

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	複数建物を有する街区免震の設計手法 その2 免震層が等価応答スペクトルに与える影響
Title(English)	Design Method of Multiple Building Base-isolated System Part 2. Effect of isolation layer on equivalent spectra
著者(和文)	李晶, 佐藤大樹, 長谷川愛理
Authors(English)	LI Jing, SATO Daiki, HASEGAWA Airi
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 485-488
Citation(English)	, , , pp. 485-488
発行日 / Pub. date	2024, 3
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

複数建物を有する街区免震の設計手法

その2 免震層が等価応答スペクトルに与える影響

構造—振動

正会員 ○ 李晶<sup>\*1</sup>

正会員 佐藤大樹<sup>\*2</sup>

// 長谷川愛理<sup>\*1</sup>

街区免震 免震層絶対加速度 等価応答スペクトル  
アイソレーター 履歴系ダンパー 粘性系ダンパー

1. はじめに

街区免震の上部構造の設計クライテリアは層間変形角である。そのため、その1で質量が全質量である1質点モデルのΣm Modelに基づいた擬似等価地震波による変位応答スペクトルを用いて、上部構造が1質点である街区免震 Multiple Building Single-Degrees-of-Freedom Model (MS Model) の上部構造を設計する際に有用であることを示した。しかし、上部構造が多質点の Multiple Building Multi-Degrees-of-Freedom Model (MM Model) の場合、擬似等価変位スペクトルが MM Model に適用できるかどうかを検証する必要がある。さらに、等価地震波の波形は免震層の具体的な配置に依存しているため、免震層が等価地震波に与える影響について検討する必要がある。

その2では、まず、MM Model に対して、擬似等価変位応答スペクトルが適用できるかを確認する。また、免震層が擬似等価スペクトルに与える影響を検討する。

2. 擬似等価変位スペクトルの検証

本章では、擬似等価変位スペクトルを用いて、MM Model の上部構造の応答を予測できるかを確認する。なお、本検討において上部構造の層間変形角のクライテリアを 1/200 とする。

MM Model の応答評価を行う上部構造の変位は、第j棟の等価高さにおける等価層間変位 δ<sub>Ueq,j</sub>(Fig. 1)とする。第j棟の等価高さ H<sub>eq,j</sub>は Fig. 1 のように表せ、式(1)より算出される<sup>1)</sup>。ここで、第j棟の最大層数を N<sub>j</sub>とする上部構造のi層の質量を m<sub>j,i</sub>、高さを H<sub>j,i</sub>、1次固有モードを φ<sub>1,j,i</sub>とする。

$$H_{eq,j} = \frac{\sum_{i=1}^{N_j} m_{j,i} \phi_{1,j,i} H_{j,i}}{\sum_{i=1}^{N_j} m_{j,i} \phi_{1,j,i}} \quad (1)$$

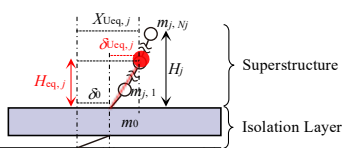


Fig. 1 等価高さおよび等価層間変位の概念

第j棟の等価高さにおける上部構造の等価層間変位 δ<sub>Ueq,j</sub>(Fig. 1)は、免震層と上部構造における変位の差の最大値と定義し、次式で算出される。

