

## 超高層住宅の地震応答特性－耐震・制震・免震の比較－

野 路 利 幸\*

### Study on Seismic Response Characteristics for High-rise Apartment Buildings－Comparison of Earthquake Resistant System ,Structural Control System and Base-isolated System－

Toshiyuki NOJI

Since 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, many high-rise apartment buildings designed by structural control system and base-isolated system have been built around big cities. In this study, the structural design of these new design systems and the existing earthquake resistant design system were investigated. Also, the seismic response analyses for 33-story and 20-story model of high-rise apartment buildings were performed. As a result, the structural design features and the seismic response characteristics of each structural system were demonstrated.

#### 1. はじめに

日本の超高層住宅は1970年ころからはじまり、特に1980年代後半から首都圏や阪神地域を中心に大都市圏に数多く建設されてきた。これらの超高層住宅の構造方式は、当初は従来からの耐震構造によって設計されていた。しかし、1995年兵庫県南部地震以降、新たな構造方式として技術開発された制震構造や免震構造が多く適用されるようになり、最近ではこれらの構造方式が全設計件数の半数近くにのぼっている。

超高層住宅の建物概要および構造設計概要は、(財)日本建築センター発行「ビルディングレター」の超高層建築物性能評価・評定シートに掲載されている<sup>1)</sup>。筆者らは本シートをもとに超高層住宅構造設計情報データベースを作成し、建物の基本構造特性、耐震設計法、およびこれらの時系列変化の調査・分析を行ってきた<sup>2),3)</sup>。他方、和泉らは高強度コンクリートを使用した建物の分析を行い、特に鉄筋コンクリート(RC)造超高層住宅について使用材料や構造特性の特徴を報告している<sup>4)</sup>。

本研究はこれらの研究結果を踏まえ、まず最近10年間の設計情報を、「耐震・制震・免震」の比較という観点から分析する。次に、33階建、20階建のモデル建物の地震応答解析を行い、各構造方式の応答特性を比較・検討する。以上の結果から、耐震・制震・免震構造の設計法の特長および地震応答特性を論じる。

---

\* 建設工学科建築学専攻

## 2. 耐震・制震・免震構造の構造設計の比較

ビルディングレターの評価シートにもとづいて、1997 年以降 2006 年までの 10 年間の設計物件について「耐震・制震・免震」の比較・分析を行う。対象建物数は耐震構造が 262 棟（60%）、制震構造が 86 棟（20%）、免震構造が 89 棟（20%）の合計 437 棟である。図 1 に 10 年間の超高層住宅における構造方式の変遷を示す。40～50 棟／年の設計棟数の中で、1997 年から制震・免震が本格的に適用されはじめた。その後、徐々に制震・免震の割合が増加し、2004 年以降はこれらの構造方式が半数以上を占めるようになっている。

各構造方式の構造種別を図 2 に示す。高強度 RC 造の開発・実用化に伴って全方式とも RC 造が多く、特に免震は RC 造が 95%を超える。これに対し制震は他の構造方式に比べて RC 造が少なく、鉄骨鉄筋コンクリート（SRC）造や鋼管コンクリート（CFT）造が多く採用されている。

