

環境改善・防災に役立つ免震・制振装置

Earthquake Isolation and Vibration Damping System for Improving the Habitability and Disaster Prevention

石井元悦 尾木靖夫 片山大助
原田秀秋 平井潤



地震や強風に対して、構造物は構造安全性を保証するだけでなく、そこに暮らす人々の居住性の確保、家財の保護及び情報ネットワークの機能維持など“揺れ”に対する環境・防災面での対応が求められてきている。当社は、煙突・長大橋梁等で培った耐震・耐風技術を基に、顧客の多様なニーズにこたえる免震・制振装置を開発してきた。本報では、当社の免震・制振装置に関する幅広いラインアップと、地震対応高減衰TMD (Tuned Mass Damper), 可変ゲイン制御HMD (Hybrid Mass Damper), 摩擦型躯体制振装置等の最近の開発技術について紹介する。

1. はじめに

免震・制振と一言で言っても、その対象となる振動の発生源は、地震、風、交通振動、機械振動等多岐にわたる。また、その振動低減の目標となるクライテリアも、構造強度確保、疲労寿命改善などの構造安全性の確保のみならず居住者の快適性確保、家財の保護、電子機器類の誤作動防止、震災後の設備機能維持など、構造物の用途に応じ様々である。このような顧客の要求に適切に対応するために、当社では図1に示すような免震・制振装置を開発し、数多くの実績を有している⁽¹⁾⁽²⁾。以下では、図1で示す当社の主要商品の適用事例と技術的特徴について紹介する。

2. 床免震装置

床免震装置は、コンピュータのサーバ、半導体製造設備、

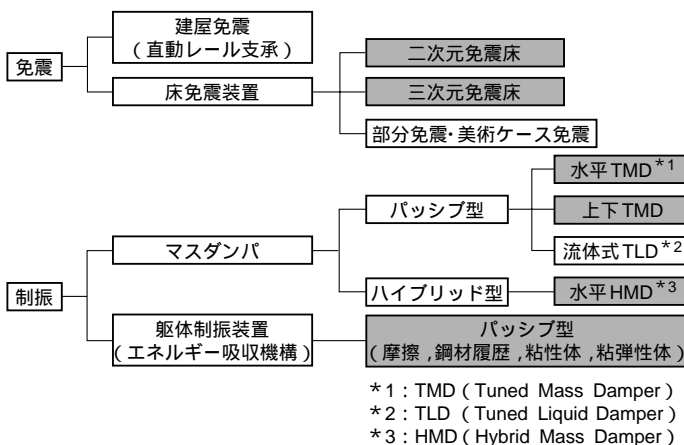
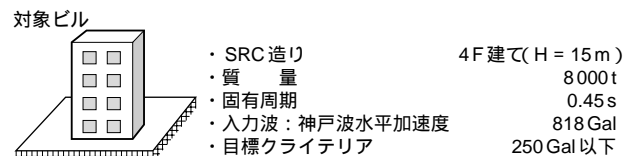


図1 当社の製品ラインアップ 当社で対応可能な装置の分類を示す。

電子機器等振動により誤動作や作動不良が発生するおそれがある設備に対し、地震加速度の入力を1/7~1/10に低減し、震災時の設備の機能維持を目的とするものである。表題写真下側は一般的なサーバ室の概要である。サーバが載るフリーアクセス床と建物床との約30cm~50cmの配線スペースを利用して、オイルダンパ等の免震装置を設置する。図2は、標準的な鉄筋コンクリート4階建の建物に対し、建物免震と床免震との振動低減効果を比較したものである。床免震装置は、床の固有周期を6秒程度に長周期化することで、大幅な加速度低減が可能である。

2.1 二次元床免震装置

阪神大震災以降、新設、リニューアルを問わず床免震を導入するビルが増加してきている。図3に二次元床免震の解析モデルを示す。当社のシステムの特徴は、床荷重支持のためのもがり支承、周期調整及び復元力確保のためのコイルばね、減衰確保のためのオイルダンパと各機能を受け持つデバ



効果比較

	耐震(補強)構造	建物免震	床免震
固有周期(s)	0.48	2	6
2階加速度応答(Gal)	818 (100)	307 (38)	110 (13)
4階加速度応答(Gal)	2697 (100)	331 (12)	216 (8)

