.57 \text{ MPa}, \quad E_0 = 2.24 \text{ MPa}$$

ここで、 ϵ_b は引張破断ひずみである。

実験では、従来一般的に積層ゴムの特性評価としておこなわれてきた、回転を拘束した圧縮せん断試験をおこない、おもに水平剛性の軸力依存性に着目し評価した。

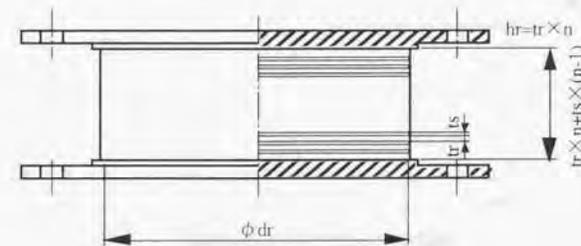


図3-1 要素積層ゴム

表 3-1 要素積層ゴムの主な仕様

Test Piece No.	A	B	C	D	E	F	G	H	I
dr:Diameter of rubber sheet(mm)	60								
tr:Thickness of rubber sheet(mm)	0.5	0.6	0.75	0.5	0.6	0.75	0.5	0.6	0.75
n:Number of rubber sheet	48	40	32	48	40	32	48	40	32
hr:Total height of rubber sheets(mm)	24			20			17		
S ₁	30	25	20	30	25	20	30	25	20
S ₂	2.5			3.0			3.5		

(2) 二軸試験装置と実験方法

実験に用いた二軸試験装置を図 3-2 に示す。本装置は、水平方向に 1 本、鉛直方向に 1 本の油圧アクチュエータを有し、積層ゴムに鉛直荷重（軸力）を載荷し、回転を拘束した状態でせん断変形をあたえ、水平復元力特性を評価できるようになっている。実験では、上述の装置に表 3-1 に示した試験体の積層ゴムを取り付け、ゴム部のせん断ひずみが各々 25%、50%、75%、100%、150% および 200% に相当する振幅の水平変位を鉛直荷重を載荷した状態のまま一定周期（10 秒）で 3 サイクルあたえ水平復元力と水平変位を計測した。積層ゴムの水平ばね定数 K_H と損失係数 $\tan \delta$ は図 3-3 に示すような各変位振幅における最終サイクルの水平復元力-変位曲線から式(3-3)と(3-4)より算出した。

$$K_H = F_m / X_m \quad (3-3)$$

$$\tan \delta = \Delta W / (\pi \cdot W) \quad (3-4)$$

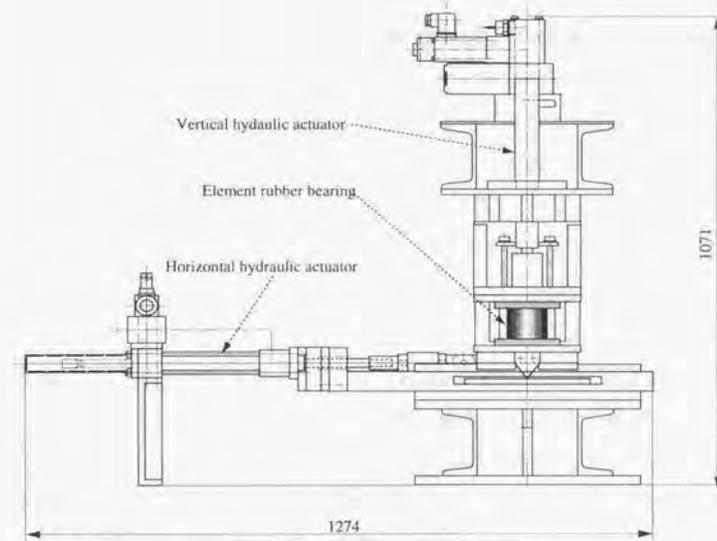


図 3-2 回転拘束型積層ゴム試験装置

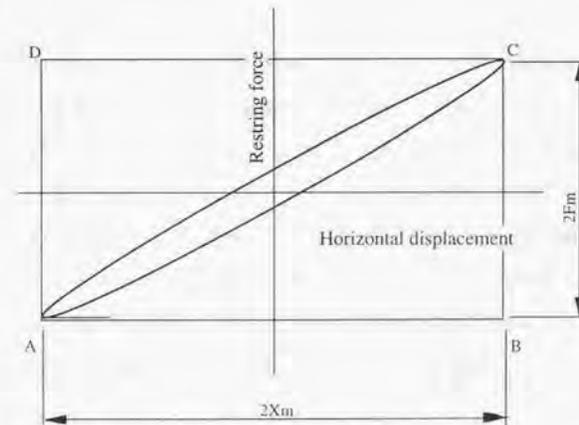


図 3-3 積層ゴムの水平復元力の履歴ループ

ここで、 ΔW 、 W はそれぞれ積層ゴムが描く履歴ループの面積と最大変位 X_m と最大変位点の荷重 F_m で規定される四角形の面積（図中の ABCD）である。なお、損失係数 $\tan \delta$ と等価減衰比 h_{eq} との間には $\tan \delta = 2h_{eq}$ の関係がある。

3・2・2 実験結果

図 3-4(a)~(c)では、各試験体ごとに実験から計測された各せん断ひずみにおける水平ばね定数 K_H より積層ゴムの見かけのせん断弾性係数 G (MPa) を求め、軸力をパラメータに示した。なお、軸力も積層ゴムの断面積で除し面圧に換算している。また、図 3-5(a)~(c)には実験から計測された各せん断ひずみにおける損失係数を、図 3-4(a)~(c)と同様に面圧をパラメータに示した。本実験における軸力（面圧で 0.98MPa から 7.84MPa）の範囲で求められたせん断弾性係数と損失係数は、あきらかに 1 次形状係数 (S_1) と 2 次形状係数 (S_2) に依存することが確認された。せん断弾性係数は、2 次形状係数が 2.5, 3.0, 3.5 と大きくなるにつれてばらつきが小さくなっていくことが認められる。すなわち、2 次形状係数が大きくなるほど積層ゴムの水平剛性におよぼす軸力の影響は小さくなる。また、せん断弾性係数におよぼす 1 次形状係数の影響については、2 次形状係数が小さいほど影響が顕著になることが確認された。本実験では、積層ゴムの 2 次形状係数が 3.5 以上あるいは 2 次形状係数が 3.0 以上かつ 1 次形状係数が 25 以上であれば、面圧換算の軸力で 0.98MPa から 7.84MPa、かつゴムせん断ひずみ 200%に相当するせん断変位の範囲においてせん断弾性係数の軸力依存性はほぼ無視しうることが確認された。

損失係数についても、せん断弾性係数とほぼ同様な傾向が認められる。すなわち、損失係数は 2 次形状係数が 2.5, 3.0, 3.5 と大きくなるにつれてばらつきが縮小し、積層ゴムの損失係数におよぼす軸力の影響は小さくなる。また、損失係数におよぼす 1 次形状係数の影響についてもせん断弾性係数の場合と同様に、2 次形状係数が小さいほど影響が顕著になることがわかった。また、損失係数はせん断弾性係数より軸力依存性が大きく現れる傾向が認められる。これは、図 3-3 に示したように損失係数がせん断弾性係数と履歴ループの面積によって決まり、この両者ともに軸力の影響を受けるためと考えられる。つまり、軸力の増大にともなって、せん断弾性係数は低下し、ループ面積の面積は増加するからである。なお、ループ面積の軸力の増大にともなう増加の機構としては、積層ゴムのせん断変形にともなう鉛直変位の増加によるものとの説明がある^{(3-5),(3-6)}。

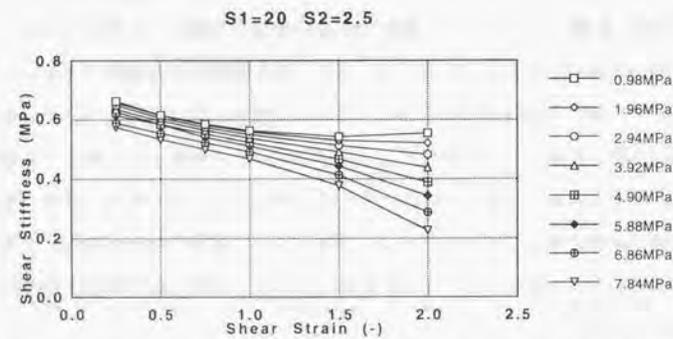
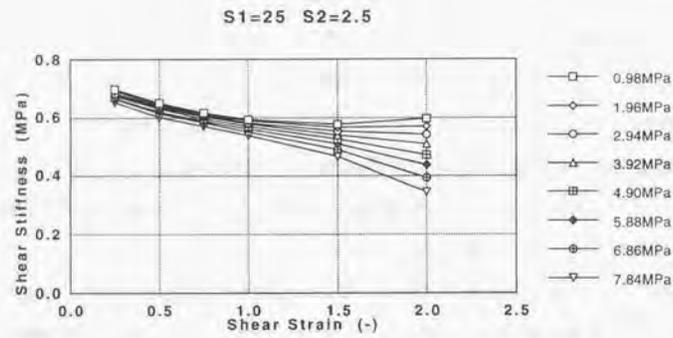
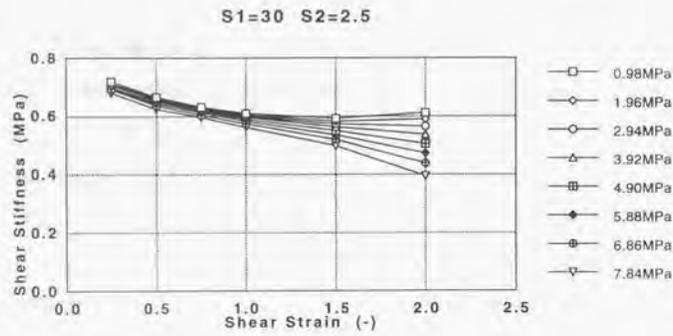


図 3-4(a) 種々の軸力下における要素積層ゴムの見掛けのせん断弾性係数($S_2=2.5$)

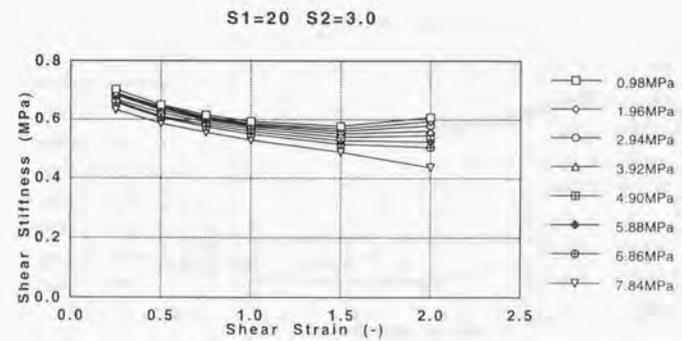
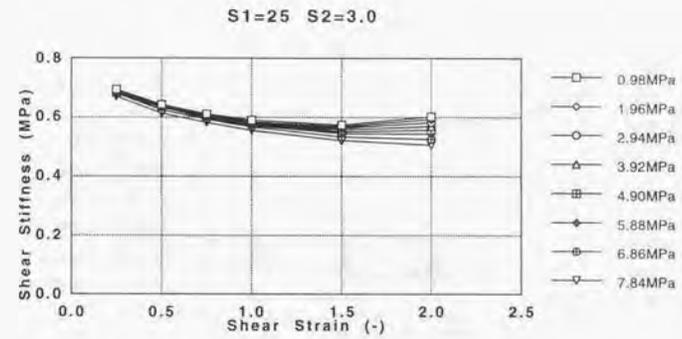
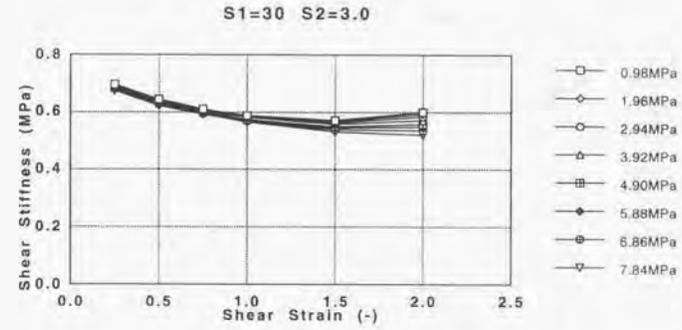


図 3-4(b) 種々の軸力下における要素積層ゴムの見掛けのせん断弾性係数($S_2=3.0$)

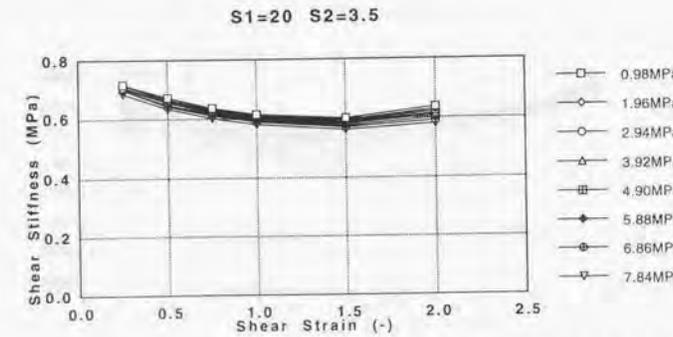
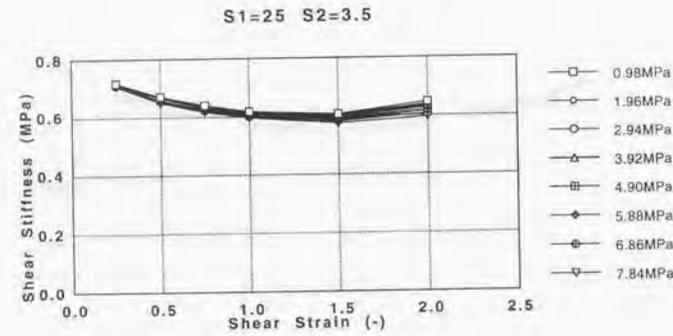
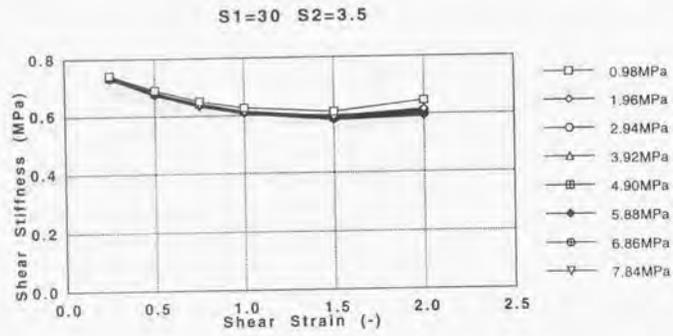


図 3-4(c) 種々の軸力下における要素積層ゴムの見掛けのせん断弾性係数($S_2=3.5$)

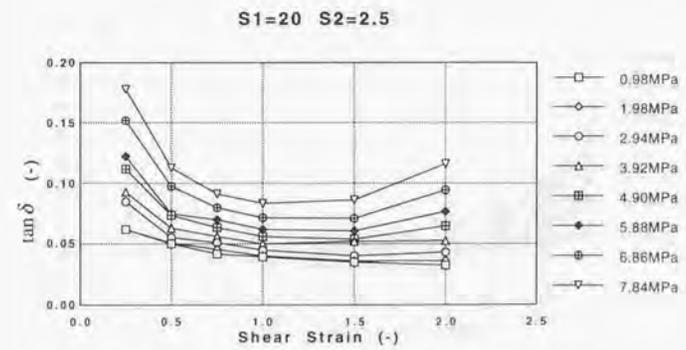
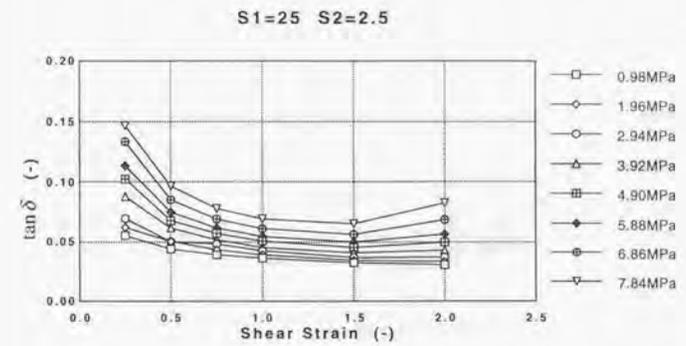
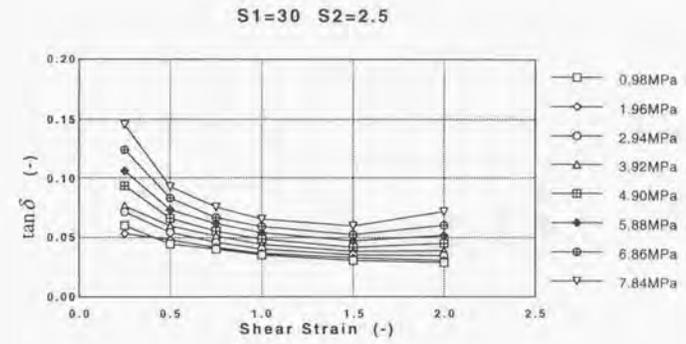


図 3-5(a) 種々の軸力下における要素積層ゴムの損失係数($S_2=2.5$)

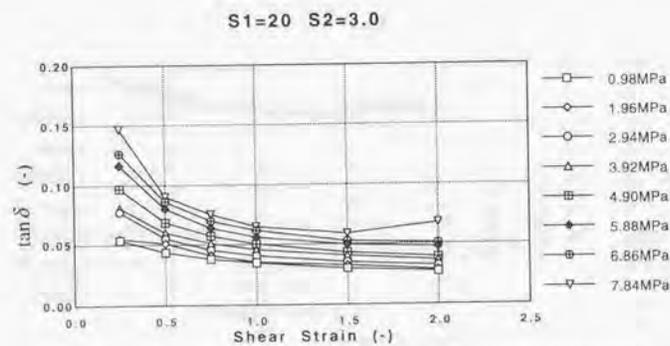
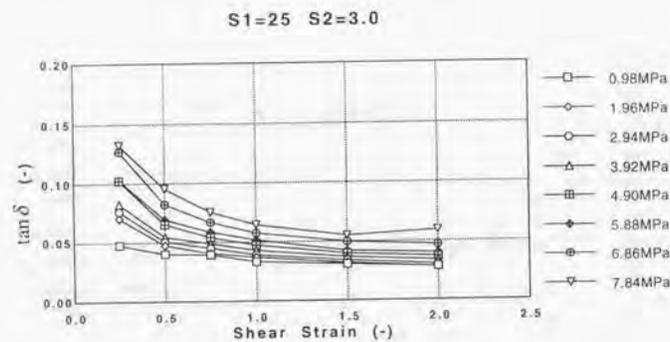
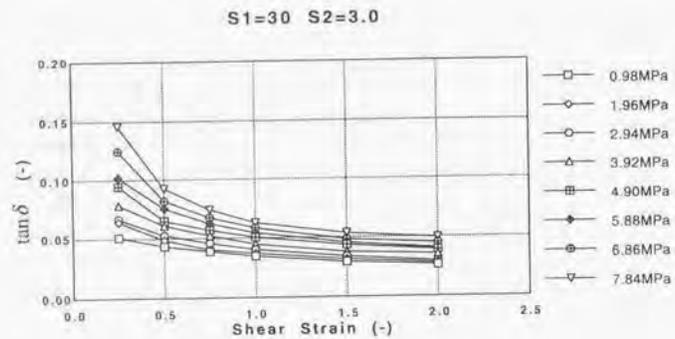


図 3-5(b) 種々の軸力下における要素積層ゴムの損失係数($S_2=3.0$)

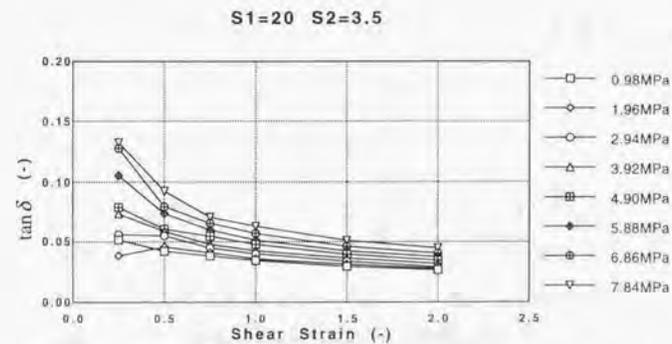
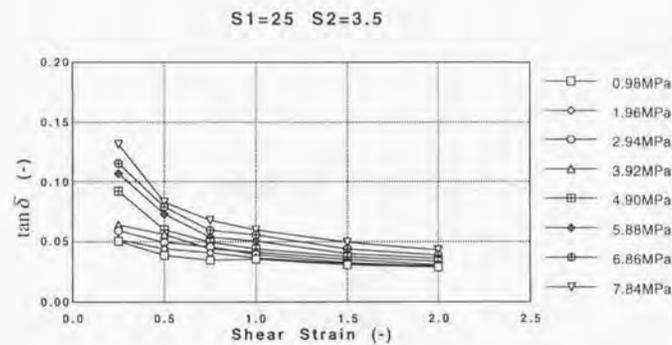
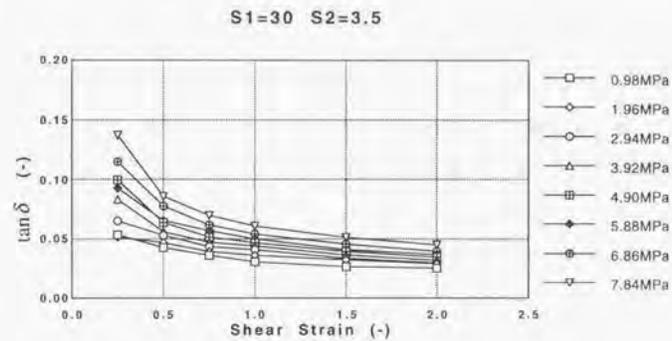


図 3-5(c) 種々の軸力下における要素積層ゴムの損失係数($S_2=3.5$)

3・3 軸力依存性の理論的検討

積層ゴムの水平剛性の軸力依存性は、曲げせん断座屈理論に基づき解析的に導くことができる。ここでは、Haringx の理論を基にした Stanton の論文に基づき積層ゴムの水平剛性の軸力依存性について検討する (3-10)。

図 3-6 の積層ゴム柱において、積層ゴムの水平変位 $v(z)$ と、積層ゴムの曲げ回転角 $\psi(z)$ およびせん断歪み $\gamma(z)$ は、

$$v' = \gamma + \psi \quad (3-5)$$

積層ゴム柱の中での力の釣り合いは、

$$S_b v'' - (P + S_s) \psi' = 0 \quad (3-6)$$

$$(P + S_s)(v' - \psi) + S_b \psi' = 0 \quad (3-7)$$

のようになる。

ここで、 S_b および S_s はそれぞれ、曲げおよびせん断剛性であり、 P は軸力である。式(3-6)、(3-7)は以下のように解ける。

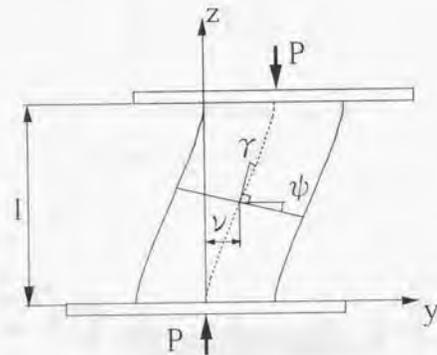


図 3-6 積層ゴム柱内の力の釣り合い

$$v = \frac{1}{q} (C_1 \cos qz + C_2 \sin qz + C_3 qz + C_4) \quad (3-8)$$

$$\psi = \xi (-C_1 \sin qz + C_2 \cos qz) + C_3 \quad (3-9)$$

ここで $q^2 = \frac{P}{\xi \cdot S_b}$ 、 $\xi = \frac{1}{1 + \frac{P}{S_s}}$ である。積分定数 $C_1 \sim C_4$ は境界条件より求めることができる。

両端の回転が拘束され軸方向に加力されている曲げせん断ばり柱の横方向の剛性 K_H は、式(3-8)と(3-9)に境界条件として、

$$z=0 \text{ において, } v=0 \quad (3-10)$$

$$z=l \text{ において, } \psi=0 \quad (3-11)$$

とすることより、以下のようになる。

$$K_H = \frac{P}{l} \left(\frac{\tan\left(\frac{ql}{2}\right)}{\frac{\xi ql}{2}} - 1 \right)^2 \quad (3-12)$$

P の値が小さいとき (すなわち $ql \ll 1$)、式(3-12)は以下のように簡単になる。

$$K_H = \frac{1}{\frac{l}{S_s} + \frac{l^3}{12S_b}} \quad (3-13)$$

積層ゴムに適用するために、連続体としての S_b と S_s をそれぞれ積層ゴムの平均の曲げ剛性とせん断剛性を用い書き直す。これらの剛性は一層のゴム板の特性から求めることができ、1層のゴム板と鋼板の1/2層2枚分からなるモジュールの厚みを有する層の剛性で見なすことにより修正を加えている。

$$S_s = GA_r \frac{t_r + t_s}{t_r} \quad (3-14)$$

$$S_b = E_b I \frac{t_r + t_s}{l_r} \quad (3-15)$$

ここで、 G はゴム板のせん断弾性係数、 A_r は積層ゴムの断面積、 t_r はゴム板1枚あたりの厚さ、 t_s は鋼板1枚あたりの厚さ、 E_b はゴム板の曲げに関する弾性係数および I は断面2次モーメントである。式(3-1)、(3-2)、(3-14)、(3-15)を用い、さらに $A_r = \pi d_r^2/4$ 、 $I = \pi d_r^4/64$ 、 $E_b = 2E_0 \kappa S_1^2/3$ 、 $E_0 = 3G$ 、に注目して式(3-13)を書き直すと以下ようになる。ここで、 d_r は積層ゴムの直径、 E_0 は縦弾性係数および κ はゴム硬度によって決まる定数である。

$$K_H = \frac{S_s}{l} \frac{1}{\frac{3}{2} \kappa S_1^2 S_2^2} \quad (3-16)$$

このように、積層ゴムの水平変形は式(3-13)でわかるようにゴムのせん断変形と曲げ変形の和としてあたえられる。また、式(3-16)で示されるように、積層ゴムの水平方向の剛性は1次形状係数と2次形状係数に依存し、1次形状係数と2次形状係数を大きくすることにより水平方向の剛性は曲げの影響が小さくなり、水平変形にともなう変形はもっぱらゴムのせん断変形となる。したがって、水平方向の剛性は軸力の影響を受けなくなる。

3・4 回転拘束度の影響

3・4・1 試験体

実験に用いた積層ゴムは、第2章で述べた制振装置用大型多段積層ゴムの要素積層ゴムに使用されたものである。積層ゴムは、ゴム直径190mm、ゴム厚さ2.0mmの天然ゴム系ゴムシートを厚み0.6mmの鋼板を介して29枚加硫接着し積層している。積層ゴムの1次形状係数(S_1)と2次形状係数(S_2)はそれぞれ23.75と3.28であり、通常の建物免震用積層ゴムより形状がややスレンダーである。また、細長比は1.22となっている。

3・4・2 実験の概要

回転拘束度の影響を調べるための実験に用いた二軸偏心試験装置の主な仕様と構造を図3-7に示す。本試験装置は、鉛直方向に2本と水平方向に1本のアクチュエータを備え、積層ゴムに軸変位、せん断変位ならびに回転変位を同時に与えることができる。

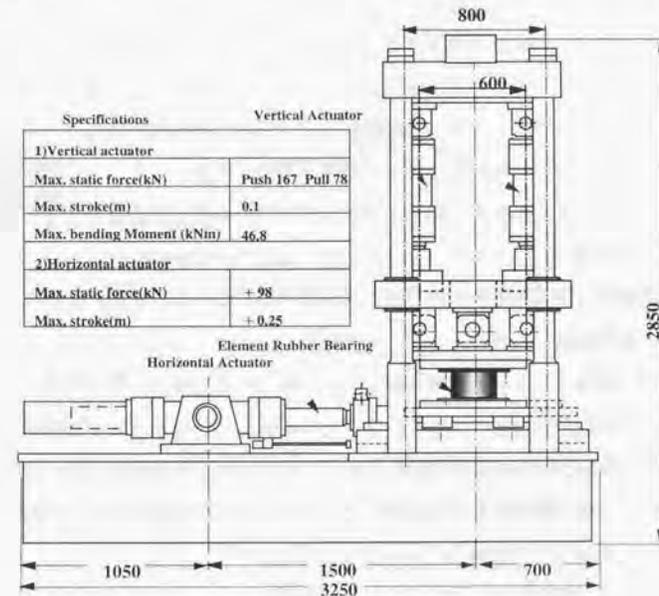


図3-7 積層ゴム二軸偏心試験装置

また、本装置の実施できる試験項目は表 3-2 のとおりである。

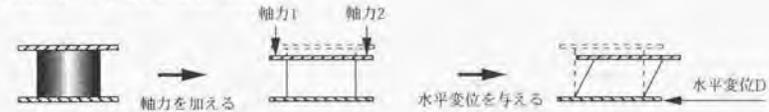
表 3-2 積層ゴム二軸偏心試験装置の試験モード

Test number	Control mode
Test 1	Shear with rotation restrained
Test 2	Shear with various bending moment
Test 3	Rotation with fixed shear displacement

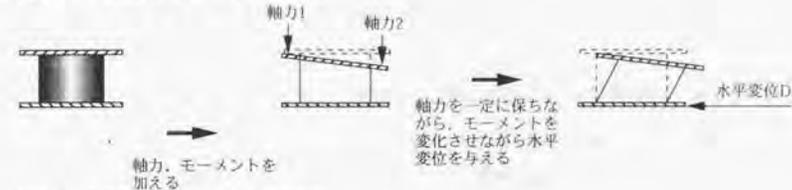
- 実験 1 は回転を拘束した状態で積層ゴムにせん断変形を加えるもので通常の二軸試験装置と同じ測定が可能である。積層ゴムの回転角を 0 に保ったまま、水平変形を加えると、左右の鉛直方向のアクチュエータの軸力は変化し荷重差が生じる。この荷重差とアクチュエータの取り付け間隔から、積層ゴムに作用する回転拘束モーメントを測定することができる。また、鉛直方向のアクチュエータの変位量から、水平変位-鉛直変位特性が求められ、要素積層ゴムの鉛直剛性の水平変位依存性も測定することができる。
- 実験 2 は積層ゴムの回転を拘束する曲げモーメントを、せん断変形にともなって変化させながら水平復元力特性などを測定できる。したがって、要素積層ゴムのように、せん断変形にともなって回転変形が生じる変形状態を模擬できる。なお、実験では、あらかじめ曲げモーメントを水平変位に関数として入力しておき、コントローラが、左右の鉛直方向のアクチュエータの荷重を変化させ任意の曲げモーメントを積層ゴムにあたえる。このとき、回転角は制御対象ではないので、結果として積層ゴムに回転角が生じる。したがって、安定板の回転拘束効果が小さい場合の要素積層ゴムの復元力特性を測定することができる。
- 実験 3 は、積層ゴムのせん断変形量を一定に保ったまま積層ゴムに曲げモーメントをあて回転角の変化を調べられる。この実験では、任意のせん断変位量における曲げモーメント-回転角関係を求めることができ、要素積層ゴムの曲げ剛性（厳密には、曲げ剛性は EI であるが、ここでは、 $M-\theta$ 関係の傾きで定義しており、 $\frac{EI}{l}$ に相当する）の水平変位依存性を測定することができる。この他に、水平荷重を測定することにより、回転角-水平荷重 ($F_s-\theta$) 関係も測定することが可能である。

なお、いずれの実験も常に軸力を一定に保持した状態でおこなっている（図 3-8 参照）。実験 1 では回転拘束モーメントを直接測定できることに、実験 2 では任意の曲げモーメントが作用したときの水平復元力特性を同じく測定できるところに、この二軸偏心試験装置の従来の積層ゴム二軸試験装置にはない特徴がある。

[実験1] 水平軸可変-回転角固定実験



[実験2] 水平軸可変-モーメント可変実験



[実験3] 水平軸固定-モーメント可変実験

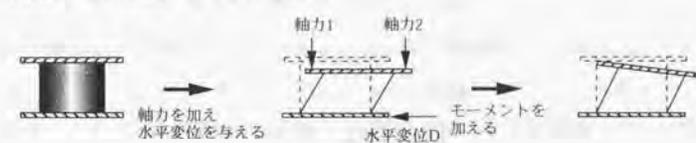


図 3-8 積層ゴム二軸偏心試験装置の実験による要素積層ゴムの変形

3.4.3 実験結果

(1) 予備実験

図 3-9 は通常の二軸加力試験装置を用いて測定された水平剛性の軸力依存性である。測定では、軸力は 27.8kN から 333kN（面圧換算で 0.98MPa から 11.76MPa）まで変化させた。また、ゴムのせん断ひずみは 25% から最大 200% まで 25% ぎみに復元力特性を求めた。3.2 の実験結果を裏付けるように本積層ゴムについても回転を拘束した状態では、実験をおこなった面圧 11.76MPa まで水平剛性の軸力依存性はないことが確認された。

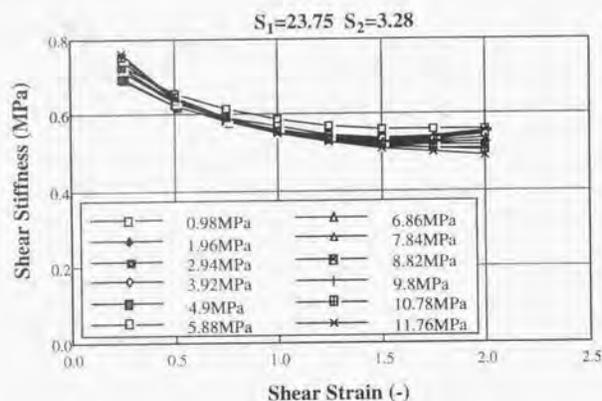


図 3-9 制振装置用大型多段積層ゴムに用いた要素積層ゴムの軸力依存性

(2) 水平復元力特性の軸力依存性

図 3-10 から 12 は回転を拘束した場合の積層ゴムの復元力特性、鉛直変位および回転拘束モーメントの二軸偏心試験装置で測定された結果である（実験 1）。実験では、ゴムせん断ひずみ 200%に相当する変位 116mm までの水平復元力を 4 ケースの鉛直軸力のもと測定した。鉛直軸力は 41kN, 83kN, 163kN および 244kN とし、多段積層ゴムの定格質量載荷時の軸力 83kN のそれぞれ 0.5, 1, 2 および 3 倍に相当する。本試験は、通常の積層ゴム試験に相当するもので、2 本の鉛直方向載荷用アクチュエータの荷重を調節することによって回転拘束のための曲げモーメントを加え、積層ゴムの上下フランジの回転を拘束し、試験中積層ゴムの上下のフランジの平行が保たれるようにしている。実験の範囲内の軸力では、予備実験で確認されたように水平復元力特性変化はほとんどない（図 3-10）。また、鉛直変位も軸力によって変化するがその変化量は微小である（図 3-11）。回転拘束のための曲げモーメントは 2 本の鉛直方向のアクチュエータの荷重差とアクチュエータの取り付け間隔より計算して求めた。曲げモーメントの測定結果は軸力とせん断変形の増加にともない大きくなる傾向が認められた（図 3-12）。

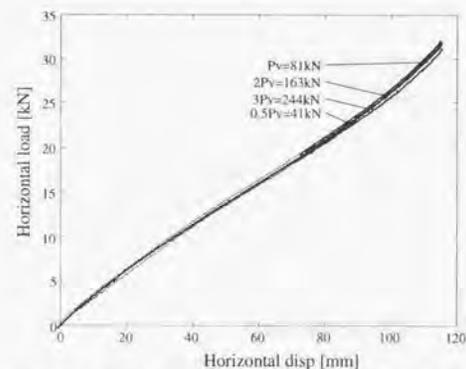


図 3-10 回転を拘束した場合の水平復元力特性

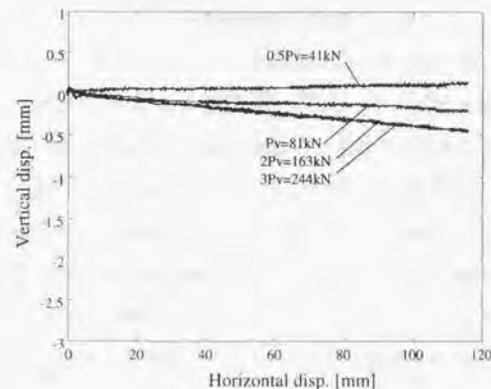


図 3-11 回転を拘束した場合の鉛直変位特性

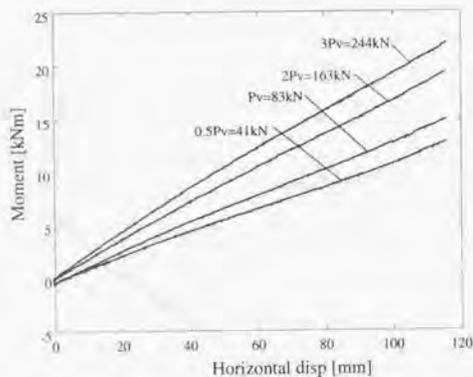


図 3-12 回転拘束曲げモーメント

(3) 水平復元力特性への回転拘束度の影響

図 3-13 から図 3-16 は、モーメント可変-水平変位可変実験 (実験 2) での測定結果 (水平復元力, 拘束モーメント, 沈み込み量, 回転角) で, 本実験の場合, 積層ゴムに多段積層ゴムの定格支持荷重に相当する軸力 (81kN) を一定に保持しながら, 図 3-13 に示すせん断変位に比例した曲げモーメントを加えた。

実験では, 先に述べた実験 1 で測定した回転拘束モーメントが作用した状態を拘束度 100% と定義し, 順次拘束度 (回転拘束モーメント) を減少させ水平復元力, 回転角および沈み込み量を測定した。定義より拘束度 0% は回転自由である (図 3-13)。

拘束度 100% すなわち回転を拘束した状態ではゴムせん断ひずみ 200% に相当する変位 116mm 付近で水平復元力が若干立ち上がる傾向があるのに対して, 拘束度が低下すると積層ゴムの水平復元力は順次低下することが確認された。なお, 拘束度が小さいとき水平変位の測定結果がせん断ひずみ 200% に相当する変位以内で終了しているのは, 鉛直アクチュエータのストロークがリミットに達したためである。また, この実験では拘束度 0%, せん断変位 0.05m 付近で水平復元力が極大値を取りそれ以上のせん断変位では復元力が減少するいわゆる座屈現象が発生することもわかった (図 3-14)。

さらに, 鉛直沈み込み量は拘束度が低下すると逆に非常に大きくなることも認められた (図 3-15)。

積層ゴムの回転角は, 鉛直沈み込み量と同じように拘束度を小さくすると大きくなり, さらに水平変位が大きくなると, 急激に増大することがわかった (図 3-16)。

図 3-17 に積層ゴムの変形状態を示す。

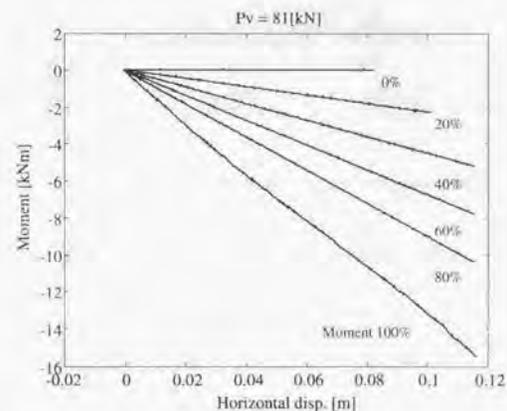


図 3-13 回転拘束度の定義

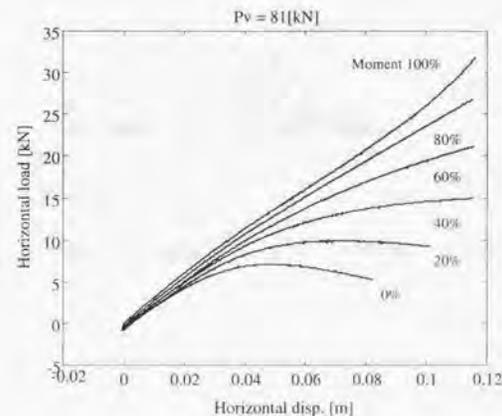


図 3-14 水平復元力特性への回転拘束度の影響

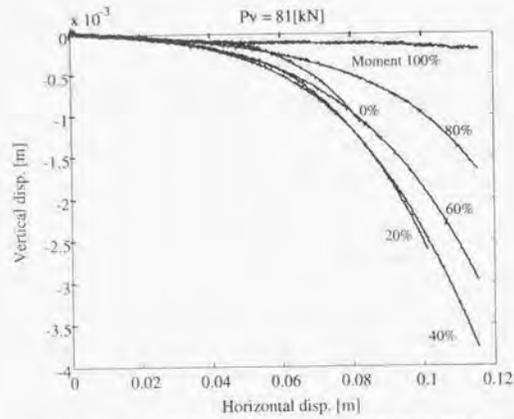


図 3-15 鉛直変位特性への回転拘束度の影響

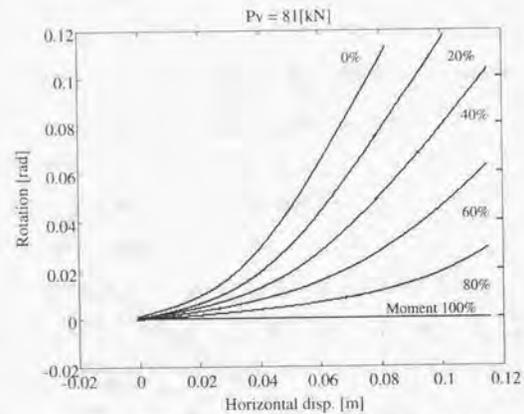


図 3-16 積層ゴムの回転角と回転拘束度の関係

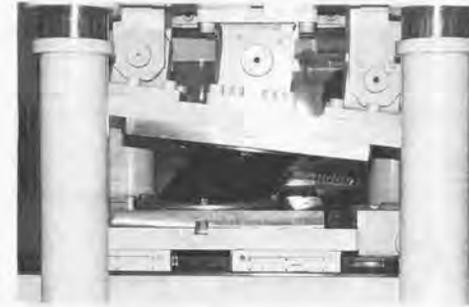


図 3-17 二軸偏心試験装置で実験中の要素積層ゴム

(4) 曲げ剛性

積層ゴムの曲げ剛性のせん断ひずみおよび軸力の影響を調べるための実験をおこなった(実験3)。曲げ剛性は実験からえられた各せん断ひずみにおける曲げモーメント-回転角線図(図3-18)より、回転角度0から0.01radまでの曲げモーメントの変化で定義した。