図 3 に各構造方式の階数分布を示す。耐震・免震が 20～30 階が主であるのに対して、制震は

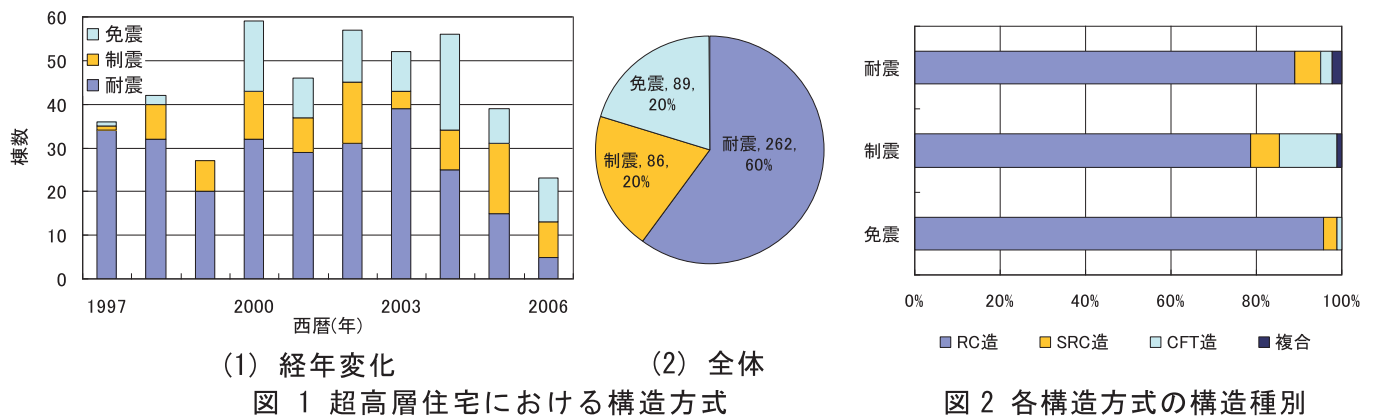
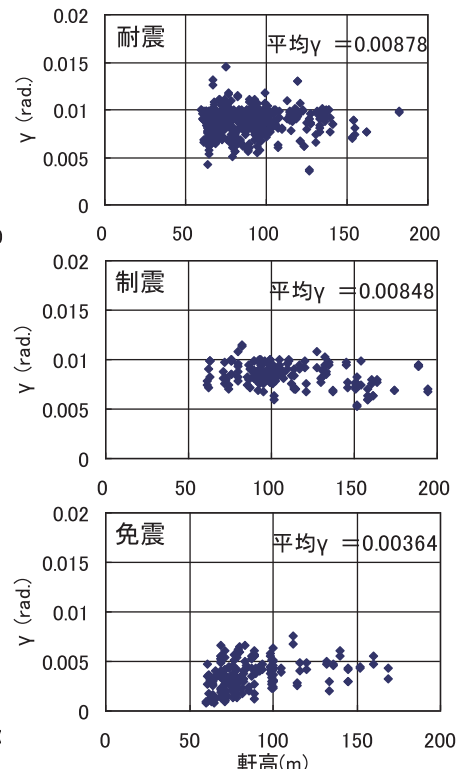
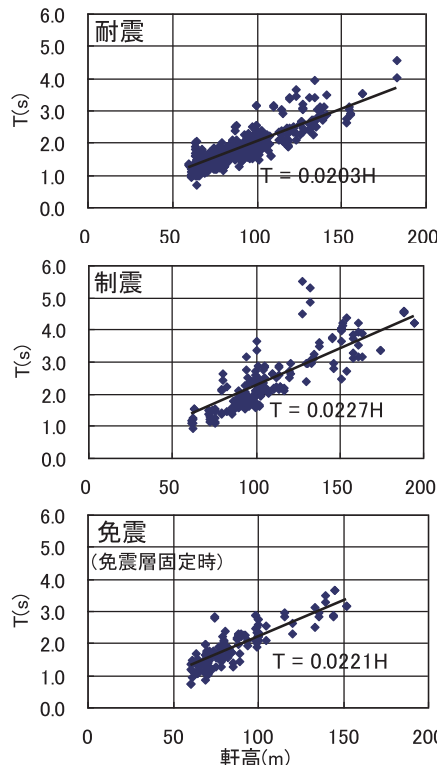
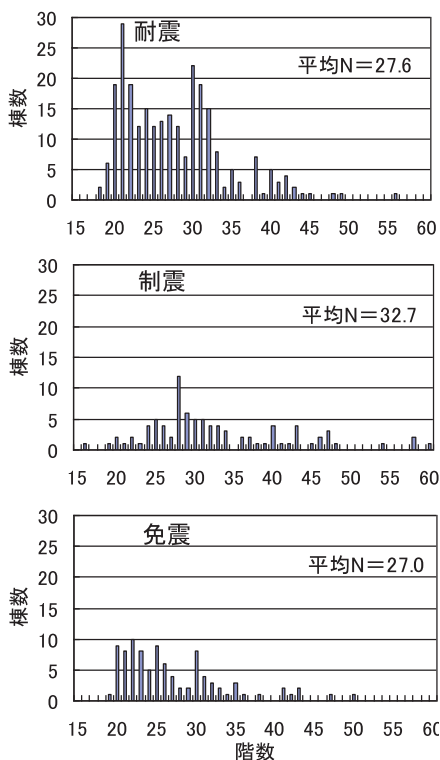


