

# オールラウンド免震®の実建物への適用（その2）

## －観測記録に基づく微振動対策ダンパーの適用効果－

### Application of All-round Isolation System to an Actual Structure (Part 2)

#### - The Effect of Viscous Dampers based on Observational Records -

小山慶樹\* 山上 聡\* 舟木秀尊\* 安井健治\*

#### 要 旨

一般的な免震装置に微振動対策ダンパーを組み合わせた『オールラウンド免震®』建物において、微振動対策や地震対策効果を確認する目的で、建物竣工前に起振実験、竣工後に常時観測や常時微動計測を行っている。本報では、微振動対策ダンパーが Maxwell モデルによってモデル化が可能で、精度よく起振実験を再現することができ、設計段階から微振動対策ダンパーの適用効果を把握できることを示す。また、常時観測記録からオールラウンド免震が一般的な免震建物に比べて 1.5 倍程度の減衰定数を有し、微振動対策効果があることを示す。最後に、建物稼動中に常時微動計測を行い、微振動に対する設計クライテリアを満たしていることを確認する。

キーワード：免震建物、微振動対策ダンパー、起振実験、常時微動計測

#### 1. まえがき

マグニチュード9級の巨大地震などを経験し、免震建物の安全性や事業継続性の向上が再認識され、重要拠点となる建物の多くに免震構造が採用されるようになった。しかし、免震建物は一般に地盤への逸散減衰が期待できず、免震層の水平剛性が耐震建物に比べて小さいので、交通振動や建物内の機械振動などの微振動に対して揺れやすい。その結果、精密機器を扱う生産施設などでは、測定精度の悪化や製品の不良率増加を招く恐れがある。

そこで、著者らは通常の免震装置に微振動対策ダンパーを組み合わせた「オールラウンド免震」を開発し、実建物に適用した。その建物において、竣工前に起振実験や常時微動計測を行い、通常の免震建物に比べてオールラウンド免震は、微振動に対して変位振幅を大幅に低減させる効果があることを確認した<sup>2)</sup>。

本報では、オールラウンド免震の微振動対策効果が計画段階から把握可能であることを確認するため、起振実験を解析により再現できることを示す。また、建物が稼動中の状態で得られた常時観測、および常時微動計測記録を分析し、オールラウンド免震の微振動対策効果を明らかにし、設計クライテリアを満たしていることを確認する。

#### 2. 建物概要、および微振動対策ダンパーの概要

オールラウンド免震を適用した建物外観を写真-1に示す。宮城県内に建設された本建物は、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る。大地震時の安全性向上と常時の微振動対策を行うため、通常の免震装置に加え微振動対策ダンパーを2基設け、オールラウンド免震とした。建物概要を表-1に、免震層伏



写真-1 建物外観

表-1 建物概要

|       |  |                        |
|-------|--|------------------------|
| 構造    | 基礎免震構造<br>地上2階、純ラーメン架構<br>S造（1階大梁SRC造、小梁RC造） |                        |
| 基礎    | 既製コンクリート杭                                    |                        |
| 高さ    | 10.075m                                      |                        |
| 建築面積  | 1,529.17m <sup>2</sup>                       |                        |
| 延べ床面積 | 2,859.82m <sup>2</sup>                       |                        |
| 免震装置  | 支承材  | 高減衰ゴム系積層ゴム支承 (HRB) 10基 |
|       |  | 天然ゴム系積層ゴム支承 (NRB) 8基   |
|       | 減衰材  | 弾性すべり支承 (SB) 6基        |
|       |  | オイルダンパー (OD) 4基        |
|       |  | 微振動対策ダンパー (VD) 2基      |

※以下、免震装置には( )内の記号を用いる。

\* 技術研究所建築研究グループ

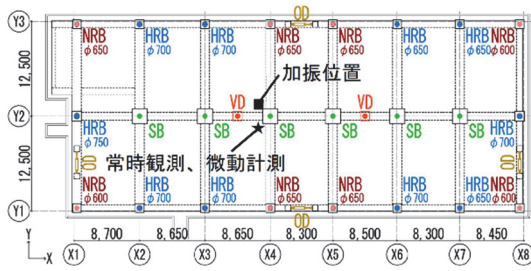
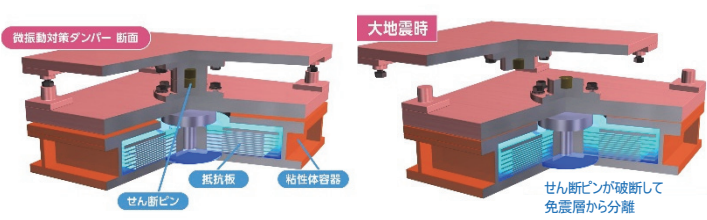