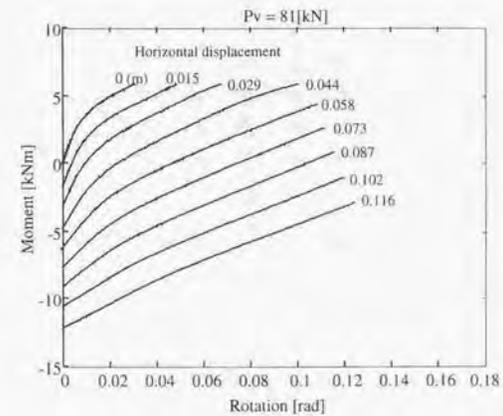


図 3-18 種々の水平変位下における曲げモーメントと回転角の関係

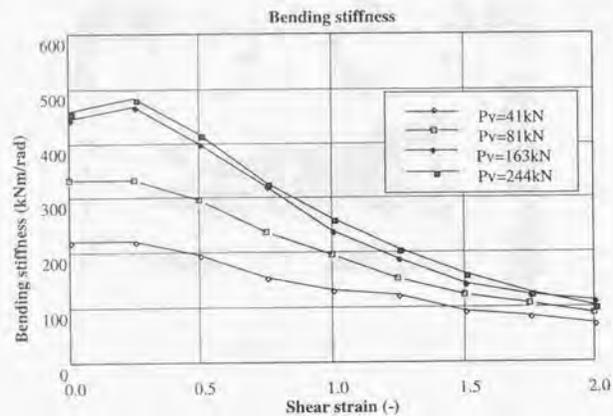


図 3-19 種々の軸力下の曲げ剛性のせん断ひずみ依存性

図 3-19 に曲げ剛性のせん断ひずみ依存性を、軸力をパラメータに示す。積層ゴムの曲げ剛性はせん断ひずみに大きく依存し、せん断ひずみの増加にともなって急速に低下することがわかった。さらに軸力が大きくなると曲げ剛性も大きくなることが確認された。

3・5 回転拘束の理論的検討

積層ゴムは回転すると、水平反力が小さくなる特性が実験的に確認された。この特徴は理論計算でも示すことができる。この計算は飯塚によって、Haringx の理論を用いてなされている⁽⁹⁻¹¹⁾。理論計算の出発点は、3・3の式(3-5)から(3-7)の方程式である。この方程式を図 3-20 に示すような境界条件のもとに解き剛性マトリックスの形式で書くと式(3-17)のようになる。

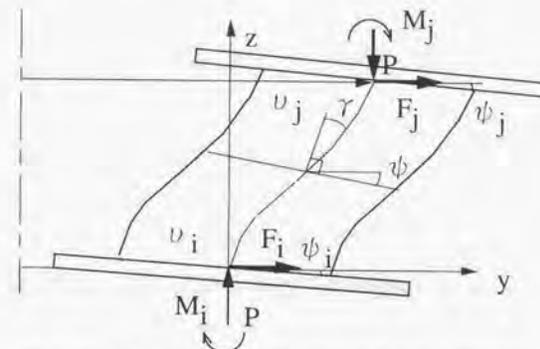


図 3-20 傾斜角を有する積層ゴム柱内の力の釣り合い

$$\begin{Bmatrix} F_i \\ M_i \\ F_j \\ M_j \end{Bmatrix} = K_H \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & -k_1 & k_2 \\ k_2 & k_3 & -k_2 & k_4 \\ -k_1 & -k_2 & k_1 & -k_2 \\ k_2 & -k_2 & -k_2 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_i \\ \psi_i \\ v_j \\ \psi_j \end{Bmatrix} \quad (3-17)$$

ここで、 K_H は式(3-6)で示される値をとり、 k_1 から k_4 は以下のようになる。

$$k_1 = 1$$

$$k_2 = -\frac{S_y q}{P} \tan \frac{ql}{2}$$

$$k_3 = \frac{S_y q}{K_H \tan ql} + \left(\frac{S_y q}{P} \tan \frac{ql}{2} \right)^2$$

$$k_4 = -\frac{S_2 q}{K_H \sin ql} + \left(\frac{S_2 q}{P} \tan \frac{ql}{2} \right)^2$$

したがって、積層ゴムの上端と下端に作用するせん断力の関係は、式(3-17)の剛性マトリックスの1行目から、

$$F_j = -F_i = K_H(v_j - v_i) - K_H \frac{S_2 q}{P} \tan \frac{ql}{2} (\psi_i + \psi_j) \quad (3-18)$$

となる。ここで、右辺第2項の端部回転角に関する係数が P が大きくなる時 $P/2$ で近似できる。

$$F_j = -F_i = K_H(v_j - v_i) - \frac{P}{2} (\psi_i + \psi_j) \quad (3-19)$$

式(3-19)において、積層ゴムの端部回転を拘束すれば式(3-20)のようになり式(3-12)と同じになる、

$$F_j = -F_i = K_H(v_j - v_i) \quad (3-20)$$

この式(3-19)からわかるように、積層ゴムの上端と下端に作用するせん断力 F_i と F_j は、積層ゴムの上端と下端の回転角が正であれば、回転角が大きくなるにしたがって減少していくことがわかる。

3・6 結語

多段積層ゴムに用いられる要素積層ゴムの水平剛性の軸力依存性と回転拘束度の影響について新たに開発された二軸偏心試験装置による加力実験と曲げせん断はり理論解析より検討した。結果をまとめると以下ようになる。

(1) 実験と理論解析より、積層ゴムの水平剛性の軸力依存性は、積層ゴムの1次形状係数 (S_1) と2次形状係数 (S_2) がそれぞれ影響し、1次形状係数と2次形状係数がともに大きくなるほど軸力依存性が小さくなることが確認された。今回実験した範囲 ($S_1=20\sim30$ と $S_2=2.5\sim3.5$) では、面圧 $0.98\sim7.84\text{MPa}$ で、 $S_1=25$ かつ $S_2=3.0$ 以上では軸力依存性はほとんど認められなかった。したがって、多段積層ゴムに用いる要素積層ゴムは、 $S_1=25$ かつ $S_2=3.0$ 以上であることが望ましい。この条件で、要素積層ゴムの形状と多段積層ゴムの段数を決定すれば、要素積層ゴムの軸力依存性は無視でき設計が容易になる。

(2) 積層ゴムの回転による水平剛性の影響を把握するため、二軸偏心試験装置を開発し、積層ゴムの回転を拘束する曲げモーメントを直接測定し、この曲げモーメントを回転拘束度100%と定義し、回転拘束度を減少させ水平剛性の変化を測定した。実験から水平剛性への回転拘束度の影響では、軸力依存性の少ない積層ゴム(1次形状係数と2次形状係数がともに大きい)でも、拘束度が低下すると積層ゴムに曲げによる回転が発生し、水平剛性が急激に低下していくことがわかった。さらに、理論解析により回転によって水平剛性が低下していくことを示した。したがって、多段積層ゴムに用いる要素積層ゴムが、 $S_1=25$ かつ $S_2=3.0$ 以上の条件を満たしても、回転拘束度が低下すれば、水平復元力が低下するのでこの効果を考慮する必要があることが認められた。

(3) このことは、第2章で示したように、多段積層ゴムの水平剛性が安定板の曲げ剛性を小さくすると急激に低下する現象を説明すると考える。また、要素積層ゴムの水平剛性の軸力依存性を小さくしても、多段積層ゴムの安定板の曲げ剛性が十分大きくないと要素積層ゴムの回転を拘束することができず多段積層ゴム自体の軸力依存性を大きくしてしまう可能性が実験および解析から示された。

第3章の参考文献

- (3-1) 藤田隆史・藤田聡・鈴木重信・芳沢利和, 建物免震用の積層ゴムに関する実験的研究(第1報, 50トン用積層ゴムの静的加力実験), 機論, 53-845, C(1987), 71-76.
- (3-2) 藤田隆史・藤田聡・鈴木重信・芳沢利和, 建物免震用の積層ゴムに関する実験的研究(第2報, 100トン用積層ゴムの静的加力実験), 機論, 53-845, C(1987), 77-81.
- (3-3) 藤田隆史・藤田聡・鈴木重信・芳沢利和, 建物免震用の積層ゴムに関する実験的研究(第3報, 100トン用積層ゴムの破断実験), 機論, 54-507, C(1988), 2618-2623.
- (3-4) Haringx, L.R., On highly compressive helical springs and rubber rods, and their application for vibration-free mountings, Phillips Res. Report, Part 1-3.
- (3-5) Thomas, A.G., The design of laminated bearing 1, Proc. of the Conference on NR for Earthquake Protection of buildings, (1982), 229-246.
- (3-6) Derham, C. J., The design of laminated bearing 2, Proc. of the Conference on NR for Earthquake Protection of buildings, (1982), 247-257.
- (3-7) 多田英夫・酒井章・高山峯夫・安藤勝利, 免震構造に関する実物実験(その10) 実施構造物の Isolator, 日本建築学会大会講演梗概集, (1986), 817-718.
- (3-8) 八坂厚彦・水越薫・飯塚真臣・高林勝人, 形状係数をパラメータとした積層ゴムの限界特性(その1 復元力特性), 日本建築学会大会講演梗概集, (1991), 599-600.
- (3-9) 八坂厚彦・水越薫・飯塚真臣・高林勝人, 形状係数をパラメータとした積層ゴムの限界特性(その2 限界特性), 日本建築学会大会講演梗概集, (1991), 601-602.
- (3-10) Stanton, J.F., Stability of laminated elastomeric bearings, Journal of Engineering Mechanics, Vol.116, No.6, June, 1990, 1351-1370.
- (3-11) 飯塚真臣, 積層ゴムの剛性マトリックス(Haringx理論による定式化), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), B(1995), 619-620.

第4章 多段積層ゴムの剛性解析

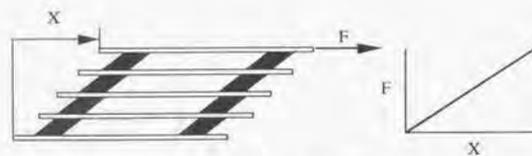
4-1 緒言

多段積層ゴムは、高層建物用質量効果型制振装置(チューンド・マスダンパ、ハイブリット・マスダンパなど)の振動質量支持および復元力要素としてその使用可能性があることを第1章で述べた。特に、超高層建物用制振装置に用いられる多段積層ゴムは、水平方向に数秒におよぶ固有周期となるような非常に小さい水平剛性と1m以上にもおよぶ変形能力が要求される⁽⁴⁾。このように、多段積層ゴムを制振装置として用いる場合は使用条件が厳しくより信頼性のある設計・評価法の確立が望まれる。

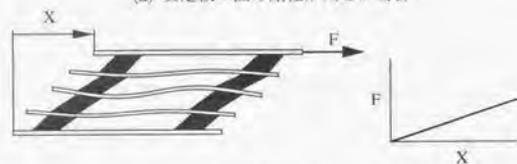
多段積層ゴムの剛性評価式には、簡易式がある程度で、要素積層ゴムの形状、多段積層ゴムの安定板の曲げ剛性、スパン(多段積層ゴムにおける要素積層ゴムの取り付け間隔)などの影響を考慮した詳細な評価方法がない。

そこで、第2章では評価方法を確立するため、多段積層ゴムの加力実験を実大スケールでおこなった。この結果、多段積層ゴムの水平復元力特性が安定板の剛性の大小により大きく影響を受けることを確認した。続いて、多段積層ゴムに用いられた要素積層ゴムの水平復元力特性におよぼす面圧や回転拘束度の影響について実験的および解析的に検討した。実験から軸力依存性(鉛直軸力の増加にともなって水平復元力が低下していく現象)の小さい要素積層ゴムでも回転拘束度が低下すると水平復元力が急激に低下していくことがわかった。

そこで、本章では、多段積層ゴムの水平復元力特性を要素積層ゴムの加力実験結果と安定板の曲げ剛性から解析的に求める手法を提案する。解析では、図4-1に示すような多段積層ゴムの水平復元力特性が安定板の曲げ剛性の大小の違いにより影響を受ける現象が、図4-2に示すような要素積層ゴムの回転拘束度の低下による水平復元力の減少に起因すると仮定した。要素積層ゴムを非線形はり要素でモデル化し、水平復元力特性におよぼす回転拘束度の影響を考慮できるように剛性マトリックスを実験的に決定した。さらに、提案された解析モデルによる多段積層ゴムの水平復元力特性と加力実験結果を比較し、解析モデルの有効性を検証した。



(a) 安定板の曲げ剛性が大きい場合



(b) 安定板の曲げ剛性が小さい場合

図 4-1 多段積層ゴムの変形性状

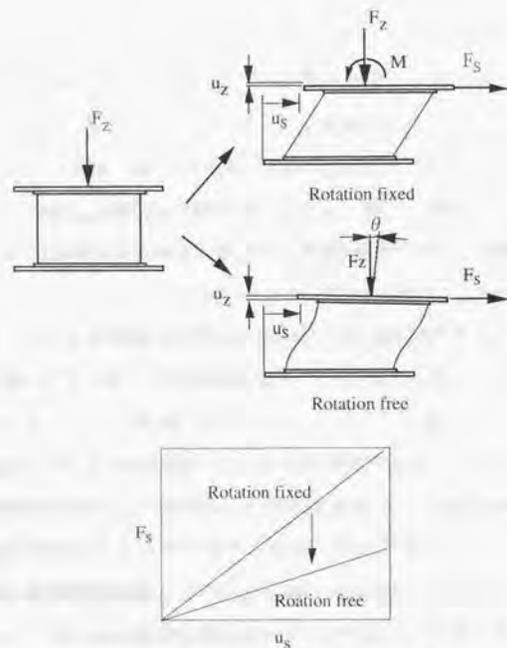


図 4-2 要素積層ゴムの復元力特性

4・2 既存の解析モデル

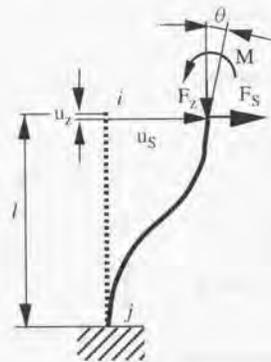
積層ゴムの水平復元力の軸力依存性を考慮した材料力学的解析モデルは多くの提案がなされている。この中で、もっとも古くから知られているのが、Haringxにより提案の金属スプリングの横座屈問題を扱った曲げせん断はり要素である⁽⁴⁻²⁾。その後、これは Gent によって積層ゴムに応用された⁽⁴⁻³⁾。Koh と Kelly は、積層ゴムのせん断ばねと回転ばねが直列に取り付けられた剛体のはりとしてモデル化し、積層ゴムの水平剛性の軸力依存性を解析し、Haringx のモデルと比較し非常によい近似がなされていることを示した⁽⁴⁻⁴⁾。さらに、飯塚は、Koh と Kelly のモデルを大変形問題に直接適用できるように、幾何学的非線形、材料非線形を考慮して拡張した⁽⁴⁻⁵⁾。このほかに、塩尻・松田によって、伝達マトリクス法を用いた解析もおこなわれている⁽⁴⁻⁶⁾。これらの解析モデルは、いずれも数値計算をする場合、変形状態や物性値を仮定する必要があり、例えば、文献(4-5)で提案されているモデルでは、降伏モーメントと終局モーメントを仮定された変形状態から推定している。

4・3 非線形はり要素モデル

要素積層ゴムの水平復元力、鉛直変形特性、曲げ剛性などは、幾何学的非線形性および材料物性の非線形性などが相互に影響しあい厳密に解析的にそれらの特性を求めることは非常に難しい。従って、解析に必要なパラメータの決定には実験が必要になってくると思われる。そこで、本節で述べる要素積層ゴムの解析モデルは、積層ゴムの変形特性がはりに類似であること、安定板をはり要素すると多段積層ゴムの解析モデルがすべてはり要素で取り扱えることを考慮してはり要素とする。

さらに、上述の理由から、解析モデルの剛性マトリックスの各要素をすべて二軸偏心試験装置によって実験的に決定する。

解析モデルは、せん断ひずみによる非線形性を考慮するため、式(4-1)のように増分型のマトリックス方程式とする⁽⁴⁻⁷⁾。



(要素積層ゴムの加力試験の状態を模擬)

図 4-3 要素積層ゴムのはり要素モデルへの置換

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta u_i \\ \Delta u_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta F_i \\ \Delta F_j \end{pmatrix} \quad (4-1)$$

ここで、 F_i , u_i , F_j , u_j はそれぞれ ij 節点における節点力と節点変位である(図 4-3)。節点力 F_i 、節点変位 u_i および剛性マトリックス K_{ij} を、2次元平面モデルを仮定して具体的に書くと、式(4-2)のようになる。

$$F_i = (F_y, M, F_x)^T$$

$$u_i = (u_y, \theta, u_x)^T$$

$$K_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_y}{\partial u_y} & \frac{\partial F_y}{\partial \theta} & \frac{\partial F_y}{\partial u_x} \\ \frac{\partial M}{\partial u_y} & \frac{\partial M}{\partial \theta} & \frac{\partial M}{\partial u_x} \\ \frac{\partial F_x}{\partial u_y} & \frac{\partial F_x}{\partial \theta} & \frac{\partial F_x}{\partial u_x} \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

ここで、 F_x は積層ゴムのせん断復元力、 M は曲げモーメント、 F_y は鉛直軸力、 u_y はせん断変位、 θ は回転角および u_x は鉛直変位である。

はり要素の剛性マトリックスは、せん断復元力が回転拘束度の低下によって減少する特性と水平変位依存性をもつことを考慮する。すなわち、 K_{ij} において $\frac{\partial F_y}{\partial u_x}$ および

$\frac{\partial F_x}{\partial \theta}$ は非ゼロ項とする。また、せん断復元力は鉛直変位に依存しないので、 $\frac{\partial F_y}{\partial u_y}$ は 0 とする。

次に、曲げモーメントは鉛直軸力とせん断復元力により変化すること、曲げ剛性が水平変位に依存すること、さらに、曲げモーメントが鉛直変位により変化しないことを考慮する。従って、 $\frac{\partial M}{\partial u_y}$ および $\frac{\partial M}{\partial \theta}$ は非ゼロ項とし $\frac{\partial M}{\partial u_x}$ は 0 となる。最後に、鉛

直軸力は鉛直変位のみ変化させることを考慮すると、 $\frac{\partial F_x}{\partial u_x}$ および $\frac{\partial F_z}{\partial \theta}$ は 0 となり $\frac{\partial F_x}{\partial u_x}$ は非ゼロ項となる。以上の結果より要素積層ゴムの剛性マトリックスは式(4-3)のようになる。

$$K_{11} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial u_x} & \frac{\partial F_x}{\partial \theta} & 0 \\ \frac{\partial M}{\partial u_x} & \frac{\partial M}{\partial \theta} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial F_z}{\partial u_z} \end{bmatrix}$$

$$K_{12} = \begin{bmatrix} -\frac{\partial F_x}{\partial u_x} & \frac{\partial F_x}{\partial \theta} & 0 \\ \frac{\partial M}{\partial u_x} & -\left(\frac{\partial M}{\partial \theta} \frac{\partial F_x}{\partial \theta}\right) & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\partial F_z}{\partial u_z} \end{bmatrix}$$

$$K_{21} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial u_x} & \frac{\partial F_x}{\partial \theta} & 0 \\ \frac{\partial M}{\partial u_x} & -\left(\frac{\partial M}{\partial \theta} \frac{\partial F_x}{\partial \theta}\right) & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\partial F_z}{\partial u_z} \end{bmatrix}$$

$$K_{22} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial u_x} & \frac{\partial F_x}{\partial \theta} & 0 \\ \frac{\partial M}{\partial u_x} & \frac{\partial M}{\partial \theta} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial F_z}{\partial u_z} \end{bmatrix}$$

(4-3)

ここで、 l は図 4-3 に示すように積層ゴムの高さである。

4・4 剛性マトリックスの決定法

4・4・1 解析対象

解析の対象は、図 4-4 に示す超高層建物用制振装置に用いられた三角形形状をした多段積層ゴムの一部を切り出し平面フレームとしたもので、第 2 章の多段積層ゴムの復元力特性で述べた実験モデルと同じである。

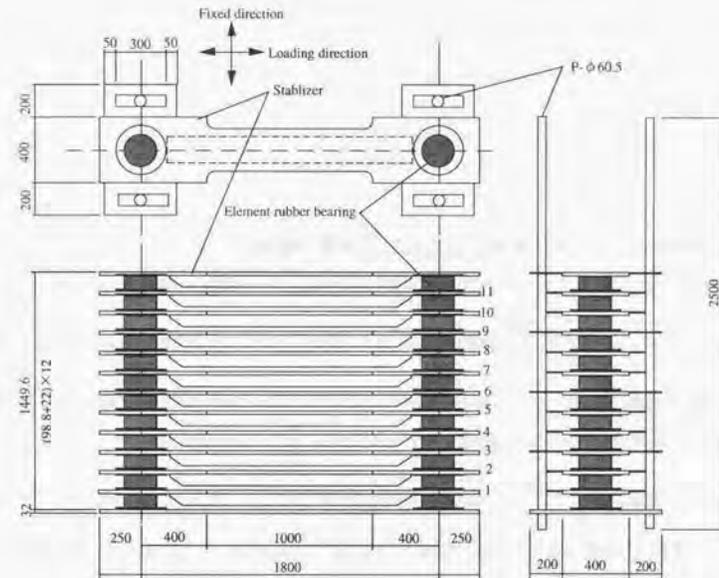


図 4-4 解析対象の多段積層ゴムモデル

多段積層ゴムの安定板は、曲げ剛性の大きい順に、基本モデル（一般構造用炭素鋼 SS400 の厚さ 22mm の平鋼に溝型鋼 150×75×6.5×10 で補強したもの）、PL22 モデル（22mm の平鋼のみ）、PL16 モデル（16mm の平鋼のみ）とした。

図 4-5 に上記の多段積層ゴムに用いられた要素積層ゴムを示す。ゴム材料は天然ゴムで厚さ 2mm のゴムシートを 0.6mm 厚みの金属板を介して 29 層加硫接着してい

る。第3章の加力実験から、本多段積層ゴムの加力実験範囲の軸力で軸力依存性が無いことを確認している。

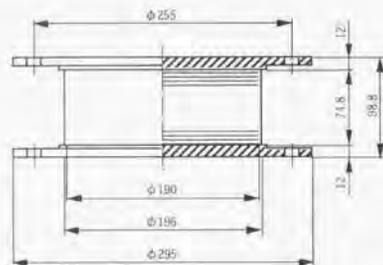


図 4-5 要素積層ゴム

4・4・2 剛性マトリックス要素決定のための実験の概要

図 4-6 に剛性マトリックスの各非ゼロ項を求めるための実験の概要を示した。

図 4-6(a), (b) は, $\frac{\partial F_s}{\partial u_s}$ と $\frac{\partial M}{\partial u_s}$ を求めるための実験である。要素積層ゴムの回転を拘束した状態で鉛直方向に一定の軸力を载荷しながら、水平方向に強制変位を加え要素積層ゴムの上端に発生するせん断復元力と曲げモーメントを測定する。

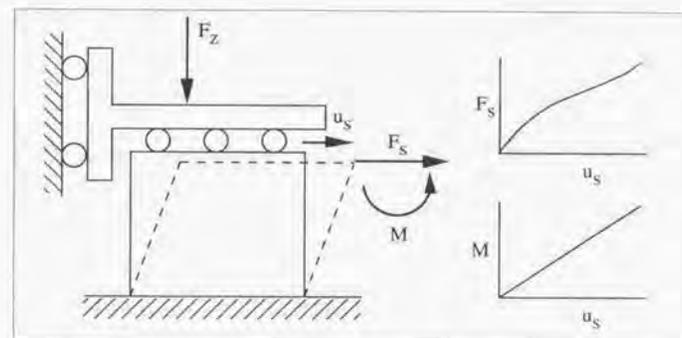
図 4-6(c), (d) は, $\frac{\partial F_s}{\partial \theta}$ と $\frac{\partial M}{\partial \theta}$ を求めるための実験である。鉛直方向の軸力を一定とし、かつ一定のせん断（水平）変位を加えた状態で、回転角 0 の状態から強制回転を加え、要素積層ゴムのせん断復元力と曲げモーメントを計測する。

図 4-6(e) は, $\frac{\partial F_z}{\partial u_z}$ を求めるための実験である。ある一定のせん断変位を加えた状態で、回転角 0 の状態を保ったまま強制鉛直変位を加え、鉛直軸力の変化を求める。

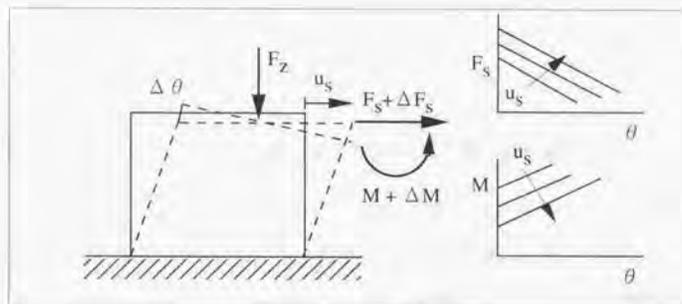
4・4・3 実験結果

図 4-7 に二軸偏心試験装置を用いた要素積層ゴムの組み合わせ加力（鉛直変位-せん断変位-回転角）試験結果を示す。

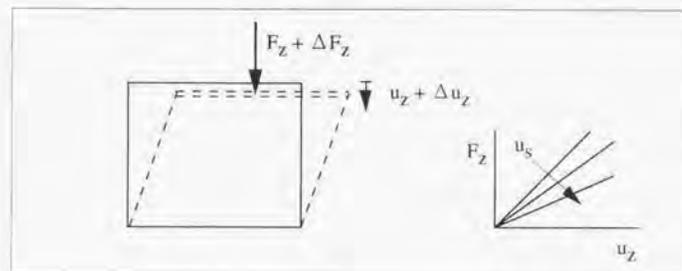
図 4-7(a) は、せん断復元力-せん断変位特性でゴムせん断ひずみ 200%に相当する変位 0.116m まで測定している。図 4-7(b) は、曲げモーメント-せん断変位特性であ



(a) F_s-u_s (b) $M-u_s$



(c) $F_s-\theta$ (d) $M-\theta$



(e) F_z-u_z

図 4-6 要素積層ゴムの加力実験

る。図 4-7(c)は、せん断復元力-回転角特性で、一定のせん断変位（せん断変位をゴムせん断ひずみで 0%か 200%まで 25%づつ変化させている）で、回転角 0 の状態から回転角を変化させた時のせん断復元力の変化を測定している。実験より、せん断力-回転角特性は回転角に対してほぼ線形であることが確認された。従って、 $\frac{\partial F_s}{\partial \theta}$ はせん断変位 u_s のみの関数としてよいと考えられる。

図 4-7(d)は、曲げモーメント-回転角特性で、一定のせん断変位で回転角 0 の状態から回転角の増加にともなう曲げモーメントの変化を測定したものである。せん断変位が小さい領域で、回転角の増大にともなう曲げモーメントの増加率が低下する傾向がみられるが、せん断ひずみが大きくなると特性はほぼ線形であることがわかった。多段積層ゴムに用いられる要素積層ゴムに生じる回転角の変化は、安定板の効果により極端に大きくなると推定されるので、 $\frac{\partial M}{\partial \theta}$ についてもせん断変位 u_s のみの関数とする。

また、 $\frac{\partial F_s}{\partial u_s}$ すなわち軸方向の剛性は、実験装置の都合により、回転を拘束した条件で鉛直変位-せん断変位特性を測定し、次節 4.4.4 で述べる方法により算出した。なお、これらの一連の実験では鉛直軸力はすべて 81kN とし、多段積層ゴムの加力実験における要素積層ゴムに作用する軸力と等しくした。

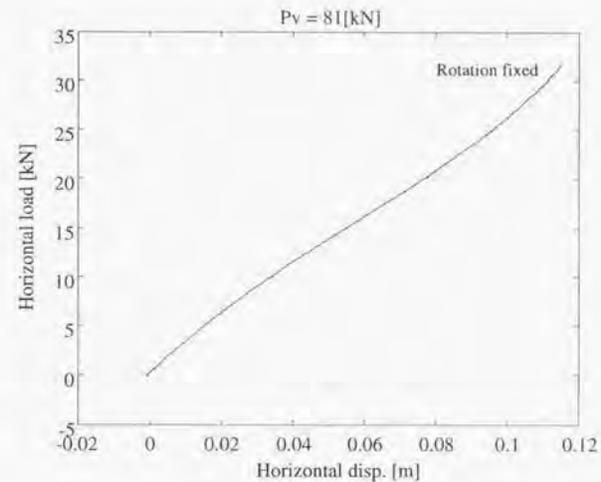


図 4-7(a) F_s vs. u_s .

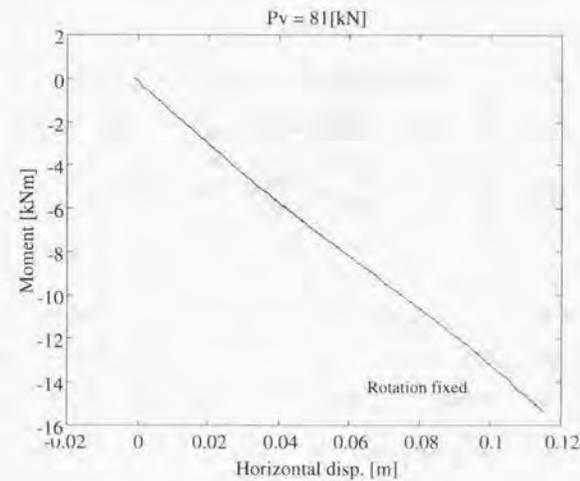


図 4-7(b) M vs. u_s .

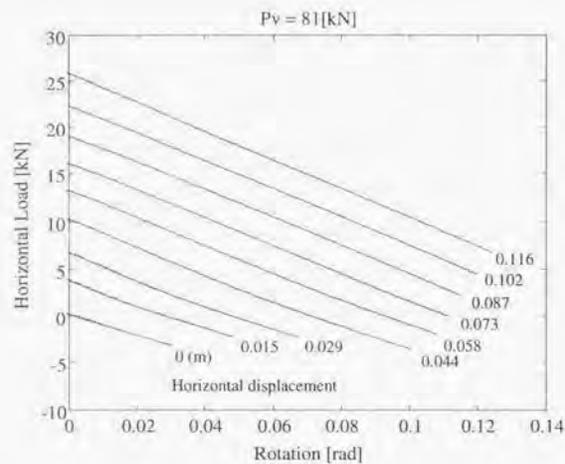


図 4-7(c) F_s vs. θ

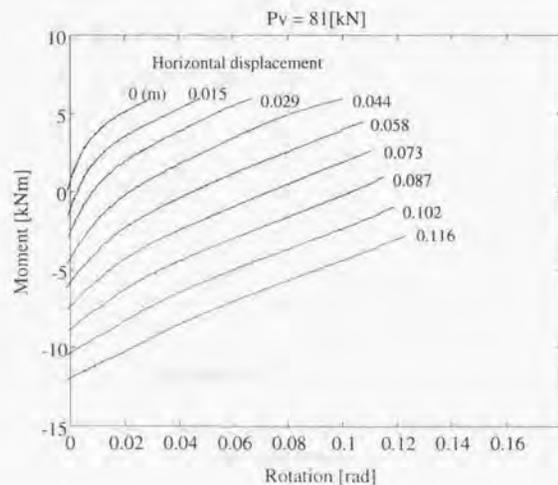


図 4-7(d) M vs. θ

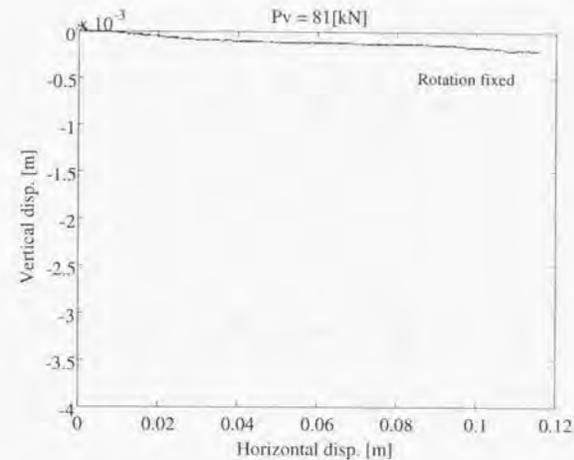


図 4-7(e) u_z vs. u_s

4・4・4 実験式の決定法

(1) $\frac{\partial F_s}{\partial u_s}$ の実験式

図 4-7(a)のせん断変位とせん断復元力の関係の曲線から近似式を作成する。実験式は、実験から求められた水平変位-水平荷重(F_s - u_s) の関係を水平変位の 4 次の多項式で近似し、これをせん断変位で 1 階微分して $\frac{\partial F_s}{\partial u_s} = a + bu_s + cu_s^2 + du_s^3$ として求める。

(2) $\frac{\partial M}{\partial u_s}$ の実験式

図 4-7(b)のせん断変位と曲げモーメントの関係の曲線から近似式を作成する。実験式は、実験から求められた曲げモーメント-せん断変位の関係を (1) と同様に、水平変位の 4 次の多項式で近似し、これをせん断変位で 1 階微分して求める。

(3) $\frac{\partial F_s}{\partial \theta}$ の実験式

図 4-7(c)のせん断復元力と回転角の関係において、各水平変位の微小回転時(この場合、 $\Delta \theta = 0.01 \text{ rad}$ と仮定)のせん断復元力の変化 ΔF_s を求め変化率 $\Delta F_s / \Delta \theta$ を

計算し、この変化率を縦軸にせん断変位を横軸にプロットして、そのプロットした点を結んでせん断変位の3次の多項式に近似する。

$$\frac{\partial F_s}{\partial \theta} = \frac{\Delta F_s}{\Delta \theta} = \frac{F_s(0.01) - F_s(0)}{0.01} \quad (4-4)$$

(4) $\frac{\partial M}{\partial \theta}$ の実験式 図4-7(d)の曲げモーメントと回転角の関係において、(3)と同様に、各せん断変位の微小回転時(この場合、 $\Delta \theta = 0.01 \text{ rad}$ と仮定)の曲げモーメントの変化 ΔM を求め変化率 $\Delta M / \Delta \theta$ を計算する。この変化率を縦軸にせん断変位を横軸にプロットして、そのプロットした点を結んでせん断変位の3次の多項式に近似する。

$$\frac{\partial M}{\partial \theta} = \frac{\Delta M}{\Delta \theta} = \frac{M(0.01) - M(0)}{0.01} \quad (4-5)$$

(5) $\frac{\partial F_s}{\partial u_s}$ の実験式 図4-7(e)のせん断変位と鉛直変位の曲線から実験式を求める。図4-6(e)では鉛直軸力を載荷したときの初期沈み込みを考慮していないので、別に、積層ゴムの鉛直ばね定数 K_s と鉛直軸力 F_s から鉛直変位 δ_1 を $\delta_1 = \frac{F_s}{K_s}$ として求め、これとせん断変位の増加にともない計測された鉛直変位からの変化 δ_2 より

$$\frac{\partial F_s}{\partial u_s} = \frac{\Delta F_s}{\Delta u_s} = \frac{F_s}{\delta_1 + \delta_2} \quad (4-6)$$

を求め、この値をせん断変位の3次の多項式で近似した。

求められた剛性マトリックスの各要素を図4-8に示す。また、剛性解析に用いた剛性マトリックスの各要素のせん断変位に関する実験式を式(4-7)~(4-11)にまとめて示す。なお、近似式は要素積層ゴムの加力実験範囲のゴムせん断ひずみで200%に相当する変位(0.116m)までとした。

$$\frac{\partial F_s}{\partial u_s} = 322 - 1888u_s - 12348u_s^2 + 296208u_s^3 \quad (4-7)$$

$$\frac{\partial M}{\partial u_s} = 148 - 150u_s - 12501u_s^2 + 127320u_s^3 \quad (4-8)$$

$$\frac{\partial F_s}{\partial \theta} = 111.5 + 1042.8u_s - 12680.1u_s^2 - 59733.0u_s^3 \quad (4-9)$$

$$\frac{\partial M}{\partial \theta} = 91.9 - 2984.2u_s + 29395.6u_s^2 - 106774.2u_s^3 \quad (4-10)$$

$$\frac{\partial F_s}{\partial u_s} = 3.68 \times 10^5 - 7.5 \times 10^6 u_s + 1.06 \times 10^8 u_s^2 - 5.09 \times 10^8 u_s^3 \quad (4-11)$$

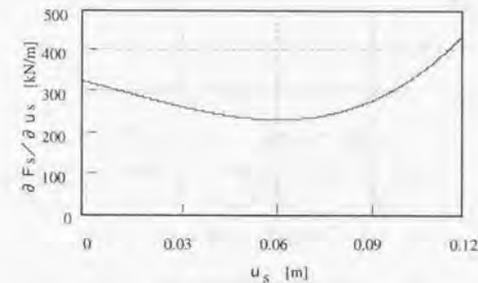


図4-8(a) $\partial F_s / \partial u_s$

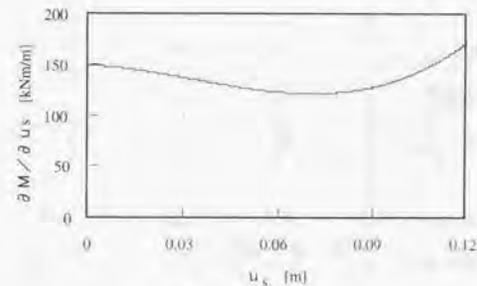


図4-8(b) $\partial M / \partial u_s$

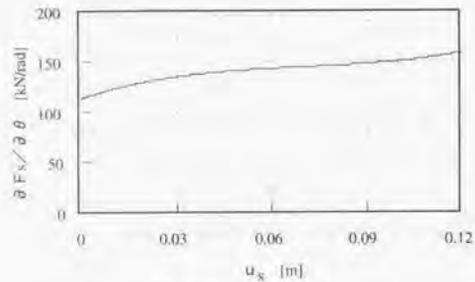


図 4-8(c) $\partial F_s / \partial \theta$

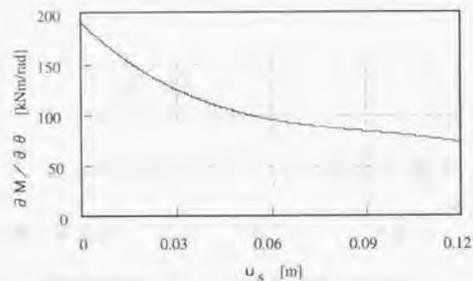


図 4-8(d) $\partial M / \partial \theta$

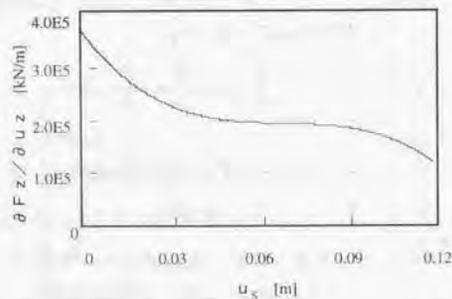


図 4-8(e) $\partial F_z / \partial u_s$

4・5 多段積層ゴムの復元力特性解析

4・5・1 解析モデル

多段積層ゴムの解析モデルを図 4-9 に示す。解析モデルは、平面フレームモデルで、要素積層ゴムは非線形はり要素、安定板は通常のはり要素とした。鉛直軸力は、12 段目の要素積層ゴム上に作用させた。水平方向の強制変位を 12 段目の積層ゴムの上端に作用させ、水平復元力を荷重増分法と平衡反復法を用いて静的平衡を収束計算で求めた(4-8)。

