T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ Science Tokyo Research Repository

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)			
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, , , pp. 501-504		
Citation(English)	, , , 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

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 I),} 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。

Seismic response of multiple building base isolated system Part1. An investigation by eigenvalue analysis

正会員	○ 長谷川愛理	正会員	佐藤大樹
//	李晶 *1]]	^{*3} 菊地優

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Table1,2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	$[kN \cdot s^2/cm]$
-----------	---------	---------------------

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

HASEGAWA Airi, SATO Daiki, LI Jing, KIKUCHI Masaru



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。

$$C_i = a_K \cdot k_i \tag{1}$$

$$a_{K} = \frac{2 {}_{1}h_{U}}{{}_{1}\omega} = \frac{2 {}_{1}h_{U}}{2\pi/{}_{1}T_{U}}$$
(2)

ここで、 a_{K} は初期剛性比例減衰係数を、 $_{1}\omega$ 、 $_{1}h_{U}$ 、 $_{1}T_{U}$ 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、δ₁、δ₂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 k₁を既知とし下式により行う。

2次剛性 k₂, 3次剛性 k₃はそれぞれ下式より求められる。

$$k_2 = 0.30k_1 \tag{3}$$

$$k_3 = 0.01k_1$$
 (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。

$$Q_1 = 0.30Q_2$$
 (5)

第1降伏変形 δ₁, 第2降伏変形 δ₂は Fig. 4の関係から下式 により決まる。

$$\delta_1 = \frac{Q_1}{k_1} \tag{6}$$

$$\delta_2 = \delta_1 + \frac{Q_2}{k_2} \tag{7}$$

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Table3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]

14			[9]
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7m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 Table2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_v は免震層の降伏変形を、 $k_{iso}(=k_f+k_s), k_{iso,v}(=k_f)$ 、 kea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。

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

 $\langle \mathbf{0} \rangle$

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

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 Teq 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 kise は次で求められる。

$$k_{iso} = \frac{4\pi^2 \Sigma m}{{}_1 T_{iso}} \tag{12}$$

降伏変形 δ_v を次に示す。

0.02

0.025

0.03

0.035

0.04

4.42

4.55

4.70

4.86

5.04

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

免震層の降伏剛性kiso,水は次式で得られる。

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

また,履歴型ダンパーの剛性 k は次式で求められる。 $k_s = k_{iso} - k_f$ (15)

アイソレータの周期 T_fは次式より算出される。

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

307659

309885

312143

314434

316759

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 $\delta_{0,\text{max}} = 40$ cm, 免震層の1 次固有周期 $_1T_{iso} = 1.5$ s, 免 震層の最大せん断力係数 α_{0,max}=0.1 と設定した。免震層の 降伏せん断力係数 asは 0.01~0.04 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。

α_s	$T_f[\mathbf{s}]$	<i>k</i> _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

39945

37720

35461

33170

30845

Table 4 免震層のパラメータ

3. 固有值解析

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,免震層が弾性の場合,免震層が10cm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 kea(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,かっ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)に免震層が弾性の場合($\delta_{0,\max} < \delta_{\nu}$), (b) に免震層が 10 cm 変形した場合(δ_{0,max} = 10 cm), (c)に免震 層が 30 cm 変形した場合(δ_{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 keg 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で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

1.117

1.396

1.676

1.955

2.234

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。

		记展 7 回 日 同 刑	[9]
$\delta_{0,\max}$	1次	2 次	3次
(a) < δ_y	1.745	1.591	1.526
	(0.367)	(0.180)	(0.000)
(b) 10 cm	2.086	1.643	1.526
	(0.920)	(0.031)	(0.000)
(c) 30 cm	3.504	1.658	1.526
	(0.997)	(0.001)	(0.000)

Table 6 街区免震の固有周期 [s]

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

- 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.dynamicd.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/kikan_obayashi/up load/img/052_IDEA.pdf, (参照 2022-12-14)



*1 東京工業大学 大学院生

*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 $^{\ast 2}$

*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

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology *1