嫌振機器を有する生産施設

谷地畝　和夫
戸田建設

1　はじめに

本建物は施主グループの核となる生産施設であり、ほぼ同規模の既存棟に増築し、生産エリアを拡張する計画である。快適性・柔軟性・経済性をコンセプトとした建築計画を踏まえて、約13m×15mの柱スパンによる鉄骨造を適用し、更に、BCP（事業継続計画）の観点から免震構造（戸田式免震工法(TO-HIS工法):天然ゴム系積層ゴム､弾性すべり支承､オイルダンパーを用いた、免震性能と経済性に優れた工法）を採用している。生産ラインに嫌振機器があることから、微細な揺れを吸収する特別な免震装置を採用し､微振動に対応した免震構造としている。

2　建物概要

鉄骨造の地上5階建て、延べ床面積約24,000m²で、既存棟も免震建築物のため、耐震構造とする渡り廊下を挟んで各々エキスパンションジョイントで接続している。

微細な振動を嫌う嫌振機器を使用する生産ラインを計画しており、建物内部からの外乱による微振動に対応した床組計画と、外部からの外乱による微振動に対応した免震構造が求められた。

建築主からの構造性能に関する要望は、以下の2点である。

①大地震時（震度6強相当）での居室階最大床応答加速度を、200cm/sec²以下とする。

②工場稼働時の各嫌振機器振動許容値を満足する。

3　構造概要

基準階平面は約100m×55mで、階高は約5.5mとしている。建物剛性を向上させるため、柱にCFT構造を採用している。地上5階建てで地下が無いため、1階床下を免震層とする基礎免震構造とした。免震層の躯体と擁壁とのクリアランスは600mm以上としている。

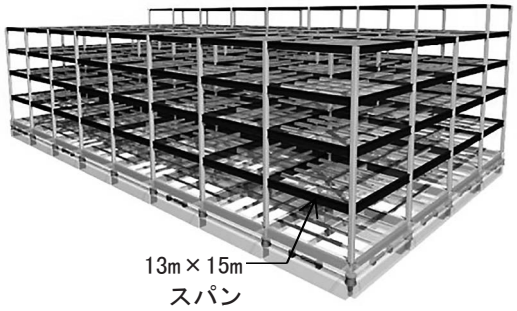


図1　架構モデル図

4　構造計画

4.1　上部構造

構造架構は将来の工程ライン更新にも配慮し、純ラーメン構造を採用している。柱は冷間成形角形鋼管を用い 、1～4階までをCFT柱として建物の剛性を確保した。工期の短縮を目的とし、1階床梁（大梁,小梁共）についてもS造としている。

床組は、振動に対する配慮と、桁行,張間両方向の大梁へ均等に荷重を分配するために、1次,2次小梁を設けた。さらに、1次小梁の向きを統一することで小梁同士の連続性を確保し、床の振動に配慮している。

4.2　基礎構造

基礎は硬質な砂礫層を支持層とする直接基礎とした。掘削土量や仮設費用の低減を目的とした杭頭免震工法は既に周知の技術であるが、今回はその技術を直接基礎に応用した。免震装置の傾斜による性能については、製造者と共同で実施した傾斜試験で許容値を把握した（写真1)。設計では免震装置の回転剛

性や、直接基礎の回転剛性、地盤剛性を詳細に評価することで、免震装置の性能を確保できる許容値以内であることを確認し、建物内部の基礎梁を中止した。

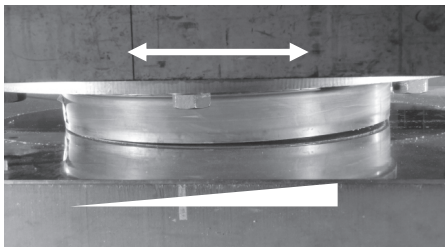


写真1　傾斜試験

4.3　免震構造

免震構造は、大地震時の揺れを低減するため建物の固有周期を3～4秒以上とすることが一般的だが、耐震構造と比較すると、常時の揺れに対しては懸念されることが多い。

既存棟についても、嫌振機器の使用が予定されていたため、微振動対応の免震構造としている。具体的には、初期剛性を高くする「剛すべり支承」をTO-HIS工法に組合せることで、微振動領域について耐震構造と変わらぬ水平剛性を確保した。剛すべり支承は基数が多いと初期剛性が増加し、日常使用時の性能は良くなるが、大地震での応答加速度が大きくなることが欠点として挙げられる。基数の設定は必要剛性と最大応答加速度の両方を満足するよう決定した。竣工後より今日まで、工場は問題無く稼働しており、微振動対策が有効であったと判断できる。