図2 免震床の性能解析結果 地震の応答加速度を1/7以下に低減可能。建物免震より低減割合は大きい。

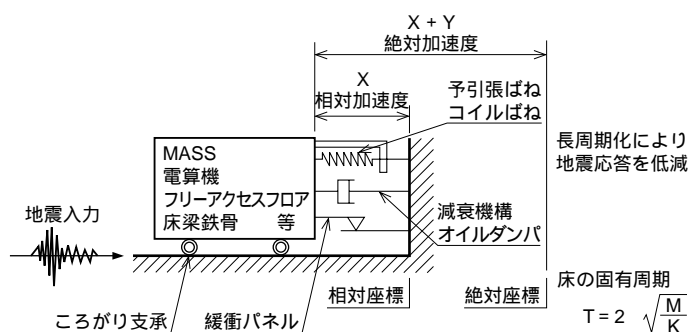


図3 二次元床免震の解析モデル 床質量、ころがり支承、ばね及びダンパの各デバイス毎にモデル化される。

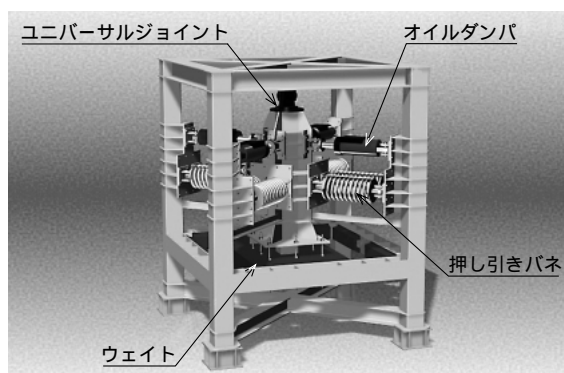


図5 水平TMD 振り子型のTMD。周期調整用のばねと減衰確保のためのオイルダンパを装備する。

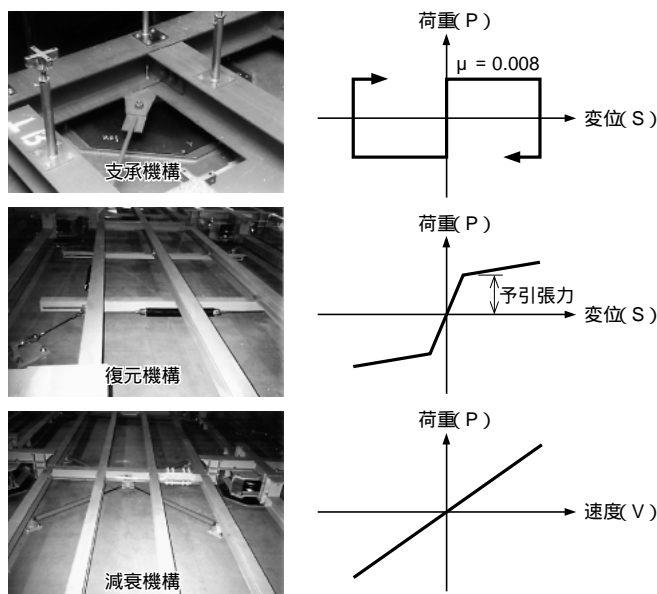


図4 各デバイスとその復元力特性 デバイス毎に最適な復元力特性が設定できる。

イスを別個に設置し、対象地震波や設計条件に応じそれぞれ最適な仕様を設定することができる点である。これらのデバイスは汎用標準品を使用しているため、経済的かつ信頼性の高いシステムとなっている。図4は各デバイスの写真とその復元力特性を示す。当社の床免震の特徴として、摩擦係数の極めて小さいころがり支承と、あらかじめ引張力を導入したばねの組み合わせにより、振動後の原点復帰性能が約±5mm以内と小さく、地震後にジャッキ等で原点に復帰させるという作業が不要である。また、原点復帰性が良いため、現地にて実機の復元力特性を確認し設計値との照合を実施することで、防災システムとしての信頼性を高めている。

2.2 三次元床免震装置

我が国においては、直下型地震を想定した上下振動に対する免震についても注目を浴びている。特に重要度の高いサーバ室については、上下動にも対応できる三次元床免震の導入事例が増加している。当社の装置は、前項で述べた二次元床免震装置に加え、床荷重の支持及び上下動の長周期化デバイスとして空気ばねを装備している。上下方向の減衰機構としてオイルダンパと粘弾性ダンパを併用し歩行感の改善も図っている。各空気ばねには、それぞれレベリングバルブを設置



