

高性能上下免震床システム（TASS floor-3D）の開発

上下免震床システムのラインアップ拡充

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, pneumatic spring, rotary inertia mass device, shaking table test, business continuity planning
上下免震床, 空気ばね, 回転慣性機構, 振動台実験, 事業継続計画

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 $200\sim250\text{cm/s}^2$ (震度5程度) 以下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採用されているが、従来の上下免震床では、人の歩行振動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0.5~1.0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-1)。

そこで、補助タンク付き空気ばねと回転慣性機構とブレーキ機構によって、人の歩行振動や地震時の変位

量を従来と同程度に抑えながら、周期を最大1.8秒まで長周期化することで免震性能を大幅に向上させた高性能上下免震床システムを開発し、既報¹⁾において本システムの有効性を報告した。

従来の上下免震床に対するコストの上昇を最小限とするため、さらなる検討により、システムの構成を簡素化し、要求性能や予算に応じて選択できるよう、ラインアップを3タイプに拡充した。

本論では、まず、各タイプの構成の特徴と、地震応答解析による免震効果を示し、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構成

2.1 基本構成

本システムを構成する要素は、図-2に示す①補助タンク付き空気ばね、②回転慣性機構、③ブレーキ機構(摩擦ダンパー)に大別される。各要素の機能は、①は空気ばねによる鉛直荷重の支持および補助タンクによる長周期化、②は回転慣性質量効果による長周期化および入力低減効果、③は長周期化に伴う歩行感劣化の改善および地震時のダンパー効果である。

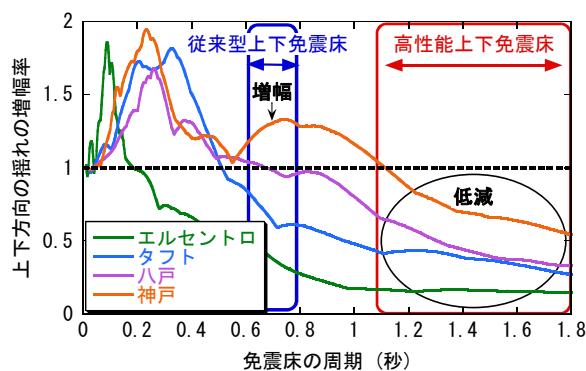


図-1 免震床の周期と増幅率の関係

Fig.1 Relationship between isolation period and amplification

* 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

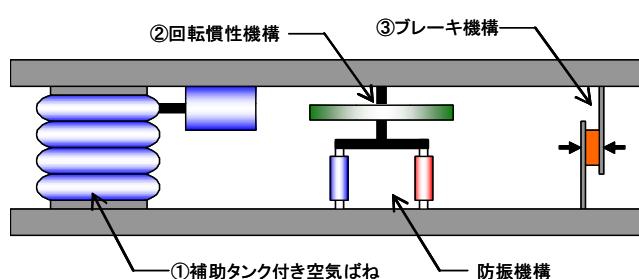


図-2 上下免震床システムの基本構成図

Fig.2 Configuration of vertical isolation floor system

これらの要素と並列にスプライン(水平移動拘束材)を設けている。

2.2 システムの簡素化とラインアップ

構成要素のうち、③のブレーキ機構は回転盤を摩擦材で挟み込むディスクブレーキ型として、その回転盤を②の回転慣性体として利用することにより、②と③を一体化し要素数を減らすことが出来る。

また、本システムでは、空気ばねと回転慣性機構を併用することで、周期を最大 1.8 秒程度まで長周期化しているが、補助タンク付き空気ばね単体でも 1.2 秒程度まで長周期化が可能である。要求性能や対象床の振動性状によっては②の回転慣性機構を用いなくても、十分な免震効果が得られる可能性があり、この場合、ブレーキ機構にシンプルな摩擦ダンパーを用いて、コストダウンが可能となる。

以上をふまえて、ラインアップは、表-1 に示す 3 タイプ (S-TYPE, C-TYPE, B-TYPE) とした。

S-TYPE は、空気ばね、回転慣性機構、ブレーキ機構が独立した構成である。免震周期を最大 1.8 秒まで長周期化でき、最も高性能だが、構成要素数が多くコストが若干高い。B-TYPE は空気ばねとブレーキ機構だけの最もシンプルな構成であり、コストは低めだが、長周期化の点で若干劣る。C-TYPE は回転慣性機構とブレーキ機構を一体化して空気ばねと組合せており、前述 2 タイプの中間的な位置づけとなり、性能とコストのバランスが良い。これら 3 タイプから、要求性能や予算に応じて装置の構成の選択が可能となる。なお、各タイプにオプションとしてオイルダンパーを取付けることも可能である。

