

高性能上下免震床システム(TASS floor-3D)の開発

欄木 龍大^{*1}・長島 一郎^{*1}・新居 藍子^{*1}・勝田 庄二^{*2}・木村 雄一^{*3}・中島 徹^{*2}・山崎 英一^{*2}

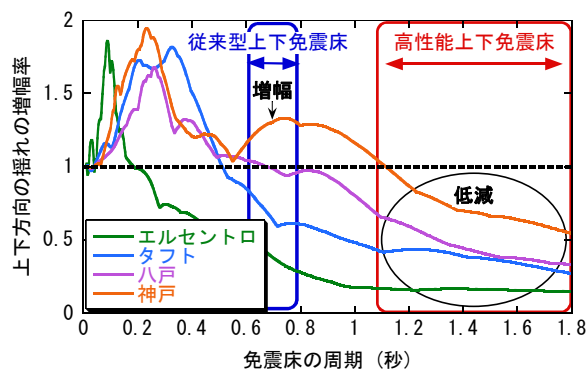
Keywords : vertical isolation floor system, rotary inertia device, shaking table test, business continuity planning, data center

上下免震床, 回転慣性機構, 振動台実験, 事業継続計画, データセンター

1. はじめに

コンピューターや通信機器類の高度化・多様化に伴い, 情報施設, 医療施設, 生産施設や防災施設等では, 事業継続性(BCP)の観点から, 水平動のみならず上下動に対しても地震対策が要求されつつある。地震時にこれらの機器類を正常に稼働させるためには, 機器が受ける加速度を水平・上下方向とも $200 \sim 250 \text{ cm/s}^2$ 以下(震度5程度)に抑えることが必要といわれている。

上下動の対策技術として免震床が使用されているが, 従来の上下免震床では, 人の歩行や地震時の変位量を実用上問題のない大きさに抑えるために, 周期を0.7秒程度に設定しており, 1995 兵庫県南部地震の JMA Kobe-UD のように $0.5 \sim 1.0$ 秒の周期帯の入力が大きい地震動に対しては十分な免震効果が期待できなかった(図一1)。そこで, 回転慣性機構によって周期を $1.1 \sim 1.8$ 秒まで長周期化することで, 地震時の変位量を従来と同程度に抑えながら, 大幅に免震性能を向上させた高性能上下免震床の開発を行った。



図一1 免震床の周期と増幅率の関係

Fig.1 Relationship between isolation period and amplification

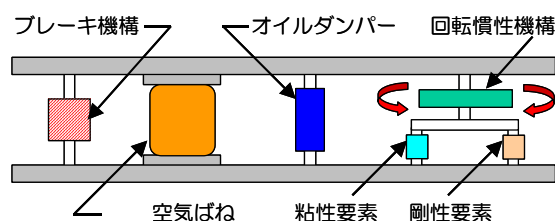
本論では, まず高性能上下免震床のシステム概要と, シミュレーション解析による免震床の歩行性能および免震効果を示し, 次に振動台による性能確認実験結果について報告する。

2. 高性能上下免震床システムの概要

2.1 システムの構成

図一2 に上下免震床システムの構成を示す。床の鉛直荷重は空気ばね支承により支持する。空気ばねには空気室を設けた補助タンクおよび空気を送り込むコンプレッサーが併設されており, この補助タンクの空気容量を大きくすることで, 周期を標準の0.7秒から1.1秒程度に長周期化することが可能である。さらに, 回転慣性機構を取り付け, 質量効果を増やすことで最大1.8秒までの長周期化を実現している。この回転慣性機構は, ボールネジと円盤とで構成され, 床の上下運動を円盤の回転運動に変換することで付加質量効果を得ることができる。ここで, 円盤質量を m_p , 円盤半径を R , ボールネジのリード(ネジを1回転させて軸方向に進む距離)を L とすると付加質量 Δm は下式で表せる。

$$\Delta m = 2m_p \cdot (\pi \cdot R / L)^2 \quad (1)$$



図一2 上下免震床システムの構成

Fig.2 Configuration of vertical isolation floor system

* 1 技術センター建築技術研究所防災研究室

* 2 設計本部構造グループ

* 3 設計本部構造計画グループ

また、積載荷重の増減、偏在に対しては空気ばねに取り付けられたレベリングバルブにより水平レベルを保持する。減衰機構としてはオイルダンパーとブレーキ機構を併用しており、ブレーキのロック機能によって歩行時の居住性を確保している。なお、回転慣性機構に直列に配置されている粘性要素、剛性要素は慣性質量機構の作動によって高周波振動が励起されるのを低減するためのものである。