図-1 免震層伏図



(a) 通常の場合 (b) 揺れが大きい場合

図-2 微振動対策ダンパーの概要

図を図-1に、微振動対策ダンパーの概要を図-2に示す。本ダンパーは、微振動対策のほか、風揺れが懸念される免震建物の居住性能の改善を目的に開発された免震装置である。高粘度の粘性体を使用し、粘性体容器内に抵抗板を多層化することで、平面形状が800mm×800mmとコンパクトになり、異方性を有さず極めて微小な変形から大きな抵抗力を発揮できる。また、震度5弱程度以上の大きな揺れによりせん断ピンが破断し、微振動対策ダンパーが免震層から分離し、通常の免震建物として機能する特徴がある。

### 3. 微振動対策ダンパーを有する解析モデルの妥当性

#### 3.1 解析モデルの妥当性確認方法

ここでは、解析モデルに用いる重量や免震装置の設計値を変化させ、竣工直前に行った起振実験を解析で再現できるようにフィッティングさせる。設計値の変化率を評価し、設計段階で微振動対策ダンパーの適用効果が把握できることを確認する。

#### 3.2 起振実験概要

起振実験では、図-1に示すように X4-Y2 通りの建物中央付近の1階床に加振装置を取付け、そこにスライド支承、錘(≒30kN)を設けた。また、X方向に最大加振力が一定となるように錘を正弦波加振し、サーボ型速度計を用いて速度を計測した。サンプリング周波数が200Hzとし、定常応答の継続時間が81.92秒以上となるように計測時間を定めた。これらの条件の下、オイルダンパーと微振動対策ダンパー機能の有無を実験因子とし、以下3ケースの起振実験を行った。

- CASE 1 : B+OD(通常の免震構造)
- CASE 2 : B+VD
- CASE 3 : B+OD+VD

ここで、Bは支承材、ODはオイルダンパー、VDは微振動対策ダンパーを示す。

#### 3.3 解析モデル

解析モデルは、免震層より上部を剛体と仮定した1質点系せん断モデルとし、免震層には支承材の復元力と減衰材の抵抗力を考慮し、内部粘性減衰は無視した。

上部構造の重量は、1質点系線形モデルの共振曲線を起振実験結果にフィッティングさせた時の算定重量(44,546kN≒設計重量×0.8)<sup>2)</sup>を基準値とした。

表-2 免震装置の基準値諸元

|        | 水平剛性 $k_d$<br>[kN/cm] | 減衰係数 $C_d$<br>[kN・s/cm] | モデル     |
|--------|-----------------------|-------------------------|---------|
| NRB+SB | 267.9                 | —                       | Linear  |
| OD     | 1400.0                | 25.0                    | Maxwell |
| VD     | 1393.6                | 366.6                   | Maxwell |
| HRB    | (1)式による特性値の総和         |                         |         |

免震層全体を考慮した免震装置の基準値諸元を表-2に示す。天然ゴム系積層ゴム支承(NRB)は100%せん断歪み時の水平剛性を、弾性すべり支承(SB)はすべりが生じる前の水平剛性を基準とした線形の履歴則とした。また、減衰材(OD、VD)はMaxwellモデル<sup>1)</sup>とした。一方、微小歪み時( $\gamma < 1\%$ )における高減衰ゴム系積層ゴム支承(HRB)の等価水平剛性 $k_{eq}$ については、森井ら<sup>3)</sup>により提案されている(1)式の非線形履歴則から求まる等価剛性 $k_{eq}$ を1基あたりの基準値とした。

$$k_{eq} = 22 \cdot k_{eq(\gamma=100\%)} / (1 + \gamma / 1.5\%) \quad (1)$$

ここで、 $k_{eq(\gamma=100\%)}$ は100%せん断歪み時の等価剛性、 $\gamma$ は支承材のせん断歪みを表し、1基あたりの $k_{eq(\gamma=100\%)}$ はゴム外径が650mmで6.57kN/cm、700mmで7.46kN/cm、750mmで8.66kN/cmとした。また、ゴム外径ごとに(1)式から求めた $k_{eq}$ に基数を乗じたものを合算し、全HRBの等価剛性を求めた。以上の各基準値に対して、特性変化率 $V$ を乗じたものを解析モデルの諸元とした。