表-1 タイプ別システム構成
Table 1 Configuration of each system

図-3(a)は S-TYPE で用いる回転慣性機構で、免震床の長周期化と入力低減機能を有する。回転慣性質量が持つ高周波伝達特性の低減を目的に、回転慣性質量ダンパーとばねとオイルダンパーを直列接続している。図-3(b)は S-TYPE, B-TYPE の両方で用いる摩擦ダンパーで、歩行に対する免震床のロック機能と地震時のエネルギー吸収機能を有する。図-3(c)は C-TYPE で用いる回転慣性付ブレーキ機構で、回転慣性質量ダンパーの回転盤を摩擦材で挟み込んだ回転慣性付きのブレーキ機構を、粘弾性ダンパーに直列接続している。歩行に対しては、主に粘弾性ダンパーが作動して歩行振動を低減し、地震に対しては、主に回転慣性質量ダンパーと摩擦ダンパーが作動して免震床の長周期化と応答低減効果が得られるように、ダンパー各部のパラメータを調整している。なお、粘弾性ダンパーは回転慣性質量が持つ高周波伝達特性を改善する機能も有している。

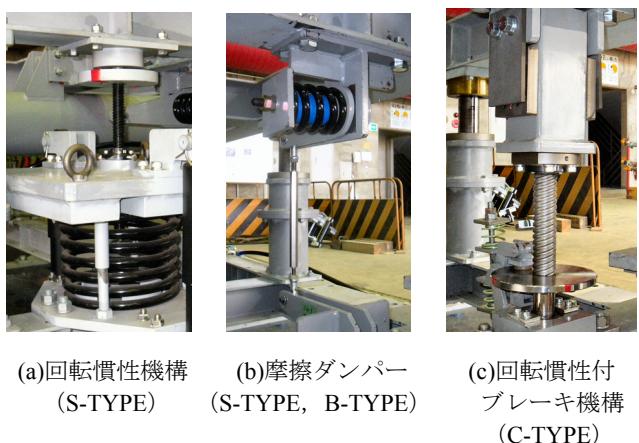


図-3 ダンパーの外観写真
Fig.3 External view of dampers

3. 解析による免震効果の検討

3 タイプの高性能上下免震床システムについて、地震応答解析を行い、免震効果を検討した。比較として空気ばねとオイルダンパーで構成された従来型の上下免震床 ($T=0.7$ 秒, $h=15\%$, 以後 O-TYPE と呼ぶ) の応答結果も併せて示す。

3.1 解析モデルと入力地震動

解析モデルの概念図と諸元を図-4、表-2 に示す。解析モデルの諸元は、後述する性能確認実験の試験体に基づいて設定している。摩擦ダンパーとスプラインの摺動抵抗は、剛塑性型の履歴モデルとし、粘弾性ダンパーは、2 本の Maxwell モデルと 1 本の Voigt モデルを組み合わせた 6 要素モデルとした。なお、6 要素の

TYPE	免震装置組み合わせ					固有周期 (秒)	
	空気ばね	回転慣性 機構	回転慣性 付 ブレーキ 機構	ブレーキ 機構 (摩擦 ダンパー)	オイル ダンパー		
高性能	回転慣性 空気ばね オイル 摩擦 粘弾性	補助タンク付	●	-	●	○ オプション	1.4~1.8 秒
	空気ばね 摩擦 回転慣性	補助タンク付	-	●	-	○ オプション	1.2~1.4 秒
	空気ばね 摩擦	補助タンク付	-	-	●	○ オプション	1.1~1.2 秒
従来	空気ばね オイル	●	-	-	-	●	0.7秒

2.3 各装置の特徴

各タイプの回転慣性機構およびブレーキ機構となる装置の外観写真を図-3 に示す。

パラメータは、非線形最小自乗法を用いて、0.1Hz-20Hz の振動数範囲でメーカーの設計式を近似したものを利用した。図-5に6要素モデルの貯蔵剛性率および損失剛性率の適合度を示す。

地震応答解析における入力地震動は、1995 兵庫県南部地震の JMA Kobe UD および 2004 新潟県中越地震の K-net Ojiya UD の観測波とした。

