

## すべり型免震床の開発—高周波振動成分の対策—

## Development of a Sliding-Isolation Floor System

岩沢 徹\*  
Tetsu Iwasawa

山内 次郎\*\*  
Jiro Yamanouchi

阿世賀 宏\*\*\*  
Hiroshi Asega

## 要 約

近年、地震動に対する振動制御の方法として、さまざまな免震・制振構法が開発されている。本論文は、特に免震構法の一手法であるすべり型免震床の開発について報告するものである。

免震床の支承部として4つのタイプを考え、モデルによる振動台実験をおこなった。いずれのタイプのモデルも開発前に設定した目標値を満足した。しかし、免震床システムを構成する床梁鉄骨上の応答に高周波数の振動成分が認められた。

支承部に積層ゴムを組み合わせることで、床梁鉄骨上の高周波数の振動成分を取り除くとともに目標値を満足する免震床システムを開発することができた。

## 目 次

- §1. はじめに
- §2. システムの開発
- §3. 床フレームの高周波振動
- §4. 積層ゴム支承の性能実証
- §5. 考 察
- §6. おわりに

## §1. はじめに

近年、地震・風などによる建物の振動対策としてさまざまな免震・制振構法が開発されている。それらの構法は利用される空間や目的によって使い分けられている。すでに、当社においても積層ゴムとステンレスダンパーを組み合わせた免震構法を開発し、実施建物に採用している<sup>1),2)</sup>。

さらに電算機室等に収容された重要機器の機能維持のため、有効な免震効果をもった構法が望まれている。そのような社会のニーズに応えるための一構法として免震床システムが挙げられる。

免震床は既存の建築構造物への施工も容易であり、経済的にも構造物の免震構法と比較してすぐれていると考えられる。とくに、ここで述べるすべり型免震床は、すべり機構部の摩擦係数で免震床パネル上の加速度値を定めることのできる構法として知られており、優れた免震効果が期待できる<sup>3)</sup>。

本論文は、システムの開発過程とその応答性状について述べるものである。

## §2. システムの開発

## 2-1 システムの構成

本すべり型免震床システムは以下の5つの部位で構成している。

## ①すべり支承部

\*技術研究所構造研究課  
\*\*技術研究所研究部長  
\*\*\*技術研究所構造研究課長

支承部は自重を支持し、すべり摩擦力以上の水平力を伝達しない機能を持たせている。

②復元バネ

復元バネには、地震終了後に免震床を原位置に戻す復元能力と免震床の固有周期を調整する機能を持たせている。バネは金属コイルバネで、支承と床スラブとを平面内90度ピッチに四方向に結んでいる。

③床梁鉄骨 (床フレーム)

支承と支承とを連結する鉄骨である。

④フリーアクセスフロア (床パネル)

床梁鉄骨の上にフリーアクセスフロアを設置し、コンピュータなどの電子機器のケーブル配線空間を構成している。

⑤緩衝パネル

免震床と固定床との間に生じる相対変位を吸収する機構である。免震床にピン結合された緩衝パネルが固定床の上をスライドすることによって相対変位を吸収する。

なお、緩衝パネル部の性能については、記述の対象としない。

2-2 開発目標値と予備検討

本システムの開発目標値は、コンピュータ等の機器からの要求性能および緩衝パネルの加工上の限界を考慮して、免震床パネル上での最大加速度値を250gal以下、また相対変位の最大値を25cm以下と設定した。

予備検討は、第1段階として免震床を採用する構造物モデルを想定し、その採用階の床応答加速度時刻歴を計算する。第2段階では、その床応答加速度時刻歴を免震床モデルに入力波として与えて応答を計算し、免震床の設計用数値を求める。

(1) 構造物モデル

構造物モデルは地上12階建てのSRC造12階建ての構造物(固有周期1.36秒)を12質点系の振動モデルに置換したものである。また、入力波は設計用の標準波として建築センターで指定されているEL CENTRO 1942 NSとTAFT 1952 EWの最大速度値を50cm/sに基準化した加速度波形とした<sup>4)</sup>。免震床への入力波は4階～9階に免震床を設置することを想定して、12質点系モデルの4階と9階の床応答加速度波形とした。免震床の解析モデルは、Fig. 1に示すように、1質点系モデルとしてすべり支承を考慮した。

