

# 超高層マンションにおける 免震・制振ハイブリッド構造の研究

高原伸一\* 北山裕人\*\* 近藤秀信\*\*\* 中里太亮\*\*\*\*

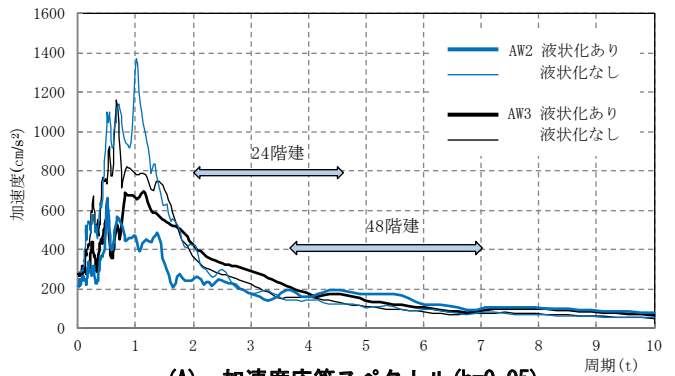
免震構造の特徴は建物の固有周期を長周期化することにより、地震動の短周期成分を免震層でほぼ絶縁し、やや長周期成分に対して免震層が応答することにあるが、液状化の可能性が高い地盤ではこのやや長周期となる2~10秒で地震動が増幅することが予測される。これまで40~50階の超高層マンションを中間層免震構造として設計したが、今後予定される50階程度の建物をモデルとして、免震構造と各種制振装置との組合せによる応答性状やエネルギー吸収比率などハイブリッド構造の有効性について研究を行った。

キーワード：免震構造、制振構造、ハイブリッド構造、地盤の液状化

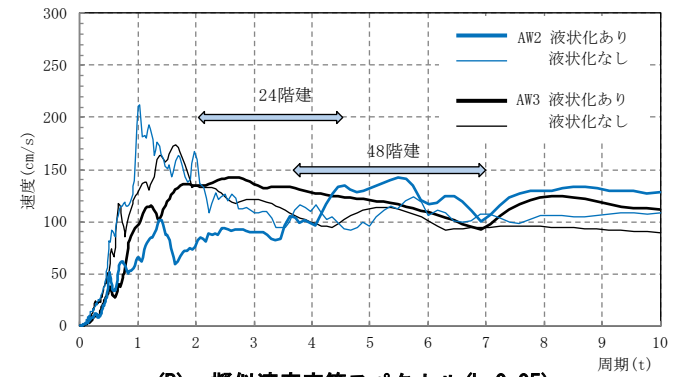
## 1. はじめに

免震構造の特徴は、建物の固有周期を長周期化することにより、地震動の短周期成分の入力を免震層でほぼ絶縁し、やや長周期成分の入力に対して免震層が応答することにあるが、液状化の可能性が高い地盤では、地盤が液状化しない場合に比べ、液状化した場合に Fig.1 のようにやや長周期となる2~10秒で、地震動の擬似速度応答スペクトルやエネルギースペクトルは小さくならないことが予測される。

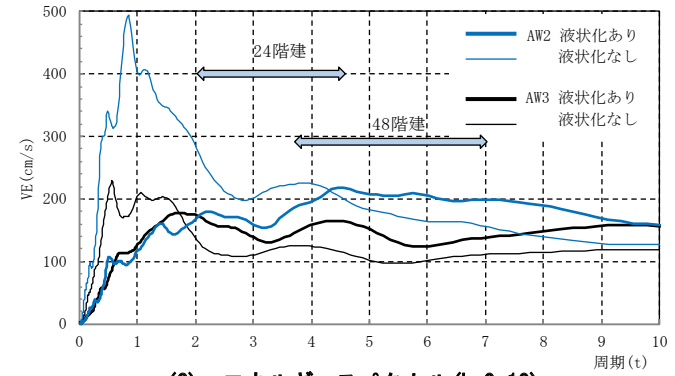
48階建て高さ170m程度の超高層マンションにおいて、建物固有周期が免震効果を考慮しない場合で3.5秒、極めて稀な地震動レベル2相当の免震層変形時で7秒程度と長周期化を図った場合、加速度としては200cm/s<sup>2</sup>から80cm/s<sup>2</sup>と50%以上低下となるが、応答速度や入力エネルギーとしては、ほぼ一定の値となる事を示しており、等価固有周期が2秒から4.5秒程度の24階建て85mの高層マンションの傾向とはやや異なり、免震層の過大な変形や減衰性能の設定に十分な注意を払う必要があること示している。ただし、免震層のダンパー性能を大きくすることは、大地震での安全性は高まるものの、中小地震の場合の上部構造の床応答加速度や層間変形に対する低減効果、構造部材の損傷に対する低減効果は少なくなる。ここでは、地盤の液状化によりやや長周期成分にパワーがシフトした地震動に対して、標準的なダンパー性能を付与した48階建て中間層免震建物とその上部構造に各種制振装置を組合せた建物の応答性状の比較を行い、免震構造とのハイブリッド構造の有効性について研究を行った。



(A) 加速度応答スペクトル(h=0.05)



(B) 擬似速度応答スペクトル(h=0.05)



(C) エネルギースペクトル(h=0.10)

Fig.1 入力地震動と建物等価周期の関係

\* 建築事業本部設計本部  
 \*\* 建築事業本部設計本部構造設計部第1グループ  
 \*\*\* 建築事業本部設計本部構造設計部第2グループ  
 \*\*\*\* 建築事業本部建築技術統括部建築構造技術部

## 2. 検討モデルの概要

### 2. 1 建物概要

検討する建物のベースモデルは、Fig. 2 に示すような48階建て中間層免震構造で、1階～5階が供用施設階、免震層は6層目にあり免震構造となる住宅階は43層で、平面形状は60m×62mの長方形、住宅階は建物中央部が吹抜けとなっている。建物高さは176.8m、免震構造部分は高さ151.4m（搭状比は2.52）となっている。

構造種別は鉄筋コンクリート造、架構形式は供用施設階、住宅階とも純ラーメン構造としている。部材断面は、柱が□-950×950～1050×1050、□-1350×1350、大梁がBxD=660×950～660×1000、780×1200としており、コンクリート強度は、供用施設階で柱Fc80、大梁床Fc51、住宅階では柱Fc80～36、大梁床Fc51～36としている。

