

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1 上部構造の等価入力地震波の提案
Title(English)	Design Method of Multiple Building Base-isolated System Part 1. Proposal of equivalent ground motion for superstructure
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, Ⅰ, , pp. 481-484
Citation(English)	, Ⅰ, , pp. 481-484
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 1 上部構造の等価入力地震波の提案

構造－振動

正会員 ○ 李晶^{*1} 正会員 佐藤大樹^{*2}
" 長谷川愛理^{*1}

街区免震 免震層絶対加速度 等価入力地震波
上部構造周期 固有値解析 デュアメル積分

1. はじめに

近年では首都直下型地震など都市が大打撃を受ける大震災が懸念されており、建物に加えてインフラ設備などの都市機能を保護することが重要視されている。そこで解決策として、日本免震構造協会（JSSI）は災害時街一体を免震化する免震システムを提案している¹⁾。そのように複数の建物が同一免震基盤を共有する免震システムを、本報では街区免震と定義する。

しかし、街区免震は免震層の設計だけでなく諸上部構造の設計も考慮することが必要なため、既存の設計方法では諸上部構造と免震層が設計クライテリアを同時に満足することは難しい。JSSI の報告書¹⁾においては、免震層のアイソレーターや履歴系ダンパーおよび諸上部構造の剛性の変更を繰り返し、選定された地震波に対する複数回の時刻歴解析を通じ免震層と上部構造のクライテリアを満足した各設計パラメータを決定した。この方法では最終的に設計パラメータが得られるが、時間と労力がかかるばかりでなく、最適化された設計パラメータを得ることが困難である。そのため、より良い設計方法の提案が必要である。

街区免震は、大きな質量の質点（免震層）が免震層に比べて質量が非常に小さい多くの質点（上部構造）と接続されたシステムとして簡単に見なすことができる。これに、建物と非構造材（例えば、建物と天井）と同様なシステムである。石原ら²⁾、笠井ら³⁾は、床の絶対加速度を非構造材の地震加速度として用いて、非構造の応答スペクトルを提案している。本報では、この考え方を準用して、免震層の絶対加速度に基づく、上部構造の設計用の応答スペクトルを提案して、設計手法を示す。

本報その 1 では、免震層の絶対加速度を上部構造への地震作用としての等価入力地震波（略称：等価地震波）を提案する。その 2 では、免震層が等価応答スペクトルに及ぼす影響について検討する。その 3 では等価地震波に基づく設計の例を示す。

2. 建物モデルおよび入力地震波の概要

2.1 上部構造と解析モデル

解析対象モデルは、JSSI の報告書¹⁾と同じ、Fig. 1, 2 に示すように、合計 11 棟(6 種類)の建物が同一免震基盤を共有するモデルである。また、上部構造の建物種類、質量および 1 次固有周期は Table 1 に示す。なお、本報では建物の略称として、低層住宅棟を LB、高層住宅棟を HB、緊急避難所を GYM、エネルギーセンターを EC、防災指令センターを DC、病院を HOS と表す。

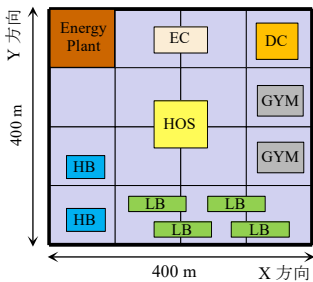


Fig. 1 建物配置平面図

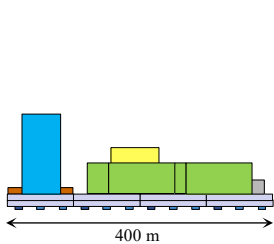


Fig. 2 建物配置立面図

Table 1 建物種類

建物	階数	構造	棟数	質量 [kN・s ² /cm]	周期 [s]
LB(低層住宅棟)	15	RC	4	228.9	0.840
HB(高層住宅棟)	29	RC	2	342.4	1.526
GYM(緊急避難所)	5	S	2	264.2	0.191
EC(エネルギーセンター)	2	RC	1	153.1	0.419
DC(防災指令センター)	6	S	1	174.5	0.891
HOS(病院)	16	S	1	536.9	1.676

街区免震の解析モデルを Fig. 3 に示す。街区免震の免震層は通常の免震構造と同じで、免震層の中にはアイソレーターとダンパーが配置されている。ここでは、上部構造の違いに基づいて、二つのモデルを定義する。(a) は JSSI の報告書¹⁾の中で用いたものと同じで、すべての上部構造が質点系で表現された Multiple Building Multi-Degrees-of-Freedom Model (MM Model) である。また、