(2) 解析結果

免震床の固有周期および摩擦係数を変化させたときの入力波に対する応答スペクトルの1例をFig. 2に示す。

最大応答加速度250gal以下かつ最大相対変位25cm以下を満足するには、固有周期が3～4秒程度で、摩擦係

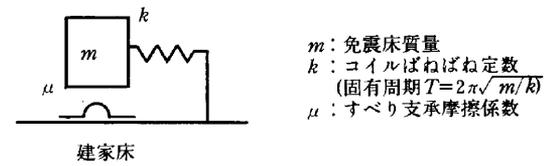


Fig.1 免震床解析モデル

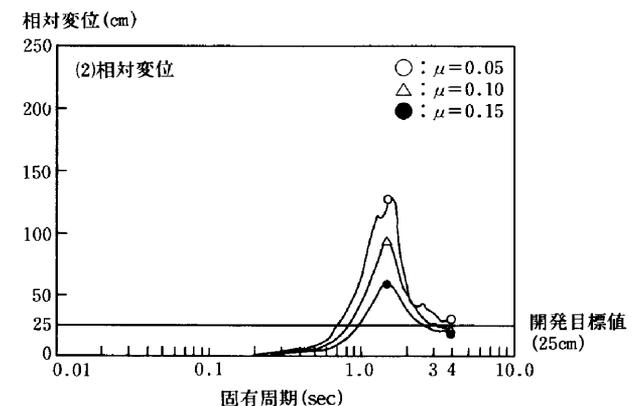
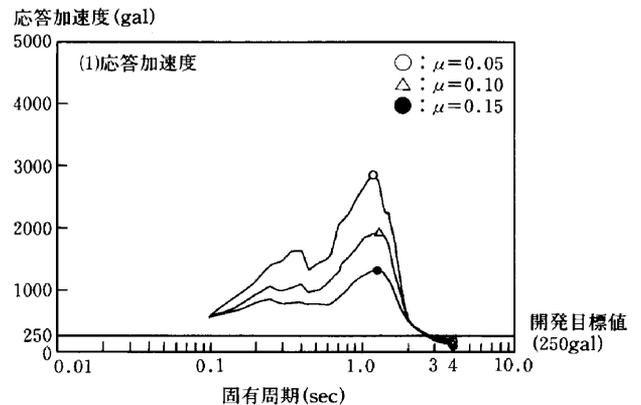


Fig.2 9階の床応答波に対する免震床の応答スペクトル

数が0.10～0.15程度であればよいことがわかった。

Table 1に免震床の固有周期を3.3秒、摩擦係数を0.10とした場合の応答加速度および相対変位の最大値を示す。

2-3 加振試験

(1) 試験モデルおよび試験方法

すべり支承部は支承材料への圧力分布がほぼ一樣になるように以下の2通りを考慮した。

①低摩擦材自身の弾性を利用して外縁部に荷重が作用しない機構。

②低摩擦材に曲げが作用しない支承構造。

すべり支承構造には4案を考慮した。

- a) ピン構造
- b) 球座構造

Table 1 免震床の最大応答加速度および最大相対変位

	階数	EL Centro—NS 1941			Taft—EW 1956		
		建物床最大 応答加速度 (gal)	免震床最大 応答加速度 (gal)	建物床—免震床 最大相対変位 (cm)	建物床最大 応答加速度 (gal)	免震床最大 応答加速度 (gal)	建物床—免震床 最大相対変位 (cm)
X 方向	9 F	488	179	22.2	500	181	22.8
	4 F	504	135	10.3	430	120	6.1
Y 方向	9 F	490	180	22.6	503	184	23.5
	4 F	490	136	10.4	424	120	6.1

(固有周期  $T=3.3$ sec, 摩擦係数  $\mu=0.10$ の場合)

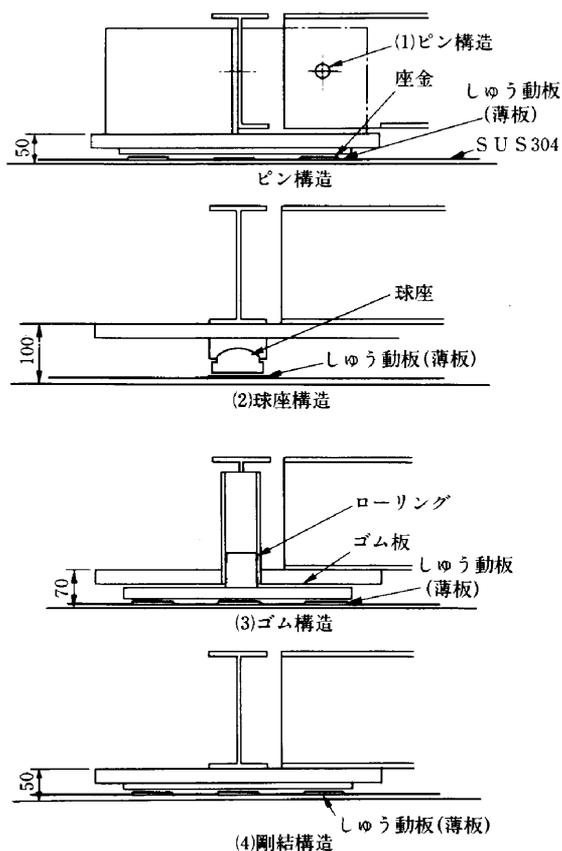


Fig.3 支承構造案

- c) ゴム構造
- d) 剛結構造

上記の①については低摩擦材を薄板構造で外縁部が張り出す形状として4案のすべてに、②については剛結構造以外の構造で考慮した。

薄板構造はPTFEコーティングを施した摩擦係数0.13程度のすべり板とその相手面としてのSUS304の研磨板で構成し、その耐荷重は1基当たり5tf(49kN)以上のものを採用した。

