

オールラウンド免震[®]の実建物への適用

－微振動対策ダンパーの性能確認－

Application of All-round Base Isolation System to an Actual Structure

- Confirming the Performance of Viscous Dampers against Micro Vibrations -

舟木秀尊* 山上 聡* 小山慶樹* 山際 創**

要 旨

免震建物は、大地震時の安全性と事業継続性を飛躍的に向上させるが、一方で微小な振動に対して通常の耐震建物よりも揺れ易いという一面を持っている。したがって、「精密工作機械」や「電子顕微鏡」などの超精密機器が設置される免震建物では、交通振動や空調機器等によって建物に発生する微小な振動の影響を受けて生産性や測定精度の低下を招く恐れがある。「オールラウンド免震」は、通常の免震層に微振動対策ダンパーを併用することにより、大地震時の安全性と平常時の微振動抑制機能をあわせ持った高性能な免震システムである。今回、超精密機器を扱う免震建物にオールラウンド免震が採用されたことから、建物の完成に合わせて起振実験と常時微動計測を実施し、微振動対策ダンパーの性能確認を行った。その結果、オールラウンド免震は、微振動対策ダンパーを取り外した通常免震に比べて、建物内の微小な揺れを 1/3～1/4 程度に低減できた。

キーワード：免震建物、精密機器、微振動対策ダンパー、常時微動、起振実験

1. まえがき

東北地方太平洋沖地震や熊本地震において、免震構造の優れた安全性が証明され、その普及に大きな期待が掛けられている。免震建物は、大地震時の安全性と事業継続性を飛躍的に向上させるが、一方で微小な振動に対しては通常の耐震建物よりも揺れ易いという一面を持っている。精密工作機械や電子顕微鏡などの超精密機器が設置される免震建物では、建物に発生する微小な振動の影響を受けて生産性や測定精度の低下を招く恐れがあるとの指摘がある¹⁾³⁾。そこで、筆者らは、免震建物の微振動特性を把握し、その対策方法を確立することを目的とした研究を実施している⁴⁾⁵⁾。「オールラウンド免震」とは、微振動対策ダンパーの採用により、大地震時の安全性と平常時の微振動抑制機能を実現した免震システムの呼称である。本報では、交通振動等を対象とした常時微動計測と、各免震装置の特性を把握するために実施した起振実験を踏まえ、オールラウンド免震の応答低減効果を評価した結果について報告する。

2. 対象建物および免震装置

オールラウンド免震を適用した建物を写真-1に示す。本建物は、宮城県黒川郡大和町に建設され、2019年11

月に竣工した、精密・微細加工を伴う超硬小径エンドミルの開発センターであり、大地震時の安全性と常時の微振動抑制が求められた。建物概要と免震装置を表-1に示す。免震装置には、支承材として天然ゴム系積層ゴム支承と高減衰ゴム系積層ゴム支承および弾性すべり支承を、減衰材としてオイルダンパーと微振動対策ダンパーを使用している。



写真-1 オールラウンド免震を適用した建物

表-1 建物概要と免震装置

項目	諸元
構造	上屋：鉄骨造
	1階梁：鉄骨鉄筋コンクリート造
高さ	地上2階、基礎免震 10.075m
建築面積	1,529.17m ²
延べ床面積	2,859.82m ²
免震装置	支承材 天然ゴム系積層ゴム支承 8基 高減衰ゴム系積層ゴム支承 10基 弾性すべり支承 6基
	減衰材 オイルダンパー 4基 微振動対策ダンパー 2基