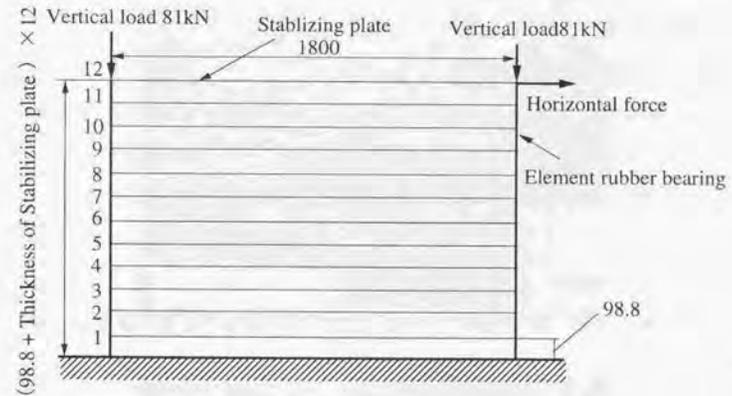


図 4-9 解析モデル

解析は、曲げ剛性の異なる 3 種類のモデル（基本モデル、PL22 モデル、PL16 モデル）の定変位加力についておこなった。定変位加力では、多段積層ゴムの上端の左右の鉛直方向の節点変位が等しくなるように解析した。ただし、左右の鉛直軸力の和は一定とした。

さらに、第 2 章で述べた加力方法の違いによる水平復元力への影響を調べるため、定荷重加力による解析もおこなった。定荷重加力では、多段積層ゴムの左右の上端に作用する鉛直軸力を一定に保持するほか、特に制約条件は付けていない。この結果、

鉛直軸力と水平復元力から曲げモーメントが発生し、多段積層ゴムの上端を回転させることになる。なお、解析では、曲げモーメントの釣り合いから、要素積層ゴムの剛性マトリックスの $\frac{\partial M}{\partial u_i}$ の項を、

$$\frac{\partial M}{\partial u_i} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial F_x}{\partial u_i} l + F_z \right) \quad (4-12)$$

として計算した。

4・5・2 解析結果

(1) 安定板の曲げ剛性の影響

図 4-10 に多段積層ゴムの变形特性と各段の層間変位（多段積層ゴムの水平変位 30, 60, 90 および 120cm）を第 2 章の実験結果と比較して示す。安定板は PL-22 をチャンネルで補強した基本モデル、PL-22 のみ、PL-16 のみの 3 種類である。

図 10(b)の解析から求められた变形特性と図 10(a)の実験結果は、良く一致しており、安定板の曲げ剛性が、基本モデル、PL-22、PL-16 と低下するにつれて、多段積層ゴムの安定板の变形と要素積層ゴム柱の变形に曲げ变形の影響が顕著になることが解析からも示された。

さらに、図 10(c)の解析による層間変位も実験結果を良好に再現している。すなわち、安定板の曲げ剛性が低下するにつれて、せん断变形が支配的な状態から曲げの影響が大きくなって多段積層ゴムの变形が段の中央部に集中することが解析からも求めている。

図 4-11 では、多段積層ゴムの水平復元力も安定板の曲げ剛性の低下により急速に低下することが解析から示されている。



Original Model

基本モデル



PL-22

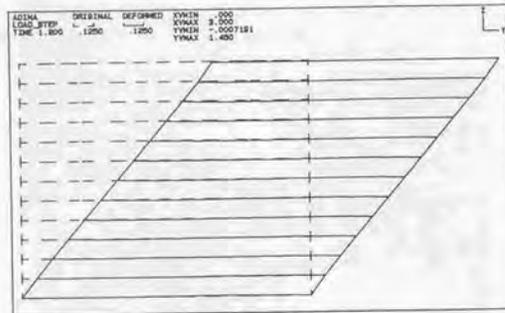
PL-22



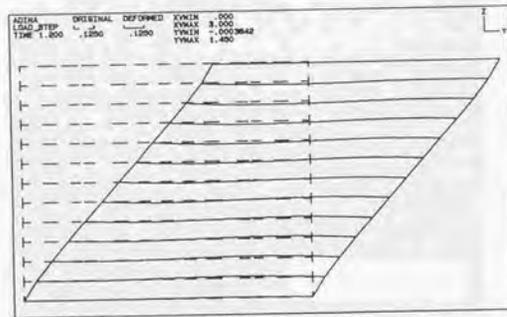
PL-16

PL-16

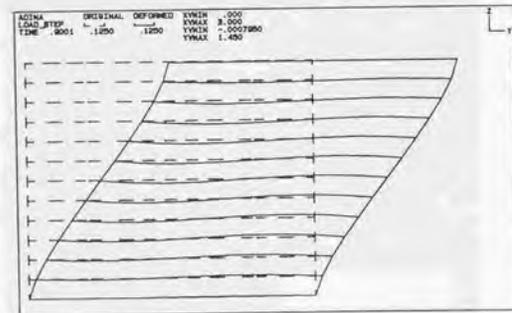
図 4-10(a) 变形特性 (実験結果)



基本モデル

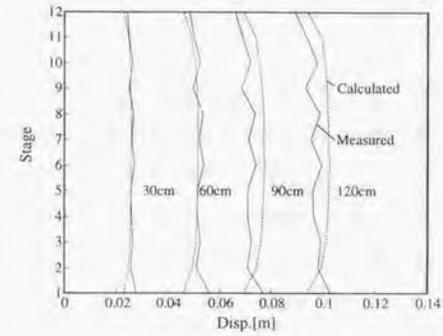


PL-22

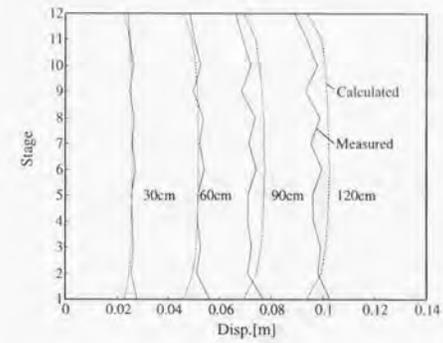


PL-16

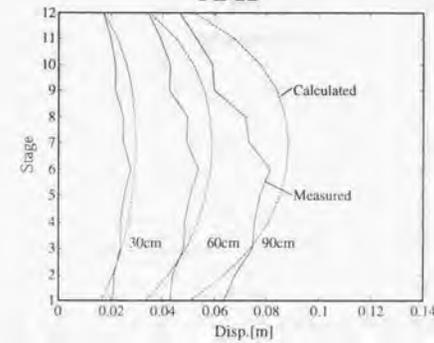
図 4-10(b) 変形特性 (解析結果)



基本モデル

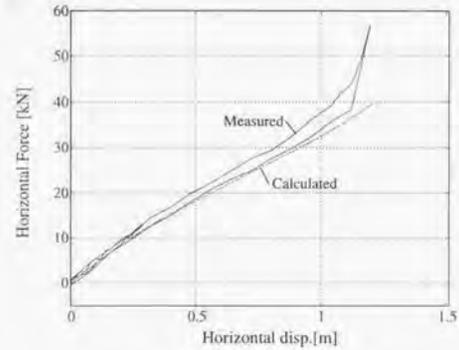


PL-22

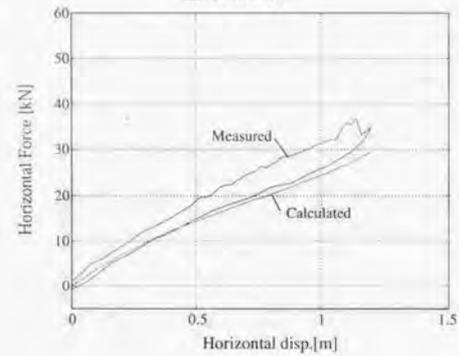


PL-16

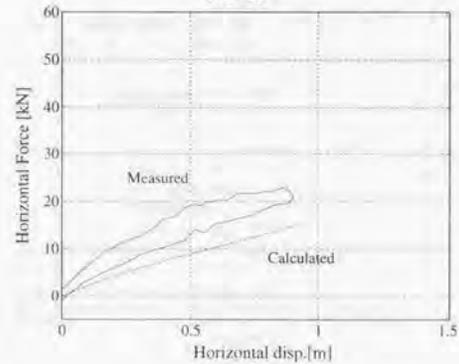
図 4-10(c) 層間変位 (実験と解析)



基本モデル



PL-22

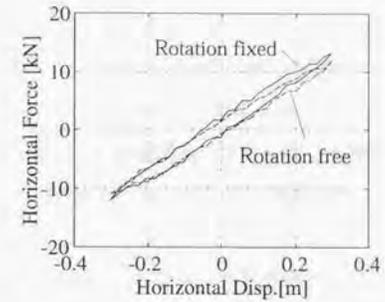


PL-16

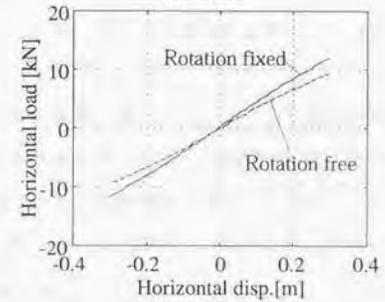
図 4-11 多段積層ゴムの水平復元力特性

(2) 加力方法の影響

図 4-12 は基本モデルの水平変位 0.3m までの復元力特性で、定変位加力と定荷重加力（図中それぞれ Rotation fixed と Rotation free と略記）の実験と解析の結果である。定荷重加力の多段積層ゴムの水平復元力は、定変位加力と比較して、小さくなっており、解析も実験と同様の傾向を示している。これは多段積層ゴムの上端の変位が水平加力とともに不均一になって、要素積層ゴムにより大きな回転が発生したためと推定される。このように多段積層ゴムの水平復元力は、安定板の曲げ剛性だけでなく、多段積層ゴムに支持される上部構造の剛性にも大きく影響されることが解析からも示された。



(a) 実験



(b) 解析

図 4-12 加力方法の違いによる復元力特性の変化

4・6 結語

要素積層ゴムの解析モデルを回転拘束度による水平復元力への影響を考慮できるはり要素と仮定し、その剛性マトリックスの各要素がせん断ひずみのみに依存する形式として、それらを二軸偏心試験装置による組み合わせ加力実験から決定した。多段積層ゴムのモデル解析から水平復元力特性と変形特性を求めた結果、以下のことがわかった。

(1) 多段積層ゴムの変形特性と水平復元力特性の解析結果は、実験結果を十分に再現できた。従って、要素積層ゴムの力学特性を組み合わせ加力(せん断・回転・軸の各変位)試験で確認できれば、その要素積層ゴムと種々の曲げ剛性を有する安定板から構成された多段積層ゴムの復元力特性を本提案の手法を用いることにより解析的に求めることが可能である。

(2) 特に、多段積層ゴムの安定板の曲げ剛性が比較的高い基本モデルと PL-22 モデルについては、本章で提案した要素積層ゴムの解析モデルを用いることによって、十分精度の高い解析結果が得られた。また、多段積層ゴムの安定板の曲げ剛性は設計上、極端に低くすることはない。これらのことから、本提案の解析手法は実用設計上、有効であると考えられる。

(3) 解析結果が実験結果をほぼ再現することにより、安定板の曲げ剛性が要素積層ゴムの曲げモーメントによる回転を拘束するに十分でない場合、要素積層ゴムが回転し結果として、多段積層ゴムの水平復元力を低下させるとの予測の妥当性が検証された。

(4) ただし、安定板の剛性が低下するにつれて、解析結果の再現精度が低下している点を考慮すると、本解析手法の適用限界は PL-16 モデル程度までと思われる。この精度低下の原因については主として、非線形はり要素モデルの剛性マトリックスの要素決定の際の仮定(微小回転、線形近似)に起因していると考えられる。特に、剛性マトリックスの $\frac{\partial M}{\partial \theta}$ と $\frac{\partial F_x}{\partial \theta}$ は、 $M-\theta$ 特性と $F_x-\theta$ 特性を微小回転角変化(0-0.01rad)で線形近似しており、解析精度の低下の要因になっている可能性がある。 $M-\theta$ 特性では、回転角度が大きくなると曲げモーメントが飽和していく傾向が認められ、線形近似の誤差が大きくなっていると推定される。

さらに精度を高めるためには、前述の非線形性を考慮した解析モデルを開発する必要があると思われる。

第4章の参考文献

- (4-1) 藤田隆史, XY 運動機構を用いた高層建物制振用マスダンバの開発と実用化, 生産研究, 42巻5号, (1990), 263-268.
- (4-2) Haringx, J.A., On highly compressive helical springs and rubber rods and their applications to free mountings, Phillips Research Reports (1948), Parts 1-3
- (4-3) Gent, A.N. and Lindley, P.B., The compression of bonded rubber blocks Proc. Inst. Mech. Eng. London, (1959), 173-3, 111-222.
- (4-4) Koh, C.G. and Kelly, J.M., A simple mechanical model for elastomeric bearings used in base isolation, Int. J. Mech. Sci., Vol.30, No.12, (1988), 933-943.
- (4-5) 飯塚正臣, 圧縮軸力・水平力同時作用下における免震用積層ゴムの大変形マクロモデル, 日本建築学会学術講演梗概集, B(1993), 2361-2362.
- (4-6) 松田泰治・塩尻弘雄, 伝達マトリックス法による積層ゴムの簡易解析, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.39B, (1993), 203-209.
- (4-7) 例えば, H.C.マーチン, マトリックス法による構造力学の解法, (1967), 56, 培風館.
- (4-8) 例えば, R.K.リブスレイ, マトリックス構造解析入門, (1998), 184-189, 培風館.

第5章 多段積層ゴムの制振装置への適用

5・1 はじめに

風や地震による高層建物の振動を低減する目的で, 制振技術の開発が近年急速に進んできた。制振技術開発の中で最も注目されているのが, マスダンバによる制振である。マスダンバとは, いわゆる動吸振器と呼ばれているもので, 建物屋上階近傍に建物の固有振動数に同調させた質量比 1%程度の副振動系を設置し, 副振動系を共振させその慣性力により建物に減衰力をあたえるものである。わが国では, 1986年3月に竣工した「千葉ポートタワー」(千葉市)に設置されたマスダンバ(XY運動機構を用いたマスダンバ)が最初の実施例である⁽⁵⁻¹⁾。その後, 直方体水槽を用いたマスダンバが「ゴールドタワー」(香川県多度津町)に実用化され⁽⁵⁻²⁾、多層円筒水槽を用いたマスダンバが「横浜マリントワー」(横浜市)などで実験され⁽⁵⁻³⁾、XY運動機構を用いたマスダンバが「福岡タワー」(福岡市)に用いられている⁽⁵⁻⁴⁾。

ところで, 序論でも述べたように, 高層建物制振用マスダンバは, 数 10ton から 100ton 程度の質量を周期 2~6 秒, 振幅 1m 程度で振動させることができ, しかも, 摩擦をできるだけ小さくし, 通常の階高内に収まる形状のものでなければならない。したがって, 実用性のあるマスダンバの構造はかなり限られたものになると思われる。

多段積層ゴムの制振装置への適用では, 第2章で低剛性, 大変形吸収能力が実現できることを実証した多段構造の積層ゴムを, 質量効果型制振装置(マスダンバ)に適用することを試み, 実用化研究を実施している。

開発は2種類のマスダンバについて実施し, 最初に, パッシブ型制振装置の実用化研究をおこなっている。開発の第1段階では, 基礎研究として, 実大タワーの風による振動低減を目的とした, 振動質量 25ton, 周期 3 秒, 変位吸収能力 1.2m のマスダンバを設計し, この縮尺比 1/2 の実験モデルによる振動実験を通じて, マスダンバの制振特性を検討している。

つづいて, 超高層建物用ハイブリットマスダンバの実用化研究をおこなっている。実用化されたハイブリットマスダンバは, 振動質量 200ton を, 6 基の多段積層ゴムで支持し, 固有周期 3 秒, 変位吸収能力 1m を確保している。アクチュエータは油圧式で最大制御力は 294kN を有している。ハイブリットマスダンバは, 地上試験後,

地上質量 40000ton の超高層建物に設置され、加振試験により制振性能が検証された。さらに、設置後、風・地震応答観測をおこない制振効果が実証されている。

5・2 多段積層ゴムを用いたパッシブ型制振装置の開発

5・2・1 まえがき

本節では、実大タワーに設置を想定した多段積層ゴムを用いたマスダンバの 1/2 スケールモデルを製作し、加振試験、静的加力試験を通じて振動特性を検証している。

実験では、マスダンバの固有周期の入力振幅依存性を調べたほか、安定板による高次モードの振動特性、鉛直方向の応答倍率などを測定した。さらに、マスダンバの振動解析用モデルとして、多自由度系モデル、1 自由度系モデルを提案し、実験結果との比較をおこなっている。つづいて、マスダンバの静的加力試験から多段積層ゴムの水平復元力特性を実測し、加振試験の固有周期から求められた水平復元力特性と比較している。このほか、実大マスダンバの制振性能を解析モデルから検討を加えている。

5・2・2 多段積層ゴムを用いたマスダンバの基本構造

本マスダンバは、図5-1に示すように、免震装置として用いられている積層ゴムを安定板を介して多段に積み重ねた多段積層ゴムによって鋼製質量を支持する基本構造をもっている。したがって、質量の変位は多段積層ゴムのせん断変形によって与えられるため、基本的には、摩擦のない構造である。また、安定板の各段の間にはオイルダンバが取り付けられている。各段での相対変位はあまり大きくならないため、汎用のオイルダンバを用いることができる（実際には、このオイルダンバによって多少の摩擦が導入される）。

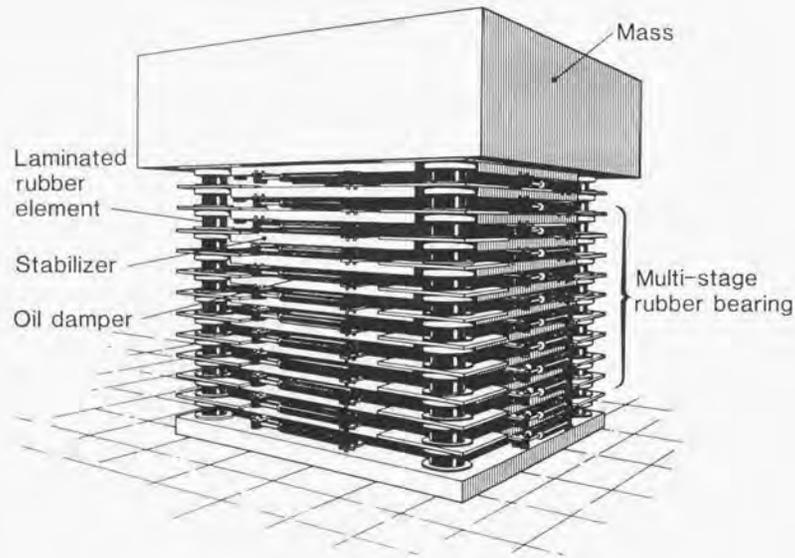


図5-1 多段積層ゴムを用いたマスダンバの基本構造

本マスダンバは、このように摩擦を非常に小さくできる構造を持つため、一次固有周期が6秒程度の超高層建物にも適用が可能であり（建物の固有周期が長周期になると風による振動の加速度は非常に小さくなるため、低加速度から作動し始めるマスダンバでなければならない）、作動時の騒音が小さいなどの長所を有している。

本マスダンバの周期の調整は、多段積層ゴムの段数の変更と質量の増減によっておこなう。また、周期に異方性を持たせる場合には、多段積層ゴムの各段に補助コイルばねを装着する。周期の調整はこの補助コイルばねによってもおこなえる。なお、図5-1では質量を1基の多段積層ゴムで支持する場合が示されているが、質量が大きくなると第2章の図2-1に示したように2~4基の多段積層ゴムで支持する構造になる。

5・2・3 実験モデル

図5-2に示す実験モデルは、実大タワーの諸元を用いて設計した有効質量25tのマスダンパのスケールモデルであり、要素積層ゴムの寸法が実大マスダンパのそのの1/2となっている。ただし、頂部の質量（主質量）は、要素積層ゴムの面圧が実大マスダンパの場合と等しくなるように定められている。

実験モデルの主質量は鋼製容器の中に鋼板を積み重ねたものであり、質量を調整できるようにしている。主質量は4500kg、安定板1段当たりの総質量（安定板、要素積層ゴムの合計）は131kgである。

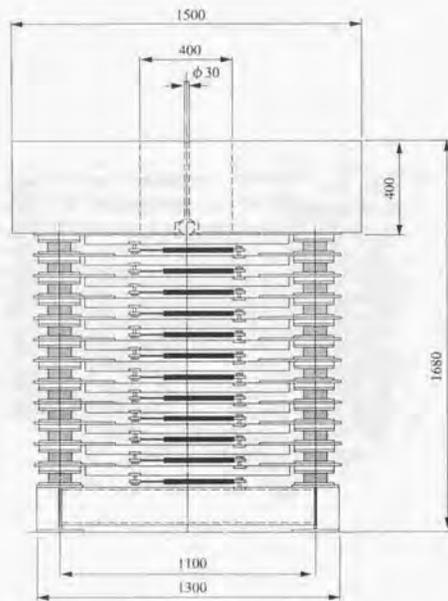


図5-2 実験モデル

実験モデルに用いられた要素積層ゴムを図5-3に示す。要素積層ゴムの1次形状係数 S_1 は30.6、2次形状係数 S_2 は2.91および標準面圧 σ は1.16MPaであり、第3章の実験結果より、通常の使用面圧下では水平剛性の軸力依存性はない。多段積層ゴムは、各段4個の要素積層ゴムを安定板を介して12段に積み重ねたものである。また、

安定板の各辺に2本、1段あたり合計8本のオイルダンパが取り付けられている。

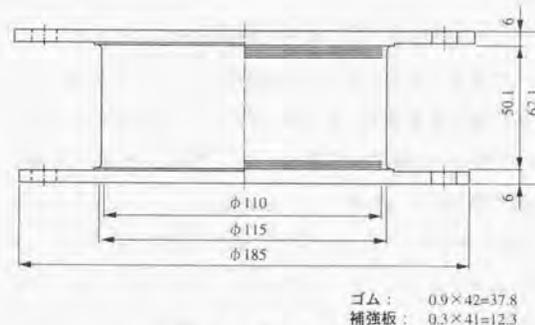


図5-3 要素積層ゴム

以上より、本実験モデルは、有効質量5t、水平固有周期2.0秒（いずれも一次モードに対する値）を設計値としてもつものであった。なお、本実験モデルでは、多段積層ゴムの高次の共振を防ぐために、ロッド（拘束ロッドと呼ぶ）を主質量および各安定板の中心に挿入できる構造となっている。

図5-4に大振幅振動実験中の実験モデルを示す。



図5-4 振動実験状況

5・2・4 実験結果と考察

(1) 実験の概要

水平・鉛直二次元振動台を用いた正弦波加振実験をおこない、マスダンパの主質量部の加速度および相対変位を測定し、各入力振幅について共振周期と応答倍率を求めた。また、安定板の加速度を測定し、その振動特性を調査した。さらに、地震床応答模擬波（秋田・NS波による固有振動数 0.5Hz、減衰比 1%の 1 質点系の応答加速度波）を用いた加振実験もおこなった。

実験モデルの上述の拘束ロッドを装着した場合の実験をおこなったが、その結果は拘束ロッドのない場合とほとんど同じであり、このような拘束ロッドは必要ないことが判明した。後述するように、オイルダンパだけで多段積層ゴムの高次の共振がほぼ完全に抑えられたためである。したがって、以下では、拘束ロッドのない場合の実験結果だけを示すことにする。

(2) 水平振動特性

図 5-5 は主質量の共振曲線を示したものである。共振振動数と応答倍率には入力依存性があり、本マスダンパの振動特性には若干の非線形性のあることがわかる。

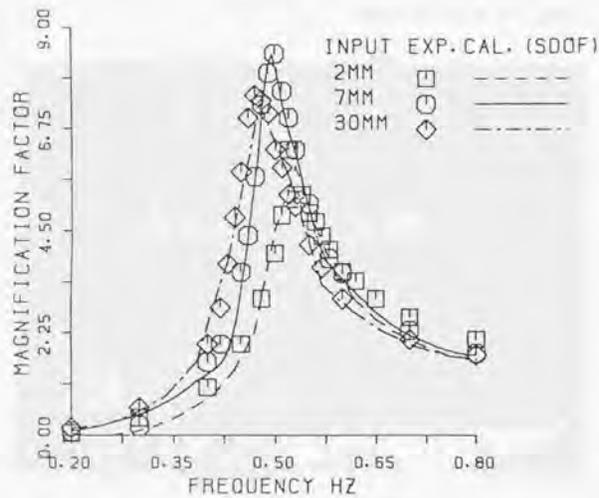


図 5-5 主質量の共振曲線

そこで、入力振幅を順次変化させ、マスダンパの共振周期と共振応答倍率を求めたのが図 5-6 である。2mm 以下の微小入力振幅においては、オイルダンパの摩擦に起因すると考えられる共振周期と応答倍率の急激な低下が見られる。しかし、入力振幅が 2mm 以上では共振周期が入力振幅の増大とともに長周期になる傾向があるが、入力振幅 25mm までは設計値 2.0 秒の±5%の範囲内に収まっている。なお、一般に高層建物では振動の振幅が大きくなるにつれてその固有周期は若干長くなる傾向があり、本マスダンパの共振周期の同様な傾向は制振性能の向上につながる可能性もある。

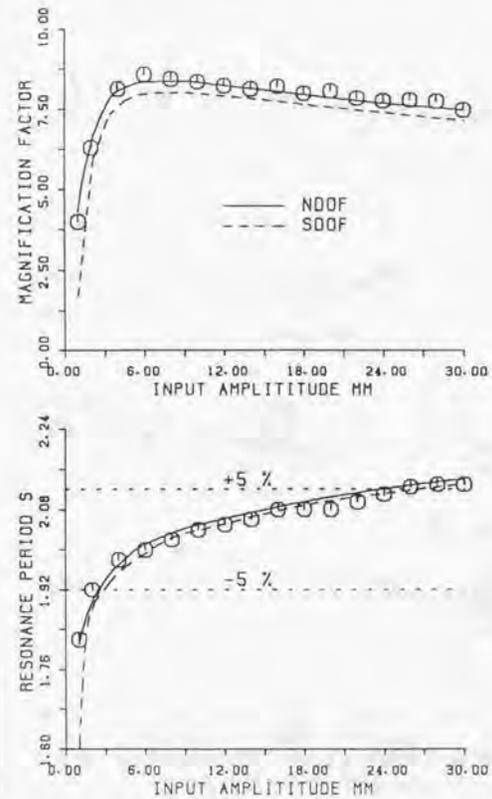


図 5-6 マスダンパの共振周期と共振応答倍率（ダンパ付きの場合）

図5-7はすべてのオイルダンパを取り外した場合の共振周期と応答倍率の入力振幅依存性を示したものである。共振周期は、図5-6と同様に、入力振幅とともに長周期化しており、実験モデルに用いた多段積層ゴムの水平剛性がソフトスプリングの傾向を持っていることを示している。一方、応答倍率は、図5-6とは逆に、入力振幅の増加とともに大きくなっている。この結果は、多段積層ゴム自体の減衰が振幅とともに減少する非線形特性を持っていることを示している。

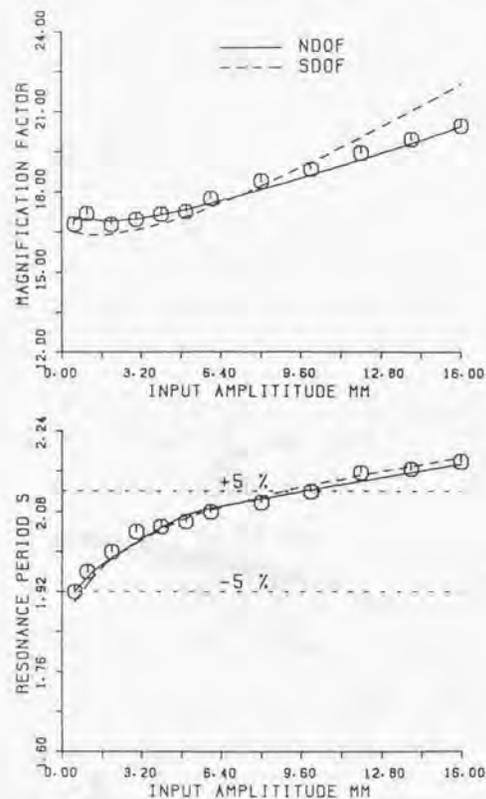


図5-7 マスダンパの共振周期と共振応答倍率 (ダンパなしの場合)

図5-8は、安定板の各層間にオイルダンパを装着した場合と、オイルダンパを取り外した場合について、入力加速度 1.0m/s^2 一定の正弦波加振をおこない、各段の安定板の加速度の加速度応答倍率を求めたものである。オイルダンパのない場合には、安定板と要素積層ゴムで構成される多質点系の高次モードの共振点が現れているが、オイルダンパのなる場合には、高次モードの共振がほぼ完全に抑えられている。この結果より、多段積層ゴムを用いたマスダンパの設計に際しては、多段積層ゴムの高次モードの振動を考慮する必要はないと言える。

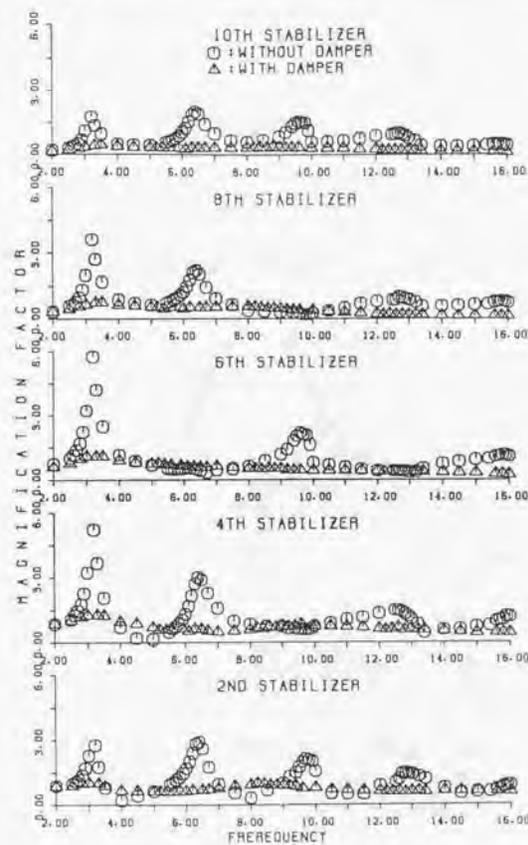


図5-8 安定板の応答

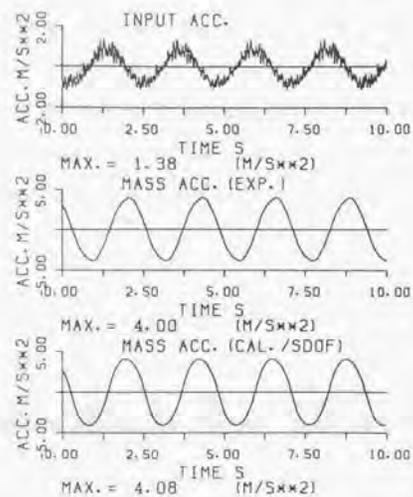


図 5-9(a) 主質量の応答加速度

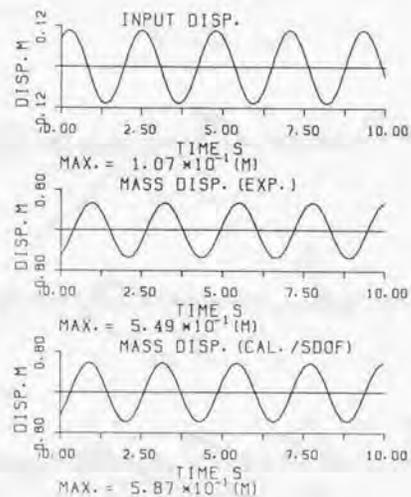


図 5-9(b) 主質量の応答変位

図 5-9(a), (b)は、本マスダンパの変位能力を検証するためにおこなった大変位振動実験での、主質量の応答加速度と応答変位の波形である。この結果から、実験モデルの変位能力は少なくとも 0.6m 程度はあると考えられる。したがって、実大マスダンパでは 1.2m 程度の変位能力を期待することができる、本マスダンパは大地震時にも十分安全な変位能力を有していることがわかる。

(3) 鉛直振動特性

鉛直方向に入力加速度 1.0m/s^2 一定および 0.5m/s^2 一定の正弦波加振をおこない、主質量の鉛直方向の加速度応答倍率を求めたのが図 5-10 である。鉛直固有振動数は入力加速度によらずほぼ一定の 13.5Hz であるが、加速度応答倍率は入力加速度振幅が大きくなるにつれて若干小さくなる。この結果から求めた減衰比は、入力加速度 0.5m/s^2 の場合 8%、 1.0m/s^2 の場合は 10% である。

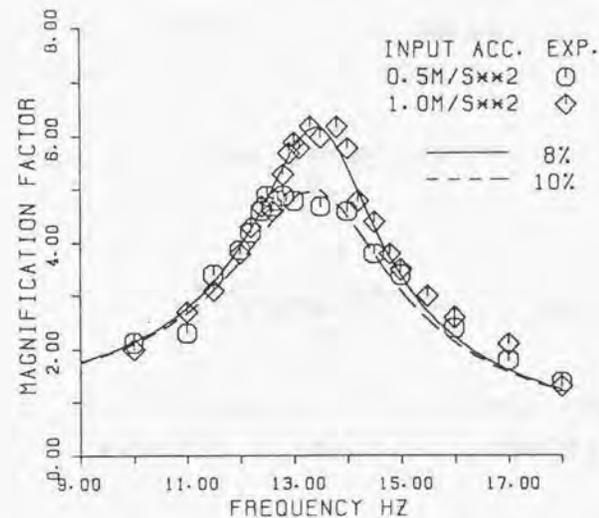


図 5-10 鉛直方向の応答倍率

5・2・5 解析モデル

(1) 多自由度系モデル マスダンパの主質量の質量を m_m 、安定板 1 枚あたりの総質量を m_e および i 段目の安定板の変位を x_i とすると、マスダンパの多自由度系 (NDOF) としての運動方程式は、式(5-1)のようになる。

$$\begin{aligned} m_m \ddot{x}_n + f(x_n - x_{n-1}, \dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}) &= 0 \\ m_e \ddot{x}_i + f(x_i - x_{i-1}, \dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) - f(x_{i+1} - x_i, \dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) &= 0 \\ (i=1 \sim n-1) \end{aligned} \quad (5-1)$$

ただし、

$$f(x, \dot{x}) = f_{kr}(x) + f_{cr}(\dot{x}) + f_{cd}(\dot{x}) + f_{fd}(\dot{x}) \quad (5-2)$$

ここで、 $f_{kr}(x)$ と $f_{cr}(\dot{x})$ は、多段積層ゴム 1 段あたりの要素積層ゴム 4 個の復元力と減衰力を、また、 $f_{cd}(\dot{x})$ と $f_{fd}(\dot{x})$ は、同じく 1 段あたりのオイルダンパの減衰力と摩擦力である。

実験より、多段積層ゴム 1 段あたりの要素積層ゴムの復元力 $f_{kr}(x)$ と減衰力 $f_{cr}(\dot{x})$ を次の式(5-3)と式(5-4)で近似する。

$$f_{kr}(x) = \text{sgn}(x) f_s \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{k_0 |x|}{f_s}\right) \right\} \cdot \left\{ 1 + \alpha \exp\left(\frac{|x|}{x_0}\right) \right\} \quad (5-3)$$

ここで、 $f_s=43.48\text{kN}$ 、 $k_0=580\text{kN/m}$ 、 $\alpha=0.2$ 、 $x_0=0.0026\text{m}$ である。図 5-11 に式(5-3)によって表せる多段積層ゴム 1 段あたりの積層ゴムの復元力特性を示す。

$$f_{cr}(\dot{x}) = C_r \dot{x} - \text{sgn}(\dot{x}) C_{rm} |\dot{x}|^n \quad (5-4)$$

ここで、 $c_r=1.09\text{kNs/m}$ 、 $c_{rm}=466\text{Ns/m}$ 、 $n=1.8$ である。

オイルダンパの減衰力 $f_{cd}(\dot{x})$ と摩擦力 $f_{fd}(\dot{x})$ をそれぞれ式(5-5)、(5-6)で近似する。

$$f_{cd}(\dot{x}) = \text{sgn}(\dot{x}) C_d |\dot{x}|^m \quad (5-5)$$

ここで、 $c_d=76.21\text{kNs/m}$ 、 $m=1.5$ である。

$$f_{fd}(\dot{x}) = \text{sgn}(\dot{x}) f_f \quad (5-6)$$

ここで、 $f_f=46.0\text{N}$ である。

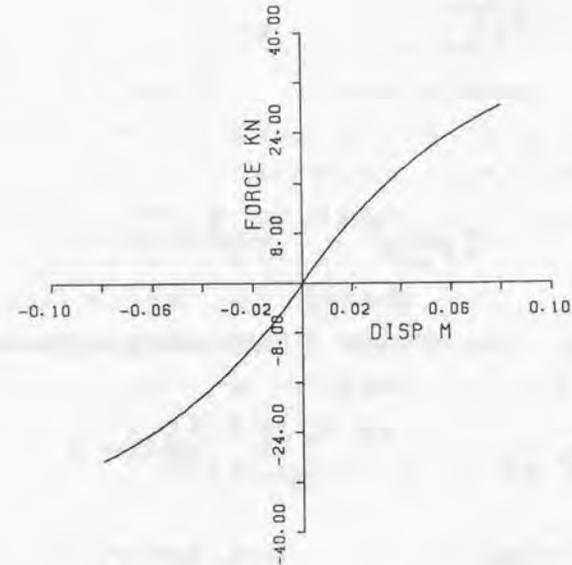


図 5-11 解析モデルの多段積層ゴムの復元力特性 (1 段あたり)

(2) 1 自由度モデル 実験結果より、多段積層ゴムの高次モードの振動は発生せず、一次モードが支配的であることが判明しているため、本マスダンパの振動を簡単な 1 自由度系 (SDOF) で表すことができる。そこで、一次モードでの多段積層ゴムの変形形状を直線で近似し (この近似の妥当性は、拘束ロッドのある場合とない場合とで実験結果に違いがなかったことから明らかである)、主質量の床面からの変位を x

とすると、次の式(5-7)がえられる。

$$m_m^* + f(x/n, \dot{x}/n) = 0 \quad (5-7)$$

ただし、

$$m_m^* = m_m + m_f(n+1)(2n+1)/(6n)$$

ここで、 n は多段積層ゴムの段数である。また、 f は式(5-2)で与えられる。

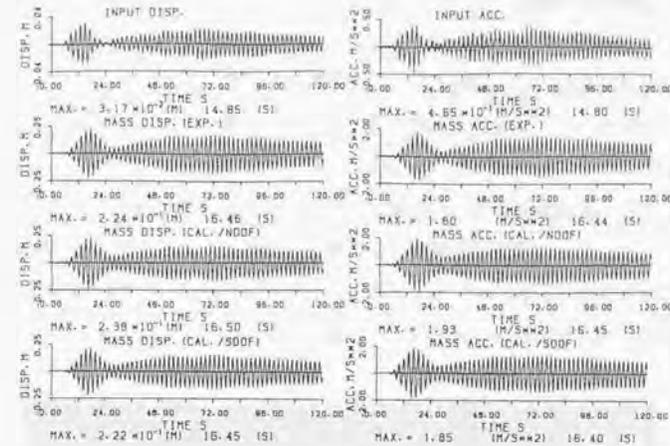
式(5-7)は、1自由度系モデルの場合のマスダンパの復元力および減衰力の特性が多自由度系モデルの場合の1段あたりの特性式と等価であることを示している。