4種類の加振試験モデルをFig.3に示す。床パネルのサイズは3m×3mの鉄骨造で、四隅をすべり支承で

支持している。支承に作用する設計荷重1.25tf(12.25kN)(コンピュータ重量を想定)を模擬するため床パネル上に2.5tf(24.5kN)のウェイトを2個設置した。また免震床の固有周期は約3秒になるよう設定した。

加振試験はそれぞれのモデルを振動台上に設置し、加振をおこなう。加振波は正弦波定常加振とし、振幅を100galと300gal、振動数を2Hzとした。

(2) 試験結果

Fig.4に水平方向の正弦波定常加振結果(300gal入力)を示す。いずれの支承でも応答特性はほぼ同じで、目視によると、低摩擦材が損傷することはなかった。床パネル上の最大加速度は約130galで摩擦係数が0.13程度であった。

しかし、床フレームには高周波振動がみられ、その値は約500galになっている。

(3) 考察

いずれの支承構造においても低摩擦材が損傷するような現象はみられず、耐久性に問題がないことがわかった。

また、応答特性はいずれの支承構造においても同じ傾向を示し、床パネルの応答加速度は目標加速度値以下となった。しかし、床フレームの応答波形に高周波数の振動成分がみられ、入力波の加速度振幅と同程度の値となり改善の必要性が生じた。

§3. 床フレームの高周波振動

2-3での加振試験で床パネルの応答加速度は目標加速度値以下となったものの、床フレームの計測波形に高周波振動成分がみられた。

通常、免震床上に積載するコンピュータ類は床パネル上に設置するため床フレームの振動は問題とならないが背の高い機器などは床フレームに固定することもあるため、床フレームの高周波振動の低減対策を検討した。

3-1 高周波振動成分

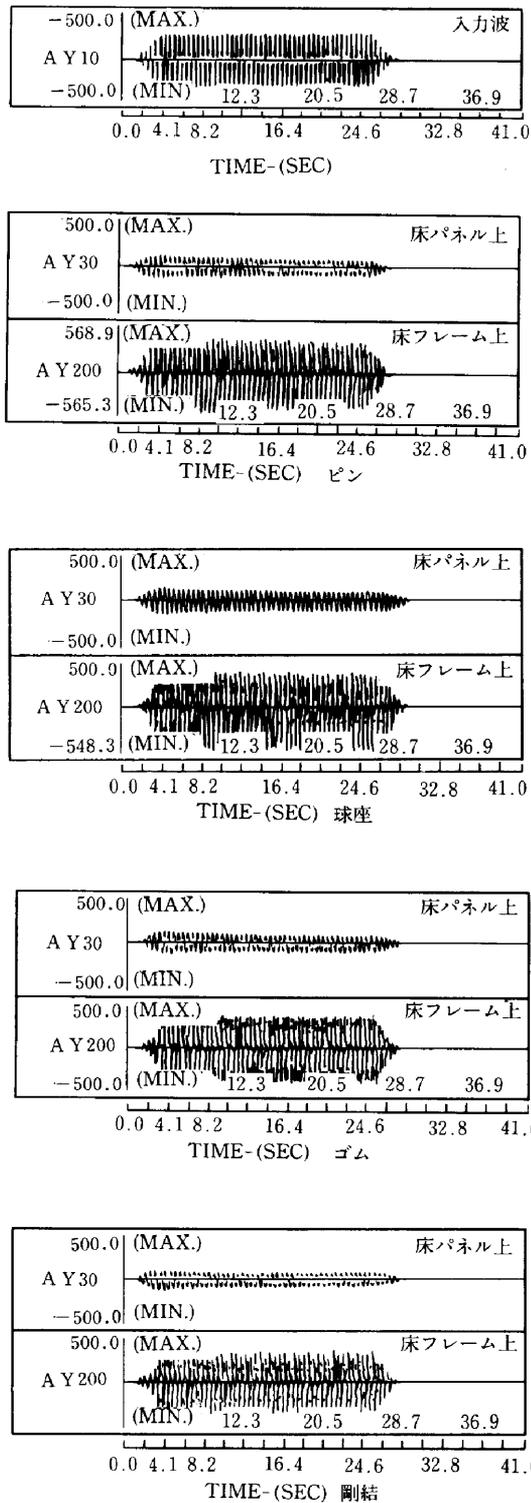


Fig.4 左弦波定常加振結果(300gal入力)

