

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地震応答に関する検討 その1 固有値解析による検討
Title(English)	Seismic response of multiple building base isolated system Part1. An investigation by eigenvalue analysis
著者(和文)	長谷川愛理, 佐藤大樹, 李晶, 菊地優
Authors(English)	Airi Hasegawa, Daiki Sato, Jing LI, Masaru Kikuchi
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, 1, , pp. 501-504
Citation(English)	, 1, , pp. 501-504
発行日 / Pub. date	2023, 2
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地震応答に関する検討

その1 固有値解析による検討

構造一振動

正会員 ◯ 長谷川愛理^{*1}
〃 李晶^{*1}

正会員 佐藤大樹^{*2}
〃 菊地優^{*3}

免震構造 街区免震 復元力特性
固有値解析 上部構造周期 固有モード

1. はじめに

近年大規模地震に対して建物倒壊を防ぐだけでなく、建物の継続使用や内部の機能・財産を保護する必要性が高まってきている。それらを可能とする建築技術の一つとして免震構造が用いられることがある。免震構造は高い耐震性を示し、災害後でも大きな損傷は無く上部構造の性能を維持することが可能である。しかし、近年では首都直下型地震など都市が大打撃を受ける災害が懸念されており、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、街一体を免震化する免震システムが提案されている^{例えば 1)}。2)。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。

街区免震の事例を次に述べる。神奈川県にある集合住宅「上九沢住宅」は、21 棟の住戸ビルが同一の人工地盤を共有している、実在する街区免震である¹⁾。その地下には無数の免震装置が設置されており、街区全体を免震化する仕組みとなっている。他に「ゼリー免震都市構想」という街区免震の計画が提案されている²⁾。スリットで区切られた地盤を免震基盤と見なし、上部には複数の建物が並び地盤内には配管や地下道路が通る計画である。

以上のような事例が提案されている中、免震構造協会では災害時にインフラ機能を確保することを目的として、次世代型の街区免震を提案している。しかし複数の建物が同一免震基盤を共有する街区免震は、設計法が定まっていない。そこで本報では、街区免震とした際の免震層の最適な条件を決定し、応答低減効果を検討する。本報その1では街区免震モデルについて固有値解析を行い、上部構造の剛性と質量の分布が街区免震全体に与える影響について簡易的に検討する。本報その2では時刻歴応答解析を用いて、街区免震の免震層の最適な条件を決定する。さらに耐震モデル、単体免震モデルの応答結果と比較することで、街区免震の応答低減効果を検討する。

2. 建物モデル概要

2.1 上部構造

解析対象モデルは、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。上部構造の建物種類および質量は Table 1, 2 の通りである。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。解析モデル図を Fig. 3 に示す。本検討では共通地盤上の多棟質点せん断モデルで解析を行い、解析方向は X 方向のみとする。

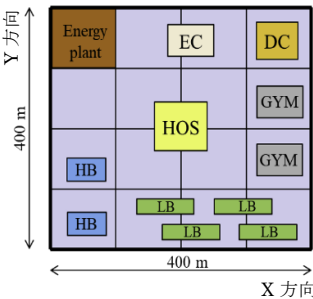


Fig. 1 建物配置平面図

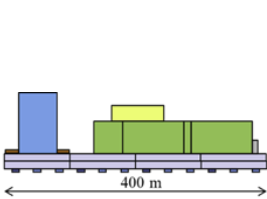


Fig. 2 建物配置立面図

Table 1 建物種類

建物	規模	構造	棟数
LB(低層住宅棟)	地上 15 階	RC	4
HB(高層住宅棟)	地上 29 階	RC	2
GYM(緊急避難所)	地上 5 階	S	2
EC(エネルギーセンター)	地上 2 階	RC	1
DC(防災指令センター)	地上 6 階	S	1
HOS(病院)	地上 16 階	S	1

Table 2 上部構造の質量 [kN・s²/cm]

