

藤本 滋  
S.Fujimoto

丹羽 博志  
H.Niwa

相田 安彦  
Y.Aida

原子力発電プラント機器における地震時の耐震性向上および機械振動低減を目ざして免震・制振装置の開発を行ってきた。ここでは、プラント計測制御用の電算機システムへの地震力低減を目的とした免震床および配管やポンプに発生する振動低減を目的とした磁気ばね・ダンパ型制振装置について述べる。免震床については試作した免震床上に実際の電算機システムを設置し、地震波加振試験を実施した。その結果、免震床は地震力を大幅に低減し、電算機システムを大地震から保護できることを確認した。磁気ばね・ダンパ型制振装置については、壁や床からのサポートが不要な動吸振器型で、かつ永久磁石の磁気力を利用し、従来の機械的なばねおよびダンパをなくしたコンパクトな装置を考案した。試作した制振装置を回転機器に適用した振動試験により制振性能を確認した。

We have developed a seismic isolation floor to improve protection against earthquakes for process computer systems, and a magnetic dynamic damper to reduce the mechanical vibrations of piping systems and pumps in nuclear power plants.

Seismic excitation tests of the seismic isolation floor, on which actual process computer systems were installed, were performed using large earthquake simulators. The test results proved that the seismic isolation floor significantly reduced seismic forces.

To control mechanical vibrations, a magnetic dynamic damper was designed using permanent magnets.

This magnetic dynamic damper does not require mechanical springs, dampers and supports on the floors and walls of the building. Vibration tests using a rotating machine model confirmed that the magnetic dynamic damper effectively controlled vibrations in such a rotating machine model.

### 1 まえがき

わが国は世界有数の高地震地帯であるため、原子力発電プラントの耐震設計には一般建築物よりはるかに厳しい条件が課せられている。特に、重要な原子力機器については数千年から数万年に1回程度起こり得る巨大地震を想定し、これに十分耐えるようにすることが要求される。このため、このような機器ではメカニカルスナバやオイルダンパなどの耐震サポートの設置や補強構造などによる剛構造設計が行われる。しかし、耐震設計条件は年々厳しくなる傾向にあり、耐震コストが上昇したり、また機器によっては構造や機能上の制約から十分な対策をとりにくい場合がある。このような問題を解決する方法の一つとして、構造物全体を基礎や床に設置した特殊なばね装置で浮かせ、構造物に伝わる地震力を遮断する免震構造が目ざされている。わが国では一般の中層ビル全体を対象とした免震ビルや銀行の電算機センタの電算機システムを対象とした免震床に実績があり、今年1月の兵庫県南部地震ではこれら免震構造の有効性が確認されている。

この方法を原子力プラントに適用すると地震力を大幅に低減できるので、耐震構造の合理化や地震力を意識しない標準

設計によるコストダウンが期待できる。適用検討対象の一つとしてプラント計測制御用の電算機システムを免震床に設置し、耐震性を向上させることが考えられている。このシステムはプラント状態の記録、表示および異常時の操作ガイダンス表示などの役割を担っている。このシステムは地震で機能を失っても安全上支障はないが、運転員にプラントの運転状態をわかりやすく表示する役割をもっているため、大地震時でも正常に機能が維持されることが望まれる。免震床の原子力プラントへの適用に際しては、一般耐震基準よりはるかに厳しい大地震にも対応できる構造と機能およびそれらの十分な信頼性の確認が必要である。

一方、原子力プラントでは通常運転時にも、ポンプなどの回転機器や配管内部を流れる流体が励振源となることがある。こうした力に対して過大な振動が起らないように、各機器は耐震サポートを兼ねた制振装置を介して壁や床に固定されている。これらは設置のための大きなスペースを必要とするとともに機械的ながたや摩擦構造をもつため、メンテナンスが煩雑になる。このため、制振装置は簡素でコンパクトな構造が望まれている。このような問題への対策の一つとして、制振装置として動吸振器を用いる