$$\delta_{Ueq,j} = |X_{Ueq,j}(t) - \delta_0(t)|_{\max} \quad (2)$$

ここで、X<sub>Ueq,j</sub>は第j棟の上部構造の等価高さにおける変位、δ<sub>0</sub>は免震層の変位である。tは時間を表す。

上記により求められた等価層間変位 δ<sub>Ueq,j</sub>と等価変位応答スペクトルを比較する。Fig. 2 に応答スペクトルと MM

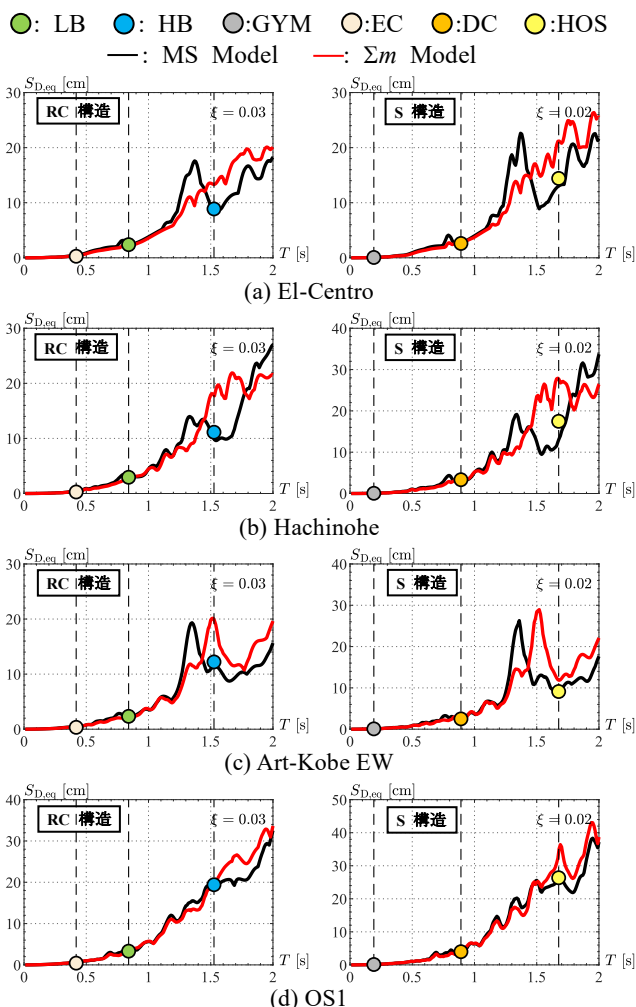


Fig. 2 等価変位応答スペクトル (JSSI<sup>2)</sup>)

Model を用いた時刻歴応答解析結果の比較を示す。MM Model の上部構造の剛性は JSSI の報告書<sup>2)</sup>の街区免震と同じ弾性剛性とした。免震層のパラメータは JSSI の報告書<sup>2)</sup>のパラメータと同じで、アイソレーターの周期  $T_0$  は 4.55 s、ヒステリシスダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_{n,y}$  は 0.022、降伏変位  $\delta_y$  は 1.398 cm である。黒線は MS Model の時刻歴解析より得られた免震層の絶対加速度を用いて算出した等価変位スペクトル、赤線は  $\Sigma m$  Model より得られた疑似等価変位スペクトルである。

Fig. 2 からわかるように、MM Model の応答 (図中プロット) は等価応答スペクトル (MS Model) と非常によく一致し、すべての上部構造の応答は疑似等価変位応答スペクトル ( $\Sigma m$  Model) より小さい。また、周期が 1s 未満の場合、疑似等価変位応答スペクトルの精度は非常に高い。しかし、周期が長い上部構造 (HB, HOS) については、疑似等価変位応答スペクトルが大きくなる。したがって、免震層に粘性系ダンパーを設置すると、疑似等価変位応答スペクトルの精度がよくなること分かった。

また、粘性系ダンパーは、免震層でよく設置される。したがって、免震層に粘性系ダンパーがある場合、疑似等価変位応答スペクトルが MM Model に適用できるかについても確認する必要がある。Fig. 3 に粘性系ダンパーの減衰定数  $\xi_v = 20\%$  の場合、応答スペクトルと解析結果の比較を示す。粘性系ダンパー以外のパラメータは同じである。

Fig. 3 からわかるように、免震層に粘性系ダンパーがあ

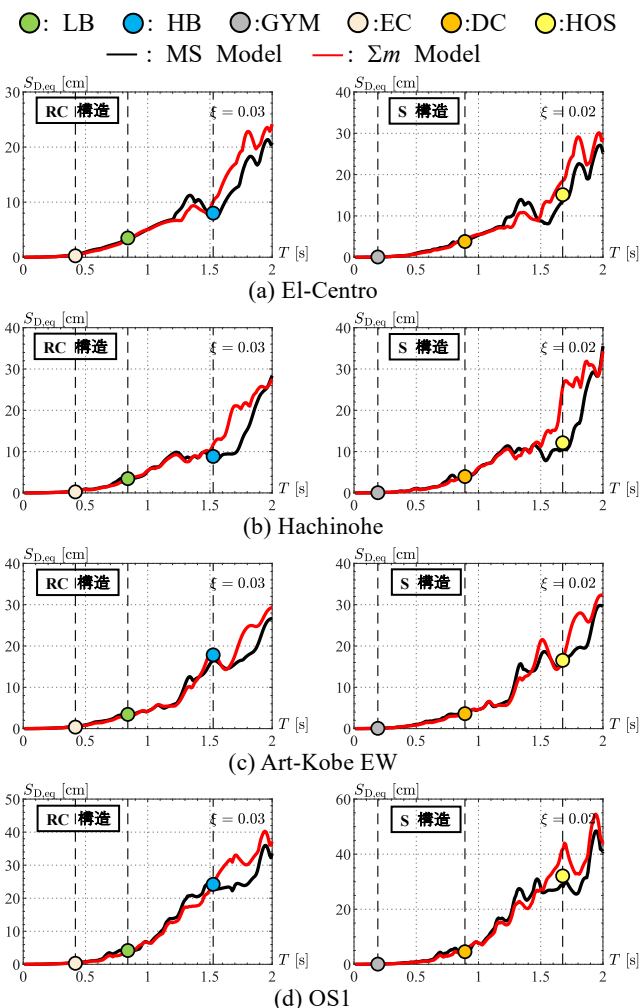


Fig. 3 等価変位応答スペクトル ( $\xi_v = 20\%$ )

る場合、MM Model の応答 (図中プロット) は等価応答スペクトル (MS Model) と非常によく一致し、すべての上部構造の応答は疑似等価変位応答スペクトル ( $\Sigma m$  Model) より小さい。周期が 1s 未満の場合、疑似等価変位応答スペクトルの精度は非常に高い。しかし、周期が長い上部構造 (HB, HOS) については、疑似等価変位応答スペクトルが大きくなる。したがって、免震層に粘性系ダンパーを設置すると、疑似等価変位応答スペクトルの精度がよくなること分かった。

### 3. 免震層が疑似等価変位スペクトルに与える影響

等価地震波の波形は免震層の具体的な配置に依存していることを本報その1で確認した。本章では、免震層の具体的な配置 (アイソレーター、履歴系ダンパーと粘性系ダンパー) が疑似等価変位スペクトルに与える影響について検討する。

#### 3.1 免震層周期の影響

まず、免震層が弾性、ダンパーがない場合、免震層の周期  $T_0$  が疑似等価変位スペクトルに与える影響を考察する。免震層の周期  $T_0$  が疑似等価変位応答スペクトルに与える影響を Fig. 4 に示す。上部構造の波形特性をより検討しやすくするために、設計範囲の周期 (0-2.5s) も示す。