(3) 解析結果と実験結果の比較

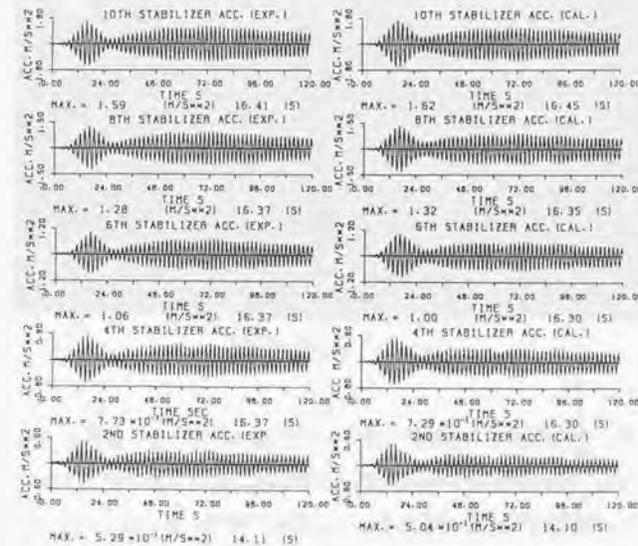
図 5-12(a)は、前述の地震床模擬応答波を入力した場合の主質量の応答加速度と応答変位について、実験結果と多自由度系モデル、1自由度系モデルによる計算結果を比較したものである。また、図 5-12(b)は、安定板の応答加速度について、同様に実験結果と多自由度系モデルによる計算結果を比較したものである。(a)、(b)いずれの場合も、多自由度系モデルによる計算結果は実験結果と良好な一致を示している。また、1自由度系モデルと多自由度系モデルの差はほとんど見られない。

既に述べた図 5-6、図 5-7には多自由度系モデルと1自由度系モデルの両者による計算結果が、また、図 5-5、図 5-9には1自由度系モデルによる計算結果が示されているが、これらの結果はすべて実験結果とよく一致している。

以上より、本マスダンパの振動解析には、多自由度系モデルはもちろんのこと、1自由度系モデルで実用上十分な解析ができることが示された。



(a) 主質量の応答



(b) 安定板の応答

図 5-12 地震床応答模擬波入力に対する応答

5・2・6 静的加力試験

ここでは、実験モデルの静的加力試験による復元力特性を示す。試験では、図 5-13 に示す加力装置を用いて、実験モデルの主質量を油圧アクチュエータに連結し、多段積層ゴムを変形させ、荷重-変形特性を測定した。主質量は 4500kg で加振試験と同じとし、変形は 0.6m までとした。加力は 1mm/s 程度でほぼ静的と考えてよい。

測定結果を加振試験からえられた復元力特性と比較して図 5-14 に示す。この結果から明らかなように、静的加力試験による復元力特性は、加振試験の固有周期から求められた復元力特性にきわめて良く一致している。したがって、多段積層ゴムの振動特性は、静的加力試験の復元力特性から正確に求められることが示された。



図 5-13 静的加力試験

図 5-15 は、要素積層ゴム試験から求められた復元力特性を、荷重を 4 倍、変位を 12 倍したもので安定板が十分剛な場合の多段積層ゴムの復元力特性である。なお、要素積層ゴムの試験では、鉛直軸力として 11kN を載荷させ、かつ上下のフランジを常に平行に保ちながら水平復元力特性を測定した。要素積層ゴム試験から求められた復元力特性は、直接、多段積層ゴムの加力試験から測定された復元力特性と水平変位 0.3m 程度までは一致しているが、それ以上では、直接測定した結果の方が小さくな

っている。この原因については、安定板の曲げ変形による要素積層ゴムの回転と主質量自体の回転が考えられる。要素積層ゴムによる復元力特性は、理想的な多段積層ゴムの特性であり、安定板の剛性をこれ以上大きくしても、復元力特性の変化がわずかであることがわかる。

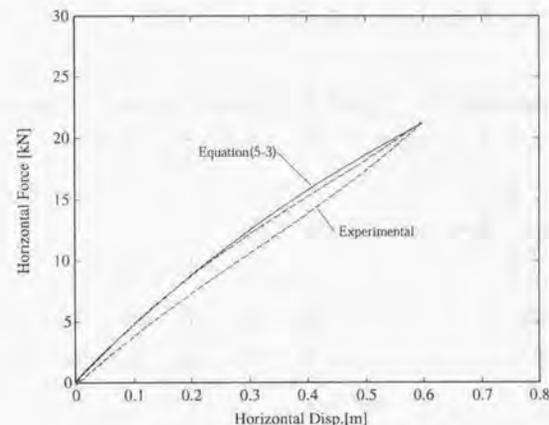


図 5-14 多段積層ゴムの復元力特性

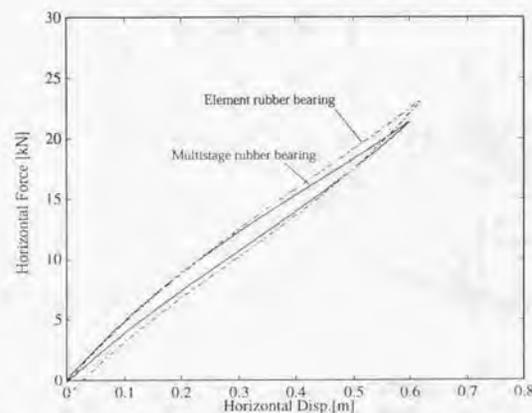


図 5-15 要素積層ゴム試験から求められた多段積層ゴムの復元力特性

5・2・7 実大マスダンバの制振性能について

有効質量（上述の m_m ）25t、設計固有周期 3.24 秒の実大マスダンバを 1 次固有周期 3.22 秒の実大タワーに取り付けた場合の制振性能を、マスダンバとタワーをそれぞれを 1 自由度系とした 2 自由度系モデルによって解析した。実大マスダンバの復元力特性ならびに減衰力特性などは、実験モデルの特性から相似則にしたがって定めた。また、実大タワーは、質量 2500t、固有周期 3.22 秒、臨界減衰比 0.5% の 1 質点系でモデル化した。

実大マスダンバの共振周期と応答倍率の入力振幅依存性を図 5-16 に示す。図より、

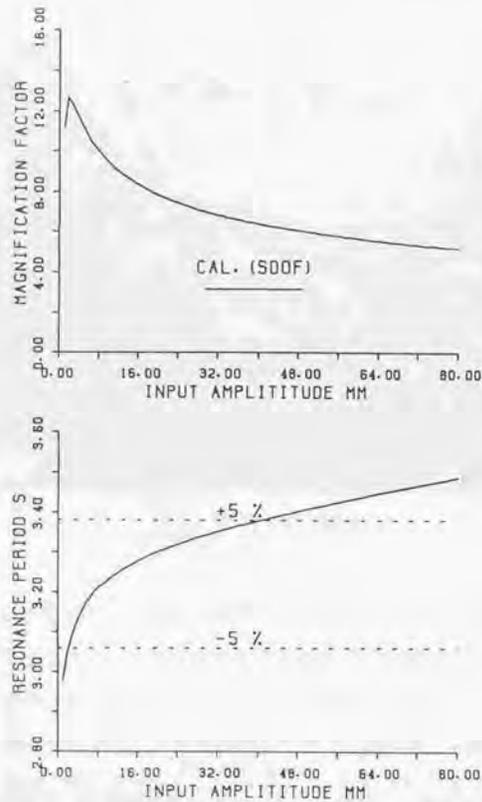


図 5-16 実大マスダンバにおける入力依存性

実大マスダンバも、実験モデルの場合と同様に、微小振幅における共振周期と応答倍率に急激な変化が見られるが、この範囲の入力振幅は、実大タワーの制振の場合には問題にならないと考えられる。また、共振周期は、入力振幅が 40mm までは設計周期の $\pm 5\%$ の範囲に収まる。なお、この入力振幅 40mm は、実大タワーの加速度に換算すると 0.15cm/s^2 となり、相当な強さの風による振動に相当する。

図 5-17 は、実大マスダンバを設置した実大タワーが正弦波入力を受けた場合の応答倍率を、入力加速度別に求めたものである。ただし、この入力加速度は、実大タワーの単位質量あたりの強制外力を意味してしている。図には、このほかに、同じ質量比で線形なばねと減衰をもつ理想的なマスダンバを最適調整した場合の応答と、マスダンバを設置していない場合の応答が示されている。なお、この実大マスダンバは、入力加速度 0.01m/s^2 の場合に最大の制振効果を与えるように調整してある。この結果より、設計基準の入力加速度である 0.01m/s^2 では理想的なマスダンバに近い制振性能を示すが、それより、弱風の場合あるいは強風の場合には、マスダンバの非線形な特性のため制振性能がやや低下することがわかる。

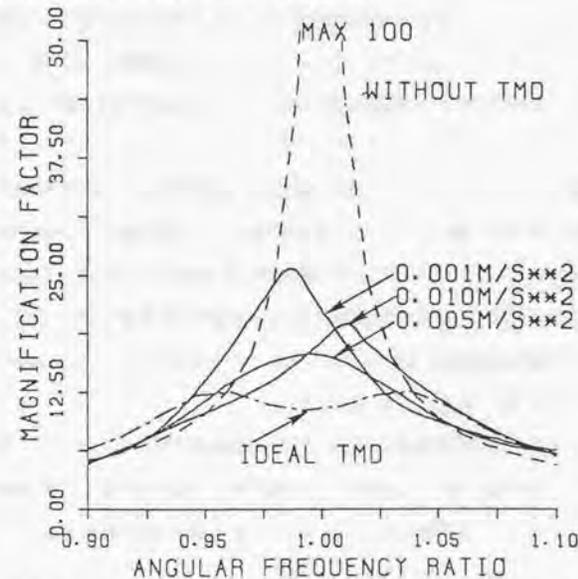


図 5-17 正弦波入力に対する制振性能（質量比 0.01 の場合）

5・2・8 まとめ

多段積層ゴムを用いたマスダンバの振動特性についての知見を与えるために実験モデルによる振動実験をおこなった。また、実験結果に基づく解析モデルを構成した。さらに、解析モデルを用いて実大マスダンバの制振性能についても検討した。

振動実験からえられた結果をまとめると以下のとおりである。

(1) 正弦波加振実験から、本マスダンバは、微小変位入力でも応答し制振効果を期待できることがわかった。ただし、共振固有周期は、入力振幅の増加とともに、長くなる傾向が認められた。実験モデルの応答倍率は、オイルダンバ装着時には、入力振幅により僅かに減少する傾向を示した。これに対して、オイルダンバを取り外した場合は、入力振幅の増加とともに応答倍率は大きくなった。このことから、多段積層ゴムの等価減衰定数は振幅に依存し減少することがわかった。

(2) 拘束ロッドは、多段積層ゴムの安定板の高次モードの変形を抑制するために、必要と考えたが、実験結果より、通常の使用状態では不要であった。また、解析モデルは、1自由度モデルで十分な精度がえられることがわかった。

(3) 静的加力試験より求められた多段積層ゴムの水平復元力特性は、加振試験からえられた水平復元力特性と一致した。このことから、多段積層ゴムを用いたマスダンバの振動特性を、多段積層ゴムの静的加力試験から求めることが可能であることが示された。

(4) 要素積層ゴムから求められた復元力特性と、多段積層ゴムの実測値を比較することにより、本マスダンバに用いられた多段積層ゴムの安定板は十分剛であることがわかった。このことから、本マスダンバの固有周期の振幅依存性は、主として要素積層ゴムのゴム材料のせん断弾性係数の非線形性に起因することがわかった。したがって、マスダンバの固有周期の振幅依存性を小さくするためには、ゴム材料の非線形性を改良することが必要であることが示された。

(5) 実大マスダンバの制振性能は、固有周期の振幅依存性により、入力加速度に依存し変化することがわかった。したがって、風応答の場合、風速により制振性能が変化するので、マスダンバの設計では、この点を十分注意する必要があることがわかった。

5・3 多段積層ゴムを用いたハイブリッド型制振装置の開発

5・3・1 まえがき

マスダンバの制振性能は、振動数比が決まれば質量比で決り、性能を向上させようとする質量比を大きくしたり、また、建物の高次モードの振動を抑制するためには、高次モードの固有振動数に同調させたマスダンバをモードの腹にあたる階ごとに設置する必要がある。

質量比1%でも通常の高層ビルでは数100tonにもなり、質量比をこれ以上大きくすることはあまり現実的でない。さらに、高次モードの振動を制御するために各モードの固有振動数にあわせてマスダンバを複数基設置するもの同様にあまり実用的でない。このような問題点を解決するために開発されたのが、ハイブリッドマスダンバである。これはアクチュエータを用い外部からエネルギーを供給し、副振動系の慣性力をより大きくし建物への減衰力を高めて、制振性能を向上させるものである。さらに、制御システムを適宜設計することにより、建物の高次モードの振動まで制御することができる。ハイブリッドマスダンバにはこのように数々の利点がある。しかしながら、大地震などの大きな外乱に対しても十分な制振性能を発揮させようとする、制御力やマスダンバの変位が極端に大きくなってしまいう問題点があった。

ここでは、これらの問題を克服するため、風や小地震ではアクティブ制御を、中および大地震ではアクチュエータから制御力を発生させないパッシブマスダンバに切り換えるアクティブパッシブ切り換え型ハイブリッドマスダンバを開発実用化している。さらに、アクティブ制御時に制振効果を最大限発揮させるため、外乱の大きさによって(実用上は、マスダンバの変位や制御力によって)フィードバックゲインを切り換える可変ゲイン制御則も開発し有効性を確認している。

5・3・2 ハイブリットマスダンパの概要

今回開発されたハイブリットマスダンパが設置された建物は図 5-18 に示すように、地上重量が 40000ton の高層部が南北に張り出した T 型の特徴ある形態をした超高層建物である。南北方向に 8 階以上が 13 層にわたって 19.2m の張り出し部を持ち、東西方向に建物高さ／幅比が 5:1 とスレンダーな形状をしている。このため、強風時と地震時の振動を抑制し居住性を向上を目的にハイブリットマスダンパが屋上に設置された(5-5)~(5-7)。



図 5-18 制振装置を設置した高層ビル

制振装置は、図 5-19 に示すように屋外型 (W18m×D6.5m×H4.5m) で、6 基の蓄熱槽の質量を利用している。可動質量は 194.9t で、建物の 1 次モード質量の 0.65% に相当する。この質量を 6 基の多段積層ゴムで支持し、水平方向に ±1m の変形能力をもつ、原理的に摩擦のない支持機構を実現している。

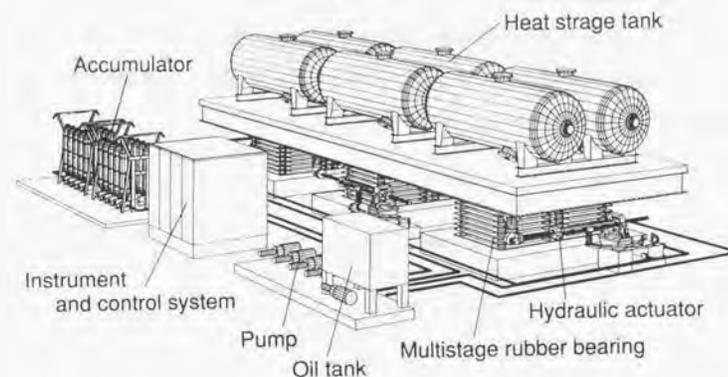


図 5-19 ハイブリットマスダンパ

アクチュエータには、地震時に瞬時的に大きな制御力が発揮できる油圧アクチュエータを採用した。この油圧アクチュエータは 1 本あたり 147kN の推力を有し各方向に 2 本用いている。この他油圧システムは、2400liter の容量のアクュームレータ、出力 30kW の油圧ポンプ 4 台と 11kW のパイロットポンプ 1 台、各方向 2 台のダンパブロックから構成される。表 5-1 に制振装置の主な仕様を示す。

表 5-1 ハイブリットマスダンパの主な仕様

可動質量(ton)	194.9	最大減衰力(kN)	588
固有周期(sec)	3.0	油圧源出力(kW)	131
最大ストローク(m)	±1	システム圧力(MPa)	13.7
最大制御力(kN)	294	アキュームレータ容量(m ³)	2.4

制御方式として、アクティブ・パッシブ切り換え方式を採用し、アクティブモードではコントローラを建物の 1 次モードと 2 次モードを振動を制御対象とし最適レギュレータ理論に基づいて設計した。さらに、地震や風による外乱に応じてフィードバックゲインを切り換えより強い外乱までアクティブ制御が可能ないように開発された可

変ゲイン制御を採用した。パッシブモードでは、制振装置の応答変位によって減衰を切り換えられるようにし、どの強さの外乱においても制振性能がえられるようにした。これらの制御方式を採用することにより強風・中小地震から大地震まで制振装置を稼働させることが可能となった。

5・3・3 建物の動特性

常時微動測定、制振装置を用いた強制振動試験と自由振動試験ならびに地震応答観測結果より求めた建物の固有周期と減衰定数の一覧を表5-2に示す。さらに、地震応答観測結果より解析的にえられた建物の3次モードまでの固有周期と減衰定数を表5-3に示す。

表5-2 建物の固有周期と減衰定数

	固有周期(sec)						等価減衰定数 1次	
	X方向		加速度 (cm/s ²)	Y方向		加速度 (cm/s ²)	X方向	Y方向
	1次モード	2次モード		1次モード	2次モード			
設計値	2.96	0.99	-	2.97	0.92	-	0.02	0.02
常時微動	2.29	0.76	~0.1	2.50	0.75	~0.1	-	-
自由振動実験	-	-	~8	-	-	~8	0.014	0.006
強制振動実験	2.44	0.83	~20	2.60	0.77	~20	0.010	0.010
93.10.12地震	2.38	0.82	~10	2.56	0.76	~12	0.012	0.006

表5-3 建物の同定値

	X方向(長辺方向)		Y方向(短辺方向)	
	固有周期 (sec)	等価減衰定数 (%)	固有周期 (sec)	等価減衰定数 (%)
1次	2.38	1.2	2.56	0.6
2次	0.87	2.0	0.76	1.4
3次	0.37	1.2	0.38	2.0

5・3・4 システム同定試験

制振装置の設置に先立ち、各種デバイスの単体試験と、制振装置の地上試験（図5-20）を実施した。デバイス試験として、多段積層ゴムの加力試験、油圧シリンダの推力測定試験およびアキュムレータの耐圧試験をおこなった。単体試験後、制振装置を地上で仮組し、パッシブモード時の特性を把握するため、自由振動試験による後述のダンピングユニットの性能確認を、アクティブモード時の特性を確認する目的で制振装置の同定をおこなった。



図5-20 地上試験

（1）多段積層ゴムの特性試験

多段積層ゴムは、ゴム部直径 250mm、ゴム厚さ 2.2mm の天然ゴム系ゴムシートを 40 枚積層した要素積層ゴスを 1 段あたり 4 個用い 9 段積み重ねたもので、積載荷重 323kN (33t \bar{f}) に対して、周期 3 秒の水平剛性と 1m の水平変位吸収能力を持つように設計した。要素積層ゴムの 1 次形状係数 S_1 は 28.4、2 次形状係数 S_2 は 2.84 および標準面圧 σ は 1.65MPa であり、通常の使用状態では水平剛性の面圧依存性はない。多段積層ゴムの形状を図 5-21、仕様を表 5-4 に示す。多段積層ゴムの安定板には厚さ 19mm の平鋼を角形鋼管で補強したものをを用いた。多段積層ゴムの復元力特性ならびに減衰特性を把握するため静的加力試験と自由振動試験を実施した。静的加

力試験では、積載荷重 33t \bar{f} に相当する鋳鉄製重りを多段積層ゴムに載荷し水平変位 1m までの復元力特性を測定した。図 5-22 は多段積層ゴムの復元力特性である。多段積層ゴムの減衰特性は、人力加振による自由振動実験から求めた。測定より求められた多段積層ゴムの等価減衰定数は 3%であった。

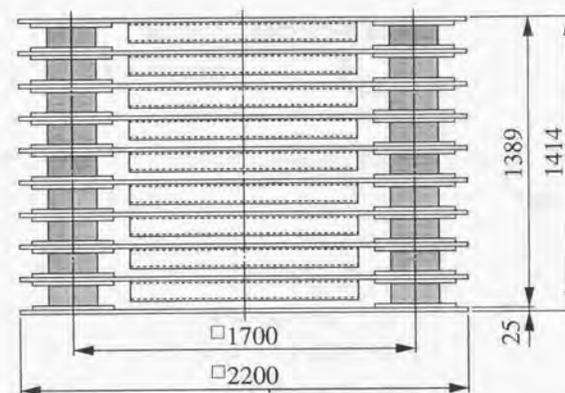


図 5-21 多段積層ゴム

表 5-4 多段積層ゴムの主な仕様

定格積載質量(ton)	33
水平方向ばね定数(kN/m)	1.43×10^5
鉛直方向ばね定数(kN/m)	2.10×10^8
水平方向許容変位(m)	1.0

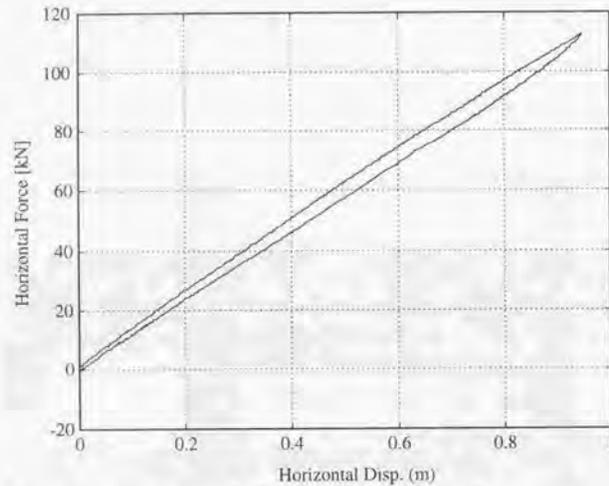


図 5-22 多段積層ゴムの復元力特性

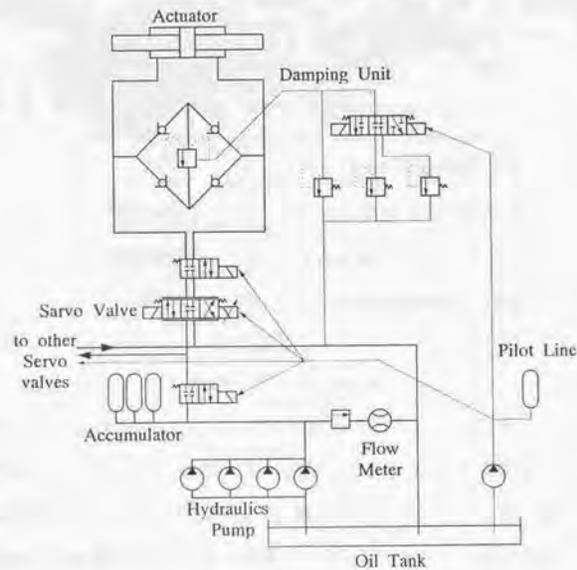


図 5-23 油圧回路

(2) 油圧システムの概要

本制振装置に用いられた油圧システムは、油圧シリンダ、油圧源、アキュムレータ、サーボ弁およびリリーフ弁とチェック弁を組み合わせたダンピングユニットなどから構成される。図 5-23 は本アクティブ制振装置に用いられた油圧回路図で、切換弁（図中サーボ弁のすぐ上にある）の開閉により、アクティブ・パッシブ切換え方式を実現している。また、作動流体は、難燃性作動流体の水-グリコールを用いた。

(3) パッシブモード時の特性試験

パッシブモードのとき、制振装置に減衰力を発生させるためのリリーフ弁の特性を自由振動試験より確認した。試験では、制振装置をあらかじめ変位させたのち、パッシブモードに切換え自由振動させた。図 5-24 は、リリーフ弁を開放にしたときの実測とシミュレーションとの比較である。両者はよく一致しており適切なモデル化がなされていることがわかる。また、リリーフ弁は全部で3個用いており、設定圧力は3段階にとることができ、パッシブモードのとき、減衰力を可変にできる。

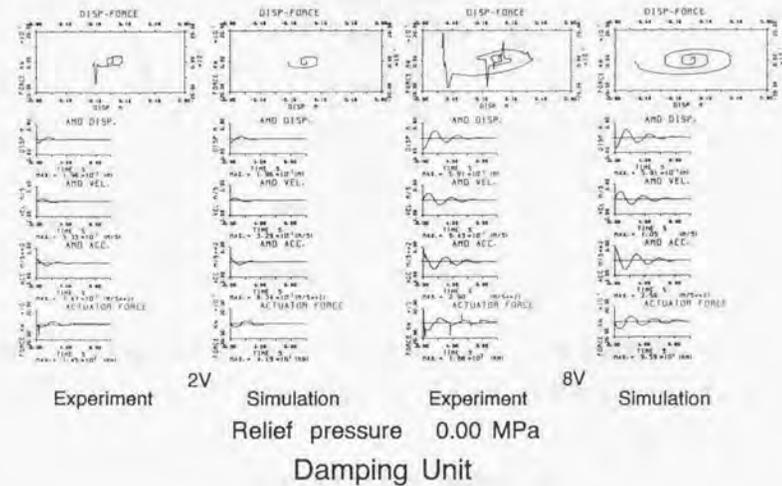


図 5-24 ダンピングユニットの減衰力特性

(4) アクティブモード時の特性試験

図 5-25 に、サーボンプに供給する制御電圧から、制振装置変位、速度、加速度および油圧アクチュエータ制御力までの伝達関数を示す。図中の破線は、各要素の単体試験よりえられたパラメータを用い、油圧システムを 1 次遅れ系で近似した場合の計算値であり、実験値とよく一致している。

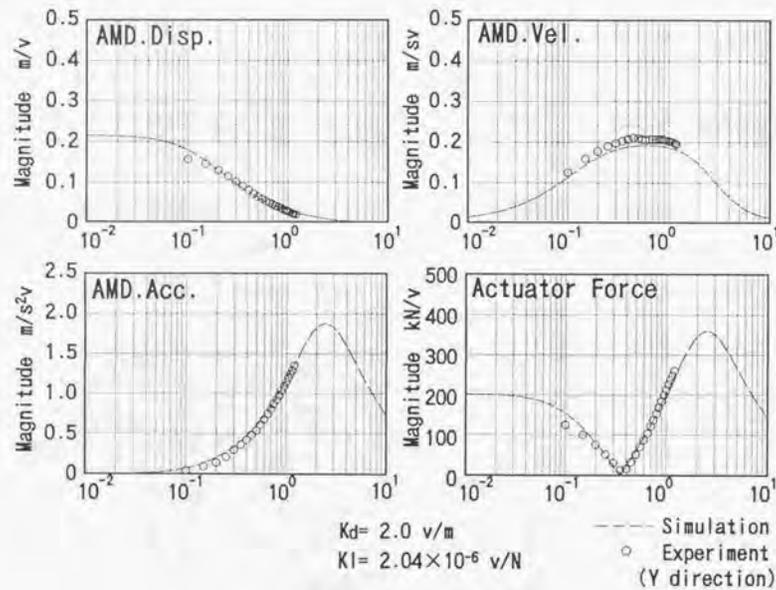
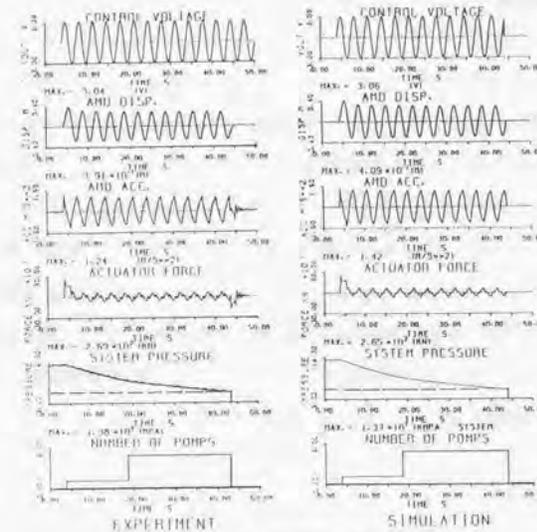


図 5-25 制振装置の伝達関数

このとき、制振装置のドリフト防止と加速度波形の高調波成分を抑制するため、変位および荷重をマイナーフードバックした。変位と荷重のフィードバックゲインは以下のように定めた、

$$K_d = 2.0 (\text{V/m}) \quad K_f = 2.04 \times 10^{-6} (\text{V/N})$$

図 5-26 は、制振装置を大変位で連続稼働させた時の、制振装置のシステム圧力の変化を測定結果とシミュレーション結果とで比較したものである。両者は非常によく一致しており、油圧システムのモデル化が良好になされていることが確認された。



0.33Hz 3.0V

図 5-26 正弦波加振試験（油圧システムの同定）

5・3・5 振動制御試験

(1) 制振システムの概要

アクティブモードの状態フィードバック制御では、状態量として、建物の1次モードと2次モードの変位、速度、制振装置の設置階との相対変位、相対速度およびアクチュエータの制御力を用いる。これらの状態量は、図5-27に示すように、建物の1階、6階、10階、16階および屋上階の設置された振動センサ^(5・8)と油圧アクチュエータに内蔵された変位センサとロードセルより測定されたデータをもとに計算される。建物の1次モードと2次モードの変位と速度は、各階の地表面との相対変位と相対速度からモーダルフィルターにより算出される。制御では、後述のように、制振性能の異なった2組のフィードバックゲインを用意し、システム圧力、制振装置変位および制御力をもとにファジー推論を用いゲインを切り換えている。

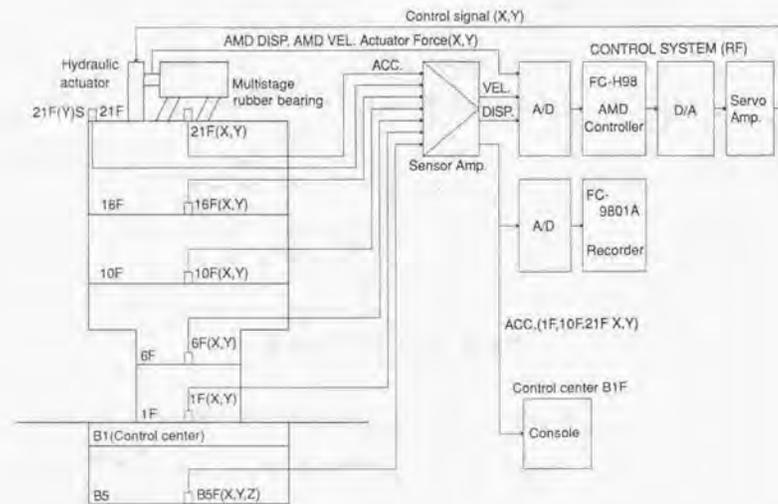


図5-27 制振システムの概要

なお、制御用計算機には、32ビットCPU(80486DX)を積んだファクトリコンピュータを用いた。制御時のサンプリング間隔は、10msである。

各階に設置された加速度センサの測定値、屋上階に設置された風向風速計の測定値および制振装置の状態(移動、故障など)は、地下階に設置された防災センタで、常時監視できるようになっている。

地震外乱に対するトリガは、B5階および1階の加速度とし、風外乱に対するトリガは、屋上階および16階の加速度とした。制振装置は、外乱および応答がいずれも 0.02m/s^2 になったとき制御を開始し、建物の応答加速度が、 0.02m/s^2 以下でかつ、制振装置の変位振幅が 0.1m 以下になったとき、制御を中止する。

(2) 制振性能の確認

屋上階に設置した制振装置(図5-28)を起振機として用い建物を加振した後、制御をおこなって振動を抑える試験をおこなった。加振は、正弦波加振で振動数は建物の1次モードおよび2次モードの固有振動数とした。フィードバックゲインは建物の見かけの減衰を基準に2組のゲインを用意し、減衰が大きいのをゲイン1とし、減衰が小さいものをゲイン2とした。試験では、ゲイン1として、建物の1次モードと2次モードの減衰とともに、7%、10%および15%に相当するものを用いた。また、ゲイン2は、建物の1次モードと2次モードの減衰とともに4%にするものを採用した。

図5-29は、建物を1次モードの固有振動数で加振した後、自由振動させた場合、加振した後に制御をした場合の、短辺方向(Y方向)の応答である。自由振動では、建物の減衰が小さいため(0.6%)加振終了後2分以上経過しても振動が継続しているが、制御をおこなった場合はいずれのゲインでも、加振後数波で振動が収束している。図5-30は、建物を2次モードの固有振動数で加振した場合の応答の例である。これより、建物2次モードの振動に対しても、アクティブ制振装置が有効に機能していることが確認された。



図 5-28 制振装置（設置後）

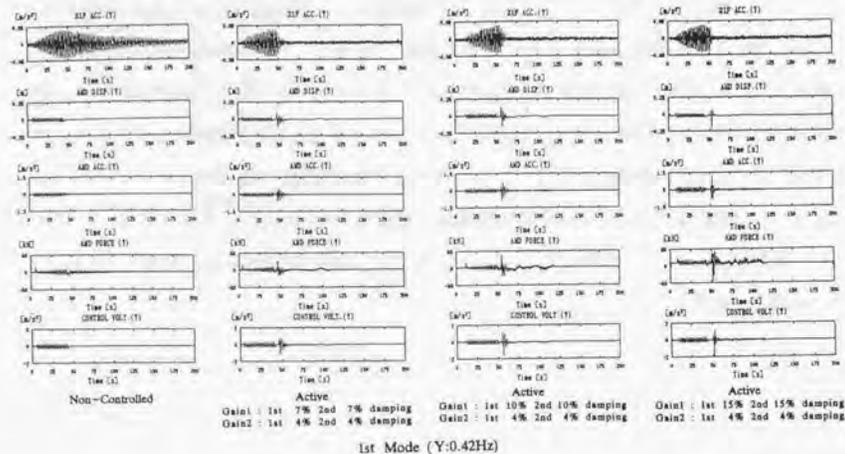


図 5-29 制御試験結果（1次モード固有振動数加振 Y方向）

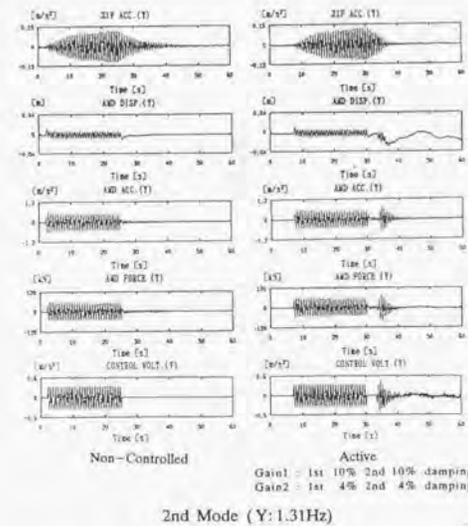


図 5-30 制御試験結果（2次モード固有振動数加振 Y方向）

表 5-5 制振装置の安全対策

	項目	制御モード	自動復帰の可否	防災センタ表示
1	油温異常上昇	PMD 3	不可	システム断
2	液面異常低下	PMD 3	不可	システム断
3	システム圧力異常	PMD 3	不可	システム断
4	ダンパブロック温度異常上昇	PMD 3	不可	システム断
5	油圧源動力異常	PMD 3	不可	システム断
6	シリンダセンサ異常	PMD 3	不可	システム断
7	振動計測システム異常	PMD 3	不可	システム断
8	制御用計算機異常	PMD 3	不可	システム断
9	制御信号線異常	PMD 3	不可	システム断
10	動力系電源停電	PMD制御	可	
11	制御系電源停電	PMD制御	可	
12	無停電電源電圧異常	PMD 3	不可	システム断
13	落雷	PMD 3	不可	システム断

(3) 安全対策

本制振装置では、表 5-5 のように発生しうる故障を、油圧系、振動計測（センサ）系、制御系に分類し、これらの故障や障害が発生した場合、制御を中止し、パッシブ

モードに切り換えることにした。制振装置の運用開始に際しては、事前にこれらの故障や障害を意図的に発生させ安全装置が確実に機能することを確認した。

5・3・6 シミュレーションによる制振効果

(1) 制御方式の概要

本制振装置では、図 5-31 にその概念を示すように、アクティブ・パッシブ切り換え方式、可変ゲイン制御則を適用し、さらにパッシブモード内での減衰力の切り換えなど、制御においていくつかの切り換えをおこなう。

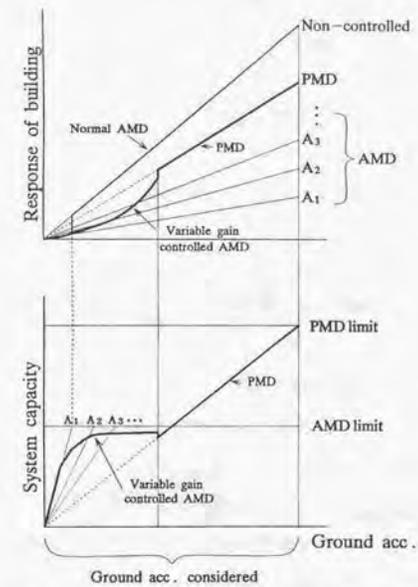


図 5-31 ハイブリッドマスダンパの概念

(2) 可変ゲイン制御則

アクティブ制御では、より大きな外乱までアクティブ制御を続けるために可変ゲイン制御則を適用する。使用するフィードバックゲインは2種類(制振効果の高い方をゲイン1、低い方をゲイン2とする)でファジー切り換えをおこなう。切り換えは、システムの能力を表す指標としてマスダンパ変位 x_d 、システム圧力 p_s 、システム圧力に対する負荷圧力(制御力 p_l)の割合 p_l/p_s をもとにおこなう。図 5-32 に制御領域のファジー分割を示す。ここにゲイン1での制御を f_1 、ゲイン2での制御を f_2 とする。

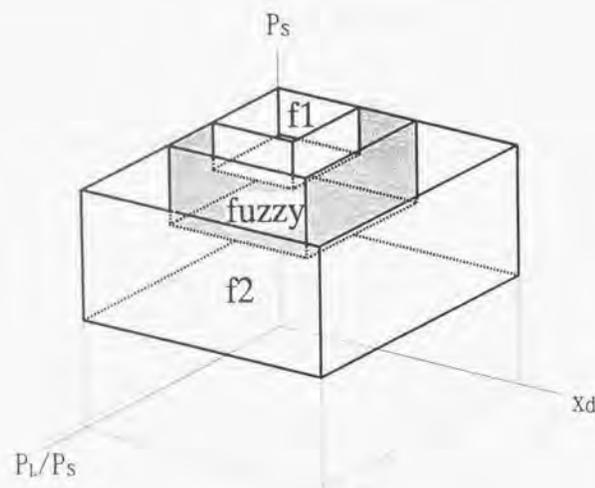


図 5-32 領域のファジー分割

(3) アクティブ・パッシブ切り換え則

アクティブからパッシブへ、およびパッシブからアクティブへの切り換えはシステム圧力とマスダンパ変位に注目し、以下の条件でおこなう。なお、制御力に関してはそのまま飽和させて制御を続けるものとする。

if ($p_s < p_f$) or ($x_d > DA$) then Active mode \rightarrow Passive mode

if ($p_s > p_f + p_y$) and ($x_d < DP$ for 2.5sec) then Passive mode \rightarrow Active mode

ここに、 p_f はシステム圧力の下限值、 p_y はアクティブパッシブの切り換えが頻繁に起こらないように定めた圧力のマージンである。

(3) パッシブモードでの切り換え則

パッシブモードで考慮すべき作動限界はマスダンパ変位のみである。切り換えはクリップ切り換えで、その概要を図 5-33 に示す。設定圧力すなわち減衰力の小さい順に P_1 、 P_2 、 P_3 とし、切り換えの判断に用いるのはマスダンパの相対変位 x_g 、変位方

向の速度 \dot{x}_g の 2 つを用いる。切り換え条件は以下に示す通りである。

① ($x_g > DP1$) or ($(x_g > DP2)$ and ($\dot{x}_g > VP2$))

② ($x_g > DP3$) or ($(x_g > DP4)$ and ($\dot{x}_g > VP4$))

③ ($x_g > DP5$) and ($\dot{x}_g > VP5$)

④ ($x_g < DP6$ for 2.5sec)

⑤ ($(x_g > DP7)$ or ($(\dot{x}_g < VP8)$ and ($\ddot{x}_g < AP8$)) for 10.0sec)

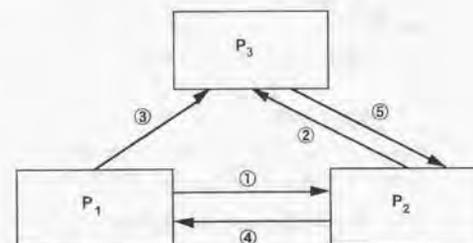
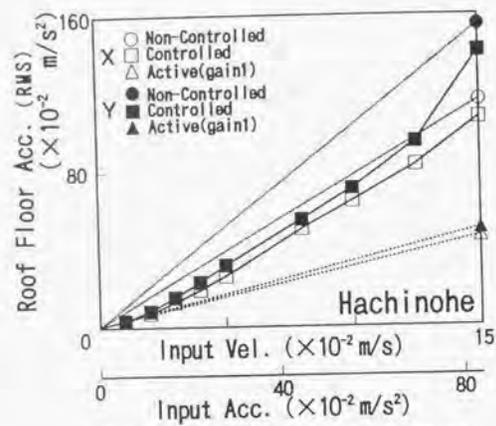