図6 ハイブリッド型HMD(吊り式) 多段振り子型を示す。多段振り子により装置の高さを低くできる。

し、上載偏荷重によるばねのたわみ変動や、長期的な空気圧低下による床レベルの変動を検知し、コンプレッサで随時加圧を行うことで床レベルを一定に保つことができる。

当社では、これら床免震の外にも少数のサーバ機を部分的に免震する免震ユニットや美術品等を対象としたコンパクトな免震台、立体倉庫のラック免震等、多様なニーズに対応できる製品を有している。

3. マスダンパ

当社の本型式の制振装置の実績は、水平TMDで180基、HMDで60基を数えている。設置目的としては、主に風揺れを低減させることによる居住性の向上、構造疲労強度の改善及び地震の後揺れ低減が挙げられる。このように本型式は、外力のレベルが地震に比べ小さい振動に対して、簡易に設置できる装置として一般的に用いられる。しかしながら、最近では耐震安全性に対する要求が厳しくなってきたことや建物の大スパン化傾向に対応し、地震応答を低減するためにTMDを設置する例も出てきている。

3.1 パッシブ型マスダンパ(TMD)

図5に一般的なTMDの構造を示す。装置は振り子型のおもりと周期調整用のばね、減衰確保のためのオイルダンパより構成されるシンプルなものである。当社のTMDの特徴のひとつとして、現地での周期調整を容易にするために、若干マス比を重くし最適減衰比より減衰比を大きくした過

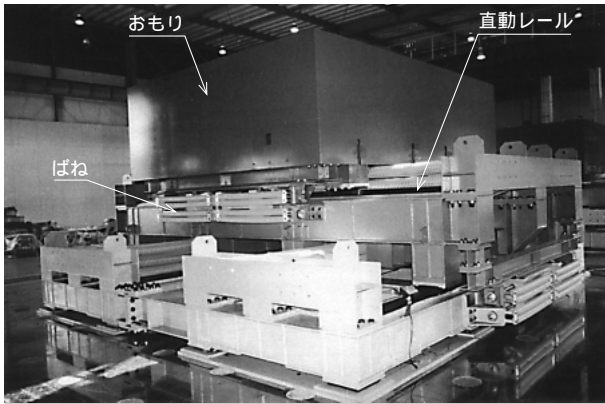


図7 ハイブリッド型HMD（直動レール型） 直動レール型を示す。周期調整用のばねと減衰確保のためのオイルダンパを装備する。

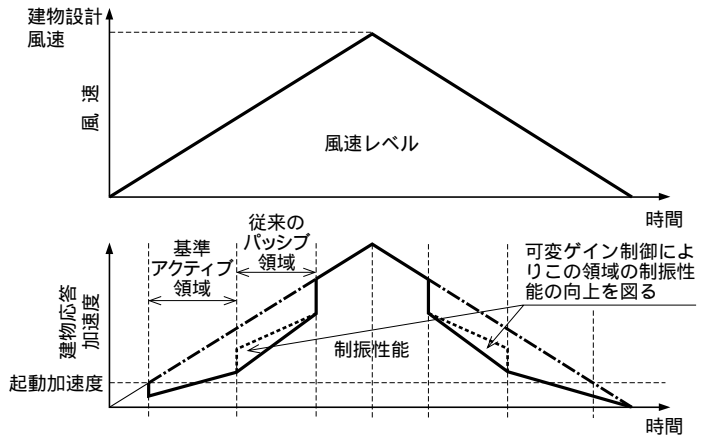


図8 可変ゲイン制御の模式図 アクティブ領域からパッシブ領域に切り替わる際の性能低下を改善するため、可変ゲイン制御を採用する。

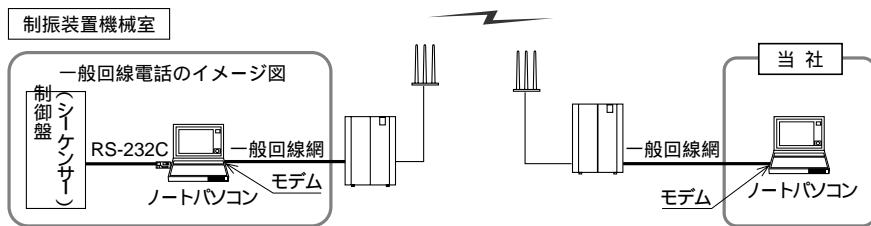


図9 遠隔モニタリングシステムの概要 電話回線を利用した遠隔モニタリングシステムにより装置の常態観測が可能。

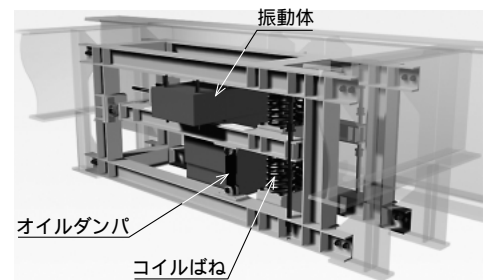


図10 地震用上下TMD てこを利用した上下TMD。高減衰のオイルダンパを装備。

減衰のTMDとしている。これにより対象構造物の固有振動数が多少（±10%）変動しても所定の制振性能が確保できる。

(1) 地震対応TMD

旧耐震設計基準で建設された煙突や鉄塔の中には、新たに要求される耐震基準では耐震強度が不足する例がある。既設の鉄塔に対しては構造補強も容易でないためTMDが有効な場合がある。地震用TMDは一般的に、マス比10%以上、マスに与える減衰量40%程度と風対応TMDに比べ大きなものとなっている。その期待効果は、地震時の層モーメント及び層せん断力を約10～20%低減できる。

3.2 ハイブリッド型マスダンパ（HMD）

本型式HMDは、図6に示す1993年に納入した横浜ランドマークタワー向MHDを足掛かりに着実に納入機を増やしている。最近ではこの多段振り子型に加え、図7に示す直動レール型をメニューに加え、設置条件に応じ最適な型式を提案できるようになった。その外様々な改良を加え性能のブラッシュアップを図っている。

(1) 簡易可変ゲイン制御

一般にHMDは、アクティブ状態からパッシブ状態に切り替わる際に、応答低減効果が低下する。可変ゲイン制御はこれを防ぎ、パッシブ領域でも装置の能力を最大限活用し、制振性能を改善させるものである。図8にその模式図を示す。当社では、運用条件に応じパッシブ領域のゲイン数値（モータ制御力の強さを示す値）を変化させる制御システムを提案している。

(2) 遠隔モニタリングシステム

図9に遠隔モニタリングシステムの概念図を示す。電話回線を利用し装置側のパソコンにアクセスし運転データを当社のパソコン画面でモニタリングできるようにしたものである。装置自体は信頼性の高いシステムであり不具合の発生は極めてまれであるが、万が一のトラブルの場合、迅速・適確な処置を実施するのに有効なシステムである。

3.3 上下振動用制振装置（TMD）

歩道橋やペDESTリアンデッキの歩行振動や交通振動を低減させるために上下動用TMDが設置される。振動振幅を1/2程度に低減することで歩行感を改善している。これらは、手摺の側面や路面の下側に取り付けられる。

(1) 上下地震動用TMD

建物の高層階では地震動も増幅される。また大スパンの床では更に地震応答が大きくなる。この地震応答を低減させるためにTMDが設置される。一般的に有効マス比4%程度、マスに対する減衰量10%以上を確保している。図10に地震用TMDを示す。図11は、TMDの効果シミュレーションの結果である。地震時の床の振動振幅と応答加速度をそれぞれ約1/2に低減できる。

4. 駆体制振装置

建物の層間に制振部材を組み込み、地震時に各層間に発生する相対変形を利用して地震エネルギーを吸収するものである。制振部材の材料としては、低降伏点鋼材、粘性体、粘弾性体など様々なものが提案されているが、当社ではその復元力特性が温度、振幅、速度等の要因に影響されにくい摩擦ダ

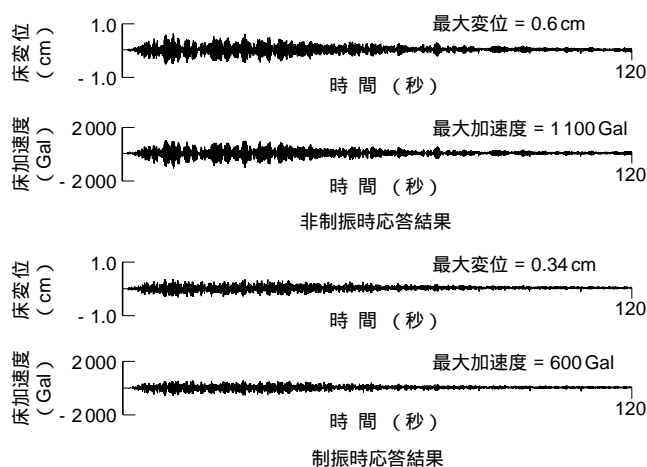
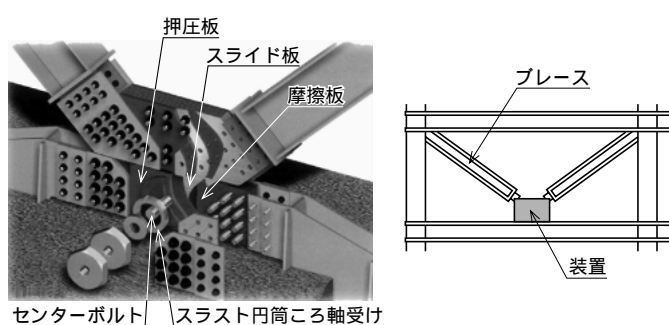


図11 TMDによる鉛直地震応答の効果 加速度応答，変位応答共，TMDにより1/2に低減。



センターボルト スラスト円筒ころ軸受け

図12 摩擦によるエネルギー吸収装置 複数の摺動板を所定トルクで締め付けることで，安定した摩擦抵抗力を確保。

ンパを開発し，当社品川ビルに適用した．図12は実機のイラストである．銅粉と黒鉛を焼結処理した摺動板とステンレス鋼板を交互に重ね，所定トルクで締め付けることで1000 kNの摩擦制動力を確保している．

本装置は動的摺動試験，繰返し摺動試験等を実施し，その信頼性を検証している．図13は復元力特性の実験結果である．工場出荷前に特性確認試験を実施することで，その摩擦力のバラツキは±10%以下を確保している．静摩擦と動摩擦係数に差がなく，安定した復元力が得られ，設計的には信頼性の高いモデル化が可能である．

当社では躯体ダンパとして外にも，鋼材の履歴ダンパ，粘弾性体ダンパ等の実績も有してる．

5.ま と め

近年の環境・防災意識の高まり，都市再生の大型プロジェ

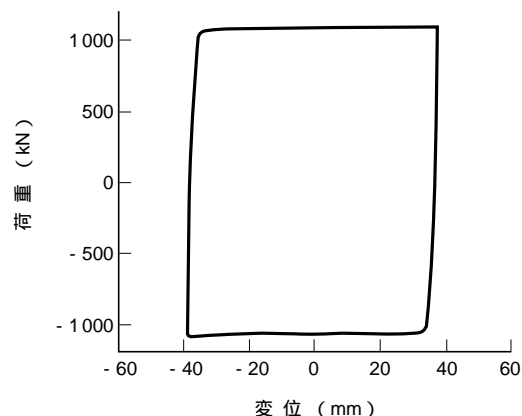


図13 摩擦による復元力特性 温度，振幅，速度等外部要因に影響されない安定した復元力特性が確保できる。

クトの継続，建築分野のみならず土木・プラント分野への耐震性能設計の普及等，本装置の市場は今後共伸長するものと予想される．今後は，土木・プラント分野での屋外使用を想定した耐候性に富んだ装置の開発や建物免震にも適用できる高耐力の三次元免震システム等，新たな市場開拓に向けた技術開発を行っていく所存である．

参考文献

- (1) 阿比留久徳ほか，高層構造物の制振技術，三菱重工技報 Vol.27 No.5 (1990) p.447
- (2) 阿比留久徳ほか，高層ビル用制振装置の開発，三菱重工技報 Vol.32 No.3 (1995) p.195



石井元悦
広島製作所
鉄構技術部主席



尾木靖夫
広島製作所
鉄構技術部



片山大助
広島製作所
鉄構技術部



原田秀秋
技術本部
広島研究所
鉄構・土木研究室主席



平井潤
技術本部
広島研究所
鉄構・土木研究室