図 2 各構造方式の構造種別



30 階程度を主に幅広く分布している。高層建物への適用が多いことも CFT 造や SRC 造が多いことにつながっていると考えられる。

図 4 に軒高 (H) と 1 次固有周期 (T) (免震は免震層固定時) の関係を比較する。いずれの構造方式も軒高が高くなるにつれて 1 次固有周期は大きくなり、これらの関係は、耐震では  $T=0.0203H$ 、制震では  $T=0.0227H$ 、免震では  $T=0.0221H$  で近似される。したがって、主体構造の剛性は耐震が最も大きく、次いで免震、制震と評価される。制震の剛性が低い理由としては、高層建物が多いこと、CFT 造や SRC 造が多いことその他、粘性系や粘弾性系ダンパーの使用の影響が考えられる。

図 5 に軒高とレベル 2 (L2) 地震時最大層間変形角の関係を示す。耐震では  $1/100 \sim 1/150$  が多数であるが、 $1/100$  を上回るものも多い。制震では  $1/100 \sim 1/150$  が大多数である。他方、免震では  $1/200$  以下が多いが、 $1/150 \sim 1/200$  にも分布している。中低層免震建物における応答結果と比べて高層建物ではかなり層間変形が大きいといえる。免震構造において上部構造の変形およびエネルギー吸収をどこまで許容するかは重要な課題である。

### 3. 耐震・制震・免震構造の地震応答特性

#### 3.1 対象建物

検討対象建物は、地上 33 階・地下なし、軒高が約 108m、平面がほぼ正方形のタワー型高層集合住宅の試設計建物、およびこれの下層 20 層を切り出したものの 2 建物である。主体構造は鉄筋コンクリート造の純ラーメン構造である。1 階床を固定とした時の 33 階建の 1 次固有周期は、前章の結果を参考に、 $T=0.02H$ =約 2.1 秒となるように重量および剛性を調整した。本検討では以上を耐震構造モデルとして基本モデルとした。ここで、制震構造や免震構造の場合、本来ならば上部構造躯体の設計は耐震構造と異なるが、本解析では単純化のため、制震・免震構造とも上部構造は同一とした。この基本モデルに対して、制震構造モデルは各層間に粘性系ダンパーを設置し、免震構造モデルは 1 階床と基礎の間に積層ゴムと弾塑性ダンパーから成る水平ばねの免震部材を挿入した。

#### 3.2 解析条件

##### (1) 振動解析モデル

図 6 に地震応答解析に用いる耐震・制震・免震構造の振動解析モデルを示す。上部構造の剛性は、構造物全体の曲げ成分と柱梁フレームのせん断成分を考慮した曲げせん断棒とした。耐震構造および制震構造モデルは、2 階から R 階の各階床位置に質量を集約した 33 質点系および 20 質点系とした。制震ダンパーは粘性系ダンパーを各層に配置した。免震構造モデルは基礎免震とし、耐震構造モデルの 1 階床に質点を設け、基礎部に積層ゴムのばねと弾塑性ダンパーの履歴減衰を付加した。表 1 に振動解析モデルの共通事項を示す。

##### (2) 振動緒元

表 2 に 33 階建モデルの上部構造の振動緒元を示す。復元力特性は曲げに関しては弾性、せん断に関しては剛性低減型トリリニア (武田モデル) とした。上部構造の減衰は内部粘性型 (瞬間剛