図-3 に本システム（周期 1.8 秒）と従来タイプ（周期 0.7 秒）の上下免震床の伝達関数を比較して示す。本システムは、従来タイプに比べ 0.7Hz～3.0Hz の間で加速度の伝達関数が小さくなっており、大きな応答低減効果が得られることが分かる。

2.2 長周期化原理

免震周期 1.8 秒までの長周期化を実現するために、回転慣性機構による付加質量を用いる。付加質量を Δm とすると、振動方程式は

$$(m + \Delta m) \cdot \ddot{Z} + C \cdot \dot{Z} + K \cdot Z = -m \cdot \ddot{Y} \quad (2)$$

ここに

m : 免震床上部の質量(積載も含めたシステム全体)

K : 空気ばねのばね定数

C : オイルダンパーの減衰係数

\ddot{Z}, \dot{Z}, Z : 免震床の上下方向相対加速度, 速度, 変位

\ddot{Y} : 空気ばね支持部(構造床)の入力加速度

と表せ、さらに両辺を $(m + \Delta m)$ で除して

$$\omega' = \sqrt{K/(m + \Delta m)} \quad (3)$$

$$h' = C / \{2 \cdot \sqrt{(m + \Delta m)K}\} \quad (4)$$

と置くと、(2)式は(5)式となる。

$$\ddot{Z} + 2 \cdot h' \cdot \omega' \cdot \dot{Z} + \omega'^2 \cdot Z = -\{m/(m + \Delta m)\} \cdot \ddot{Y} \quad (5)$$

(3)式より付加質量 Δm によって固有円振動数 ω' が小さくなり、 $\Delta m \rightleftharpoons m$ となるように回転慣性機構を構成すれば周期を約 1.4 倍まで長周期化することができる。また、(5)式右辺より、 $m/(m + \Delta m)$ 倍に入力を低減する効果も得られることがわかる¹⁾。

3. 解析による免震効果の検討

3.1 振動解析モデルの概要

本システムの免震効果を確認するため、モデル建物に対する地震応答解析を実施する。また、上下免震床に大人 1 名の歩行加振力を作用させた解析を実施し、歩行時における床の居住性能を確認する。

モデル建物は鉄骨造 4F 建ての事務所ビルで、1～4F を電算室として想定しており、この範囲に上下免震床を設置する。ここでは 22.0m×3.6m スパンの 1 フレームを取り出した 2 次元弾性フレームモデルに対して検討を行う。図-4 に建物の解析モデル概念図を示す。各階の重量は柱梁接点位置および梁を 4 等分した位置に集中質量として与える。内部減衰は上下 1 次振動数に対して 2%の剛性比例型減衰として与える。振動系モデルの上下固有振動数は、 $f_1=9.27\text{Hz}$, $f_2=11.15\text{Hz}$ である。また、図-5 に免震床部分の解析モデルを示す。入力地震波は、El Centro-UD(1940), Taft-UD(1958), Hachinohe-UD(1968)および JMA Kobe-UD(1995)を採用し、前者 3 波(標準 3 波)は水平 50cm/s 相当に基準化して用いる。JMA Kobe 波は原波を用いる。

