

微振動対応免震構造技術の開発



谷地 敏和夫 *1

埜 亨 *1 松本喜代隆 *2
渡壁 守正 *2 稲井 慎介 *2
山本 健史 *2

概 要

生産施設の事業継続計画（BCP）に基づく地震リスク低減対策として、免震構造の採用が多くなってきている。一方、電子デバイスや精密加工工程を持つ生産施設の免震化においては、日常的な微振動制御技術（微振動対策）が重要な課題となる。

免震構造の生産施設への適用拡大を目的として、当社の免震構法である戸田式免震構法（TO-HIS 構法）の改良を行い、微振動対策を考慮した免震構造技術の整備を行った。本報では、微振動対策として、戸田式免震構法に剛すべり支承を組み合わせた TO-HIS II 構法と、戸田式免震構法に用いる弾性すべり支承に制振用オイルダンパーを組み込んだ免震装置の開発について報告する。

Technical Development of Base Isolation System Subjected to Microvibration

Kazuo YACHIUNE*1 Tooru HANAWA*1
Kiyotaka MATSUMOTO*2 Morimasa WATAKABE*2
Shinsuke INAI*2 Takeshi YAMAMOTO*2

Recently base-isolation systems are frequently applied to production facilities, in order to reduce the risk of earthquakes as a part of BCP. And then, regular control of micro vibration is necessary for base-isolated plant produce precision instruments especially.

For increase acceptance of work on production facilities, we improved Toda's own base-isolation system TO-HIS. In this paper, it is reported outline of development of base-isolation system named TO-HIS II which added rigid sliding bearings to TO-HIS, and development of new base-isolation device which combined elastic sliding bearings with oil-dampers

*1 構造設計部 *2 技術研究所

*1 Structural Engineering Dept. *2 Technical Research Institute

微振動対応免震構造技術の開発

谷地 敏和^{*1} 埜 亨^{*1}
 松本 喜代隆^{*2} 渡壁 守正^{*2}
 稲井 慎介^{*2} 山本 健史^{*2}

1. はじめに

近年生産施設の需要が増加しており、BCPに基づく地震リスク低減対策として免震構造の提案を行っている。免震構造を電子デバイスなどの生産施設に適用する場合には、地震時の揺れ低減以外に、常時の微振動についての対策が重要である。免震構造の採用で水平方向の固有周期が長くなると、固有周期近く成分が増幅され、振動許容値を超えることが懸念される。従来の微振動対策は、剛すべり支承の採用による低荷重時での剛性増加や、粘性ダンパーの採用による減衰付加方法が主流である。

本報では、微振動対策として、戸田式免震構法(TO-HIS 構法)に従来とは異なる方法で剛すべり支承を組み合わせた TO-HIS II 構法と、戸田式免震構法に用いる弾性すべり支承に制振用オイルダンパーを組み込んだ免震装置の開発について報告する。

2. 微振動対応免震構造の開発

多くの実績がある TO-HIS 構法を基本とし、初期剛性を増加させる方法(TO-HIS II 構法)と、粘性ダンパーによる減衰を付加する方法(オイルダンパー付き弾性すべり支承)を検討した。

TO-HIS II 構法は、TO-HIS 構法の弾性すべり支承に剛すべり支承を組み合わせた免震構法として検討した。コスト増を最小限に抑えるため、履歴減衰の大きい高摩擦係数の剛すべり支承を用い、地震時の応答値を小さく抑えるよう弾性すべり支承との最適な組合せをシミュレーションにより導き出すようにしている。

オイルダンパー付き弾性すべり支承は、弾性すべり支承の特徴である、支承が滑り始めるまでは積層ゴム部分のみが水平変形することを利用して、この積層ゴム下部と上部躯体の間に、制振用オイルダンパーを組み込んだものである。滑り出しが生じる前の小振幅時にこのダンパーが作動し、減衰効果を発揮するものである。滑り出し後は弾性すべり支承と一体となり摺動するため、大振幅時の特性に影響を与えず、ダンパーストロークや振幅が小さくて済むのが特長である。(図-1) なお、このオイルダンパー付き弾性すべり支承の開発については、西松建設、昭和電線デバイステクノロジー並びにカヤバシステムマシナリーの協力を得て、4社共同で開発したものである。