*技術研究所建築研究グループ **東日本支社建築設計部

3. 微振動対策ダンパー

3.1 微振動対策ダンパーの概要

微振動対策ダンパーの概要を図-1に示す。本装置は水平方向に自由に動ける構造であり、免震建物に適用実績⁹⁾のある平面型粘性ダンパーを採用している。従来の平面型粘性ダンパーは、地震用に使用するため小振幅時の減衰力は小さく、また、装置の占める面積が大きい。そこで、変位ストロークを±50mmに限定し、制振建物で実績のある多層化⁷⁾を取り入れることで、省スペースで大きな減衰力を発揮する粘性ダンパーを実現した。粘性体には、高粘度の粘性体（SA-P：粘度範囲 7200～9600Pa・S）を使用した。ダンパーの諸元を表-2に示す。対象建物に使用した装置は、材料認定を受けた2タイプのうち、せん断面が14面のWSD-3.2-100である。各部寸法を図-2に示す。微振動時に高い減衰力を発揮させるため、本装置では、せん断ピンと粘性体容器との接合部の隙間が微小となるように高い精度で加工を行っている。また、装置のストロークを小さくするにあたって、変形が大きくなった際の装置を保護する機能としてトリガー機構を併設している。トリガー機構は、せん断ピン、サポート支柱等で構成される。せん断ピンの中央部にはくびれがあり、その径の大きさをトリガー機構の破断荷重が決定される。なお、せん断ピンの破断後の交換は容易である。

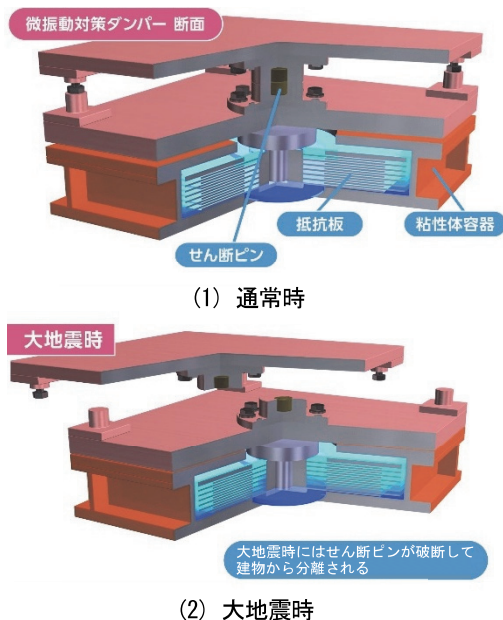


図-1 微振動対策ダンパーの概要

表-2 ダンパーの諸元

製品	せん断面積 S (mm^2)	ストローク L (mm)	層数	全体高さ H (mm)
WSD-1.8-100	1.825×10^6	±50	8	397.2
WSD-3.2-100	3.193×10^6	±50	14	402.0

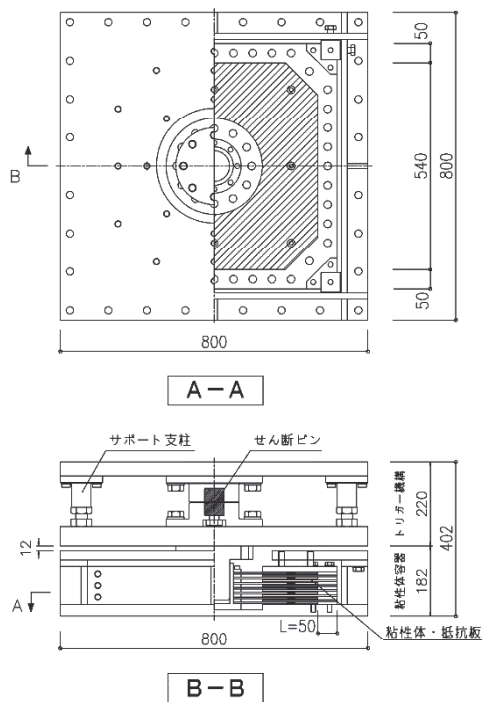


図-2 各部寸法

3.2 基本特性

微振動対策ダンパーの基本特性を確認するため、単体試験を行った。試験は2軸試験機を使用し、振動数0.1Hz～1.0Hz、振幅±1mm～±4mmの正弦波で加振した。試験結果の一例として振動数0.3Hzと0.5Hzの試験で得られたダンパーの水平変位と抵抗力の関係を図-3に示す。ダンパーは、±1mm程度の小さな振幅から確実に抵抗力を発揮しており、粘弾性の性状を示している。なお、他の実験結果から、振動数が同じであれば振幅によらずほぼ同じ勾配の履歴を示す結果が得られている。

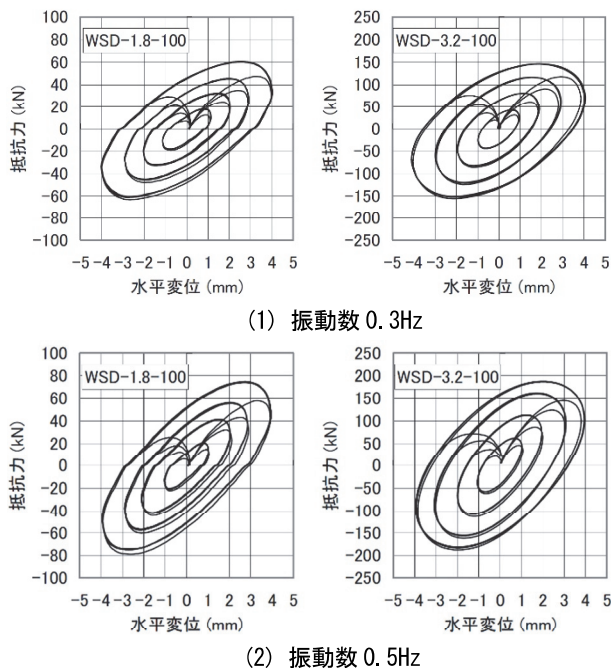


図-3 単体試験結果 (WSD-1.8、WSD-3.2)