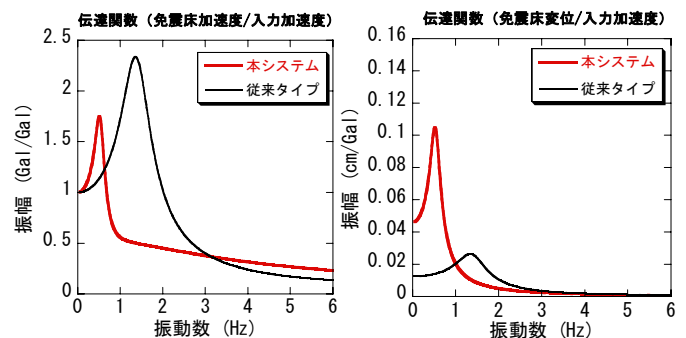


図-3 伝達関数の比較
Fig.3 Comparison of transfer function

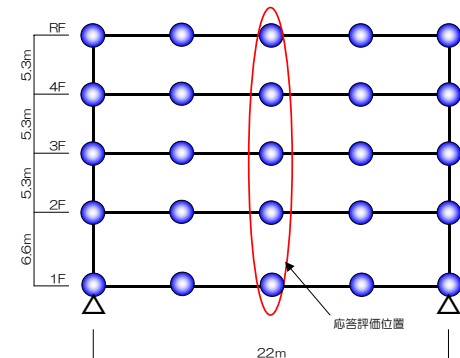


図-4 建物モデル
Fig.4 Analysis model of structure

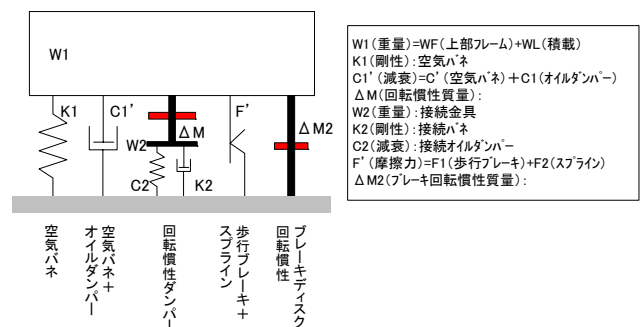


図-5 上下免震床モデル
Fig.5 Analysis model of vertical isolation floor system

3.2 地震応答解析結果

図-6 に 4F における最大応答加速度値を示す。従来タイプの上下免震床(周期 0.7 秒)、本システムの上下免震床(周期 1.4 秒)ともに、建物床応答に対して応答加速度が低減されているが、従来タイプは標準 3 波に対して概ね 200cm/s^2 程度であるものの、JMA Kobe-UD 波に対しては 400cm/s^2 程度の大きな応答値となっている。それに対し、本システムは、JMA Kobe-UD 波に対しても 200cm/s^2 程度まで応答を抑えることができおり、優れた免震性能を有していることが確認できる。なお、図には示していないが応答変位は従来タイプに比べて 2~3 割増加する。

3.3 歩行時の居住性評価結果

図-7 に 1 名歩行時の床の居住性能評価結果を示す。本システムの上下免震床の ISO2631-2 による応答は、従来タイプに対して 2Hz 帯の応答加速度は増大するが 1Hz 帯の応答は減少しており、従来タイプでは環境係数が 8 (作業所の許容値) 上限付近であったものが、本システムでは環境係数が 4 (事務所の許容値) 程度に改善されている。ブレーキ機構の効果により、歩行時の居住性能が従来タイプに比べて向上していることが分かる。

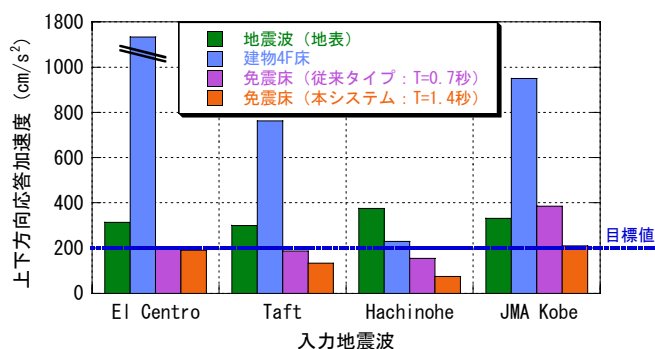


図-6 地震応答解析結果 (最大加速度)

Fig.6 Results of response analysis (peak acceleration)

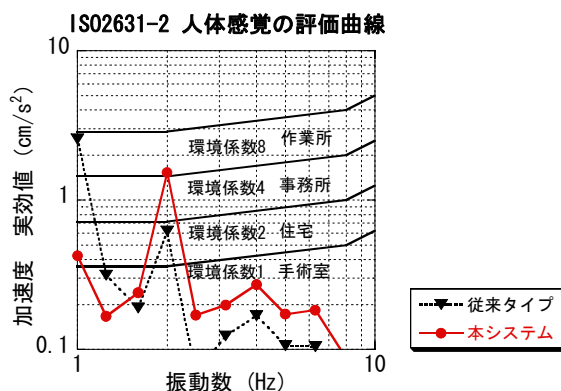


図-7 歩行時の居住性評価結果 (ISO2631-2)