(b)は上部構造をそれぞれ1自由度に簡略化した Multiple Building Single-Degrees-of-Freedom Model (MS Model) である。このモデルは上部構造の質量と第一周期が全システムに与える影響に焦点を当てているため、上部構造のモードが全システムに与える影響は考慮しない。MM Model の記号について、第 j 棟の第 i 層の上部構造の剛性は $k_{j,i}$ であり、質量は $m_{j,i}$ である。次に、MS Model の記号について、第 j 棟の上部構造の剛性は k_j であり、質量は m_j である。また、減衰は剛性比例減衰として、上部構造の1次減衰定数は鉄骨造で $\xi_{U,j} = 2\%$ 、鉄筋コンクリート造で $\xi_{U,j} = 3\%$ である。なお、免震層について、免震層の質量を m_0 、アイソレーターの周期を T_b 、履歴系ダンパーのせん断降伏係数を $\alpha_{h,y}$ 、粘性系ダンパーの減衰定数を c_0 とそれぞれ定義する。

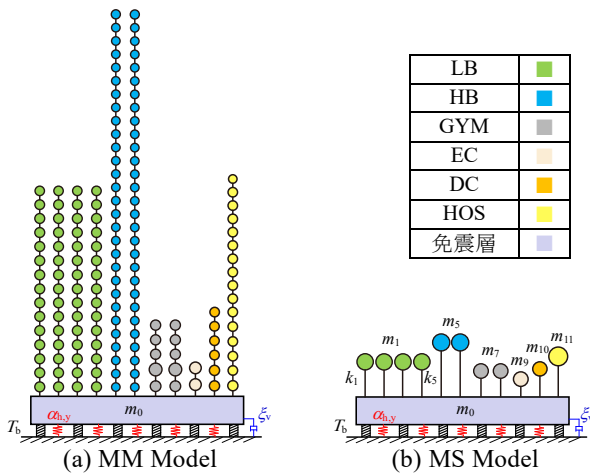


Fig. 3 解析モデル

MS Model の第 j 棟の上部構造の剛性 k_j と減衰係数 c_j を以下で定義する。

$$k_j = \frac{4\pi^2}{T_{U,j}^2} m_j, \quad c_j = \frac{4\pi\xi_j}{T_{U,j}} m_j \quad (1, 2)$$

ここで、 $T_{U,j}$ は第 j 棟の上部構造の周期 (Table 1) である。

2.2 免震層

免震層の質量 m_0 は、免震層基盤を構成する部材断面 (柱: 1.5 m×1.5 m, 梁: 1.0 m×1.0 m, スラブ厚: 0.6 m 厚) と各階の階高 7 m より躯体重量を算出した。なお、柱高さは階高の半分とし、躯体の単位体積重量は 2.4 kN/m³、基盤面積は 160000 m² である。以上より免震層の基盤全重量を算出し、合計した街区免震の免震層の質量は $m_0 = 16817.87 \text{ kN}\cdot\text{s}^2/\text{cm}$ である。また、免震層の質量と上部構造の質量の合計 (総質量 Σm) は、免震層の質量と Table 1 の合計より、 $\Sigma m = 19811.09 \text{ kN}\cdot\text{s}^2/\text{cm}$ である。

免震層の復元力特性を Fig. 4 に示す。免震層の中には線形のアイソレーター(a)、バイリニアの履歴系ダンパー(b)および線形の粘性系ダンパー(c)が配置されている。

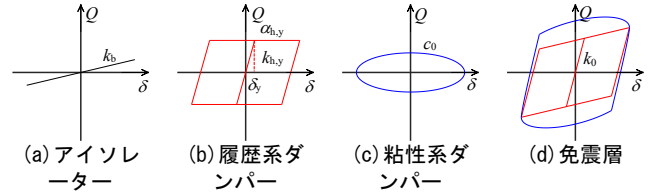


Fig. 4 免震層の復元力特性

アイソレーターの剛性 k_b 、履歴系ダンパーの弾性剛性 $k_{h,y}$ および免震層の弾性剛性 k_0 を以下にそれぞれ示す。

$$k_b = \frac{4\pi^2}{T_b^2} \Sigma m, \quad k_{h,y} = \frac{\Sigma m g \alpha_{h,y}}{\delta_y}, \quad k_0 = k_b + k_{h,y} \quad (3-5)$$

