

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	鉄骨造の中低層免震建物の応答に固有周期が与える影響
Title(English)	
著者(和文)	付慧鑫, 渡辺泰成, 佐藤利昭, 北村春幸, 佐藤大樹, 宮川和明, 植木卓也, 村上行夫, 戸張涼太, 久保田航平
Authors(English)	Toshiaki Sato, Haruyuki Kitamura, Daiki Sato, Kazuaki Miyagawa, Takuya Ueki, Yukio MURAKAMI, Ryota TOBARI, Kohei Kubota
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 425-428
Citation(English)	, , , pp. 425-428
発行日 / Pub. date	2016, 3

## 鉄骨造の中低層免震建物の応答に固有周期が与える影響

構造—振動

鉄骨造 免震構造 中低層建物

天然ゴム系積層ゴム 履歴型ダンパー

準会員 ○ 付慧鑫<sup>\*1</sup> 正会員 渡辺泰成<sup>\*1</sup> 同 佐藤利昭<sup>\*1</sup>  
 正会員 北村春幸<sup>\*1</sup> 同 佐藤大樹<sup>\*2</sup> 同 宮川和明<sup>\*3</sup>  
 正会員 植木卓也<sup>\*4</sup> 同 村上行夫<sup>\*4</sup> 同 戸張涼太<sup>\*3</sup>  
 正会員 久保田航平<sup>\*3</sup>

### 1. はじめに

近年、インターネット通販市場の拡大により、都市近郊での物流拠点が増加している。2011年に発生した東北地方太平洋沖地震の影響で、企業は物流倉庫の災害対策に関心を強めており、特に鉄骨造に対して免震構造を採用する事例が増えている<sup>1)</sup>。鉄骨造は、RC造と比べ、上部構造の剛性が低く、固有周期が長い。固有周期が長い建物に免震構造を採用した場合、高次モードの影響で、免震効果が小さくなることが考えられる。

本研究では、固有周期の長い鉄骨造の中低層建物に免震構造を採用した場合に、免震効果が発揮される条件を調べることを目的とする。本報では、基礎的研究として、小林ら<sup>2)</sup>が着目している免震係数を参考にし、周期比を用い、応答値を整理した結果について示す。はじめに、上部構造を剛体とした場合の天然ゴム系積層ゴムアイソレータ（以降、アイソレータと呼ぶ）のみの周期、履歴ダンパー（以降、ダンパーと呼ぶ）のせん断力係数および固有周期が異なる上部構造を変えた時の上部構造の応答性状を把握する。その後、基礎固定時の上部構造の1次固有周期と上部構造を剛体とした場合の免震層の周期の比に着目し、水平地震力低減率<sup>3)</sup>と周期比、相対変位の応答倍率と周期比について検討した結果を述べる。

### 2. 検討対象モデル概要

#### 2.1 上部構造の概要

検討対象は物流倉庫を想定した、平面が67.2 m × 41.6 m、建物高さが29.1 mの地上4階建て鉄骨造建物である。階高は1~3階が7.5 m、4階が6.6 mである。基準階伏図と検討対象とする長辺方向の軸組図を図1に示す。上部構造の固有周期による応答性状の違いを検討するために、建物規模が同じで固有周期の異なる3つのモデルを作成した。今後はモデル1、モデル2、モデル3と呼ぶ。モデル1、2、3の許容応力時のベースシア係数 $C_0$ は、それぞれ0.22、0.14、0.07であり、基礎固定時の1次固有周期 $T_0$ は、それぞれ1.47 s、2.17 s、2.41 sである。図1(a)は、モデル1と2の基準階伏図である。モデル3は市松状に小梁を各スパン3本ずつ架けた。モデル1、2、3の上部構造の重量は、それぞれ194,531 kN、185,349 kN、198,650 kNであり、第1層の層剛性は、それぞれ777,000 kN/m、