#### 3.4 再現性の確認

最初に、1階床の加振力を外力とした時刻歴応答解析を行い、速度応答のフーリエスペクトルが50Hz以下の振動数領域において、実験結果とフィッティングするように特性変化率 $V$ を算定した。フィッティングには、Levenberg-Marquardt法<sup>4), 5)</sup>によるカーブフィット法を用いた。また、上部構造の基準重量に対して±5%、各免震装置の基準値に対しては-90%～+900%の特性変化を考慮した。実験結果と解析結果のフィッティング例を図-3に示す。いずれのケースにおいても、解析結果は起振実験を精度よく再現していることが分かる。

次に、特性変化率 $V$ の算定結果を図-4に示す。横軸は加振力の振動数とし、(a)が上部構造の重量、(b)がHRBの等価剛性、(c)がその他の支承材(NRB+SB)の水平剛性、(d)、(e)がOD、(f)、(g)がVDに関する特性変化率を示す。(a)では、 $V_m$ が平均で1.01となり基準重量

と概ね等しかった。また、(b)では、(1)式から求まる等価剛性に対して、 $V_{keq}$ が最大で1.5倍程度となったが平均で1.01となり、(1)式の妥当性が確認できた。(c)では、 $V_{kb}$ の平均値が1.1となった。(d)より、 $V_{Cod}$ は共振点付近では概ね2.0となり、振動数が小さい場合には非常に大きな値を示した。また、(e)では、 $V_{kod}$ が共振点付近で大きくなる傾向を示した。(d)、(e)において、ODの特性変化率が大きくばらついた理由としては、摺動摩擦による抵抗力やOD接合部のわずかなゆるみの影響を解析モデルに考慮していないことが原因として考えられる。(f)、(g)では、 $V_{Cvd}$ の平均値が0.92、 $V_{kvd}$ の平均値が1.46となり、ODの有無によらず安定しており、設計時に考慮する製造ばらつきや温度変化による特性変化(0.55~2.07%)の範囲内であった。

最後に、全ての免震装置を考慮したCASE3のみの $V$ の平均値を用いて、共振曲線を再現した。再現した共振曲線と実験結果の比較を図-5に示す。いずれのケースでも、再現した共振曲線は実験結果とよい対応を示した。