ここで、 T_b はアイソレーターの周期、 g は重力加速度、 δ_y は履歴系ダンパーの降伏変位である。

免震層の弾性周期 T_0 、粘性系ダンパーの減衰係数 c_0 を以下に示す。

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{\Sigma m}{k_0}}, \quad c_0 = \frac{4\pi\xi_v}{T_0} \Sigma m \quad (6, 7)$$

2.3 入力地震波

本報では、El Centro 1940 と Hachinohe 1968 という代表的な観測地震波⁴⁾を、JMA KOBE 1995 EW⁵⁾の位相特性に基づく Art-Kobe EW と基整促波 OS1⁶⁾という人工波を、入力地震波として採用する。

入力地震波のスペクトルを Fig. 5 に示す。(a)は疑似速度スペクトルであり、(b)はエネルギースペクトルである。

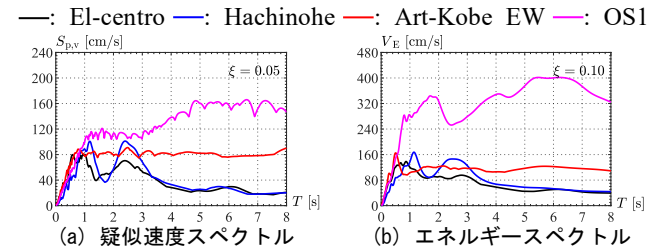


Fig. 5 入力地震波のスペクトル

3. 上部構造の等価入力地震波

3.1 等価入力地震波の理論式

MS Model の運動方程式を式(8)のように示す。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\ddot{x}_g \{1\} \quad (8)$$

ここで、 $\{x\}$ 、 $\{\dot{x}\}$ 、 $\{\ddot{x}\}$ および $\{\ddot{x}_g\}$ は変位、速度、加速度および地震波の加速度である。また、質量マトリックス、減衰マトリックスおよび剛性マトリックスはそれぞれ

$$[M] = \begin{bmatrix} m_0 & & & \\ & m_1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & m_j & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & m_N \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} c_0 + c_1 \cdots c_i \cdots c_N & -c_1 & \cdots & -c_j & \cdots & -c_N \\ & -c_1 & & c_1 & & \\ & \vdots & & & \ddots & \\ & -c_j & & & c_j & \\ & \vdots & & & & \ddots \\ & -c_N & & & & c_N \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_0 + k_1 \cdots k_j \cdots k_N & -k_1 & \cdots & -k_j & \cdots & -k_N \\ & -k_1 & & k_1 & & \\ & \vdots & & & \ddots & \\ & -k_j & & & k_j & \\ & \vdots & & & & \ddots \\ & -k_N & & & & k_N \end{bmatrix} \quad (11)$$

で示される。なお、 N は上部構造の棟数である。

式(9-11)のマトリックスを運動方程式(式(8))に代入し、上部構造の加速度 $\ddot{x}_j$ を層間加速度 $\ddot{x}_0 + \ddot{\delta}_j$ の形式に書き換え、整理することで、式(12)が得られる。

$$\begin{Bmatrix} m_0 \ddot{x}_0 \\ m_1 (\ddot{x}_0 + \ddot{\delta}_1) \\ \vdots \\ m_j (\ddot{x}_0 + \ddot{\delta}_j) \\ \vdots \\ m_N (\ddot{x}_0 + \ddot{\delta}_N) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} c_0 \dot{x}_0 + \sum_{i=1}^N c_i \dot{x}_0 - \sum_{i=1}^N c_i \dot{x}_i \\ -c_1 \dot{x}_0 + c_1 \dot{x}_1 \\ \vdots \\ -c_j \dot{x}_0 + c_j \dot{x}_j \\ \vdots \\ -c_N \dot{x}_0 + c_N \dot{x}_N \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} k_0 x_0 + \sum_{i=1}^N k_i x_0 - \sum_{i=1}^N k_i x_i \\ -k_1 x_0 + k_1 x_1 \\ \vdots \\ -k_j x_0 + k_j x_j \\ \vdots \\ -k_N x_0 + k_N x_N \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} m_0 \ddot{x}_g \\ m_1 \ddot{x}_g \\ \vdots \\ m_j \ddot{x}_g \\ \vdots \\ m_N \ddot{x}_g \end{Bmatrix} \quad (12)$$