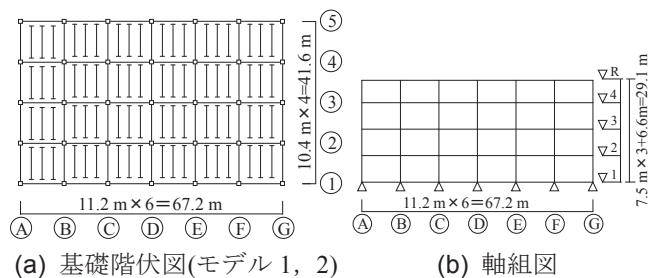


図1. 伏図と軸組図

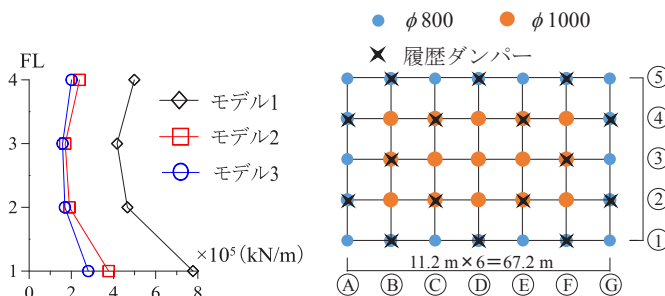


図2. 上部構造の剛性分布

図3. 免震層の配置図

377,000 kN/m、280,000 kN/mである。図2に各モデルの層剛性の高さ方向分布を示す。

解析は立体フレームモデルで行う。時刻歴応答解析では、基礎固定時の上部構造の1次固有周期 $T_0$ に対して、減衰定数 $h = 2\%$ となる初期剛性比例型の減衰を上部構造のみに与える。

#### 2.2 免震層の概要

免震層はアイソレータとダンパーで構成する。図3に、免震層の配置図を示す。アイソレータは $\phi 800$  mm、 $\phi 1000$  mmをそれぞれ、20基、15基、ダンパーは16基配置する。上部構造を剛体とした場合のアイソレータのみの周期（以降、アイソレータのみの周期と呼ぶ） $T_f$ とダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_s$ をパラメータとし、 $T_f$ は3~6 s、 $\alpha_s$ は0.01~0.05の範囲で変動させる。本報では、 $T_f$ を、アイソレータの厚みを200 mmとし、アイソレータのせん断弾性係数 $G$ を変化させることで調整することとした。ダンパーの降伏変位は30 mmとする。アイソレータは弾性、ダンパーは完全弾塑性型の復元力特性とした。表1に各モデルのアイソレータのせん断剛性の和 $\Sigma k_f$ 、表2にダンパーの水平剛性の和 $\Sigma k_s$ を示す。

表 1. アイソレータのせん断剛性の和  $\Sigma k_f$  (kN/m)

$T_f$	3s	4s	5s	6s
モデル 1	87102	48995	32357	21775
モデル 2	82747	46708	29832	20687
モデル 3	88735	50084	32010	22211

表 2. ダンパーの水平剛性の和  $\Sigma k_s$  (kN/m)

$\alpha_s$	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
モデル 1	64844	129688	194531	259375	324219
モデル 2	61783	123566	185349	247132	308915
モデル 3	66217	132433	198650	264866	331083