3. TO-HIS II 構法の開発

3.1 剛すべり支承の特徴

剛すべり支承は、装置の滑り材とフランジを接続す

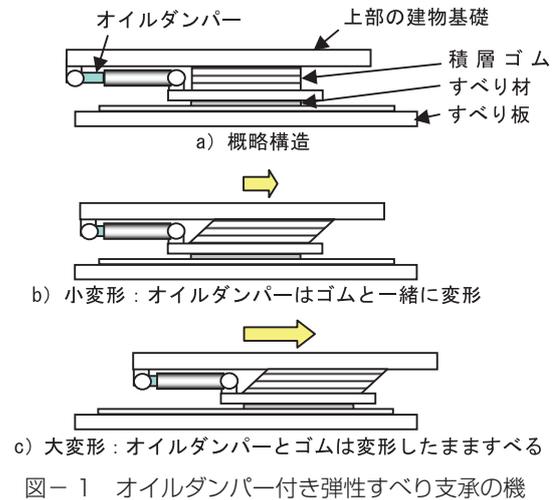


図-1 オイルダンパー付き弾性すべり支承の機構

る積層ゴムを最小限に薄くし、水平剛性を高めた装置である。長所は耐震構造のように高い水平剛性を確保できるため、微振動対策は勿論、耐風性能など居住性能も向上できる点である。一方短所は、一般の免震構造と比べて等価周期が短くなり、地震時入力、応答値が大きくなる点が挙げられる。装置単体の性能としては、水平剛性にばらつきが大きいことが設計上の課題となる。

3.2 実物件への適用と効果の確認

TO-HIS II 構法を、医療機器の生産施設である会津オリパス A 棟新築工事に適用した。当該施設には、微細な部品を計測する嫌振機器などがあり、一方当該敷地は幹線国道に隣接していることから、交通振動に対する微振動対策が必要であると判断し、採用した。剛すべり支承の特徴で述べたように、初期剛性を増加させるのは容易だが、大地震時の応答値を大きくする恐れがある。そこで、免震層固有周期付近での増幅を小さく抑えた微振動対策と、大地震時の水平方向床応答加速度を $200\text{cm}/\text{sec}^2$ 以下(施主要求性能)とすること、の両者を満足する最適な組み合わせを、シミュレーションを繰り返して決定した。その結果、支承の数 52 基のうち、弾性すべり支承 6 基と剛すべり支承 4 基を配置した。(図-2)

図-3 に竣工前に測定、分析した結果を示す。常時の微振動に対して、特に 1Hz 付近での増幅が無く、TO-HIS II 構法の効果が発揮されていると判断できる。図-4 に再現期間 1 年の風圧力および大地震に対する解析結果を示す。再現期間 1 年の風圧力に対して応答加速度は極めて小さく、また、作業階である 2~4 階

*1 構造設計部 *2 技術研究所

について大地震時の水平方向最大床応答加速度は、目標値である 200cm/sec^2 以下を満足している。

4. オイルダンパー付き弾性すべり支承の開発

4.1 オイルダンパー付き弾性すべり支承の特徴

オイルダンパー付き弾性すべり支承の詳細図を図-5に示す。オイルダンパーは微振動領域でも効果を発揮するよう、取付部の緩みがほとんどない制振用オイルダンパーを用い、設置位置は積層ゴム下と上部躯体の間としている。採用した制振用オイルダンパーは、エア抜きを目的として作動油に一定の圧力を掛けているため、微小振幅から効果を発揮する特長がある。

弾性すべり支承は、面圧に応じた摩擦係数により滑り出しを始めるが、滑り出す変位は積層ゴムの高さに依存して一定となるため、取り付くダンパーのストロークは積層ゴム（高さ20mm）の水平変形分で十分となる。