今回の計画では、微振動対策として、新たに大臣認定を取得（平成25年6月）した、「オイルダンパー付き弾性すべり支承（写真2、図2）」を採用した。

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（図3）。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、大振幅時の特性に大きな影響を与えず、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4）。コンパクトな装置とすることで、上下基礎躯体も低減を図ることが可能となっている。免震層の履歴系装置の復元力特性を図5に示す。滑り出し前の振幅で、剛すべり支承よりも等価剛性が小さく（等価周期が長く）、応答加速度の低減効果が高い特長がある。

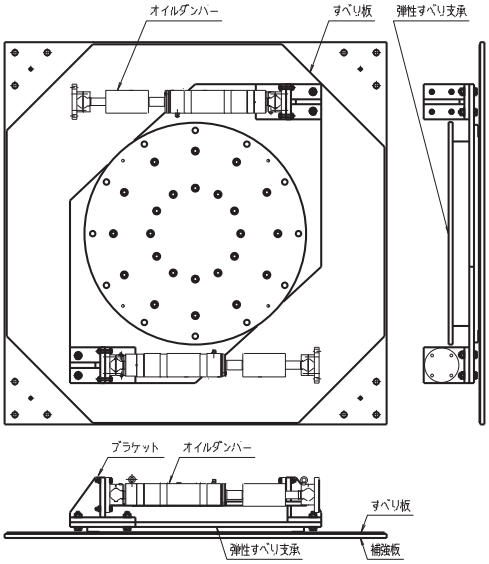


図2　オイルダンパー付き弾性すべり支承

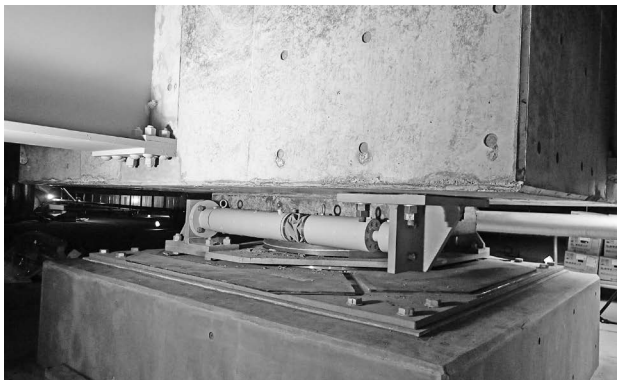
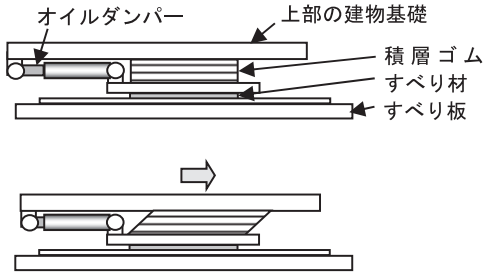


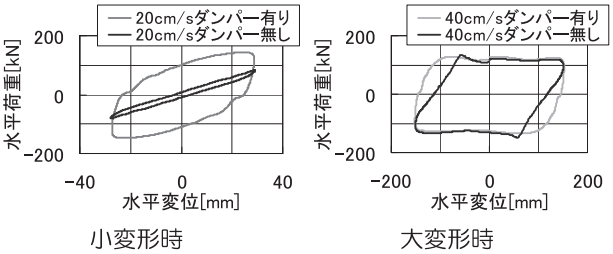
写真2　オイルダンパー付き弾性すべり支承



b）小変形：オイルダンパーはゴムと一緒に変形

c）大変形：オイルダンパーとゴムは変形したまますべる

図3　オイルダンパー付き弾性すべり支承の機構



小変形時　　大変形時

図4　オイルダンパー付き弾性すべり支承の履歴ループ

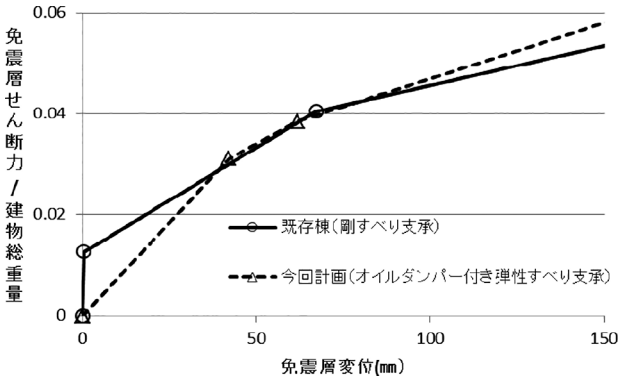


図5　免震層復元力特性

5　構造設計

5.1　時刻歴応答解析結果

オイルダンパー付き弾性すべり支承の解析モデルを図6に示す。レベル2地震時の時刻歴応答解析の結果、最大床応答加速度は1階～4階の居室階において200cm/sec²以下を満足し、高い耐震性能を有している（図7）。