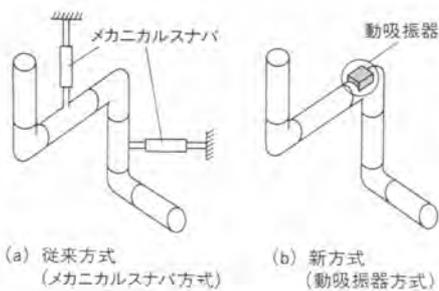


図1. 従来方式と新方式の制振装置の比較(配管系)  
 動吸振器を用いると構造を簡素化できる。  
 Comparison of vibration control equipment for piping systems

と、対象機器と一体化できるので床や壁からのサポートがなくなり、構造を簡素化することができる。従来のサポート構造と動吸振器を配管系に取り付けた場合の概念を図1に示す。高層ビルやタワーなどの耐風・耐震対策には動吸振器が採用されているが、原子力プラント機器への適用には動吸振器の構成要素であるばねやダンパの小型化に課題が残されており、まだ採用されるまでには至っていない。

このような背景のもとで、原子力プラント電算機システムを対象とした免震床およびポンプ・配管の振動低減を目的とした簡素でコンパクトな磁気ばね・ダンパ型制振装置を開発した。これらの構造の特長と機能について概要を紹介する。

## 2 電算機システム用免震床

### 2.1 構造と動作原理

免震床の設置概念を図2に示す。建物床の上にベアリングユニットとスプリングダンパユニットからなる免震装置を多数配置し、その上に電算機を搭載する免震床を載せた二重床構造となっている。図3に示すベアリングユニットは滑らかなベースプレートとボールベアリングから成り、床全体の重量を支えるとともに、地震時には免震床を水平方向に滑らせて地震の揺れを遮断するように働く。図4に示すスプリングダンパユニットにおいては、ストッパを挟む二つのスライダにはコイルばねによりつねに一定の引っ張り力が作用している。したがって、地震の揺れが小さい時には、このばねの

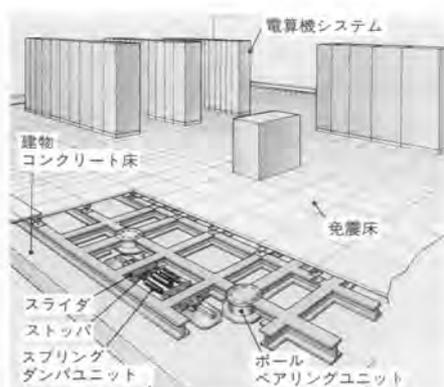


図2. 免震床の設置概念 免震床を電算機室に適用した場合の設置状況。

Structural outline of seismic isolation floor

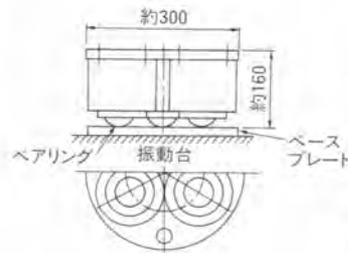


図3. ボールベアリングユニットの構造例 免震床重量を支持し、水平方向にすべらす装置の構造例。  
 Ball bearing unit

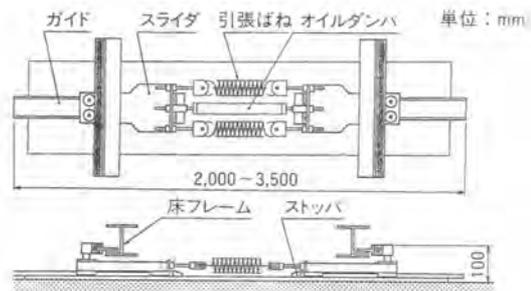


図4. スプリングダンパユニットの構造例 免震床に水平方向の復原力と減衰力を与える装置の構造例。  
 Spring damper unit

引っ張り力で免震床が建物に固定された状態を保つ。大きな揺れが発生した場合には、ばねが引き伸ばされて床をゆっくりとした動きに変えて地震力を和らげる。また、ばねと並列に取り付けられたダンパは免震床の揺れのエネルギーを吸収し、床変位が過大になるのを抑える。このユニットは作動方向と直交方向の床の動きを拘束しない構造となっており、設置されるユニットを半数ずつ互いに直交するよう配置することにより、水平面内の任意方向の免震が可能となる。