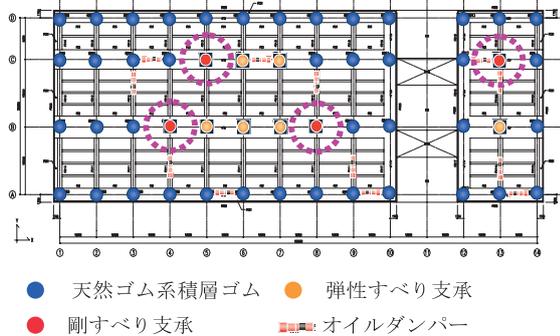


図-2 免震装置配置図

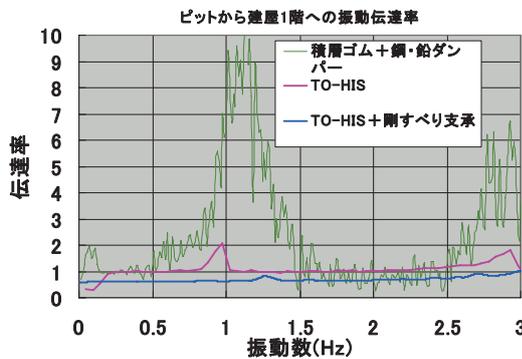


図-3 振動伝達率

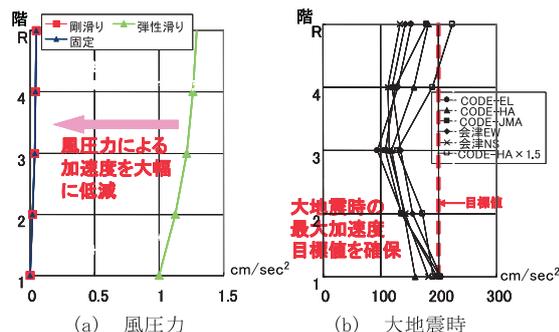


図-4 時刻歴応答解析結果

支承が摺動中はダンパーの減衰力が極めて小さいため、弾性すべり支承の摩擦係数や復元力特性に与える影響がほとんどない。よって、微振動や小振幅のみに効果を発揮し、大地震時には耐震安全性に悪影響を与えないことが特長といえる。

オイルダンパー、弾性すべり支承ともに既存の製品を組み合わせた装置のため、おのおのの特性値を用いて解析的検討が可能である。

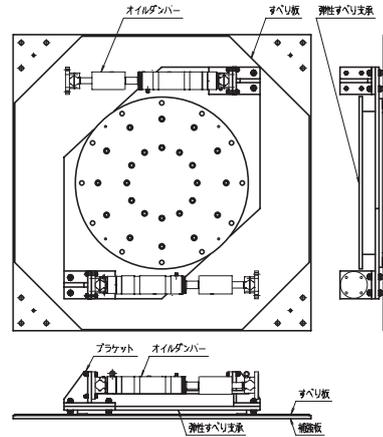


図-5 オイルダンパー付き弾性すべり支承詳細

4.2 オイルダンパー単体性能確認試験

オイルダンパーの定格特性は、速度依存型のバイリニア特性を有している。オイルダンパーの微小領域での特性は、試験装置での計測が困難なため明らかにされていない。既往の研究では、 $250\mu\text{m}$ 程度の振幅から減衰の効果が確認されているが¹⁾、それより小さい振幅の領域については報告されている例は少ない。電子デバイスなどの生産施設での常時の微振動対策を考えた場合、 $250\mu\text{m}$ 以下の範囲においてもオイルダンパーの特性を把握する必要があった。そこで、加振機を用いて微振動レベルの減衰係数を確認するため、図-6に示す当社の保有の小規模免震構造建物（津田沼寮）にオイルダンパーを設置（図-7）し、加振試験を行った。

建物は延べ床面積約 200m^2 、重量は約 400tf の建物で、積層ゴムアイソレータが8基、鋼棒ダンパーが30本設置されている。常時微動測定結果から求めた固有振動数は 1.0Hz である。使用したオイルダンパーの定格特性を図-8に示す。

オイルダンパーは後述する動的縮小試験体の特性値を考慮して、減衰係数等を設定している。

加振機の設置状況を図-9に示す。加振機は、最大振幅 $\pm 500\text{mm}$ 、可動質量 250kg で、最大加振力が約 1640N のものを1台使用した。加振は、 $1\text{Hz} \sim 9\text{Hz}$ までの正弦波加振とし、各振動数で加振力を数段階変化させた。

図-10に 1Hz と 2.5Hz 加振時の減衰力-変位関係を示す。加振力は、その振動数での最大加振力とその半分程度の加振力の結果を示した。 1Hz 加振、 2.5Hz 加振とも $10\mu\text{m}$ 程度の微振動領域でも安定したループを描いており、オイルダンパーの減衰性能が認められる。