次に、式(12)の中のすべての上部構造の方程式を免震層に加えると、式(13)が得られる。つまり、質量が総質量で、剛性と減衰係数がMS Modelの免震層と同じで、地震作用が $\ddot{x}_g + \sum_{j=1}^N m_j / \Sigma m \ddot{\delta}_j$ である1自由度の運動方程式となる。

$$\Sigma m \ddot{x}_0 + c_0 \dot{x}_0 + k_0 x_0 = -\Sigma m \left(\ddot{x}_g + \sum_{j=1}^N m_j / \Sigma m \ddot{\delta}_j \right) \quad (13)$$

また、式(12)によると、任意の上部構造に対して、運動方程式は式(14)で示される。すなわち、入力地震が免震層の絶対加速度である1自由度の運動方程式と等価する。

$$m_j \ddot{\delta}_j + c_j \dot{\delta}_j + k_j \delta_j = -m_j (\ddot{x}_g + \ddot{x}_0) \quad (14)$$

したがって、免震層の絶対加速度を上部構造の設計における入力地震として使用できる。本報では、等価地震波と定義する。そして、デュアメル積分⁷⁾を使用して、街区免震に対する上部構造の等価入力地震波を式(15)に示す。

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{g,eq}(t) &= \ddot{x}_g(t) + \ddot{x}_0(t) \\ &= -\sum_{s=1}^N \beta_{s,0} \{ \phi_{s,0} \} \left[2\pi \xi_s / T_s \dot{q}_s(t) + 4\pi^2 / T_s^2 q_s(t) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、 $\beta_{s,0} \{ \phi_{s,0} \}$ 、 ξ_s 、 T_s は s 次の免震層の刺激関数、減衰定数および固有周期である。 $\dot{q}_s(t)$ と $q_s(t)$ を以下に示す。

$$\dot{q}_s(t) = -\int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\frac{2\pi\xi_s}{T_s}(t-\tau)} \cos \frac{2\pi}{T_s} \sqrt{1-\xi_s^2} (t-\tau) d\tau - \xi_s \frac{T_s}{2\pi} q_s(t) \quad (16)$$

$$q_s(t) = -\frac{T_s}{2\pi\sqrt{1-\xi_s^2}} \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\frac{2\pi\xi_s}{T_s}(t-\tau)} \sin \frac{2\pi}{T_s} \sqrt{1-\xi_s^2} (t-\tau) d\tau \quad (17)$$

しかし、本報では、上部構造の最大層間変形角を満足する上部構造の剛性 k_j が未知数であるため、式(15)より等価地震波を得ることはできない。そのため、次の小節では、別の仮定を用いて擬似等価地震波を提案する。

3.2 疑似等価入力地震波

式(13)の中に上部構造の振動の影響を無視すると、式(18)が得られる。すなわち、Fig. 6のように質量が総質量の1自由度モデル Σm Modelの運動振動方程式となる。

$$\Sigma m \ddot{x}_{\text{SDOF}} + c_0 \dot{x}_{\text{SDOF}} + k_0 x_{\text{SDOF}} = -\Sigma m \ddot{x}_g \quad (18)$$

式(15)と同様に、式(18)の絶対加速度を擬似等価地震波と定義する。デュアメル積分⁷⁾を用いて、擬似等価地震波は式(19)のように示される。

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{g,peq}(t) &= \ddot{x}_g(t) + \ddot{x}_{\text{SDOF}}(t) \\ &= -\left[2\pi\xi_0 / T_0 \dot{q}(t) + (2\pi\xi_0 / T_0)^2 q(t) \right] \end{aligned} \quad (19)$$

ここで、 ξ_0 、 T_0 は1自由度の減衰定数、固有周期である。

$\dot{q}(t)$ と $q(t)$ を下に示す。

$$\dot{q}(t) = -\int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\frac{2\pi\xi_0}{T_0}(t-\tau)} \cos \frac{2\pi}{T_0} \sqrt{1-\xi_0^2} (t-\tau) d\tau - \xi_0 \frac{T_0}{2\pi} q(t) \quad (20)$$

$$q(t) = -\frac{T_0}{2\pi\sqrt{1-\xi_0^2}} \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\frac{2\pi\xi_0}{T_0}(t-\tau)} \sin \frac{2\pi}{T_0} \sqrt{1-\xi_0^2} (t-\tau) d\tau \quad (21)$$