免震装置は、鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB, φ-1600～1700mm)を主とし、建物中央部に弾性すべり支承(SSR, □-1300～1400mm)、隅角部に天然ゴム系積層ゴム支承

(NRB, φ-1600mm)を配置し、最大減衰力1000kN（バイリニア特性）の免震用オイルダンパー(OD)を減衰機構として付加している。

建物重量は地震時積載荷重に対して、建物全体で2,587,500kN（約259,000t）、免震層より上部で2,113,000kN（約211,300t）あり、次ページのFig. 3に示す免震層の地震時の復元力特性として、降伏荷重は支承材の剛性を含め約49,500kN(4,950t)あり、重量比で2.35%と標準的なダンパー量となっている。また、建物の短辺方向の等価固有周期はTable1に示すように、免震層固定と仮定した場合に約3.9秒、地震動入力レベル2相当400mm変形時では約7秒となっている。尚、再現期間500年の風荷重が、鉛プラグの降伏荷重以下になるよう免震材料を配置している。

Table1 建物短辺方向の等価周期 (単位:s)

免震層固定	微小変形時 (20mm)	レベル1相当 (200mm)	レベル2相当 (400mm)
3.88	4.46	6.14	6.97

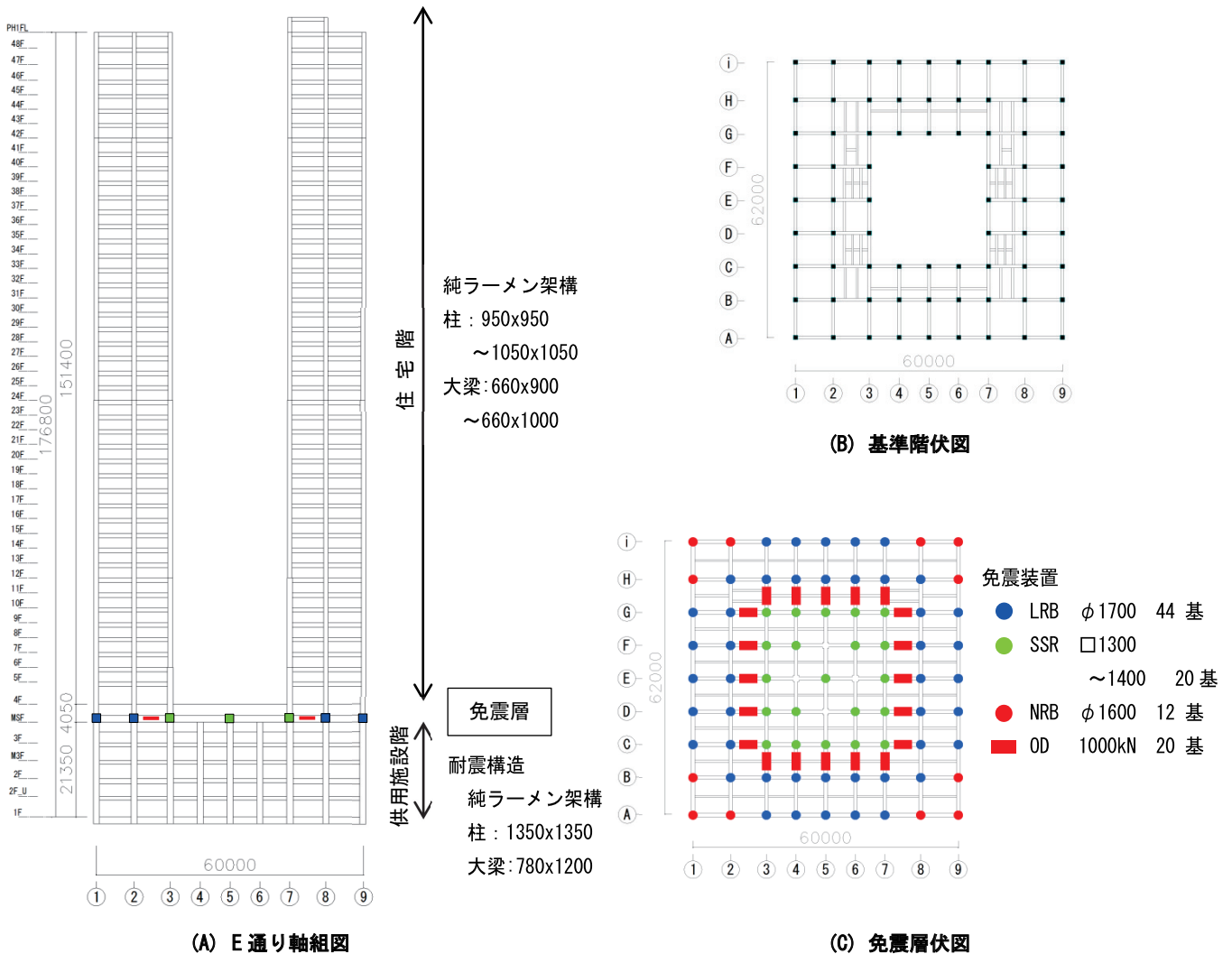


Fig. 2 検討建物概要

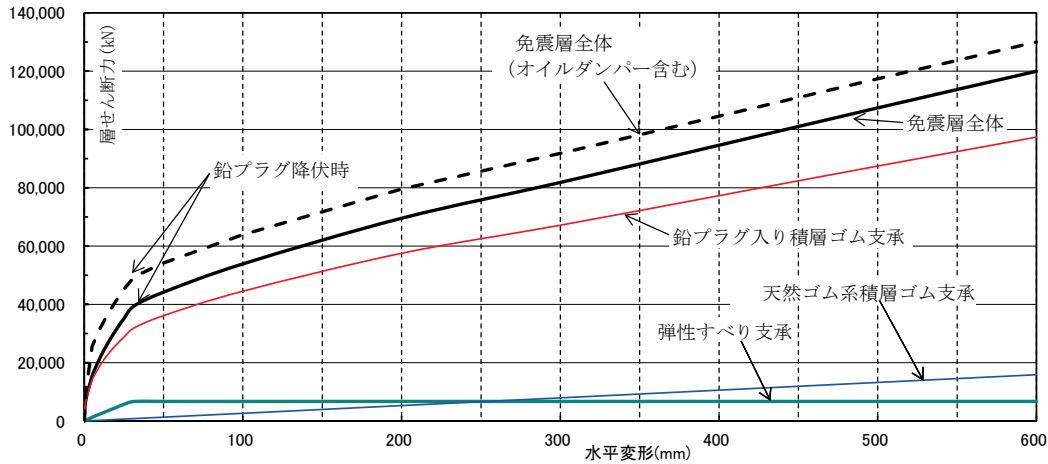


Fig. 3 免震層の地震時復元力特性

### 2. 2 敷地地盤の概要

検討モデルの敷地地盤は、東京湾岸の荒川や旧利根川により作られた低湿地を1946年以降に埋立て造成した敷地とし、表層から深度15m程度までが液状化の可能性の高い地盤とする。Fig. 4に代表孔での孔内検層結果を示し、地盤特性を以下に記載する。

- ・深度50m以深の砂礫層（S波速度750m/s）が工学的基盤の上端と想定される。