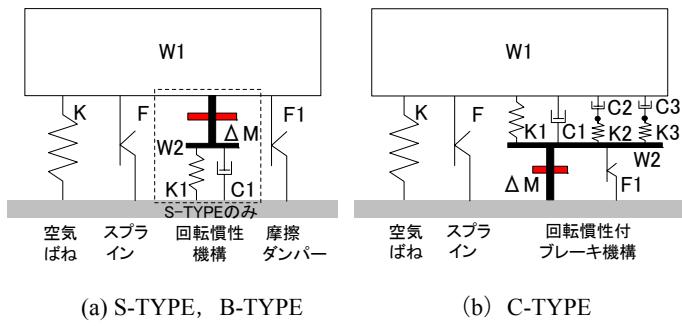
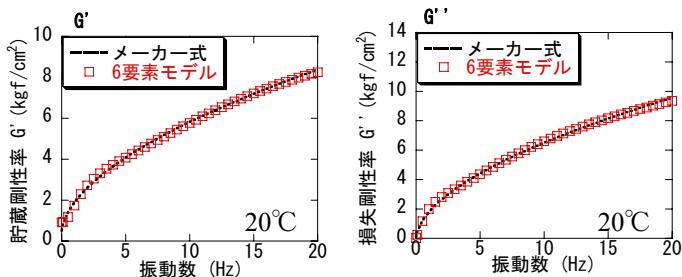


図-4 上下免震床の解析モデル

Fig.4 Analytical model

表-2 解析モデル諸元
Table 2 Analytical model

TYPE	重量(架台+積載) W (kN)	回転慣性重量 ΔM (kN)	固有周期 T (s)	粘性減衰定数
S-TYPE	28.7	22.5	1.71	—
C-TYPE	28.7	4.5	1.34	—
B-TYPE	28.7	—	1.24	—
O-TYPE	28.7	—	0.70	0.15

図-5 6要素モデルの適合度
Fig.5 Goodness of fit of six element model

3.2 タイプ別応答比較

図-6, 7 に各タイプの最大応答加速度、最大応答変位を示す。

比較的長周期成分の卓越する JMA Kobe UD 波に対しては、最大応答加速度、最大応答変位とも S-TYPE の性能が最も良く、次いで C-TYPE, B-TYPE の順となっている。一方、従来型の上下免震床 O-TYPE は応答加速度が増幅しており免震効果が認められない。

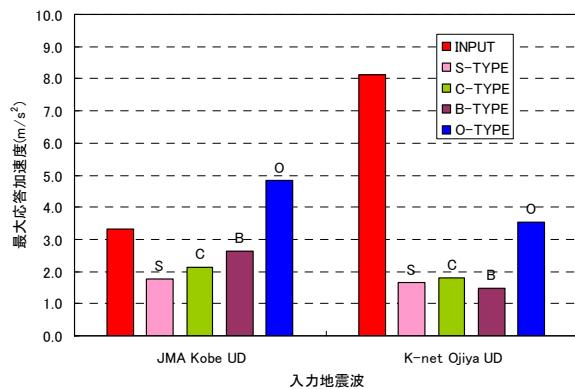
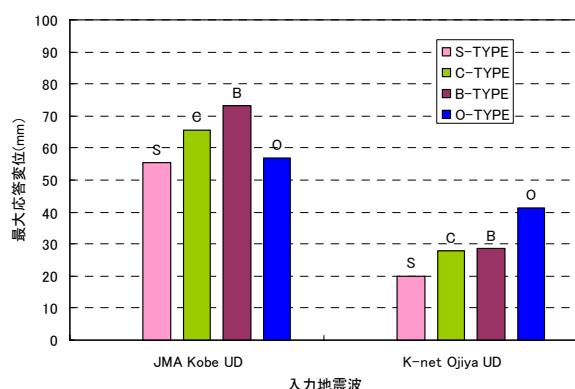
K-net Ojiya UD 波に対しては、最大応答加速度ではタイプによる明瞭な差異は見られないが、いずれも入力加速度に対して 1/4 以下に応答が低減されており、

O-TYPE と比較して性能が良い。最大応答変位は JMA Kobe UD と同様に S-TYPE が最も性能が良く、次いで C-TYPE, B-TYPE の順である。特に S-TYPE では、最大応答加速度、最大応答変位とも O-TYPE に比べて半減している。