Fig.7 Results of habitable evaluation under walking

4. 振動台による性能確認

4.1 実験概要

高性能上下免震床システムの周波数応答特性ならびに地震時の免震効果の確認を目的に、実大試験体による振動台試験を実施した。

4.1.1 試験体

図-8 に免震床試験体の概略図を示す。免震床は $4\text{m} \times 2.45\text{m}$ の平面形状とし、試験体の隅部に免震装置を配置した。上下免震装置は①空気ばね支承、②回転慣性機構、③歩行時のロック機能と地震時のエネルギー吸収機能を兼ねたブレーキ機構から構成される。なお、本試験体は水平免震も組合せた 3 次元免震床として構成しており、水平免震装置はボールベアリング支承による既存製品を用いた。加振は、上下免震床の基本性能を確認する目的で上下方向加振を実施し、また、水平方向入力が上下方向の免震効果に及ぼす影響を確認する目的で、水平+上下方向の 3 軸加振を実施した。なお、免震床上の搭載物として、上下方向加振時はダミーウェイト (質量 $2 \times 10^3 \text{ kg}$) を設置し、3 軸加振時は検査機器 ($4\text{m(L)} \times 2.4\text{m(W)} \times 2.4\text{m(H)}$, 質量 $2.3 \times 10^3 \text{ kg}$) を設置した。

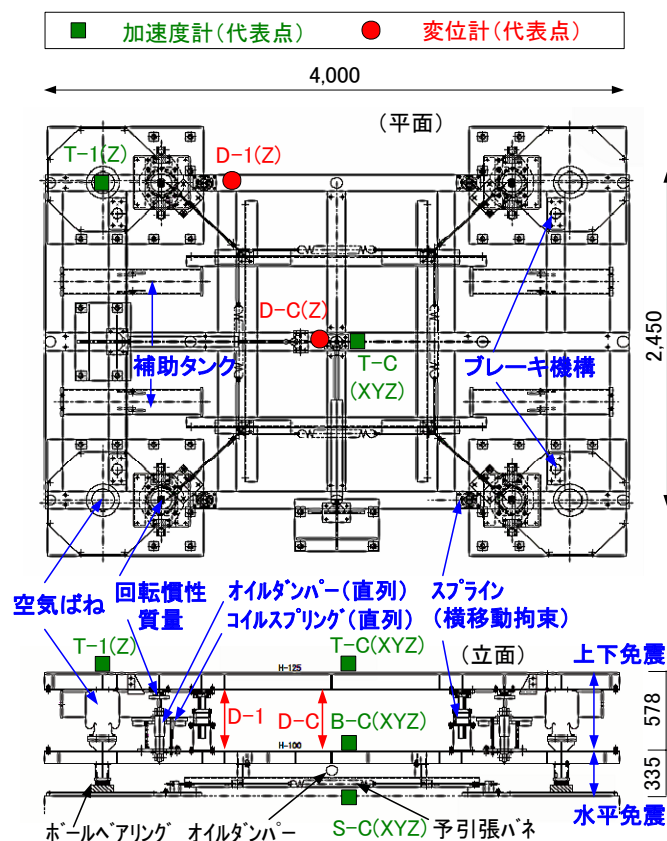


図-8 試験体概略図

Fig.8 Outline of test model

図一9 に免震床上に検査機器を設置した際の状況写真を示す。表一1 にダミーウェイト搭載時の上下免震床の振動特性（設計値）を示す。空気ばね単体による固有周期は $T=1.2$ 秒であり、慣性質量の付加により固有周期は $T=1.7$ 秒まで長周期化されている。

4.1.2 加振方法

以下に記述するスイープ加振試験および地震波加振試験を実施する。

- (1) 上下免震床の周波数特性確認（ダミーウェイト搭載）
0.6～2.0Hz の正弦波スイープ加振 [上下1軸加振]
- (2) 上下免震床の効果確認（ダミーウェイト搭載）
JMA Kobe-UD, K-net Ojiya-UD [上下1軸加振]
- (3) 水平方向入力の影響確認（検査機器搭載）
JMA Kobe 原波 [上下1軸加振, 水平+上下3軸加振]