- ・常時微動計測等の解析結果より地盤の卓越周期は0.39s付近で第二種地盤と判定される。また、深部地盤構造を考慮した解析結果から長周期領域の卓越周期は7.1s付近と想定される。
- ・液状化の発生については、PL値は設計用水平加速度200galで8.7~16.8で「液状化の可能性は高い~極めて高い」、350galでは20.4~36.6で「液状化の可能性は極めて高い」と判定される。また、地盤変位の略算予測(Dcy)値は、200galで13.8~26.1で「影響は中~大」、350galで21.4~26.7で「影響は大」と判定される。

### 2. 3 検討用地震波の概要

検討用地震波は、告示波によるレベル2の模擬地震動波形とした。模擬地震波の位相は観測地震動を用い、プレート境界型地震における位相情報が反映されていると考えられるHACHINOHE 1968 NSによるもの(AW2)と陸域の浅い直下型地震の位相情報が反映されていると考えられるJMA KOBE 1995 NSによる(AW3)を採用した。この2波形につき、液状化層を考慮した場合と考慮しない場合の2ケースの4地震波による検討を行った。液状化に対する詳細検討は、有効応力解析（解析プログラム：FLIP）<sup>1)</sup>を行っている。Table. 2に4地震波の概要を示す。

また、加速度応答スペクトル、擬似速度応答スペクトル、エネルギースペクトルはFig. 1に示している。

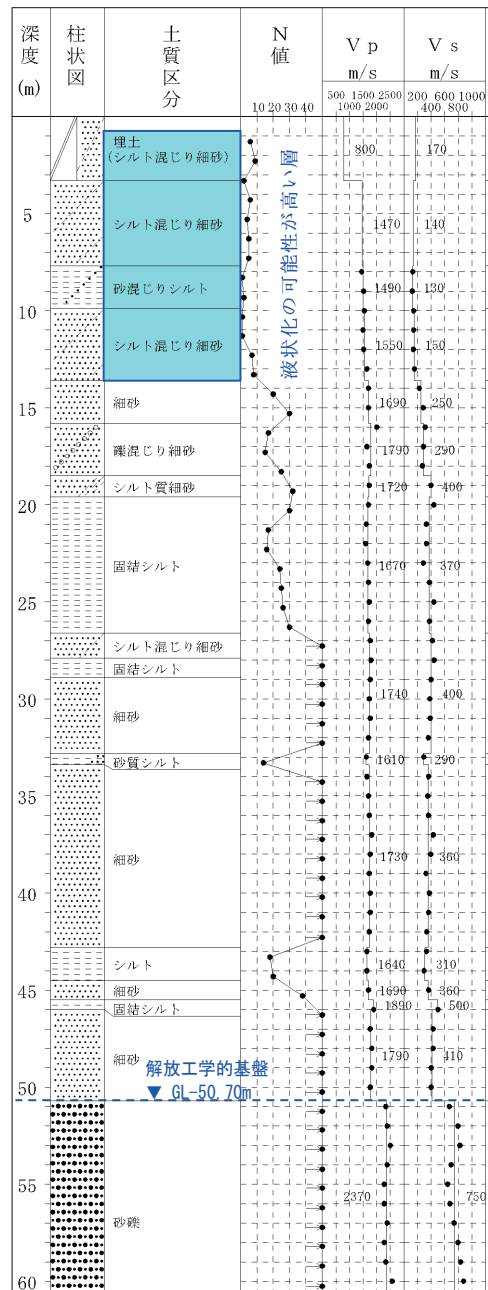


Fig. 4 孔内検層結果図

Table2 検討用地震動諸元

地震波	位相特性	継続時間 (s)	刻み時間 (s)	液状化	最大加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	最大速度 (cm/s)	最大変位 (cm)
AW2	HACHINOHE 1968 NS	230	0.01	なし	283.9	72.85	44.85
				あり	216.0	52.45	68.77
AW3	JMA KOBE 1995 NS	60	0.02	なし	273.0	63.66	57.33
				あり	273.9	76.48	45.35

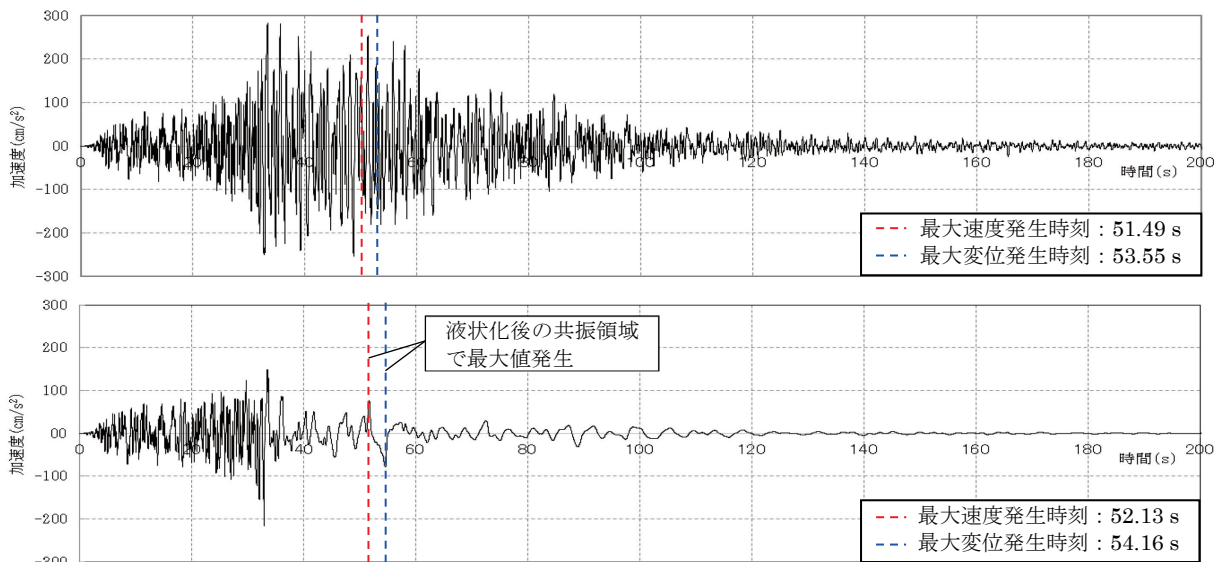


Fig.5 AW2 加速度時刻歴波形

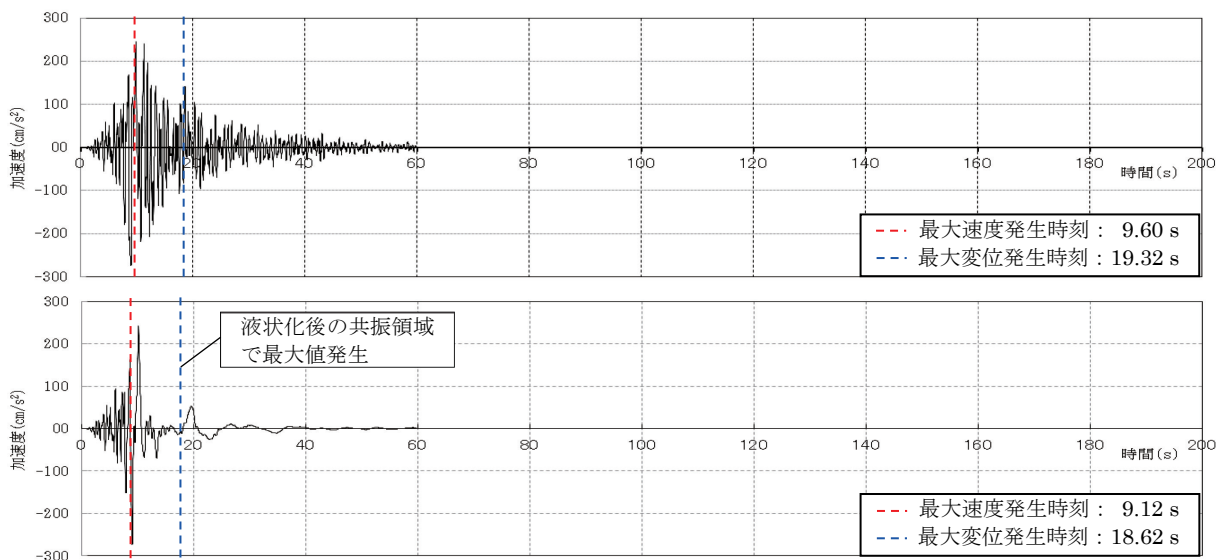


Fig.6 AW3 加速度時刻歴波形

## 2. 4 上部構造に配置する制振装置

上部構造に配置する制振装置は、粘性減衰型と履歴減衰型の2種類とし応答性状の比較を行った。粘性減衰型は制振用オイルダンパー（リリース速度6.4cm/s、最大減衰力2000kN、ストローク80mm）、履歴減衰型は制振用座屈拘束ブレース（LY225）とし、一般的に普及している装置とした。制振装置の配置はFig.7に示すように、平面的

には建物使用に影響が少なくメンテナンス可能な吹抜け部側フレームに逆V型で均等で、高さ方向は4階から層間変形が大きくなる中間層32階まで29層とした。また、オイルダンパーのリリース荷重と座屈拘束ブレースの降伏軸力（Py=1500kN）が同じで各階のダンパー量が同じとなるように設定した。

各方向の各階ダンパー量  $\Sigma Q_y=16,960\text{kN}$   
 各方向の総ダンパー量  $\Sigma \Sigma Q_y=491,840\text{kN}$   
 各階の地震時重量  $W_i=47,650\text{kN}$   
 ダンパー比  $\Sigma Q_y/W_i=0.356$   
 4階から上層の地震時重量  $\Sigma W_i=2,022,000\text{kN}$   
 ダンパー比  $\Sigma \Sigma Q_y/\Sigma W_i=0.243$