図 5-33 パッシブモードでの切り換え

(5) シミュレーションによる制振性能の解析

図 5-34 は十勝沖地震の八戸波に対する制振性能で、小外乱に対しては強い制御をおこない、外乱が大きくなるにしたがって極端に性能を劣化させることなく制御をしていることがわかる。

図 5-35 は、風外乱に対する制振性能である。解析は建物の短辺方向（南北方向）で風と直角方向の振動を考えている。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おこない、建物の 1、2 モードに対するモード外力として与えている。本制振装置はアクチュエータが大容量であり、再現周期 500 年までの風に対する応答を考えてもほとんどパッシブモードに入ることはなく、建物の最上階加速度を rms 値で常に 50% 程度に抑制することが可能である。



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

図 5-34 八戸波に対する制振性能

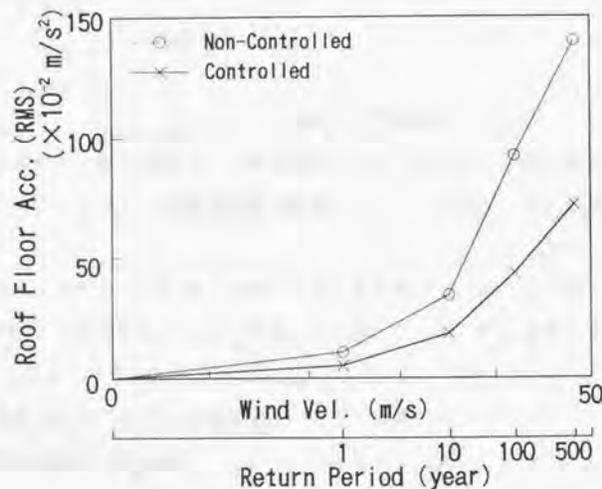


図 5-35 風外力に対する制振性能

5・3・7 風・地震観測結果

図 5-36 は風に対する応答である。上から制御モード、屋上階での風速、Y 方向の屋上階の速度、マスダンバ変位、制御力である。建物の形状から X 方向の風による揺れは Y 方向と比較して非常に小さい、この観測例では、非制振状態（待機状態）から約 50 秒すぎにマスダンバが制御状態に入っており、制御開始後マスダンバが 2~3 ストローク動いただけで建物振動をほとんど抑えてしまっている。

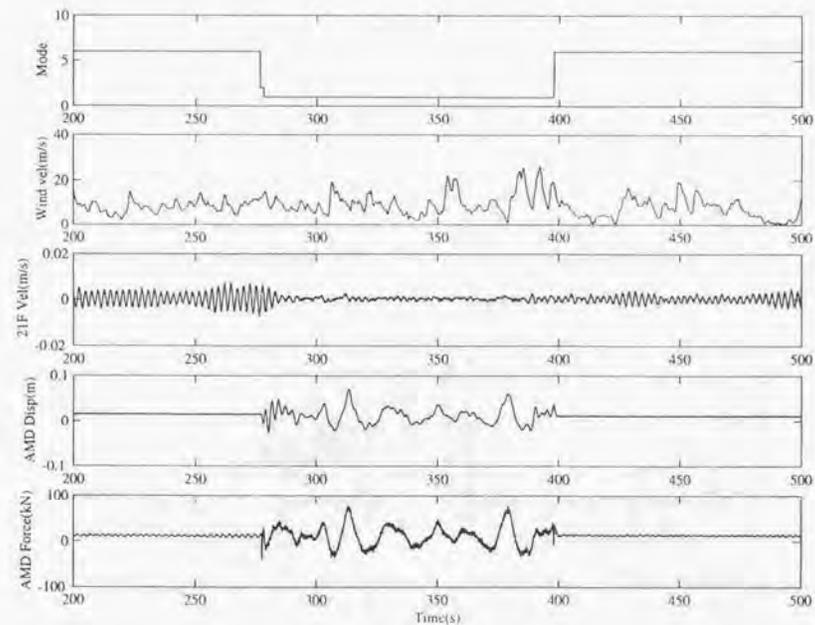
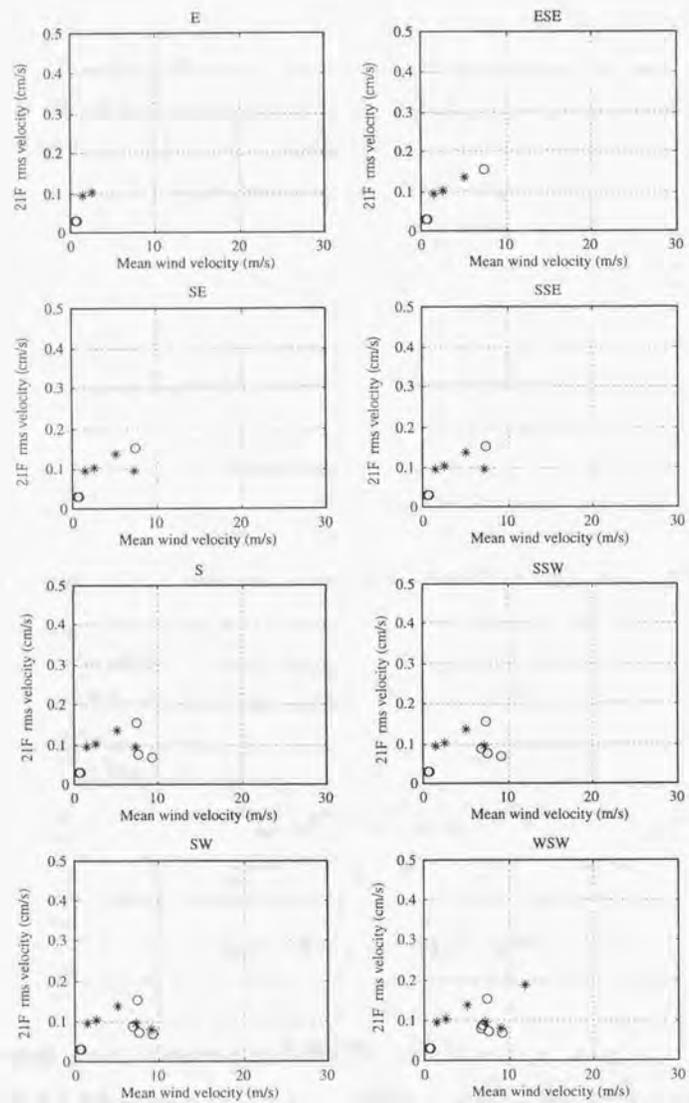


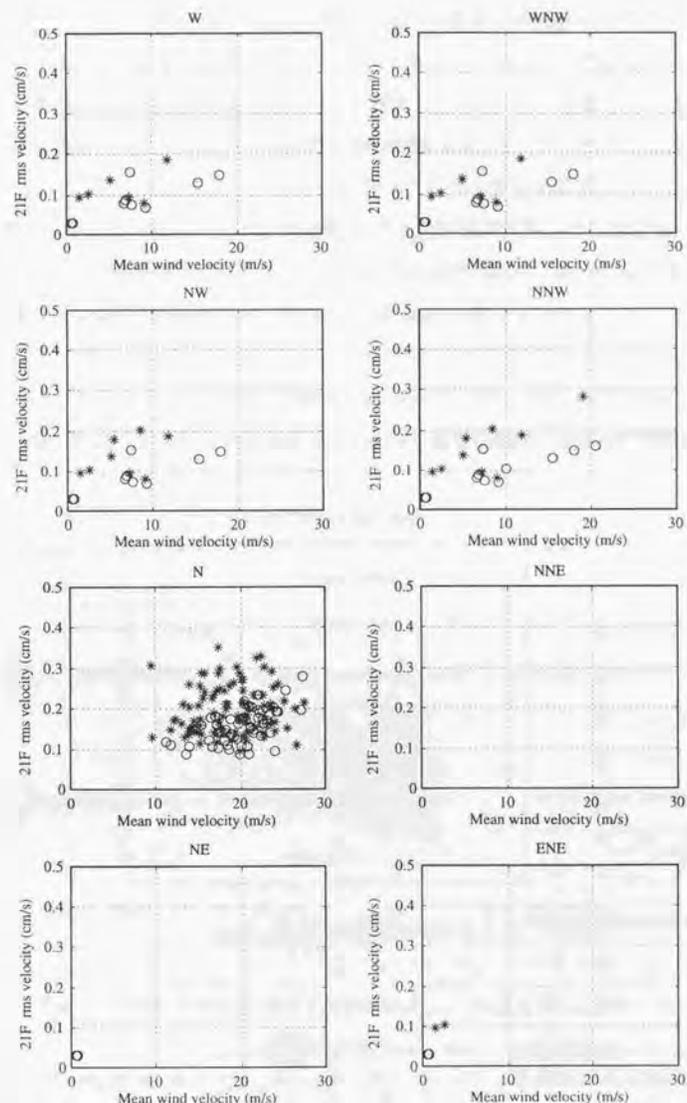
図 5-36 風に対する応答(Y 方向)

図 5-37 と 5-38 は、1993 年 11 月からおこなった風観測結果のなかで、台風と季節風で比較的長時間稼働した場合の、建物短辺 (Y) 方向 21 階の絶対速度と風速の関係を風向別に分類で示したものである。絶対速度は 60 秒ごとの rms 値で、風速は同じく 60 秒ごとの平均値である。図中の○印は、ハイブリットマスダンバが稼働して



○は制振, *は非制振

図 5-37 建物 21 階 Y 方向 rms 絶対速度と平均風速の関係 (その 1)



○は制振, *は非制振

図 5-38 建物 21 階 Y 方向 rms 絶対速度と平均風速の関係 (その 2)

いる時の、*印は非稼働時の結果を示している。観測結果は、意図的にハイブリットマスダンパを停止させて比較している訳ではないので、厳密な意味での比較とはなっていないが、ハイブリットマスダンパ稼働直前の状態とは比較できる。この観測結果からも、ハイブリットマスダンパの制振効果を検証することができる。風向別には、N方向の風により建物が振動し易いことがわかった。

図5-39は、風向Nの建物短辺(Y)方向21階の絶対速度と風速の関係を非制振(非稼働)時と制振(稼働)時別に回帰分析したもので、この解析結果からは、ハイブリットマスダンパの稼働により建物rms絶対速度を約30%低減していることがわかった。

ただし、先にも述べたとおり、この結果は強風時にハイブリットマスダンパに停止させた訳ではないので、実際の制振効果は、この結果より大きいものと推定される。

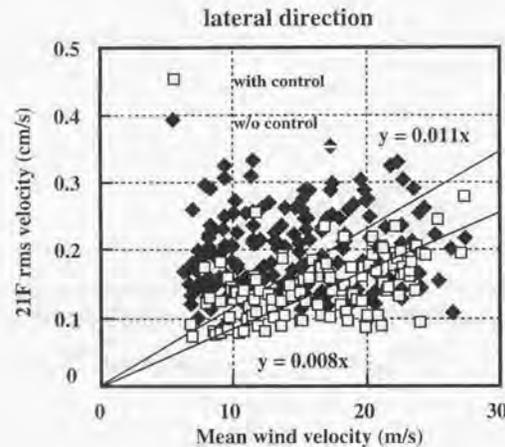


図5-39 建物21階Y方向rms絶対速度と平均風速の関係(風向Nの場合)

次に、地震応答観測結果について述べる。図5-40に1994年12月28日の三陸はるか沖地震の応答を示す。震源は八戸市の東方約200kmの地点で、マグニチュード7.5、東京の震度はIIであった。図は上から地動加速度、屋上階加速度、屋上階変位、マスダンパ変位、制御力で、左が非制振の場合、中央が観測結果、右が解析モデルに

よるシミュレーションで、すべてY方向のデータである。観測値とシミュレーションでは、シミュレーションの屋上階応答にパルス的な高振動数の成分が数カ所認められるが、その他はよく一致しており、屋上階加速度で約50%、rms値で約30%低減している。なお、ハイブリットマスダンパは常にアクティブモードで、パッシブモードに切り替わることはなかった。

図5-41は、このときの地上階加速度に対する屋上階加速度の応答倍率である。実線がアクティブ制御をおこなった場合、破線が非制振の場合(竣工前の振動実験による観測値を使用した理論値)で、制御対象とした建物の1次モードと2次モードの応答がよく抑えられている。特に、1次モードの応答倍率は非制振で45あったものが、制御することにより5以下に抑えられている。また、2次モードの応答倍率も約半分に低減できている。さらに、高次モードについては、3Hz以上で応答倍率が制御時に

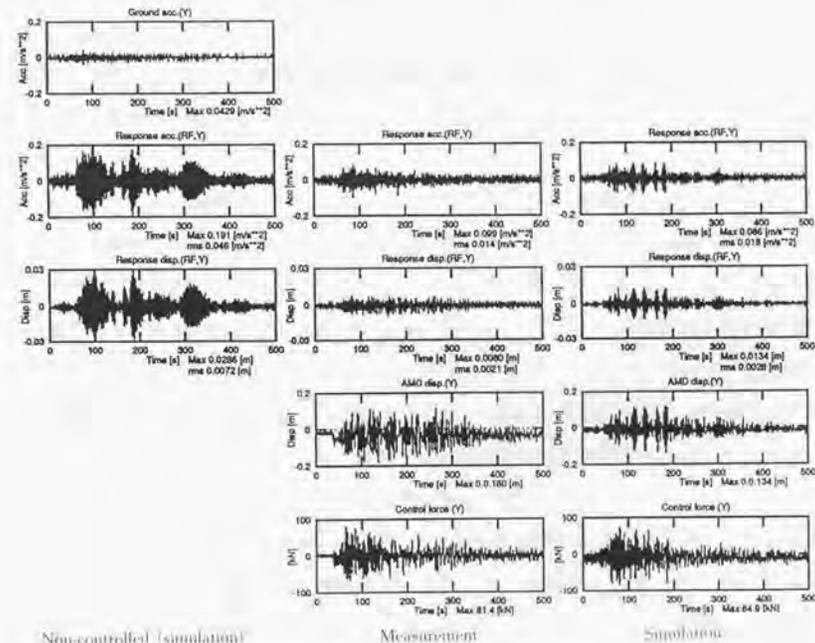


図5-40 地震応答観測結果(Y方向)

非制振時より多少大きくなっているが、特に、特定の振動数で増幅するなどの発振現象や不安定などは認められなかった。

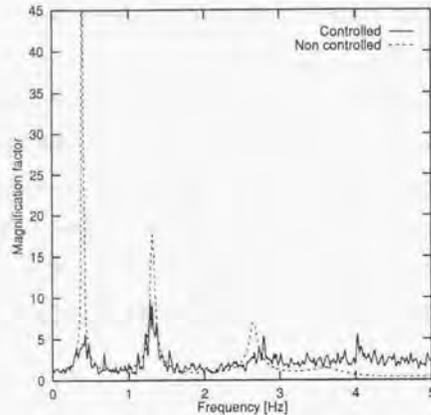


図 5-41 建物加速度の応答倍率 (Y 方向)

5・3・8 まとめ

多段積層ゴムを用いたアクティブパッシブ切り換え可能なハイブリッドマスダンバを開発し、これに可変ゲイン制御則と減衰力切り換え方式を用いることにより広範囲の外乱に対し制振効果を有効に発揮できることを実験とシミュレーションより示した。地上実験および設置時の振動実験から以下の結果がえられた。

(1) 定格質量 33ton、水平固有周期 3 秒の多段積層ゴムを製作し、大変形加力実験から、水平変位 1m の変位吸収能力を確認した。これらの多段積層ゴムを 6 基と油圧アクチュエータを用いることによって、振動質量 200ton、水平固有周期 3 秒、変位吸収能力 1m、制御力 294kN (各 X,Y 方向ごと) のハイブリッドマスダンバを実現することができた。

(2) 地上実験では、油圧回路を切り替えることにより、油圧回路をオイルダンバとして機能させ、リリーフ弁と電磁弁を組み合わせ減衰力を可変にできる機構を考案し、所定の減衰力を発生させられることが確認された。減衰力については、切り替え時に生じる衝撃力を除いてほぼモデル化できた。したがって、パッシブマスダンバとして使用時、過大な外乱が入力された場合 (大地震時を想定) には、振動質量の過度な変形を防止できることがわかった。

(3) アクティブ制御では、モーダルフィルタを用いて、建物の 1 次モードと 2 次モードの振動を制振するコントローラを実現した。また、可変ゲイン制御 (ゲインスケジュール) を考案し、システム圧力 P_s 、マスダンバ変位 X_d とシステム圧力に対する負荷圧力 (制御力) P_L の比に応じて、フィードバックゲインを制御効果の高いゲイン (ゲイン 1) から制御効果の低いゲイン (ゲイン 2) にファジー則を用い段階的に切り替えいくことにより、より大きい外乱までアクティブ制御と続けられることをシミュレーションから示した。なお、設置時の制御実験では、建物の 1 次モード減衰を非制振の 0.6% から 20% まで増やせることが確認された。

(4) 風・地震応答観測結果から強風時と地震時の制振効果を検証できた。風応答観測では、非制振時と比較して、制御時には、建物の応答加速度と速度をそれぞれ約 30% 低減できていることがわかった。また、地震観測結果では、屋上階加速度で約 50%、rms 値で約 30% 低減していることがわかった。また、この時の地動加速度は 49.2cm/s^2 であったが、制御ゲインはゲイン 1 のままでファジー領域に入ることはなかった。

5・4 多段積層ゴムを用いたマスダンパの実用化例

多段積層ゴムを用いた質量効果型制振装置（マスダンパ）は、1988年に開発着手して以来現在まで、20棟を越える実用化例がある。この間日本国内では、アクティブ（ハイブリット）マスダンパが30棟設置されている^(5・9)、現在、このマスダンパは、風による振動を抑え居住性を改善させるため、超高層建物に設置される例が多い。この他、特徴的なものとしては、高減衰多段積層ゴムを用いた制振装置が、電波棟の地震時の耐震補強のため使用されている。これは、大地震時に鉄塔に作用する外力を高減衰多段積層ゴムを用いたマスダンパによって低減しようとするものである。現時点で、この種のマスダンパの設置例は8棟ある。図5-42に設置例の写真を示す。この電波塔用制振装置は、今後も設置が予定されており1999年末までに、実施例は13棟まで増える予定である。

表 5-6 多段積層ゴムを適用したマスダンパの実用化例

No.	建物						制振装置			
	名称	所在地	軒高 [m]	床面積 [m ²]	用途	竣工	固有周期 [sec]	分類	駆動機構	備考
1	清水建設実験棟	東京	30	-	実験棟	1991	1.05	TMD	-	天然ゴム
2	ゆめろぼとドーム塔	長崎	105	-	展望塔	1991	2.5	TMD	-	天然ゴム
3	千駄ヶ谷インテス	東京	58	10602	事務所	1992	1.7	HMD	油圧	天然ゴム
4	ORC200	大阪	188	72097	複合	1992	4.72	HMD	サーボモータ	天然ゴム
5	阪急茶屋町ビル	大阪	147	89868	複合	1992	4.48	HMD	油圧	天然ゴム
6	ポルタ金沢	石川	130.6	-	複合	1992	2.9	HMD	油圧	天然ゴム
7	NTT小田原	神奈川県	-	-	電波塔	1992	-	TMD	-	高減衰ゴム
8	NTT伊東	静岡県	-	-	電波塔	1993	-	TMD	-	高減衰ゴム
9	新潟県某研究棟	新潟	-	-	事務所	1993	-	TMD	-	天然ゴム
10	日本長期信用銀行	東京	140	62812	事務所	1993	3	HMD	油圧	天然ゴム
11	秋田タワー	秋田	112	4773	展望塔	1994	2.44	TMD	-	天然ゴム
12	宮崎シグナルビル	宮崎	154	-	ホテル	1994	3.4	HMD	サーボモータ	天然ゴム
13	NTT唐ヶ崎	東京	-	-	電波塔	1994	2.5	TMD	-	高減衰ゴム
14	NTT和歌山	和歌山	-	-	電波塔	1996	-	TMD	-	高減衰ゴム
15	NTT関目	大阪	-	-	電波塔	1997	-	TMD	-	高減衰ゴム
16	NTT姫路	兵庫	-	-	電波塔	1997	-	TMD	-	高減衰ゴム
17	NTT奈良大安寺	奈良	-	-	電波塔	1997	-	TMD	-	高減衰ゴム
18	NTT和歌山京橋	和歌山	-	-	電波塔	1997	-	TMD	-	高減衰ゴム
19	仙台アエル	宮城	145.5	73131	事務所	1998	-	TMD	-	天然ゴム
20	横浜相鉄ビル	神奈川県	115	68954	複合	1998	3.34	HMD	サーボモータ	天然ゴム
21	品川イオンタワー	東京	144.2	-	事務所	1999	4.32	HMD	サーボモータ	天然ゴム
22	JRセントラルタワー	愛知	245.1	417182	複合	2000	-	HMD	油圧	天然ゴム

また、第2章で加力実験をおこなった多段積層ゴムは、表5-6の例4に使用されて

いる。このマスダンパは、振動質量100ton、固有周期4秒、変位吸収能力1mのACサーボモータを用いたハイブリットマスダンパで、建物屋上階の両端に各1台、合計2台設置され、主として風による建物の並進とねじれ振動を制御するため使用されている。図5-43に設置例を示す。



図 5-42 電波塔に設置されたマスダンパの例



図 5-43 高層建物に設置されたマスダンパの例

5・5 結語

多段積層ゴムを建物用質量効果型制振装置に適用するための実用化研究をおこな
い、パッシブ型マスダンバ、油圧アクチュエータを用いたパッシブ-アクティブ切り
替え型ハイブリッドマスダンバをそれぞれ開発し実用化した。

第5章の参考文献

- (5-1) H. Kitamura, T. Fujita, T. Teramoto and H. Kihara, Design and analysis of a tower structure with a tuned mass damper, Proc. of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, VIII(1988), 415.
- (5-2) 吉田英敏・立見英司・野路利幸・小坂英之, スロッシングを利用した制振装置の研究 (その6) 高層タワーへの適用とその振動実験(1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1988, 567-568.
- (5-3) 藤井邦雄・大築民夫・佐藤孝典, 液体のスロッシングを利用した制振装置の実証実験—横浜マリントワーの風による振動の制振効果—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1988), 561-562.
- (5-4) 藤田隆史, XY 運動機構を用いた高層建物制振用マスダンバの開発と実用化, 生産研究, 第42巻5号, (1990), 263-268.
- (5-5) 北村春幸・藤田隆史・寺本隆幸・山根尚志・原田公明, AMDを設置した高層建物の設計と解析—設計概要及び効果の検証(その1)—, 日本建築学会学術講演梗概集B構造I, 1992, 965-966.
- (5-6) 山根尚志, 北村春幸・藤田隆史・寺本隆幸・滝沢総, AMDを設置した高層建物の設計と解析—エネルギーの釣り合いに基づく評価(その2)—, 日本建築学会学術講演梗概集B構造I, 1992, 967-968.
- (5-7) H.Kitamura, T.Fujita, T.Teramoto and T.Yamane, Design and Analysis of a Tall Building with an Active Mass Damper, Proc. 10WCEE, Vol.4, 1992, 2061-2067.
- (5-8) 金沢純一, 田矢晃一, 福島健二, 位相保証型振動センサのアクティブ制振装置への適用, 日本音響学会講演論文集, 1994年10月, 599-600.
- (5-9) 藤田隆史, 建築構造物におけるアクティブ振動制御の実用例, 計測と制御, 第37巻, 第8号, (1998), 563-565.

第6章 多段積層ゴムの免震装置への適用

6・1 緒言

建物や構造物の固有周期を地盤の加速度の周波数成分と比較して意図的に長くして、建物や構造物の応答加速度を低減する技術／構造を免震技術／構造と呼んでいる。免震性能は、地動加速度に対する応答加速度で示され、通常、建物の固有周期を長くするほど良くなる。しかしながら、建物を免震するためには、第1章の式(1-1)に示されるように免震装置の水平剛性を限りなく小さくしなければならない。

通常、建築免震装置用積層ゴムは鉛直支持荷重 980~4900kN に対して、水平方向に 2.0~3.0 秒の固有周期となる剛性と 0.2~0.3m 程度の変位吸収能力をもつように設計される。また、床免震装置は 100kN 程度までの支持荷重に対して、周期 2 秒程度あるいはそれ以上になるような水平剛性と水平変位吸収能力 0.2~0.3m が必要とされる。さらに、機器免震装置では、10kN 程度の極めて小さな支持荷重に対して床免震装置と同様固有周期となるような水平剛性と同等な水平変位吸収能力が要求される。しかし、免震装置として積層ゴムをそのまま適用しようとすると、第1章でも述べたように、より小さな鉛直支持荷重では、通常の積層ゴムでは剛性を免震に要求される程度に低くすると、積層ゴムは 2 次形状係数が小さくなり、形状がスレンダーになって、地震時に必要とされる変位吸収能力を確保することはできなくなる。

ここでは、これらの問題点を解決するため、多段積層ゴムを用いた建物用免震装置、床免震装置および機器免震装置の実用化研究をおこなう。最初に、建物免震装置として、従来の構造の積層ゴムでは実現できなかった水平固有周期 4 秒となるような長周期免震装置の実用化を目指し、定格軸力 882kN と 1470kN、変位吸収能力 0.4m の多段積層ゴムを開発する。

続いて、高減衰多段積層ゴムを用いた免震床を提案し、定格軸力 19.6kN、水平固有周期 1.7 秒、変位吸収能力 0.15m の高減衰多段積層ゴムを製作し、静的加力実験と振動台実験から免震効果を検証している。振動台実験では、5 階建ての建物を想定し、免震床が 5 階に設置された条件で、地震床応答波を振動台入力として入力している。

最後に、高減衰多段積層ゴムを用いた機器免震装置を開発し、重要文化財の黄銅製仏像の免震装置に適用している。

6・2 建築免震装置用多段積層ゴムの開発

6・2・1 はじめに

建築免震用多段積層ゴムは、第5章で述べた制振装置用に比較して、鉛直支持荷重が大きいという特徴はあるが、基本的な構造は同じである。鉛直支持荷重が大きいことより、安定板の曲げ剛性も大きくする必要があり、結果として安定板の板厚も増す。

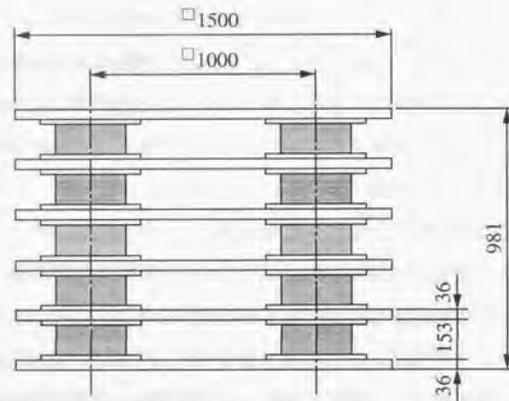
この節では、半導体工場を想定した精密加工工場の実験建物⁽⁶⁾用に開発された多段積層ゴムの大変形加力試験について述べる。実験では、鉛直支持荷重 882kN および 1470kN に対して、水平方向に、変位吸収能力 0.4m、目標固有周期 4 秒の天然ゴム系（低減衰）多段積層ゴムを設計し、各々、大型 2 軸加力試験装置を用い、定格支持荷重において、変位 0.4m のまでの水平復元力特性、鉛直変位特性および安定板に発生する曲げひずみを測定している。

この他、882kN 用多段積層ゴムについては、第3章および第4章で述べた、2 軸偏心試験装置を用い、水平復元力特性におよぼす軸力と回転拘束度の影響を実験的に調べている。つづいて、要素積層ゴムの非線形はり要素モデルの剛性マトリックスの各要素を実験的に求め、多段積層ゴムの剛性解析を実施している。えられた水平復元力特性は、実験結果と比較的によく一致しており、本論で提案した剛性解析の手法の妥当性を検証することができた。さらに、多段積層ゴムの安定板の曲げひずみ測定の結果、変形特性の実験と解析の結果から、定格支持荷重および変位吸収能力に対して、安定板が十分剛であることが確認された。

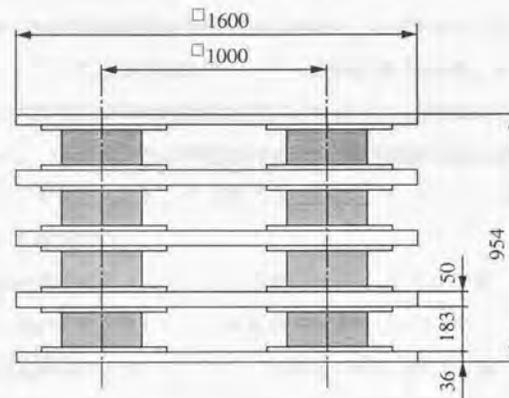
本章で開発された多段積層ゴムは、実大の建物に採用され、従来実現が困難であった周期 4 秒という長周期な免震建物を実現された。

6・2・2 免震建物用多段積層ゴム

図6-1に軽量建物免震用多段積層ゴムの基本構造を示す。定格軸力882kN用多段積層ゴムは5段、1470kN用は4段で、各段の四隅に図6-2に示す要素積層ゴムを配置している。多段積層ゴムの水平剛性は各定格荷重に対して4秒の固有周期をもつように設計している。また、水平変位吸収能力は0.4mを最低限確保するようにしている。

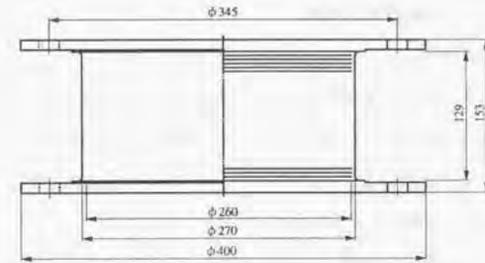


(a) 882kN用



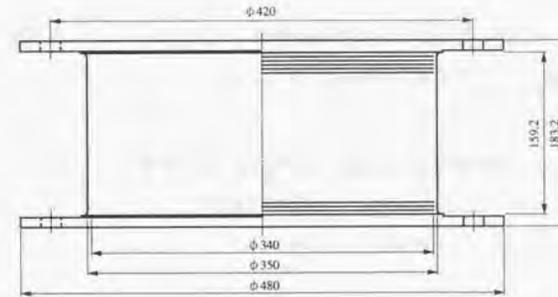
(b) 1470kN用

図6-1 軽量建物免震用多段積層ゴム



ゴム 2.1×48層=100.8
補強板 0.6×47層=28.2

(a)882kN (220.5kN) 用



ゴム 3.2×40層=128
補強板 0.8×39層=31.2

(b)1470kN (367.5kN) 用

図6-2 要素積層ゴム

要素積層ゴムは、定格荷重220.5kN(882kNの1/4)のものは48層、367.5kN(1470kNの1/4)のものは40層積層している。各層は天然ゴムのシートと鋼板から構成され、ゴムシートと鋼板は加硫接着している。要素積層ゴムの1次形状係数 S_1 は、220.5kN用で31.0、367.5kN用で26.6である。2次形状係数 S_2 は、220.5kN用で2.58、367.5kN用で2.66である。標準面圧 σ は、それぞれ、220.5kN用で4.15MPa、367.5kN用で40.5MPaである。第5章の制振装置用多段積層ゴムの要素積層ゴムと比較して、標準面圧は2~3倍程度大きく、2次形状係数は、0.5程度小さいのが特徴となっている。

6・2・3 要素積層ゴムの静的加力試験

(1) 組み合わせ加力試験

要素積層ゴムの水平剛性、鉛直剛性および曲げ剛性を測定するため、組み合わせ加力試験をおこなった。試験は、第3章で示した二軸偏心試験装置を用いておこなった。

図6-3は定格荷重220.5kNにおける要素積層ゴムの水平復元力特性である。試験では、最初に、積層ゴムの上端の回転を0radに拘束した状態で水平方向にゴムせん断ひずみ200%に相当する変位まで加力した。この時、積層ゴムに作用した曲げモーメントを回転拘束度100%と定義した。この変形状態は、多段積層ゴムの曲げ剛性が要素積層ゴムの曲げ剛性と比べて十分大きくて要素積層ゴムの回転が完全に押さえられていることと等価である。この他に、図6-3では、回転拘束度を100%からそれぞれ80、60、40、20、0%に低減した場合の水平復元力を、図6-4では鉛直変位特性を、図6-5では、積層ゴムに作用する回転角の変化を示した。なお、図6-6は各回転拘束度において積層ゴムに作用させた曲げモーメントを示している。

実験結果から、この要素積層ゴムについても、回転拘束度が低下するにつれて、水平復元力は低下し、鉛直変位は増加し、回転角は急激に大きくなることが示された。この傾向は、第3章で示した積層ゴムと同様である。

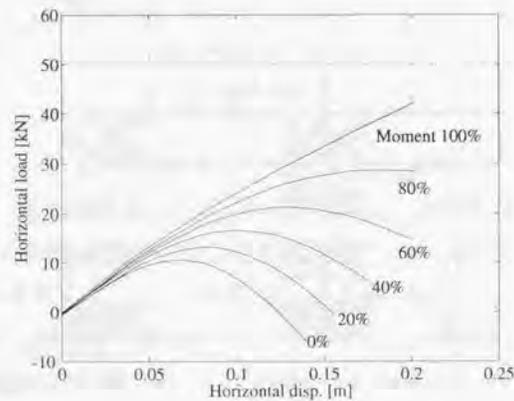


図6-3 要素積層ゴムの水平復元力特性

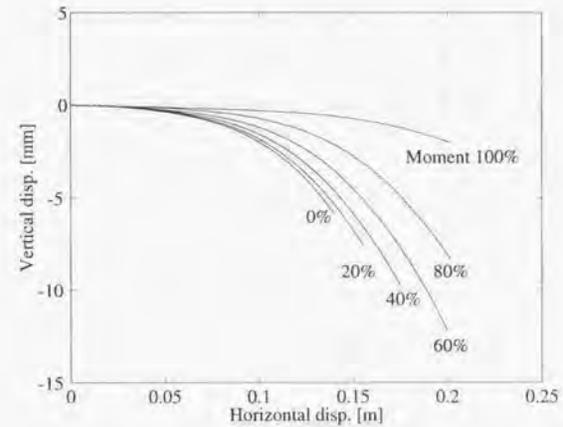


図6-4 要素積層ゴムの鉛直変位特性

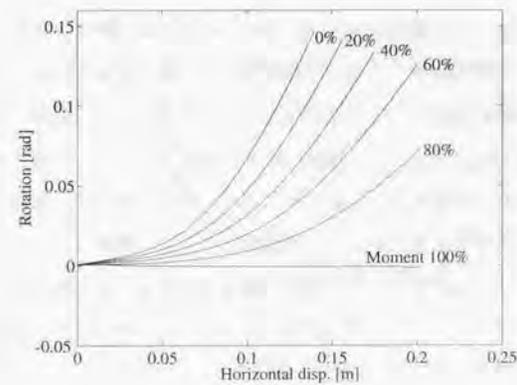


図6-5 要素積層ゴムの回転変位特性

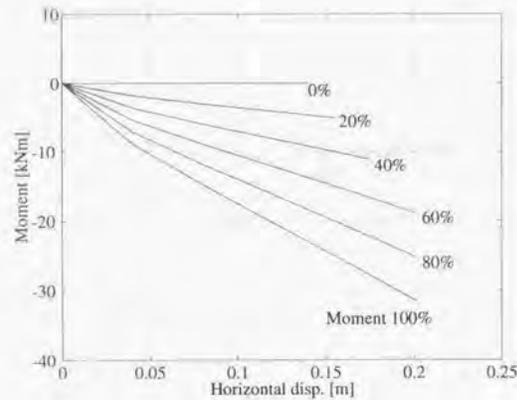


図 6-6 要素積層ゴムに作用する回転拘束曲げモーメント

(2) 曲げ剛性

曲げ剛性測定実験では、要素積層ゴムのせん断変位と軸力を一定に保った状態で、回転角 0rad の状態から曲げモーメントを载荷し、回転角の変化を測定した (図 6-7)。曲げ剛性は、回転角 0rad から 0.01rad までの曲げモーメントの変化から求めた。

図 6-8 に要素積層ゴムの軸力 220.5, 110.3kN における曲げ剛性の測定結果を示す。実験結果から、この要素積層ゴムの曲げ剛性は、せん断ひずみすなわち水平変位に強く、かつ軸力に僅かに依存することがわかった。このすなわち、積層ゴムの曲げ剛性は、水平変位の増加にともなって、急激に減少し曲げモーメントを負担する能力を失う。この曲げ剛性低下の度合いは、第 3 章で述べた制振装置用多段積層ゴムに用いられた要素積層ゴムの場合より大きい。この原因としては、積層ゴムの 2 次形状係数が小さいことが考えられる。また、曲げ剛性の軸力依存性は、せん断ひずみが大きくなるにつれて、影響が小さくなり、測定結果によると、せん断ひずみ 150% 以上では、軸力による曲げ剛性の変化は見られなかった。

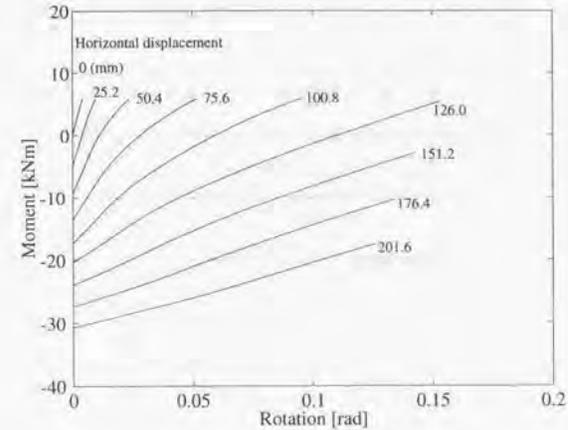


図 6-7 M- θ 関係

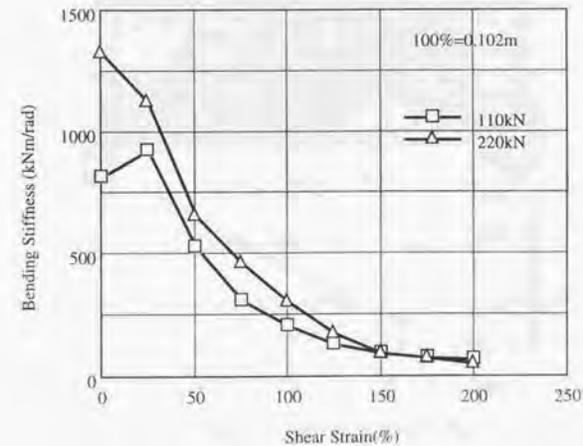


図 6-8 要素積層ゴムの曲げ剛性

6・2・4 多段積層ゴムの静的加力試験

多段積層ゴムの圧縮・せん断加力試験をおこなった。実験では、多段積層ゴムの定格荷重 882kN および 1470kN に対して、水平変位 0.4m までの水平復元力特性と安定板の曲げひずみを測定した。

図 6-9 に多段積層ゴムの水平復元力特性を示す。実験より、多段積層ゴムの水平復元力は水平変位の増加にともなって低下するソフトスプリングの傾向が認められたが、鉛直軸力支持能力は水平変位 0.4m まで保持されることがわかった。

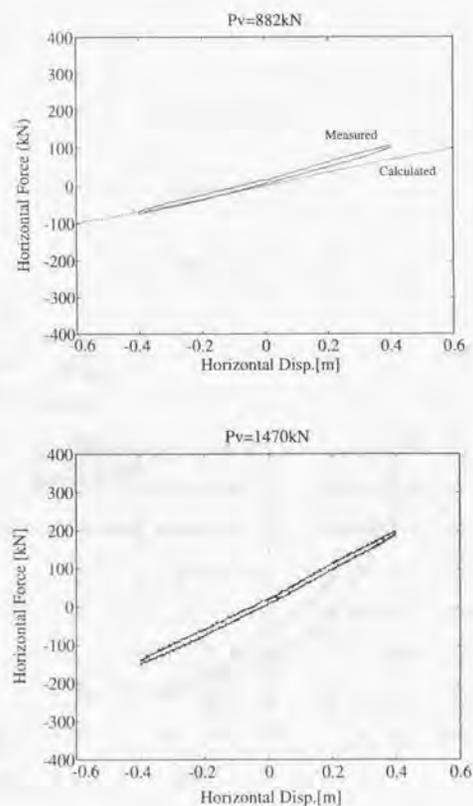


図 6-9 多段積層ゴムの復元力特性

表 6-1 は、多段積層ゴムの水平剛性で実験による測定結果と、要素積層ゴムの加力試験による推定値を示す。推定値は、安定板が十分剛と回転が完全に拘束される場合の推定式から求めた。このことより、多段積層ゴムの安定板の曲げ剛性が要素積層ゴムの回転を拘束するに十分な値をもっていることが確認された。