### 3. 時刻歴応答解析による検討

#### 3.1 解析用入力地震動の概要

解析用入力地震動は、1968 年十勝沖地震の八戸港湾記録 EW 成分を位相特性に用い、コーナー周期 0.64 s 以降

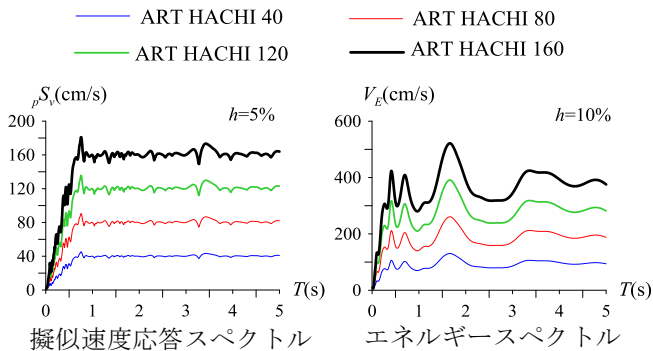
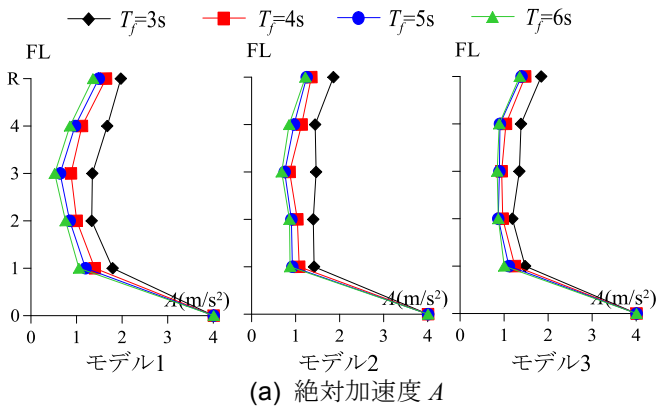
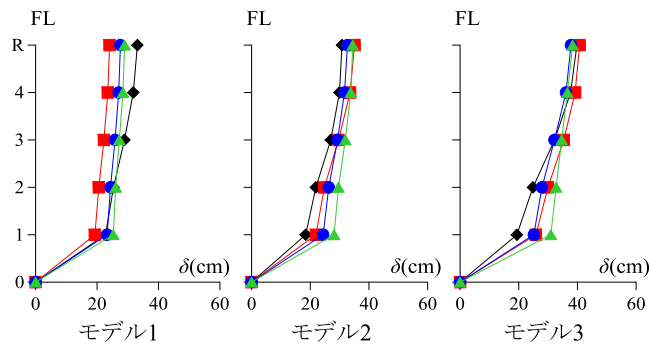


図 4. 解析用入力地震動のスペクトル



(a) 絶対加速度  $A$



(b) 相対変位  $\delta$

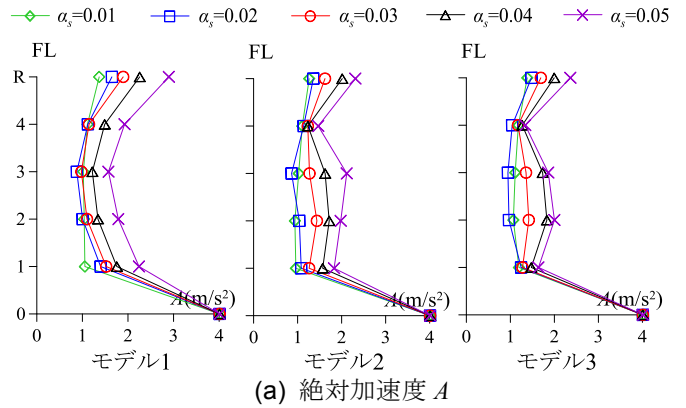
図 5.  $T_f$  をパラメータとした場合 ( $\alpha_s=0.02$ )

で擬似速度応答スペクトル  ${}_pS_v$  ( $h=5\%$ ) が 80 cm/s で一定となる告示波の入力レベルを 0.5 倍, 1.0 倍, 1.5 倍, 2.0 倍した地震動を使用し, それぞれ ART HACHI 40, ART HACHI 80, ART HACHI 120, ART HACHI 160 と呼ぶ。図 4 に, 解析用入力地震動の  ${}_pS_v$  ( $h=5\%$ ) とエネルギースペクトル  $V_E$  ( $h=10\%$ ) を示す。

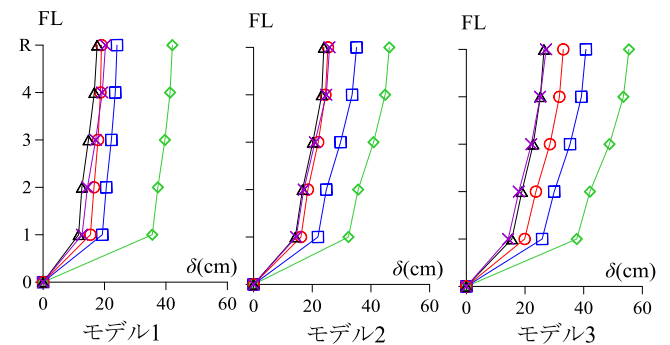
#### 3.2 解析パラメータの変化による応答性状の検討

上部構造の絶対加速度  $A$  と地面に対する相対変位  $\delta$  の高さ方向分布に, アイソレータのみの周期  $T_f$ , ダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_s$  および基礎固定時の上部構造の 1 次固有周期  $T_0$  が与える影響について検討する。図 5 に, ダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_s$  を 0.02, アイソレータのみの周期  $T_f$  をパラメータとした場合, 図 6 に,  $T_f$  を 4 s,  $\alpha_s$  をパラメータとした場合の絶対加速度  $A$  と相対変位  $\delta$  の高さ方向分布をモデルごとに示す。解析用入力地震動は ART HACHI 80 とした。

図 5 より,  $T_f$  が 4s 以上で絶対加速度  $A$  は小さくなることと,  $T_f$  の変化による, 絶対加速度  $A$  と相対変位  $\delta$  の応答の変化は小さいことが確認できる。一方で, 図 6 より,  $\alpha_s$  の変化による,  $A$  と  $\delta$  の応答の変化は大きく,  $\alpha_s$  が大きくなるに従い,  $A$  は大きく,  $\delta$  は小さくなること分かる。これは, 免震層の層剛性が高くなり, 周期が短くなったためである。表 1, 2 から明らかなように, ダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_s$  が変化することによる免震層の層剛性の変化は, アイソレータのみの周期  $T_f$  が変化した場合よりも大きい。



(a) 絶対加速度  $A$



(b) 相対変位  $\delta$

図 6.  $\alpha_s$  をパラメータとした場合 ( $T_f=4s$ )

モデルの違いによる絶対加速度  $A$  と相対変位  $\delta$  の高さ方向分布の変化に着目する。図 6(a)より、モデル 1 は、ダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_s$  によらず、3 階に  $A$  の最小値が現れることが確認できる。それに対して、モデル 2 とモデル 3 は、 $\alpha_s$  が 0.03 以上の範囲で、2 階、3 階と R 階の  $A$  が増加し、4 階はほとんど変化がない。これは、上部構造の第 1 層の層剛性とダンパー群の水平剛性の和の比  $b_s$  が小さくなり、高次モードの影響が大きくなるためだと考えられる<sup>4),5)</sup>。したがって、ダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_s$  が同じ場合でも、上部構造の剛性の違いにより、絶対加速度  $A$  の高さ方向の分布形状が異なる。

図 5、図 6 より、モデルの違いによる相対変位  $\delta$  の高さ方向分布の形状の変化は、絶対加速度  $A$  の場合と比べ、小さいことが分かる。これは、 $\delta$  は  $A$  より周期の違いによる影響が小さいためである。モデル 2 とモデル 3 の層間変位は、モデル 1 より大きい。したがって、アイソレータのみの周期  $T_f$  とダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_s$  が同じ場合、モデル 2 とモデル 3 よりモデル 1 のほうが、免震効果が大きいと言え、基礎固定時の上部構造の 1 次固有周期  $T_0$  が短いほうが、免震構造を採用したことによる応答の低減効果が大きいと考えられる。

#### 4. 周期比に基づく検討

##### 4.1 周期比と評価指標の概要

前章の検討から、基礎固定時の上部構造の 1 次固有周期  $T_0$  が免震構造の応答の最大値や高さ方向分布に与える影響が大きいことが分かった。したがって、4 章では、 $T_0$  とアイソレータのみの周期  $T_f$  (ダンパーの二次勾配が 0 のため、ダンパーが降伏後の免震層の二次剛性に対する免震層の周期と言える)、あるいは上部構造が剛体時の免震層の初期剛性に対する固有周期  $T$  との周期比に着目する。4.2 節では、二次周期比  $T_0/T_f$ 、4.3 節では、初期周期比  $T_0/T$  を用いて検討する。免震構造としたことによる応答の低減効果の指標は水平地震力低減率、高さ方向分布の評価は相対変位の応答倍率  $\delta_i/\delta_1$  (以降、応答倍率と呼ぶ) を用いる。水平地震力低減率は、非免震構造での上部構造の最大応答せん断力に対する免震構造での上部構造の最大応答せん断力の比である。

