

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	複数建物を有する免震システムの免震層と上部構造の設計手法 その1：疑似等価スペクトルの判定手法の提案
Title(English)	Design method of multiple building base-isolated system for seismic isolation layer and superstructure Part 1: Proposal of a method for determining pseudo equivalent spectra
著者(和文)	李晶, 佐藤大樹, 長谷川愛理
Authors(English)	Jing Li, Daiki Sato, Airi Hasegawa
出典(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, , pp. 911-912
Citation(English)	, 構造II, , pp. 911-912
発行日 / Pub. date	2024, 8
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

複数建物を有する免震システムの免震層と上部構造の設計手法
(その 1：疑似等価スペクトルの判定手法の提案)

免震システム 複数建物 判定手法
応答スペクトル 時刻歴解析 判定係数

正会員 ○李 晶*¹ 同 佐藤 大樹*¹
同 長谷川 愛理*²

1. はじめに

大地震後、建物に加えてインフラ設備などの都市機能を保護するために、日本免震構造協会（JSSI）は複数の建物が同一免震基盤を共有する免震システムという街区免震を提案している¹⁾。また、筆者らは上部構造の設計用の疑似応答スペクトルを提案している²⁾。本報その 1 では疑似応答スペクトルの適用範囲の決定手法を提案し、その 2 には設計例を示す。

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。

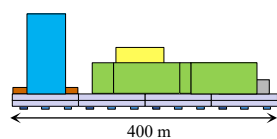
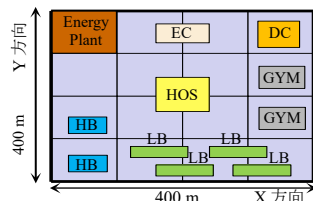


Fig. 1 建物配置平面図 1) Fig. 2 建物配置立面図 1)

Table 1 建物種類 1)

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、Fig. 3 に示す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) は上部構造の高次モードが全体応答に与える影響は小さいと仮定して、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。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

レーターの剛性を k_b 、履歴系ダンパーの剛性を $k_{h,y}$ 、粘性系ダンパーの減衰係数を c_0 とそれぞれ定義する。

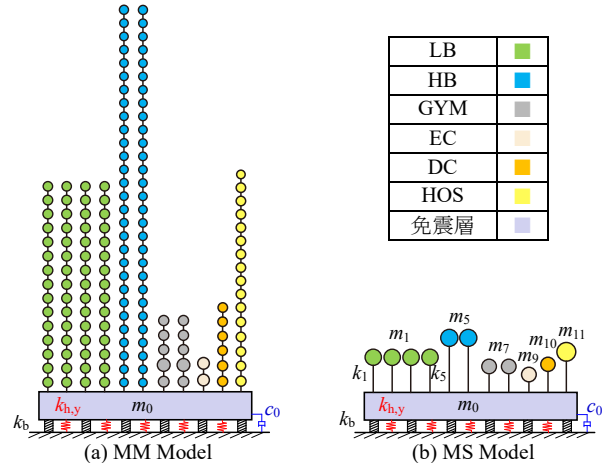


Fig. 3 解析モデル

MS Model の第 j 棟の上部構造の質量 m_j 、剛性 k_j と減衰係数 c_j を以下のように定義する。

$$m_j = \sum_{i=1}^{N_j} m_{j,i}, \quad k_j = 4\pi^2 m_j / T_{U,j}^2, \quad c_j = 4\pi \xi_j m_j / T_{U,j} \quad (1-3)$$

ここで、 N_j は第 j 棟の階数であり、 $T_{U,j}$ 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 $\Sigma m = 19811.09 \text{ kN}\cdot\text{s}^2/\text{cm}$ 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(a)線形のアイソレーター、(b)バイリニアの履歴系ダンパーおよび(c)線形の粘性系ダンパーが配置されている。

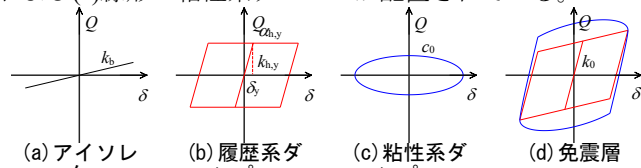


Fig. 4 免震層の復元力特性

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。

$$k_b = 4\pi^2 \Sigma m / T_b^2, \quad k_{h,y} = \alpha_{h,y} \Sigma m g / \delta_y, \quad k_0 = k_b + k_{h,y} \quad (4-6)$$