Fig. 4 に示すように、疑似等価変位スペクトルのピーク

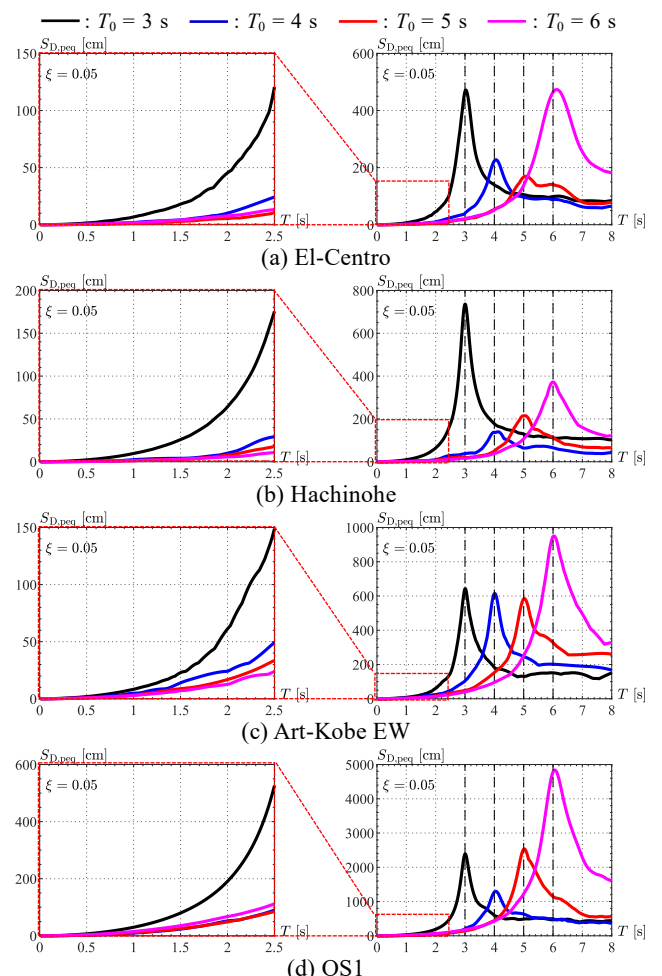


Fig. 4 免震周期の影響

は免震層の弾性周期  $T_0$  の近くに現れ、異なる免震層の弾性周期  $T_0$  のピークの大きさは地震波によって違う。設計範囲の周期に着目すると、免震層の弾性周期が増加するにつれて、設計範囲内の疑似等価変位スペクトルは徐々に減少することがわかる。

### 3.2 履歴系ダンパーの影響

従来の免震構造には履歴系ダンパーが多く使われるため<sup>3),4)</sup>、本節では、履歴系ダンパーの降伏せん断係数  $\alpha_{h,y}$  と履歴系ダンパーの降伏変位  $\delta_y$  が疑似等価変位応答スペクトルに与える影響について検討する。

履歴系ダンパーの降伏せん断係数  $\alpha_{h,y}$  が疑似等価変位スペクトルに与える影響を Fig. 5 に示す。アイソレーターの周期  $T_b = 4s$ 、履歴系ダンパーの降伏変位  $\delta_y = 3cm$  である。上部構造の波形特性をより検討しやすくするために、設計範囲の周期 (0-2.5s) も示す。

Fig. 5 に示すように、非常に小さい降伏せん断係数 ( $\alpha_{h,y} = 0.01$ ) でも、ダンパーがない疑似等価変位スペクトルと比べて、疑似等価変位スペクトルのピークの大きさを大幅に減少させる。また、設計範囲の周期に着目すると、ピーク値を減少させると同時に、疑似等価変位スペクトルのばらつきを増大させる。なお、履歴系ダンパーの降伏せん断係

数  $\alpha_{h,y}$  が増加するにつれて、設計範囲内 (0-2.5s) の疑似等価変位スペクトルは増大する傾向があることがわかる。

履歴系ダンパーの降伏変位  $\delta_y$  が疑似等価変位応答スペクトルに与える影響を Fig. 6 に示す。アイソレーターの周期  $T_b = 4s$ 、履歴系ダンパーの降伏せん断係数  $\alpha_{h,y} = 0.02$  である。上部構造の波形特性をより検討しやすくするために、設計範囲の周期 (0-2.5s) も示す。

Fig. 6 に示すように、履歴系ダンパーの降伏変位  $\delta_y$  が増加するにつれて、疑似等価変位スペクトルは徐々に増大する。また、設計範囲以内の周期に着目すると、履歴系ダンパーの降伏変位  $\delta_y$  が増加するにつれて、疑似等価変位スペクトルのばらつきは増大する。さらに、スペクトルの周期が 1.3s 未満の場合、履歴系ダンパーの降伏変位  $\delta_y$  が異なっても疑似等価変位応答スペクトルはほとんど変わらないことがわかる。

