

# 床免震技術に関する研究（その3）

——滑り・コロガリ併用型・三次元免震床の開発——

金子 正孝      安井 讓  
島口 正三郎

## Developmental Study on Floor Isolation Techniques (Part 3)

——Development of Three-dimensional Floor Isolation System of Ball-bearing and Low-friction Sliding Types——

Masataka Kaneko      Yuzuru Yasui  
Shosaburo Shimaguchi

### Abstract

The authors carried out simultaneous horizontal and vertical vibration tests of a three-dimensional floor isolation system which uses base isolation devices of both low-friction sliding and ball-bearing types. The system increases damping by using friction sliding and decreases dynamic coefficient of friction by using ball-bearings. The floor isolation system is capable of working smoothly by using both of the abovementioned mechanisms when small earthquake motions occur. The methods of vibration tests and simulation analyses are the same as described in the previous paper<sup>3)</sup>. As results of the vibration tests, the authors confirmed that the system is capable of functioning and demonstrating three-dimensional isolation effects. Response accelerations, relative displacements, phase lags, and frictional hysteresees were simulated well according to the results of the analyses.

### 概 要

滑り支承とコロガリ支承の免震装置を併用した三次元免震床の性能実証確認の為に、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。“滑り・コロガリ併用型・三次元免震床”は、滑り支承を利用することで減衰を確保し、コロガリ支承を使用することで動摩擦係数を小さくし、両者を組合せた総合特性により、低加速度領域での免震床の動きをスムーズにしたものである。試験方法および解析方法は前報<sup>3)</sup>と同様である。試験結果からは、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。また、解析結果からは、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

当社開発の“ダイナミック・フロア・システム<sup>1)</sup>”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、1976年（昭和51年）に開発・実用化されたものである。1989年（平成元年）に“(財)機械電子検査検定協会”の認定「適合証明書」を取得し、全滑り型の低摩擦タイプ免震床<sup>2),3)</sup>について開発を完了している。

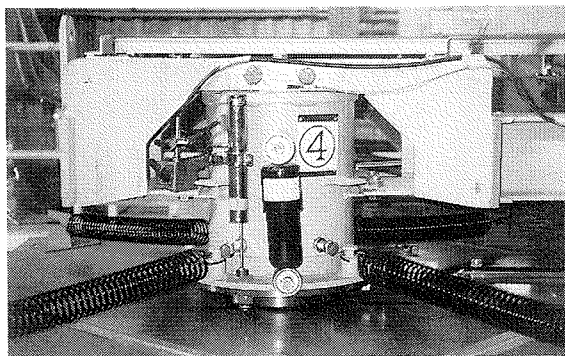
滑り・コロガリ併用型免震床は、滑り支承を利用することで減衰を確保し、コロガリ支承を使用することで動摩擦係数( $\mu_0$ )を小さくし、両者を組合せた総合特性により、低加速度領域での免震床の動きをスムーズにしたものである。本報告は、滑り・コロガリ併用型免震床の上下・水平同時加振による性能実証試験とシミュレーション解析結果について述べるとともに、コロガリ型免震床の試験結果についても言及する。

なお、免震床に対する考え方は、免震対象物とその許容値を明確にして、免震床の性能が決定されるべきであり、単に「動摩擦係数が小さければ良い」というものではない。施工性、施工コスト等のあらゆる面からの要因を考慮して、如何にトータルバランスのよい免震床の設計仕様を得るかであると考えられる。

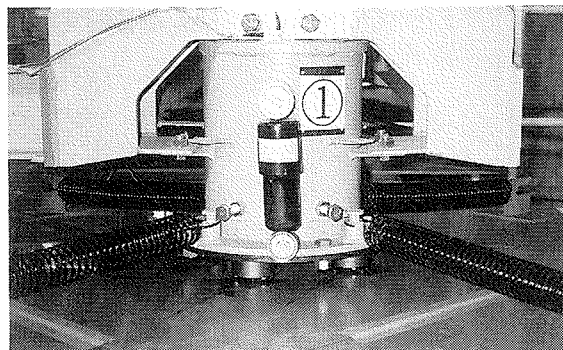
## 2. 免震床の性能実証試験

### 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<sup>1)</sup>であり、加振は上下・水平同時加振である。試験体の概要および振動台設置状況については、免震装置部を除いて同一のものを使用しているので、前報<sup>3)</sup>を参照されたい。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)が約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