MS Modelの免震層弾性周期 T_0 と1次刺激関数 $\beta_{1,0} \{ \phi_{1,0} \}$ をFig. 7に示す。Fig. 7より、免震層の質量 m_0 が上部構造の質量 Σm_U よりはるかに大きいため、免震層の弾性周期 T_0 が増加するにつれて、免震層の1次刺激関数 $\beta_{1,0} \{ \phi_{1,0} \}$ は徐々に1に近づくことがわかる。 $\beta_{1,0} \{ \phi_{1,0} \}$ が1になる場合、式(15)、(19)より、擬似等価地震波 $\ddot{x}_{g,peq}$ は等価地震波 $\ddot{x}_{g,eq}$ にほぼ等しくなることは明らかである(式(22))。

$$\ddot{x}_{g,peq}(t) \approx \ddot{x}_{g,eq}(t) \quad (22)$$

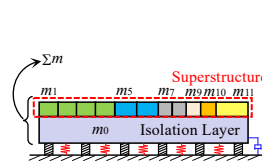


Fig. 6 Σm Model

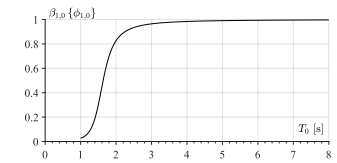


Fig. 7 免震層の1次刺激関数

等価地震波と疑似等価地震波をFig. 8に示す。Fig. 8より、免震層の弾性周期 T_0 が短い場合(1.5 s)、疑似等価地震波と等価地震波の違いは大きい、 T_0 が長くなるほど、疑似等価地震波は等価地震波に近づくことが確認できる。そのため、上部構造の設計に疑似等価地震波を使用するためには、 T_0 をできるだけ長くすべきである。一方、履歴系ダンパーは T_0 を短くするため、履歴系ダンパーのダンパ一量はあまり大きくすべきではない。