図-11にオイルダンパーの減衰力履歴から求めた等価粘性減衰係数とオイルダンパーの速度振幅の関係を示す。図中の計測値は、加振振動数(1.0~9.0Hz)を区別せずに示した。0.25mm/sから1.2mm/sの速度振幅の時に、等価粘性減衰係数は2.0kN・s/mm程度で、オイルダンパー減衰係数定格値の約1/4であった。0.25mm/sより小さい速度振幅の領域では、速度振幅が小さいほど等価粘性減衰係数が大きくなるが、これはオイルダンパー内部の摩擦力の影響によるものと考えられる。また、計測値の減衰係数は0.2mm/sから1.2mm/sで変化が小さく、この領域での等価粘性減衰係数の振動数依存性はわずかであった。

4.3 縮小試験体による性能確認試験

オイルダンパー付き弾性すべり支承を実用化するためには、建築材料としての性能評価と、国土交通大臣の認定が必要であり、そのための動的試験および静的試験を行った。動的試験は、弾性すべり支承の縮小試験体(ゴム径300φ)を用いて実施した。

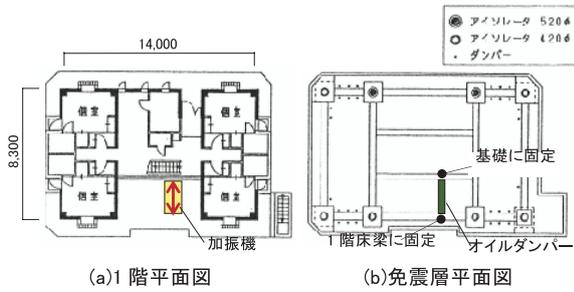


図-6 建物平面図



図-7 オイルダンパー設置状況

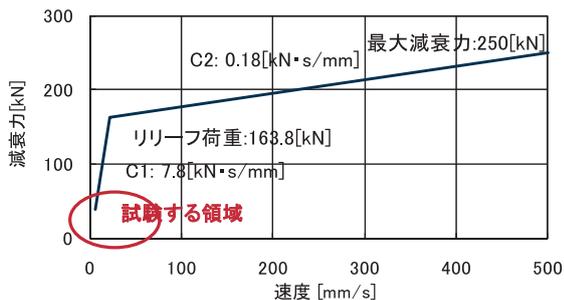


図-8 オイルダンパー性能

試験状況を図-12に、動的基本性能加振条件を表-1、動的繰り返し試験加振条件を表-2に示す。

動的基本性能試験で得られた履歴曲線3サイクル目の水平変位と荷重の関係を図-13に示す。振幅±30mmの時、オイルダンパーは常に作動するので履歴曲線面積、等価剛性、減衰定数はいずれもダンパー無しより増加した。振幅±150mmの時、摺動している間はオイルダンパーが作動しないので切片荷重の変化は小さく、オイルダンパーが作動する加振折り返し直後での履歴曲線面積が増加していることがわかる。また、加振振幅±30mmでは速度が大きくなるほど履歴ループ形状も大きく、速度依存性が認められる。これを図-14に示す。一方、加振振幅±150mmでは、速度依存性は小さかった。

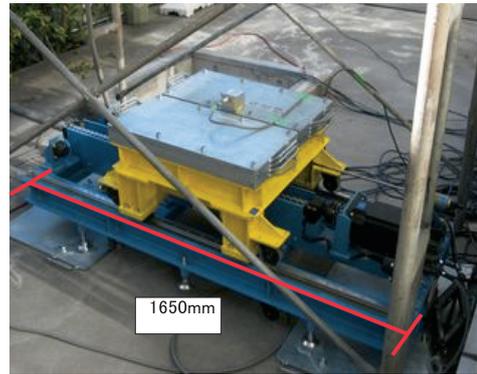


図-9 加振機

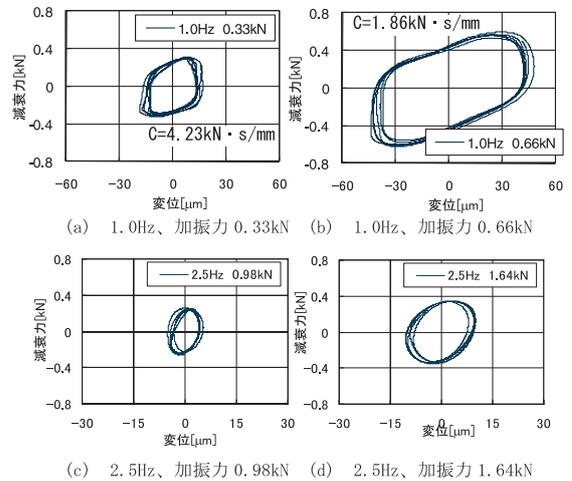


図-10 減衰力-変位関係図

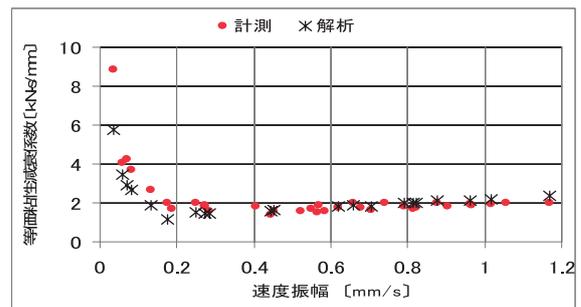


図-11 等価粘性減衰係数

次に、繰り返し加振試験結果を図-15に示す。オイルダンパーがある場合、最大変位後の除荷時に勾配が丸みを帯びた形状になり、すべり板温度上昇は緩やかになる代わりにオイルダンパー表面温度が上昇した。摩擦係数はオイルダンパーの有無にかかわらず40サイクル以降はほとんど変化しなかった。試験後、すべり板中央温度が試験前相当になるまで空冷してから測定した摩擦係数は試験前とほとんど差がなかった。繰り返し加振中の摩擦係数変化は摩擦熱による一時的なものと考えられる。

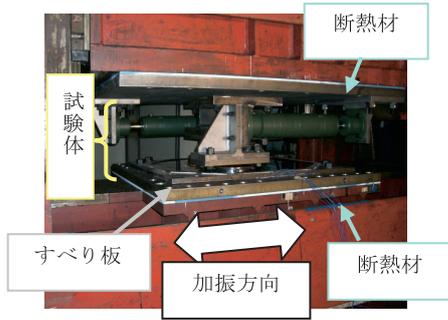


図-12 動的試験状況

表-1 動的基本性能試験加振条件

	振幅 [mm]	面圧 [N/mm ²]	正弦波加振速度 [mm/s]						
			5	10	100	200	300	400	500
摺動前	±30	20	○	○	○	○	○	○	○
摺動後	±150		○	○	○	○	○	○	○

表-2 動的繰り返し試験加振条件

振幅 [mm]	面圧 [N/mm ²]	正弦波加振速度 [mm/s]	加振回数
±150	20	400	合計 175 サイクル※ (摺動距離 = 105m)

※試験機能能力の都合で 20 サイクル毎に 3 分間休止

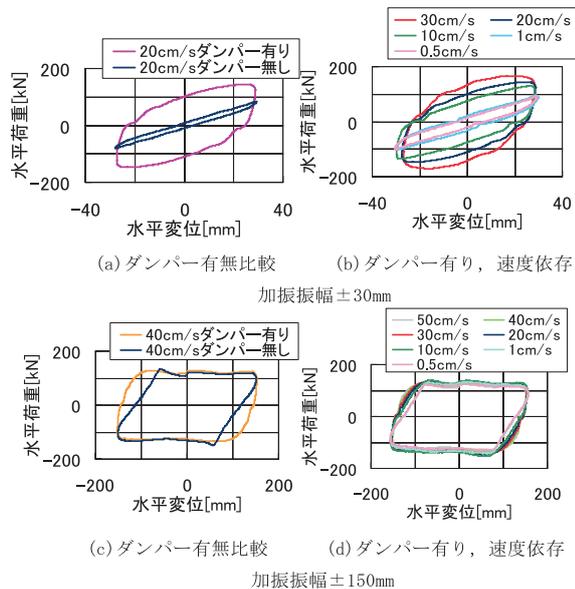


図-13 水平変位と荷重の関係

5. 時刻歴応答解析による効果の確認

5.1 解析モデルと解析ケース

TO-HIS II 構法、およびオイルダンパー付き弾性すべり支承を建物に適用した際の効果について、シミュレーション解析を行った。

解析モデルは、微振動および小地震の外乱に対しては S 造生産施設を想定して、上部構造を 1 質点とした。

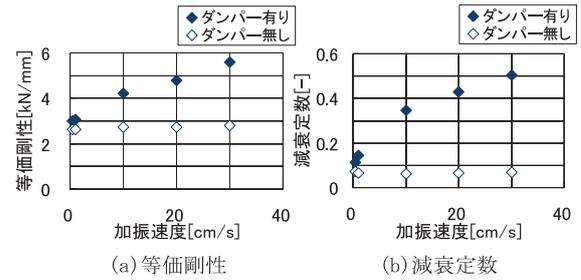


図-14 速度と等価剛性・減衰定数の関係 (振幅±30mm)