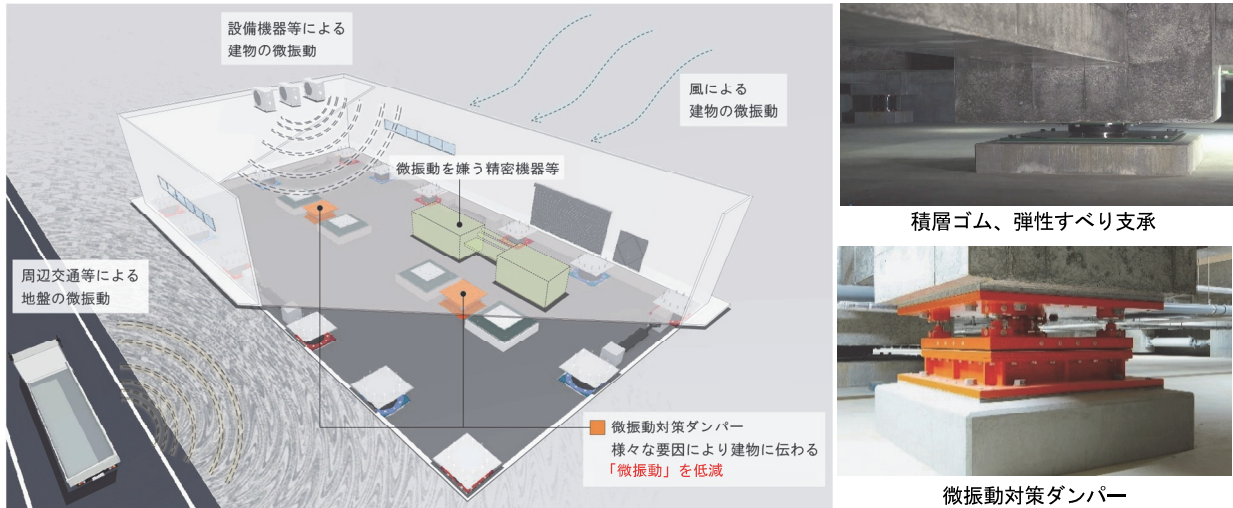


図-4 オールラウンド免震の模式図

4. 常時微動計測

4.1 測定計画

オールラウンド免震の模式図を図-4に、対象建物の免震装置の配置を図-5に示す。本建物では、複数の免震装置と微振動対策ダンパーを組み合わせている。常時微動計測は、交通振動を受ける建物内の振動レベルを確認するため、竣工前の時期に実施した。計測においては、東京測振製のサーボ型速度計を使用し、計測時間を10分間、サンプリング周波数を200Hzとした。測定ケースは、①積層ゴム等の支承材が設置された状態（減衰材なし）、②支承材とオイルダンパーが設置された状態（通常免震）、③支承材とオイルダンパーに加えて微振動対策ダンパーが設置された状態（オールラウンド免震）の3ケースとした。これは、微振動対策ダンパーと免震用オイルダンパーについて、微小振動に対する減衰効果を個別に把握するためである。測定位置は、免震層の床（建物への入力速度）と1階床（建物の応答速度）とした。また、測定方向は、XとYの2方向とした。

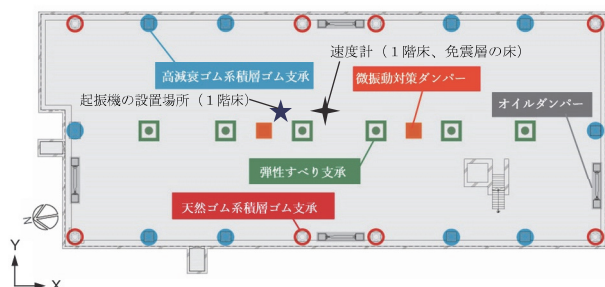


図-5 免震装置の配置

表-3 免震装置の種類と設計値 (200mm変形時)

		基数	等価剛性 (kN/cm)	等価減衰係数 (kN・s/cm)
支承材	天然ゴム系積層ゴム	8	49.2	—
	高減衰ゴム系積層ゴム	10	73.1	19.0
	弾性すべり支承	6	12.6	21.5
減衰材	オイルダンパー	2	—	25.0

4.2 測定結果

免震装置の種類と設計値を表-3に示す。積層ゴムのせん断弾性率は0.392N/mmであり、等価剛性と等価減衰係数は免震層が200mm変形した時の値である。微小振動時は、弾性すべり支承が滑らないことやオイルダンパーのガタ等の影響により、地震時よりも等価剛性は大きく、減衰効果は小さい傾向にある。オイルダンパーは地震時に、微振動対策ダンパーは通常時に有効である。

オールラウンド免震と通常免震の計測結果を設計目標値と比較して図-6に示す。揺れの大きさは、速度計測値をフーリエ変換し、変位に換算した。計画段階において既存建物（耐震構造）で計測した応答レベルを設計目標値（上限値）としており、これを満足する結果となった。免震層の床に対する建物1階床応答のフーリエ・スペクトル比を図-7に示す。卓越振動数に着目すると、支承材のみを設置したケース①が1.07Hz、支承材とオイルダンパーを設置したケース②が1.44Hz、支承材、オイルダンパーと微振動対策ダンパーを設置したケース③が1.74Hzであり、減衰材の付加に伴って卓越振動数は大きくなった。また、振幅比に着目すると、微振動対策ダンパーのない通常免震のケース②に比べて、微振動対策ダンパーを設置したケース③のオールラウンド免震では、応答の大きさが1/3程度に低減された。