4.1.3 計測方法

検査機器内部（A）、上下免震床上（T）、水平免震床上（B）、振動台（S）の加速度と、上下免震床の鉛直相対変位を計測した。図一8 の試験体概略図に代表的な計測点の位置を示す（計測点 A は省略している）。

4.2 解析モデル

上下免震床の解析モデルは図一5 に示したものをを用いる。モデル全体の摩擦力は、ブレーキ機構とスプライン（水平移動拘束装置）の摺動抵抗力を合計し、剛塑性型の履歴モデルとした。このモデルに対して、振動台実験における振動台上で計測された地震波を入力して得られる応答値と、実験値とを比較し、解析モデルの妥当性を確認する。



図一9 試験体設置状況（検査機器搭載時）
Fig.9 Installation view of test model

表一1 試験体の上下方向振動特性（設計値）

Table 1 Frequency characteristics of test model (design value)

	固有周期 (s)	減衰定数 (%)
空気ばね	1.23	7.8
空気ばね+回転慣性	1.71	12.8

注) 複素モード解析結果

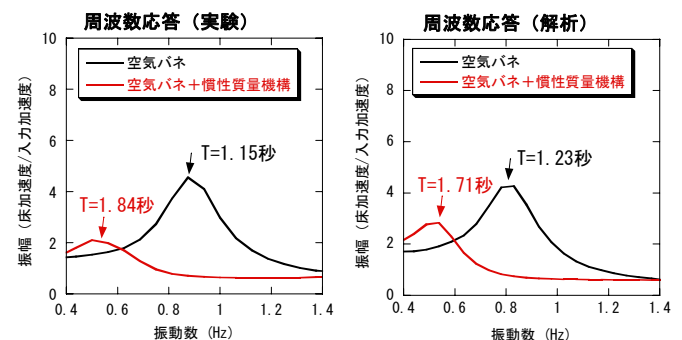
4.3 実験結果

4.3.1 上下免震床の周波数応答特性

図一10 に上下方向スイープ加振による上下免震床の周波数応答曲線（振動台に対する上下免震床の最大加速度の比）を設計値に基づく解析結果と比較して示す。実験は免震床の最大変位が 45mm となるようスイープ加振の入力レベルを調整して加振を行った。実験より得られた空気ばね単体による固有周期は 1.15 秒、慣性質量付加時の固有周期は 1.84 秒であり、固有周期、周波数応答関数とも解析結果と対応していることを確認した。

4.3.2 上下免震床の効果確認

表一2 に、地震波の上下方向加振時における入力加速度と免震床の応答加速度および応答変位それぞれの最大値を解析結果と比較して示す。JMA Kobe-UD 原波加振時の免震床最大加速度は 156.6cm/s^2 と、入力加速度の 305.1cm/s^2 に対してほぼ半減しており、長周期化の効果によって大きな免震効果が現れている。JMA Kobe-UD 原波加振時の免震床最大変位は 36.5mm であり、可動ストローク 80mm に対して十分な余裕があった。また、K-net Ojiya-UD に対する加速度低減率は 0.39 であり、所定の免震効果が得られていた。図一11 に JMA Kobe-UD 加振時における、免震床の加速度、変位波形を解析と比較して示す。解析波は実験波を良くシミュレートしていることが分かる。また、解析と実験の最大応答値も対応しており、解析モデルの適合性が確認された。



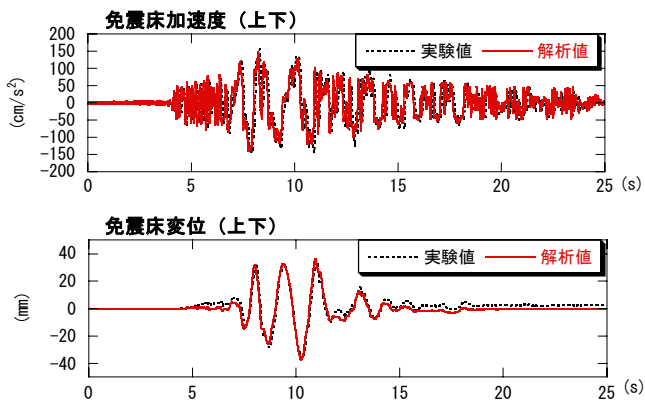
図一10 周波数応答特性の比較
Fig.10 Comparison of frequency response characteristics