ここで、 T_b はアイソレーターの周期であり、 $\alpha_{h,y}$ と δ_y は履歴系ダンパーのせん断降伏係数と降伏変位であり、 g は重力加速度である。

粘性系ダンパーの減衰係数 c_0 を以下に示す。

$$c_0 = 4\pi \xi_v \Sigma m / T_b \quad (7)$$

ここで、 ξ_v は粘性系ダンパーの減衰定数である。

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³⁾を, JMA KOBE 1995 EW⁴⁾の位相特性に基づく Art-Kobe EW と基整促波 OS1⁵⁾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。

—: El-centro —: Hachinohe —: Art-Kobe EW —: OS1

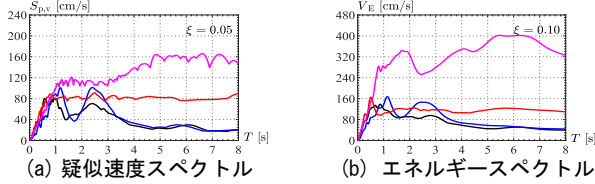


Fig. 5 入力地震波のスペクトル

3. 等価入力地震波

3.1 入力地震波

MS Model の運動方程式の整理より, 上部構造の方程式を免震層に加えると, 式(8)が得られる²⁾。つまり, 質量が総質量で, 剛性と減衰係数が免震層と同じで, 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。

$$\Sigma m \ddot{x}_0 + c_0 \dot{x}_0 + k_0 x_0 = -\Sigma m \left(\ddot{x}_g + \sum_{j=1}^N m_j / \Sigma m \ddot{\delta}_j \right) \quad (8)$$

ここで x_0 , $\dot{x}_0$, $\ddot{x}_0$ および $\ddot{x}_g$ は免震層の変位, 免震層の速度, 免震層の加速度および地震波の加速度である。

また, 式(9)のように, 任意上部構造について, 免震層の絶対加速度を入力地震波とした建物と見なせることを示した²⁾。

$$m_j \ddot{\delta}_j + c_j \dot{\delta}_j + k_j \delta_j = -m_j (\ddot{x}_g + \ddot{x}_0) \quad (9)$$

ここで δ_j , $\dot{\delta}_j$, $\ddot{\delta}_j$ は第 j 棟の層間の変位, 速度, 加速度である。

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。式(10)に示す $\ddot{x}_{g,eq}$ を等価地震波と定義する。

$$\ddot{x}_{g,eq}(t) = \ddot{x}_g(t) + \ddot{x}_0(t) \quad (10)$$

しかし, 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, 等価地震波を得ることは不可能である。そのため, 別の仮定を用いて擬似等価地震波を提案する。

式(8)の中に上部構造の振動の影響を無視すると, 式(11)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。

$$\Sigma m \ddot{x}_{SDOF} + c_0 \dot{x}_{SDOF} + k_0 x_{SDOF} = -\Sigma m \ddot{x}_g \quad (11)$$

式(10)と同様に, 式(12)のように, 式(11)の絶対加速度を擬似等価地震波と定義する。

$$\ddot{x}_{g,peq}(t) = \ddot{x}_g(t) + \ddot{x}_{SDOF}(t) \quad (12)$$

3.2 疑似等価スペクトルの判定

式(8)と式(11)を比較すると, 上部構造から免震層への影響 $\sum_{j=1}^N m_j / \Sigma m \ddot{\delta}_j$ が入力地震波 $\ddot{x}_g$ と比べて非常に小さい場合, 疑似等価地震波は等価地震波にほぼ等しいことがわかる。したがって, 疑似等価応答スペクトルを適用できるかを判定するために, 疑似等価地震波の加速度スペクトル $S_{A,peq}$ を用いて, 式(13)のように,