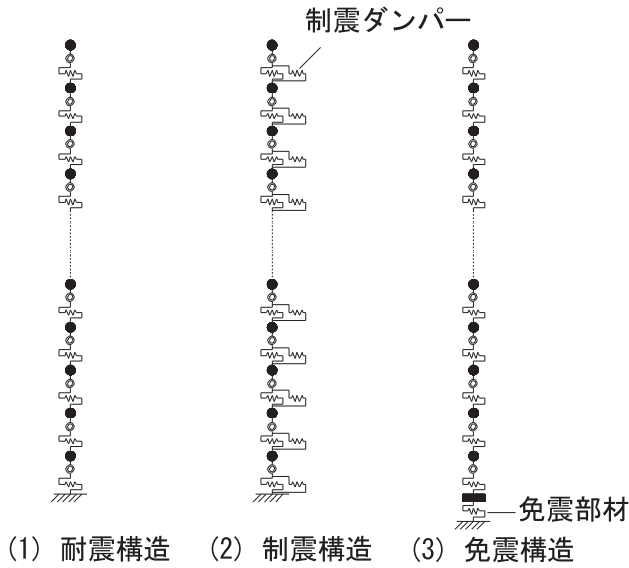


図 6 振動解析モデル

表 1 共通事項

部位	
上部構造	<ul style="list-style-type: none"> <li>・曲げせん断棒</li> <li>・復元力特性 曲げ:線形 せん断:剛性低減トリリニア(武田モデル)</li> <li>・減衰 内部粘性係 1次3%(瞬間剛性比例)</li> </ul>
制震ダンパー	・粘性系ダンパー(線形)
免震部材	<ul style="list-style-type: none"> <li>・天然系積層ゴム+弾塑性ダンパー</li> <li>・弾塑性ダンパー 降伏変位:3.0cm 降伏せん断力係数:0.03</li> </ul>

表 2 振動諸元

質点	質量(t)	階高(m)	EI(kN・m <sup>2</sup> )	GA(kN/m <sup>2</sup> )
33	2115	3.20	7.406E+09	1.759E+11
32	1436	3.18	1.787E+10	1.728E+11
31	1436	3.18	3.096E+10	1.667E+11
30	1436	3.18	4.331E+10	1.722E+11
29	1443	3.18	5.405E+10	1.734E+11
28	1450	3.18	6.443E+10	1.776E+11
27	1450	3.18	8.876E+10	1.852E+11
26	1450	3.18	1.079E+11	1.952E+11
25	1450	3.18	1.287E+11	1.982E+11
24	1450	3.18	1.357E+11	2.008E+11
23	1450	3.18	1.382E+11	2.070E+11
22	1471	3.18	1.389E+11	2.233E+11
21	1497	3.18	1.617E+11	2.242E+11
20	1496	3.18	1.582E+11	2.233E+11
19	1495	3.18	1.632E+11	2.224E+11
18	1518	3.18	1.714E+11	2.286E+11
17	1522	3.18	1.793E+11	2.265E+11
16	1522	3.18	1.771E+11	2.303E+11
15	1522	3.18	1.799E+11	2.291E+11
14	1522	3.18	1.812E+11	2.377E+11
13	1522	3.18	1.934E+11	2.355E+11
12	1522	3.18	1.893E+11	2.408E+11
11	1545	3.18	1.915E+11	2.404E+11
10	1548	3.18	2.047E+11	2.467E+11
9	1548	3.18	2.039E+11	2.456E+11
8	1548	3.18	2.025E+11	2.602E+11
7	1548	3.18	2.035E+11	2.670E+11
6	1548	3.18	2.105E+11	2.732E+11
5	1550	3.18	2.078E+11	2.730E+11
4	1552	3.18	2.038E+11	2.848E+11
3	1552	3.18	2.042E+11	2.963E+11
2	1663	4.00	2.026E+11	3.380E+11
1	2090	5.70	1.976E+11	6.483E+11

EI: 曲げ剛性 GA: せん断剛性

性) とし、1 次振動数に対して減衰定数  $h_1=0.03$  とした。

#### (3) 制震ダンパー

制震ダンパーは粘性系ダンパーとし、各層のせん断変形分に線形の粘性減衰を付加した。付加減衰は、ケース A として  $h_a=0.01$ 、ケース B としてケース A の 2 倍の  $h_a=0.02$  の 2 ケースを設定した。

#### (4) 免震部材

免震部材は積層ゴムと弾塑性ダンパーから成るものとし、免震周期（上部構造を剛体とし、ダンパーを無視した積層ゴムのみによる周期）がケース 1 として  $T=3.5$  秒、ケース 2 として  $T=4.0$  秒の 2 ケースを設定した。弾塑性ダンパーは鋼材ダンパーを想定し、降伏変位  $\delta_y=3.0$  cm、降伏せん断力係数  $\alpha_s=0.03$  の完全弾塑性型とした。積層ゴム、ダンパーとも内部粘性減衰は無視し、0 とした。なお、積層ゴムの鉛直変位による免震層のロッキング成分は無視した。

#### (5) 入力地震動

入力地震動は既往の観測地震波（既存波）および告示波とした。既存波は、エルセントロ 1940 NS (ELC)、タフト 1952 EW (TAFT)、八戸 1968 NS (HACHI) の 3 波で、最大速度を 50 cm/s に基準化した。告示波は極稀地震時のスペクトルをターゲットスペクトルとした人工地震波 3 波で、位相特性はエルセントロ 1940 NS (告 ELC)、八戸 1968 NS (告 hachi)、JMA (神戸海洋気象