床フレームの高周波振動成分について、ここでは剛結構造の結果を検討する。

正弦波加振時の試験体各部の応答加速度を、Fig.5に示す。Fig.5の応答加速度の結果をみると、床パネル上での応答加速度の最大は約150galと良好であるが、床

フレーム大梁の軸方向に高周波振動が発生している。この振動は大梁の中央および端部と同じ波形であることから、大梁が剛体的に振動しているモードと考えることができる。Fig.6にはこの振動のフーリエスペクトルを示す。加振振動数の奇数倍、とくに18Hzが卓越する特性となっている。しかし、すべりが生じない程度の小さい入力(100gal入力)結果をFig.7に示す。同図は、入力に対する各部の伝導関数である。振動台入力に対する各部の伝達関数では18Hz付近に共振ピークはみられない。これは、すべりが生じていないときにはこの振動が発生しないことを示している。

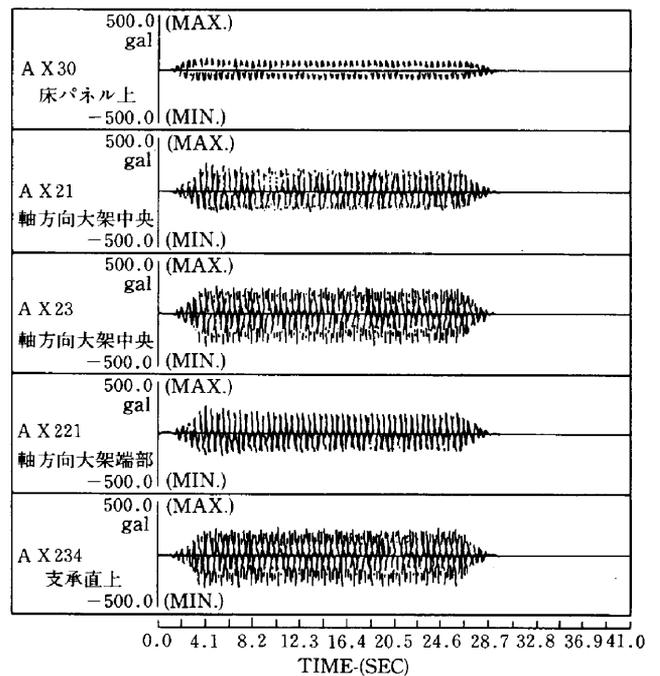
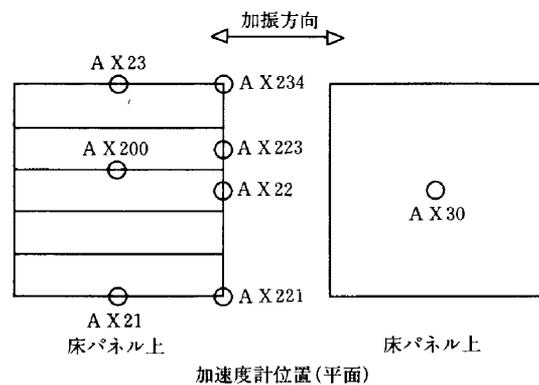


Fig.5 正弦波加振時の試験体各部の応答加速度(300gal入力)

### 3-2 高周波振動の解析検討(応答解析)

3-1ですべりが生じていない程度の入力に対し、高周波振動が発生していない事を考慮して、摩擦材と床

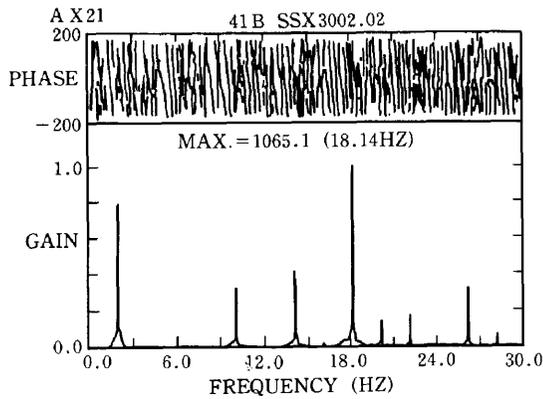


Fig.6 床フレーム軸方向大梁中央加速度フーリエスペクトル

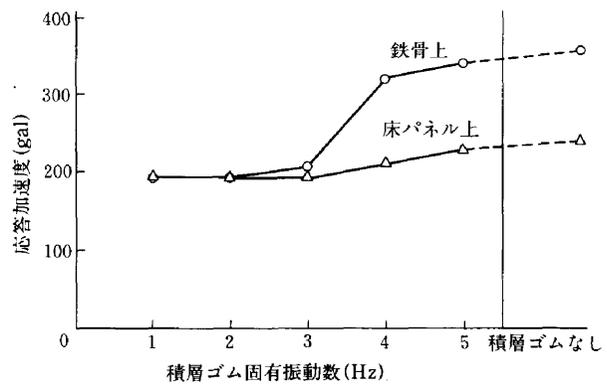


Fig.9 積層ゴム固有振動数 V S 応答加速度解析値 (EL Centro-NS 9F 応答波入力)

