

# 床免震技術に関する研究

——低摩擦タイプ免震床の性能試験とシミュレーション解析——

島口 正三郎 金子 正孝  
安井 譲

## Developmental Study on Floor Isolation Techniques

——Performance Confirmation Tests and Simulation Analysis of Floor Isolation System  
of Low-Friction Sliding Type——

Shosaburo Shimaguchi Masataka Kaneko  
Yuzuru Yasui

### Abstract

The authors carried out vibration tests of a floor isolation system for confirmation of its performance in vibration control. The vibration tests were performed using a full-sized model of the system on a shaking table. As a result, it was succeeded in developing a floor isolation system of low-friction sliding type.

This system is capable of moving and demonstrating an isolation effect when small earthquake motions occur. The isolation effect is of course exhibited against large earthquake motions also. A high-density polymer material was used at the sliding parts of the isolation devices. Finally, the authors confirmed that the responses to seismic input of the floor isolation system could be simulated well by using a non-linear analysis technique assuming bi-linear type restoring force characteristics for frictional hysteresis.

### 概 要

低摩擦タイプ免震床システムの性能確認をするために、振動台を用いた実大モデルの試験を実施した。その結果、①免震装置のすべり支承に高分子材料を用いることにより、低摩擦タイプの免震床の開発に成功した。②摩擦履歴特性を Bi-Linear 型の復元力特性で仮定した弾塑性解析手法を使用することによって、地震入力に対する応答をよくシミュレートできることを確認した。

### 1. はじめに

“ダイナミック・フロア・システム”<sup>1),2)</sup>は、床組全体を建物躯体から浮かせて免震装置で支持しており、この装置によって地震による振動を効果的に低減させる構造となっている。同システムは、コンピュータ室などの地震対策を目的とする「コイルバネによる免震床システム」と機械振動などの微小振動から精密機器を守る空気を緩衝材とする「空気バネ及び空気膜による免震床システム」を保有している。前者の施工実績は、昭和51年の開発以来、平成元年3月現在で延べ57件、64,500 m<sup>2</sup>に及び、圧倒的なシェアを占めてきた。この研究では、最近のニーズの多様化に対処するため、免震装置のすべり支承の改善・開発に着目し、低摩擦タイプ免震床の地震時の免震性能を確認することを主目的に振動台試験を実施した。

本報告は、免震装置のすべり支承に高分子材料を用いた免震床の性能確認試験結果とシミュレーション解析結果との対応について述べるものである。

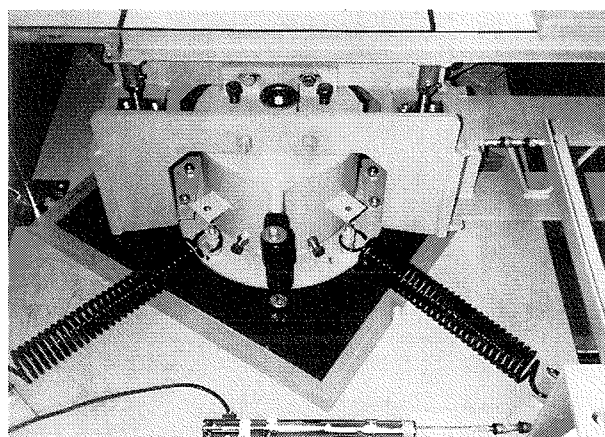


写真-1 免震装置

免震機構：上下方向 コイルバネ+オイルダンパー  
 水平方向 コイルバネ+すべり摩擦

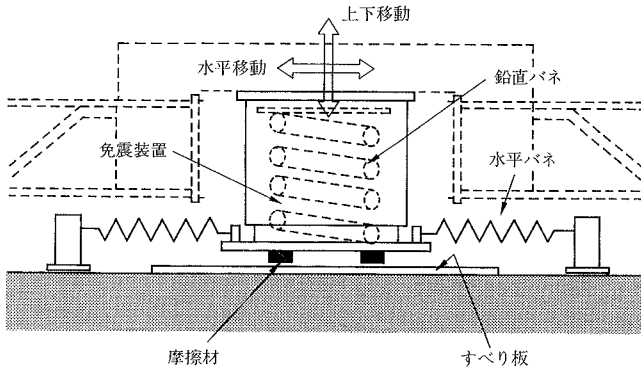


図-1 免震機構

## 2. 免震床の概要<sup>3)</sup>

### 2.1 免震装置の機能

ダイナミック・フロア・システムの免震機構を写真-1 および図-1 に示す。

**2.1.1 地震入力の低減** 地震に対する構造床の応答は、通常、入力地震波の数倍に増幅される。この床応答の性質を考慮して、免震装置は水平・鉛直両方向とも柔らかいバネを構造床に設けて構造体より長周期の系を作り、さらに摩擦ダンパーを含むダンパーにより地震エネルギーを吸収し、二重床への伝達を低減するものである。免震装置は設定値以上の地震力（加速度）が加わると水平方向にすべりが生じる。また、上下方向では平常時固定装置が解除されるその機能を発揮する。