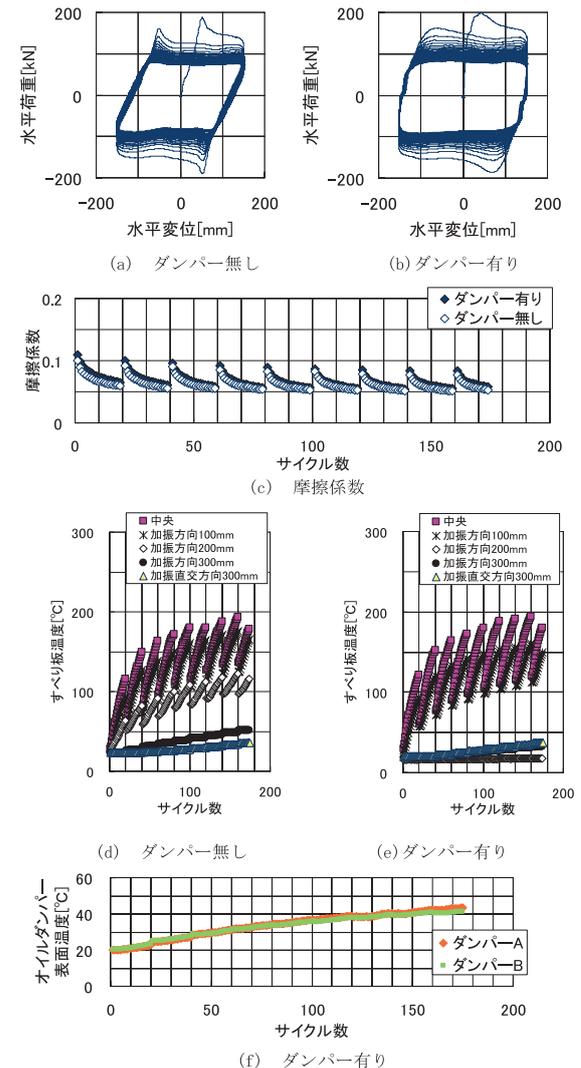


図-15 動的繰り返し加振試験結果

風圧力に対してはRC造超高層住宅（地上高さ91m）を想定し、1層1質点の計27質点とした。上部構造の減衰定数は剛性比例型で、微振動に対しては1%、風圧力と地震力に対しては2%を考慮した。

図-16にオイルダンパー付き弾性すべり支承を用いた場合の免震層解析モデルを示す。免震装置は、天然ゴム系積層ゴム、弾性すべり支承、免震用のオイルダンパーで構成するものとし、弾性すべり支承の一部をオイルダンパー付き弾性支承に置き換えたモデルとして検討した。TO-HIS II構法は弾性すべり支承の一部を剛すべり支承に置き換えてモデル化した。

微振動領域の建物固有周期は、風応答時や地震時（固有周期2.5秒）と比較して短くなることを考慮し、微振動応答解析では、固有周期が約1秒になるように積層ゴムの剛性を調整した。また、オイルダンパーの減衰係数は、前述4.2に示した単体性能試験結果を用いた。地震応答解析および風応答解析では、オイルダンパーの減衰係数、および積層ゴムの剛性は定格値を用いた。解析ケースを表-3にまとめて示す。

5.2 検討に用いた外力

外乱として入力した微振動は、モデルとした生産施設の敷地内で観測されたものを用いた。入力した微振動の時刻歴とフーリエスペクトルを図-17に示す。

地震動の検討に用いた入力波は、免震周期に近いやや長周期の成分が比較的大きい小地震の観測記録を用いた。地震動の時刻歴を図-18に示す。

風力の時刻歴を図-19に示す。風外力は再現期間1年の模擬風力とした。

5.3 解析結果

微振動入力による応答解析結果の伝達関数を図-20に示す。オイルダンパー付き弾性すべり支承では、従来の弾性すべり支承と比較して、卓越周期の1秒で3割程度の応答の低減が得られた。剛すべり支承を用いた場合には、周期1秒では弾性すべりの場合よりも応答が小さいが、剛すべり支承の卓越周期の0.14秒でのピークは、弾性すべり支承での1秒のピークより