【滑り支承による免震装置】



【コロガリ支承による免震装置】

写真-1 免震装置の設置状況

る。ここでは、前報<sup>3)</sup>と異なる滑り支承部とコロガリ支承部の免震装置の設置状況を写真-1に示す。

本報告で述べる滑り-コロガリ併用型免震床とは、写真-1に示す滑り支承とコロガリ支承の利点を相乗的に利用したものであり、ダンパー不要な免震床としたものである。今回は、滑り支承とコロガリ支承の免震装置を各2台ずつ対角線位置に設置することで、免震床全体として滑り部分とコロガリ部分のバランスをとり、0.04の $\mu_0$ を確保し、特に、低加速度レベルでの免震床の動きをスムーズにしたものである。

更に、コロガリ型免震床とは、写真-1に示すコロガリ支承の免震装置を4台使用し、0.02の $\mu_0$ を確保したダンパー不要な全コロガリ型免震床である。

各型式免震床の概要を表-1に示す。

## 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った。振動台に入力した地震動は、Aビル<sup>3)</sup>～Dビル<sup>3)</sup>の4つの各建物の基礎部に①EL CENTRO 1940 NS、②HACHINOHE 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。

なお、上下・水平同時加振振動台試験の前後に、各型式免震床システムの静加力試験を実施した。この静加力試験より、動摩擦係数を求めた結果を表-1に示す。滑り-コロガリ併用型免震床で $\mu_0=0.04$ 、コロガリ型免震床で $\mu_0=0.02$ である。

## 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、水平方向成分について、滑り-コロガリ併

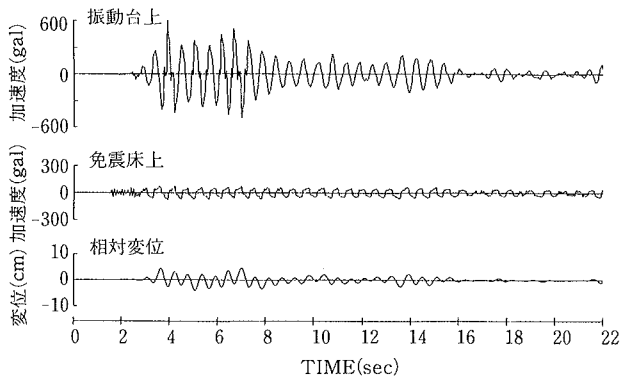
表-1 各型式免震床の概要

	免震床の名称	動摩擦係数 ( $\mu_0$ )	免震支承部の型式
I	低摩擦タイプ <sup>2),3)</sup>	0.06	全滑り型
II	滑り-コロガリ併用型	0.04	滑り-コロガリ併用型
III	コロガリ型	0.02	全コロガリ型

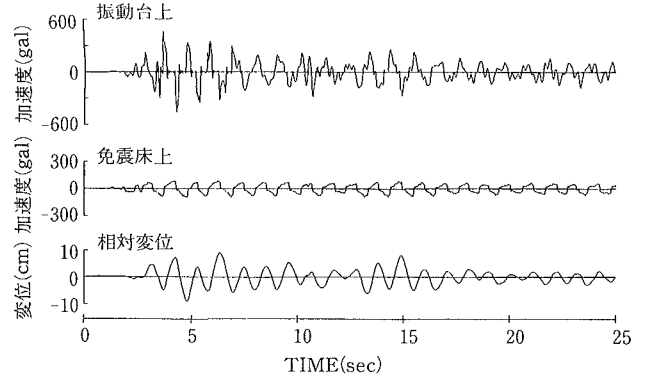
用型免震床とコロガリ型免震床を比較して図-1に示す。更に、一次固有周期がAビルの0.56 secに較べて、1.06 secと長周期であるDビル7階のフロアレスポンス波を入力した場合の同様の波形を図-2に示す。水平方向の免震床上の最大応答加速度が、滑り-コロガリ併用型およびコロガリ型とも、100 gal以下と著しく低減されていることが分かる。また、両型式免震床とも、水平方向の始動加速度が50 gal以下であり、低加速度レベルでの免震床の動きがスムーズであることが分かる。また、振動台上と免震床上の加速度波形の位相がほぼ逆相であり、動摩擦係数が小さい場合の動的特性が顕著に現われている。更に、コロガリ型免震床上の応答加速度波形は、三角波的になっていることが分かる。これは、水平方向の始動加速度が非常に小さいためと、免震装置に水平方向の横ばねを使用しているためである。なお、上下方向の免震性状は、免震機構が低摩擦タイプ免震床<sup>3)</sup>と同一のものを使用しているため、前報<sup>3)</sup>で述べた応答特性と差がない。従って、本報告では、原則として上下方向の試験結果を割愛する。