以上の構成による免震床は次のような特長をもつ。

- (1) 小さな地震や人の動きでも免震床は動かず、比較的大きな地震のときに作動し、地震後は元の位置に復帰する。
- (2) 簡素かつコンパクトな構造で作動信頼性が高い。

### 2.2 免震性能

2.2.1 免震床の基本免震機能 免震床の基本機能を確認するために、小規模な電算機システムを搭載した小型免震床(広さ: 4 m×4 m)を振動台に設置し、振動試験を実施した。電算機は稼働させておき、地震時にも機能が維持されるかどうか調べた。

振動試験には、過去に発生した大規模地震の観測波および免震床が設置される建物の揺れを模擬した応答波(建物固有振動数 2 Hz, 減衰 5%, および 3 Hz, 5%)を用いた。観測波は EL CENTRO (エルセントロ) NS 波(南北方向の揺れ), TAFT (タフト) NS 波, 十勝沖地震・八戸 NS 波および宮城県沖地震・東北大学 NS 波である。図5に免震床を水平方向に加振した場合の入力加速度, 床中央の加速度, 電算機頂部加速度および床中央部の変位の最大値を示す。最大加速度が約 14 m/s<sup>2</sup>の入力波に対しても免震床上の応答加速

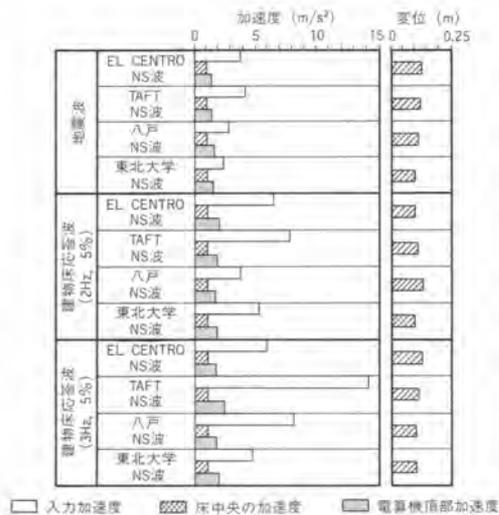


図5. 地震波加振に対する小型免震床の最大応答 地震波に対し、免震床は加速度応答を大幅に低減した。

Maximum responses of small type seismic isolation floor for seismic wave excitations

度は  $1.2 \text{ m/s}^2$  程度に低減されており、十分な免震効果が得られた。また、稼働中の電算機システムにはまったく異常は生じなかった。

**2.2.2 実規模免震床を用いた免震機能の実証** 原子力プラントの電算機システムを免震床と組み合わせて、大地震に対し機能を正常に保持できることを確認する試験が(財)原子力発電技術機構により実施された<sup>11)</sup>。使用された大型免震床(13m×13m)と電算機システムの概要を図6に示す。

試験ではこの免震床上に設置した電算機システムに対し、設計で想定されるもっとも厳しい地震波で水平・上下方向に加振し、免震床の構造健全性、免震機能および電算機システムの機能を実証した。振動台の加振加速度および免震床応答加速度の時刻歴の例を図7に示す。加振加速度が約  $4.7 \text{ m/s}^2$  に対し、床上の最大応答加速度は約  $1.5 \text{ m/s}^2$  に低減された。これは電算機システムの耐震基準である  $2.5 \text{ m/s}^2$  を下

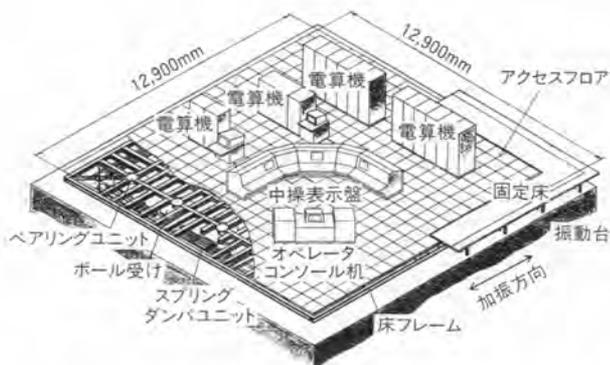


図6. 電算機システムを搭載した大型免震床 振動台上に設置した大型免震床と電算機システムの配置状況。

Large type seismic isolation floor with process computer systems in nuclear power plant