3.3 支持荷重の変動に対する検討

将来的に機器配置の変更や機器の更新などで、空気ばね支承が負担する重量が変動することが考えられる。本システムの空気ばね支承は、支持荷重によらず常に床レベルが一定となるように、コンプレッサーとレベリングバルブによって空気ばねの内圧が自動調整される機構を有している。すなわち、荷重と剛性の比がほぼ一定となるよう支持荷重の変化に合わせて空気ばねの鉛直剛性が変化するため、周期の変動がほとんど生じない。

図-8 に支持荷重のみ±25%変化させた場合の応答解析結果を示す。タイプにより多少ばらつきがあるが、大きな変動は無く、また、O-TYPE と比較しても応答値は小さく、本システムにより荷重変動に対して安定した免震効果が得られることを確認した。

図-6 最大応答加速度
Fig. 6 Maximum response acceleration図-7 最大応答変位
Fig.7 Maximum response displacement

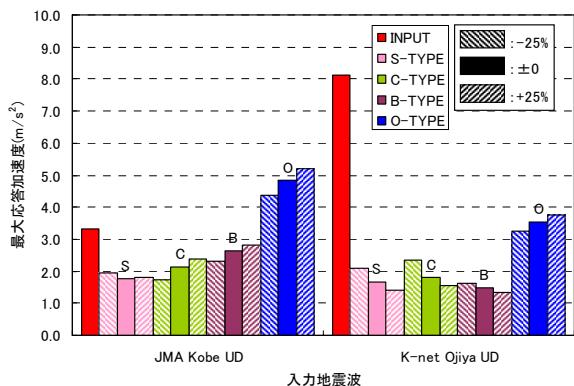


図-8 最大応答加速度（荷重変動考慮）

Fig.8 Maximum response acceleration
(in consideration of shift of load)

4. 振動台による性能確認実験

3 タイプの高性能上下免震床システムの免震性能を確認するため、振動台実験を実施した。

4.1 実験概要

4.1.1 試験体

図-9 に上下免震床試験体の概略図を示す。試験体は既報¹⁾で用いた3次元免震床（床面積約10m²）であり、図-3 の各種ダンパーを設置して、3タイプ（S-TYPE, C-TYPE, B-TYPE）の上下免震床試験体を構成した（各試験体の諸元は解析モデルの表-2を参照）。試験体の固有周期は、補助タンク付空気ばねのみの特性となるB-TYPEがT=1.24秒であるのに対して、回転慣性質量の付加によってC-TYPE, S-TYPEは、それぞれT=1.34秒, T=1.71秒に長周期化されている。

4.1.2 加振方法

加振は、上下1軸の地震波加振とし、加振波は、JMA KobeUD およびK-net OjiyaUD の観測波とした。

4.1.3 計測方法

上下免震床（T），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-9 の試験体概略図に代表的な計測点の位置を示す。

4.2 実験結果

表-3 に、S-TYPE, C-TYPE, B-TYPE の各試験体で得られた免震床の最大加速度および最大変位を3章で実施した解析結果と比較して示す。表中には参考として、O-TYPE (T=0.7秒, h=15%) の解析値も併せて示す。1~1.5Hz の長周期成分が卓越する JMA Kobe UD 加振では、O-TYPE（解析モデル）の応答加速度は入力加速度よりも増幅されるのに対して、S-TYPE, C-TYPE, B-TYPE

（試験体）の応答加速度は、入力加速度よりも低減されており、ほぼ想定通りの免震効果が得られた。また、応答変形もS-TYPE, C-TYPE, B-TYPE の全試験体で、可動ストローク（80mm）以内であった。K-net Ojiya UD 加振についても、S-TYPE, C-TYPE, B-TYPE では、O-TYPE に比べて大きな加速度低減効果が得られた。

また、実験結果と解析結果の最大応答値は概ね良く対応しており、解析モデルの妥当性が確認された。図-10 に JMA Kobe UD 加振時における、C-TYPE 試験体の免震床加速度、変位波形を解析結果と比較して示す。解析波は実験波を良くシミュレートしている。