BCP対策として免震構造を採用したが、災害損失の指標であるPML値は3.3%と低く抑えることができている。

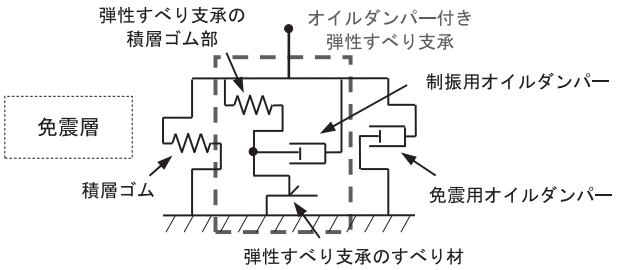


図6　解析モデル図

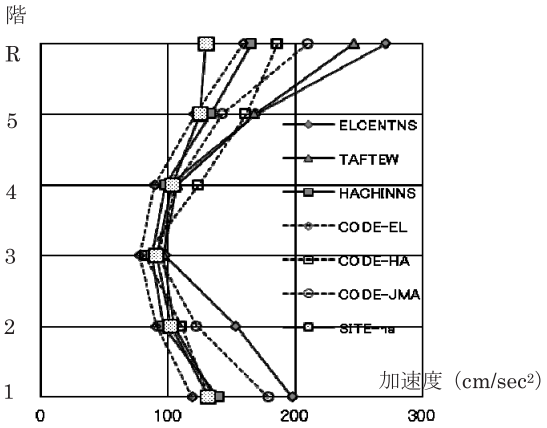


図7　最大応答加速度

5.2　居住性能の確認

建物内部の外乱については、1人歩行を外乱として嫌振機器の許容値について検討を行い、問題ないことを確認した。建物外部の外乱については、敷地の西側で国道に隣接しているため、交通振動を対象とした。図8に振動評価の結果を示す。オイルダンパー付き弾性すべり支承を用いた場合、嫌振機器の許容値である1cm/sec²－1μmを満足することを確認した。なお、従来の免震装置では許容値を満足できていない。微振動入力による応答解析結果の伝達関数を図9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。