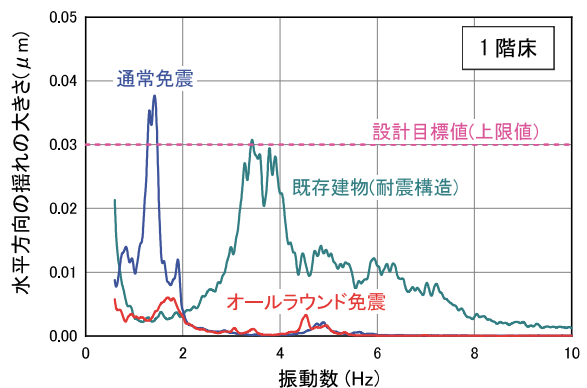
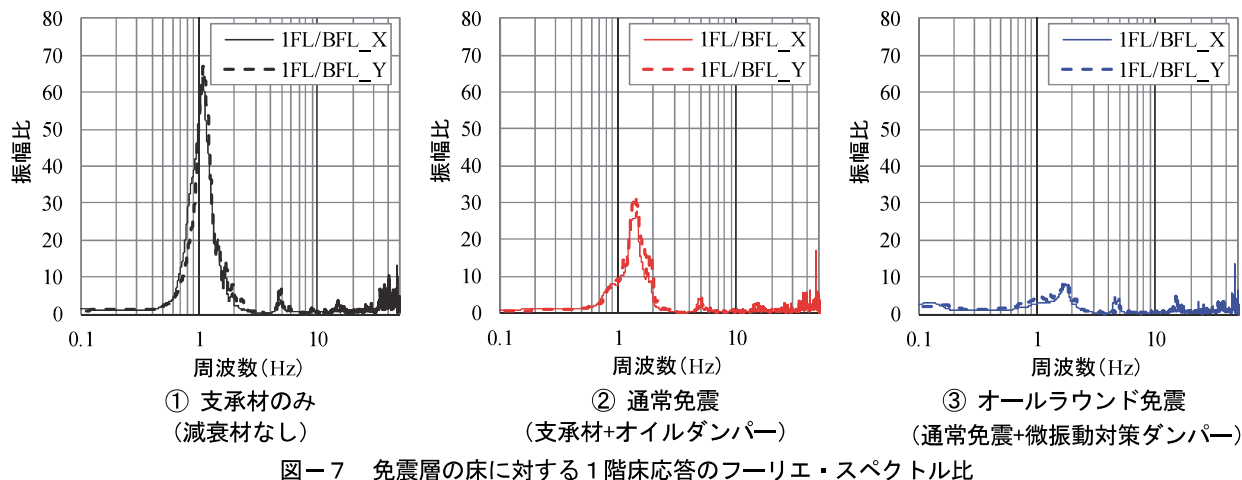


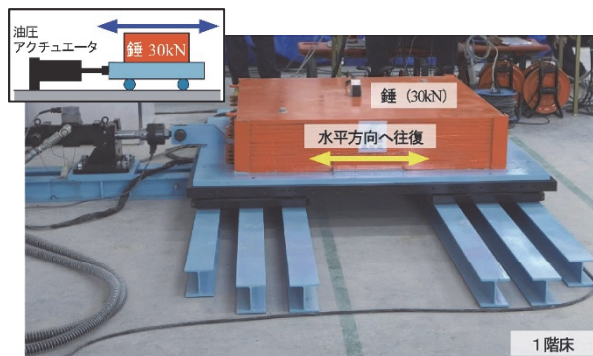
図-6 設計目標値との比較



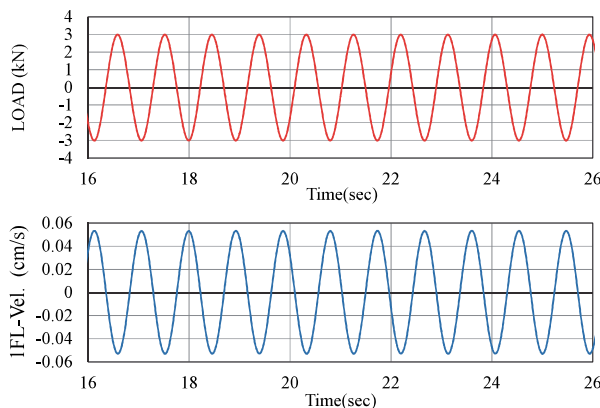
5. 起振実験

5.1 実験の概要

対象建物において起振実験を行い、微振動対策ダンパーの性能を確認した。起振実験の状況を写真-2に示す。実験では、1階に実験装置を設置し、油圧アクチュエータで加振される可動錘(重量 30kN)により建物を水平方向(X方向)に振動させた。実験は、①支承材のみが設置された状態(減衰材なし)、②支承材とオイルダンパーが設置された状態(通常免震)、③支承材と微振動対策ダンパーが設置された状態、④支承材とオイルダンパーに加えて微振動対策ダンパーが設置された状態(オールラウンド免震)の4ケースとした。

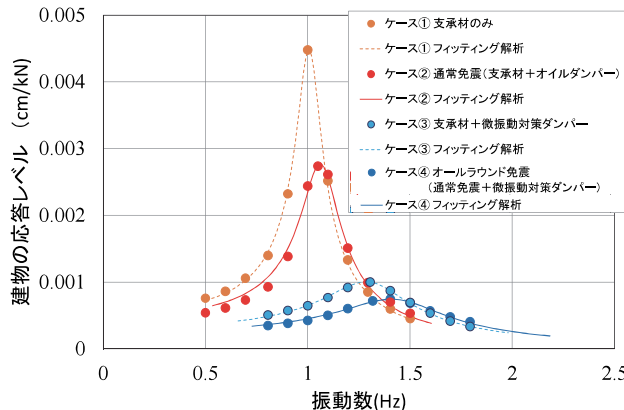


起振実験では、加振機の能力を踏まえて起振力の最大値が3kNとなるように加振時の変位を制御し、正弦波による加振を行った。その際、①～④の各状態における常時微動計測により得られた卓越振動数に対し、±0.5Hzの範囲で加振を行った。計測項目は、起振力(ロードセル荷重)と1階床の応答速度とした。計測時間は、定常応答を82秒、サンプリング周波数は200Hzとした。



5.2 実験結果

起振実験における測定結果の一例を図-8に示す。通常免震の応答レベルが最大となった1.07Hzの正弦波加振における起振力と1階床の応答速度を時刻歴波形で示している。測定結果には、0.2~3.0Hzの範囲でバンドパス・フィルタの処理を行っている。また、微振動対策ダンパーの効果を検討するため、計測データを高速フーリエ変換して、励起する周波数ごとの振幅を抽出した。そして、速度の振幅を固有円振動数 ω で除すことで変位振幅Aに変換し、単位起振力あたりの応答変位の振幅(A/F)を求めた。起振実験の結果から評価した免震装置の組み合わせごとの振動数と応答の関係を図-9に示す。それぞれのケースについて、測定値と併せて後述するフィッティング解析の結果を示している。オイルダンパーが設置された通常免震のケース②では、支承材のみが設置されたケース①の状態に比べて応答は約2/3に低



減されており、オイルダンパーによる減衰効果が確認できる。また、通常免震に微振動対策ダンパーを加えたオールラウンド免震のケース④では、通常免震のケース②よりも固有振動数が僅かに増加しているが、通常免震に比べて応答は約 1/3 に低減されている。

建物内に設置した起振機により、一定の円振動数で振動する起振力が、1 質点にモデル化した建物に与えられた場合、振幅の理論値は式 (1) で表される。

$$\frac{A}{F} = \frac{1}{\sqrt{((2\pi f)^2 - (2\pi x)^2)^2 + 4h^2(2\pi f)^2(2\pi x)^2}} \cdot \frac{g}{W} \quad (1)$$

ここに、 A : 応答変位 (cm)

F : 起振力 (kN)

f : 建物の固有振動数 (Hz)

x : 荷重の振動数 (Hz)

h : 減衰定数

W : 建物重量 (kN)

g : 重力加速度 (= 980.665 (cm/s²))