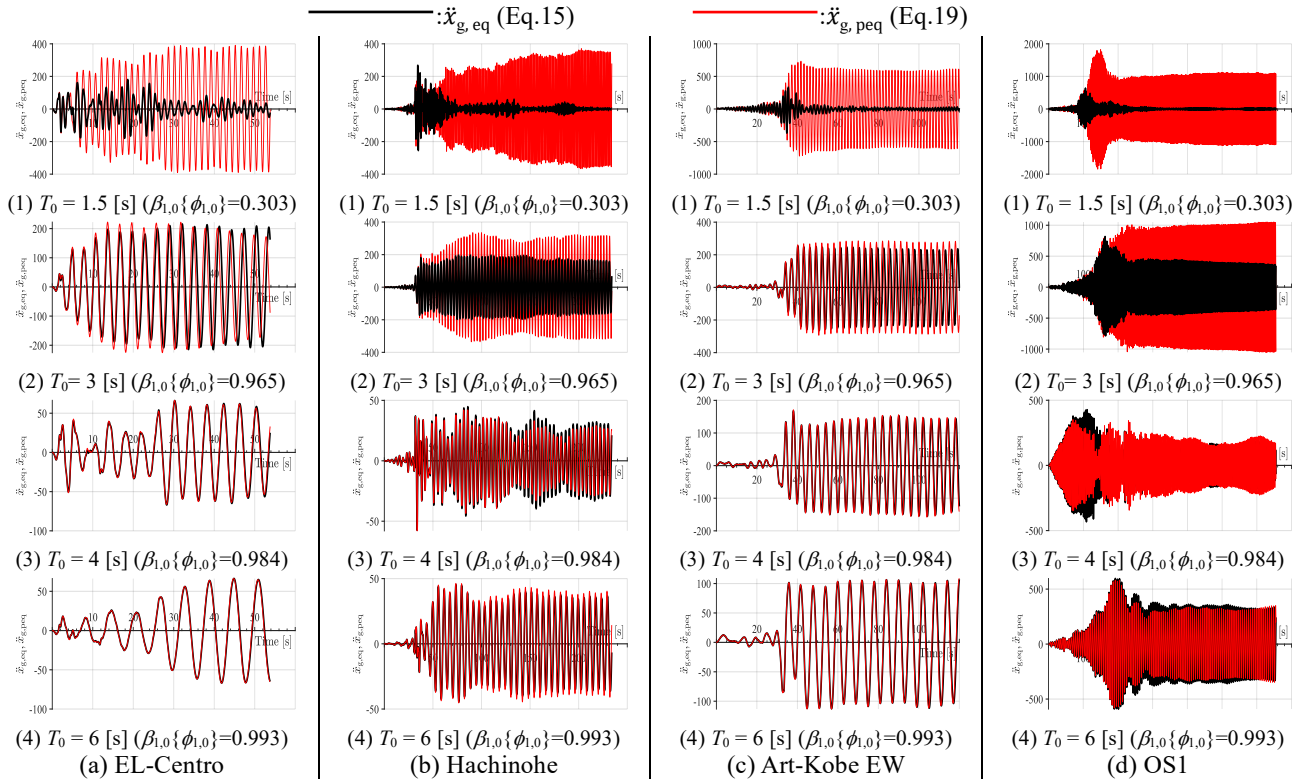


Fig. 8 等価地震波と疑似等価地震波（免震層周期の影響，質量比 $m_{11}/\Sigma m = 2.7\%$ ）

免震層周期 $T_0 = 6$ s，入力地震波が OS1 の場合，質量比が疑似等価地震波に及ぼす影響を Fig. 9 に示す。(a)-(d)の質量比は上部構造の中で質量が一番大きい建物の質量 m_{11} (病院)と全質量 Σm の比 $m_{11}/\Sigma m$ が 1%，3%，5%と 10%である。Fig. 9 より，質量比が小さい場合(3%以下)，疑似等価地震波と等価地震波の違いは小さいことがわかる。

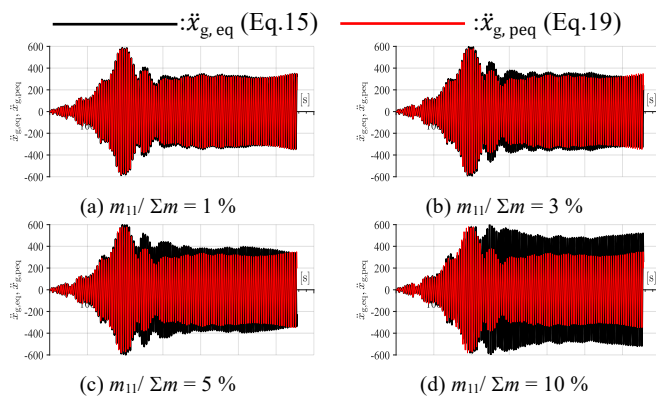


Fig. 9 質量比の影響 ($T_0 = 6$ s, OS1)

4 まとめ

本報その 1 では，街区免震の運動方程式を整理することにより，任意の上部構造について，免震層の絶対加速度を入力地震波とした耐震構造と見なすことを示した。そして，街区免震の免震層の絶対加速度を上部構造の等価入力地震波として提案した。また，街区免震においては，その免

震層の質量が上部構造の質量をはるかに上回るため，免震層の周期が長い場合 ($T_0 > 4$ s)，かつ質量比が小さい場合 ($m_{11}/\Sigma m < 3\%$)，街区免震の免震層の地震応答は，同様の免震層配置とし質量に総質量を適用した 1 自由度モデルの応答にほぼ等しいことを確認した。そのため，1 自由度モデルの絶対加速度を上部構造の疑似等価入力地震波として提案した。つまり，適切な免震層を先に設計することで，疑似等価入力地震波を地震加速度として上部構造の地震動設計を行うことができる。

参考文献

- 1) 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
- 2) 石原直，佐藤航平，鈴木賢人，永野正行：非線形地震応答における床応答スペクトルの略算法の提案，日本建築学会技術報告集，Vol.23，No.54，pp.433-436, 2017.6
- 3) 笠井和彦，小松真吾，近藤さゆみ，赤塚希美：地震時における建物非構造材の応答スペクトルの作成法，日本建築学会構造系論文集，Vol.84，No.758，pp.489-499, 2019.4
- 4) 一般社団法人建築性能基準推進協会：代表的な観測地震波（加速度データ）の頒布について
- 5) 国土交通省：強震波形（平成 7 年(1995 年)兵庫県南部地震）
https://www.data.jma.go.jp/eqcv/data/kyoshin/jishin/hyogo_nanbu/index.html
- 6) 国土交通省：「長周期地震動への対策」における『基盤促波』の作成, 2017.4
- 7) 柴田明徳：最新耐震構造解析(第 2 版)，森北出版株式会社，pp.76, 2011.9

*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, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng *2