

床免震技術に関する研究（その2）

—三次元免震床の上下水平同時加振試験—

金子正孝 安井 讓
島口正三郎

Developmental Study on Floor Isolation Techniques (Part 2)

—Simultaneous Horizontal and Vertical Vibration Tests of Three-dimensional Floor Isolation System of Low-friction Sliding Type—

Masataka Kaneko Yuzuru Yasui
Shosaburo Shimaguchi

Abstract

The authors carried out simultaneous horizontal and vertical vibration tests of a three-dimensional floor isolation system of low-friction sliding type. The vibration tests were performed by measuring acceleration and relative displacement between a shaking table and a floor isolation system. As a result, the authors confirmed that the system is capable of moving and demonstrating three-dimensional isolation effects when earthquake motions occur. The horizontal responses to seismic input of this system could be simulated well by using a non-linear analysis technique assuming bi-linear type. And the vertical responses could be simulated well by using a linear analysis technique assuming elastic spring and damper. As results of the simulation analyses, response acceleration, relative displacement, phase lag, and frictional hysteresis were simulated well.

概 要

三次元低摩擦タイプ免震床の性能実証確認のために、振動台を用いた実大モデルの上下・水平同時加振試験とそのシミュレーション解析を実施した。試験は、振動台および免震床の加速度、免震床と振動台間の相対変位の上下水平成分を測定し、免震効果を把握したものである。試験結果から、上下・水平同時加振時においても、三次元免震床としての免震効果が問題なく機能することが確認された。解析は、免震床を1質点系に置換し、水平振動については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を使用し、上下振動については上下ばねとダンパーを有する系として弾性解析を実施した。解析結果から、免震床上の応答加速度、応答変位、振動台と免震床間の位相差、履歴特性等の試験結果がよくシミュレートできることを確認した。

1. はじめに

今日では、ほとんど全ての分野でコンピュータが使用され、社会の進歩と発展に寄与し、生活の向上のための重要なサポート機構として活用されている。このため、大地震時にコンピュータの機能を維持することは、社会的な混乱を招かないためにも大変重要なことである。

当社開発の低摩擦タイプ免震床「ダイナミック・フロア・システムTM」は、「コイルばねによる滑りタイプの二次元、三次元免震床システム」であり、激震・烈震からコンピュータを守るものである。施工実績は、1976年(昭和51年)の開発以来、既に65件、9万m²を越えており、圧倒的なシェアを占めている。

本報告は、最近のニーズの多様化に対処するため新たに開発した、三次元低摩擦タイプ免震床の上下・水平同時加振時における性能実証試験とそのシミュレーション解析結果について述べるものである。

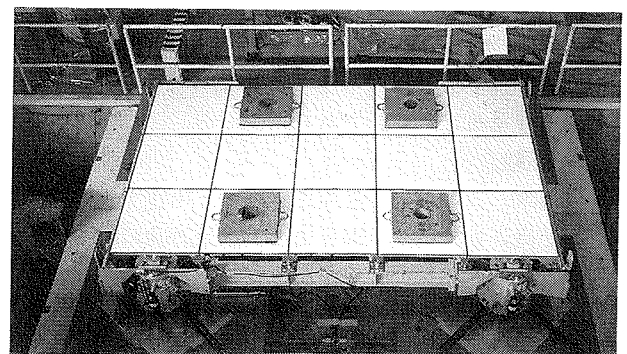
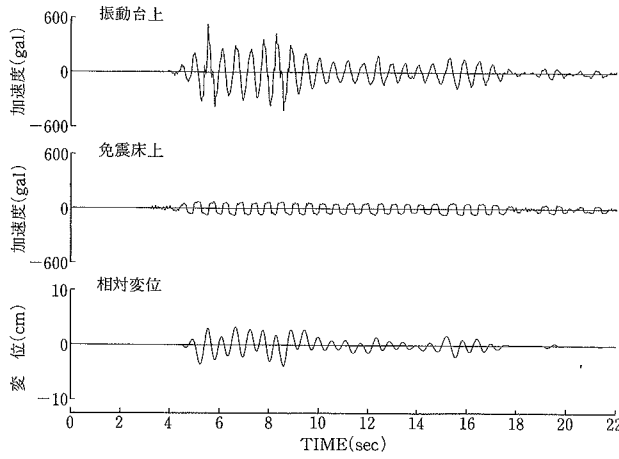
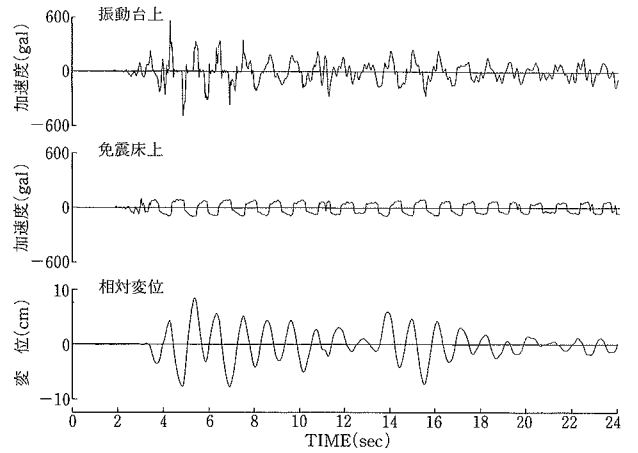


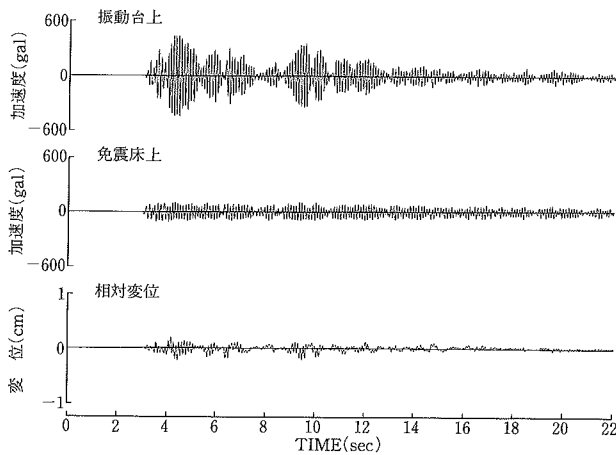
写真-1 試験体（免震床モデル）



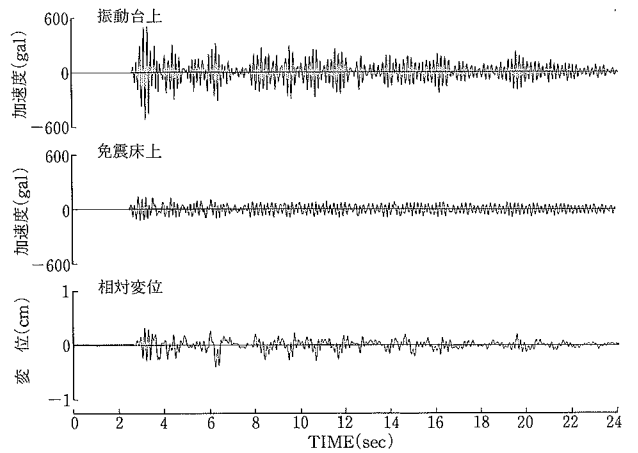
(a) Aビル, 9階フロアレスポンス波入力時(水平方向)



(a) Dビル, 7階フロアレスポンス波入力時(水平方向)



(b) Aビル, 9階フロアレスポンス波入力時(上下方向)
(EL CENTRO NS波, 水平526 gal, 上下443 gal 入力)



(b) Dビル, 7階フロアレスポンス波入力時(上下方向)
(EL CENTRO NS波, 水平555 gal, 上下519 gal 入力)

図-1 Aビルの床応答波形

図-2 Dビルの床応答波形

2. 免震床の性能実証試験

2.1 試験装置と試験体 (免震床モデル)

使用した試験装置は, 当社保有の電気油圧式振動台であり, 加振は上下・水平同時加振である。試験体および振動台設置状況を写真-1に示す。この免震床試験体は, 外形寸法が2,000×3,000であり, 総重量(W)が1,200 kgf, 水平の固有周期(T_H)が3.0 sec, 上下の固有周期(T_V)が0.65 sec, 上下ダンパーの減衰定数(h_V)が30%の諸特性を有したものである。