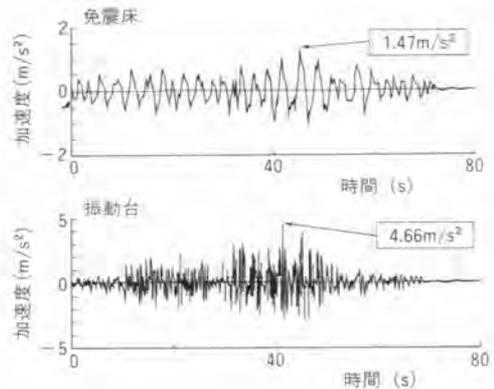


図7. 地震波加振に対する大型免震床の応答加速度 免震床は地震力を大幅に低減し、免震床の免震効果を実証した。

Response acceleration of seismic isolation floor for large seismic wave excitation

回っており、この免震床は十分な免震機能を備えていることが確認された。また、搭載された電算機システムは地震波加振の際にも正常に働き、なんら異常がないことを確認した。

これらの振動試験から、開発した免震床は最大級の地震に対しても十分な免震機能を発揮し、電算機システムを地震から保護できることが実証された。この免震床は地震時の電算機システムの信頼性向上に大きく貢献するものと期待される。

### 3 磁気ばね・ダンパによる動吸振型制振装置

#### 3.1 構造と動作原理

近年、性能向上の著しい永久磁石に着目し、永久磁石と導体板を用いた単純な構成による磁気ばね・ダンパ要素を新たに考案し、これを動吸振器の機械的ばね・ダンパ要素の代わりに用いて、動吸振器の大幅な小型化を達成した。

考案した磁気ばね・ダンパ要素の基本構成を図8に示す。復元力を得るために、内側と外側の磁極が互いに異磁極となる二重円筒磁石を動吸振器の可動質量部と制振対象物とに一定の間隔を保ち異磁極が対向するように配置し、可動磁石の水平移動に伴い、磁束のせん断方向に働く磁気吸引力および磁気反発力をばね要素として利用している。さらに対向磁石間に非接触に導体板を設置し、導体板をよぎる磁束の移動に

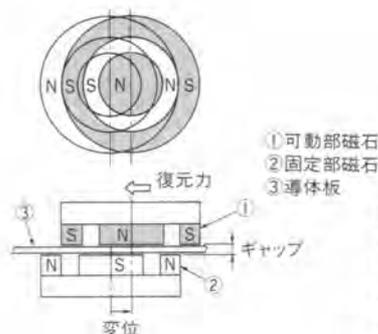


図8. 磁気ばね・ダンパの基本構成 コンパクトな動吸振型磁気ばね・ダンパの基本構造。

Outline of magnetic dynamic damper

伴い渦電流が発生して磁束と作用することにより、運動方向と逆向きに働く抵抗力を減衰要素として利用している。

このように磁石をばねとダンパとして利用し、動吸振器の可動質量と一体化することにより、制振装置の大幅な小型化(従来のコイルばね方式の1/2以下)を達成した。また、機械的な接触部が少ないので、メンテナンスフリーとなる。

### 3.2 制振性能

磁気ばね・ダンパ要素の動特性を調べるため、磁気ばね・ダンパ要素を用いた動吸振器を振動台に搭載し、振動試験を実施した。この結果から以下のことが確認された。①固有振動数は応答変位に依存せず、磁気復元力特性はほぼ線形性をもっている。②動吸振器の固有振動数の調整は磁石間隙(すき)間の調整により可能。③実験で得られた固有振動数は、磁場解析で得られる磁気ばね定数と可動部の質量から計算される固有振動数とよく一致した。④減衰力を得るための導体板の有無は磁気ばね定数に影響を与えない。また、動吸振器の減衰比についても同様に、対向磁石間に設置した導体板の板厚により広い範囲で減衰が調整できることと、振幅依存性の少ない安定した減衰比が得られることを確認した。また、磁束と導体板の相対運動に伴い、誘導される渦電流により導体内に発生するジュール熱を磁気ダンパが運動中になす仕事に換算して求めた理論的な減衰比と実験値とはほぼ一致した。