以上のことより、VDはMaxwellモデルでモデル化が可能で、設計時に考慮する特性変化の範囲内で精度よく起振実験を再現でき、設計段階でも微振動対策ダンパー

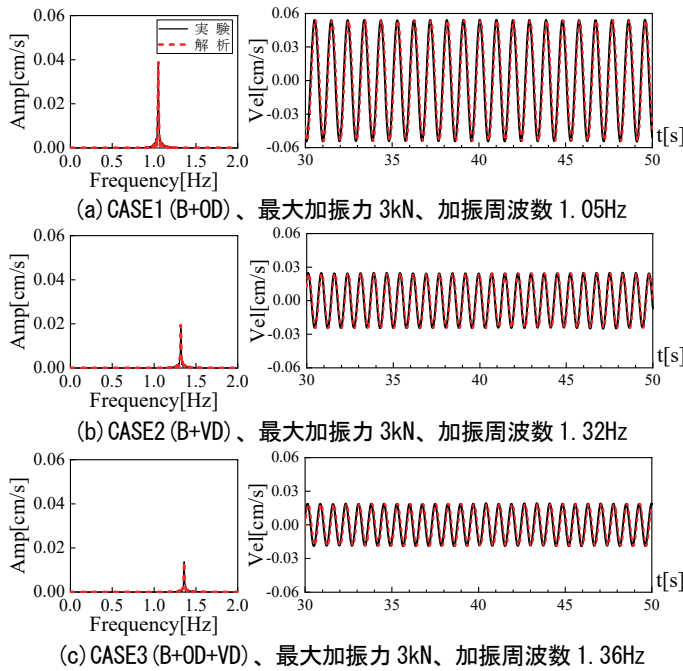


図-3 起振実験結果のフィッティング例

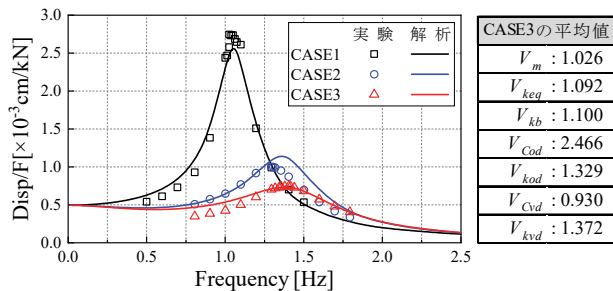


図-5 共振曲線

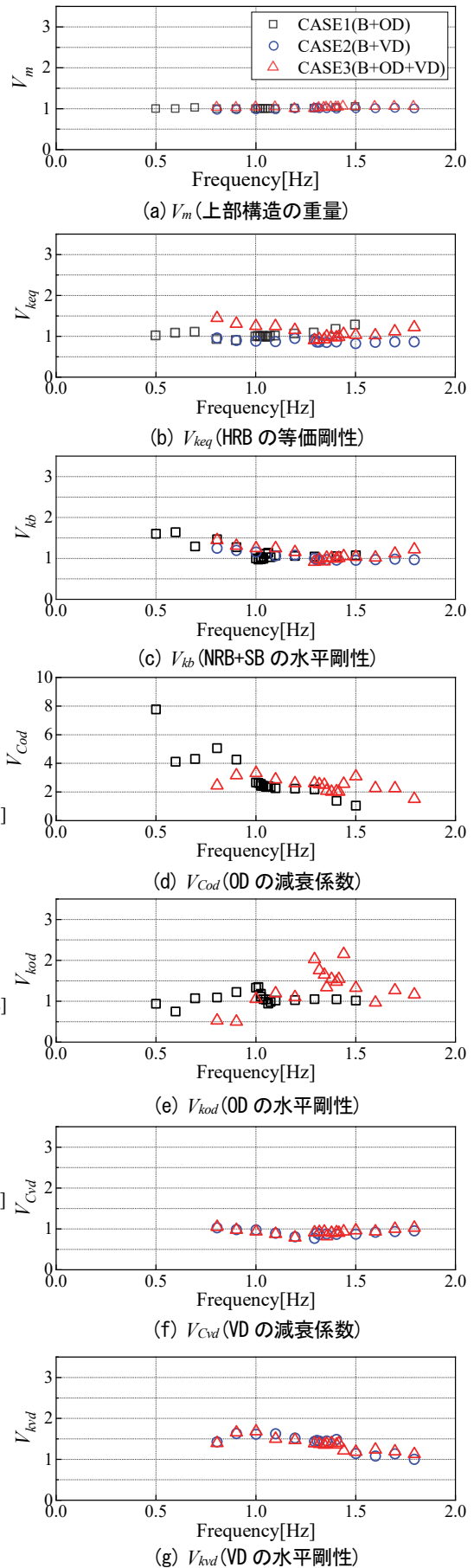


図-4 特性変化率Vの算定結果



の適用効果を把握できることが確認できた。

$$h = 1 / (2 \times \text{Amp.Ratio}) \tag{2}$$

#### 4. 建物稼働時の微振動対策効果

ここで、Amp.Ratio：フーリエスペクトル比(振幅)

##### 4.1 常時観測記録に基づく微振動対策効果

強震観測を目的に、サーボ型加速度計による常時観測を行っている。計測位置は図-1に示すように、X4-Y2通りの耐圧盤、1階床、R階床面とし、サンプリング周波数は100Hzとしている。