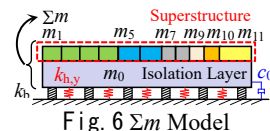


Fig. 6 Σm Model

判定係数 ε_A を定義する。

$$\varepsilon_A = \left(\frac{m_j S_{A,peq}(T_j, \xi)}{\Sigma m PGA} \right)_{\max} \quad (13)$$

ここで, PGA は $\ddot{x}_g$ の最大加速度であり, 減衰係数は $\xi = 5\%$ とする。

また, 式(14)のように, 等価スペクトル強度 SI_{eq} ³⁾ を定義して, 等価スペクトルの大きさを評価する。

$$SI_{eq} = \int_{0.1}^{2.5} S_{v,eq}(T, \xi) dT \quad (14)$$

ここで, $S_{v,eq}$ は等価地震波の速度応答スペクトルであり, 減衰係数は $\xi = 20\%$ ³⁾ である。

判定係数 ε_A と等価スペクトル強度 SI_{eq} 比の関係を Fig. 7 に示す。縦軸は $\ddot{x}_{g,peq}$ (式 12) より算出した疑似等価スペクトル強度 $SI_{p,eq}$ と $\ddot{x}_{g,eq}$ (式 10) より算出した等価スペクトル強度 SI_{eq} の比である。検討用パラメーターについて, アインレーターの周期 T_b は, 1.5 s – 8 s (刻み 0.5 s) であり, 質量比 $m_{11} / \Sigma m$ は, 1% – 10% (刻み 1%) である。

Fig. 7 に示すように, 判定係数 ε_A が 0.01 より小さい場合, 疑似等価スペクトル強度は等価スペクトル強度とほとんど同じである (違いは 15% 以内)。すなわち, 判定係数 ε_A が 0.01 より小さい場合, 疑似応答スペクトルを適用できることがわかる。

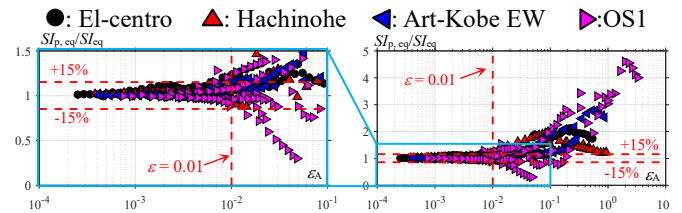


Fig. 7 ε_A と SI_{eq} 比の関係

疑似等価加速度スペクトル $S_{A,peq}$ を Fig. 8 に示す。また, JSSI モデルの場合 ($T_b = 4.55$ s, $m_{11} / \Sigma m = 2.71\%$) について, 疑似等価加速度スペクトルに基づいて計算した判定係数 ε_A を Table 2 に示す。各地震波の ε_A は 0.01 より小さいので, JSSI モデルの場合, 疑似応答スペクトルが適用できる。

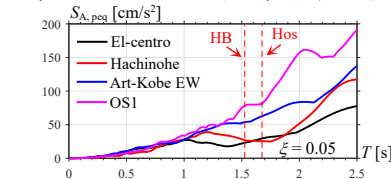


Fig. 8 疑似等価加速度スペクトル

Table 2 判定係数 ε_A

Ground motion	ε_A
El-centro	0.0023
Hachinohe	0.0038
Art-Kobe EW	0.0039
OS1	0.0084

4. まとめ

本報その 1 では疑似応答スペクトルが適用できるかの判定手法を提案した。JSSI のモデルの場合, 疑似応答スペクトルが適用できることを確認した。

参考文献

- 日本免震構造協会: レジリエントな都市の実現構造研究会 免震システム技術 WG 活動報告書, 2023. 3
- 李品, 他 2 名: 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, 日本建築学会関東支部研究報告集, 2024. 3
- 柴田明徳: 最新耐震構造解析 (第 2 版), 森北出版株式会社, pp. 36, 2011. 9
- 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
- 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/eqev/data/kyoshin/jishin/hyogo_nanbu/index.html
- 国土交通省: 「長周期地震動への対策」における『基整促波』の作成, 2017.

*1 東京工業大学

*2 東急建設株式会社 (元東京工業大学)

*1 Tokyo Institute of Technology

*2 Tokyu Construction Co. Ltd.