図-3に、図-1 (Aビル, 9階)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わす水平成分の試験結果のオービットを、表-1の各型式免震床について比較して示す。図-3より、全滑り型→滑り-コロガリ併用型→全コロガリ型の免震床の順に、低加速度領域でも免震床が起動する傾向があることが分かる。

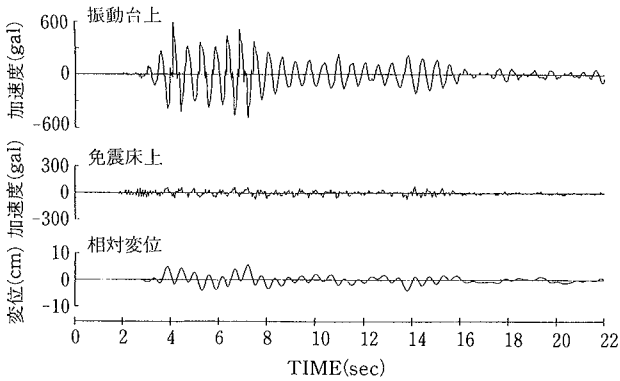
図-4と図-5に、EL CENTRO 波入力時の、免震床上の応答加速度と相対変位の関係を表わす水平成分の試



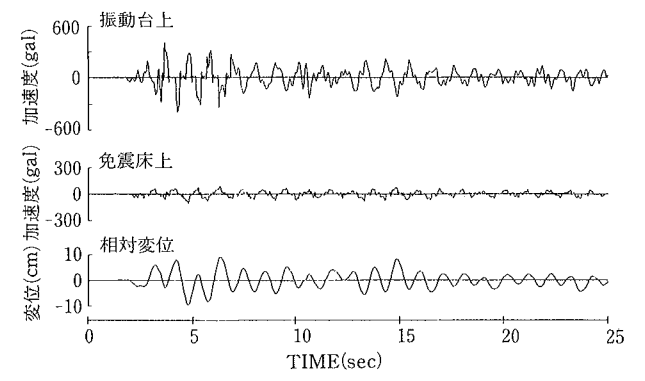
(a) 滑り-コロガリ併用型免震床 ( $\mu_D=0.04$ )



(a) 滑り-コロガリ併用型免震床 ( $\mu_D=0.04$ )



(b) コロガリ型免震床 ( $\mu_D=0.02$ )



(b) コロガリ型免震床 ( $\mu_D=0.02$ )

図一 各型式免震床のAビル床応答波形の比較 (Aビル, 9階 EL CENTRO NS波 入力時の水平方向)

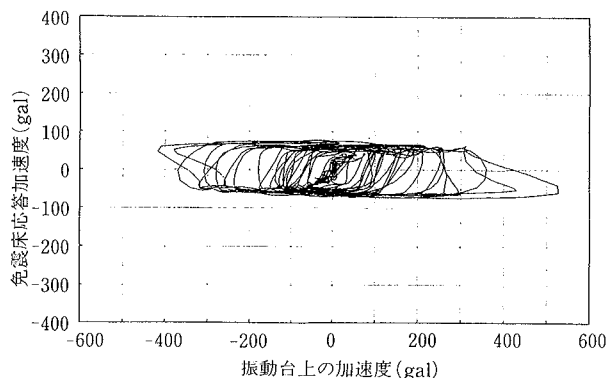
図二 各型式免震床のDビル床応答波形の比較 (Dビル, 7階 EL CENTRO NS波 入力時の水平方向)