**2.1.2 平常時の居住環境の維持** 免震床を弾性支持すると水平方向は摩擦力が作用するので平常時は滑動しないが、上下方向は運搬車等の走行で床が振動し電算機室としての環境振動が問題となる。このため、上下方向に対しては平常時は免震装置を機能させない、固定機構を持たせている。

## 3. 免震床の性能確認試験

### 3.1 物性試験

**3.1.1 物性試験の方法** 免震装置のすべり支承を構成する摩擦材とすべり板の組合せによる摩擦係数を把握するため、静加力試験を行なった。

(1) **試験体と試験材料** 試験体は、コンピュータ室の免震床に用いられていた実機の免震装置である。試験材料は、①摩擦材（8種類）、②すべり板（12種類）、③潤滑剤（11種類）を組合せて行なった。ここでは、表-1 に示す代表的な組合せ例について報告する。なお、同表に示す摩擦材は、アセタール樹脂系の材料である。

(2) **試験方法** 物性試験は実機の免震装置を用いて、面圧をパラメータとして静加力試験を行なった。試験は免震装置をワイヤーロープで引張り、すべり出す時の引張力と変位を熱ペンレコーダに記録した。試験条件は、面圧を9段階（約5 kg/cm<sup>2</sup>～65 kg/cm<sup>2</sup>の範囲）に変化させて、

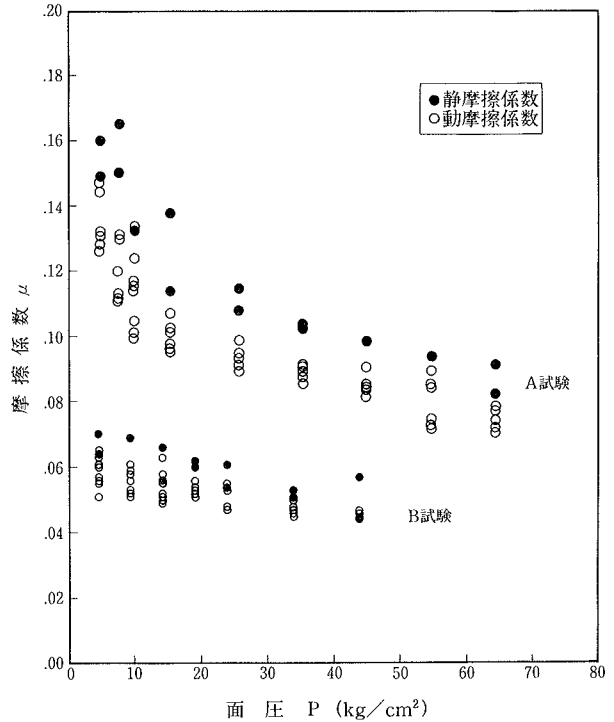


図-2 摩擦係数と面圧の関係

表-1 摩擦材とすべり板の組合せ

CASE	試験体の型式	試験条件
A試験	標準タイプ	摩擦材+ステンレス板
B試験	低摩擦タイプ	摩擦材+高分子材料

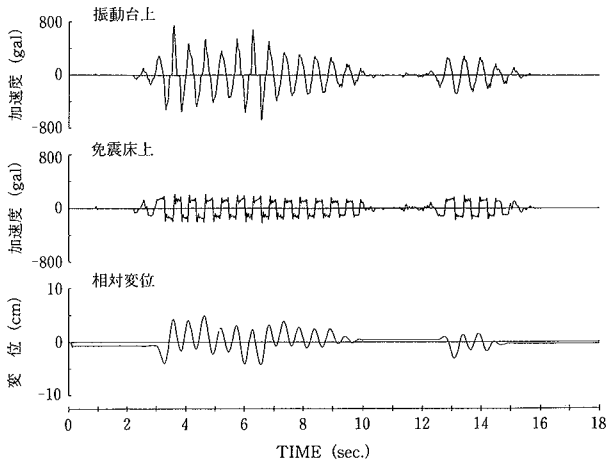
各々6回の加力を行ない摩擦係数を求めた。試験は面圧を5～65 kg/cm<sup>2</sup>に順次増加した場合と65～5 kg/cm<sup>2</sup>に減少した場合の2回である。