磁石形状、対向磁石間および導体板厚が磁気復元力、磁気減衰に及ぼす影響が明らかになり、この装置は動吸振器のばね・ダンパ要素として優れた特性をもつことを確認した。

さらに磁気ばね・ダンパを用いた動吸振器を、図9に示す回転機器モデルに適用し、二次元(回転)振動に対する制振効果を調べた。制振対象物は、モータ、減速機および偏心質量をもつ回転円板を内蔵する円筒ケーシングを鋼管により支持した片持ち構造物(総質量:約80kg、高さ:1,300mm、固有振動数:約10Hz)であり、回転体アンバランスにより二次元振動を励起させる構造となっている。動吸振器(可動質量:約4kg)は回転機器モデルの最上部に装着した。動吸振器を装着した場合としない場合のモータ回転数に対するモデル

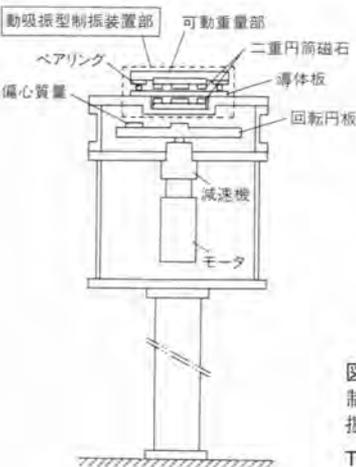


図9. 回転機器への適用例  
制振効果の確認のための回転機器  
振動試験体の構造。  
Test rotating machine model

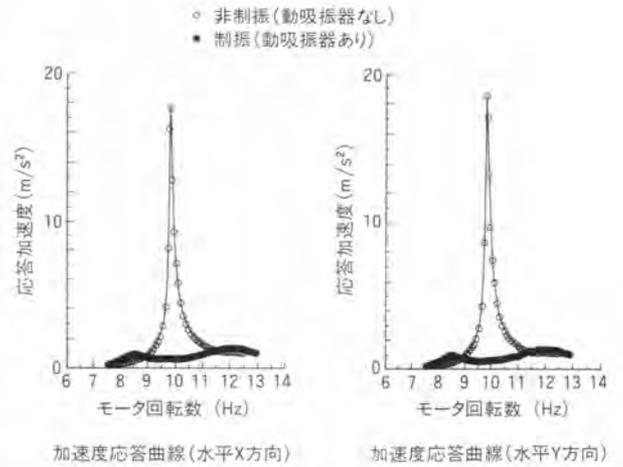


図10. 磁気ばね・ダンパ型動吸振器による制振効果 この動吸振器の適用により回転機器の振動は大幅に低減する。

Vibration reduction effect of magnetic dynamic damper

頂部の水平2方向加速度の応答曲線の比較を図10に示す。

この制振装置を付加することで、回転機器に対し大きな制振効果が水平二次元方向で安定して得られることを確認した。

## 4 あとがき

2章で述べた実規模免震床の振動試験については、通商産業省の指導で(財)原子力発電技術機構が行った成果の一部を引用させていただいたものである。なお、この免震床は新設の一部実機プラントへの適用が決定されている。開発した免震床および制振装置は、原子力機器に限らず一般の産業設備・機器への適用も十分可能で、これらの耐震性の大幅向上および振動防止に大きく貢献するものと思われる。

## 文献

- (1) 原子力発電技術機構編:原子力発電施設信頼性実証試験の現状 平成5年, pp.15-48(1993)



藤本 滋 Shigeru Fujimoto, D.Eng.

1978年入社。原子力機器の耐震・振動に関する研究・開発に従事。現在、原子力技術研究所主幹、工博。  
Nuclear Engineering Lab.



丹羽 博志 Hiroshi Niwa

1975年入社。原子力機器の耐震・振動に関する研究・開発に従事。現在、原子力技術研究所機械技術担当課長。  
Nuclear Engineering Lab.



相田 安彦 Yasuhiko Aida

1980年入社。原子力機器の耐震・振動に関する研究・開発に従事。現在、原子力技術研究所機械技術担当主査。  
Nuclear Engineering Lab.