以上のことから、免震層に履歴系ダンパーを追加すると、街区免震の上部構造の応答を効果的に減少させることができるが、注意すべきなのは、過大な降伏せん断係数  $\alpha_{h,y}$  と降伏変位  $\delta_y$  はかえって上部構造の応答を増大させるということである。したがって、適切な履歴系ダンパーのパラメータを選択する必要がある。

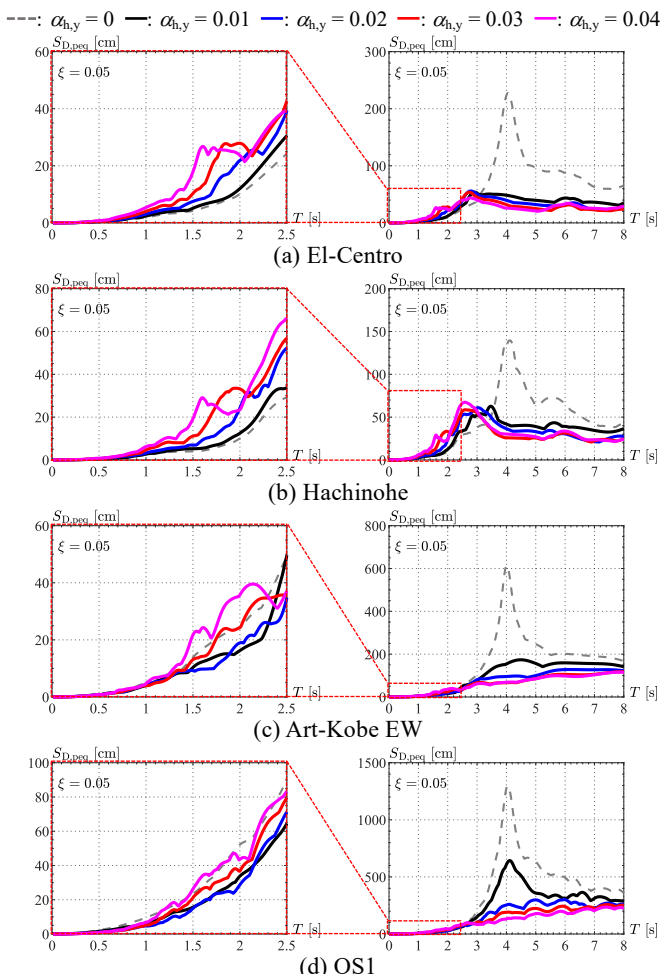


Fig. 5 ダンパーダンパー量の影響 ( $T_b = 4s$ ,  $\delta_y = 3cm$ )