図 6-10 に 882kN 用多段積層ゴムの加力試験状況を示す。

表 6-1 多段積層ゴムの水平剛性

Rated load(kN)	Horizontal Stiffness (kN/m)	
	Measured	Predicted
882	225	230
1470	434	395

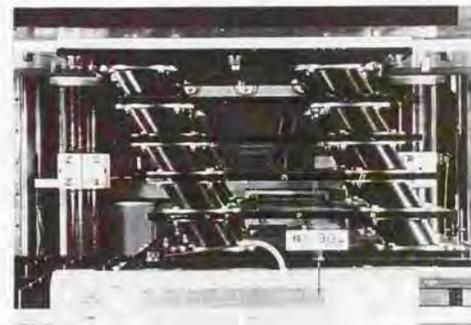
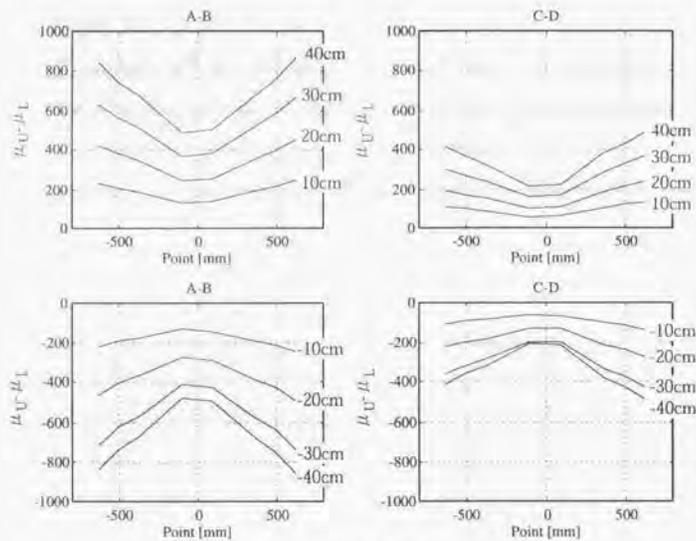
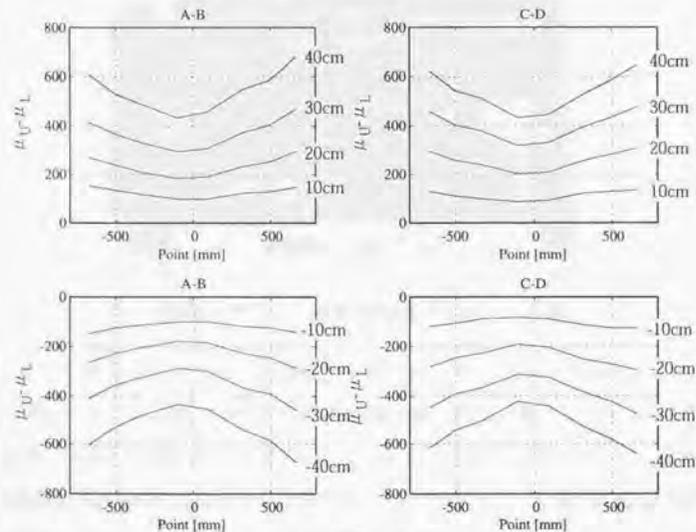


図 6-10 882kN 用多段積層ゴムの加力試験状況

図 6-11 は、882kN および 1470kN 用多段積層ゴムの下から 1 段目(図中 A-B と表示)と 2 段目(図中 C-D と表示)の加力軸と直交方向の安定板の曲げひずみの分布である。要素積層ゴムの取り付け位置付近で曲げひずみが集中する傾向があるが、変位 0.4m まで弾性範囲内であることがわかった。安定板のひずみ量は、1470kN 用多段積層ゴムの場合は、1 段目と 2 段目でほとんど変化しないのに対して、882kN 用多段積層ゴムの場合は、1 段目と 2 段目の値に差が認められる。これは、882kN 用のほうが、多段積層ゴム内部で曲げ変形の影響が大きくなっているためと考えられる。



(a) 882kN 用



(b) 1470kN 用

図 6-11 安定板の曲げひずみ分布

6・2・5 多段積層ゴムの剛性解析

(1) 解析モデル

882kN 用多段積層ゴムの变形能力を確認するために、第 4 章で提案した非線形はり要素モデルによる剛性解析をおこなった。解析では、第 4 章と同じく安定板は通常のはり要素モデルとした。要素積層ゴムの解析モデルは、第 4 章の式(4-3)に示すものと同じである。

剛性マトリックスの各要素も同様に、二軸偏心試験装置による実験から求めた。解析モデルの K_{ij} を再度示す。

$$K_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_s}{\partial u_s} & \frac{\partial F_s}{\partial \theta} & 0 \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial F_{s1}}{\partial u_s} + F_z \right) & \frac{\partial M}{\partial \theta} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial F_z}{\partial u_z} \end{bmatrix} \quad (6-1)$$

ここで、 F_s は要素積層ゴムのせん断力、 M は曲げモーメント、 F_z は鉛直軸力、 u_s はせん断変位、 θ は回転角、 u_z は鉛直変位である。解析は、非線形解析のため増分解析をおこなった。また、剛性マトリックスの各要素は、せん断変位 u_s のみに依存すると仮定した。実験より求められた $\frac{\partial F_s}{\partial u_s}$ 、 $\frac{\partial F_s}{\partial \theta}$ 、 $\frac{\partial M}{\partial \theta}$ および $\frac{\partial F_z}{\partial u_z}$ を図 6-12 から図 6-15 に示す。また、求められた各要素を式で示すと以下ようになる。

$$\frac{\partial F_s}{\partial u_s} = 279.1 - 1455.8u_s + 6844.8u_s^2 - 16088u_s^3 \quad (6-2)$$

$$\frac{\partial F_s}{\partial \theta} = 202.6 + 2324.0u_s - 20432.0u_s^2 + 48208.5u_s^3 \quad (6-3)$$

$$\frac{\partial M}{\partial \theta} = 1455.9 - 20670.8u_s + 104759.9u_s^2 - 174049.9u_s^3 \quad (6-4)$$

$$\frac{\partial F_z}{\partial u_z} = 4.7 \times 10^6 - 8.03 \times 10^7 u_s + 5.98 \times 10^8 u_s^2 - 1.50 \times 10^9 u_s^3 \quad (6-5)$$

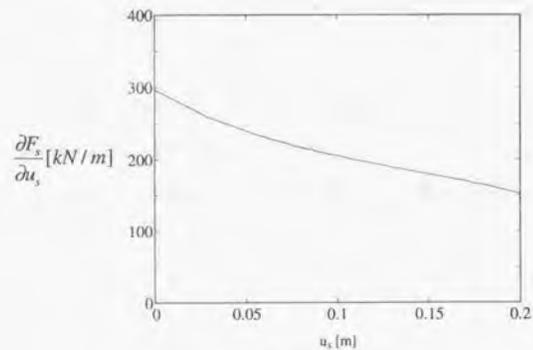


図 6-12 $\partial F_x / \partial u_x$

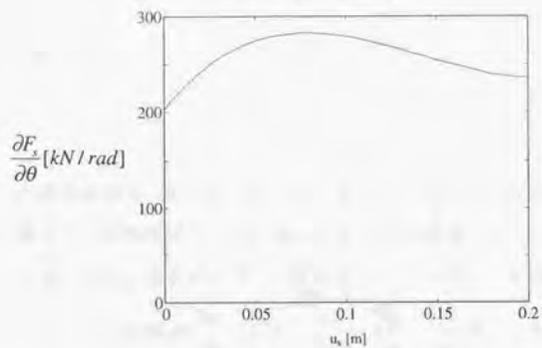


図 6-13 $\partial F_x / \partial \theta$

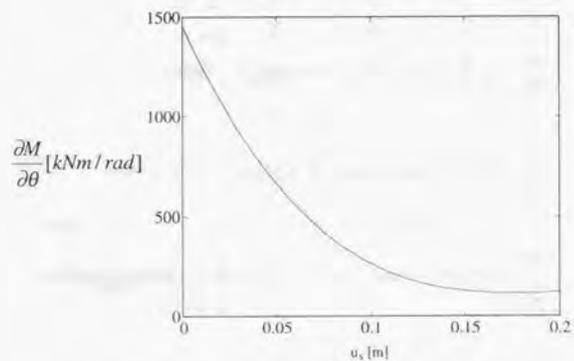


図 6-14 $\partial M / \partial \theta$

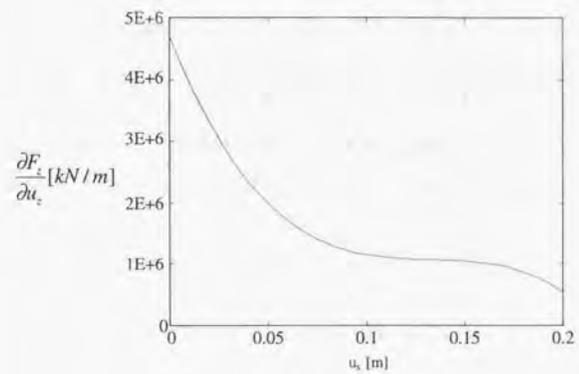


図 6-15 $\partial F_z / \partial u_z$

なお、 $\frac{\partial F_x}{\partial \theta}$ は図 6-16 に示すせん断変位固定-曲げモーメント可変実験から測定された F_x - u_x 特性から求めた。

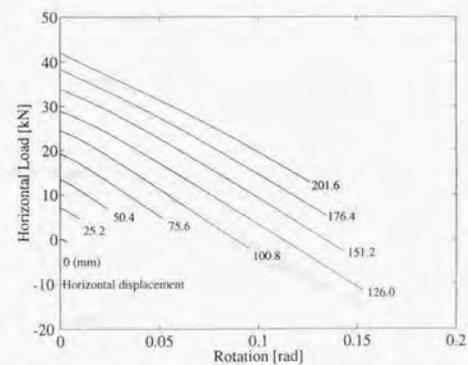


図 6-16 F_x - θ 特性

(2) 非線形はり要素モデルの検証

二軸偏心試験装置でえられた要素積層ゴムの解析モデルと実験結果の検証をおこなう。要素積層ゴムの増分型のマトリックス方程式は、

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta u_i \\ \Delta u_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta F_i \\ \Delta F_j \end{pmatrix} \quad (6-6)$$

ここで、 F_i , u_i , F_j , u_j はそれぞれ i, j 節点における節点力と節点変位である。

$$F_i = (F_x \quad M_i \quad F_y)^T \quad (6-7)$$

$$u_i = (u_x \quad \theta_i \quad u_y)^T \quad (6-8)$$

要素積層ゴムの実験と等価な状態とするため、 $u_y=0$ として、積層ゴムの上端に作用する水平復元力 F_x を求めた。解析モデルを用いた有限要素解析から求められた要素積層ゴムの水平復元力特性を図 6-17 に示す。この結果より、この解析モデルが実験結果をよく再現しているのがわかる。

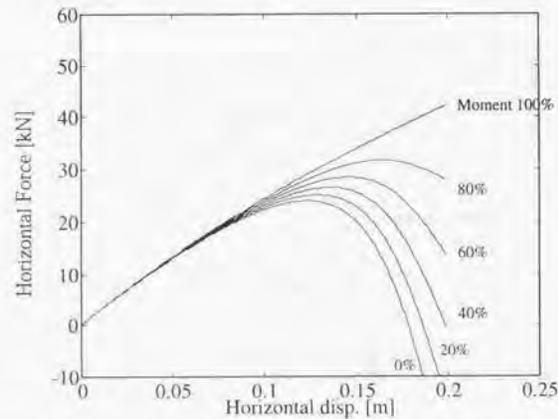


図 6-17 要素積層ゴムの水平復元力特性 (解析モデルによる)

(3) 解析結果

解析結果を図 6-9 で破線で示す。解析結果は実測値とほぼ一致しており、剛性解析としては、ほぼ満足する結果となっている。また、解析は変位 1.0m まで実施したが、多段積層ゴムの水平復元力が負勾配になる結果はえられなかった。このことから、この多段積層ゴムは、要素積層ゴムが回転することによって、座屈する現象は少なくとも、変位 1m までは発生しないと推定される。ただし、安定板に塑性変形が発生すると安定板は曲げモーメントを弾性範囲内のように負担し続けることはできないから、座屈開始の点はもっと早まるかもしれない。



6・2・6 実施例

本多段積層ゴムの使用した免震建物の実施例を図 6-18 に、多段積層ゴムの配置を図 6-19 に示す。建物規模は地上 2 階、延べ床面積 405m²、総重量 586tonf である。建物は、882kN 用多段積層ゴム 4 基、1470kN 用 2 基で支持されている。自由振動実験の結果、この建物の水平固有周期は 3.7 秒とほぼ目標の固有周期 4 秒を達成し、免震建物としては最高レベルの性能をもっている。また、減衰を付与するため 6 基の粘性ダンパーが取り付けられている。この結果、この建物の等価減衰定数 h_{eq} は 0.13 となっている。このように、この建物は多段積層ゴムと粘性ダンパーを使用しているため、基本的には摩擦がなく微振動に対しても除振性能を有するように設計されている。

この建物は、竣工後直ちに地震観測がなされいくつかの観測結果がえられている。免震効果については、地震波によりばらつきが生じているが、最も効果のあった場合で、1 階の応答は地動加速度の約 1/6 になっていたと報告されている。



図 6-18 実施例の建物

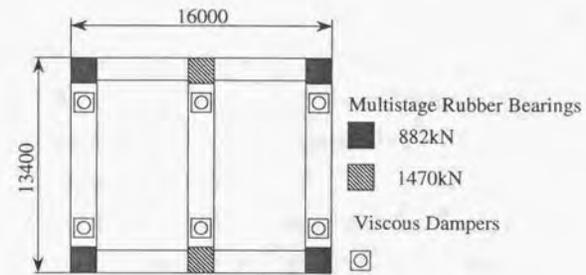


図 6-19 多段積層ゴムの配置

6・2・7 まとめ

この節では、半導体工場を想定した精密加工工場を想定した実験建物用に開発された多段積層ゴムの大変形加力試験を実施した。実験では、鉛直支持荷重 882kN および 1470kN に対して、水平方向に、変位吸収能力 0.4m、目標固有周期 4 秒の天然ゴム系（低減衰）多段積層ゴムを設計し、各々、大型二軸加力試験装置を用い、定格支持荷重において、変位 0.4m のまでの水平復元力特性と安定板に発生する曲げひずみを測定した。882kN 用多段積層ゴムについては、第 3 章および第 4 章で述べた、二軸偏心試験装置を用い、水平復元力特性におよぼす軸力と回転拘束度の影響を実験的に調べた。また、非線形はり要素モデルの剛性マトリックスの各要素を第 4 章で提案した要素積層ゴムの組み合わせ加力試験によって実験的に求め、多段積層ゴムの剛性解析を実施した。多段積層ゴム加力試験、要素積層ゴムの組み合わせ加力試験による剛性解析からえられた結果をまとめると以下ようになる。

(1) 設計・製作された 882kN 用と 1470kN 用多段積層ゴムが建築物を免震するに十分な水平剛性と変位吸収能力を有することを実験的に確認できた。復元力特性は、水平変位の増加にともなって低下していくソフトスプリング特性を有してしたが、鉛直荷重支持能力は水平変位 0.4m まで問題なく維持されていた。

(2) 実測された多段積層ゴムの水平剛性 K_H は、要素積層ゴムの水平剛性 k_H と段数 N を用いて、 $K_H = \frac{4 \cdot k_H}{N}$ （要素積層ゴムを 1 段あたり 4 個使用）で求めた値とほぼ一致した。この結果、本多段積層ゴムの安定板の剛性は、支持荷重と水平変位に対して十分な値であったことが確認された。

(3) 要素積層ゴムの組み合わせ加力試験から、本多段積層ゴムに用いられた要素積層ゴムの曲げ剛性は、水平変位にともなって急激に減少することが確認された。同様に、鉛直剛性も水平変位にともなって同様に急激に低下することがわかった。

(4) 剛性解析から計算で求められた多段積層ゴムの水平復元力特性は、実験結果と比較的よく一致した。従って、免震装置用大型多段積層ゴムに対しても、第 4 章で提案した剛性解析の手法が適用できることが示された。

(4) 本章で開発された多段積層ゴムは、実大の建物に採用され、従来実現が困難であった周期 4 秒という長周期の免震建物が実現された。

6・3 多段積層ゴムの免震床への適用

6・3・1 はじめに

建物内に設置される電算機などの重要機器を地震時の強震動から保護するために、種々の方法が考えられている。このなかで、免震床構造は免震効果を床レベルで実現させるものである。床レベルの免震装置として要求される仕様は、設置される建物の振動特性により異なる。しかし、一般的には免震装置として 10kN から 50kN 程度の支持荷重に対して、水平方向に 1 秒以上の剛性と数 10cm の変位吸収能力が要求される。床レベルの免震装置は、建物レベルの免震装置と比較して、装置 1 基あたりの支持荷重が非常に小さい。従って、建物レベルの免震装置のほとんどが、積層ゴムを利用したものであったのに対して、床レベルの免震装置では、多数の免震装置が提案されている。

このなかで、主な床レベルの免震装置としては、すべり摩擦型ところがり摩擦型の 2 種類が挙げられる^(6・2)。

すべり摩擦型免震床は、摺動抵抗の小さいテフロン板とステンレス板などを利用した免震装置で、静摩擦係数に相当する加速度が床上に発生した場合、摺動部が動きだす。従って、免震性能は、摺動部の静摩擦係数で決まる。一般的には、大変形の発生を防止し、摺動後の残留変形を小さくするためコイルばねなどを併用して復元力をもたせている。

ころがり摩擦型免震床は、すべり摩擦型の摩擦面の代わりに、ボールベアリングを用いるもので、すべり摩擦型免震床と比較して摩擦抵抗を小さくすることができ、小さい地震入力から免震効果を発揮することができる。

免震床に積層ゴムをそのまま適用しようとする場合、積層ゴム 1 基あたりの支持荷重が 10kN から 50kN と、積層ゴムにとっては小さすぎるので、免震装置に必要な水平剛性の条件を満たせても、水平変位吸収能力の条件を満たすことができない。そこで、この節ではこの問題を解決するため開発された高減衰多段積層ゴムを用いた免震床システムに関する装置単体による静的加力試験および振動台を用いた動的振動実験について述べる。

多段積層ゴムを用いた免震床は、原理的に摩擦がないので、地震時の稼働が確実であり、微小振幅の振動まで免震効果がある利点も考えられる。

図 6-20 と図 6-21 に高減衰積層ゴムを用いた免震床システムの概要を示す。免震装置として用いた高減衰多段積層ゴムは、床の荷重支持機能と変位吸収機能および振動減衰機能を兼ね備えた装置構成になっており、ゴム材料を使用しているため、地震後の復元性を有する特徴をもっている。



図 6-20 免震床

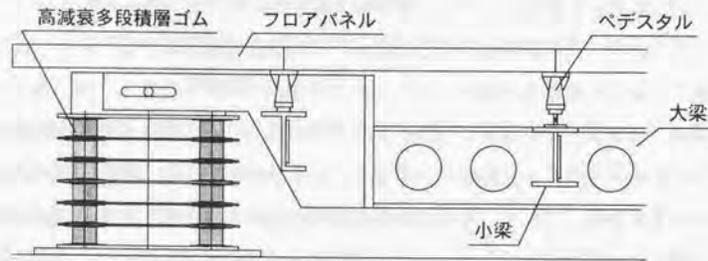


図 6-21 免震床システムの基本構造

6・3・2 静的加力試験

静的加力試験に用いた試験体の寸法・仕様を図 6-22 と表 6-2 に示す。多段積層ゴムには高減衰ゴムを用い、等価減衰定数 Heq が 0.15 程度えられるようにしている。水平剛性は、変位 0.1m で固有周期が 1.7 秒になるように設定した。段数は 6 段で、1 段あたり要素積層ゴムを 4 個使用している。要素積層ゴムの 1 次形状係数 S_1 は 13.9、2 次形状係数 S_2 は 1.85、標準面圧 σ は 2.5MPa である。安定板の厚みは 0.006m である。実験は、2 軸加力試験装置を用いて、鉛直荷重載荷のもと免震装置単体の水平方向の復元力特性の把握、および変位性能の確認を目的としている。実験で用いた加力パターンを図 6-23 に示す。加力は、3cm から 3cm ごとに 15cm までの各変位振幅で 3 サイクル加力した。

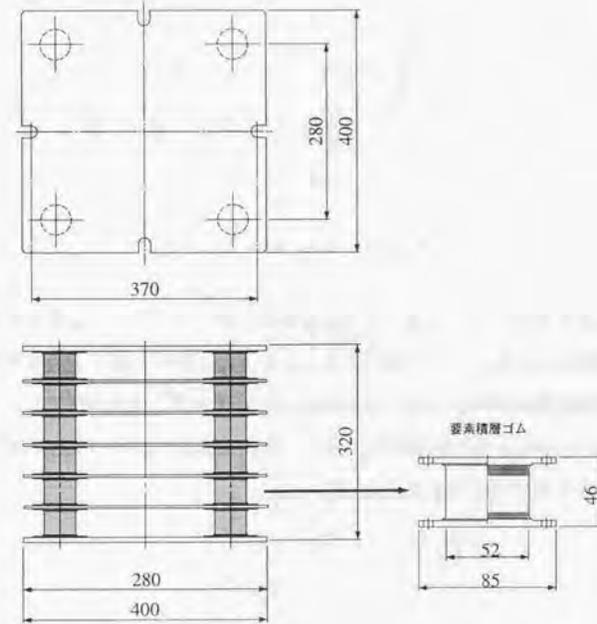


図 6-22 高減衰多段積層ゴム

表 6-2 高減衰多段積層ゴムの仕様

項目		
免震装置	設計荷重(kN)	19.6
	固有周期(sec) ($\delta=10\text{cm}$ での値)	1.7
	等価減衰定数 h_{eq}	約0.15
	許容変形(cm)	15

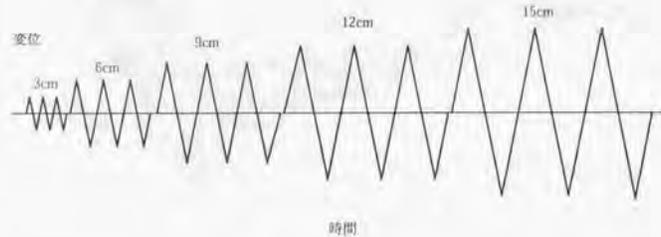


図 6-23 加力パターン

実験から求めた水平方向の荷重-変位履歴曲線を図 6-24 に示す。高減衰多段積層ゴムは、変位振幅により変化し、振幅が大きくなるほどに剛性が低下する特徴を有する。一方、等価減衰定数は振幅が大きくなるに従いやや現象する傾向が認められた。今回の実験では $h_{eq}=0.12\sim 0.16$ 程度の値がえられた。また、変形性能は、15cm の設計値に対して十分な性能を有することが確認された。

6・3・3 動的振動実験

動的振動実験は、図 6-20 に示す免震床上に、設計荷重に相当するコンクリート製重りを載荷しておこなった。

最初に免震床システムの動的特性を調べるために、振動台と免震床の相対変位を一定とした正弦波掃引試験をおこない、えられた共振振動数の正弦波による繰り返し載荷試験をおこなった。荷重-変位履歴曲線を図 6-25 に示す。また、表 6-3 には免震装置 4 台分の等価剛性、等価減衰定数の各変位振幅での値を静的加力試験と比較して示す。静的加力試験結果と同様に、相対変位が大きくなるに従い剛性が低下する傾向が認められる。静的加力試験と動的加力試験結果に差異が認められるが、これは加力パターンの相異、すなわち履歴依存性に起因するものと考えられる。

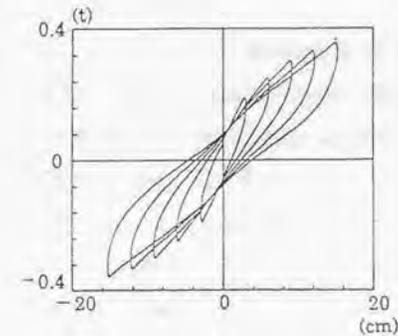


図 6-24 水平荷重-変位履歴曲線 (静的加力実験)

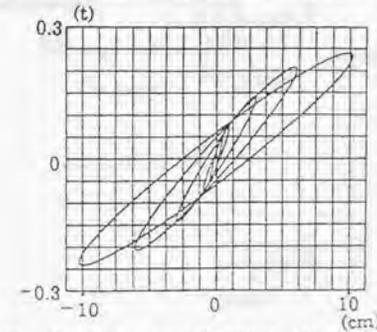


図 6-25 水平荷重-変位履歴曲線 (動的加力実験)

表 6-3 水平等価剛性・等価減衰定数の比較 (装置 4 台分)

水平変位 (mm)	等価剛性(kN/cm)		等価減衰定数	
	静的実験	動的実験	静的実験	動的実験
10(9)	2.623	2.185	0.276	0.161
30	2.215	1.627	0.175	0.143
60	1.470	1.137	0.151	0.144
100(90)	1.176	0.882	0.145	0.171

()は静的試験の場合

次に建物の応答波形を用いた振動試験をおこなった。図 6-26 に振動試験用の加速度波形をえるのに用いた解析モデルの諸元を示す。建物は 5 質点せん断ばねモデルとし、地震波は ELCENTRO1940NS、TAFT1952EW の 2 波を用い、地表面加速度は 250Gal(cm/s^2)、400Gal(cm/s^2)とした。実験では、解析モデルから 5 階床の応答加速度を求め、これを振動実験用の入力波とした。

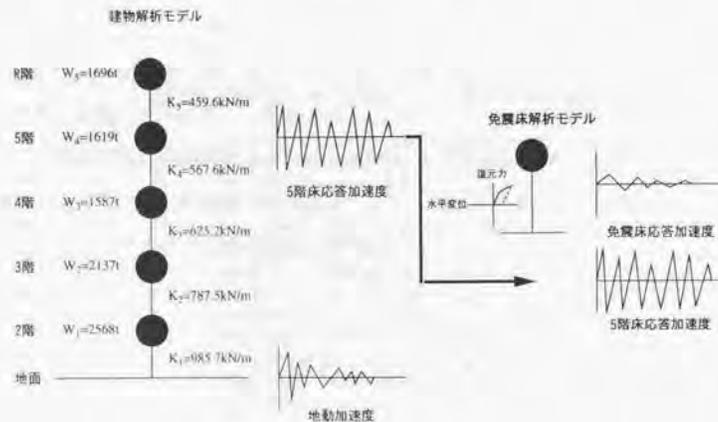


図 6-26 解析モデル

表 6-4 加振ケースと試験結果

ケース	地震波	地表面 加速度 (Gal)	5階床応答 加速度 (Gal)	実加振 加速度 (Gal)	免震床応答 加速度 (Gal)	相対 変位 (cm)	応答加速度 実加振加速度
1	EL CENTRO 1940 NS	250	499	499.7	121.5	4.98	1/4.1
2		400	799	811.7	158.4	8.70	1/5.1
3	TAFT 1952 EW	250	513	536.8	150.4	8.00	1/3.6
4		400	821	677.4	173.1	10.65	1/3.9

表 6-4 に加振ケースと試験結果を示すが、加振加速度に対して免震床上ではおよそ 1/3~1/5 に低減されており、十分な免震効果があることが確認された。

図 6-27 に免震床の解析モデルを示す。装置は 1 質点せん断ばねモデルとし、復元力特性は Tri-Linear 型とした。図 6-28 に免震床上の振動実験による応答波形と解析からえられた応答波形の一例を示す。また、図 6-29 にはそれらの応答スペクトルを示す。解析結果は実験結果と比較的良好な対応を示しており、免震床の応答特性を本モデルを用いた 1 質点せん断ばねモデルで解析的に予測できるものと考えられる。

表 6-5 に加振加速度を変化させた場合の免震床の応答加速度を示すが、加振加速度の増大にともない免震装置の水平剛性が低下し、加速度応答低減率が大きくなる。従って、中小地震などの低振幅領域では変形が小さく押さえられ、大規模地震では大きな免震効果を発揮する特徴を有することがわかる。

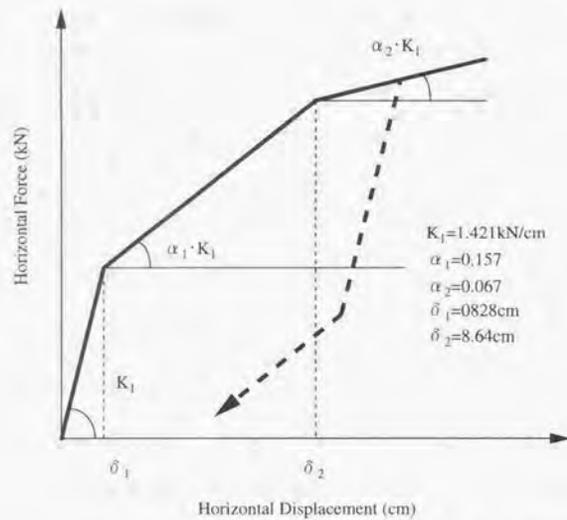


図 6-27 高減衰多段積層ゴムの解析モデル

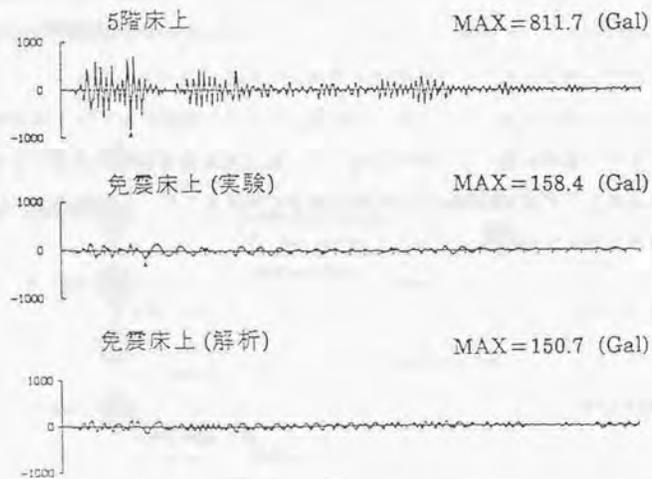


図 6-28 応答波形の比較

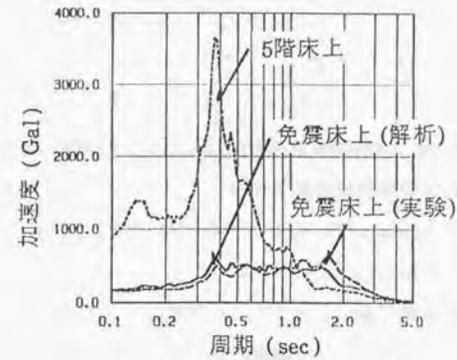


図 6-29 応答スペクトル

表 6-5 加振レベルの違いによる応答の変化

加振 加速度 (Gal)	免震床応答 加速度 (Gal)	相対 変位 (cm)
52.7	29.5	0.74
108.1	47.9	1.40
221.3	73.8	2.67
456.1	114.2	5.58
527.6	131.8	6.40

6・3・4 まとめ

高減衰多段積層ゴムを用いた免震床システムを開発し静的加力試験と振動台実験から以下の結果をえた。

(1) 静的加力試験から、本高減衰多段積層ゴムは、支持荷重 19.6kN (2tonf) に対して、水平変位 0.15m まで荷重支持能力を有した。測定された水平剛性は水平変位に依存し、変位の増大にともなって剛性が低下する傾向が認められた。また、等価減衰定数は、0.12~0.16 がえられた。

(2) 振動台を用いた動的試験によっても、水平剛性が水平変位に依存することが確認された。動的試験から測定された水平剛性は、静的加力試験から測定された値より小さいことが認められた。この原因については、加力パターンの相違、すなわち履歴依存性によるものと考えられる。

(3) 5階建て建物の5階の床応答加速度を入力とした振動台実験では、EL CENTRO 1940 NS 波と TAFT 1952 EW 波(地動加速度は 250Gal と 400Gal) による床応答加速度に対して免震床上では、応答加速度は 200Gal 以下に抑えられた。床応答加速度に対する免震床上加速度はおよそ 1/3~1/5 に低減されており、十分な免震効果があることが確認された。

(4) 高減衰多段積層ゴムの復元力特性を Tri-Linear 型とした解析モデルによる免震床上の応答波形は、時刻歴波形、応答スペクトルともに実験結果とほぼ一致することが示された。

(5) 加振加速度の増大にともない免震装置の水平剛性が低下し、加速度応答低減率が大きくなることが示された。従って、中小地震などの低振幅領域では変形が小さく押さえられ、大規模地震では大きな免震効果を発揮し、床免震装置として良好な特徴を有することがわかった。

6・4 多段積層ゴムの機器免震装置への適用

6・4・1 はじめに

地震時に保護を必要とする機器を個別に免震支持する目的で、機器レベルの免震装置が開発されている。機器レベルの免震装置では、序論でも述べたように、10kN 程度またはそれ以下の支持荷重に対して、要求される仕様は床レベルの免震装置と同等である。従って、機器レベルの免震装置には、床レベルの免震装置と同様に、すべり摩擦型、ボールベアリング型などの各種の免震装置が提案され実用化されている。

機器免震装置の一例として、リニアベアリングを用いた三次元免震装置の構造を図 6-30 に示す⁽⁶⁻³⁾。この例では、2本の互いに平行なレールを用い回転を拘束し、それを 90 度回転させたものをその上に重ね、平面自由に運動できるようにしている。

この免震装置を用いることにより入力加速度に対し免震装置上の応答加速度が 1/4~1/9 程度に低減されている。また、上下方向は、コイルばねとリンク機構を用いロッキングを防止しながら免震している。

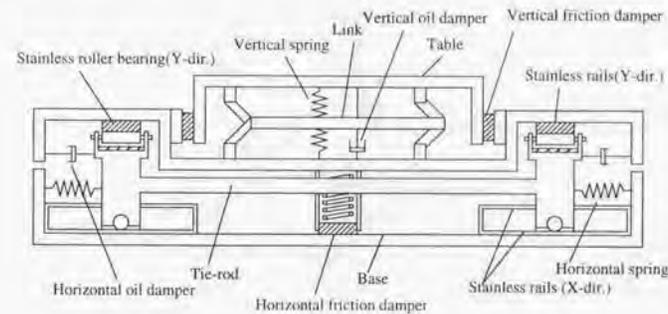


図 6-30 リニアベアリングを用いた三次元免震装置

床レベルの免震装置用に開発された多段積層ゴムを、そのまま機器レベルの免震装置に適用すると、水平方向が周期 2 秒程度にするためには、定格積載荷重 10kN の多段積層ゴムを最低でも 4 基使用し、装置全体の質量を、コンクリートブロックなどで増強し 4000kg 程度にする必要があり、装置全体が大きくなるほか、不必要に装置が重くなるなど不具合が生じる。

そこで軽量でしかも低固有振動数（長周期）の除振／免震装置を実現させるため、大スパンの多段積層ゴムが開発され、SEM などの比較的軽量の装置を多段積層ゴム単体で支持できるようになった⁶⁴⁾。

ここでは、復元力と振動減衰機能を兼ね備えた高減衰多段積層ゴムを用いた機器免震装置の開発例について述べる。

6・4・2 高減衰多段積層ゴムを用いた機器免震装置

図 6-31 は、奈良薬師寺の講堂安置の薬師三尊像の両脇土像（日光像・月光像）を免震支持するために開発された高減衰多段積層ゴムの実施例である。像は重要文化財で、地震時の転倒を防ぐ目的で免震装置を設置することになった。



図 6-31 免震装置の設置例

免震装置用高減衰多段積層ゴムの形状と主な仕様を図 6-32 と表 6-6 に示す。高減衰多段積層ゴムを用いた免震装置は、像の重量を支持したとき周期 1.5 秒となる。また、免震装置は、像の台座の中に格納され外から見えないようになっている。高減衰多段積層ゴムは、リング状のステンレス製の厚さ 0.009m 安定板を用い、周上に 6 個の要素積層ゴムを配置し、5 段積み重ねた構造となっている。ゴム材料は、6-3 の床免震装置で用いた高減衰ゴムよりさらにゴム硬度の低いもの（約 2/3）を用いている。こ

の結果、免震装置の固有周期を1.5秒まで長くすることが可能となった。また、等価減衰定数 h_{eq} は、約0.15で免震床に用いた高減衰多段積層ゴムと同等である。要素積層ゴムは、直径48mm、ゴム厚み0.6mmの高減衰ゴムシートを厚み0.3mmの補強金属板を介して34枚積層した構造である。1次形状係数 S_1 は20、2次形状係数 S_2 は2.35、標準面圧 σ は2.03MPaであり、1次形状係数、2次形状係数ともに小さく、第3章の実験で示したように、積層ゴムの水平剛性の面圧依存性が大きい。従って、荷重管理に注意を必要とする。

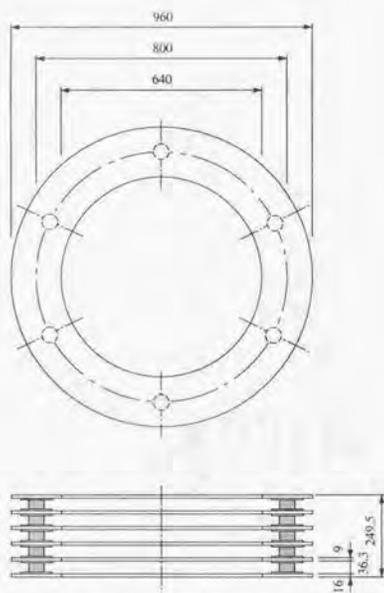


図 6-32 免震装置

表 6-6 免震装置の主な仕様

外径(mm)	960	水平剛性(kN/cm)	0.284
高さ(mm)	249.5	水平固有周期(sec)	1.5
自重(kgf)	230	等価減衰定数(%)	約15
材質	SUS304	最大変形量(cm)	12

6・4・3 まとめ

高減衰多段積層ゴムのスパンを大きくとりかつ安定板をリング形状とすることによって、支持荷重14.7kN(1.5tonf)用の機免震装置を開発することができた。開発された機器免震装置は重要文化財の仏像の免震支持に適用された。

図6-33に設置状況の写真である。免震装置は設置後、自由振動実験からほぼ設計とおりの固有周期がえられていることを確認した。

なお、本免震装置は台座と基礎のクリアランスからクリープを定期的に観測するほか、震度IV以上の地震発生後には臨時点検を実施することになっている。



図 6-33 免震装置の設置状況

6・4 結語

多段積層ゴムを用いた免震装置を開発し、建物免震、床免震および機器免震に適用可能な装置を開発した。適用化研究をまとめると以下ようになる。

(1) 建物免震では、支持荷重 882kN と 1470kN、固有周期 4 秒、変位吸収能力 0.4m の免震装置を多段構造にすることによって積層ゴムで実現できた。この結果、従来の積層ゴムでは実現が困難であった周期 4 秒の免震建物を実用化できる可能性を示した。なお、建築免震としては、高減衰多段積層ゴムを用いた戸建て免震住宅も開発されている。

(2) 床レベルの免震装置として、高減衰多段積層ゴムを開発し、静的加力試験と振動台を用いた動的加力試験から免震性能を実証した。高減衰多段積層ゴムを用いた床免震装置では、すべり摩擦方式やころがり摩擦方式と比較して、荷重支持機能、復元力機能および減衰機能が一体化され、コンパクトな装置を実現できた。しかしながら、高減衰多段積層ゴムを用いた免震装置の固有周期は、ゴムのせん断弾性係数が決まってしまうと、段数により決まり、より長周期にするためには段数を多くしなければならない。したがって、長周期の免震装置を用いると床が高くなる問題が生じる。今後、免震性能を高めるためには、より低弾性性のゴムを開発が必要となると思われる。

なお、免震床用高減衰多段積層ゴムは床荷重の関係から、支持荷重 20~50kN に対して、固有周期 1.5 秒~2.0 秒、変位吸収能力 0.12~0.18m のものが開発されており、現状では、建物の固有周期に応じてこれらの高減衰多段積層ゴムを選択し用いることになっている。

(3) 高減衰多段積層ゴムを用いた機器免震装置を開発し、重要文化財である仏像に適用することができた。固有周期は支持荷重に対して 1.5 秒程度で、すべり方式やころがり方式の機器免震装置の免震性能と比較すると、今後改良する必要があるが、ゴム材料が長期間にわたって安定した性能がえられることから、用途に応じて使用されていくものと思われる。

第 6 章の参考文献

- (6-1) 嶺脇重雄・相沢覚・東野雅彦・速水浩、多段積層ゴムを用いた免震構造システム、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)、B、(1990)。
- (6-2) 第 2 回振動制御コロキウム、PART A、構造物の振動制御(2)、土木学会、(1993)。
- (6-3) 藤田隆史・鞍本貞之・小見俊夫、三次元免震装置の研究、機論、51-471、C(1985)、2768-2776。
- (6-4) 早津昌樹・福井伊津志・正木信男・竹下章治、半導体設備電子顕微鏡用除振台の開発、日本機械学会「振動と運動の制御」シンポジウム講演論文集、125-128、(1990)。