台) 1995 NS (告 JMA) である。

### 3.3 固有周期、振動モード

図 7 に 33 階建の耐震・制震構造モデルおよび免震構造モデル (ケース 1、鋼材ダンパー無視時) の無減衰固有振動モードと固有周期を示す。また、表 3 に複素固有値解析による制震構造モデルのモーダル減衰定数を示す。耐震・制震構造と免震構造では、固有振動モードおよび固有周期が大きく異なることが分かる。免震では免震層の変形に加えて上部構造でも変形が認められる。同様に、図 8 に 20 階建の無減衰固有振動モードと固有周期を、表 4 に制震構造モデルのモーダル減衰定数を示す。免震では上部構造の変形成分は 33 階建に比べてかなり小さい。

なお、図 9、10 に本解析モデルの固有周期 (上部構造 1 次固有周期、免震構造 L2 地震時固有周期) を前章の設計情報と比較して、本解析の位置づけを示す。

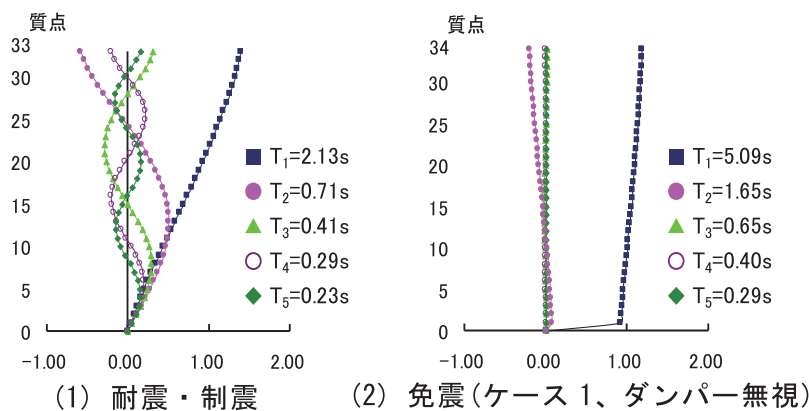


図 7 固有周期・振動モード (33F)

表 3 モーダル減衰定数 (33F)

次数	ケースA ( $h_a=0.01$ )	ケースB ( $h_a=0.02$ )
1	0.037	0.045
2	0.116	0.141
3	0.207	0.257
4	0.293	0.368

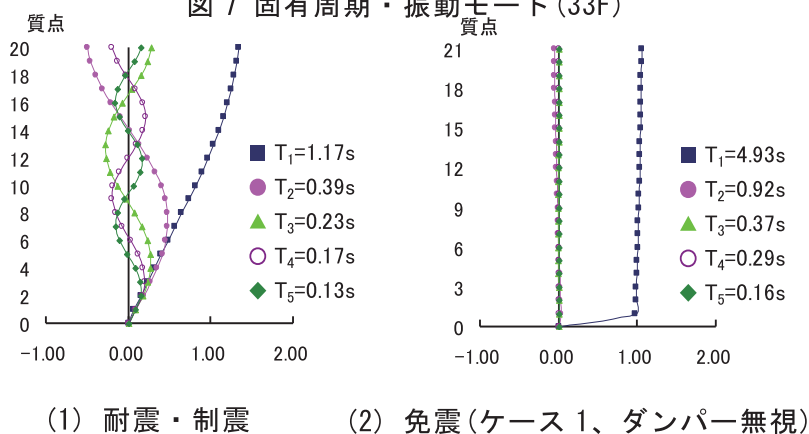


図 8 固有周期・振動モード (20F)

表 4 モーダル減衰定数 (20F)

次数	ケースA ( $h_a=0.01$ )	ケースB ( $h_a=0.02$ )
1	0.039	0.047
2	0.117	0.145
3	0.202	0.252
4	0.282	0.354