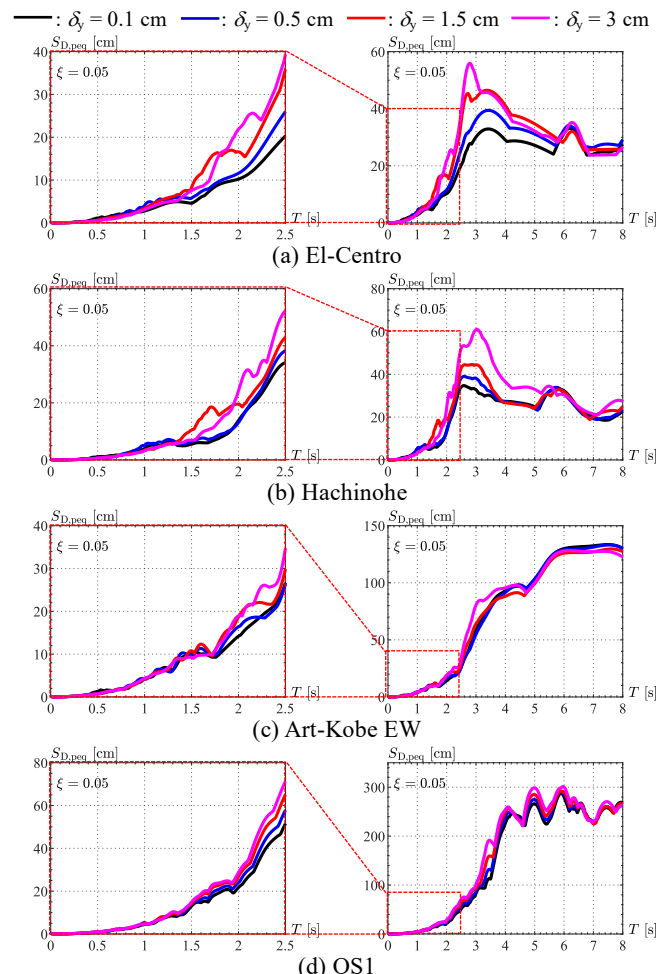


Fig. 6 降伏変形の影響 ( $T_b = 4s$ ,  $\alpha_{h,y} = 0.02$ )

### 3.3 粘性系ダンパーの影響

従来の免震構造には粘性系ダンパーが多く使われるため<sup>3),4)</sup>、本節では、粘性系ダンパーが疑似等価変位応答スペクトルに与える影響について検討する必要がある。

粘性系ダンパーの減衰定数 $\xi_v$ が疑似等価変位応答スペクトルに与える影響を Fig. 7 に示す。アイソレーターの周期  $T_b = 4s$  である上部構造の波形特性をより検討しやすくするために、設計範囲の周期 (0-2.5s) も示す。

Fig. 7 に示すように、小さい粘性系ダンパーの減衰定数 ( $\xi_v = 0.05$ )でも、疑似等価変位スペクトルのピークの大きさは大幅に減少する。また、粘性系ダンパーの減衰定数 $\xi_v$ が増加するにつれて、疑似等価変位スペクトルは徐々に減少する。粘性系ダンパーの減衰定数 $\xi_v$ が大きい場合 ( $\xi_v > 0.10$ )、疑似等価変位スペクトルのピーク値はあまり存在せず、応答スペクトルは周期の増加につれて増加する傾向を示す。また、設計範囲内の周期に着目すると、大部分の地震波に対して、粘性系ダンパーの減衰定数 $\xi_v$ が増加するにつれて、疑似等価変位スペクトルが減少する。さらに、