そこで、式 (1) により、建物重量 (W)、固有振動数 (f)、減衰定数 (h) をパラメータとしたフィッティング解析を行った。解析は、各装置を線形モデルと仮定した場合の推定であり、実験データの誤差やフィッティングの誤差を含んだ簡易的な評価である。反復アルゴリズムには Levenberg-Marquardt 法を採用し、建物重量は各免震装置の組み合わせで共通とした。フィッティング解析の結果を表-4 に示す。起振実験を行った際の建物重量は 44.546 kN と推定され、建物の構造躯体と仕上げが完成している状態での設計重量と概ね一致した。また、起振実験における免震建物の最大振幅は 0.013cm 程度であった。支承材のみのケース①の状態における固有振動数は 1.012 Hz、減衰定数は 0.062、最大振幅は 0.013 cm であった。オイルダンパーが設置された通常免震のケース②においては、固有振動数は 1.070Hz、減衰定数は 0.088、最大振幅は 0.008cm であり、微小振幅の領域でもオイルダンパーの減衰効果が確認された。支承材と微振動対策ダンパーのみが設置されたケース③の状態での固有振動数は 1.323Hz、減衰定数は 0.162、最大振幅は 0.003cm であり、減衰定数と免震層の水平剛性は、通常免震よりも大きい結果となった。通常免震に微振動対策ダンパーを

加えたオールラウンド免震のケース④の状態においては、固有振動数は 1.456 Hz、減衰定数は 0.180、最大振幅は 0.002cm であり、支承材と微振動対策ダンパーを設置したケース③の状態に比べて減衰定数は僅かに大きくなった。これらの結果より、微振動対策ダンパーを適用することで、対象建物の応答振幅は 1/4 程度に低減されており、微振動に対するオールラウンド免震の優れた減衰効果を確認できた。また、設計値と比較するため、フィッティング解析を踏まえて、免震装置を組み合わせた免震層全体の水平剛性 K と減衰係数 C を式 (2) より求めた。

$$K = \omega^2 m \quad (2)$$

$$C = 2h\omega m$$

ここに、 m : 建物質量 (= W/g)

各ケースにおける免震層全体の水平剛性と減衰係数を表-5 に示す。支承材のみのケース①において、免震層全体の水平剛性は、200mm 変形時の各支承材の設計値 (表-3) を足し合わせた全支承材の等価剛性に対し、13.6 倍となった。また、支承材とオイルダンパーを設置した通常免震のケース②では、設計値に対して概ね 15 倍となっており、微振動に対する免震建物の応答を検討する際には、微小振幅に応じた支承材の水平剛性を用いて評価することが必要となった。減衰係数に着目すると、支承材のみの場合と比べて、オイルダンパーを設置することで減衰係数は 1.5 倍に、さらに微振動対策ダンパーを加えることで 4.2 倍となり、オイルダンパーと微振動対策ダンパーの各々の減衰効果を確認した。また、ケース①とケース②の差から求めたオイルダンパーの減衰係数は 18.2kN・s/cm であり、地震時の設計値 (表-3) に比べてやや小さいものの、振幅が 0.003cm 程度においてもオイルダンパーの効果が確認できた。これらの起振実験の結果とフィッティング解析による検討を踏まえて、微振動対策ダンパーの適用を検討する際、振動数と振幅レベルを限定すれば、各免震装置を線形モデルと仮定した評価が可能であると推察される。

6. まとめ

オールラウンド免震を適用した建物を対象として、常時微動計測や起振実験を行い、微振動対策ダンパーの

表-4 フィッティング解析の結果

免震装置の組み合わせ	建物重量	固有振動数	減衰定数	最大応答変位
	W (kN)	f (Hz)	h	A_{max} (cm)
① 支承材のみ (天然ゴム系積層ゴム、高減衰ゴム系積層ゴム、弾性すべり支承)	44.546	1.0124	0.0618	0.013
② 通常免震 (支承材とオイルダンパー)		1.0696	0.0883	0.008
③ 支承材と微振動対策ダンパー		1.3231	0.1616	0.003
④ オールラウンド免震 (支承材とオイルダンパーおよび微振動対策ダンパー)		1.4562	0.1799	0.002