験結果のオービットを、各型式免震床について比較して示す。図一4はAビル(図一1)に、図一5はDビル(図一2)に対応するものである。この結果からも、全滑り型→滑り-コロガリ併用型→全コロガリ型の順に、低加速度領域でも免震床が動く傾向があることが分かるとともに、相対変位が多少とも大きくなってきている様子が分かる。更に、図一5から、Dビルの水平方向の一次固有周期がAビルに較べて長いために、振動台(建築床を想定)と免震床との間の相対変位がAビルの場合(図一4)よりも大きいことが分かる。また、図一4と図一5から、動摩擦係数に差があるわりには、各型式免震床の最大相対変位に差がないことが分かる。このことから、各型式免震装置の水平方向の長周期の横ばねによって、免震床の最大応答加速度値を100 gal以下に抑えるとともに、適切な動摩擦係数により変位制御も同時に達成されていることが分かる。この点も“ダイナミック・フロア・システム”のトータルバランスの良さの一つであると言える。もちろん、相対変位を大きくとれば、免震床上の最大応答加速度を、更に小さく抑えることができる。しかし、過大な相対変位は、建築床と免震床間の大きなクリアランスを必要とし、有効床面積の減少につながる。更

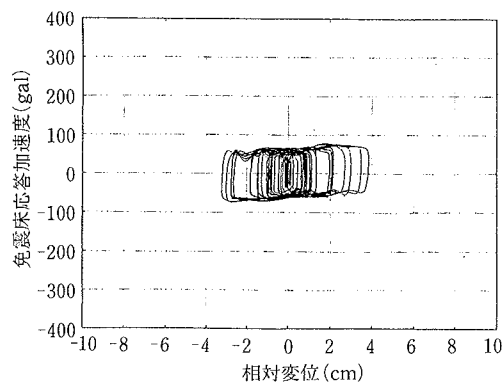
に、極端な場合、免震床の施工を不可能にすることもあり、相対変位は、免震床の設計・施工計画に、重要な意味をもつ。すなわち、免震床の性能は、免震対象物と許容値を明確にして、施工性、施工コスト等のあらゆる面からの要因を考慮して決定されるべきであり、単に“免震床の始動加速度および最大応答加速度が小さければよい”というのではないと考える。

図一6に、Aビル～Dビルの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場合の、振動台上の最大入力加速度に対する免震床上の最大応答加速度の関係を、滑り-コロガリ併用型免震床に関してまとめて示す。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、100 gal以下であることが分かる。また、滑り-コロガリ併用型免震床の始動加速度が50 gal以下であることが分かる。更に、上下方向の免震床上の最大応答加速度は、200 gal以内であることが分かる。

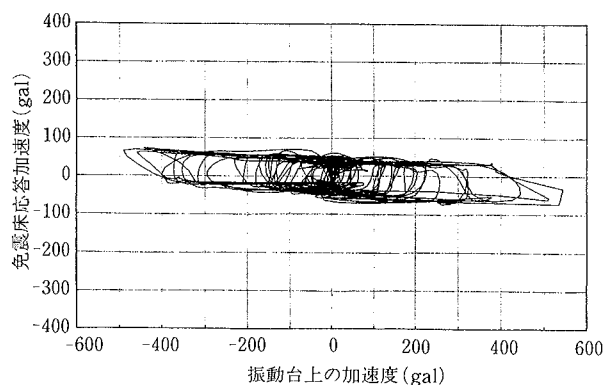
表一2に、各型式免震床の始動加速度と最大応答加速度を比較して示す。免震床の最大応答加速度は、入力地震波の動特性、建物の固有振動特性、建築床への最大入力加速度値、免震床自体の固有振動特性によって影響を



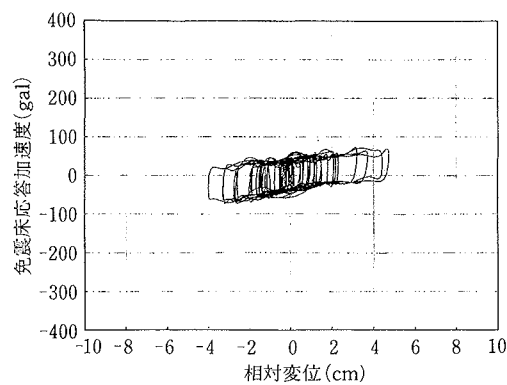
(a)低摩擦タイプ免震床 ( $\mu_D=0.06$ )