2021年2月13日23時7分頃に発生した福島県沖地震時に、震度5弱の揺れを観測した。その際、微振動対策ダンパーが想定通りに免震層から切り離され、通常の免震建物として機能した。そこで、地震前をオールラウンド免震、地震直後のせん断ピンが破断した状態を通常の免震として、小地震(震度2)時、および微動時(夜間)の観測記録から建物の振動特性を評価し、オールラウンド免震の微振動対策効果を確認した。図-6に小地震時(震度2)、図-7に微動時(夜間)の加速度時刻歴、フーリエスペクトル(振幅)、耐圧盤に対する1階床のフーリエスペクトル比、位相差を示す。なお、観測記録に対して0.1Hz~30Hzまでのバンドパスフィルター処理を施し、Parzen ウィンドウ幅は0.1Hzとした。減衰定数 $h$ はフーリエスペクトル比(振幅)から、(2)式により評価した。

一次固有振動数 $f_0$ 、減衰定数 $h$ を表-3に示す。表より、 $f_0$ は微動時に比べ小地震時の方が0.5~0.7倍となり長周期化している。これは、免震層の水平歪み量に起因する支承材の等価水平剛性の違いが影響しているものと考えられる。上部構造の重量が等しいと仮定すると、微振動対策ダンパーを2基設けたオールラウンド免震では、通常の免震に対して免震層の水平剛性は微動時で1.2倍、地震時で1.8倍程度増加し、減衰定数 $h$ は微動時で1.3倍、地震時で1.5倍程度増加することで、耐圧盤に対する1階床のフーリエスペクトル比を概ね3割低減している。

##### 4.2 設計クライテリアとの比較

表-3 振動特性(常時観測記録)

|     |           | 入力レベル | $f_0$ [Hz] | $h$   | Amp.Ratio |
|-----|-----------|-------|------------|-------|-----------|
| X方向 | 通常免震      | 微動    | 2.36       | 0.058 | 8.64      |
|     |           | 小地震   | 1.06       | 0.118 | 4.24      |
|     | オールラウンド免震 | 微動    | 2.55       | 0.084 | 5.94      |
|     |           | 小地震   | 1.36       | 0.165 | 3.03      |
| Y方向 | 通常免震      | 微動    | 1.91       | 0.072 | 6.90      |
|     |           | 小地震   | 1.05       | 0.108 | 4.62      |
|     | オールラウンド免震 | 微動    | 2.20       | 0.077 | 6.48      |
|     |           | 小地震   | 1.46       | 0.161 | 3.10      |