**3.1.2 物性試験結果** 試験材料を各種組合せて行なった物性試験の結果、摩擦係数は試験方法によって大きく左右されることから、データの取り扱いには十分注意する必要があることが分かった。図-2に摩擦係数と面圧の関係を示す。同図は、表-1に示すA試験（標準タイプ）とB試験（低摩擦タイプ）の結果であり、図中、●印は静摩擦係数、○印は動摩擦係数を示す。同図より、摩擦係数は面圧に依存し、面圧の増加とともに摩擦係数が減少する傾向がある。静摩擦係数は動摩擦係数より10～30%程度大きくなることが分かった。次に、潤滑剤が摩擦係数に及ぼす影響について述べる。まず、乾性潤滑剤は静摩擦係数をより小さくするためには非常に効果的である。一方油潤滑剤は動摩擦係数を小さくするが、静摩擦係数が大きくなるので使用上問題がある。

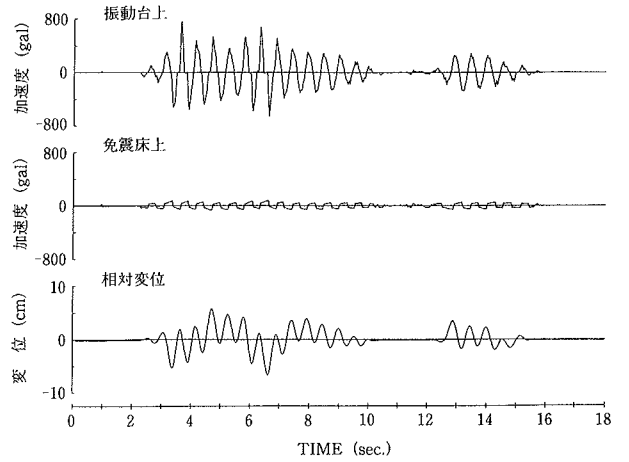
### 3.2 免震床の振動試験

#### 3.2.1 振動試験の方法

(1) **試験装置と試験体（免震床モデル）** 試験装置は当社の保有の電気油圧式振動台<sup>4)</sup>を使用し、加振は水平一方向加振とする。試験体は実大免震床モデルとし、免震装置・

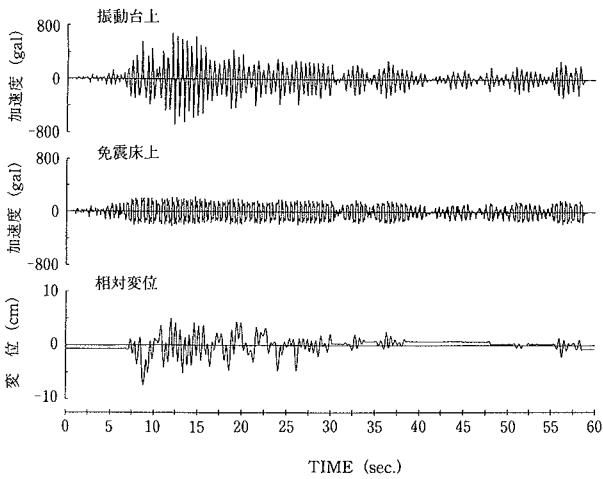


(a) A 試験 (標準タイプ)

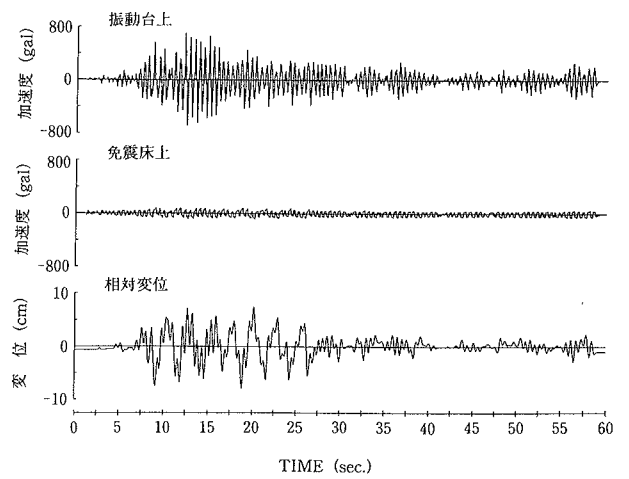


(b) B 試験 (低摩擦タイプ)