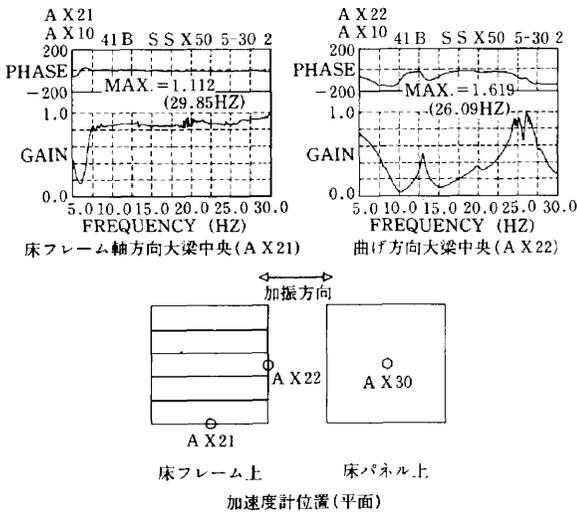


Fig.7 振動台入力に対する試験体各部の X 方向周波数応答曲線

(各定数は、試験結果をもとに決めた。)

- $m_0$  : 積層ゴム下板質量
- $m_1$  : 床梁質量
- $m_2$  : ウェイトおよび床パネル質量
- $k_1$  : コイルばねばね定数
- $k_2$  : スタンションばね定数
- $c_0$  : 積層ゴム減衰係数
- $c_2$  : スタンションの減衰係数
- $\mu$  : すべり支承の摩擦係数

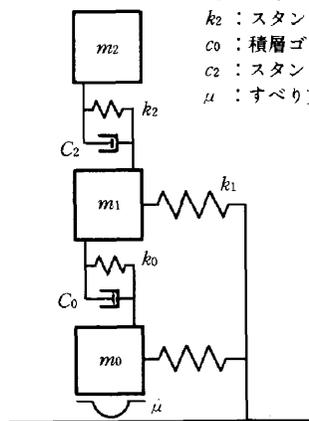


Fig.8 免震床解析モデル

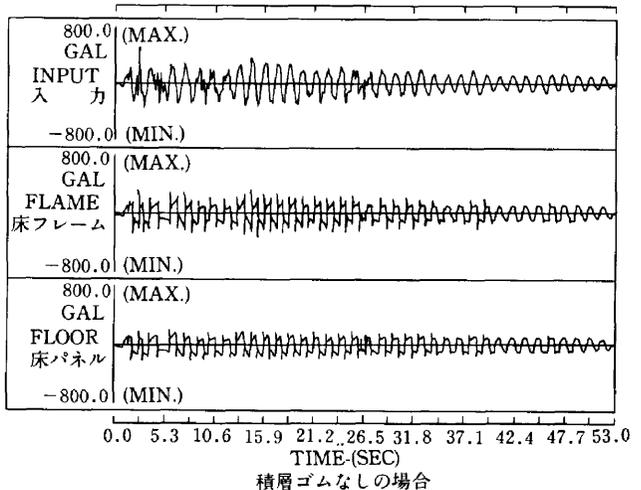
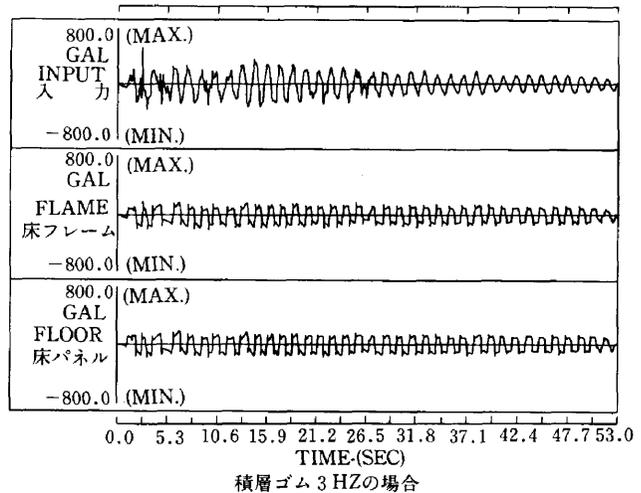


Fig.10 地震波に対する応答解析一例

レームの間に緩衝材 (弾性体) を設置したと想定した場合の解析を行った。解析に用いたモデルを Fig. 8 に示す。また、支承の最適な固有振動数を見つけるために、弾性体の固有振動数をパラメータとした応答解析をおこ