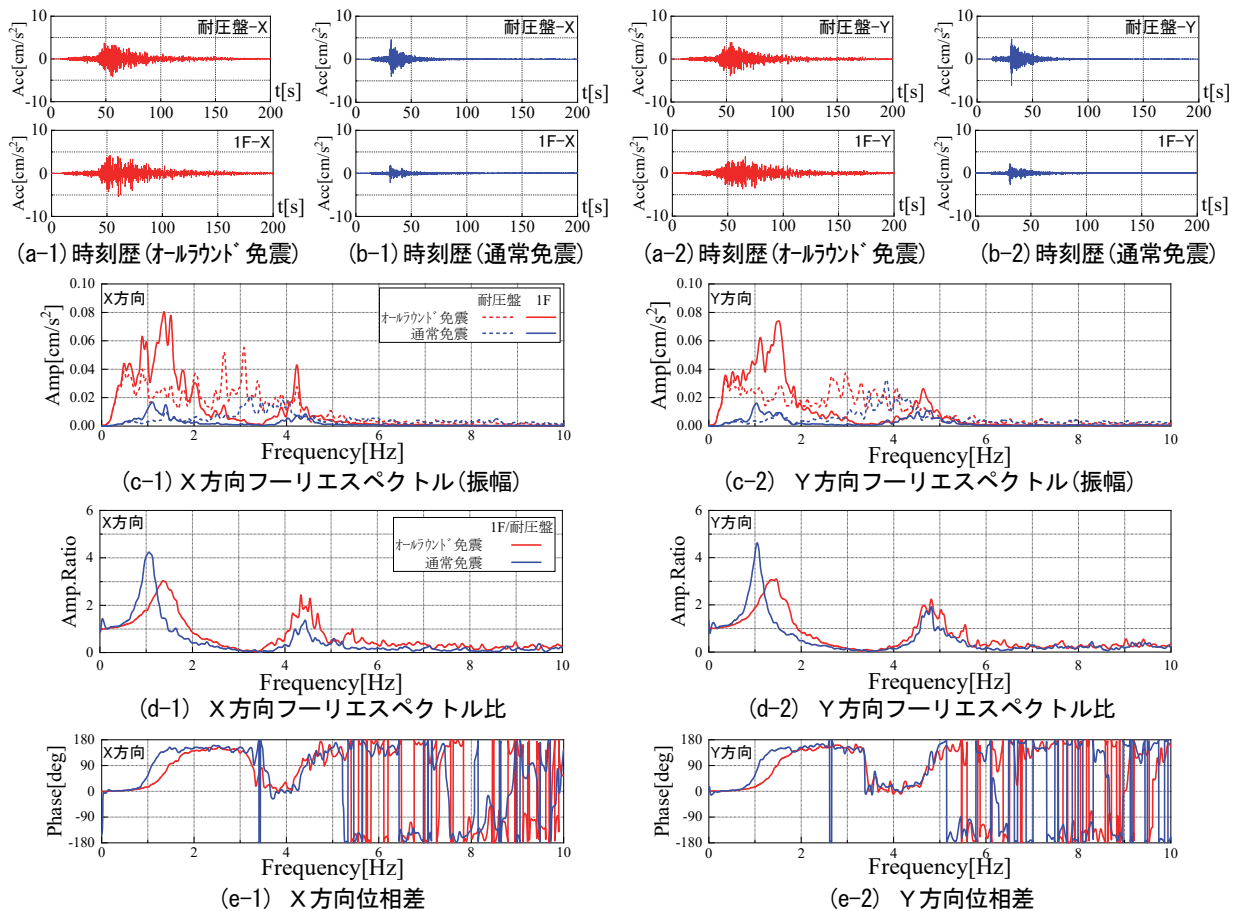


図-6 小地震時(震度2)の加速度時刻歴、フーリエスペクトル(振幅)、フーリエスペクトル比、位相差

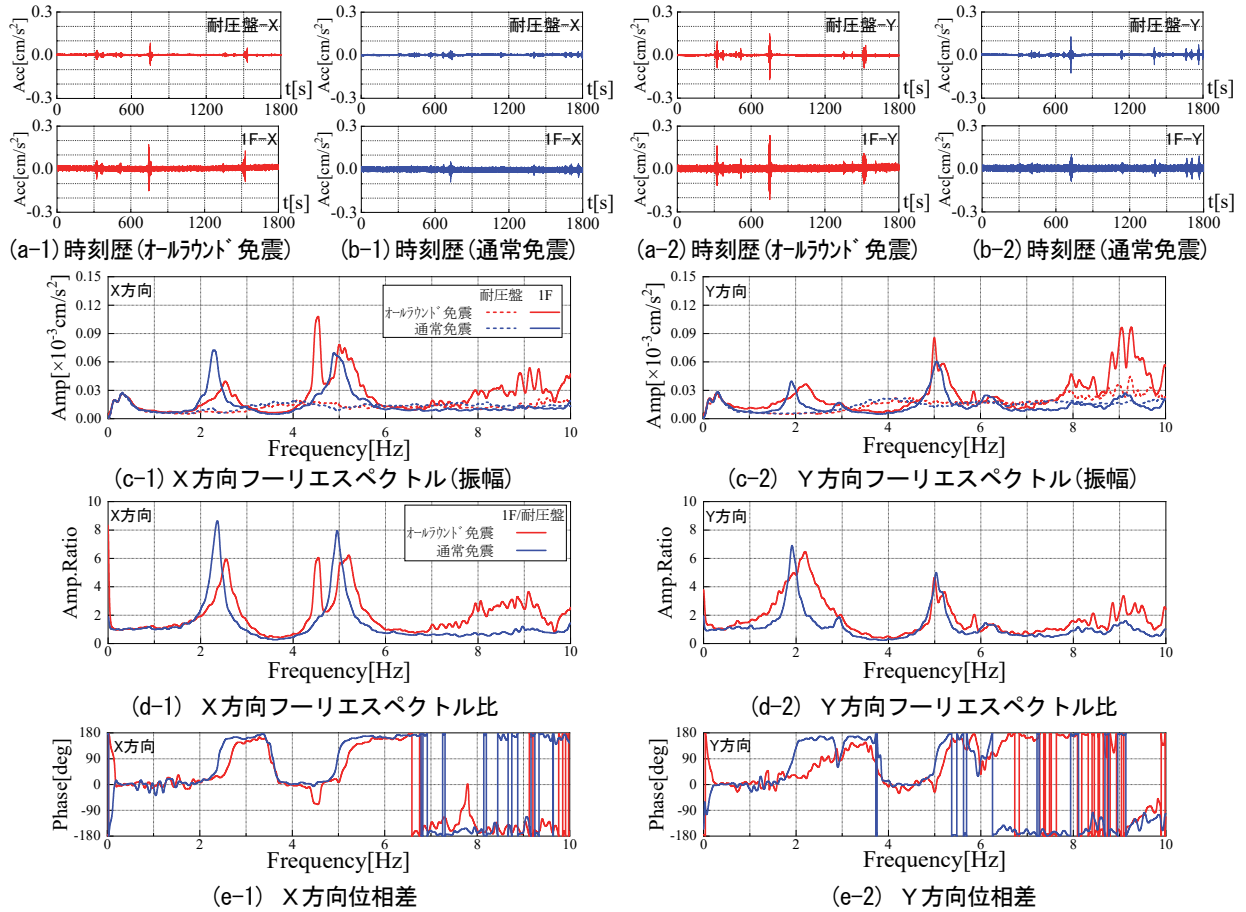


図-7 微動時(夜間)の加速度時刻歴、フーリエスペクトル(振幅)、フーリエスペクトル比、位相差

建物稼働時の微振動に対し、設計クライテリアが担保されているかを確認する目的で、オールラウンド免震下で常時微動計測を行った。常時観測と同位置付近の耐圧盤、1階床にサーボ型速度計を設置し、サンプリング周波数を100Hzとした。ここで、1階床の日中と夜間6時間分の計測記録を対象にRD法<sup>9)</sup>を用いて、減衰定数 $h$ を評価した。なお、3秒間を1サンプルとし、各サンプルが重複しないように抽出した。RD法から求まる自由振動波形に対して、非減衰固有振動数 $\bar{f}$ を収斂させ、Levenberg-Marquardt法<sup>4), 5)</sup>を用いたカーブフィット法を適用し、(3)式にフィッティングするように、減衰定数 $h$ を求めた。

$$x = \frac{x_0}{\sqrt{1-h^2}} e^{-h\bar{\omega}t} \cos(\sqrt{1-h^2}\bar{\omega}t) \quad (3)$$

- ここで、 $x$  : ある時間の振幅
- $x_0$  : 非減衰時の最大振幅
- $h$  : 減衰定数