図-3 実測記録波形の比較 (EL CENTRO NS 波 800 gal 入力)



(a) A 試験 (標準タイプ)



(b) B 試験 (低摩擦タイプ)

図-4 実測記録波形の比較 (HACHINOHE NS 波 712 gal 入力)

鉄骨床組は実際に使用するものと同一のものとする。また、一辺に緩衝部を設けて振動時の挙動についても確認できるようにする。免震床モデルは、総重量  $W=3,964$  kg、固有周期： $T_H=3.0$  sec である。免震装置は、物性試験で用いた A 試験 (標準タイプ) と B 試験 (低摩擦タイプ) の 2 種類である。

(2) 試験方法 振動試験は①正弦波加振試験、②地震波加振試験を行なった。免震床システムの性能確認試験は、免震床の滑動開始前後の挙動を把握するための微小入力レベルでの試験と振動台の性能限界における大加振での免震性能を確認するための試験を実施した。免震効果の確認方法は、振動台入力に対する免震床の応答加速度 (鉄骨はり上および二重床上面に加速度計を設置) および振動台に対する免震床の応答変位を測定することにより行なう。

入力地震動の種類と加速度 振動試験で使用する入力地震波は、想定建物に① EL CENTRO 1940 NS、② HACHINOHE 1968 NS を入力した場合の中間層 (4 階床) と最上層 (9 階床) の床応答波形である。なお、想定建物は、中高層建物の一例として鉄骨鉄筋コンクリート造

表-2 入力地震波のレベル一覧表

(単位: gal)

気象庁 震度階	入力 レベル 地 動	EL CENTRO 40NS		HACHINOHE 68NS	
		4 階床	9 階床	4 階床	9 階床
IV	100	218	400	173	237
V	200	436	800	347	475
VI	300	654	*	520	712
VII	400	*	*	694	*

\*印は、振動台性能上不可能の領域

(SRC 造) 9 階建てのオフィスビル (1 次固有周期  $T_1=0.56$  sec) である。振動台の入力加速度レベルは、表-2 に示す気象庁震度階にはほぼ対応する床応答加速度レベルである。

### 3.2.2 振動試験結果

#### (1) 免震効果

図-3, 4 は、上記 2 種類の入力地震波の異なる実測記録波形の一例である。同図は、振動台の入力波と免震床の応答加速度および応答相対変位の関係を 1 セットとして、A 試験と B 試験の結果を対比して示している。同図より、

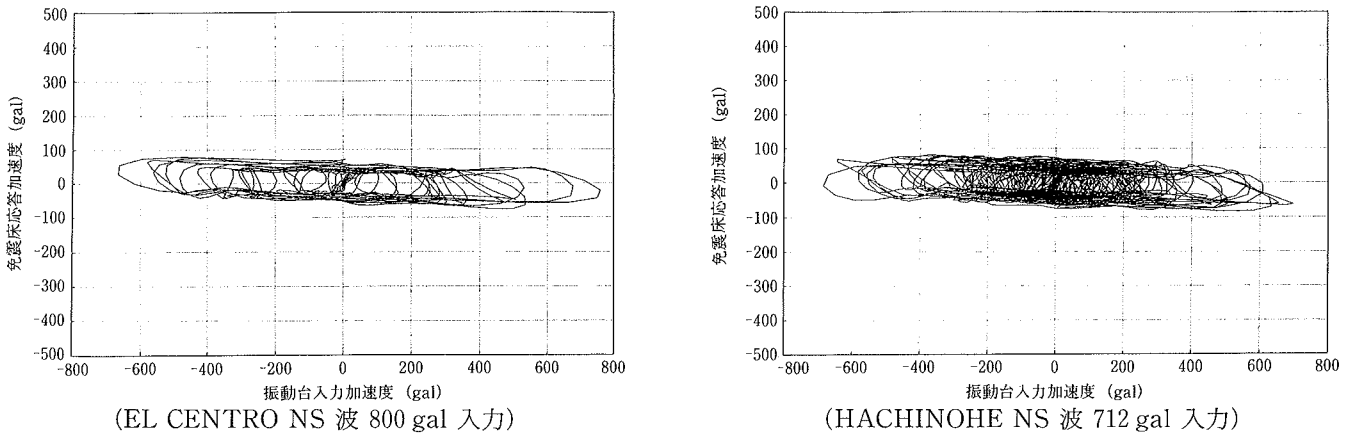


図-5 振動台と免震床の応答加速度のオービットの比較 (B試験 低摩擦タイプ)