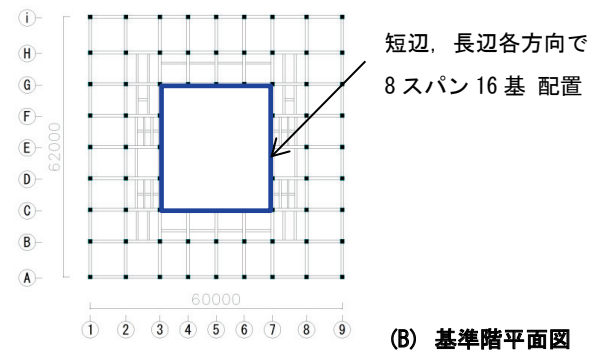
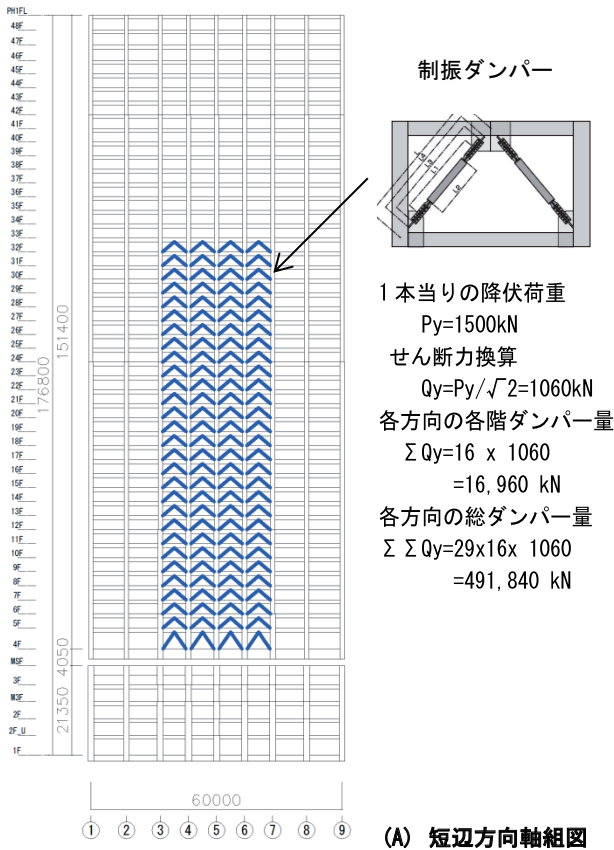


Fig. 7 制振ダンパーの配置

### 2. 5 質点系解析モデルの概要

地震動に対する時刻歴応答解析を行った質点系解析モデルの概要を Fig. 8 に示す. 今回比較検討する制振ダンパーは層のせん断変形に作用タイプであるため, 上部構造の復元力は曲げせん断分離型モデル<sup>2)</sup>とし, 建物全体曲げ変形とせん断変形を分離した. 建物全体の曲げ剛性は, 静的荷重増分解析結果の初期弾性状態での柱の軸変形と軸力のエネルギー保存則から求めた等価曲げ剛性を

各階の回転ばねとして評価した. 内部粘性減衰は瞬間剛性比例型で1次定数2%とし, 免震装置および制振装置の性能変動を考慮した.

解析プログラムは RESP-D(構造計画研究所)を使用した.

Table 3 各モデルの建物短辺方向の等価周期 (単位:s)

	免震層固定	微小変形時 (20mm)	レバ <sup>°</sup> φ1相当 (200mm)	レバ <sup>°</sup> φ2相当 (400mm)
免震構造	3.884	4.463	6.139	6.972
+座屈拘束ブレース	3.574	4.190	5.969	6.830
+オイルダンパー	3.888	4.469	6.143	6.976

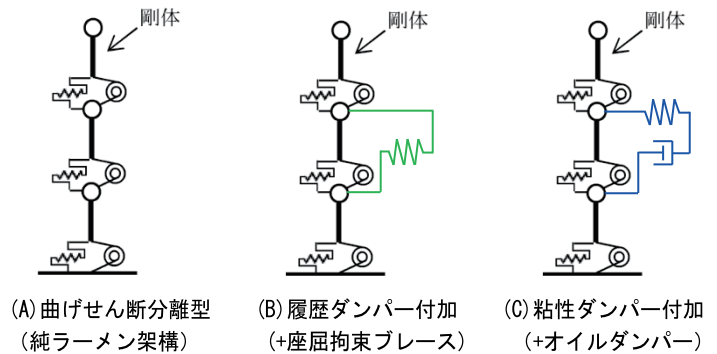


Fig. 8 質点系振動解析モデル

### 3. 応答解析結果の概要

時刻歴応答解析による最大応答値を Fig. 9, 10 及び Table5 に示し, 消費エネルギーの比較を Table4 及び Fig. 11 に示す.

最大応答値で液状化ありとなしの場合を比較すると, 最大応答加速度は液状化なしの方が大きくなるが, その他最大応答変形, 最大応答変形角, 最大応答層せん断力では, 液状化ありの方が50~70%程度応答が大きくなっており, 地盤の液状化による地震動のやや長周期領域での増幅の影響が大きい事を示している. 特に応答変形, 変形角での差が大きく, 比較検討のベースとした免震構造では, 高層免震構造建物の設計での目安とされている最大応答層間変形角が1/150を越える層が多く生じている. これに対して制振装置を付加配置した場合は, 1/150を概ね満足する. ただし, やや長周期成分の位相を含んでいる告示波 AW2 の液状化ありの場合は, 20階まで免震構造のみのケースとほぼ変わらず 1/150を越える値となっている. これはこの範囲の層間速度が小さくオイルダンパーが有効に機能しないためと思われる.

エネルギー消費割合は, 一般的に中高層免震構造建物では免震層で約80~90%となるが, 本モデルのような超高層建物では60~70%と低下し, 相対的に上部構造のフレームのひずみエネルギーの割合が増え, 本検討の免震構造の場合, 上部構造のひずみエネルギー分担は20%程度となっている.

液状化なしでは、上部構造に付加した制振装置のエネルギー消費割合は履歴減衰型では1%に満たず、粘性減衰型は7~12%と装置で差があるが、応答値では免震構造のみの場合と目立った差は生じていない。

液状化ありでは、座屈拘束ブレース3.4%、オイルダン

パー7.6%のエネルギー消費となり、その分上部構造のエネルギー消費割合が低下する。座屈拘束ブレースは上部構造の剛性増にも寄与し建物等価固有周期が0.15~0.3s程度短くなり、上部構造のエネルギー消費割合が5%低下する。