表一2 最大応答値の比較（上下方向1軸加振）：ダミーウェイト搭載
Table 2 Comparison of maximum response value (vertical excitation)

		振動台	免震床最大加速度 (cm/s ²)		最大床変位 (mm)	
		最大加速度 (cm/s ²)	実験 T-1(Z)	解析 T-1(Z)	実験 D-C(Z)	解析 D-C(Z)
JMA Kobe-UD	原波	305.1	156.6	148.1	36.5	37.3
K-net Ojiya-UD		478.6	184.5	154.5	15.1	13.0

4.3.3 水平方向入力の影響確認

表一3 に検査機器搭載時における JMA Kobe 水平＋上下 3 軸加振（免震）の結果を，上下 1 軸加振（免震）の結果と比較して示す。また，表中に上下免震装置を固定した際（非免震）の結果も併せて示す。検査機器内部の上下最大加速度は，免震が 164.6 cm/s^2 と非免震の 369.6 cm/s^2 に対して 45%に低減されており，搭載機器に対しても免震効果が確認された。また，3 軸加振時の上下加速度応答は，上下 1 軸加振時に比べて 1 割程度しか大きくなっておらず，水平動を同時入力したことによる上下方向の免震効果への影響は比較的小さいことが確認された。なお，免震床の上下変位は，ロッキング動によって端部(D-1)で中央部(D-C)よりも 1 割程度大きくなっている。



図一11 応答波形の比較 (JMA Kobe-UD) : ダミーウェイト搭載
Fig.11 Comparison of response waveform (JMA Kobe-UD)

表一3 最大応答値 (JMA Kobe 3 軸加振) : 検査機器搭載
Table 3 Maximum response value (JMA Kobe triaxial excitation)

	入力 方向	最大加速度 (Gal)						最大変位 (mm)			
		振動台		検査機器内部				免震床			
		S-C (X)	S-C (Y)	S-C (Z)	A (X)	A (Y)	A (Z)	D-C (X)	D-C (Y)	D-C (Z)	D-1 (Z)
免震	3軸	651.0	716.1	313.3	65.0	111.1	185.4	90.1	127.1	34.7	39.6
	上下	—	—	315.1	—	—	164.6	—	—	33.2	33.3
非免震	上下	—	—	313.3	—	—	369.6	—	—	—	—

5. まとめ

空気ばねと回転慣性機構を利用して周期を最大 1.8 秒まで長周期化することで，従来の上下免震床よりも大幅に免震性能を向上させた高性能上下免震床を開発した。モデル建物に対する地震応答解析を実施し，本システムによる上下免震床の優れた免震効果を示した。また，振動台による性能確認試験を実施し，本システムによる上下免震床が，所定の免震性能を有することを実証するとともに，解析モデルの適合性を確認した。

今回開発した上下免震床の特徴を以下にまとめる。

- ・空気ばねと回転慣性機構により，上下方向の免震周期を最大 1.8 秒まで大幅に長周期化が可能である。
- ・周期 0.5～1.0 秒の周期帯の入力が大きい 1995 兵庫県南部地震 (JMA Kobe-UD) のような直下型地震に対しても，非免震の 45%程度に加速度を低減し，大きな免震効果を発揮する。また，従来タイプ (周期 0.7 秒) の免震床に比べて，応答加速度を最大 50%程度に低減可能である。
- ・ブレーキ機構を設置することで，床の歩行感の確保と，地震時の免震効果の両立を実現した。
- ・既成の水平免震床装置と組み合わせることで，3 次元免震床システムとしても構成が可能である。

謝辞

本システムは，三菱重工業㈱と共同で開発しました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 古橋剛，石丸辰治：慣性接続要素によるモード分離 慣性接続要素による応答制御に関する研究 その 1，日本建築学会構造系論文集 第 576 号，pp.55-62，2004.2