2.2 試験方法

免震床システムの性能実証試験は, 実在する建物の実地震フロアレスポンス波を上下・水平方向に同時に入力する方法で実施した。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と応答変位(相対変位)を測定することにより行なった。

振動台に入力した地震動は, 表-1に示す各建物の基礎部に①EL CENTRO 1940 NS, ②HACHINOHE

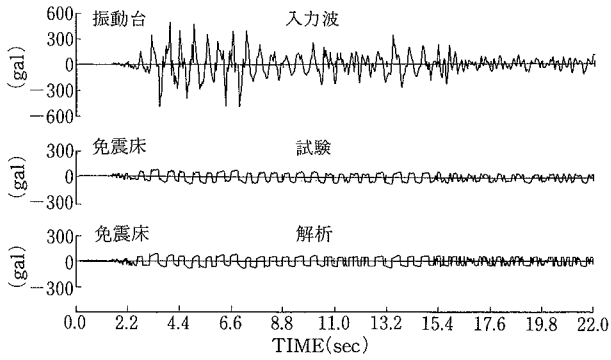
表-1 振動台入力床応答波の建物概要

ビル名	構造種別	階数	振動台入力床応答波	一次固有周期	
				水平	上下
A	SRC	9階建	4階 9階	0.56sec	0.11sec
B	RC	6階建	3階	0.49sec	0.10sec
C	RC	5階建	3階	0.45sec	0.10sec
D	SRC	11階建	7階	1.06sec	0.16sec

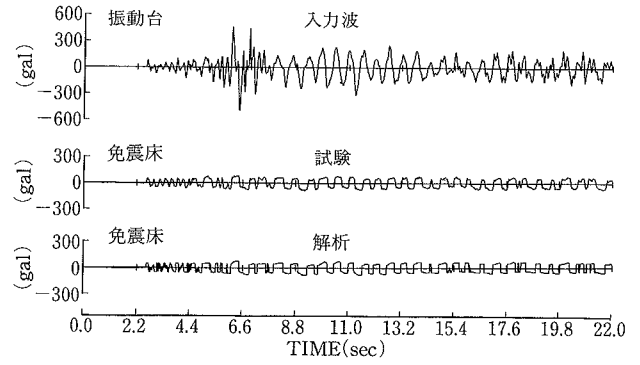
1968 NS を入力した場合の中間階ないし最上階の床応答波形である。各試験ケースとも, 気象庁震度階にほぼ対応する床応答加速度レベルで入力し, 使用した振動台の性能上, 可能な限り大振幅まで加振した。

2.3 振動台試験結果

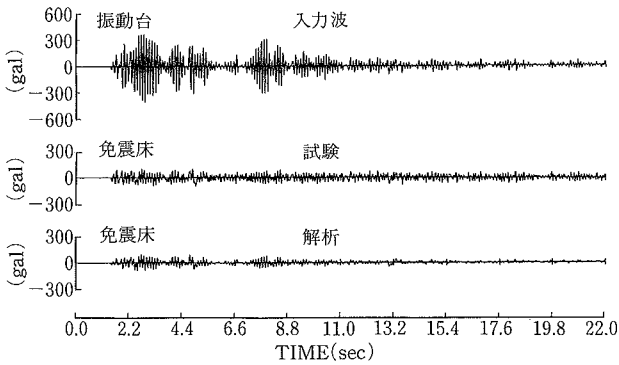
2.3.1 免震効果 建物基礎部への入力波としてEL CENTRO 波を使用した時の, Aビル9階のフロアレスポンス波を上下・水平同時に入力した場合の入力波形と応答波形を図-1に示す。さらに, Dビル7階のフロアレ



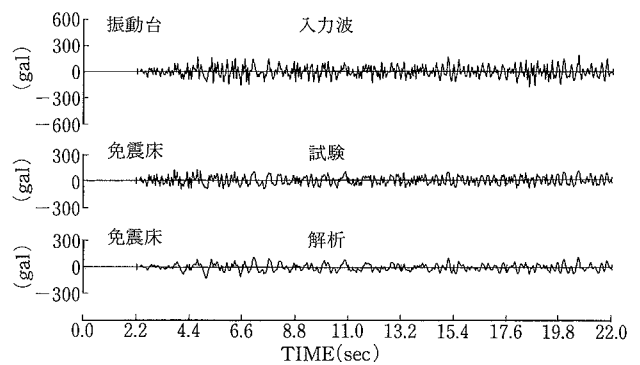
(a) Aビル, 4階フロアレスポンス波入力時(水平方向)



(a) Aビル, 4階フロアレスポンス波入力時 (水平方向)



(b) Aビル, 4階フロアレスポンス波入力時(上下方向)
(EL CENTRO NS 波, 水平 490 gal, 上下 406 gal 入力)

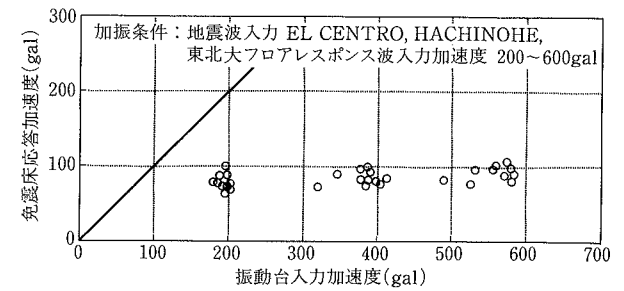


(b) Aビル, 4階フロアレスポンス波入力時 (上下方向)
(HACHINOHE NS 波, 水平 491 gal, 上下 181 gal 入力)

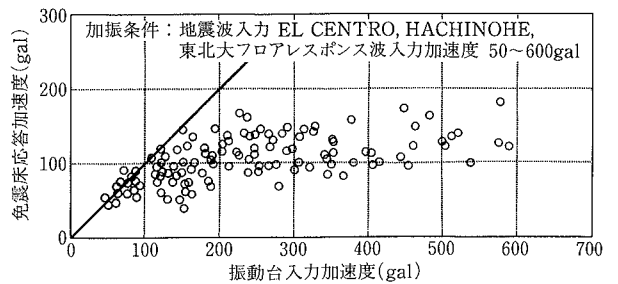
図-4 Aビルの床応答加速度の比較

図-5 Aビルの床応答加速度の比較

スポンズ波を入力した場合の同様の波形を図-2に示す。水平方向の免震床上の最大応答加速度は、Aビルが80gal以下、一次固有周期が長いDビルについても、100gal以下と著しく低減されることが分かる。また、上下方向の免震床上の最大応答加速度は、Aビルが110gal以下、Dビルが140gal以下となっている。図-3は、表-1に示す4つの建物の実地震フロアレスポンス波を、上下・水平同時に入力した時の、振動台上の最大加速度に対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。同図から、水平方向の免震床上の最大応答加速度は、気象庁震度階VIIの激震に相当する入力加速度に対しても、100gal程度以下であることが分かる。また、上下方向の免震床上の最大応答加速度は、200gal以内であることが分かる。免震床の最大応答加速度は、入力地震波の動特性、建物の固有振動特性および建築床への最大入力加速度値によって影響を受ける。しかし、三次元免震床の免震効果は、上下・水平同時加振時においても水平方向、上下方向とも良好であり、電算機の許容振幅値を十分満足していることが分かる。