第7章 多段積層ゴムの除振装置への適用

7・1 緒言

第1章ですでに述べたように、1980年以降、超LSIやレーザ応用製品などの製造設備では、集積回路の集積度向上にともない、微振動による製品の精度および歩留まりの低下が問題化した。このような問題を解決するため、製品歩留まり向上のために、平常時の微振動除振が要求されていた。また、除振技術とともに、発生頻度の高い弱地震動に対して、精度チェックの回数や程度を軽減したり、歩留まり低下を防止するための弱地震免震が要求されはじめていた。さらに、強地震動に対しては、従業員や設備を地震災害から保護するための強地震免震が必要とされる。従って、このような製造設備には、微振動から強地震動までのすべての外来振動を絶縁する除振・免震技術が望ましいと考えられた¹⁾。

上述のような製造設備は、ほとんどの場合、クリーンルーム内に設置される。そこで、クリーンルームの二重床を積層ゴムで支持すれば、すくなくとも水平方向の除振・免震を実現できる可能性がある(ただし、鉛直方向はコイルばねや空気ばねなどの別の方法で対処する必要がある)。このような製造設備が設置される床荷重を考慮すると、二重床の支持柱の荷重が1本あたり20~30kNとなり、従来構造の積層ゴムでは、支持荷重が小さすぎる。そこで、この問題の解決策として開発したのが除振・免震床用多段積層ゴムである。ここでは、上述の支持荷重を想定し、かつ免震性能を兼ね備えた固有周期2.0~2.5秒、変位吸収能力0.2mの低減衰ゴムを用いた多段積層ゴムを設計製作し、実用化のための各種実験を実施している。

また、これらの除振・免震装置には、装置の固有振動数付近の共振による振動を低減する目的で粘性せん断型ダンパやオイルダンパなどの減衰機構が空気ばねや多段積層ゴムなどのばね要素とは別に用いられるのが普通である。しかしながら、これらのダンパの微小振幅領域(変位振幅で μm オーダ程度)での減衰特性を系統的に研究した例はほとんどないと考えられる。従来、微振動にたいする除振性能の予測はデバイスの設計値や通常の試験結果などから経験的に行なわれてきている。パッシブ除振装置を設計する時に、これらの多段積層ゴムや粘性せん断ダンパの微小振幅領域における剛性や減衰特性を把握しておくことは、除振性

能を予測する上で極めて重要である。

このような背景のもと、高層建物制振用高減衰ゴムダンパが開発され、微小振幅領域の振動に対する制振効果があることを実験的に確認された²⁾。高減衰ゴムダンパは基本的には、固体であり、取り扱いが従来のダンパと比較して非常に容易であり、除振装置への適用が期待された。そこで、粘性せん断型ダンパやオイルダンパに代替可能なダンパを開発するため高減衰ゴムダンパの各種基本特性をおこなっている。

7・2 多段積層ゴムを用いた除振・免震床の開発

7・2・1 まえがき

本節では、除振・免震床の実現可能性を検討するためにおこなった、多段積層ゴムの静的加力実験と微振動を含む振動実験の結果について述べる。実験では、支持荷重 14.7kN、固有周期 2.0 秒、変位吸収能力 0.2m と支持荷重 29.4kN、固有周期 2.5 秒、変位吸収能力 0.2m の低減多段積層ゴムを製作した。静的加力実験では、各種鉛直荷重下における変位 0.2m までの復元力特性を測定し、これらを要素積層ゴムの実験結果と比較し、多段積層ゴムの安定板の効果を検討した。

振動台実験では、14.7kN (1.5tonf) 用多段積層ゴムを 4 基と鋼製質量 6000kg を用いた振動モデルによる加振実験をおこない、動特性を検証した。続いて、前述の振動モデルをコンクリート基礎上に設置し、微振動を入力とした振動実験を行い、微振動除振効果を調べた。

7・2・2 供試体

一般に、免震用積層ゴムは、定格積載質量に対して 0.5Hz 程度の低い固有振動数をあたえる水平剛性と、最低限 20cm 程度の水平変位吸収能力（ただし、十分な容量のダンバの併用を前提とする）を持つ必要がある。定格積載質量が小さくなると、この両方の条件を満たす積層ゴムの実現が困難になることは第 1 章で述べたとおりである。通常の構造の積層ゴムでは、ゴムのせん断弾性係数が 0.58MPa(6kgf/cm²) の場合、98kN(10tonf) 用積層ゴム（直径 255mm、厚さ 3.5mm のゴム板を厚さ 1.2mm の鋼板を介して 57 層交互に積層したもので、定格積載質量 10000kg に対して、固有振動数が水平に 0.57Hz、鉛直に 17Hz とする剛性をもつ）がほぼその下限にあたると思われる。その場合、98kN の定格荷重下で約 20cm の変位吸収能力が確認された。しかし、それを超す水平変位では曲げ変形が顕著になり、図 1-4 に示すような不安定な変形状態になって、荷重支持は不可能となった。また、49kN (5tonf) 用積層ゴム（直径 115mm、厚さ 1.5mm のゴム板を 54 層に積層したもの）についての実験では、変位吸収能力は 7cm 程度であり、それ以上の水平変位では同様な不安定現象が発生した。

除振・免震用多段積層ゴムは、基本構造は図 4-1 と同じであるが、非常に小型の要素積層ゴムを用いている。ただし、鉛直剛性を等しくするために、1 次形状係数の関係から、要素積層ゴムでは通常の積層ゴムより薄いゴム板を用いなければならない。この結果、ゴムの層数は増加する。

供試体として、2 種類の多段積層ゴムを試作した。一つは定格質量 1500kg に対して 0.5Hz の水平固有振動数を目標とする多段積層ゴム (1.5tonf-0.5Hz 用) であり、もう一つは定格質量 3000kg に対して 0.4Hz の水平固有振動数を目標とする多段積層ゴム (3tonf-0.4Hz 用) である。これらの仕様は、除振・免震床の水平固有振動数を 0.5Hz 以下、できれば 0.4Hz 程度にしたいという要求から、0.5Hz 仕様と 0.4Hz 仕様の場合の、定格質量の下限を検討する目的で選定した。

供試体の設計では、多段積層ゴムの剛性に関して以下の設計式を用いた。安定板が完全に剛で、しかも水平を保持すると仮定すれば、多段積層ゴムの水平剛性 K_H は要素積層ゴムの水平剛性 k_H と段数 N を用いて、次のように表せられる。

$$K_H = \frac{4k_H}{N} \quad (7-1)$$

また、要素積層ゴムの水平剛性 k_H は、第3章の式(3-12)に示したように鉛直荷重依存性を考慮して、次式であたえられる。

$$k_H = \frac{P_0^2}{2qtan \frac{ql}{2} - P_0 l} \quad (7-2)$$

ただし、

$$q = \sqrt{\frac{P_0}{S_b} \left(1 + \frac{P_0}{S_b}\right)} \quad (7-3)$$

$$l = nt_r + (n-1)t_s \quad (7-4)$$

また、 S_b 、 S_s は式(3-14)と(3-15)であたえられる。

ここで、 P_0 は要素積層ゴムに加わる鉛直軸力(多段積層ゴムに加わる鉛直荷重 P の $1/4$)、 t_r 、 n は要素積層ゴムのゴム板の厚さ、層数、 t_s は鋼板の厚さである。

このように、軸力依存性を考慮した設計式を用いたのは定格積層荷重に対して、水平固有振動数を $0.4 \sim 0.5\text{Hz}$ とするためには、式(1-1)で求められるゴム高さ h_r が高くなり、第3章で示した軸力依存性のないように2次形状係数 S_2 を 3.0 以上とするためには、段数 N が極端に多くなり、あまり S_2 を大きく取れないことおよびゴム厚さ t_r も製造上、あまり薄くできず結果として S_1 もあまり大きくできないためである。

多段積層ゴムの鉛直剛性 K_v も要素積層ゴムの鉛直剛性を k_v とすると、次のように表される。

$$K_v = \frac{4k_v}{N} \quad (7-5)$$

また、上式の k_v は、水平変位依存性を考慮して、次式であたえられる。

$$k_v = \frac{A_{ef} E_c'}{nt_r} \quad (7-6)$$

ただし、

$$A_{ef} = \frac{d_r^2 \sin^{-1} \frac{\sqrt{d_r^2 - x_0^2}}{d_r} - x_0 \sqrt{d_r^2 - x_0^2}}{2} \quad (7-7)$$

ここで、 x_0 は要素積層ゴムの水平変位(多段積層ゴムの水平変位の $1/N$)、 E_c' はゴム板の、圧縮性を考慮した、圧縮に対するみかけの縦弾性係数であって、次式であたえられる。

$$E_c' = \frac{E_c E_\infty}{E_c + E_\infty} \quad (7-8)$$

ただし、

$$E_c = 3G(1 + 2\kappa S_1^2) \quad (7-9)$$

設計、試作した 1.5tonf – 0.5Hz 用、 3tonf – 0.4Hz 用多段積層ゴムは、それぞれ図7-1(a)、(b)に示す要素積層ゴムをいずれの場合も8段に積み重ねたものである(図7-2は、静的加力実験中の 3tonf 用多段積層ゴムである)。これらの要素積層ゴムに使用したゴム板の厚さ 0.5mm は、積層ゴムの製作において精度が保証できる一応の限界と思われる厚さである。その結果、要素積層ゴムの1次形状係数 S_1 は、 1.5tonf (14.7kN) で 17.5 、 3.0tonf (29.4kN) 用で 20 、2次形状係数 S_2 は、 1.5tonf (14.7kN) で 1.84 、 3.0tonf (29.4kN) 用で 2.16 、標準面圧 σ は 1.5tonf (14.7kN) で 3.81MPa 、 3.0tonf (29.4kN) 用で 5.85MPa で第3章で示した実験から要素積層ゴム自体水平剛性の面圧依存性をもつ、また、どちらの多段積層ゴムの場合にも、中間の安定板には 5mm 厚の鋼板(SS400)を用い、上板と底板には 8mm 厚の鋼板を用いた。スパンは、 360 、 280 、 200mm の3とおりに変えることとし、そのために3種類の安定板、上板、底板を用いたが、要素積層ゴムは同じものを組み立て直して使用した。多段積層ゴムの高さは、 1.5tonf 用で 372mm 、 3tonf 用で 365mm であり、両者の形状に(要素積層ゴムの形状を含めて)あまり差がないのは、 3tonf 用のほうにより低い水平剛性が要求されたためと、 3tonf 用の場合も床用としてできるだけ高さをできるだけ低くしたためである。なお、ゴム板に用いた天然ゴム系ゴムの物性値は、

$$G=0.58\text{MPa}, E_{\text{eq}}=2.03\text{GPa}, \kappa=0.85$$

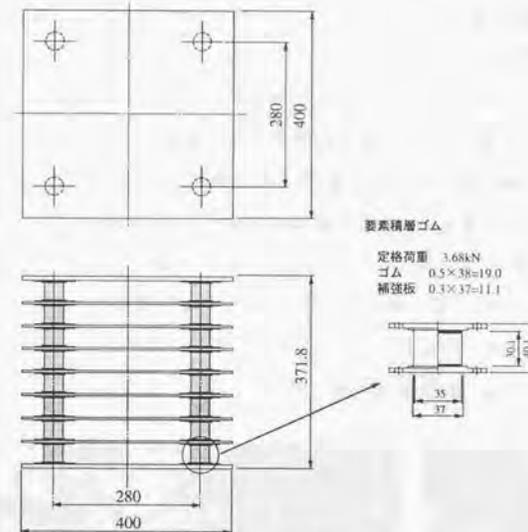
であり、上述の設計式によれば、供試体の多段積層ゴムは、各々の定格質量に対する固有振動数が、1.5tonf用の場合は水平に0.49Hz、鉛直に16Hz（水平変位がない場合）、3tonf用の場合は水平に0.40Hz、鉛直に15Hzとなる剛性を設計値としてもつ。

要素積層ゴムの曲げ剛性と安定板の曲げ剛性を求めると、表7-1のようになる。

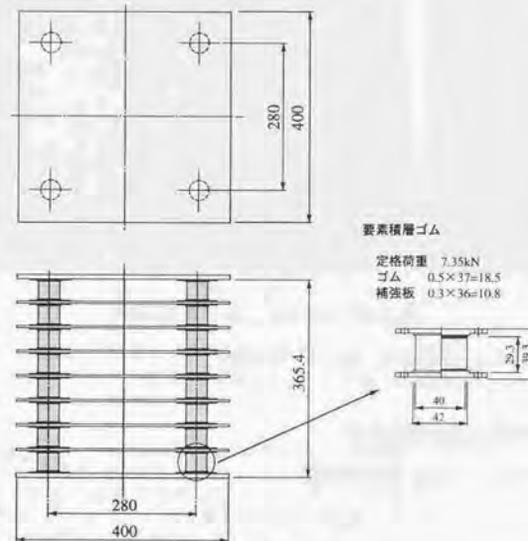
表7-1 供試体の曲げ剛性

サイズ	1.5tonf用			3.0tonf用		
	断面2次モーメント	曲げ剛性	スパン	断面2次モーメント	曲げ剛性	スパン
単位	m^4	kNm^2	m	m^4	kNm^2	m
安定板	8.53×10^{-9}	1.756	0.28	8.53×10^{-9}	1.756	0.28
要素積層ゴム	7.37×10^{-8}	0.0213	0.0301	1.257×10^{-7}	0.0441	0.0293

1.5tonf用の安定板の曲げ剛性は、要素積層ゴムのそのの82倍、3.0tonf用の安定板の曲げ剛性は、同じく要素積層ゴムの40倍となっている。



(a) 1.5tonf-0.5Hz用



(b) 3tonf-0.4Hz用

図7-1 多段積層ゴム

7・2・3 静的加力実験

(1) 実験の概要

試作した多段積層ゴムの復元力特性や変位吸収能力を調べるために、静的加力実験をおこなった。実験では、これまでの積層ゴムの実験^{(7.3)~(7.6)}と同様に、同時に2個の多段積層ゴムの供試体として用い、鉛直荷重を載荷しながら水平方向にせん断変形をあたえて、供試体の復元力、鉛直荷重、水平変位、沈み込み量を測定した。図7-2は、3tonf用多段積層ゴム(2個の内の上側の供試体)の実験中の変形状態を示している。実験には、1.5tonf用、3tonf用、各1組(2個)の多段積層ゴムを使用した(ただし、スパンは、各々3通りに変えている)。また、要素積層ゴムについても、小型の実験ジグを用いて、同様な静的加力実験をおこなった。



鉛直軸力 29.4kN, 水平変位 20cm

図7-2 実験中の3tonf用多段積層ゴム(スパン280mm)

(2) 復元力特性と変位吸収能力

図7-3の実線は、1.5tonf用多段積層ゴム(スパン360mmの場合)の水平復元力特性と沈み込み量を示したものである。図にも示されているとおり、本多段積層ゴムは定格荷重(14.7kN)下で20cmの変位吸収能力を有することが確認された。なお、この変位吸収能力はスパン280、200mmの場合についても確認されている。一方、同図

の破線は、要素積層ゴムの水平復元力特性と沈み込み量を、水平復元力と鉛直荷重は4倍(図のP'は4倍された鉛直荷重である)、水平変位と沈み込み量は8倍し、多段積層ゴムのそれらに換算して示したものである。すなわち、破線は、要素積層ゴムが理想的に多段化された場合の特性を示すものと考えられる。図の実線と破線を比較すると、水平復元力特性は、履歴の大きさにかなり差があるものの、おおむね一致している。しかし、沈み込み量は、実際の多段積層ゴムのほうが大きくなっている。

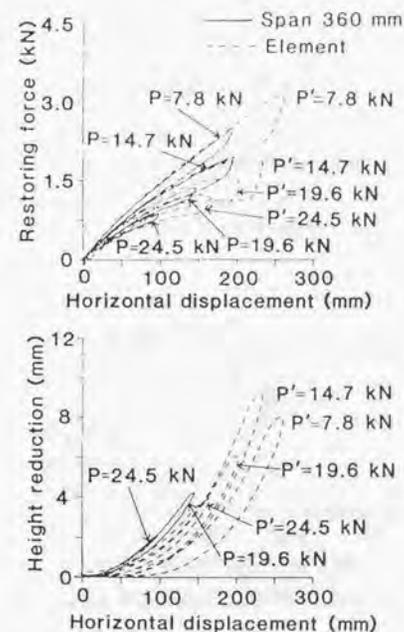


図7-3 水平復元力特性と沈み込み量(1.5tonf用)

3tonf用多段積層ゴム(スパン360mmの場合)の水平復元力特性と沈み込み量を図7-4に示す。図の実線と破線の意味は図7-3の場合と同様である。3tonf用多段積層ゴムの場合にも、定格荷重(29.4kN)下で20cmの変位吸収能力が確認された。なお、スパン280mmでも20cmの変位吸収能力は確認されたが、スパン200mmでは、不安定(屈座)発生の懸念があったため15cmまでの変位吸収能力しか確認できなかった。

また、実線と破線との比較では、1.5tonf 用の場合と異なり、水平復元力特性、沈み込み量ともに、両者はかなりの差がみられる。すなわち、実際の 3tonf 用多段積層ゴムでは、要素積層ゴムが理想的に多段化された場合に比べて、水平剛性はより小さくなり、沈み込み量はより大きくなったことを示している。

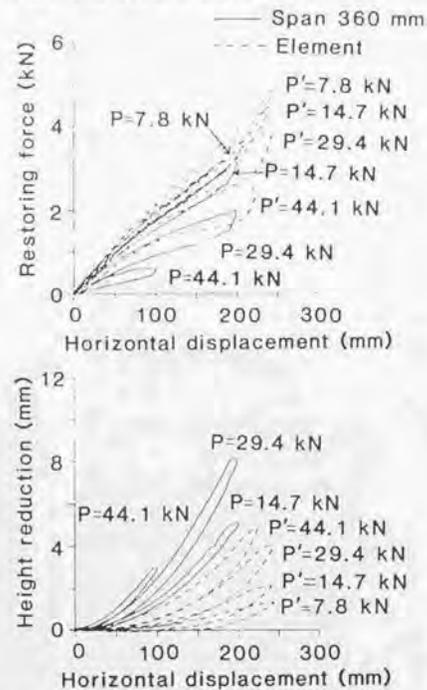
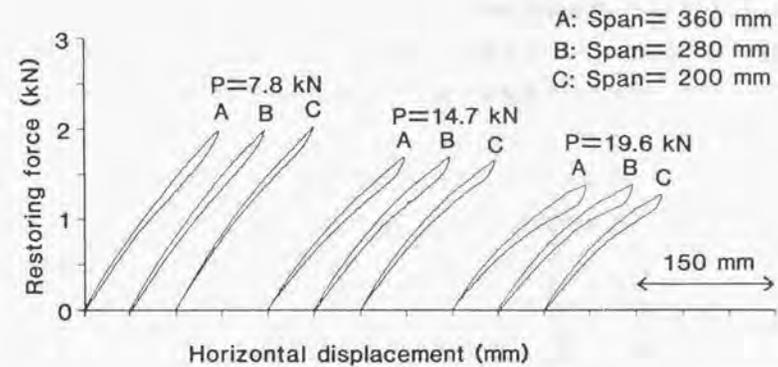


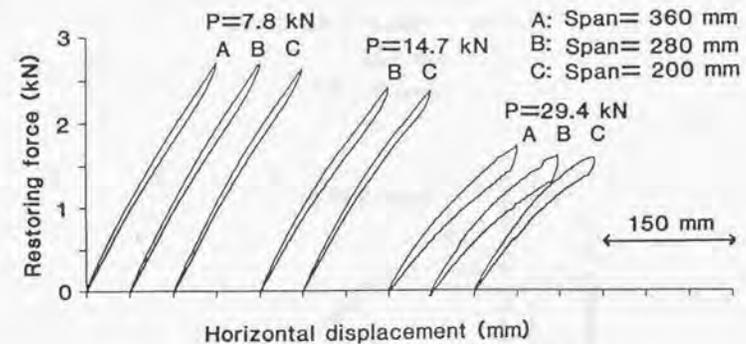
図 7-4 水平復元力特性と沈み込み量 (3tonf 用)

図 7-5 は、1.5tonf 用および 3tonf 用多段積層ゴムについて、水平復元力特性（いずれも最大水平変位は 15cm）のスパンの違いによる変化を調べたものである。実験したスパンの範囲（200～360mm）では、水平復元力特性に顕著な変化は見られなかったが、鉛直荷重が大きい場合（例えば、1.5tonf 用では $P=19.6\text{kN}$ 、3.0tonf 用では $P=29.4\text{kN}$ の場合）、スパンの増加にともなって水平復元力がより低くなっている。このことは、スパンの増加にともなう軸力の変動の低減の効果より、安定板の回転角の増加のほうが支配的であったためと推定される。また、座屈発生の安定限界にお

よぼすスパンの影響については、今回の実験からは言及できなかった。



(a) 1.5tonf 用の場合



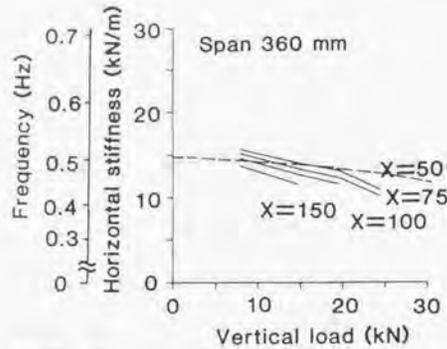
(b) 3.0tonf 用の場合

図 7-5 スパンの影響

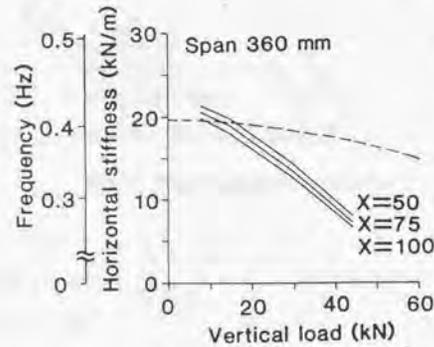
(3) 剛性

多段積層ゴムの水平剛性は、図 7-3、7-4 に見られるとおり、顕著な鉛直荷重依存性と若干の水平変位依存性（非線形性）をもっている。そこで、図 7-3、7-4 の実験デー

タ（実線）から、各鉛直荷重下の、各水平変位に対する水平剛性を、復元力のヒステリシスの中心線で算定される弾性エネルギーと等しい等価線形剛性として求めた^{(7-4)~(7-6)}。図7-6は水平剛性と鉛直荷重の関係を、水平変位振幅をパラメータにして示したものである（縦軸に併記された振動数は、1.5tonf用、3tonf用、各々の定格質量に対するものである）。また、図の破線は、式(7-1)、(7-2)による計算結果である。



(a) 1.5tonf 用の場合

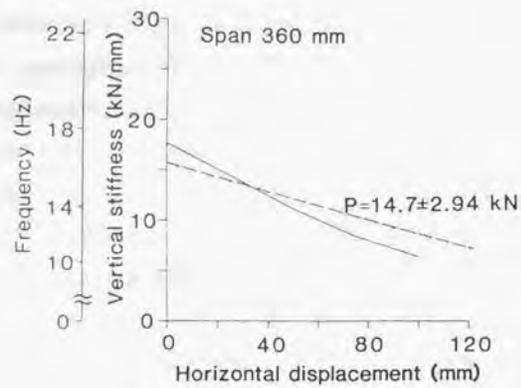


(b) 3.0tonf 用の場合

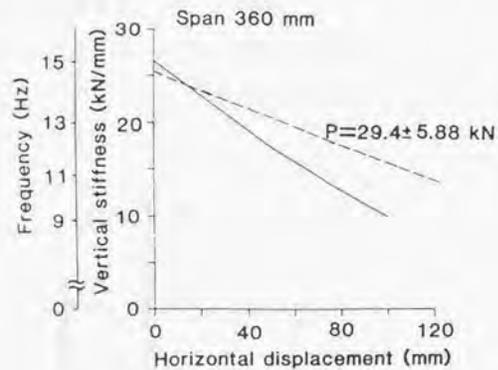
図7-6 水平剛性の鉛直荷重依存性

計算結果と実験結果を比較すると、1.5tonf 用の場合にはほぼ満足しえる一致がえられているが、3tonf 用の場合には、鉛直荷重が大きくなるにつれて水平剛性の実験値は急激に低下し、計算値との差が拡大している。設計式が理想的な多段化を仮定してえられた式であることを考えれば、この結果は、図7-3、7-4での実線と破線の比較からえられた結果と同じものであることがわかる。すなわち、1.5tonf 用の場合には理想的なものに近い多段構造が実現されたが、3tonf 用の場合、主として安定板の曲げ剛性不足のために、要素積層ゴムの性能十分に発揮されない多段構造になったと考えられる。この推測は、ここでは省略したが、3tonf 用の要素積層ゴムの水平剛性は式(2)をほぼ満足するものであったことから、裏付けられる。

多段積層ゴムの鉛直剛性についても、通常の積層ゴムの場合と同様な実験データ解析をおこない、その結果、鉛直荷重振幅依存性はほとんどないが、水平変位依存性は、次に述べるとおり、相当に強いことが示された。図7-7は鉛直剛性の水平変位依存性を示したもので、水平変位が大きくなるにつれて鉛直剛性はかなり低下している。また、図中の破線は、式(7-6)、(7-7)による計算結果である。計算結果と実験結果はおおむね一致しているといえるが、水平変位が大きくなるにつれて、特に3tonf 用場合に、鉛直剛性の実験値のほうがより低下する傾向がある。



(a) 1.5tonf 用の場合



(b) 3.0tonf 用の場合

図 7-7 鉛直剛性の水平変位依存性

7・2・4 正弦波加振および微振動実験

(1) 実験の概要

試作した多段積層ゴムが、微振動（加速度で数 cm/sec^2 以下、変位で数 μm 以下の振動をさす場合が多い）に対しても、静的加力実験でえられた剛性と同一剛性を持ち、それゆえ、微振動の水平方向除振に有効であることを確認するため、さらに、多段積層ゴムの減衰についての知見をえるために、図 7-8 に示す供試体を用いて正弦波加振実験と微振動実験をおこなった。この供試体は、6000kg の質量（ $1800 \times 1200 \times 30\text{mm}$ の鋼板を重ねたもの）を 4 個の 1.5tonf-0.5Hz 用多段積層ゴム（スパン 280mm）で支持したもので、ダンパは用いてない。

正弦波加振実験には水平・鉛直二次元振動台を使用した。微振動実験では、供試体を振動台わきのコンクリート床上に置き（固定はしていない）、常時微動を入力した、供試体質量の応答を測定した。なお、測定はムービング・コイル式微振動計（MTKH&V-1C 振動技研（株））を使用した。



図 7-8 振動実験中の供試体

(2) 正弦波加振実験結果

図 7-9 は、水平および鉛直方向の単独加振による共振曲線である。図中の実線は線形一自由度系（固有振動数と臨界減衰比の値は図中に示されている）の理論曲線であ

る。ここでえられた固有振動数は、ほぼ 1.5tonf 用多段積層ゴムの設計値どおりのものである。また、この多段積層ゴムは、定格質量に対して、水平に約 3%、鉛直に約 5%の臨界減衰比を持つことがわかった。

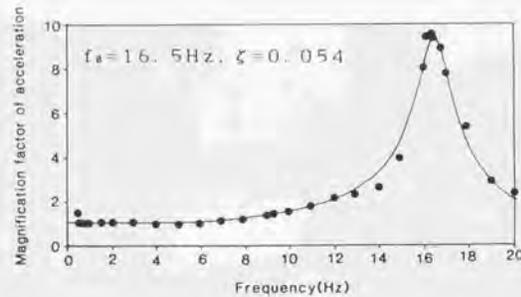
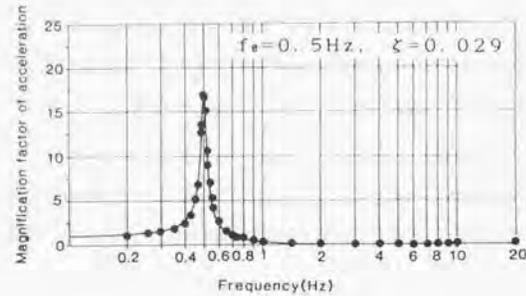


図 7-9 水平および鉛直方向の共振曲線

(3) 微振動実験結果

微振動実験で測定された入力加速度（コンクリート床で測定）と応答加速度（質量上面中央で測定）の波形例を図 7-10 に示す。この例の場合、水平方向には、 10^1cm/s^2 オーダの最大加速度を持つ微振動が多段積層ゴムの持つ除振効果によって約 1/8 に低減し、鉛直方向にも、同様な大きさの微振動が約 1/2 に低減した。ただし、この場合、水平方向の入力加速度では 5Hz 付近の振動数成分が卓越していたのに対して、鉛直方向の入力加速度は 30Hz 以上の成分を多く持っていた。鉛直方向の除振効果（本多段

積層ゴムでは意図していない) は、このように非常に高い振動数成分を持つ入力のためであった。

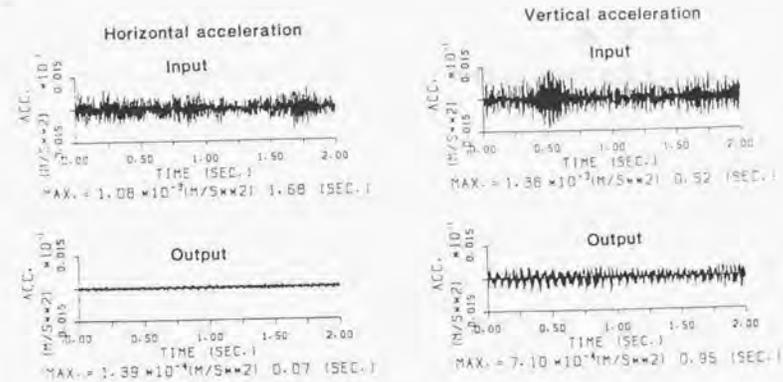


図 7-10 水平および鉛直方向の微振動波形例

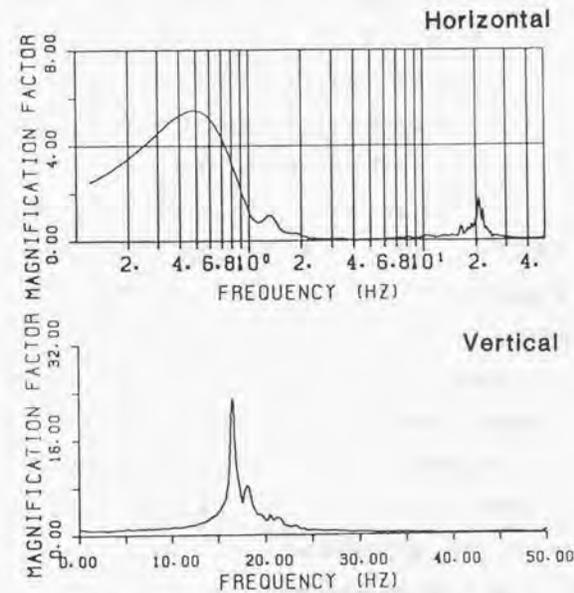


図 7-11 水平および鉛直方向の周波数伝達関数

図 7-11 は、入力、応答加速度のパワースペクトル(平準化のために、バンド幅 0.5Hz の Parzen のラグ・ウィンドウを用いた)から求めた周波数伝達関数である。水平方向の周波数伝達関数は 0.5Hz に、鉛直方向のそれは 16.5Hz にそれぞれピークを持っている。これらの振動数は図 7-9 でえられた固有振動数と完全に一致しており、静的加力実験や正弦波加振実験で求められる剛性と同じ剛性を持つことが確認された。

7・2・5 まとめ

除振・免震床用多段積層ゴムを製作し、静的加力実験、振動台実験および微振動実験をおこない以下の知見を得た。

(1) 本研究で試作した 1.5tonf-0.5Hz 用多段積層ゴムは、定格積載荷重 14.7kN に対して水平方向に 0.5Hz の固有振動数となる水平剛性と 0.2m の変位吸収能力を有することが確認され、このままで十分に実用化しえるものと考えられる。また、要素積層ゴムの復元力特性を変位で 8 倍、荷重で 4 倍にした理想的な多段積層ゴムの復元力と多段積層ゴムの実測された復元力特性は、ほぼ一致しており安定板の曲げ剛性は十分であった。ただし、要素積層ゴム自体、水平剛性の水平剛性の軸力依存性があり使用上は、この点に注意する必要があると思われる。

(2) また、3tonf-0.4Hz 用多段積層ゴムは、定格積載荷重 29.4kN に対して水平方向に 0.4Hz の固有振動数となる水平剛性と 0.2m の変位吸収能力を有することが確認された。ただし、多段積層ゴムの実測された復元力特性は、要素積層ゴムから求めた理想的な多段積層ゴムの復元力と比較して小さい値となった。従って、3.0tonf 用多段積層ゴムは、安定板の曲げ剛性を上げることで、特に定格荷重を超える鉛直荷重に対する水平変位吸収能力が向上すれば、実用しえると考えられる。

(3) 多段積層ゴムの水平剛性におよぼすスパンの影響については、今回の実験から、単に大きくするだけでなく、同時に安定板の曲げ剛性を大きくしなければ、大変形時の安定性を確保できない可能性があることがわかった。

(4) 振動台実験および微振動実験から、本多段積層ゴムが免震装置のほか除振装置としても十分性能を発揮することがわかった。測定された固有振動数から、1.5tonf 用多段積層ゴムの水平剛性は、振動数 0.5Hz において、動的にも微振動でも静的加力試験から求められた値とほぼ一致することがわかった。この理由として、本多段積層ゴムに使用したゴム材料が、比較的カーボンの含有率が低く、剛性の速度依存性(動ばね効果)と微小振幅で急激に剛性が変化しないことが考えられる。

(5) 以上の結果から本多段積層ゴムを用いることにより、地震動のみならず微小振動にも効果のある、0.4Hz の水平固有振動数を持つ除振・免震床は困難かもしれないが、0.5Hz あるいはそれを多少下回る水平固有振動数を持つ除振・免震床は十分に可能であると考えられる。

なお、本研究で開発された多段積層ゴムは、超 LSI 工場のクリーンルーム内に設置される除振・免震床のデバイスとして実用化されている^{(7-7), (7-8)}。

7・3 高減衰ゴムダンパの減衰特性

7・3・1 まえがき

本節では高減衰ゴムダンパの除振装置の減衰材としての適用の可否を調べるため、高減衰ゴムダンパの微小振幅領域における減衰特性を、新たに開発した装置を用い実験的に検討している。また、従来、除振装置に多く用いられているシリコン系オイルを用いた粘性せん断型ダンパの減衰特性と比較を試みている。さらに多段積層ゴムと高減衰ゴムダンパを適用した主に水平方向の微振動の除去を目的とした除振装置を試作し常時微動に対する除振効果を実験的に検討している。

7・3・2 高減衰ゴムダンパ

図 7-12 は実験に用いた高減衰ゴムダンパである。高減衰ゴムダンパは図 7-13 に示すように少量の熱可塑性エラストマが三次元網目構造を形成し、高粘性流体を保持補強している特殊な構造を有している。このため、従来の粘弾性体からなるダンパと比較して、変形能力、高温形状保持性および形状記憶性などにすぐれている。今回の実験では後述の多段積層ゴムを用いた除振台の臨界減衰比が大振幅領域で約 15% になるように大きさ $50 \times 50 \times 10^3 \text{mm}$ のゴム板を鋼板の間にはさみ込み 90℃ で約 15 分間加圧接着する構造を採用した。ダンパの 1 次形状係数（せん断面積を自由面積で除した値）は 1.25 であった。

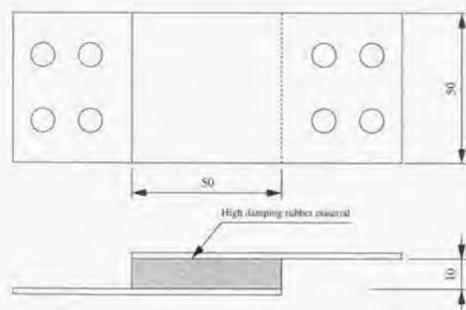


図 7-12 高減衰ゴムダンパ



図 7-13 高減衰ゴムダンパの内部構造の例

7・3・3 粘性せん断型ダンパ

図 7-14 に実験に用いた粘性せん断型ダンパを示す。粘性体は微振動除振装置のダンパに多く用いられているシリコンオイルとした。シリコンオイルの粘性係数は $10^6 \text{cP/at } 25^\circ\text{C}$ で抵抗板のせん断面積は $5.20 \times 10^3 \text{m}^2$ 、抵抗板と容器のギャップは $4.1 \times 10^{-3} \text{m}$ である。実験では前述の高減衰ゴムダンパと等しい臨界減衰比を得るようにせん断面積とギャップを決めた。

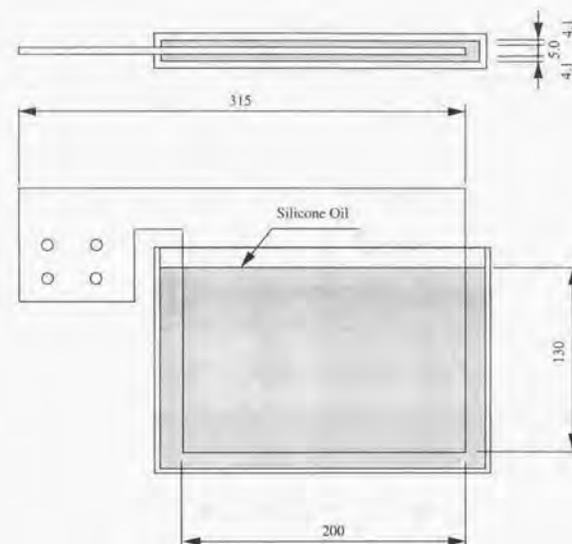


図 7-14 粘性せん断型ダンパ

7・3・4 基本特性実験

(1) 実験装置

図7-15におもに大振幅領域の高減衰ゴムダンパと粘性せん断型ダンパの復元力特性を把握するために用いた実験装置を示す。本実験装置では試験体はアクチュエータのシリンダに一方の側を取付けられ他の一方を基礎側に取付けられている。実験ではアクチュエータに取付けられたロードセルと変位計によりダンパの変位量と復元力を計測した。実験装置は特に恒温槽などには入れなかったが室温を実験開始前と終了後で計測し実験中に極端な雰囲気温度変化が生じないことを確認している。ここではおもにダンパのせん断剛性の変位振幅依存性と減衰力の速度依存性について検討した。

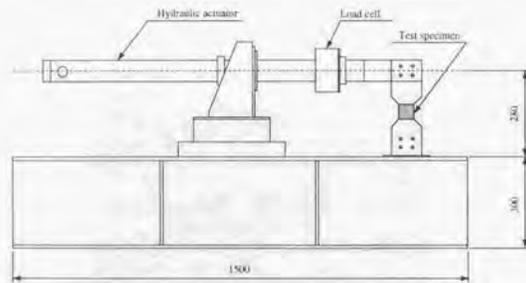


図7-15 ダンパ加力装置

(2) 高減衰ゴムダンパの復元力特性

図7-16は前述の高減衰ゴムダンパの復元力特性の一例でアクチュエータの加振周波数 1.0Hz、雰囲気温度 16℃の時のものである。変位振幅は最大 9.57mm でせん断ひずみ（変位振幅をゴム厚みで除したもの）に換算すると 0.957 となる。この復元力特性からわかるように本高減衰ゴムダンパはせん断ひずみ 0.5 程度以下では粘性的な減衰をし、だ円形状の履歴特性を有すること、また減衰が等価減衰定数で 0.4 程度もつことが確認された。せん断ひずみが 0.5 を越えると履歴特性が弾塑性的になることがわかった。この傾向は、加硫ゴムの傾向とほぼ同じである (79)。