- $\bar{\omega}$  : 非減衰固有円振動数(=2π $\bar{f}$ )
- $t$  : 時間

なお、計測記録には非減衰固有振動数 $\bar{f}$ に対して±0.5Hzのバンドパスフィルター処理をした。RD法による自由振動波形を図-8に、算定した減衰定数 $h$ を表-4に示す。速度振幅レベルの平均値は、概ね日中で

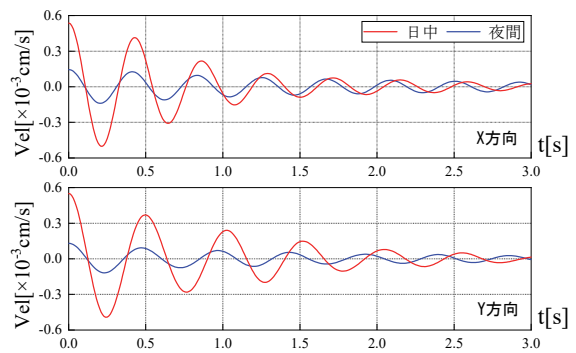


図-8 RD波形(日中と夜間の比較)

表-4 RD法から算定した減衰定数 $h$

|    |     | 振幅レベル<br>[×10 <sup>-3</sup> cm/s] | $\bar{f}$<br>[Hz] | $h$   |
|----|-----|-----------------------------------|-------------------|-------|
| 日中 | X方向 | 0.538                             | 2.32              | 0.070 |
|    | Y方向 | 0.551                             | 1.96              | 0.070 |
| 夜間 | X方向 | 0.145                             | 2.39              | 0.031 |
|    | Y方向 | 0.131                             | 2.08              | 0.047 |