なった。Fig. 9にそのときの最大応答加速度値を示す。同図より3 Hz以下の弾性体を用いれば200 gal以下の応答となることがわかった。

Fig. 10には3 Hzの弾性体を用いた場合と用いない場合の応答波形を示す。

3-3 積層ゴム支承

前項で3 Hzの弾性体を用いたすべり支承の場合高周波振動の除去ができるとの解析結果を得た。

そこで、支承部に積層ゴムを採用することとした。支承部に積層ゴムを用いた試験体モデルをFig. 11に示す。

積層ゴムを用いた支承の加振試験結果をFig. 12に示す。床フレームに生じていた高周波振動は抑制されているのがわかる。

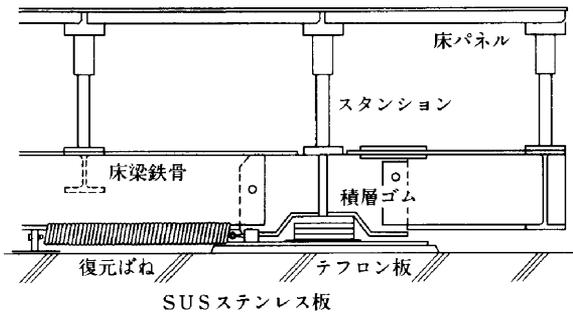


Fig.11 積層ゴムを用いた試験体モデル

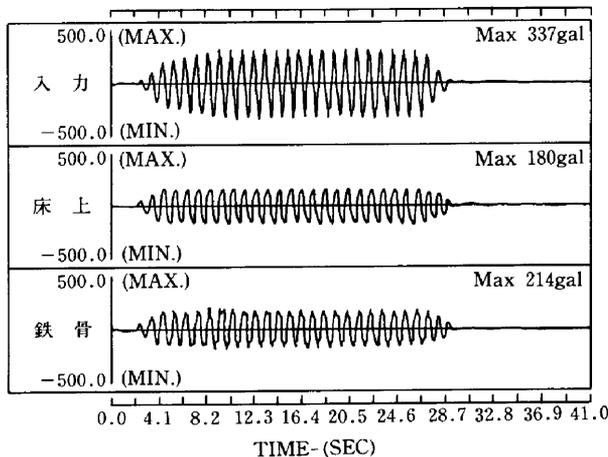


Fig.12 正弦波加振結果(積層ゴム有)

§ 4. 積層ゴム支承の性能実証

積層ゴムを用いた支承の免震性能の実証を目的として、加振試験および試験ではおこなえないケースをシミュレーション解析で補った。

4-1 正弦波および床応答波による加振

(1) 試験モデルと試験概要

試験モデルは3-3と同様とした。積載荷重は2.5 tf (24.5 kN)の錘りを2個使用し、想定した設計仕様である短期荷重150 kgf/m<sup>2</sup> (1.47 kPa) 積載時を模擬したものである。加振内容は正弦波定常加振と床応答波加振である。加振内容を以下に示す。

① 正弦波定常加振

- 加振波；正弦波
- 加速度；300 gal
- 振動数；1 Hz

② 地震波加振

- 加振波；EL Centro-NS 4 F, 9 F床応答波
- Taft-EW 4 F, 9 F床応答波
- 加速度；振動台の性能の限界まで

③ 積載条件；積載条件はウェイトの配置で標準載荷試験と偏心載荷試験の2種類とした。

(2) 試験結果

Fig. 13に正弦波定常加振試験結果を、Fig. 14に床応答波加振試験結果の1例を示す。床応答波加振試験では振動台の性能から100%加振はできなかったが、免震床上の応答からは良好な免震性能が確認できた。

4-2 シミュレーションによる検討

(1) 解析モデル

解析モデルをFig. 15に、構造諸元をTable 2に示す。このモデルはすべり支承の摩擦および積層ゴムのばね特性を考慮した2質点系モデルである。

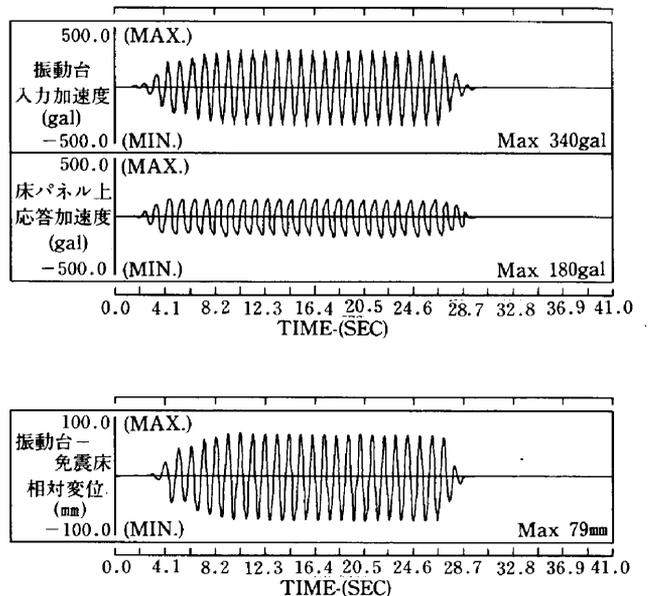


Fig.13 正弦波加振試験結果(300gal, 1Hz入力)