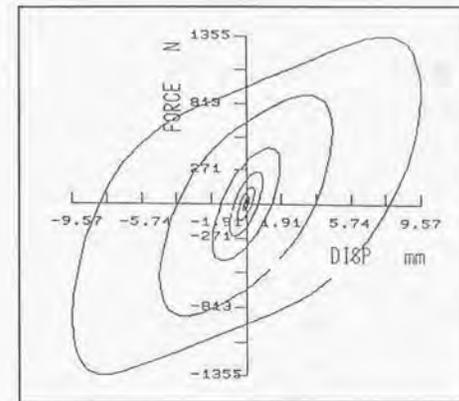


図7-16 高減衰ゴムダンパの大変位領域の復元力特性

7・3・5 微小変位振幅特性実験

(1) 特性試験の概要

微小変位振幅特性試験では、図 7-17 に示すような多段階層ゴム 4 基で定盤を支持する構造を有する除振台に水平加振器をのせ、その加振器の反力によって除振台の定盤に微小変位振幅を生じさせて、ダンパの復元力と変位を、図 7-17 の拡大図に示すように取付けられたひずみゲージ式荷重変換器（ロードセル）と非接触式変位計で測定しデジタル記録計で記録した。なお、収録時にはノイズをカットするためにアナログフィルタを用い 0.1Hz~10Hz のバンドパスフィルタをかけた。実験では、加振振動数を 1, 1.5, 2.5Hz とし、加振振幅を 2.5, 5.0, 10, 20, 50, 100 μm とした。ひずみゲージ式荷重変換器は、定格負荷 98N で非直線性とヒステリシスは定格負荷に対し 0.01% 以下であることが保証されている。非接触式変位計は、1 μm ~4mm まで測定可能である。計測器の仕様から、振幅 1 μm までの復元力特性を測定できたが振幅 2.5 μm 以下では床振動の影響を受けたため解析は振幅 2.5 μm 以上のデータに限定した。

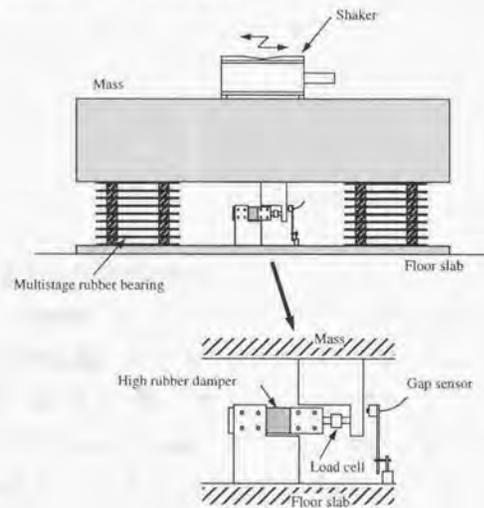


図 7-17 微小振幅領域の測定方法

(2) 高減衰ゴムダンパの減衰力特性

図 7-18(a), (b) は高減衰ゴムダンパの雰囲気温度 16°C における変位振幅 2.5 μm ~100 μm までの復元力特性（図中実線で示す）で、加振振動数 1Hz と 1.5Hz のものである。

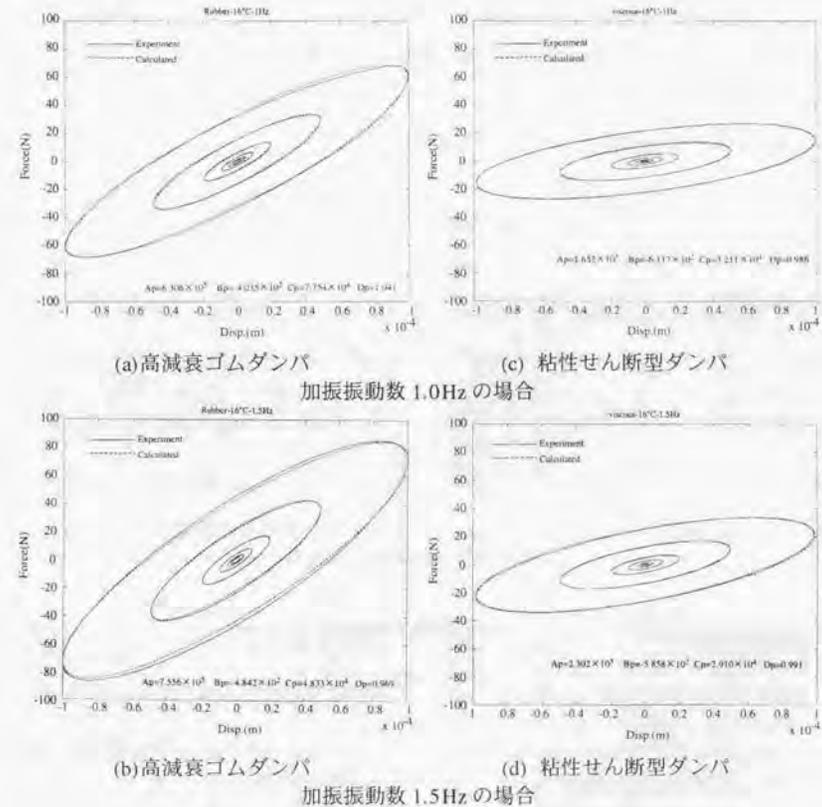
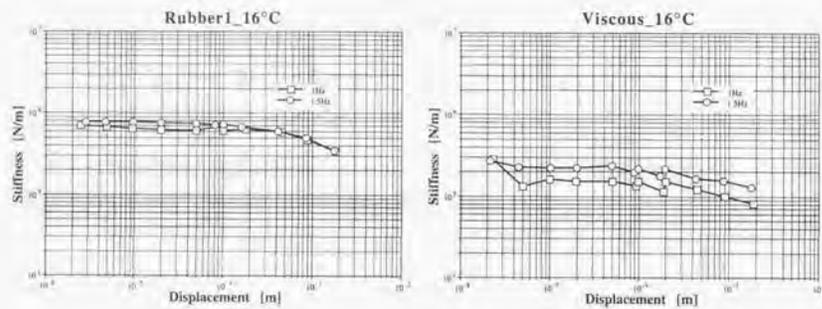


図 7-18 ダンパの微小振幅領域における復元力特性(16°C)

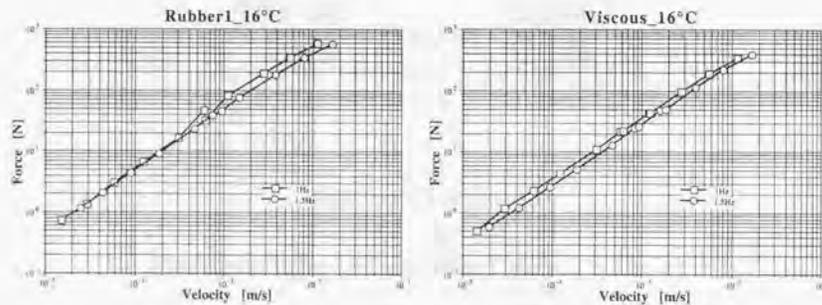
(a) せん断剛性の変位振幅依存性

復元力特性のヒステリシスループの正負の最大変位点を結んだ直線の傾きとした求められたせん断剛性の変位振幅依存性を図 7-19(a) に示す。加振振動数の違い

によって剛性の変化がみられるが、せん断剛性は両者ともによい線形性（振幅によって剛性が変化しない）を示すことがわかった。この剛性の線形性は高減衰ゴムダンパを微小振動用ダンパに適用する場合極めて重要である。すなわち、通常の高減衰ゴム⁽⁷⁻¹⁰⁾など加硫ゴムの場合、剛性はひずみに対して非線形性を有し通常は変位振幅の減少にともなって急激に大きくなってゆく。したがって通常の高減衰ゴムで減衰を付与しようとすると微小振幅での固有振動数を上昇させてしまい除振装置に適用するのは好ましくないからである。また、微小振幅領域から大振幅領域まで減衰特性が変わらないことが確認された。

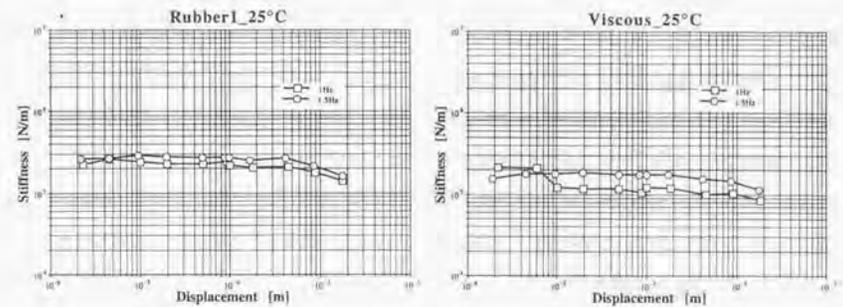


(a)高減衰ゴムダンパ (c)粘性せん断型ダンパ
せん断剛性のせん断変位依存性

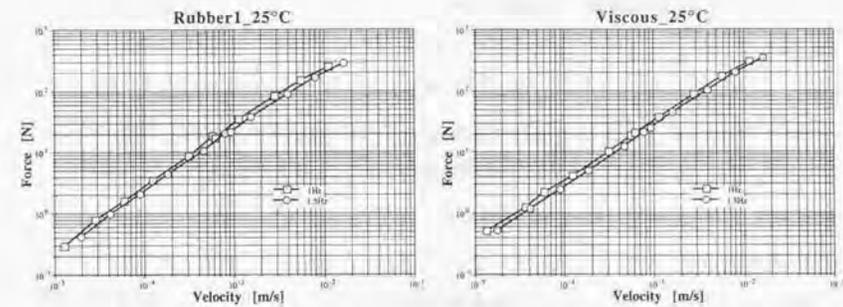


(b)高減衰ゴムダンパ (d)粘性せん断型ダンパ
減衰力の速度依存性

図7-19 減衰力特性(16°C)



(a)高減衰ゴムダンパ (c)粘性せん断型ダンパ
せん断剛性のせん断変位依存性



(b)高減衰ゴムダンパ (d)粘性せん断型ダンパ
減衰力の速度依存性

図7-20 減衰力特性(25°C)

(b) 速度依存性

高減衰ゴムダンパの減衰力の速度依存性を検討したのが図7-19(b)である。図においてせん断速度は振幅と加振振動数から計算している。減衰力は復元力特性の変位ゼロにおける荷重とした。図より減衰力は明確な速度依存性があり、その依存性は速度の1乗に比例するものであった。さらに、せん断剛性にも若干の速度依存性が認められる。

(c) 温度依存性

図7-20(a), (b)は高減衰ゴムダンパの雰囲気温度25°Cにおける復元力特性である。

実験条件は雰囲気温度 16℃の場合と同じである。本高減衰ゴムダンパは、剛性と減衰ともに温度依存性を有することわかる。25℃におけるダンパの剛性は、16℃の剛性の約 1/3 に低下している。また減衰も 1/2 に低減している。したがって本高減衰ゴムダンパを適用する場合、使用温度を十分考慮する必要がある。

(3) 粘性せん断型ダンパの減衰力特性

図 7-18(c), (d) は粘性せん断型ダンパの雰囲気温度 16℃における変位振幅 2.5 μm ~ 100 μm までの復元力特性で、加振振動数 1Hz と 1.5Hz のものである。これらの実験条件は前述の高減衰ゴムダンパのものと同じである。

(a) せん断剛性の変位振幅依存性

復元力特性より、本粘性せん断型ダンパは剛性を有することがわかった。復元力特性から求めたせん断剛性の変位振幅依存性を図 7-19(c) に示す。せん断剛性は加振振動数の違いによって剛性の変化がみられるが、両者ともによい線形性（振幅によって剛性が変化しない）を示すことがわかった。この傾向は高減衰ゴムダンパと同じである。ただし、粘性せん断型ダンパの剛性の大きさは、高減衰ゴムダンパの 1/3 程度である。したがって、減衰付与による固有振動数の上昇の割合は高減衰ゴムダンパを用いる場合より小さい。

(b) 速度依存性

粘性せん断型ダンパの減衰力の速度依存性を検討したのが図 7-19(d) である。図より減衰力はほぼ速度の 1 乗に比例することがわかった。

(c) 温度依存性

図 7-20(c), (d) は粘性せん断型ダンパの雰囲気温度 25℃における復元力特性である。実験条件は雰囲気温度 16℃のものと同じである。本粘性せん断型ダンパは、剛性と減衰ともに通常の温度範囲（室温付近の使用を想定）ではきわめて温度依存性が小さいダンパであることがわかる。

7・3・6 除振特性解析

(1) モデルリング

後述の微振動応答解析をおこなうに際し、ダンパの復元力と減衰力をモデル化する。モデル化は特性試験でえられたせん断剛性-変位線図と減衰力-速度線図より剛性は大変形時において剛性が低下する傾向を表現できるように変位振幅（ひずみ）依存性を、減衰力は速度依存性をそれぞれ考慮できるように以下の近似式を仮定し、そのパラメータを求めた。

$$F_i = F_k + F_c \quad (7-10)$$

ただし、 F_i はダンパが発生する力、 F_k はダンパの剛性による復元力、 F_c はダンパの減衰力である。 F_k は、せん断ひずみ依存性を考慮し、 $F_k = K(x)x$ とした。ただし、 $K(x) = A_p \exp(B_p x)$ 、ここでは実験的に定まる定数、 x は水平変位である。減衰力は速度依存性を考慮し、 $F_c = C_p \dot{x}^{D_p}$ とした。ここで C_p 、 D_p は実験的に定まる定数である。なお、 A_p 、 B_p 、 C_p 、 D_p は、温度および加振振動数を限定した条件で求めた。一例として、16℃の高減衰ゴムダンパと粘性せん断型ダンパの復元力と減衰力は、それぞれ、
高減衰ゴムダンパ：

$$F_k = 7.56 \times 10^3 \exp(-403.5x)x \quad (7-11)$$

$$F_c = 4.83 \times 10^4 \dot{x} \quad (7-12)$$

粘性せん断型ダンパ：

$$F_k = 2.30 \times 10^3 \exp(-611.7x)x \quad (7-13)$$

$$F_c = 2.91 \times 10^4 \dot{x} \quad (7-14)$$

となる。ただし、力の単位は N、変位の単位は m である。なお、実用的に上式を適用する場合は、復元力と減衰力の温度依存性と剛性の速度依存性を考慮するた

めの補正係数を求める必要がある。

図 7-18(a),(b)は、高減衰ゴムダンパのヒステリシス特性の実験結果（図中の実線）とモデルより計算された結果（図中の破線）を比較したものである。図より本高減衰ゴムダンパの復元力/減衰力特性は、剛性をせん断ひずみ依存型、減衰を速度依存型とするモデルで表現できることがわかる。また、解析範囲を微小振幅領域に限定すれば、剛性のせん断ひずみ依存性を考慮する必要もなくなる。したがって、微小振幅領域における解析はより簡単になる。

粘性せん断型ダンパのモデルについても、高減衰ゴムダンパと同様なモデル化をおこなった。図 7-18(c),(d)は実験結果（図中の実線）とモデルを用いた解析結果（図中の破線）で両者はよく一致している。

(2) 多段積層ゴムの微小変位振幅特性

本除振台はすでに図 7-17 に示したような構造を有しており、おもに水平方向のみの除振を目的にしている。この除振台は図に示すように多段積層ゴム 4 基で支持されている。多段積層ゴムは、1 段あたり 4 個の要素積層ゴム（直径 30mm, ゴム厚 0.5mm×層数 31）を安定板を介して 8 段積み重ねた構造を有している。除振特性試験に先立ち、多段積層ゴムの剛性と減衰特性を把握するために 2 軸加力試験装置を用い、水平方向（せん断）の力学特性を測定した。実験では、多段積層ゴムに軸力の相当する 9.8kN をエアアクチュエータを用い载荷しながら水平方向の復元力を測定した。水平方向の加振周期は、30 秒で実験はほぼ準静的なものであった。測定された水平剛性を図 7-21 に示す。なお、図では、多段積層ゴム 4 基分の剛性を示した。また、減衰は臨界減衰比で 0.031 であった。

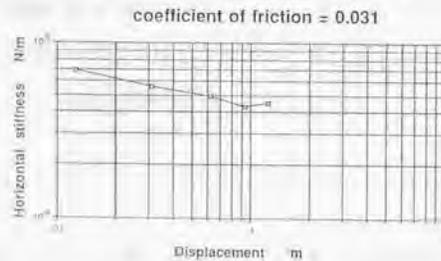


図 7-21 多段積層ゴムの水平剛性

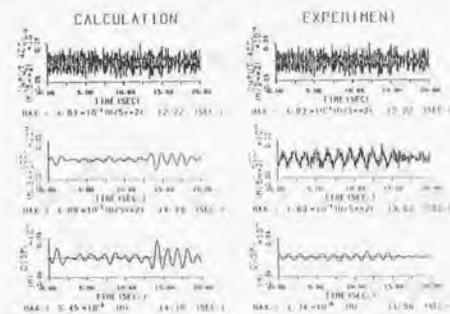
(3) 除振実験

除振台モデルの質量は、4000kg で鋼板と鋳鉄製の定盤で構成されている。定盤の大きさは 1800×1200×400^rである。ダンパは、除振台と床スラブの間に装着した。測定は、床スラブ上の加速度と除振台上の加速度をサーボ型加速度計で、ダンパの復元力を荷重計で、除振台と床スラブの相対変位を非接触型変位計で測定した。

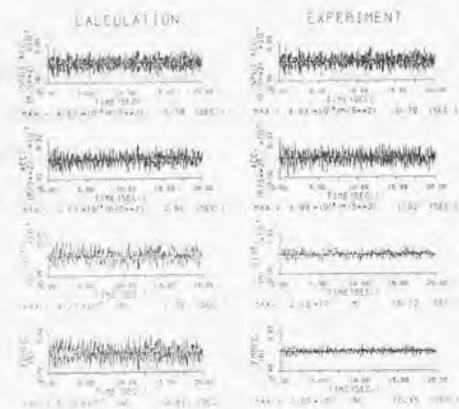
(a) 高減衰ゴムダンパの減衰効果

図 7-22 (b)と図 7-23(b)は、多段積層ゴムのみで支持した場合と高減衰ゴムダンパを装着した場合の応答波形で、環境温度 16℃のものである。図では、上から順に入力加速度、相対変位、減衰力を示した。両者とも入力加速度に対して応答加速度の方が常に小さくなっていることがわかる。除振台の絶対変位は多段積層ゴムのみで支持した場合、固有振動数で大きく揺れているのに対して、高減衰ゴムダンパを装着した場合は、除振台の相対変位は小さくなっている。また、このときに高減衰ゴムダンパに生じる減衰力は、最大で $2.20 \times 10^4 \text{N}$ であった。

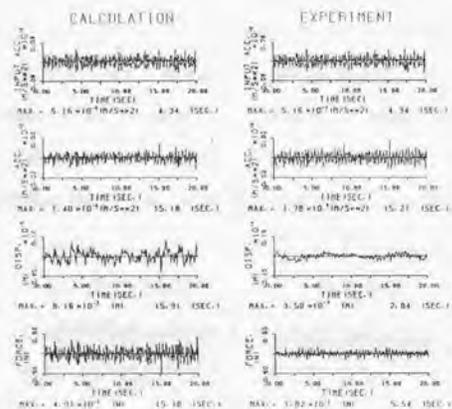
図 7-24(b)は除振台に粘性せん断型ダンパを装着した場合の微振動応答特性である。応答は高減衰ゴムダンパを装着したときと同様の結果が得られている。この結果より、高減衰ゴムダンパは粘性せん断型ダンパと同等の減衰性能を有することが確認された。



(a) 解析 (b) 実験
図 7-22 応答波形 (ダンパなしの場合)



(a) 解析 (b) 実験
図 7-23 応答波形 (高減衰ゴムダンパを装着)



(a) 解析 (b) 実験
図 7-24 応答波形 (粘性せん断型ダンパを装着)

(b) 解析モデルによる応答シミュレーション

前述の基本特性試験によるモデル化によって得られたパラメータを用いて微振動応答シミュレーションを実施した。解析モデルは、除振台の水平方向のロッキングを考慮できるように図 7-25 のようにした。

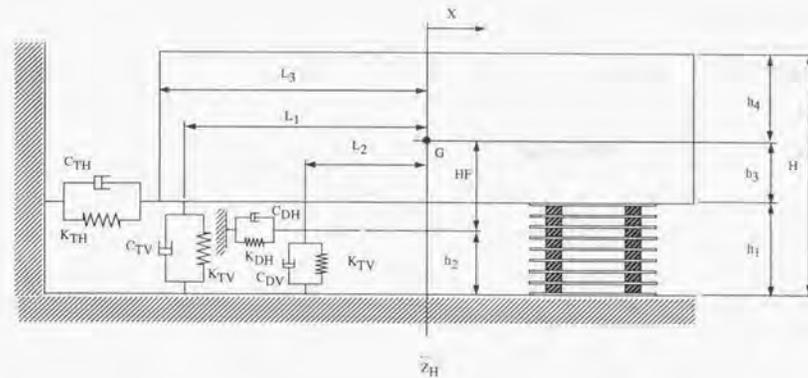


図 7-25 解析モデル

モデルの運動方程式は以下のとおりである。なおこのとき、除振台の応答変位が非常に微小であること、および減衰力が速度の 1 乗にほぼ比例することを考慮して、多段積層ゴム、高減衰ゴムダンパおよび粘性せん断型ダンパの剛性と減衰係数を定数としている。すなわち、剛性を A_p 、減衰係数を C_p としている。

水平方向：

$$m(\ddot{x} + \ddot{z}_H) + C_{TH}(\dot{x} - h_3\dot{\theta}) + C_{DH}(\dot{x} - (h_3 + h_1 - h_2)\dot{\theta}) + K_{TH}(x - h_3\theta) + K_{DH}(x - (h_3 + h_1 - h_2)\theta) = 0 \quad (7-15)$$

回転方向：

$$\begin{aligned} & -J\ddot{\theta} - C_{TV}L_1\dot{\theta}L_1 + K_{TV}L_1\theta L_1 + C_{DV}L_2\dot{\theta}L_2 \\ & -K_{DV}L_2\theta L_2 + C_{TH}(\dot{x} - h_3\dot{\theta})h_3 + K_{TH}(x - h_3\theta)h_3 \\ & + C_{DH}(\dot{x} - (h_3 + h_1 - h_2)\dot{\theta})(h_3 + h_1 - h_2) \\ & + K_{DH}(x - (h_3 + h_1 - h_2)\theta)(h_3 + h_1 - h_2) = 0 \end{aligned} \quad (7-16)$$

解析に用いたパラメータを以下に示す。多段積層ゴムに関するものとして、

水平剛性： $K_{H1} = 7.88 \times 10^4 \text{ N/m}$

鉛直剛性： $K_{V1} = 3.55 \times 10^7 \text{ N/m}$

水平減衰係数： $C_{\text{m}}=1.78 \times 10^4 \text{Ns/m}$

鉛直減衰係数： $C_{\text{v}}=4.06 \times 10^4 \text{Ns/m}$

高減衰ゴムダンパに関するパラメータは式(7-11), (7-12)から,

剛性： $K_{\text{m}}=K_{\text{ov}}=6.31 \times 10^5 \text{N/m}$

減衰係数： $C_{\text{om}}=C_{\text{ov}}=7.75 \times 10^4 \text{Ns/m}$

同様に, 粘性せん断型ダンパは式(7-13), (7-14)から,

剛性： $K_{\text{m}}=K_{\text{ov}}=2.30 \times 10^5 \text{N/m}$

減衰係数： $C_{\text{om}}=C_{\text{ov}}=2.91 \times 10^4 \text{Ns/m}$

である。実験では減衰が一致するように試みたが、結果として粘性せん断型ダンパの方が減衰係数が大きくなった。高減衰ゴムダンパを用いた場合と粘性せん断型ダンパを用いた場合の応答解析結果を測定結果と比較して、図 7-22~図 7-24 の (a)に示す。なお、解析にあたっては入力加速度は、測定された床加速度を用いた。実験結果より両者ともに除振台上の応答加速度を入力加速度の 1/4 程度に小さくすることができている。計算結果は、最大値のオーダはほぼ一致したものの精度的にはまだ十分とはいえないが、応答加速度を予測するには十分と思われる。

7・3・7 まとめ

ゴム系材料を基本とした高減衰ゴムダンパを開発し、主に微小変位振幅領域での基本特性試験をおこない以下の結論を得た。

- (1) 本高減衰ゴムダンパは、微小領域から大変形領域まで（せん断ひずみで 2.5×10^4 から 1 まで）エネルギー吸収効果をもつことが実験的に確認された。
- (2) 高減衰ゴムダンパの減衰力は速度依存性を有し、減衰力はほぼ速度の 1 乗に比例するものであった。また、剛性は大ひずみ領域でひずみ依存性を有するが、微小ひずみ領域ではほぼ一定の値となり線形として取り扱えることがわかった。
- (3) 高減衰ゴムダンパの復元力特性は、剛性のひずみ依存性と減衰力の速度依存性を考慮するモデルにより実験結果を良好に再現することができた。
- (4) 高減衰ゴムダンパの剛性と減衰力には温度依存性があり、比較のため検討した粘性せん断型ダンパ（粘性体はシリコンオイル）のそれより大きいものであった。
- (5) 提案された解析モデルは、比較的単純なものであるが微振動応答を再現させるに十分なものであった。

7・4 結語

本章では、多段積層ゴムの除振装置への適用と題し、超 LSI やレーザ応用製品などの製造設備で生じている、集積回路の集積度向上にともなう、微振動による製品の精度および歩留まりの低下が問題を解決するための微振動除振装置への多段積層ゴムの適用可能性および高減衰ゴムダンパの同装置のエネルギー吸収部材への適合性を実験的に検討した。

その結果、本章で開発された低減衰ゴムを用いた多段積層ゴムは、 10^3cm/s^2 オーダの入力加速度に対しても十分な除振性能を有することが確認された。また、微振動に対する多段積層ゴムの動特性は、静的加力試験結果から得られる復元力特性から予測可能なことが示された。

高減衰ゴムダンパは、数 μm の変位振幅においても、粘性せん断型ダンパと同等な十分なエネルギー吸収性能が得られることがわかった。

以上の結果から、低減衰ゴムを用いた多段積層ゴムと高減衰ゴムダンパは、微振動除振用デバイスで適用可能であることが確認された。

第7章の参考文献

- (7-1) 藤田隆史, 超 LSI 工場の振動問題—微振動防振技術と免震技術—, 機誌, 89-809, (1986), 427-432.
- (7-2) 藤田聡・古屋治・藤田隆史・寺本隆幸・北村春幸・森川尚一・水津洋二, 高減衰ゴムダンパを用いた高層建物の制振に関する研究(第1報, 高層建物モデルを用いた振動実験と応答解析), 機論, 59-565, C(1993), 2636-2642.
- (7-3) 藤田隆史・藤田聡・芳沢利和, 積層ゴムによる重量機器の免震支持(第1報, 実大免震支持装置についての基礎実験), 機論, 50-454, C(1984), 933.
- (7-4) 藤田隆史・津田博史・鈴木重信, 重量機器免震用積層ゴムの静的加力実験(大1報, 積層ゴム単独の場合), 生産研究, 38-3, (1986), 144-147.
- (7-5) 藤田隆史・藤田聡・鈴木重信・芳沢利和, 建築免震用の積層ゴムに関する実験的研究(第1報, 50トン用積層ゴムの静的加力実験), 機論, 53-485, C(1987), 71-76.
藤田隆史・藤田聡・鈴木重信・芳沢利和, 建築免震用の積層ゴムに関する実験的研究(第2報, 100トン用積層ゴムの静的加力実験), 機論, 53-485, C(1987), 77-81.
- (7-6) 藤田隆史・井上直樹・浅見欽一郎・鶴田顕・竹下章治, 多段積層ゴムを用いた三次元免震・除振床の研究(第1報, 大規模実験モデルによる免震・除振性能の検討) 機論, 53-496, C(1987), 2521-2528.
- (7-7) 藤田隆史・服部忍・竹下章治・鶴田顕・福井伊津志・石山日出男, 機論, 多段積層ゴムを用いた三次元免震・除振床の研究(第2報, 鉛直免震・除振機構の検討) 56-521, C(1990), 43-48.
- (7-8) 例えば, 日本鉄道車輛工業会編, 改訂防振ゴム, (1975), 22, 現代工学社.
- (7-9) 水津洋二・須藤千秋・鈴木重信・福森建至, 土木学会第48回年次学術講演会講演梗概集第1部, (1993), 906-907.

第8章 結論

通常の積層ゴムでは適用不可能であった建築用長周期免震装置や、床および機器レベルの免震装置として、また超高層建物制振装置として、さらに除振装置として多段積層ゴムを開発した。最初に、基礎研究として、多段積層ゴムの力学特性を、多段積層ゴムとその要素積層ゴムの加力実験から検討した。つづいて、多段積層ゴムの力学特性を解析的に求める手法を提案し加力実験の結果と比較検討した。さらに、制振装置、免震装置および除振装置に適合した多段積層ゴムを設計・製作し、加力試験および振動実験を通じて実用化研究を実施した。これらの研究から得られた結論をまとめると以下ようになる。

(1) 大型多段積層ゴムを用いた大変形加力試験では、安定板の曲げ剛性を変化させた多段積層ゴムの復元力特性から、安定板の曲げ剛性が低下すると、多段積層ゴムの水平剛性は低下し、鉛直方向の沈み込み量は大きくなることが確認された。さらに、多段積層ゴム上端の回転を許容すると、安定板の曲げ剛性が十分高い値であっても、水平剛性が低下し、多段積層ゴム下端の要素積層ゴムに作用する軸力も水平変位の増加にともない極端に変化することがわかった。

(2) 要素積層ゴムの水平剛性の軸力依存性と回転拘束度の影響について実験と理論より検討した結果、要素積層ゴムの水平剛性の軸力依存性は、積層ゴムの1次形状係数(S_1)と2次形状係数(S_2)がそれぞれ影響し、1次形状係数と2次形状係数がともに小さくなるほど軸力依存性が大きくなることが確認された。今回実験した範囲($S_1=20\sim 30$ と $S_2=2.5\sim 3.5$)では、面圧 $0.98\sim 7.84\text{MPa}$ で、 $S_1=25$ 以上かつ $S_2=3.0$ 以上で軸力依存性がほとんどないことが示された。水平剛性の回転拘束度の影響は、軸力依存性の小さい要素積層ゴム(1次形状係数と2次形状係数がともに大きい)でも、回転拘束度が低下すると水平剛性が急激に低下していくことがわかった。

(3) 要素積層ゴムの復元力特性への各種依存性(回転拘束度、せん断変位依存性など)を考慮できる力学モデルとして、非線形はり要素モデルを採用し、多段積層ゴムの水平復元力特性におよぼす安定板の剛性の影響を解析的予測できる手法を提案し、剛性解析を実施した。解析から求められた多段積層ゴムの変形特性と水平復元力特性は実験結果を十分に再現することがわかった。この結果、安定板の曲げ剛性が要素積層ゴムの回転を拘束するに十分でない場合、要素積層ゴムが回転し結果として、多段

積層ゴムの水平復元力を低下させるとの予測の妥当性が検証された。以上のことから、要素積層ゴムの復元力特性を実験で確認できれば、その要素積層ゴムと種々の曲げ剛性を有する安定板から構成された多段積層ゴムの復元力特性を本提案の手法を用いることにより解析的に求めることが可能であることが示された。

(4) 多段積層ゴムの制振装置への適用研究では、多段積層ゴムを用いた振動質量5tonのマスダンバの実験モデルの振動実験を実施し、正弦波加振実験から、実験モデルは、微小変位入力でも応答し、制振効果が期待できることがわかった。しかし、共振固有周期は、入力振幅の増加とともに、長くなる傾向が認められた。また、静的加力実験から求められた水平復元力特性は、大振幅加振実験の固有周期と実験モデルの質量から計算される水平復元力特性と一致したことから、静的加力実験から制振装置の動特性が予測可能であることがわかった。

(5) 超高層ビル用ハイブリット制振装置の実用化研究では、定格質量33ton、水平固有周期3秒の多段積層ゴムを製作し、大変形加力実験から、水平変位1mの変位吸収能力を確認した。これらの多段積層ゴムを6基と油圧アクチュエータを用いることによって、振動質量200ton、水平固有周期3秒、変位吸収能力1mのハイブリット制振装置を実現することができた。地上実験では、過大な外乱が入力された場合(大地震時を想定)、アクチュエータの油圧回路を切り替えることにより、電磁弁とリリーフ弁を組み合わせた油圧回路により、所定の減衰力を発生させ、アクチュエータをオイルダンバのように機能させ、振動質量の過度な変形を防止することがわかった。この結果、大地震にも停止させることが必要のないアクティブ・パッシブ切替え型マスダンバが可能であることを示した。さらに、アクティブ制御では、モーダルフィルタを用いて、建物の1次モードと2次モードの振動を制振するコントローラを実現し、外乱の大きさによってフィードバックゲインを変え、可能な限りアクティブ制御をつづけることのできる可変ゲイン制御を実用化した。また、風・地震応答観測結果から制振効果を実証した。

(6) 多段積層ゴムの免震装置への適用研究では、まず、建築免震用多段積層ゴムの実用化研究として、882kN用と1470kN用多段積層ゴムを製作し、静的加力実験から、これらが建築物を免震するに十分な性能を有することを実験的に確認した。これらの多段積層ゴムを用いることにより、従来実現が困難であった周期4秒という長周期免

震建物を実現することができた。

(7) 免震床用高減衰多段積層ゴムの実用化研究では、高減衰多段積層ゴムを用いた免震床システムを開発し、振動台実験から入力床応答加速度を約 1/4~1/5 に低減できることを確認した。また、高減衰多段積層ゴムの復元力特性を Tri-Linear 型とした解析モデルによる免震床上の応答波形は、時刻歴波形、応答スペクトルともに実験結果とほぼ一致することが示された。

(8) 多段積層ゴムの除振装置への適用研究では、除振・免震床用多段積層ゴムの実用化研究をおこない、1.5tonf-0.5Hz 用多段積層ゴムおよび 3.0tonf-0.4Hz 用多段積層ゴムの製作し静的加力試験を実施し、それぞれの定格質量に対して、水平変位 0.2m を有することを確認した。また、この多段積層ゴスを 4 基使用した振動モデルによる振動台実験および微振動実験から、本多段積層ゴムが免震装置のほか除振装置としても十分性能を発揮することがわかった。さらに、静的加力試験より求められた水平復元力特性から計算された振動モデルの固有振動数は、振動台実験と微振動実験から実測された固有振動数に一致した。このことから、静的加力試験の水平復元力特性より、大振幅から微小振幅における動特性が予測可能であることが示された。

(9) 高減衰ゴムダンパの微小振幅領域における減衰特性の研究では、微小振幅領域から大振幅領域まで（せん断ひずみで 2.5×10^{-4} から 1 まで）エネルギー吸収効果を有することが実験的に確認された。また、高減衰ゴムダンパの減衰力は速度依存性を有し、減衰力はほぼ速度の 1 乗に比例するものであった。また、せん断剛性は大ひずみ領域でひずみ依存性を有するが、微小ひずみ領域ではほぼ一定の値となり線形として取り扱えることがわかった。この結果、高減衰ゴムダンパが、微振動用除振装置のエネルギー吸収部材として適用可能なことがわかった。

以上の適用研究から、多段積層ゴムが、免震装置のみならず、制振装置、除振装置として有効に機能することが示された。

発表論文

- (1) 正木信男・田村和夫, 制振装置用大型多段積層ゴムの開発(復元力特性におよぼす安定板の効果), 構造工学論文集, Vol.44B, 1998, 237-244. [第2章に関連]
- (2) 正木信男, 免震・制振装置用積層ゴムの復元力特性に関する研究(積層ゴムの復元力特性への回転拘束度の影響), 機論, 64-624, C(1998), 2915-2922. [第3章に関連]
- (3) 正木信男・田村和夫, 制振装置用大型多段積層ゴムの剛性解析, 機論, 65-631, C(1999), 65-631, 902-909. [第4章に関連]
- (4) 藤田隆史・松本洋一・正木信男・水津洋二, 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, 振動特性についての基礎的研究), 機論, C(1990), 56-523, 634-639. [第5章に関連]
- (5) T.Fujita, N.Masaki and Y. Suizu, Tuned Mass Damper Using Multistage Rubber Bearings for Vibration Control of Tall Buildings, Proc. Asia-Pacific Vibration Conference, Vol.2, 1991, 9.13-9.18
- (6) 藤田隆史・鎌田崇義・寺本隆幸・北村春幸・正木信男・水津洋二・菅野正・河内宏充, 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・パッシブ切替え型マスダンパの実用化, 機論, C(1994), 60-580, 4107-4115. [第5章に関連]
- (7) T.Fujita, T.Kamada, T.Teramoto, H.Kitamura, Y.Suizu, N.Masaki, T.Kanno and H.Kawauchi, Application of Hybrid Mass Damper Using Hydraulic Actuator and Multistage Rubber Bearing to High-rise Building, Proc. of 1WCSC, Volume 3, 1994, FA53-62.
- (8) 藤田隆史・鎌田崇義・正木信男, 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, アクティブ・マスダンパの制御則についての検討), 機論, C(1992), 58-545, 87-91.
- (9) 藤田隆史・鎌田崇義・正木信男, 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, 建物・マスダンパ

系実験モデルによる振動制御実験), 機論, C(1993), 59-558, 379-385.

- (10) T.Fujita, T.Kamada, N. Masaki and Y.Suizu, Active Mass Damper Using Multistage Rubber Bearing and Hydraulic Actuator, Proc. 10WCEE, Vol.4, 1992, 2073-2076.
- (11) T.Fujita, T.Kamada, N.Masaki and Y.Suizu, Development of Hybrid Mass Damper with Convertible Active and Passive Modes Using Hydraulic Actuator and Multistage Rubber Bearing, Proc. of 1WCSC, Volume 3, 1994, FA43-52.
- (12) 鎌田崇義・藤田隆史・正木信男・北村春幸, 油圧アクチュエータを用いたアクティブ・パッシブ切替え型マスダンパの風・地震応答観測, 生産研究, 第47巻, 第11号, (1995), 28-31.
- (13) Masaki, N. and Suizu, Y., Development of multistage rubber bearing for seismic isolation of buildings, Proceedings of IRC95 KOBE, 225-228, 1995. [第6章に関連]
- (14) Masaki, N. and Suizu, Y., Development of multistage rubber bearing for seismic isolation of building, Rubber World, Vol. 215, No.3, 37-41, 1996. (13)を一部加筆して再録したもの
- (15) 須賀川勝・中村康一・前林和彦・渡辺弘之・水津洋二・正木信男, 高減衰多段積層ゴムを用いた免震床システムの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), B, (1988), 487-488.
- (16) 藤田隆史・森文男・正木信男・水津洋二, 免震・除振床用多段積層ゴムの実験的研究, 機論, 53-490, C(1987), 1147-1152. [第7章に関連]
- (17) N. Masaki, Y. Suizu, K. Nakayama, M. Tanaka, K. Kuroda and T. Fujita, Reduction of Micro-Vibration in an X-Ray Interferometer by Means of Multistage Rubber bearings, Int. Conf. on Advanced Mechatronics, 1989.5, 791-795.
- (18) 正木信男・太田雅巳・藤田聡・山家弘行, 高減衰ゴムダンパの微少振幅領域における減衰特性に関する研究, 機論, 63-611, C(1997), 2243-2249. [第7章に関連]

- (19) H. Yanbe, S. Fujita, N. Masaki and M. Ohta, Development of isolation system for ambient micro-vibration and earthquake using multi-stage rubber bearings and high damping rubber, Proc. 10WCEE, Vol.4, 1992, 2291-2294.

謝辞

本論文をまとめるにあたり終始ご指導いただいた東京大学生産技術研究所藤田隆史教授に謹んでお礼申し上げます。

また、論文の内容、構成について、有益なご指導とご助言を賜った東京大学大学院工学系研究科吉本堅一教授、金子成彦助教授、鎌田実助教授ならびに東京大学生産技術研究所第二部須田義大助教授に厚く御礼申し上げます。

本論文は、東京大学生産技術研究所第二部藤田隆史研究室との共同研究を中心にまとめたものであります。研究を進めるにあたり、元藤田研究室助手（現東京農工大学工学部助教授）鎌田崇義氏と技官嶋崎守氏に多大な協力を得ました。改めてここに感謝申し上げます。さらに、共同研究者である当時藤田研究室の大学院学生であった森文男氏、松本洋一氏に感謝申し上げます。

多段積層ゴムの大変形加力試験では、清水建設株式会社和泉研究室主任研究員田村和夫氏の協力を得ました。株式会社構造計画研究所川上誠主任技師には、有限要素法およびマトリックス法に関して、著者と根気強く議論していただきました。元東京電機大学工学部機械工学科金子綾一氏、木村英明氏および元堀智和氏には、実験と解析の手伝いをしていただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

また、ハイブリッドマスダンパの開発では、株式会社日建設計構造部長（現東京理科大学工学部教授）寺本隆幸氏、同構造設計室長北村春幸氏、株式会社島津製作所フルイデックス事業部菅野正氏、同河内充宏氏にご指導および助言をいただきました。ここに深く感謝いたします。

高減衰ゴムダンパの研究では、東京電機大学工学部教授藤田聡氏、株式会社ブリヂストン太田雅巳氏、山家弘行氏の協力をえました。ここに深く感謝申し上げます。

論文作成にあたっては、株式会社ブリヂストン鈴木重信氏に有益なアドバイスをいただき感謝いたします。

最後に、ブリヂストン研究開発本部前本部長飯田一嘉氏、前部長田崎貞則氏、免震・道路資材開発部長水津洋二氏には、本論文をまとめる機会を与えていただき感謝いたします。