##### 4.2 二次周期比 $T_0/T_f$ に基づく検討

ダンパーが降伏した後は、アイソレータのみの周期  $T_f$  が上部構造の応答に大きな影響を与えられられるため、二次周期比  $T_0/T_f$  について検討する。図 7 に、モデル 1 に入力レベルの異なる 4 種類の地震動を入力した場合、図 8 に、すべてのモデルに ART HACHI 80 を入力した場合の水平地震力低減率と二次周期比  $T_0/T_f$  の関係を示す。

図 7 より、地震動の入力レベルによらず、二次周期比  $T_0/T_f$  の増加に伴い、水平地震力の低減は小さくなることが分かる。図 8 より、二次周期比  $T_0/T_f$  が小さいほど、水平地震力の低減は大きい、モデルの違いによるばらつ

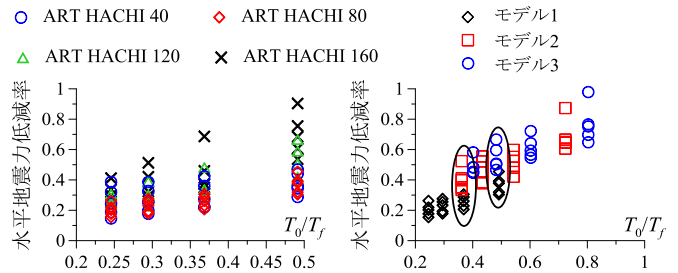
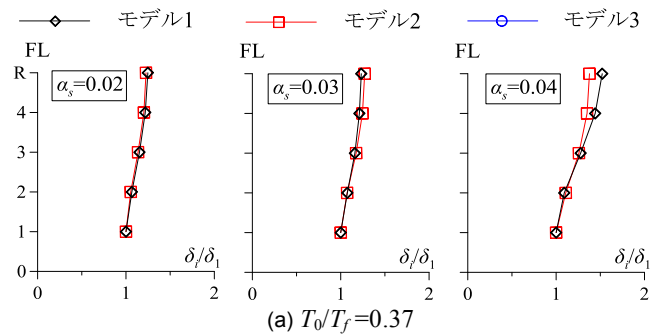
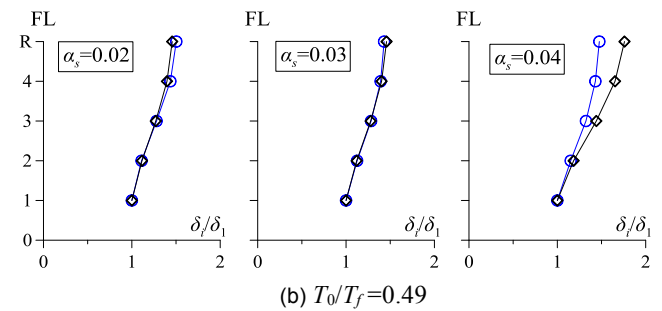


図 7. 入力地震動の影響 (モデル 1)

図 8.  $T_0$  の影響 (ART HACHI 80)



(a)  $T_0/T_f=0.37$



(b)  $T_0/T_f=0.49$

図 9.  $T_0/T_f$  が同じ場合の相対変位の応答倍率 (ART HACHI 80)

きが確認できる。二次周期比  $T_0/T_f$  が同じである、0.37 ( $T_f$  が 4 s のモデル 1 と  $T_f$  が 6 s のモデル 2)、0.49 ( $T_f$  が 3 s のモデル 1 と  $T_f$  が 5 s のモデル 3) の場合、基礎固定時の上部構造の 1 次固有周期  $T_0$  が小さいモデル 1 は、他のモデルと比較して、水平地震力の低減が大きい。

次に、応答倍率  $\delta_i/\delta_1$  の高さ方向分布の形状を検討する。二次周期比  $T_0/T_f$  が 0.37、0.49 で、ダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_s$  が同じ場合の応答倍率  $\delta_i/\delta_1$  を図 9 に示す。解析用入力地震動は ART HACHI 80 とする。