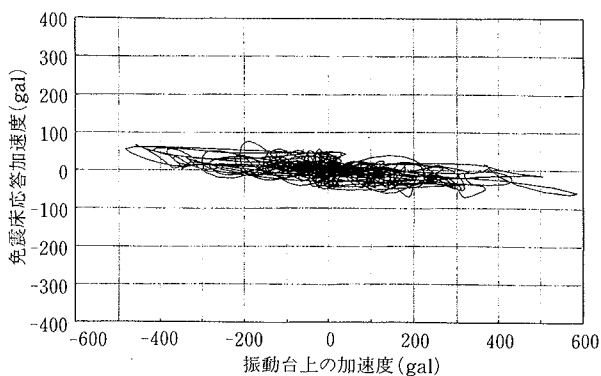
(a)低摩擦タイプ免震床 ( $\mu_D=0.06$ )



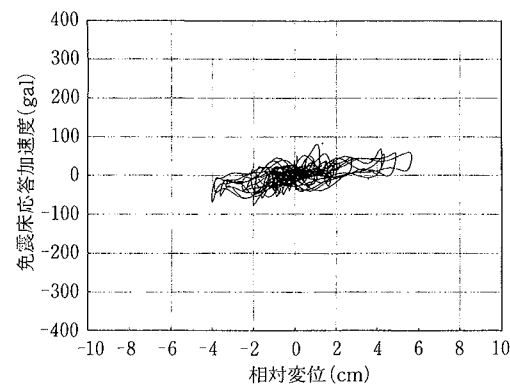
(b)滑り-コロガリ併用型免震床 ( $\mu_D=0.04$ )



(b)滑り-コロガリ併用型免震床 ( $\mu_D=0.04$ )



(c)コロガリ型免震床 ( $\mu_D=0.02$ )



(c)コロガリ型免震床 ( $\mu_D=0.02$ )

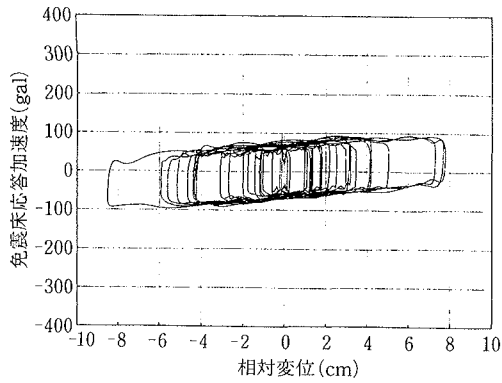
図-3 各型式免震床と振動台の応答加速度オービットの比較  
(Aビル, 9階 EL CENTRO NS波  
入力時の水平方向)

図-4 各型式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, 9階 EL CENTRO NS波  
入力時の水平方向)

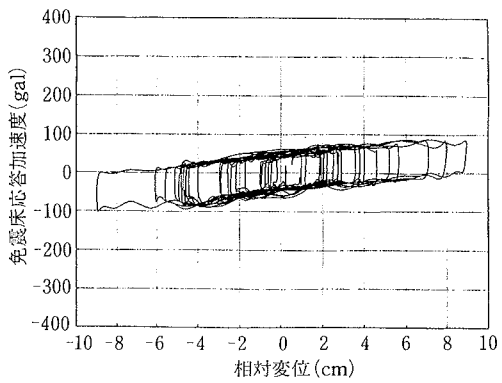
受ける。しかし、滑り-コロガリ併用型免震床の三次元免震効果は、上下・水平同時加振時においても、水平方向、上下方向とも良好であり、著者らの想定している電算機の許容振幅値を十分満足している。

2.3.2 免震床の相対変位 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、建物の固有振動特性、免震床自体の周期、減衰特性に左右される。振動台試験では、4つの建物の実地震フ

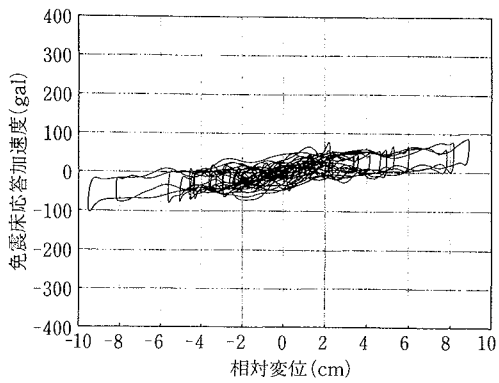
ロアレスポンス波を上下・水平方向に同時に入力した時の、三次元免震床の水平方向および上下方向の相対変位を把握した。表-2に、各型式免震床の最大相対変位を比較して示す。免震床の水平方向の最大相対変位は12~14 cmであり、免震床の型式による差が少ないことが分かる。なお、上下方向の最大相対変位は、1 cm前後である。また、免震床の残留変位についても、前報<sup>3)</sup>と同様に、原点に復帰することを確認している。