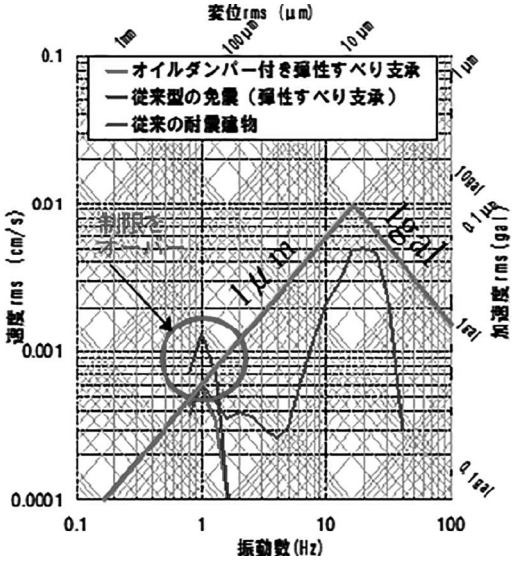


図8　交通振動による振動評価結果

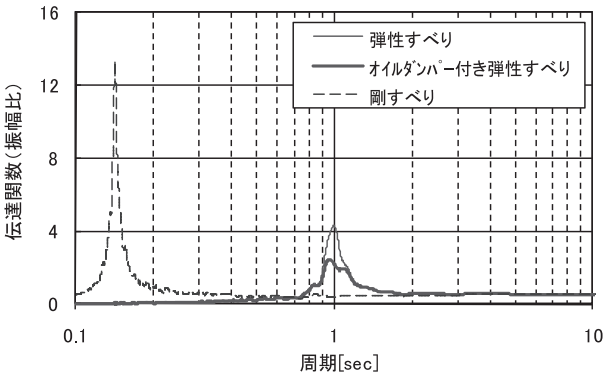


図9　伝達関数（微振動応答）

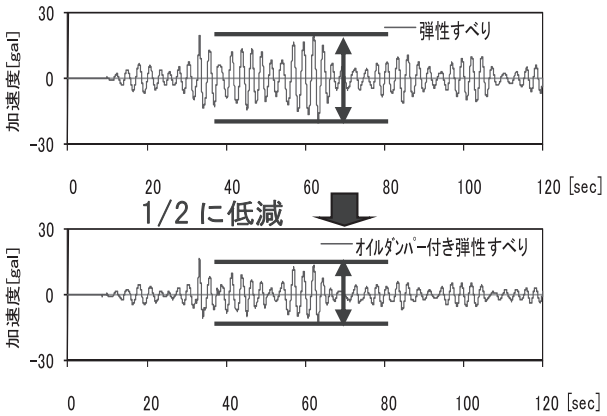


図10　小地震による応答解析結果

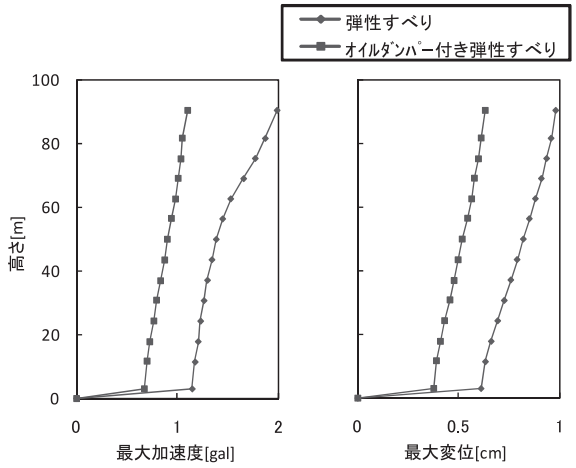


図11　風応答解析結果

オイルダンパー付き弾性すべり支承の効果は、微振動に対する減衰効果のみではない。すべり支承が滑り出す前の揺れに効果を発揮するため、小地震や暴風による揺れの低減効果もある（図10,11）。特に長周期地震の後揺れを低減する効果にも期待ができる。微振動対策を必要とする生産施設のみではなく、居住性能を向上させたい病院や住宅など様々な用途の建物にも効果を発揮する。

6　建物振動測定

6.1　振動測定結果

オイルダンパー付き弾性すべり支承による微振動対策の効果を確認するため、現地にて実測を行った。

測定は、サーボ型加速度計を用い、免震層床,1階床,4階床,5階床上で行った。弾性すべり支承は、上下の基礎躯体を構築する際に既に設置済であるが、オイルダンパーは測定を行うまで設置しなかった。オイルダンパーを設置する前と、設置した後の微動レベルの測定を分析し、オイルダンパーによる減衰の効果を確認した。

設計時、基礎固定時の建物一次固有周期は1.27秒である。伝達関数を図12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5割程度の応答の低減が得られた。

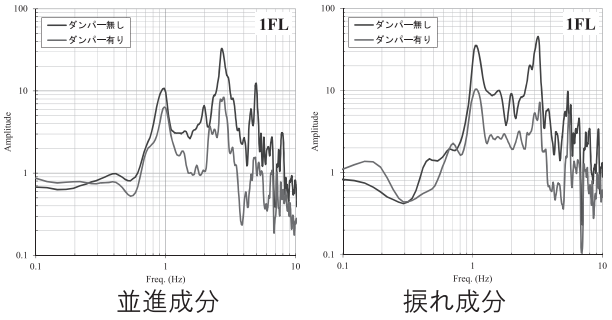


図12　伝達関数（実測結果）

7　おわりに

嫌振機器を有する鉄骨造生産施設に、免震構造を適用した事例を紹介した。一つは、耐震構造とほぼ変わらぬ微振動対策として、TO-HIS工法に剛すべり支承を組合わせる工法であり、もう一つは、微振動領域を満足しながら、従来のTO-HIS工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応した使い分けが可能である。

オイルダンパー付き弾性すべり支承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等に対しても、振動低減効果を発揮するものと期待できる。

微振動に対応した免震装置を使用することで、嫌振機器を有する建物にも免震構造は有用であり、微小振幅から大地震の揺れまで、幅広い領域の振幅に対して十分な効果を発揮する。今後も高性能な免震構造建物の普及に努め、安全・安心な建物を提供していきたい。

なお、オイルダンパー付き弾性すべり支承は、戸田建設,西松建設,昭和電線デバイステクノロジー,カヤバシステムマシナリーの4社による共同開発で大臣認定を取得した免震装置である。