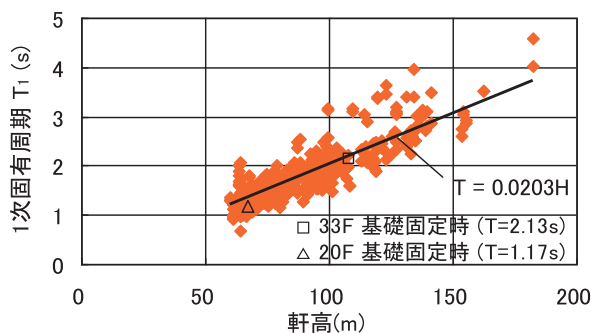


図 9 軒高-1 次固有周期

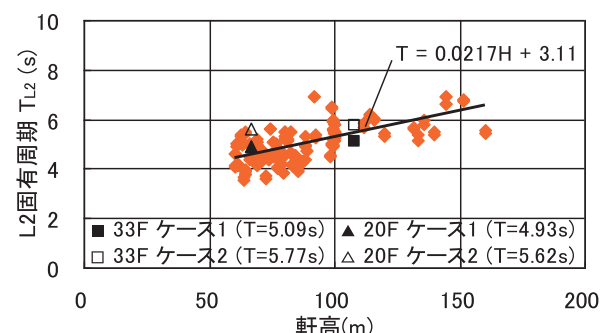


図 10 軒高-L2 固有周期



### 3.4 応答結果

#### (1) 33 階建モデル

図 11 に耐震構造、制震構造（ケース A）、免震構造（ケース 1）の最大応答値（絶対加速度、相対変位、層間変形角）を示す。耐震構造では、絶対加速度以外は既存波（ELC、TAFT、HACHI）に比べて、全般的に告示波が大きい応答値を示し、特に告 hachi、告 JMA が大きい。絶対加速度は上部であまり増幅されないため、ELC、TAFT が下層階で大きい。最大層間変形角は告 JMA で 0.0107 (1/93) である。制震構造では、絶対加速度以外は既存波に比べて全般的に告示波が大きい応答を示し、特に告 ELC、告 JMA が大きい。絶対加速度は耐震と同様に上部であまり増幅されないため、ELC、TAFT が下層階で大きい。最大層間変形角は告 ELC で 0.0086 (1/116) である。免震構造では、耐震・制震に比べて加速度応答が大きく減っていること、基礎部（免震層）で大きな変位を生じていることが特徴的である。全般的に告示波が大きな応答を示す。免震層の最大変位は 38cm、上部構造の最大層間変形角は 0.0067 (1/150) で、いずれも告 ELC である。ただし、免震層のロッキングを無視しているため、応答がやや小さ目に出ていることに留意しておく必要がある。

図 12 に耐震、制震 A・B ケース、免震 1・2 ケースの計 5 ケースの応答結果を全地震波の平均値で比較して示す。絶対加速度は、全般的に耐震＞制震＞免震となっている。耐震は下層階で大きく、中～上層で小さくなるが、最上階付近ではまた大きくなる傾向を示す。制震は下層階で大きく、上層階にいくほど小さくなる。免震は全層にわたって小さい。相対変位は、頂部では免震耐震＞制震となっている。免震は、免震層と上部構造で変形をほぼ半分に分担している。免震層の最大変位は 51cm である。層間変形角は、全体として耐震＞制震＞免震である。ただし、免震の層間変形角はケース 1 で 0.0067 (1/150)、ケース 2 で 0.0059 (1/169) であり、低～中層建物のように画期的に上部構造の応答が減じられていないことに留意する必要がある。

#### (2) 20 階建モデル

図 13 に耐震構造、制震構造（ケース A）、免震構造（ケース 1）の最大応答値を示す。耐震構造では、絶対加速度はほぼ全層にわたって ELC、TAFT が大きな応答を示す。相対変位および層間変位は ELC、HACHI、告 JMA が大きい応答値を示す。最大層間変形角は ELC で 0.0092 (1/108) である。制震構造では、絶対加速度はほぼ全層にわたって ELC、TAFT が大きな応答を示す。相対変位および層間変位は ELC、HACHI、告 JMA が大きい応答値を示す。最大層間変形角は告 ELC で 0.083 (1/121) である。免震構造では、33 階建てと同様に耐震・制震に比べて加速度応答が大きく減り、免震層で大きな変位を生じる。ただし、先に述べたように免震層のロッキングを無視しているため、応答がやや小さ目に出ていることに留意しておく必要がある。全般的に告 ELC、告 JMA が大きな応答を示す。免震層の最大変位は 46cm、上部構造の最大層間変形角は 0.0043 (1/234) で、いずれも告 ELC である。