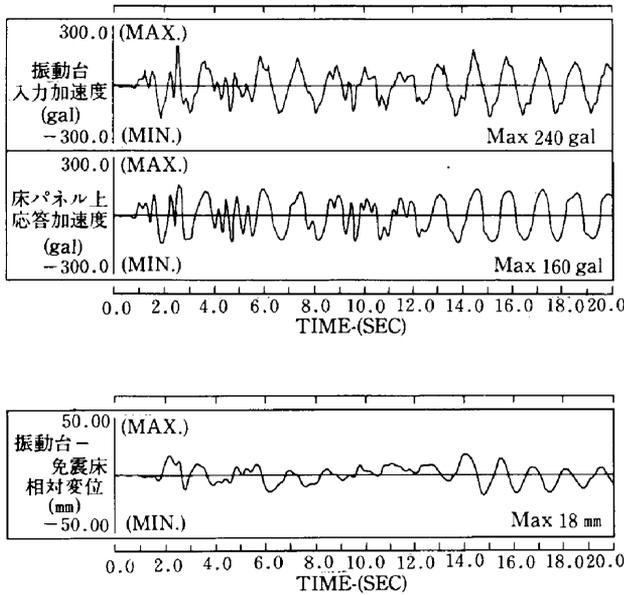


Fig.14 EL Centro-NS 9F床応答波加振試験結果

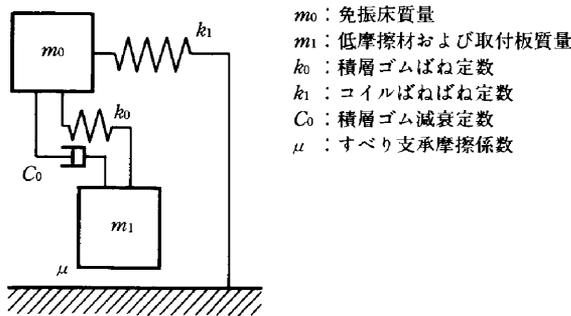


Fig.15 免震床解析モデル

Table 2 免震床構造緒元

免震床質量	$m_0$	2.16 kgf/cm/sec <sup>2</sup>
装置部質量	$m_1$	0.003 kgf/cm/sec <sup>2</sup>
積層ゴムばね定数	$k_0$	500 kgf/cm
コイルばねばね定数	$k_1$	7.83 kgf/cm
積層ゴム減衰定数	$h_0$	5%
支承摩擦係数	$\mu$	0.13

解析結果を Fig. 16 (EL Centro-NS, 9 F 床応答波のケース) に示す。4-1の加振試験結果とよく一致しており本シミュレーションは試験結果をよく模擬できることが確認できた。

(2) 免震性能検討

4-1の加振試験で100%加振ができなかったケースについて解析をおこない、所定の性能を満足するかどうかを確認した。

解析結果を Table 3 にまとめた。応答加速度および相対変位の最大値とも TAFT-EW, 9 F 床応答波の Y 方向が最も大きくそれぞれ225 gal および24.4 cm となったが、所定の目標である250 gal および25 cm以下を満足した。