LB	HB	GYM	EC	DC	HOS
228.9	342.4	264.2	153.1	174.5	536.9

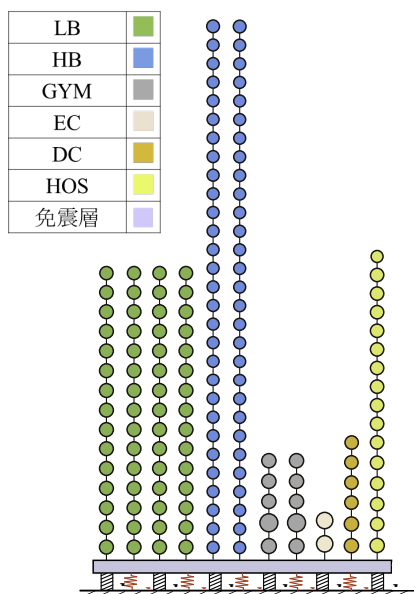


Fig. 3 解析モデル

上部構造の減衰は瞬間剛性比例減衰とし、1 次の減衰定数は一次固有周期(Table 3)に対して鉄骨造で ${}_1h_U = 2\%$ 、鉄筋コンクリート造で ${}_1h_U = 3\%$ である。上部構造の減衰係数は式(1)、(2)で求められる。

$$C_i = a_K \cdot k_i \quad (1)$$

$$a_K = \frac{2 \cdot {}_1h_U}{{}_1\omega} = \frac{2 \cdot {}_1h_U}{2\pi / {}_1T_U} \quad (2)$$

ここで、 a_K は初期剛性比例減衰係数を、 ${}_1\omega$ 、 ${}_1h_U$ 、 ${}_1T_U$ は上部構造の1次固有円振動数、1次減衰定数、1次固有周期を、 C_i 、 k_i は*i*層の減衰係数、初期剛性を示す。

Fig. 4 に上部構造の骨格曲線を示す。ここで、 Q_1 、 Q_2 は第1、第2折れ点荷重を、 k_1 、 k_2 、 k_3 はそれぞれ1～3次の剛性を、 δ_1 、 δ_2 は第1、第2降伏変形を示す。

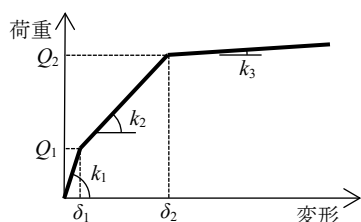


Fig. 4 上部構造の骨格曲線

上部構造の復元力特性は鉄筋コンクリート造で武田モデル、鉄骨造でノーマルトリニアモデルを採用し、層間変形角のクライテリアは1/200と設定する。設定は、各階重量、1次剛性 k_1 を既知とし下式により行う。2次剛性 k_2 、3次剛性 k_3 はそれぞれ下式より求められる。

$$k_2 = 0.30k_1 \quad (3)$$

$$k_3 = 0.01k_1 \quad (4)$$

第2折れ点荷重 Q_2 は*Ai*分布($C_0 = 0.12$)を用いて求めた値をさらに1.2倍する。また、第1折れ点荷重 Q_1 は割増係数(0.30)を用いて以下で求められる。

$$Q_1 = 0.30Q_2 \quad (5)$$

第1降伏変形 δ_1 、第2降伏変形 δ_2 はFig. 4の関係から下式により決まる。

$$\delta_1 = \frac{Q_1}{k_1} \quad (6)$$

$$\delta_2 = \delta_1 + \frac{Q_2}{k_2} \quad (7)$$

以上により求められた剛性と耐力を、低層住宅棟、高層住宅棟、病院では1.5倍、防災指令センターでは1.2倍として設定する。

上部構造の1～3次の固有周期をTable 3に示す。6種類の中で病院(HOS)、高層住宅棟(HB)の順に固有周期が長く、1次モードでは1秒を超える長い周期が確認できる。

Table 3 上部構造の固有周期 [s]

建物	1次	2次	3次
LB	0.840	0.299	0.183
HB	1.526	0.531	0.322
GYM	0.191	0.101	0.061
EC	0.419	0.161	—
DC	0.891	0.327	0.218
HOS	1.676	0.643	0.385

2.2 免震層

免震層の質量は、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である総質量 Σm は、免震層の質量 m_0 とTable 2の合計より、 $\Sigma m = 19811.09 \text{ kN} \cdot \text{s}^2/\text{cm}$ である。

Fig. 5 に免震層の変位とせん断力の関係を示す。免震層にはアイソレータと履歴型ダンパーを用い、それぞれの剛性を k_f 、 k_s で表す。復元力特性はバイリニア型を用い、減衰は無減衰とする。

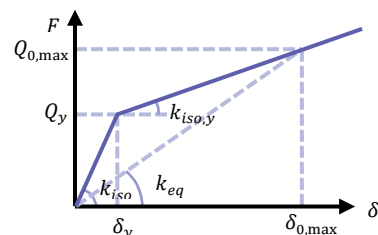


Fig. 5 免震層の変位とせん断力の関係

ここで、 Q_y 、 $Q_{0,max}$ は免震層の降伏せん断力、最大せん断力を、 δ_y は免震層の降伏変形を、 $k_{iso}(=k_f+k_s)$ 、 $k_{iso,y}(=k_f)$ 、 k_{eq} はそれぞれ免震層の初期剛性、降伏剛性、等価剛性を表している。免震層の降伏せん断力係数を α_s (以降、ダンパー量と呼ぶ)、免震層の最大せん断力係数を $\alpha_{0,max}$ とすると、免震層の降伏せん断力 Q_y と免震層の最大せん断力 $Q_{0,max}$ はそれぞれ次式より得られる。

$$Q_y = \Sigma m \cdot g \alpha_s \tag{8}$$

$$Q_{0,max} = \Sigma m \cdot g \alpha_{0,max} \tag{9}$$

ここで g は重力加速度である。
免震層の等価剛性 k_{eq} は、免震層の最大変形 $\delta_{0,max}$ を用いて次式で表される。

$$k_{eq} = \frac{Q_y}{\delta_{0,max}} \tag{10}$$

免震層の等価周期 T_{eq} は次式より算出される。

$$T_{eq} = 2\pi \sqrt{\frac{\Sigma m}{k_{eq}}} \tag{11}$$

免震層の初期剛性 k_{iso} は次で求められる。

$$k_{iso} = \frac{4\pi^2 \Sigma m}{T_{iso}^2} \tag{12}$$

降伏変形 δ_y を次に示す。

$$\delta_y = \frac{Q_y}{k_{iso}} \tag{13}$$

免震層の降伏剛性 $k_{iso,y}$ は次式で得られる。

$$k_{iso,y} = k_f = \frac{(Q_{0,max} - Q_y)}{(\delta_{0,max} - \delta_y)} \tag{14}$$

また、履歴型ダンパーの剛性 k_s は次式で求められる。

$$k_s = k_{iso} - k_f \tag{15}$$

アイソレータの周期 T_f は次式より算出される。

$$T_f = 2\pi \sqrt{\frac{\Sigma m}{k_f}} \tag{16}$$

以上の式に用いる設計用のパラメータは、免震層の最大変形 $\delta_{0,max} = 40$ cm、免震層の1次固有周期 $T_{iso} = 1.5$ s、免震層の最大せん断力係数 $\alpha_{0,max} = 0.1$ と設定した。免震層の降伏せん断力係数 α_s は $0.01 \sim 0.04$ を 0.005 刻みにした7ケースとする。以上より求めた免震層のパラメータを Table 4 に示す。

Table 4 免震層のパラメータ

α_s	T_f [s]	k_f [kN/cm]	k_s [kN/cm]	δ_y [cm]
0.01	4.20	44302	303303	0.559
0.015	4.31	42139	305465	0.838
0.02	4.42	39945	307659	1.117
0.025	4.55	37720	309885	1.396
0.03	4.70	35461	312143	1.676
0.035	4.86	33170	314434	1.955
0.04	5.04	30845	316759	2.234

3. 固有値解析

本章では、免震層の条件を変更して固有値解析を行った。解析対象は、免震層が弾性的の場合、免震層が 10 cm 変形した場合、免震層が 30 cm 変形した場合の 3 パターンである。固有値解析に用いる免震層の剛性は等価剛性 k_{eq} (Fig. 5)を用いており、Table 5 に示す。なお、免震層の降伏せん断力係数 α_s は、街区免震において最適と判断した 0.025 を採用した(本報その 2)。