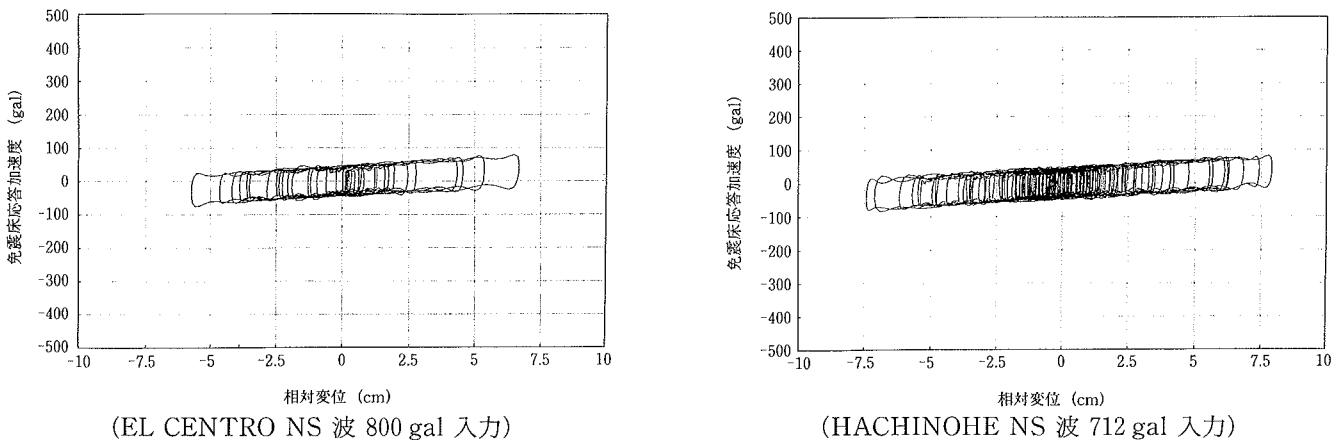


図-6 免震床の応答加速度と相対変位のオービットの比較 (B試験 低摩擦タイプ)

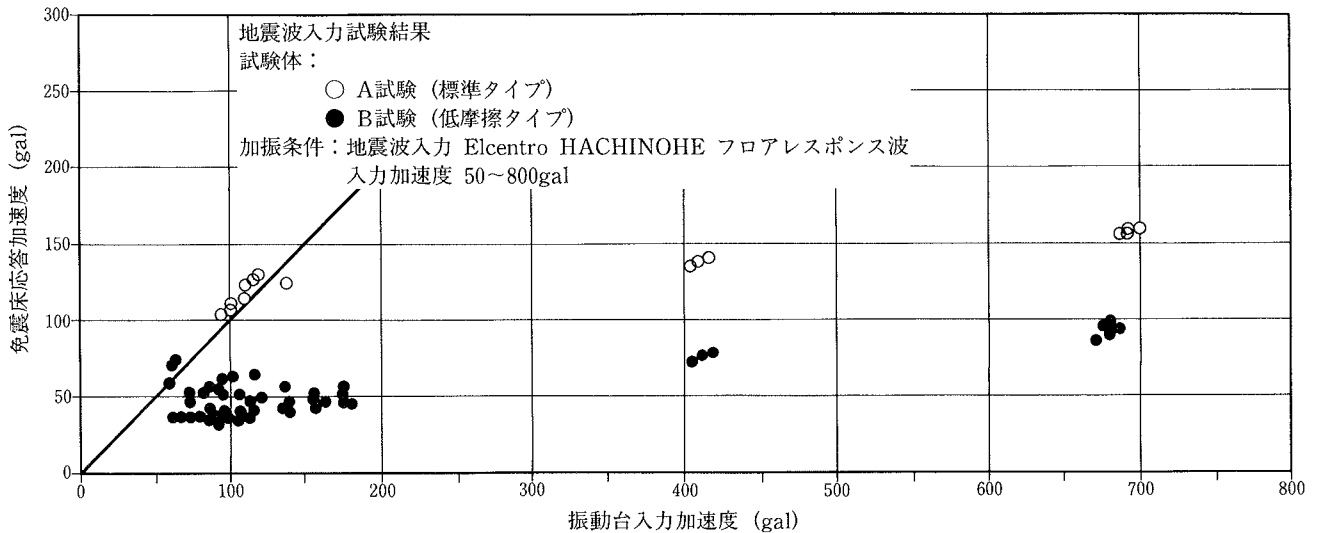


図-7 摩擦材料の相違による免震床の応答加速度

標準タイプと低摩擦タイプの免震床上の応答加速度波形を比較した場合、摩擦係数の小さな後者の加速度波形が前者に比べ大きく低減していることが分かる。同様に、図-5、6は、B試験の地震波の相違によるオービットを比較したものである。図-5は、振動台の入力加速度と免震床の応

答加速度の関係を示す。この図より、低摩擦タイプ免震床の応答加速度は、入力加速度に対し著しく低減していることが分かる。

図-6は、免震床の応答加速度と相対変位の関係を示す。図-7は、実地震による床応答波入力時の最大加速度に対

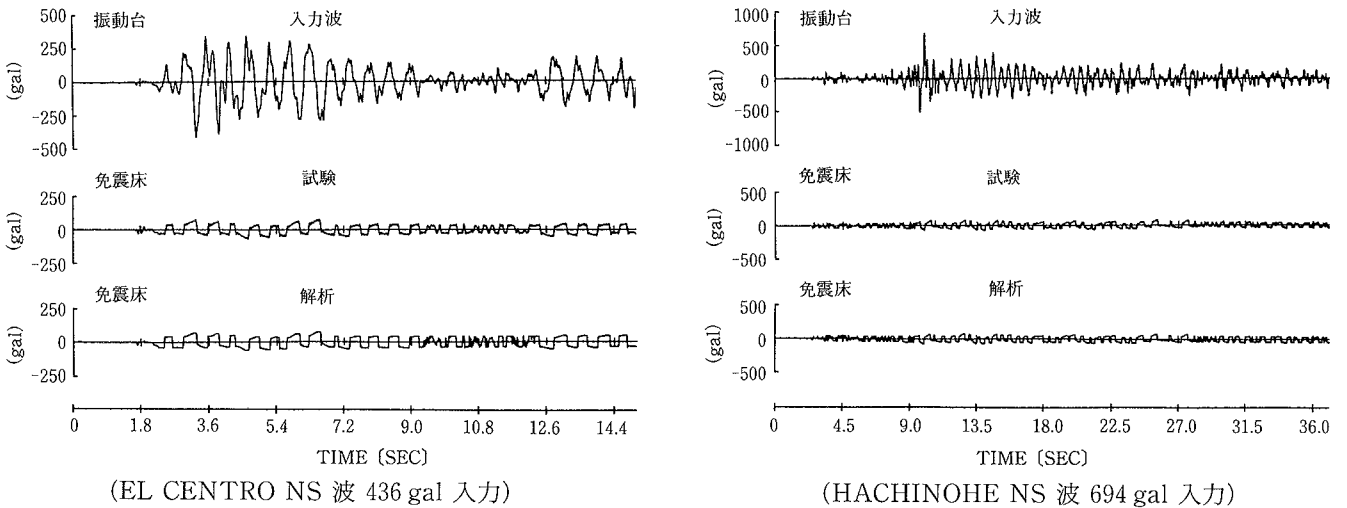


図-8 免震床の応答加速度の比較 (B 試験 低摩擦タイプ)