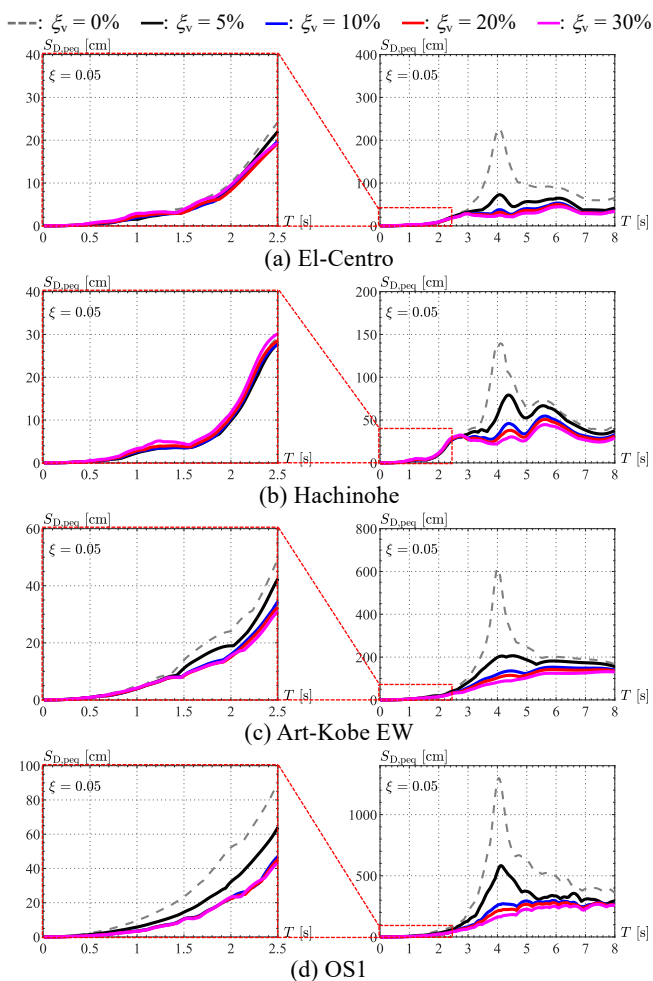


Fig. 7 粘性系ダンパーの影響 ( $T_b = 4s$ )

粘性系ダンパーの粘性定数 $\xi_v$ が大きい場合 ( $\xi_v > 0.10$ )、粘性系ダンパーの粘性定数 $\xi_v$ が増加しても疑似等価変位応答スペクトルはほとんど変わらない。すなわち、粘性系ダンパーの粘性定数 $\xi_v$ が過大な場合 ( $\xi_v > 0.10$ )、粘性系ダンパーの粘性定数 $\xi_v$ を増加させても疑似等価変位応答スペクトルを効果的に減少させることはできないことがわかる。

以上のことから、免震層に粘性系ダンパーを追加すると、街区免震の上部構造の応答を効果的に減少させることができるが、粘性系ダンパーの粘性定数 $\xi_v$ が過大な場合、粘性系ダンパーの粘性定数 $\xi_v$ を増加させても疑似等価変位応答スペクトルを効果的に減少させることはできない。したがって、適切な粘性系ダンパーを選択する必要がある。

### 4 まとめ

その2では、MM Model に対して、質量が全質量である1質点モデルの $\Sigma m$  Model に基づいた疑似等価地震波による変位応答スペクトルが適用できるかを検討した。疑似等価変位応答スペクトルは MM Model を安全側に設計できることを確認した。また、免震層が疑似等価スペクトルに与える影響を検討した。

免震層の弾性周期に対して、疑似等価変位スペクトルのピークは免震層の弾性周期の近くに現れた。免震層の弾性周期が増加するにつれて、上部構造の周期での疑似等価変位スペクトルは徐々に減少した。

免震層に履歴系ダンパーを追加すると、街区免震の上部構造の応答を効果的に減少させることができるが、過大な降伏せん断係数 $\alpha_{n,y}$ と降伏変位 $\delta_y$ はかえって上部構造の応答をある程度増大させることがある。したがって、適切な履歴系ダンパーのパラメータを選択する必要がある。

免震層に粘性系ダンパーを追加すると、街区免震の上部構造の応答を効果的に減少させることができるが、粘性系ダンパーの粘性定数 $\xi_v$ が過大な場合、粘性系ダンパーの粘性定数 $\xi_v$ を増加させても疑似等価変位応答スペクトルを効果的に減少させることはできない。したがって、適切な粘性系ダンパーのパラメータを選択する必要がある。

### 参考文献

- 1) 柴田明徳：最新耐震構造解析(第2版)、森北出版株式会社、pp.77, 2011.9
- 2) 日本免震構造協会：免震によるレジリエントな都市の実現を目指して～レジリエントな都市の実現構想研究会免震システム技術WG活動報告書～、pp.4.19-4.57, 2023.5
- 3) 日本免震構造協会：免震構造設計指針、pp.322-334, 2013.10
- 4) 大宮幸、北村 春幸：長周期地震動対策に備えた直近の免震建物の構造特性に関する調査・分析、日本建築学会技術報告集、Vol.25, No.59, pp.61-66, 2019.2

\*1 東京工業大学 大学院生

\*2 東京工業大学 准教授・博士 (工学)

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology \*1

Associate Professor, FIRS, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng \*2