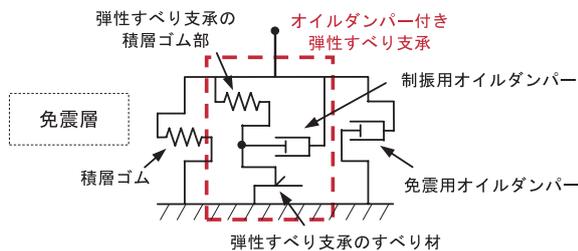


図-16 解析モデル図

表-3 解析ケース

ケース	外乱	免震装置	建物モデル	減衰定数
CASE1-1	微振動	弾性すべり支承 (TO-HIS 構法)	S 造 生産施設	1%
CASE1-2		オイルダンパー付き弾性すべり支承		
CASE1-3		剛すべり支承 (TO-HIS II 構法)		
CASE2-1	小地震	弾性すべり支承 (TO-HIS 構法)		2%
CASE2-2		オイルダンパー付き弾性すべり支承		
CASE2-3		剛すべり支承 (TO-HIS II 構法)		
CASE3-1	風	弾性すべり支承 (TO-HIS 構法)	RC 造	2%
CASE3-2		オイルダンパー付き弾性すべり支承		

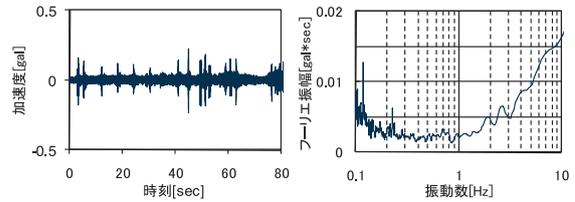
も大きい。

図-21に地震応答解析結果の時刻歴および伝達関数を示す。弾性すべり支承と比較し、オイルダンパー付き弾性すべり支承では加速度応答の低減が明確で、2.5秒付近では5割程度の応答が低減された。剛すべり支承と比較すると、応答振幅は剛すべり支承が最も小さいが、1.5秒以下の短周期帯域では剛すべり支承の応答が大きい。図-22に高層住宅をモデルとして行った風応答解析の結果を示す。風応答では、オイルダンパー付き弾性すべり支承を用いた場合、従来の弾性すべり支承と比べて、最上階の加速度で4割程度、変位では3割程度の応答が低減された。

6. 開発のメリット

6.1 TO-HIS 構法の活用による費用低減

今回開発したオイルダンパー付き弾性すべり支承は、当社が開発し適用してきた TO-HIS 構法を基本として、改良を加えたものである。実験から得られたノウハウに加え、市販のオイルダンパーを用いることで費用の増加を最小限に抑えることができた。TO-HIS II 構法



(a) 加速度時刻歴 (b) フーリエスペクトル

図-17 入力微振動 (0.03mm/s レベル)

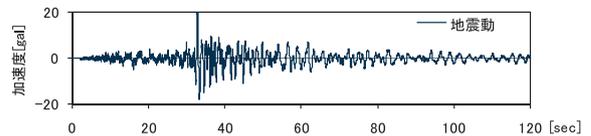


図-18 入力地震動

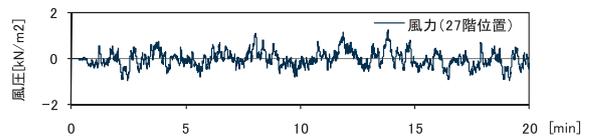


図-19 入力風圧力 (再現期間1年、27階)

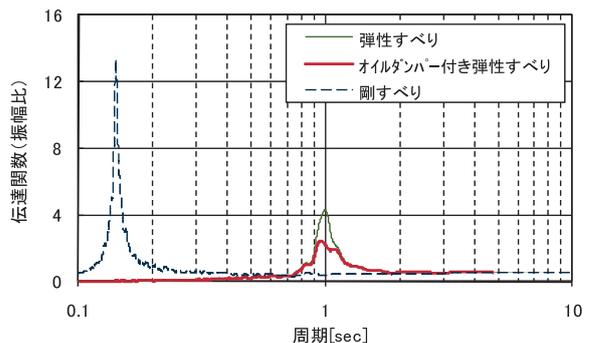


図-20 伝達関数 (微振動応答)