表-5 免震層全体の水平剛性と減衰係数

免震装置の組み合わせ	水平剛性	減衰係数
	K (kN/cm)	C (kN・s/cm)
① 支承材のみ (天然ゴム系積層ゴム、高減衰ゴム系積層ゴム、弾性すべり支承)	$K_r = 1,838.0$	$C_r = 35.7$
② 通常免震 (支承材とオイルダンパー)	$K_{ro} = 2,051.6$	$C_{ro} = 53.9$
③ 支承材と微振動対策ダンパー	$K_m = 3,139.3$	$C_m = 122.1$
④ オールラウンド免震 (支承材とオイルダンパーおよび微振動対策ダンパー)	$K_{all} = 3,802.7$	$C_{all} = 149.5$

無において微動特性を確認した。その結果、以下の知見を得た。

- i. 常時微振動計測では、通常の免震は常時微振動が一部の振動数領域で設計目標値を越えてしまうのに対して、オールラウンド免震は全ての振動数領域で設計目標値を大きく下回ることを確認した
- ii. 建物内部で錘を水平方向に往復させて約3kNの起振力を与える起振実験により、オールラウンド免震の最大変位振幅は、通常の免震構造に比べて1/4程度に低減することを確認した
- iii. オイルダンパーと微振動対策ダンパーの有無をパラメータとした計測により、微振動を十分に低減するためには、微振動対策ダンパーの設置が有効であることを確認した

7. あとがき

本報告では、対象建物が竣工する前の性能確認について述べた。本建物における事業は、精密・微細加工の機器類が配備された後、本格的に稼働する。今後、建物が使用されている状態での常時微動計測を実施し、設計時のシミュレーションとの比較を行う予定である。また、微振動対策ダンパーは、免震建物の風揺れ対策⁸⁾として活用できることから、高層免震等に提案していきたい。

【謝辞】

本研究の遂行にあたり、微振動対策ダンパーの共同開発者であるオイレス工業のご助力を頂いた。また、オールラウンド免震を適用した実建物における測定では、日進工具株式会社様にご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 藤田隆史、「超 LSI 工場の振動問題—微振動防振技術と免震技術—」、日本機械学会誌、第 89 巻、pp. 99-104、1986. 4
- 2) 古橋 剛、光阪勇治、徳武茂隆、松本吾朗、高瀬憲克、有馬文昭、「新幹線に隣接する免震半導体工場の微振動性状 その 1~その 3」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp. 711-718、1998. 9
- 3) 稲井慎介、石田琢志、成田修英、谷地敏和夫、森田泰弘、山本健史、「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微振動測定による性能検証」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp. 581-582、2016. 8
- 4) 山上 聡、安井健治、山田高之、川井伸泰、「免震建物の微振動特性に関する研究」、奥村組技術研究年報、2008. 7
- 5) 宮崎 充、川井伸泰、山田高之、山上 聡、澤田

毅、長島和央、「多層せん断粘性ダンパーの開発と実用化 その 1 ダンパーの機構」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.367-368、2010.9

- 6) 平野 晋、長岡 徹、川口澄夫、大塚 将、「偏心ローラー支承の実建物への適用 その 4 性能確認試験結果」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp. 367-368、1998. 9
- 7) 山本良隆、佐藤新治、池永雅良、斎藤賢治、栗林博之、石川晶一、林 政輝、「コンパクトタイプ粘性ダンパーの高層建物への適用例 その 2 粘性ダンパーの実大性能実験」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp. 995-996、1999. 9
- 8) 山田高之、舟山勇司、川井伸泰、宮崎 充、澤田毅、長島和央、「多層せん断粘性ダンパーの開発と実用化 その 3 超高層免震建物の風揺れ対策」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp. 371-372、2010. 9