Table 5 免震層の等価剛性

$\delta_{0,max}$	k_{eq} [kN/cm]
(a) $< \delta_y$	347,605
(b) 10 cm	194,149
(c) 30 cm	64,716

Table 6 に固有値解析によって得られた 1～3 次の固有周期を、かつこ内に有効質量比を示す。Fig. 8(a)～(c)は最大モードを 1 に基準化した s 次のモードベクトル $\{su\}$ を示している。それぞれ(a)に免震層が弾性的の場合($\delta_{0,max} < \delta_y$)、(b)に免震層が 10 cm 変形した場合($\delta_{0,max} = 10$ cm)、(c)に免震層が 30 cm 変形した場合($\delta_{0,max} = 30$ cm)を表す。Fig. 8(a)～(c)に着目すると、1 次モードでは免震層の変形が大きくなり k_{eq} が低下するほど免震層の値は増大しており、上部構造への影響が少なくなること建物ごとの値の差は小さくなることが確認できる。2 次モード以降は特定の建物の影響が顕著であり、(a)を除いては 2 次モードで病院(HOS)が、3 次モードで高層住宅棟(HB)の応答が支配的となっている。ここで Table 3 に示した上部構造の固有周期を確認すると、病院、高層住宅棟の順に固有周期が長くなっており、街区免震の際にも固有周期の長い建物のモードが大きく影響すると考えられる。さらに Table 6 に示す街区免震の固有周期に着目すると、2 次固有周期は病院の固有周期と近く、3 次固有周期は高層住宅棟の固有周期と一致することから、2 種類の建物の影響が大きいことがわかる。また、免震層の変形量による応答の違いについて Table 6 の有効質量比を比較することで確認できる。(a)の免震層が弾性的のときは 1 次モードが約 37%であるのに対し、(b)、(c)の免震層が降伏するときは 90%以上も支配している。このことから、免震層の変形が小さいほど高次モードの影響による上部構造の揺れが大きく、免震層の変形が大きいほど 1 次モードが占める割合が増え、Fig. 8(c)の 1 次モードのように免震層の応答が支配的であると考えられる。

4. まとめ

上部構造 11 棟を有する街区免震を対象に固有値解析を行い、上部構造の応答が街区免震全体に与える影響について検討した。免震層の変形が大きく等価剛性が低下するほど 1 次モードが上部構造に与える影響は小さくなり、街区免震全体の固有周期は長くなることが確認できた。2 次モ

ード以降は固有周期が比較的長い建物の応答が顕著であり、街区免震全体の固有周期は応答が大きい建物の固有周期に支配される傾向にあることがわかった。

Table 6 街区免震の固有周期 [s]

$\delta_{0,max}$	1 次	2 次	3 次
(a) $< \delta_y$	1.745 (0.367)	1.591 (0.180)	1.526 (0.000)
(b) 10 cm	2.086 (0.920)	1.643 (0.031)	1.526 (0.000)
(c) 30 cm	3.504 (0.997)	1.658 (0.001)	1.526 (0.000)

謝辞

本報は、日本免震構造協会 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（主査：菊地 優，北海道大学，教授）の成果の一部をまとめたものです。

参考文献

- 1) 株式会社ダイナミックデザイン. “相模原市営上九沢住宅”. Dynamic Design Inc.. 2008-11-26. <http://www.dynamic-d.co.jp/contents/design.htm>, (参照 2022-12-14)
- 2) 株式会社大林組. “ゼリー免震都市構想”. 季刊大林. 2019-05-10. https://www.obayashi.co.jp/kan_obayashi/upload/img/052_IDEA.pdf, (参照 2022-12-14)

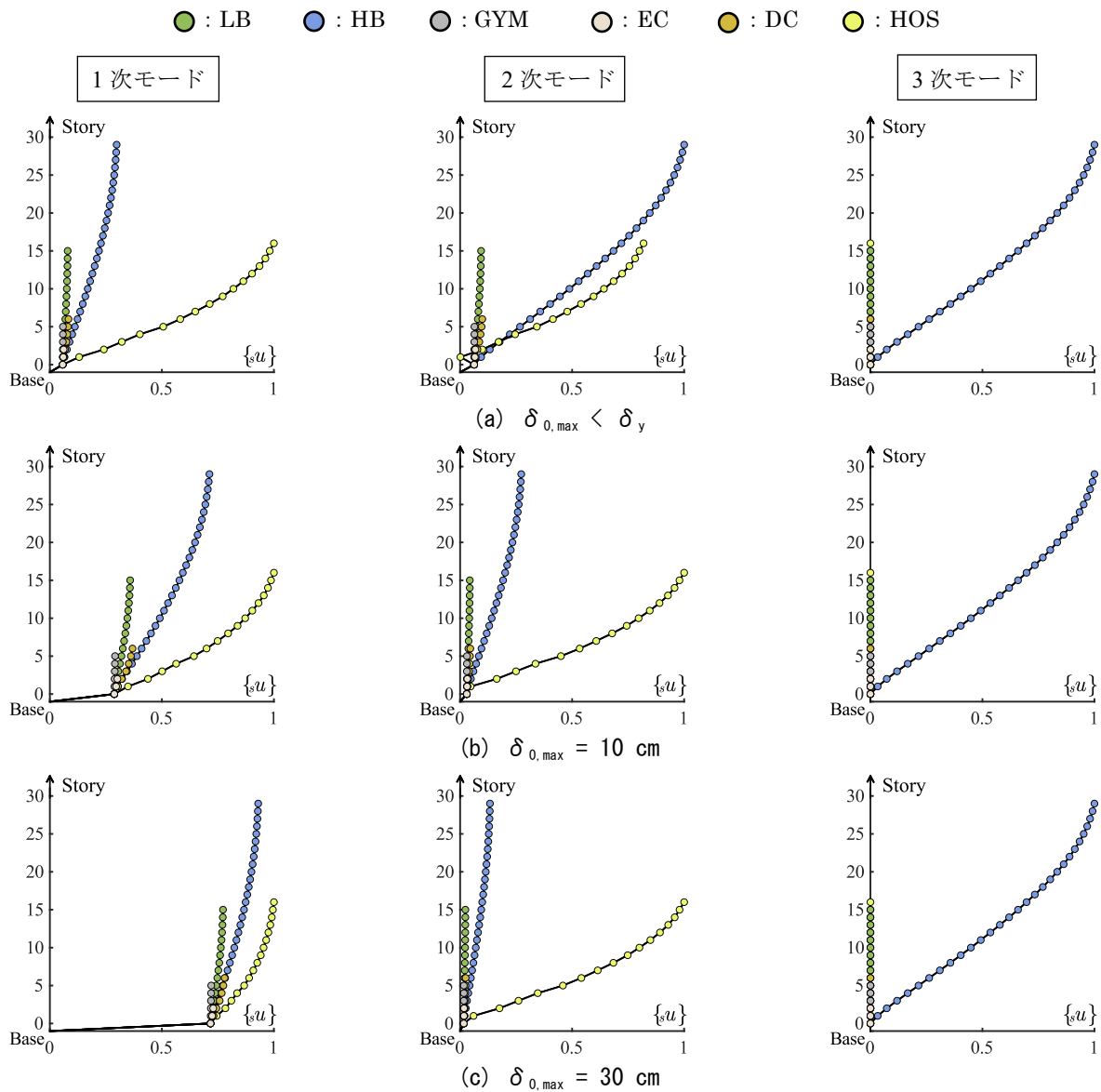


Fig. 8 固有値解析による固有モード

*1 東京工業大学 大学院生 Graduate Student, Tokyo Institute of Technology ^{*1}
 *2 東京工業大学未来産業技術研究所准教授・博士（工学） Associate Professor, FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng ^{*2}
 *3 北海道大学大学院工学研究院 教授・博士（工学） Professor, Faculty of Engineering, Hokkaido University, Dr.Eng ^{*3}