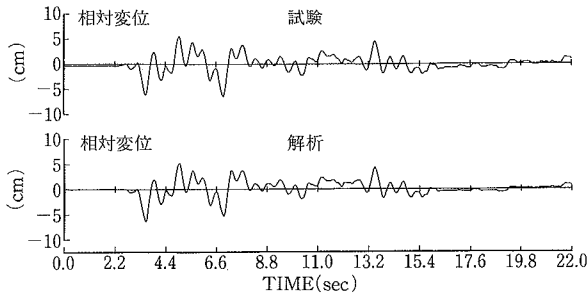


(a) 水平方向の応答加速度

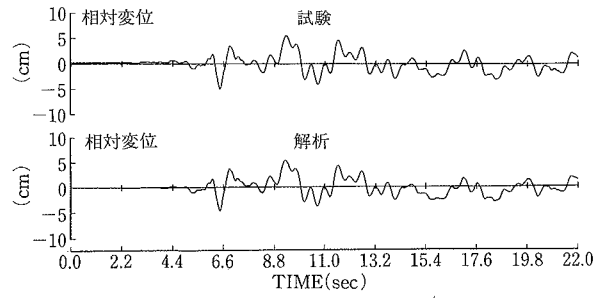


(b) 上下方向の応答加速度

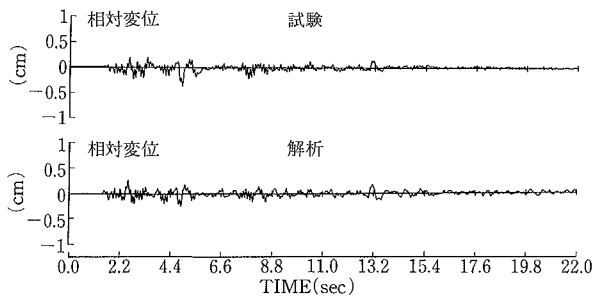
図-3 地震波入力試験結果 (低摩擦タイプ)



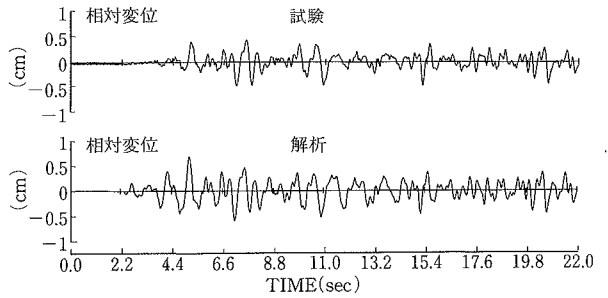
(a) A ビル, 4 階フロアレスポンス波入力時 (水平方向)



(a) A ビル, 4 階フロアレスポンス波入力時 (水平方向)



(b) A ビル, 4 階フロアレスポンス波入力時 (上下方向)
(EL CENTRO NS 波, 水平 490 gal, 上下 406 gal 入力)



(b) A ビル, 4 階フロアレスポンス波入力時 (上下方向)
(HACHINOHE NS 波, 水平 491 gal, 上下 181 gal 入力)

図-6 A ビルの相対変位の比較

図-7 A ビルの相対変位の比較

2.3.2 免震床の応答変位と残留変位 建築床と免震床間の相対変位は、免震床の応答加速度と同様に、入力地震動特性と建物の固有振動特性に左右される。今回の試験では、4つの建物の実地震フロアレスポンス波(表-1)を上下・水平方向に同時に入力した時の、三次元免震床の水平および上下方向の相対変位を把握した。その結果、滑動による水平方向の最大相対変位は10 cm前後であり、上下方向の最大相対変位は1 cm前後であることが分かった。また、実地震フロアレスポンス波入力後の残留変位は、免震機構を構成する摩擦材の摩擦係数が水平方向の復元力特性に及ぼす影響に支配されるが、上下・水平同時加振時においても、図-1の床応答波形の如く、ほぼ原点に復帰することを確認した。

3. シミュレーション解析

3.1 解析モデル

振動解析に使用したモデルは、振動台上の免震床を1質点系に置換したものである。水平方向の解析は、水平方向のばねと滑り摩擦の履歴特性を、Bi-Linear型復元力特性として、また、上下方向の解析は、上下ばねとダンパーの弾性復元力特性として実施した。解析モデルの諸定数は、以下の如くである。水平モデルの場合が総重量で1,183 kgf、摩擦抵抗力 Q_1 が動摩擦係数 $\mu=0.05$ の

場合で59 kgf、免震装置の横ばね剛性に相当する第2剛性 K_2 がモデル全体で5.5 kgf/cmである。なお、水平モデルの初期剛性 K_1 は、振動試験のP- δ 復元力曲線(図-10参照)から判断して、第2剛性 K_2 に較べてほぼ剛な値を使用した。復元力特性図は、参考文献2)を参照されたい。次に、上下モデルの場合は、総重量が1,013 kgf、上下ばね K_V がモデル全体で114 kgf/cmである。上下ダンパーの減衰定数は30%である。

3.2 解析ケース

シミュレーション解析時に使用した入力地震波は、Aビル4階のフロアレスポンス波を代表し、EL CENTRO波：水平490 gal、上下406 gal、およびHACHINOHE波：水平491 gal、上下181 galを上下・水平方向に同時に入力した。

3.3 シミュレーション解析結果

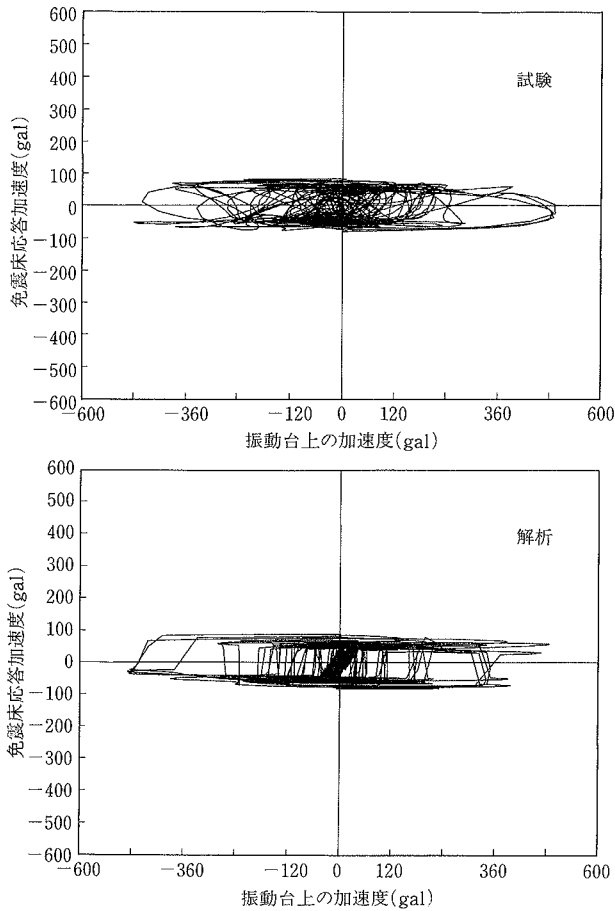
図-4に、EL CENTRO波：水平490 gal、上下406 galを同時に入力した場合の、免震床上の応答加速度波形を比較して示す。図-5に、HACHINOHE波：水平491 gal、上下181 galを同時に入力の場合を比較して示す。各図の上段(a)が水平成分、下段(b)が上下成分である。図-4、図-5の最大加速度値を比較して表-2、表-3に示す。試験値と解析値は、水平方向、上下方向ともよく一致していることが分かる。特に、水平方向について

表一2 最大応答値の比較 (水平)

	EL CENTRO 490gal		HACHINOHE 491gal	
	試験	解析	試験	解析
免震床の応答加速度	83gal	87gal	82gal	80gal
相対変位	6.4cm	6.3cm	5.5cm	5.3cm

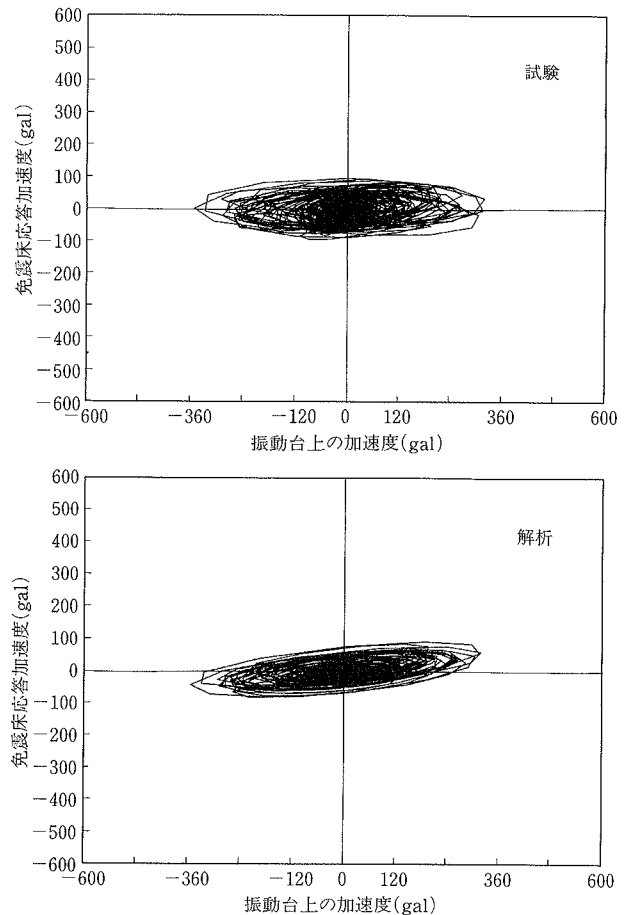
表一3 最大応答値の比較 (上下)