(a)低摩擦タイプ免震床 ( $\mu_D=0.06$ )



(b)滑りーコロガリ併用型免震床 ( $\mu_D=0.04$ )



(c)コロガリ型免震床 ( $\mu_D=0.02$ )

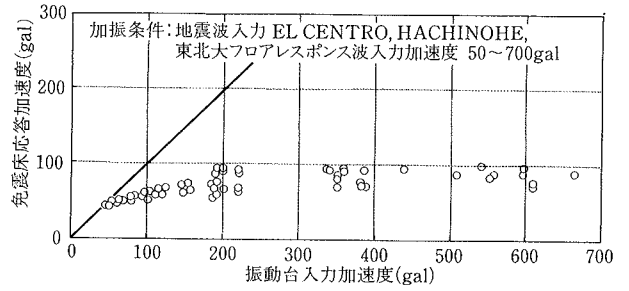
図-5 各型式免震床の応答加速度と相対変位オービットの比較  
(Dビル, 7階 EL CENTRO NS 波入力時の水平方向)

### 3. シミュレーション解析

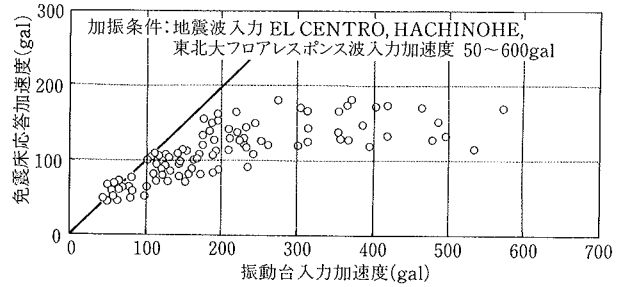
#### 3.1 解析モデル

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<sup>2)</sup>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



(a)水平方向の応答加速度



(b)上下方向の応答加速度

図-6 地震波入力試験結果(滑りーコロガリ併用型)

表-2 各型式免震床の免震性状一覧 (水平方向)

	免震床の名称	始動加速度	最大応答加速度	最大相対変位
I	低摩擦タイプ <sup>2),3)</sup>	70gal程度	100gal以下	12cm以下
II	滑りーコロガリ併用型	50gal程度	100gal以下	14cm以下
III	コロガリ型	30gal程度	100gal以下	14cm以下

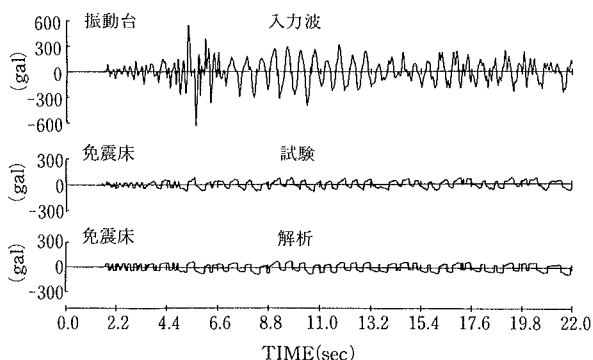
ルの場合が総重量で1,183 kgf、摩擦抵抗 $Q_1$ が滑りーコロガリ併用型免震床の場合、動摩擦係数 $\mu_D=0.04$ で47 kgf、免震装置の横ばね剛性に相当する第2剛性 $K_2$ がモデル全体で5.5 kgf/cmである。なお、水平モデルの初期剛性 $K_1$ は、振動試験のP- $\delta$ 復元力曲線(図-4、図-5参照)から判断して、第2剛性 $K_2$ に較べてほぼ剛な値を使用した。次に、上下モデルの諸定数は、総重量が1,013 kgf、上下ばね定数 $K_V$ が114 kgf/cm、減衰定数が30%である。