図 14 に応答結果を全地震波の平均値で比較して示す。絶対加速度は、全般的に耐震＞制震＞免震となっている。耐震・制震に比べて免震は全層にわたって小さい。相対変位は免震が大きく、

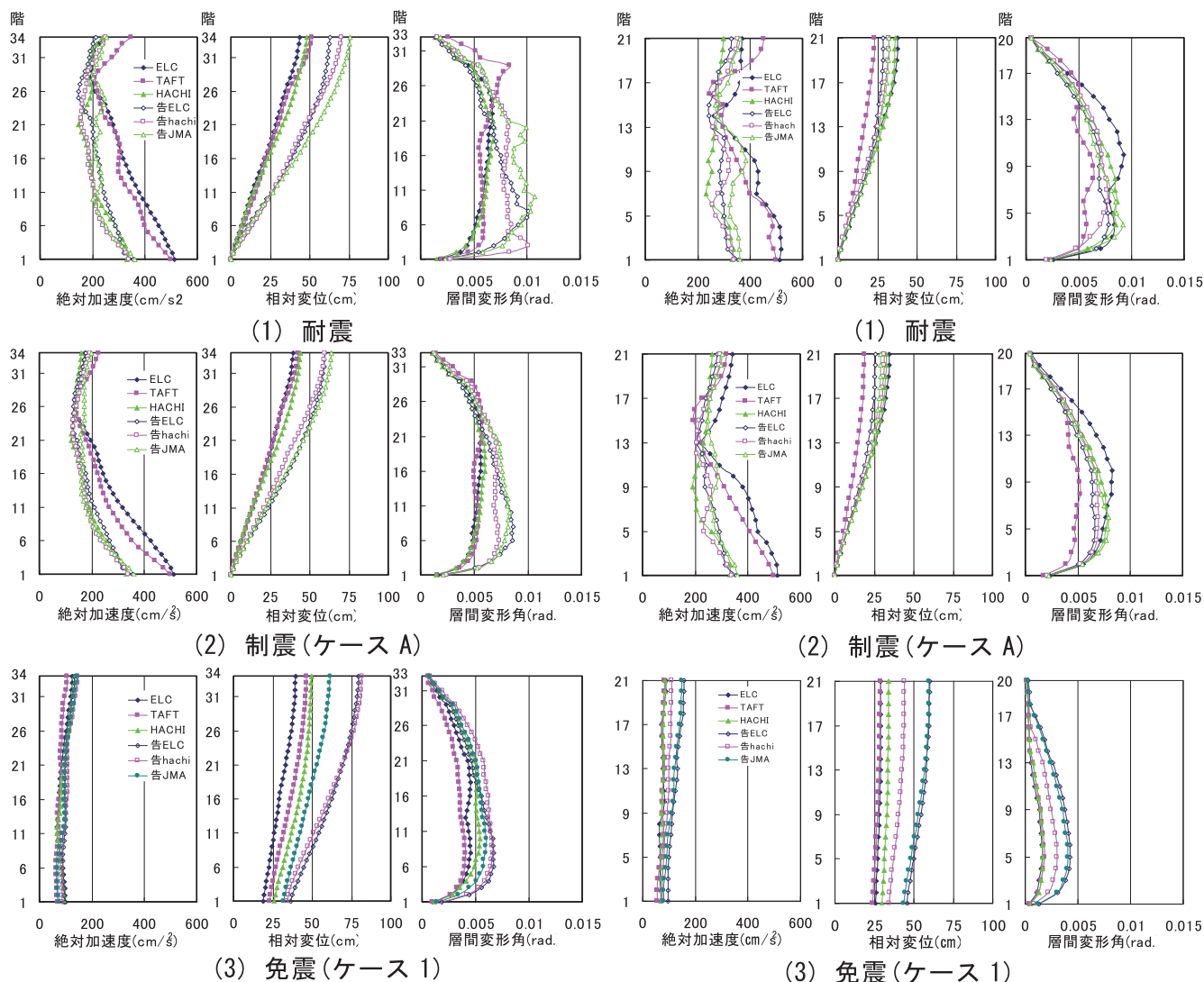


図 11 応答結果 (33 階)

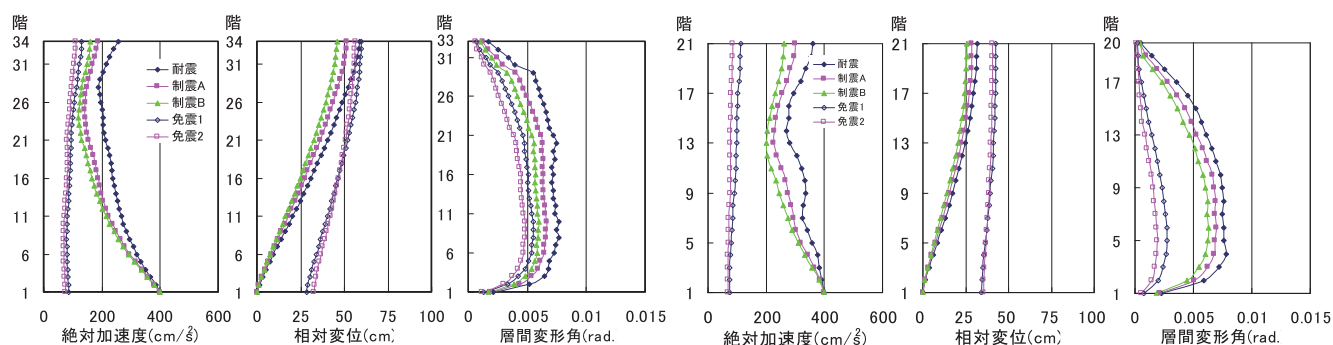


図 12 応答値の比較 (33F、6 波平均値)

図 13 応答結果 (20 階)

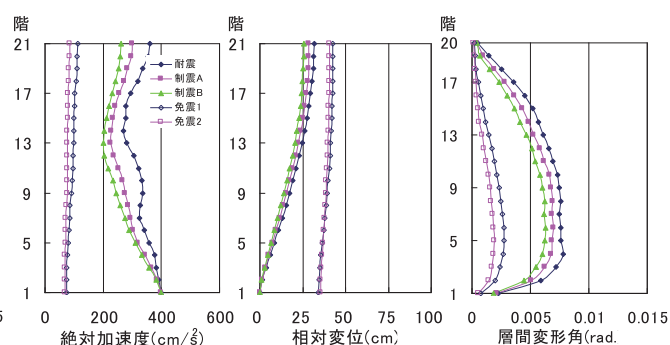


図 14 応答値の比較 (20F、6 波平均値)

免震層が大半の変形を分担している。免震層の最大変位は 48cm である。層間変形角は、耐震＞制震＞免震で、免震の上部構造の変形はかなり小さい。

#### 4. むすび

超高層住宅における「耐震・制震・免震」の比較という観点から、各構造方式の設計情報を分析し、モデル建物の地震応答解析を行った。最近 10 年間の設計の分析からは、各構造方式の階数分布、建物剛性、L2 地震時最大層間変形角の特徴を明らかにした。また、33 階建、20 階建の地

震応答解析からは、耐震・制震・免震の加速度応答や変位応答特性を把握した。設計にあたっては、これらの特性を十分把握した上で、要求性能にあった構造方式を選択することが重要である。

ただし、本解析では、入力地震動を現行一般に用いられているものを採用している。建物の長周期化が進む中、プレート境界型等の巨大地震時における長周期地震動に対する設計をどう考えるかについては、別途慎重に考慮する必要がある。また、高次の減衰に対する考え方も今後の重要な課題である。

**謝辞** 本研究にあたり、三井住友建設（株）山中久幸氏・有松重雄氏・平田裕一氏・小田稔氏・山岸邦彰氏、平成 20 年度福井工業大学建築学専攻卒業研究生北垣充隆氏・工藤晃輔氏から多大なご協力をいただきました。ここに記して深く謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) (財)日本建築センター：ビルディングレター
- 2) 有松重雄他：超高層住宅の構造設計法の調査・分析（その 1）、（その 2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.197-200、2007 年 8 月
- 3) 小田稔他：超高層住宅の構造設計法の調査・分析（その 3）耐震・制震・免震の比較、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.137-138、2008 年 9 月
- 4) 和泉信之他：超高強度コンクリート技術の現状 第 6 章 適用建物、日本建築学会大会 PD 資料、pp.48-53、2007 年 8 月

(平成 21 年 3 月 31 日受理)