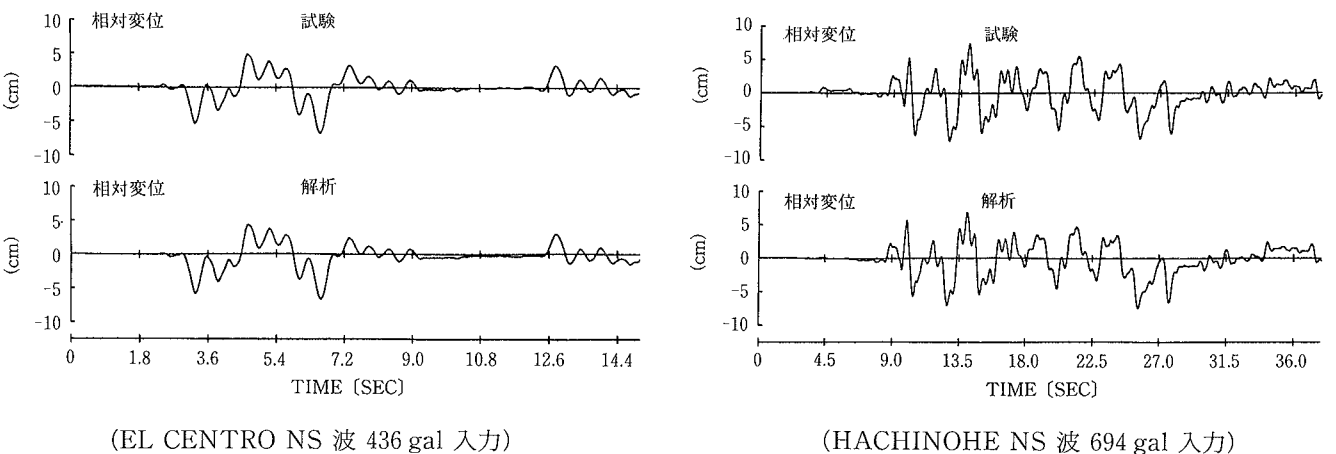


図-9 免震床の相対変位の比較 (B 試験 低摩擦タイプ)

する免震床上の最大応答加速度の関係を示したものである。免震床の最大応答加速度は地震波の種類および振動台入力加速度に関係するが、免震効果は入力加速度が増加するに伴って良くなることを示している。同図から、免震床の摩擦材の相違による免震効果をみると、摩擦係数の小さな低摩擦タイプの場合には、気象庁震度階Ⅶの激震に相当する床応答加速度に対して、免震床上の応答加速度は100 gal以下と著しく低減されることが分かる。一方、標準タイプの場合には、免震床上の応答は120～160 gal程度と、低摩擦タイプに比べ幾分大きな値を示す。しかし、いずれのタイプも電算機の許容振動値を十分満足していることから実用上支障はない。

(2) 免震床の応答変位と残留変位

免震床を使用する場合、免震床の滑動による相対変位および滑動後の水平方向の復元性(残留変位)を考慮する必要がある。入力地震波に対する免震床の応答相対変位は、図-3、4からも明らかなように、免震床の応答加速度が小さい低摩擦タイプの相対変位が標準タイプに比べ若干大きくなる傾向がある。従って、免震床の設計に際しては、

免震床の応答加速度が小さくなるような設計をすると、逆に構造床と免震床との相対変位は大きくなる。この相対変位を吸収するだけ大きなクリアランスをとれば安全性は確保されるが構造スペース上限度がある。従って、塔載機器の設計用振動許容値、平常時の作業安定性などを考慮した最適設計により床のタイプを選択することが重要である。

一方、地震終了後の残留変位は、免震装置を構成する摩擦材の摩擦係数と水平バネの復元力に支配されるが、本試験で見える限り、図-3、4の実測記録波形に示されるように、せいぜい数mm程度であり、ほぼ原点復帰すると考えてよい。なお、この原点復帰の現象は実際の免震床が地震を受けた際の「地震時の作動状況記録」<sup>3)</sup>からも確認されている。

4. シミュレーション解析

ここでは、振動台上の免震床を1質点系に置換し、振動台と免震床間の滑り摩擦の履歴特性を、Bi-Linearによる復元力特性を仮定した弾塑性解析手法によってシミュレーション解析を実施した。

4.1 解析モデル

解析モデルの諸定数は、モデル総重量が 3964 kg、摩擦抵抗抗力  $Q_1$  が動摩擦係数  $\mu=0.04$  の場合で 159 kg、免震装置の横バネ  $K_2$  がモデル全体で 18 kg/cm である。なお、モデルの初期剛性  $K_1$  については、振動試験の P- $\delta$  曲線 (図-6 参照) から判断して、 $K_2$  に較べてほぼ剛な値を使用した。復元力特性図を図-11 に示す。

4.2 解析ケース

ここでは、解析例として、低摩擦タイプ免震床のシミュレーション解析について述べる。

解析時に使用した入力地震波は、EL-CENTRO 4F 床応答波 436 gal、HACHINOHE 4F 床応答波 694 gal である。

4.3 シミュレーション解析結果

図-8 は、EL-CENTRO 436 gal 及び HACHINOHE 694 gal を入力した場合の振動台試験と解析との、免震床上の加速度応答波形の比較を示している。図-9 は、振動台試験と解析との、相対変位の比較を示したものである。これらの応答波形の最大値について、振動台試験と解析を比較したものを表-3 に示す。試験と解析は、よく一致していることが分かる。又、図-10 は、HACHINOHE 694 gal を入力した場合の振動台試験と解析との、縦軸に免震床上の応答加速度をとり、横軸に相対変位をとってオービットの比較例を示したものである。このオービットについても、試験と解析は、よく一致していることが分かる。ここで参考の為に、オービットから求めた等価粘性減衰で表示すれば、低摩擦タイプ免震床の場合、最大応答変位 7.5 cm レベルで、実験値、解析値とも 40% 程度である。以上のシミュレーション解析結果から、以下のことが言える。滑り摩擦の履歴特性を、Bi-Linear 型の復元力を仮定した弾塑性解析手法を使用することによって、免震床上の応答加速度、相対変位及び振動台と免震床との位相差を、よくシミュレートできることが分かった。つまり、物性試験から求めた動摩擦係数の値の妥当性が確認できた。