#### 3.2 解析ケース

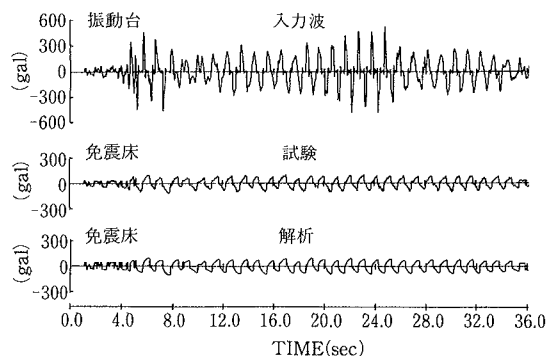
シミュレーション解析時に使用した入力地震波は、HACHINOHE波入力に対するAビル4階およびDビル7階のフロアレスポンス波を代表し、上下・水平方向に同時に入力した。この最大加速度は、水平600 gal、上下300 gal相当である。

#### 3.3 シミュレーション解析結果

図-7に、(a) Aビル4階と(b) Dビル7階について、滑りーコロガリ併用型免震床の、水平方向の応答加速度波形を試験と比較して示す。試験値と解析値は、免

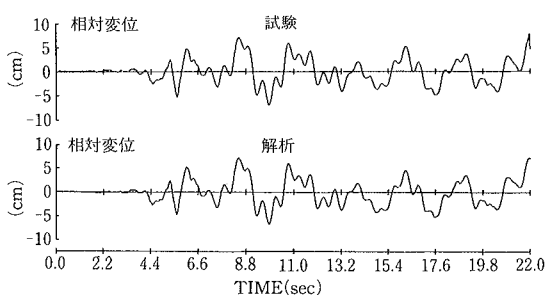


(a)Aビル, 4階 HACHINOHE NS波入力時  
(水平方向)

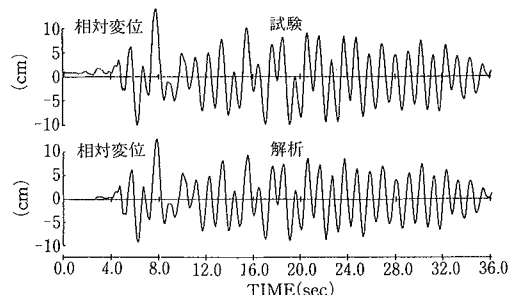


(b)Dビル, 7階 HACHINOHE NS波入力時  
(水平方向)

図一七 床応答加速度の比較（滑りーコロガリ併用型免震床）



(a)Aビル, 4階 HACHINOHE NS波入力時  
(水平方向)



(b)Dビル, 7階 HACHINOHE NS波入力時  
(水平方向)

図一八 相対変位の比較（滑りーコロガリ併用型免震床）

震床上の応答加速度，振動台と免震床間の位相差とも，よく一致していることが分かる。図一八に，振動台と免震床間の相対変位波形を，同様に比較して示す。試験値と解析値は，応答振幅，位相とも，よく対応していることが分かる。また，免震床システムの水平方向の等価粘性減衰定数を，図一七および図一八の解析波形を使って加速度ー相対変位オービットから求めると30%程度であり，同様にして試験から求めた値に対応する。以上のシミュレーション解析結果から，水平方向については，滑りーコロガリ併用摩擦の履歴特性を，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，説明できることが分かる。結論として，滑りーコロガリ併用型免震床の上下・水平同時加振時においても，免震床システムの静加力試験から求めた動摩擦係数の値の妥当性を確認した。

#### 4. まとめ

滑りーコロガリ併用型・三次元免震床の免震性能を振動台試験およびシミュレーション解析により検討した結果，次のことが分かった。

試験結果より，滑りーコロガリ併用型免震床は，低加速度領域での滑動のスムーズ化，適切な相対変位および減衰定数の確保，動摩擦係数の最適設計，等が可能であることが分かった。

次に，シミュレーション解析結果より，水平方向については，滑りーコロガリ併用摩擦の動的な復元力特性を，Bi-Linear型の復元力特性で，また，上下方向については，上下ばねとダンパーの弾性系としての復元力特性で評価できることが分かった。

以上の結果，滑りーコロガリ併用型・三次元免震床システムは，水平面内と上下方向の三次元免震床として十分機能し，実用に供せるものであることを確認した。

#### 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)
- 3) 金子，安井，島口：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），大林組技術研究所報，No. 45, p. 89~94, (1992)