図 9 より、二次周期比  $T_0/T_f$  が同じ場合、ダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_s$  が 0.03 以下では、応答倍率  $\delta_i/\delta_1$  は概ね一致することが確認できる。 $\alpha_s$  が 0.04 の場合では、応答倍率  $\delta_i/\delta_1$  に差が現れる。これは、上部構造の剛性が低く、ダンパーの投入量の影響を受けやすいためだと考えられる。したがって、次節では、ダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_s$  の影響を含めた周期比について検討する。

##### 4.3 初期周期比 $T_0/T$ に基づく検討

ダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_s$  の影響を考慮し、初期周期比  $T_0/T$  について検討する。図 10 に、モデル 1 に入力レベルの異なる 4 種類の地震動を入力した場合、図 11 に、

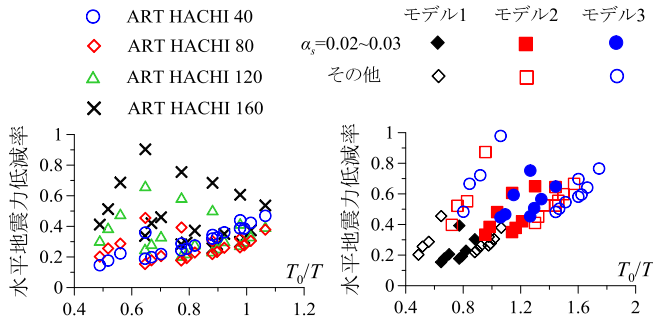


図 10. 入力地震動の影響  
(モデル 1)

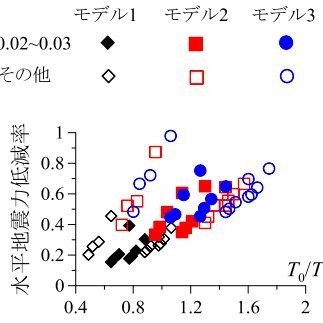


図 11.  $T_0$  の影響  
(ART HACHI 80)

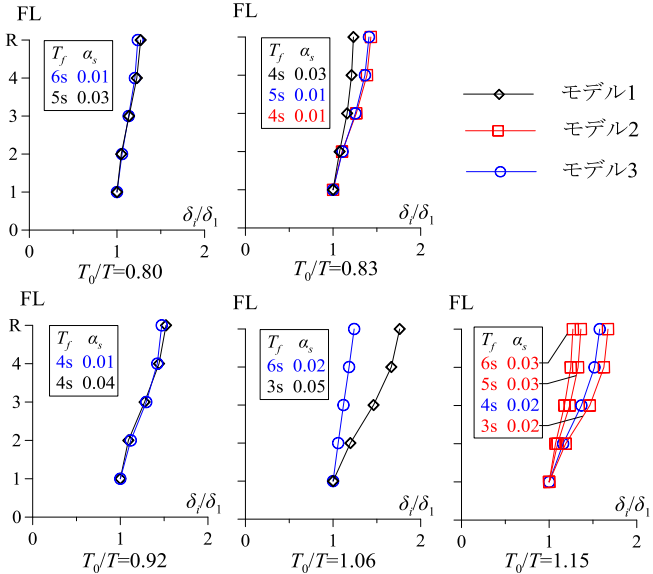


図 12.  $T_0/T$  が同じ場合の相対変位の応答倍率  
(ART HACHI 80)

すべてのモデルに ART HACHI 80 を入力した場合の水平地震力低減率と初期周期比  $T_0/T$  の関係を示す。

図 10 より、ART HACHI 40、ART HACHI 80 が入力した場合、初期周期比  $T_0/T$  の増加に伴い、水平地震力の低減は小さくなることが確認できる。ART HACHI 120、ART HACHI 160 を入力した場合、初期周期比  $T_0/T$  が 0.65 程度で水平地震力の低減は最も小さくなり、以降は、初期周期比  $T_0/T$  が大きくなるに従って、水平地震力の低減は大きくなる。地震動の入力レベルの違いによる傾向の変化は、上部構造の塑性化のためだと考えられる。