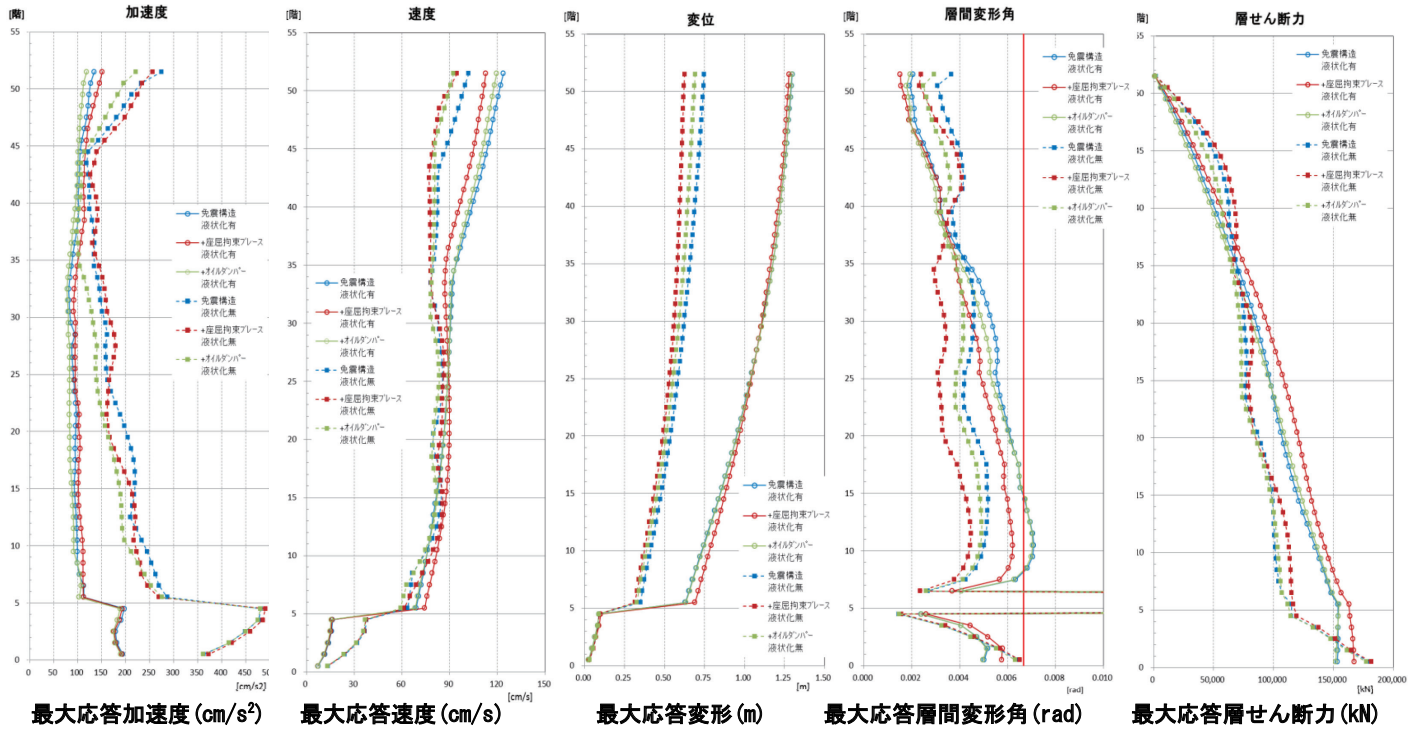


Fig. 9 時刻歴応答解析結果 (AW2:Hachinohe 1968 NS 位相)

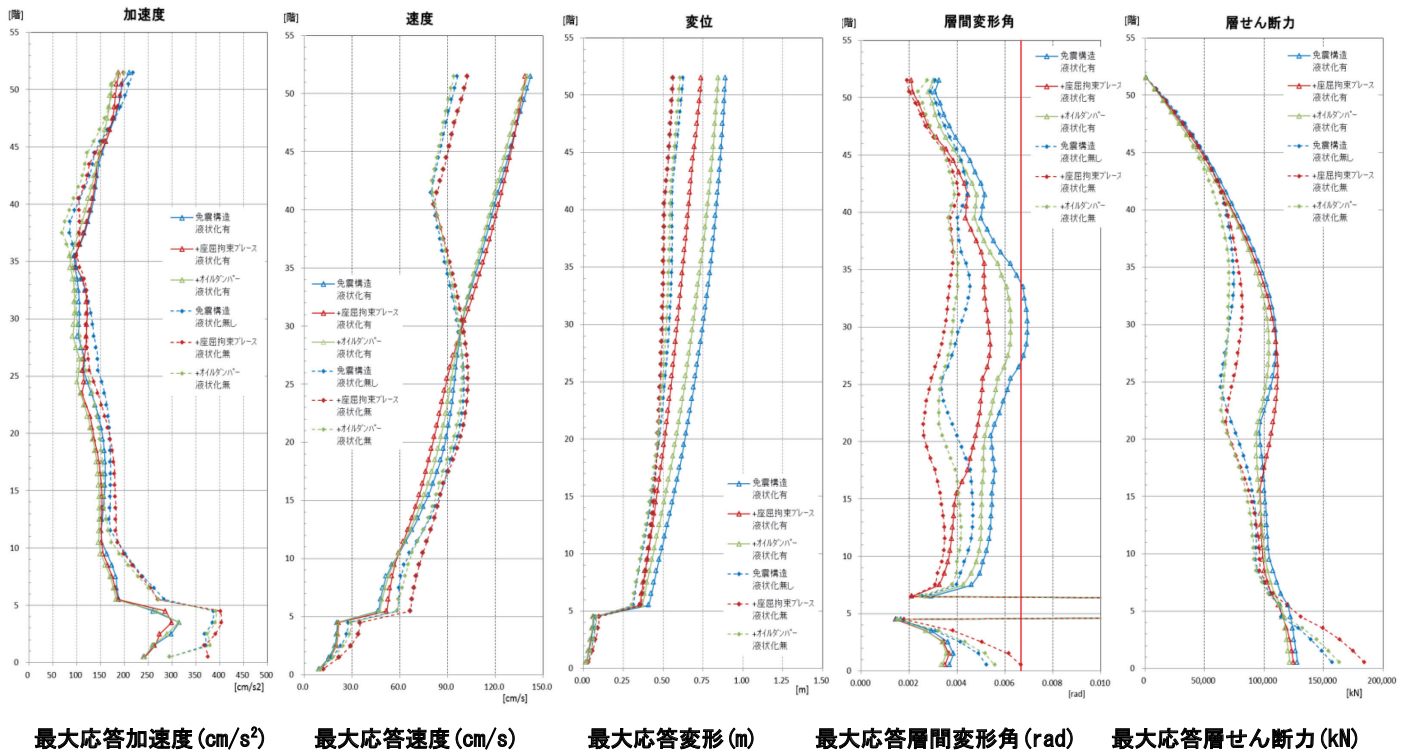


Fig. 10 時刻歴応答解析結果 (AW3:JMA KOBE 1995 位相)

Table4 消費エネルギーの比較

(単位 kNm)

液状化なし

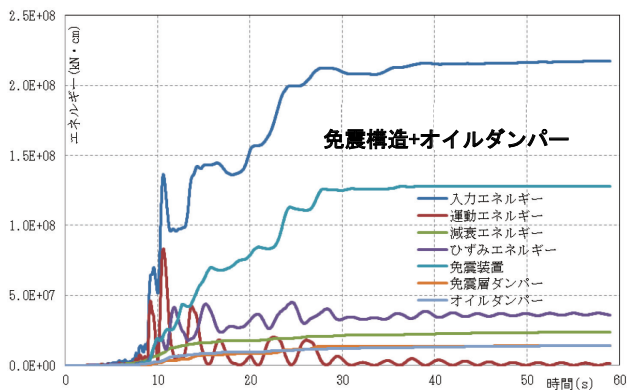
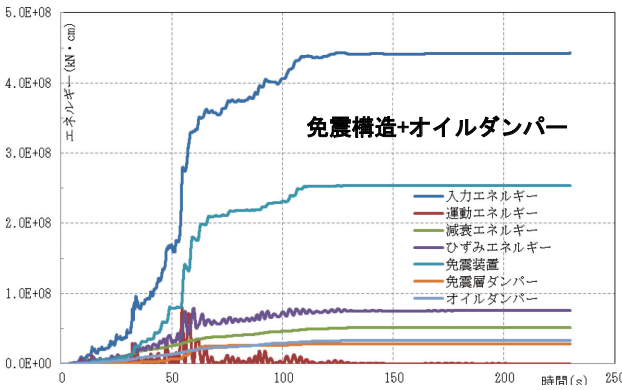
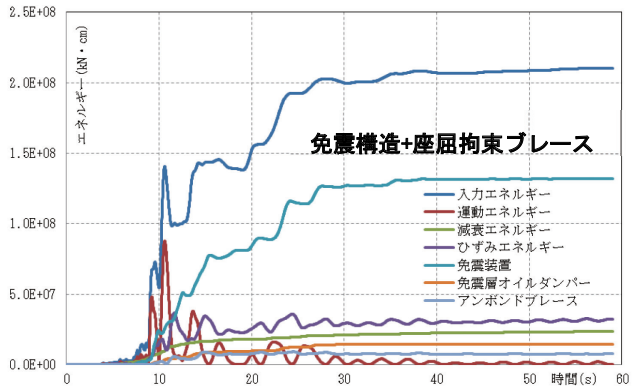
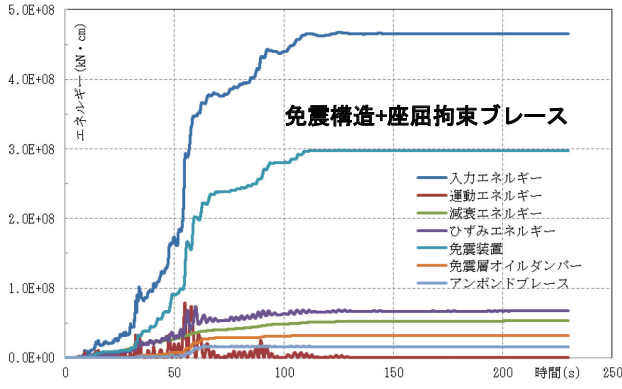
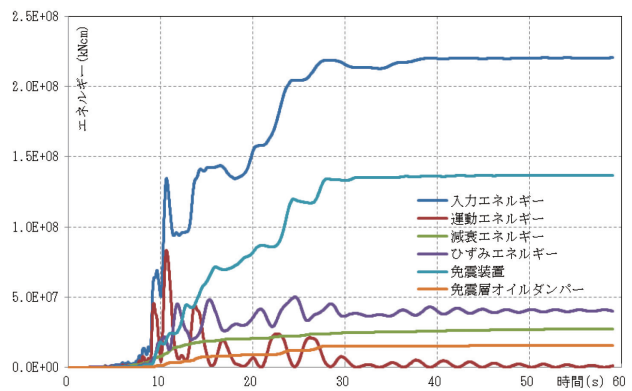
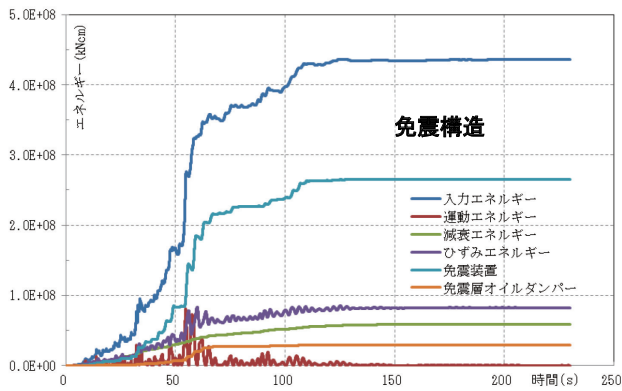
	AW2 (Hachinohe 1968 NS 位相)						AW3 (JMA KOBE 1995 NS 位相)					
	免震構造		+座屈拘束ブレース		+オイルダンパー		免震構造		+座屈拘束ブレース		+オイルダンパー	
入力エネルギー	4,706,349	100.0%	5,039,082	(107.1%)	4,811,505	(102.2%)	1,743,782	100.0%	1,652,091	(94.7%)	1,727,700	(99.1%)
運動エネルギー	85	0.0%	122	0.0%	47	0.0%	1,962	0.1%	182	0.0%	224	0.0%
減衰エネルギー	1,622,321	34.5%	1,546,698	30.7%	1,328,563	27.6%	402,762	23.1%	382,587	23.2%	339,848	19.7%
ひずみエネルギー	1,013,826	21.5%	985,441	19.6%	904,254	18.8%	331,940	19.0%	276,669	16.7%	300,456	17.4%
免震層支承材	1,854,926	39.4%	2,227,156	44.2%	1,779,164	37.0%	905,255	51.9%	876,883	53.1%	862,636	49.9%
免震層ダンパー	215,717	4.6%	253,516	5.0%	206,834	4.3%	102,057	5.9%	105,193	6.4%	97,019	5.6%
上部構造制振装置	-	-	26,737	0.5%	594,215	12.3%	-	-	10,773	0.7%	127,975	7.4%
消費エネルギー合計	-	100.0%	-	100.0%	-	100.0%	-	100%	-	100.0%	-	100.0%

( )内は免震構造の入力エネルギーに対する比率

液状化あり

	AW2 (Hachinohe 1968 NS 位相)						AW3 (JMA KOBE 1995 NS 位相)					
	免震構造		+座屈拘束ブレース		+オイルダンパー		免震構造		+座屈拘束ブレース		+オイルダンパー	
入力エネルギー	4,358,759	100.0%	4,656,427	(106.8%)	4,425,153	(101.5%)	2,204,974	100.0%	2,105,174	(95.5%)	2,176,362	(98.7%)
運動エネルギー	503	0.0%	201	0.0%	271	0.0%	11,255	0.5%	1,319	0.1%	15,753	0.7%
減衰エネルギー	590,262	13.5%	528,440	11.3%	518,907	11.7%	273,891	12.4%	236,679	11.2%	239,193	11.0%
ひずみエネルギー	824,654	18.9%	670,874	14.4%	756,773	17.1%	400,880	18.2%	323,270	15.4%	360,970	16.6%
免震層支承材	2,649,538	60.8%	2,978,792	64.0%	2,534,679	57.3%	1,365,594	61.9%	1,321,145	62.8%	1,280,872	58.9%
免震層ダンパー	293,906	6.7%	322,134	6.9%	278,725	6.3%	153,422	7.0%	144,928	6.9%	138,272	6.4%
上部構造制振装置	-	-	156,101	3.4%	336,068	7.6%	-	-	77,902	3.7%	141,447	6.5%
消費エネルギー合計	-	100.0%	-	100.0%	-	100.0%	-	100%	-	100.0%	-	100.0%

( )内は免震構造の入力エネルギーに対する比率



AW2 (Hachinohe 1968 NS 位相)

AW3 (JMA KOBE 1995 NS 位相)

Fig. 11 エネルギー消費の時刻歴波形 液状化あり

Table5 最大応答値の比較

	液状化	AW2 (Hachinohe 1968 NS 位相)					AW3 (JMA KOBE 1995 NS 位相)					
		最大応答加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	最大応答速度 (cm/s)	最大応答変形 (m)	最大層間変形角	最大層せん断力 (kN)	最大応答加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	最大応答速度 (cm/s)	最大応答変形 (m)	最大層間変形角	最大層せん断力 (kN)	
上部構造	免震構造	有り	134.5	123.7	1.300	1/141	153,774	211.8	142.3	0.892	1/144	120,303
		無し	286.8	101.9	0.747	1/193	115,414	284.4	100.4	0.628	1/214	113,344
	+座屈拘束ブレース	有り	151.1	112.7	1.279	1/161	163,148	188.9	139.0	0.740	1/186	112,250
		無し	269.3	94.6	0.625	1/224	116,393	271.1	103.0	0.563	1/246	119,972
	+オイルダンパー	有り	118.7	119.5	1.297	1/142	154,629	187.9	140.3	0.847	1/160	114,153
		無し	275.9	92.4	0.691	1/203	112,107	272.6	99.4	0.607	1/240	112,738
下部構造	免震構造	有り	197.1	16.4	0.090	1/193	154,015	315.4	20.8	0.067	1/260	128,159
		無し	481.9	37.7	0.090	1/155	180,230	387.9	27.8	0.079	1/191	157,492
	+座屈拘束ブレース	有り	192.8	16.0	0.101	1/173	167,259	299.8	21.7	0.062	1/273	124,837
		無し	491.2	37.3	0.092	1/153	181,711	404.8	35.3	0.100	1/150	184,710
	+オイルダンパー	有り	189.6	15.5	0.090	1/195	154,044	314.9	21.3	0.061	1/281	121,891
		無し	480.4	36.9	0.089	1/158	177,668	393.1	29.7	0.084	1/179	163,669

#### 4. まとめ

レベル2地震動での等価固有周期が7秒程度となる超高層建物においては、地盤の液状化による地震動のやや長周期領域での増幅は、建物応答へ大きく影響する。上部構造への制振装置の配置は、変形の抑制等その影響を緩和する一助となり、本検討では、制振装置の種別としては、建物剛性の増加する効果もある履歴減衰型ダンパーの方が粘性減衰型より効果があることが分った。ただし、履歴型ダンパーは、小地震や風荷重に対してもエネ

ルギー吸収による累積疲労があるため、建物供用期間中の交換を考慮する装置である。また、実施設計では、建物重量比25%程度のダンパー量の配置が必要となることから、その他の方策とのコスト比較検証が必要である。

#### 参考文献

- 1) 小川ほか：有効応力解析による液状化の検討、(仮称)幕張新都心若葉住宅地区計画高層棟概要書 超高層建築物性能評価委員会 2016年5月
- 2) 構造計画研究所：建築構造物の構造解析・振動解析プログラム RESP-D 計算編利用者マニュアル 2017年2月

## Study of hybrid structure capable of aseismic isolation and response control in the super-high-rise apartment

Shinichi TAKAHARA, Hiroto KITAYAMA, Hidenobu KONDOU and Taisuke NAKAZATO

#### Abstract

In a skyscraper whose equivalent natural period at Level 2 seismic motion is about 7 seconds, the amplification in the somewhat long period range of seismic motion due to liquefaction of ground greatly affects the building response. The arrangement of the damping devices in the upper structure helps to absorb the aftermaths such as the suppression of deformation and it was found that the hysteretic damper having an effect of increasing building rigidity is more effective than viscous damping type. However, hysteretic dampers have cumulative fatigue due to energy absorption against small earthquakes and wind loads, so it is necessary to consider replacement during building service period. Also, in the final design, it is necessary to arrange a damper amount of about 25% of the building weight ratio, so it is necessary to verify the cost in comparison with other methods.

Keywords: Isolation structure, Damping structure, Hybrid structure, Liquefaction of the ground