5. まとめ

低摩擦タイプ免震床システムの性能確認を振動台により検討した結果、免震装置のすべり支承に高分子材料を用いることにより、今回開発した免震床は、標準タイプの免震床に比べ、最大応答加速度を 1/2 程度以下に性能を向上していることが確認された。又、シミュレーション解析の結果、滑り摩擦による動的な復元力特性を、クーロン摩擦型によらず、Bi-Linear 型の復元力特性でも評価できることが分かった。

参考文献

- 1) 中川恭次, 渡辺清治, 島口正三郎, 山下信夫, 安井久純, 伊庭 力: ダイナミック・フロア・システムに関する実験的研究(その1 実大モデルの正弦波強制振動実験), 大林組技術研究所報, No. 16, p. 46~50, (1978)
- 2) 中川恭次, 渡辺清治, 野口正三郎: ダイナミック・フロア・システムに関する実験的研究(その2 振動台によるコンピ

表-3 最大応答値の比較

	EL CENTRO 436gal		HACHINOHE 694gal	
	試験	解析	試験	解析
免震床の応答加速度	78gal	72gal	77gal	74gal
相 対 変 位	6.7cm	6.6cm	7.4cm	7.5cm

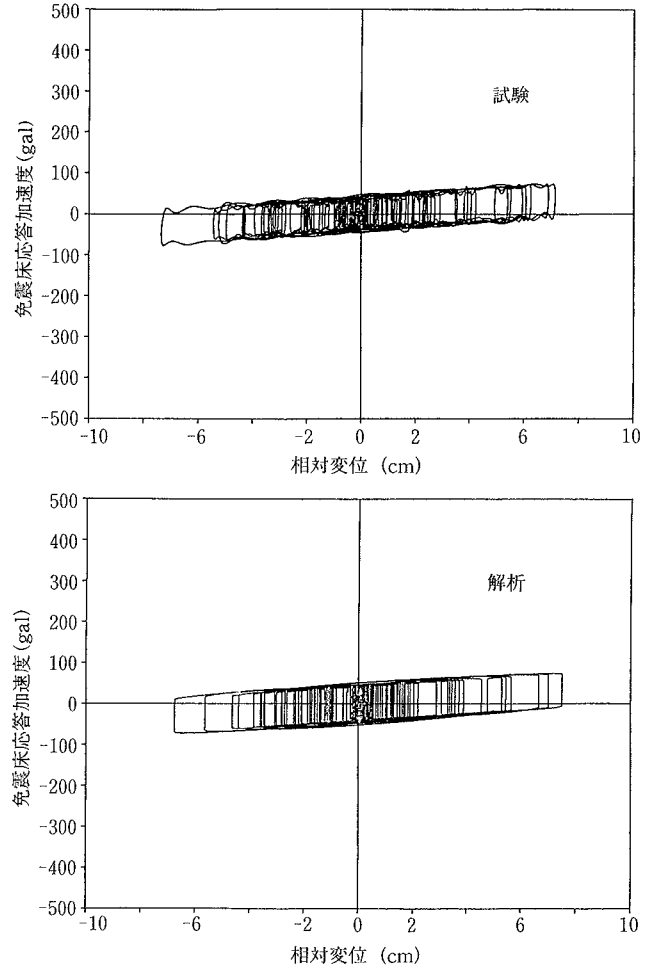


図-10 免震床上の応答加速度と相対変位オービットの比較 (B 試験 低摩擦タイプ)

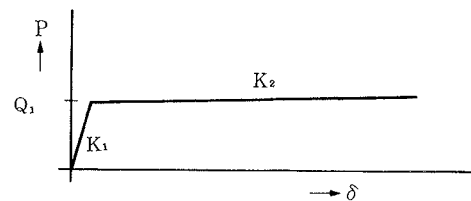


図-11 復元力特性

- 3) 武田寿一編: 建造物の免震・防振・制振, 技法堂出版, P. 37~39, p. 187~204, (1988. 5)
- 4) 角田智彦, 島口正三郎, 村上典文: 大型振動台について, 大林組技術研究所報, No. 11, p. 185~189, (1975)