図 11 より、水平地震力の低減は、ダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_s$  が 0.02、あるいは 0.03 で最も大きくなることが分かる。 $\alpha_s$  が同じ場合、初期周期比  $T_0/T$  が大きいほど、水平地震力の低減は小さくなる。基礎固定時の上部構造の 1 次固有周期  $T_0$  が同じ、かつ、初期周期比  $T_0/T$  が同じ場合でも、水平地震力低減率は差が現れ、アイソレータのみの周期  $T_f$  が大きいほど、水平地震力の低減は大きい。

次に、応答倍率  $\delta_i/\delta_1$  の高さ方向分布の形状について検討する。初期周期比  $T_0/T$  が 0.80、0.83、0.92、1.06、1.15 の場合の応答倍率  $\delta_i/\delta_1$  を図 12 に示す。解析用入力地震動は ART HACHI 80 とする。

図 12 より、初期周期比  $T_0/T$  が 0.92 での R 階の応答倍率が、初期周期比  $T_0/T$  が 0.80、0.83 の場合と比較して明らかに大きいことが分かる。初期周期比  $T_0/T$  が同じであっても、初期周期比  $T_0/T$  が 1.06 の場合のように、応答倍率  $\delta_i/\delta_1$  の差が大きいパターンが存在する。アイソレータのみの周期  $T_f$  が 6 s、ダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_s$  が 0.02 のモデル 3 のほうが、 $T_f$  が 3 s、 $\alpha_s$  が 0.05 のモデル 1 よりも、応答倍率  $\delta_i/\delta_1$  が小さい。したがって、 $\alpha_s$  が小さいほうが、応答倍率  $\delta_i/\delta_1$  が小さく、免震構造を採用したことによる応答の低減が大きいと考えられる。

## 5. まとめ

本報では、RC 構造と比較して、固有周期の長い鉄骨造の中低層建物に免震構造を採用した場合に、免震効果が大きくなる条件を調べることを目的とした研究の基礎的研究として、免震層のアイソレータのみの周期、ダンパーの降伏せん断力係数および基礎固定時の上部構造の 1 次固有周期をパラメータとした場合の時刻歴応答解析による応答性状を把握し、水平地震力低減率、相対変位の応答倍率と二次周期比  $T_0/T_f$ 、あるいは初期周期比  $T_0/T$  に関する検討をした。限られた検討の範囲ではあるが、以下に得られた知見を示す。

- (1) 本検討の範囲では、アイソレータのみの周期が 4s 以上、また、ダンパーの降伏せん断力係数が 0.03 以下で、上部構造の絶対加速度が小さい。
- (2) 本報の建物は、上部構造の剛性が低く、1 次固有周期が長い場合、ダンパーの降伏せん断力係数が大きい場合、高次モードの影響が大きく、上部構造の各層の応答の差が大きい。
- (3) ダンパーの降伏せん断力係数が同じ場合、二次周期比の増加に伴い、水平地震力の低減は小さくなる。
- (4) アイソレータのみの周期が同じ場合、ダンパーの降伏せん断力係数が 0.02~0.03 で、水平地震力の低減が大きい。
- (5) 相対変位の応答倍率から、初期周期比が 0.83 以下で免震効果が大きいと考えられる。初期周期比が 0.83 を超えても、ダンパーの降伏せん断力係数が小さい場合に、免震効果が大きいパターンがある。

## 参考文献

- 1) 西川博明(2015):「駅チカ」免震「カフェ」…変わる物流施設、ネット通販の急拡大と人手不足がプッシュ、URL: <http://www.sankei.com/west/news/150309/wst1503090001-n1.html> (参照 2015.1.7)
- 2) 小林正人他: 免震部材の多様化に対応した免震建物の設計用地震荷重分布, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻, 第 676 号, pp.859-868, 2012.6
- 3) 小倉他: 高層免震建物の地震応答特性に関する検討, 日本建築学会技術報告集, 第 5 号, pp.47-51, 1997.12
- 4) 日本建築学会: 免震構造設計指針, pp.73-110, 1993
- 5) 猿田正明他: 免震建築物の高次振動モード評価に関する研究(その 1)~(その 3), 日本建築学会大会学術講演梗概集(B-2), pp.921-926,2009

- \*1 東京理科大学  
\*3 JFE シビル株式会社

- \*2 東京工業大学  
\*4 JFE スチール株式会社