4-3 対象構造物が異なる場合の加振

前述の構造物より固有周期が短周期の構造物で、その床応答値が大きい構造物に免震床が設置される場合を想定し、加振実験を行った。

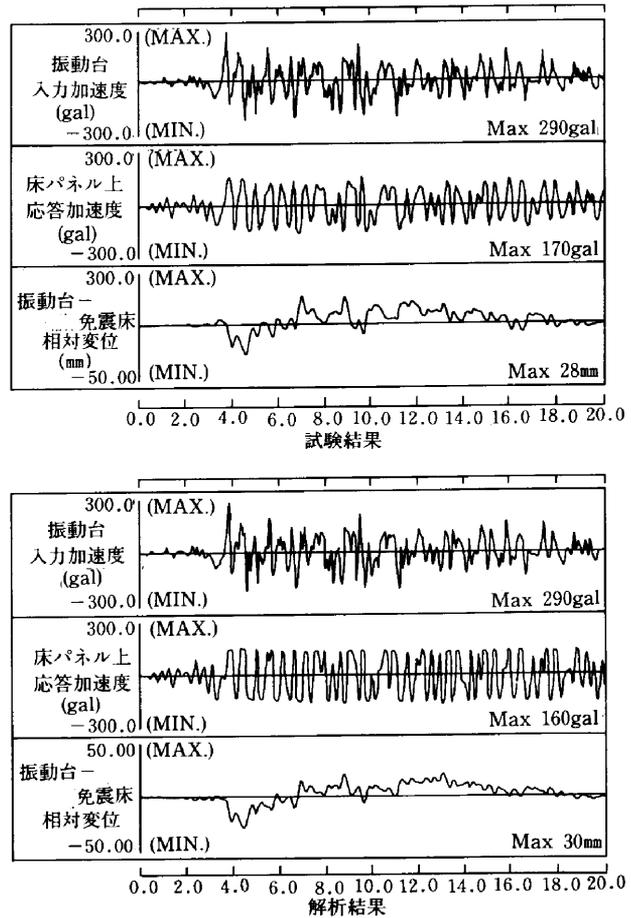


Fig.16 試験結果と解析結果の比較 (EL Centro-NS 9F床応答波)

(1) 試験概要

加振波には、SRC造8階建ての構造物(1次固有周期0.43秒)モデルを想定し、標準波を入力したときの、8階の床応答の加速度波形を採用した。加振ケースを Table 4 に示す。

(2) 試験結果

各ケースの試験結果を Table 4 に示す。ここでの残留変位は加振後の変位計の数値である。

Table 3 免震床の最大応答加速度および最大相対変位

		EL Centro-NS			Taft-EW		
	階数	建物床最大 応答加速度 (gal)	免震床最大 応答加速度 (gal)	建物-免震床 最大相対変位 (cm)	建物床最大 応答加速度 (gal)	免震床最大 応答加速度 (gal)	建物-免震床 最大相対変位 (cm)
X 方向	9階	488	218	22.3	500	224	24.1
	4階	504	173	11.9	430	166	9.9
Y 方向	9階	490	219	22.6	503	225	24.4
	4階	511	173	11.8	424	166	10.0

Table 4 入力地震波および加振結果

ケース	試験モデル 積載条件	入力地震波	加振方向	実最大入力 加速度(gal)	最大応答 加速度(gal)	最大相対 変位(cm)
1	標準荷重	EL Centro-NS	X	711	159	5.8(0.0)
2		Taft-EW	X	745	165	5.2(1.0)
2'			X	1129	176	5.5(-0.8)
3		EL Centro-NS	X	713	147	5.7(-0.2)
		EL Centro-EW	Y	326	109	2.6(-0.3)
		EL Centro-UP	Z	118	241	
4	偏心荷重	EL Centro-NS	X	716	178	5.9(0.1)
5		EL Centro-NS	Y	710	185	5.1(-0.9)
6		Taft-EW	X	759	182	5.1(0.6)

( ) 内は：残留変位

### (3) 結果の考察

いずれの加振ケースにおいても、免震床での水平応答加速度は200 gal以下になっている。設置対象構造物が、短周期構造物の場合に対しても優れた免震効果が確認できた。

また、残留変位の最大値も1 cmと原位置にもどる傾向にある。

加振ケース3の3軸加振では、上下方向には約2倍に応答加速度が増幅しているが、水平方向の応答加速度は水平1軸加振のケース1と差異がなく、上下動が水平方向の免震性能に悪影響を及ぼしていないことがわかった。

ケース1と4およびケース2と6の比較から、最大相対変位はX方向加振の場合標準荷重と偏心荷重の相対変位で差異はない。

しかし、応答加速度は偏心荷重の場合、標準荷重と比較し、20 gal程度大きくなっている。これは試験において偏心荷重でX方向加振した際にウェイト同士の衝突があり、衝撃によって幾分か加速度が大きくなったためと考えられる。

ケース1と5の比較から、偏心荷重の応答加速度が25 galほど大きく、相対変位で1 cm程度小さくなっている。相対変位が小さくなっているのは、支承の摩擦係数のばらつきの影響と考えられる。

### §5. 考察

本実験の範囲内で、支承部に積層ゴムを用いない場合と用いた場合で床梁鉄骨部の応答に相違が見られ、用いない場合で見られた高周波振動を積層ゴムを用いることにより取り除くことができ、免震効果の向上を確認することができた。

また、入力波の最大振幅値によらず、床パネル面上の最大応答加速度値は設計目標値を越えることがないことも確認し、開発を終了した。

### §6. おわりに

現在、本免震床(約29 m<sup>2</sup>)を西松建設(株)技術研究所本館4階に設置した。今後は、本すべり型免震床の実際の地震動時の挙動を観測し、その有効性を実証していく予定である。

#### 参考文献

- 1) 大泉：西松式免震構法の開発(その1)，1989西松建設技報。
- 2) 長谷部： 同上 (その2)， 同上。
- 3) 制振，免震構造建築物の技術開発について，1988，10，(財)日本建築センター。
- 4) ビルディングレター，高層建築の設計用入力地震動。