	EL CENTRO 406gal		HACHINOHE 181gal	
	試験	解析	試験	解析
免震床の応答加速度	97gal	93gal	120gal	122gal
相対変位	0.37cm	0.28cm	0.48cm	0.68cm



(EL CENTRO NS 波, 水平 490 gal, 上下 406 gal 入力)

図一8 免震床と振動台の応答加速度オービットの比較 (A ビル, 4 階フロアレスポンス波入力時の水平方向)



(EL CENTRO NS 波, 水平 490 gal, 上下 406 gal 入力)

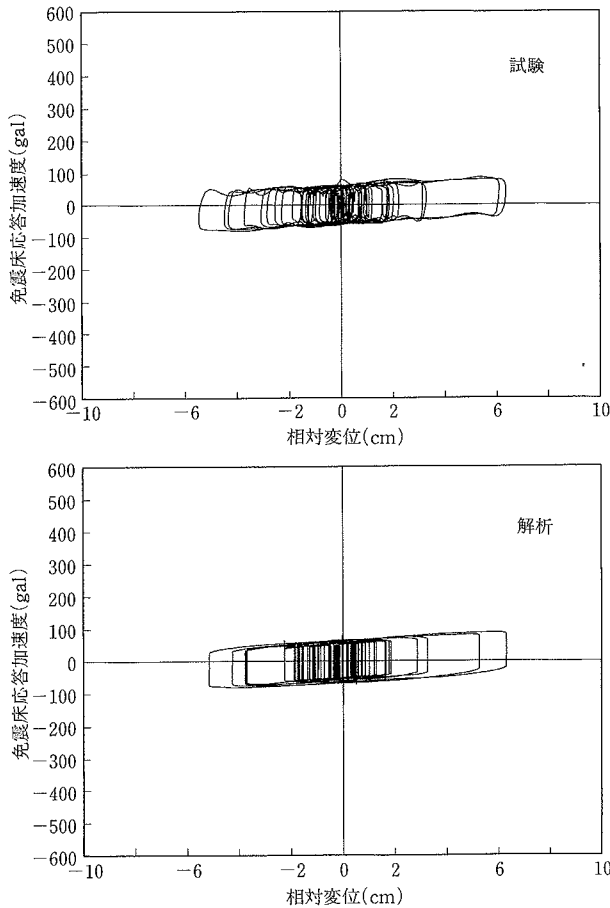
図一9 免震床と振動台の応答加速度オービットの比較 (A ビル, 4 階フロアレスポンス波入力時の上下方向)

ては、免震床上の応答加速度、振動台と免震床間の位相差がよく対応している。また、上下方向については、入力地震動の特性によっては免震床上の応答性状が極端に異なることが分かる。加速度波形の比較においては、解析波に含まれる高周波数成分が、多少とも少ない様に見える。これは、解析で考慮した上下ダンパーの減衰以外に、同ダンパーの微弱な摩擦抵抗が高周波数帯域で影響しているためと思われる。

図一6に、図一4のEL CENTRO波入力に対する免震床上の相対変位波形の試験値と解析値を比較して示す。図一7に、図一5のHACHINOHE波入力時の相対変位波形を同様に比較して示す。各図の上段(a)が水平成分、

下段(b)が上下成分である。これらの相対変位の最大値を比較して表一2、表一3に示す。図一6、図一7および表一2、表一3より、振動台に対する免震床上の相対変位波形の形状、最大相対変位量および位相差が、水平方向、上下方向とも、試験値によく対応していることが分かる。