についても、高摩擦係数の剛すべり支承を、弾性すべり支承と組み合わせて用いることで、費用の増加は微増で済んでいる。

6.2 振動低減

オイルダンパー付き弾性すべり支承は、10 μm 程度の微振動領域から減衰効果を発揮するオイルダンパーを、弾性すべり支承の積層ゴム（高さ 20mm）に取り付けることで、小さな振幅で振動低減を可能としている。大地震時には弾性すべり支承の摩擦係数にほとんど影響せず、耐震性能を低下させることがない。むしろ積層ゴム部の変形時にエネルギー吸収をすることから、等価減衰定数を増加させる長所がある。最近話題のキャスター付家具や什器の揺れが大きくなることが懸念されているが、本装置はこの揺れも低減する効果があると予測している。

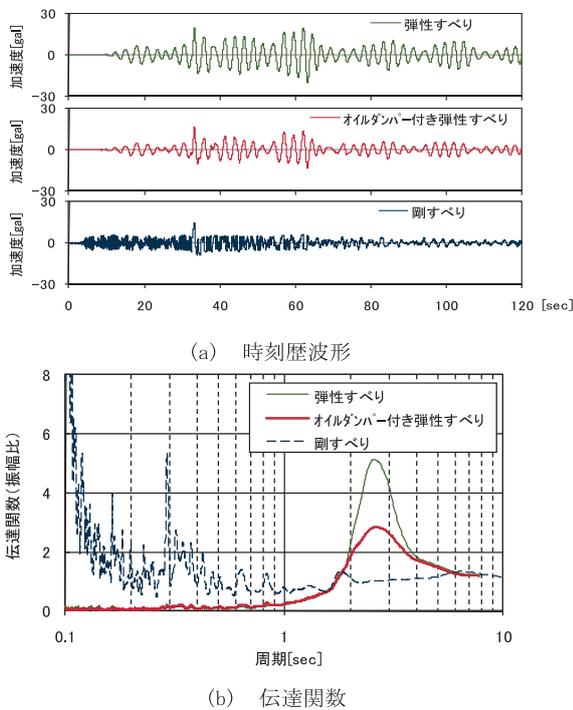


図-21 地震応答解析結果

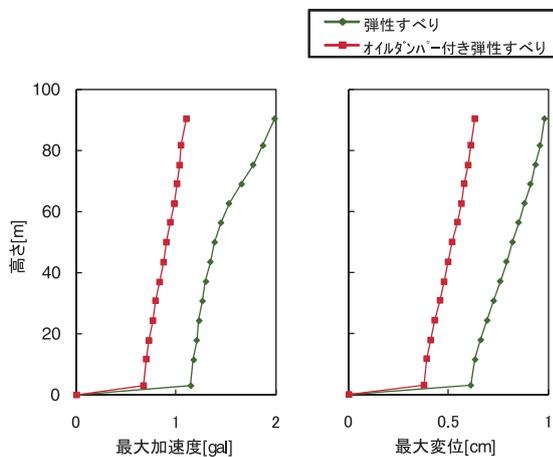


図-22 風応答解析結果

7. まとめ

免震構造を電子デバイスなどの生産施設に適用する際の対応技術として、TO-HIS 構法の改良を行い、微振動対策を使い分けることが可能な2種類のメニューを整備した。一つは、耐震構造とほぼ変わらぬ微振動対策として、TO-HIS 構法に剛すべり支承を組み合わせる TO-HIS II 構法であり、もう一つは、微振動領域を満足しながら、従来の TO-HIS 構法と変わらぬ大地震時の要求性能を満たすオイルダンパー付き弾性すべり支承である。いずれも微振動対策の要求性能、および大地震時の耐震性能に適した使い分けが可能である。

微振動領域以外にも、風揺れや小地震などの小振幅域でも効果を発揮する優れた性能を有している。さらに、長周期地震動による後揺れなどに対しても、振動低減効果を発揮するものと期待できる。

今後はさらに幅広い振動原や振動領域に対してもその効果を検証し、様々なニーズに応えるべく振動対策技術の整備を継続したいと考えている。

謝辞：オイルダンパー単体性能確認試験に用いた加振機は、東京工業大学建築物理センター・笠井研究室の好意で使っていただきました。笠井和彦教授および同研究室の皆様への謝意を記して表します。

参考文献

- 1) 石田豊他「オイルダンパーを用いた超高層 CFT 建物設計 (その2)」日本建築学会大会学術講演梗概集, 2000.9
- 2) 谷地敏他「弾性すべり支承に制振用オイルダンパーを組込んだ免震装置の開発」日本建築学会大会学術講演梗概集, 2009.8