0.55×10<sup>-3</sup>cm/s、夜間で0.14×10<sup>-3</sup>cm/sとなった。また、減衰定数 $h$ は日中で7%、夜間で3~5%程度となった。前項で算定した減衰定数 $h$ はフーリエ振幅比の応答倍率からの簡易評価値であり、減衰定数 $h$ を過大評価する傾向がある。また、計測に用いた加速度計と速度計の分解能の違いもあり、本節の方が前節に比べ精度よく微動

時の減衰定数  $h$  を評価していると考えられる。応答の傾向としては、4.1 節と同様に振幅レベルが大きくなるほど、減衰定数  $h$  が大きくなる傾向を示した。

次に、微振動対策効果が設計クライテリアを満たしていることを確認する。常時微動計測から求めるフーリエスペクトルと設計クライテリアの比較を図-9に示す。ここで、隣接するS造耐震構造の建物で常時微動計測を行い、そのフーリエスペクトル(振幅)の最大値以下となるように設計クライテリアを定めた。図より、X、Y方向ともに最大振幅は設計クライテリアを全ての振動数領域で満たし、最大で概ね半分となっていることが確認できた。

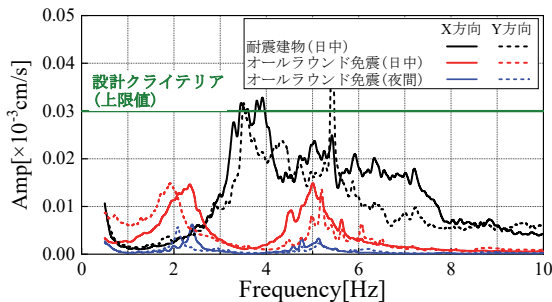


図-9 設計目標値との比較

## 5. まとめ

通常の免震建物に微振動対策ダンパーを2基設けたオールラウンド免震建物において、竣工前の起振実験および、建物稼働時の常時観測、常時微動計測から以下の知見を得た。

- i. カーブフィット法を用いて免震層の諸元を考慮した解析結果から、振幅レベル 0.01mm~0.1mm 程度の極めて微小な歪みに対しても、起振実験を精度よく再現できることを確認した
- ii. 微振動対策ダンパーは、Maxwell モデルでモデル化が可能で、かつ設計時に考慮する特性変化の範囲内であった
- iii. 免震装置の特性変化を適切に考慮することで、設計段階から微振動対策ダンパーの適用効果が評価できる
- iv. 強震観測用の常時観測記録から、2基の微振動対策ダンパーを設けたオールラウンド免震は、通常の免震建物に比べて減衰定数を1.5倍程度にし、振幅レベルを概ね3割低減できる
- v. 常時微動計測記録より、建物稼働中の最大速度振幅は設計目標値の1/2以下に納まり、設計クライテリアを満たしていることを確認した

## 6. あとがき

本研究を遂行する上で、日進工具株式会社様にご協力

頂いた。ここに記して感謝の意を表す。今後も継続して常時観測を行い、オールラウンド免震の有効性について検証を続けていきたい。

### 【参考文献】

- 1) 宮崎 充、澤田 毅、長島和央、川井伸泰、山田高之、山上 聡、舟山勇司、安井健治、「多層せん断粘性ダンパーの開発と実用化(その1~その4)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造II、pp.367-374、2010.7
- 2) 舟木秀尊、山上 聡、小山慶樹、山際 創、「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—」、奥村組技術研究年報、No.46、pp.85-90、2020.9
- 3) 森井雄史、竹内貞光、吉田一博、遠田正明、安達一喜、「免震部材の微小変形時の等価剛性が環境振動評価に及ぼす影響と簡略的な応答評価法の提案」、日本建築学会技術報告集、第21巻、第49号、pp.1101-1105、2015.10
- 4) Levenberg, K., "A Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares", Quart. Appl. Math. Vol.2, pp.164-168, 1944.
- 5) Marquardt, D., "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters," SIAM J. Appl. Math. Vol.11, pp.431-441, 1963
- 6) 国土交通省免震材料認定番号 MVBR-0232 認定資料
- 7) 柴田明徳、最新耐震構造解析、森北出版、1981.6
- 8) 田村幸雄、佐々木淳、塚越治夫、「RD法による構造物のランダム振動時の減衰評価」、日本建築学会構造系論文報告集、第454号、pp.29-38、1993.12