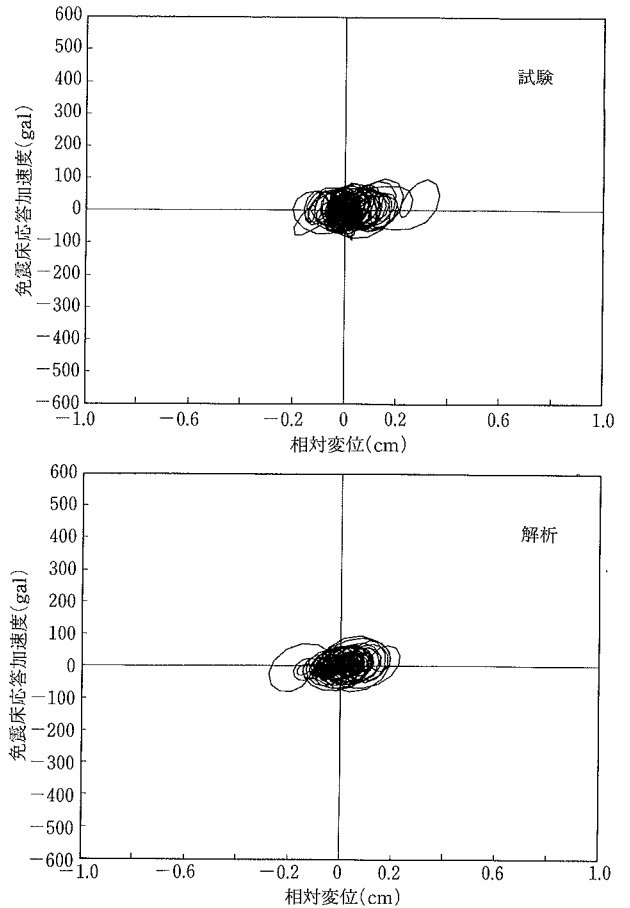
図一8、図一9に、図一4のEL CENTRO波入力時の、免震床上の応答加速度と振動台上の入力加速度の関係を表す水平成分および上下成分の、試験および解析のオービットを比較したものを示す。この結果、試験と解析における加速度-加速度オービットの形状は、水平方向、上下方向とも、ほぼ対応していることが分かる。



(EL CENTRO NS 波, 水平 490 gal, 上下 406 gal 入力)

図-10 免震床の応答加速度と相対変位オービットの比較 (A ビル, 4 階フロアレスポンス波入力時の水平方向)

図-10に、図-4のEL CENTRO波入力時の、免震床上の応答加速度と相対変位の関係を表わす水平成分の試験および解析のオービットを示し、図-11に、上下成分の同様のオービットを示す。図-10、図-11より、加速度と相対変位のオービットについても、試験と解析は、よく対応していることが分かる。参考のために、免震床システムの有する水平方向の減衰量を、加速度-相対変位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、試験値、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、次のことが言える。水平方向については、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、また、上下方向については、上下ばねとダンパーを有する系としての弾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、振動台と免震床との位相差、相対変位および履歴特性を、よく説明できる。結論として、上下・水平同時加振時においても、物性試験から求めた動摩擦係数の値の妥当性を確認した。



(EL CENTRO NS 波, 水平 490 gal, 上下 406 gal 入力)

図-11 免震床の応答加速度と相対変位オービットの比較 (A ビル, 4 階フロアレスポンス波入力時の上下方向)

4. まとめ

三次元免震床システムの免震性能を振動台試験により検討した結果、上下・水平同時加振時においても、三次元免震床としての免震効果が問題なく機能することを確認した。シミュレーション解析の結果、水平方向については、滑り摩擦の動的な復元力特性を、クーロン摩擦型によらず、Bi-Linear型の復元力特性で評価できることを、上下・水平同時加振時においても確認した。また、上下方向については、上下ばねとダンパーを有する弾性系としての復元力特性で説明できることが分かった。

参考文献

- 1) 中川, 渡辺, 島口, 他: 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) 島口, 金子, 安井: 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), 大林組技術研究所報, No. 41, p. 32~37, (1990)