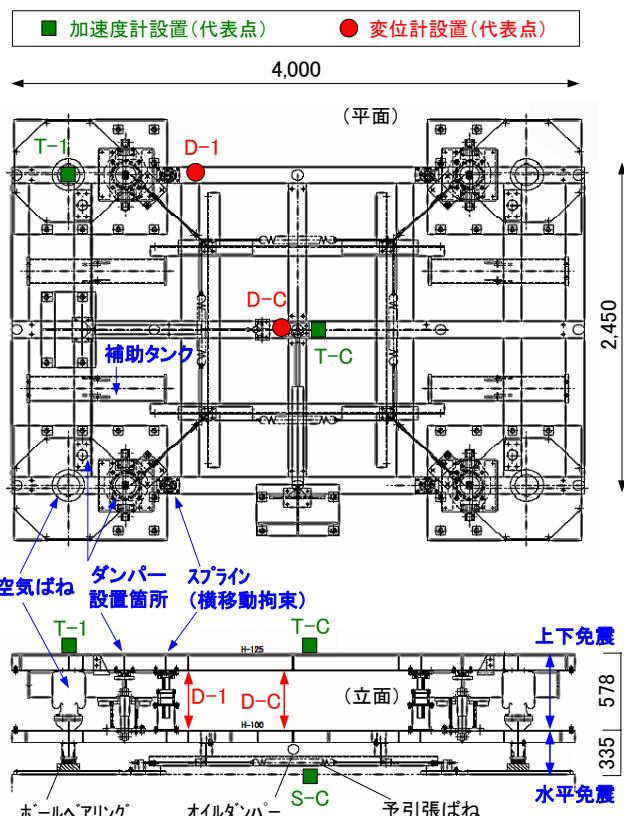


図-9 試験体概略図

Fig.9 Outline of test model

表-3 最大応答値の比較

Table3 Comparison of maximum response

		振動台 最大加速度 (Gal)	床(TC)最大加速度 (Gal)		床(D1)最大変位 (mm)	
JMA Kobe	S-TYPE C-TYPE B-TYPE O-TYPE		実験値	解析値	実験値	解析値
	301 297 299 301	189 207 269 —	141 172 217 449	44 46 67 —	53 47 55 54	
K-net Ojiya	S-TYPE	789	168	145	15	14
	C-TYPE	754	157	151	17	19
	B-TYPE	773	138	122	18	18
	O-TYPE	789	—	305	—	36

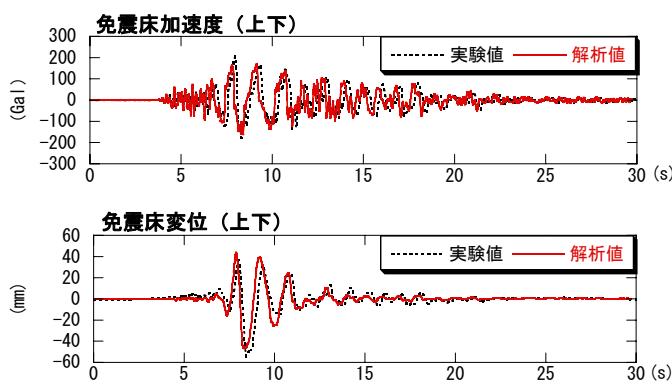


図-10 応答波形の比較 (C-TYPE : JMA Kobe UD)

Fig.10 Comparison of response waveform (C-TYPE, JMA Kobe UD)

5. まとめ

空気ばねと回転慣性質量機構を用いて周期を最大 1.8 秒まで長周期化することで、従来の一般的な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システムを開発した。本システムを構成する装置の組み合わせを工夫し、性能とコストで選択できるようラインアップを 3 タイプに拡充した。本論では、各タイプの特徴を示すと共に、解析と振動台実験により、いずれの構成でも従来の一般的な上下免震床より高い免震性能を有していることを確認した。実施適用の際には、最適なシステムを選択することができ、顧客ニーズに幅広く対応できる上下免震床システムが構築出来た。

今回開発した高性能上下免震床システムの特徴を以下にまとめる。

- ・空気ばねと回転慣性機構を用いて、上下方向の免震周期を最大 1.8 秒まで大幅に長周期化することで、高い免震効果を得ることが可能である。
- ・従来型（周期 0.7 秒）の免震床では加速度が増幅される、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 50%程度に加速度を低減することが可能である。
- ・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できる。
- ・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することができる。
- ・ラインアップは以下の 3 タイプである。

S-TYPE：回転慣性機構とブレーキ機構を独立して設置した高性能タイプ

C-TYPE：回転慣性機構とブレーキ機構を一体化して設置したコストパフォーマンスタイプ

B-TYPE：ブレーキ機構のみを設置した、ローコストタイプ

謝辞

本システムは、三菱重工鉄構エンジニアリング㈱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) 櫛木龍大、長島一郎、新居藍子、勝田庄二、木村雄一、中島徹、山崎英一：高性能上下免震床システムの開発、大成建設技術センター報,第 42 号,pp.30-1 - 30-5, 2009