

## 4 3階建超高層RC造複合建物の耐震設計

磯貝 哲也\* 都祭 弘幸\*  
 藤本 純一\*\* 正田 雄高\*

### 要 旨

都市型の複合開発プロジェクトとして計画している住宅・店舗・事務所等からなる超高層RC造複合建物の構造設計及びその耐震安全性の検討概要について報告する。耐震設計は、一般的な超高層RC造集合住宅と同様に静的設計と動的設計からなる。静的設計では、立体骨組モデルによる静的弾塑性解析より得られる建物に適應した設計荷重に対して、架構骨組の耐力と変形性能の確認、各部材の1次設計及び終局強度設計を行い、静的設計クライテリアを満足することを確認する。動的設計では、標準的な観測地震動の他に建設計画地の地盤特性を考慮した模擬地震動を用いて、地震応答解析を行い、動的設計クライテリアを満足することを確認する。振動解析モデルは、質点系モデルおよび、立体骨組モデルによる部材レベルの耐震安全性も確認する。

### 1. はじめに

近年、RC構造の発展はめざましく、また、建設地の有効活用等、社会的な要望から、超高層RC建物が数多く建設されるようになって来た。本報告は、建物に高強度材料を用いた、超高層RC建物の構造設計、耐震安全性の検討方法及び、検討結果について述べる。

### 2. 建物概要

建物の規模は、地上43階、地下1階、軒高153m、最高部高さ174.8mである。基準階平面形状を図-1に示す。基準階プランは、7×6スパンからなり、中央部の3スパンがポイドとなっている。X、Y方向とも6.3mが基準スパンとなっている。地上部分の骨組は、RC造純ラーメン構造であり、ポイドをクロスするようにメインの骨組を配置したクロスチューブ架構とする。地下階の構造は、RC造耐力壁付きラーメン構造である。29階から上層階は、扁平梁を採用し居住性の向上を図っている。

階高は、事務所階（15階まで）3.55～4.6m、住宅階3.15～3.7m、メゾネット階（21階）5.05mであり、軒高さと幅の比は、X方向が3.8、Y方向が3.5程度である。図-2は建物の用途、軒高さ、及び各部材の使用材料等を示す。建物の使用材料は、コンクリート強度がFc30～60MPa、主筋がSD390（D29～D35）、SD490（D35～D41）を用いている。せん断補強筋は、降伏点強度785N/mm<sup>2</sup>の高強度異形棒鋼及びSD295Aを使用する。この建物は、複合用途の建物であるため、一般的な超高層RC造住宅と比較してスパンが大きく階高の高い階が多いため、高層階まで高強度材料を使用している。柱、梁の標準断面を表-1に示す。

基礎は、場所打ちコンクリート拡底杭とし、GL-25m以

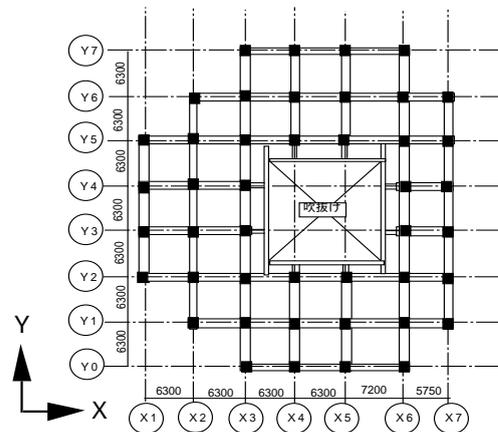


図-1 基準階平面図

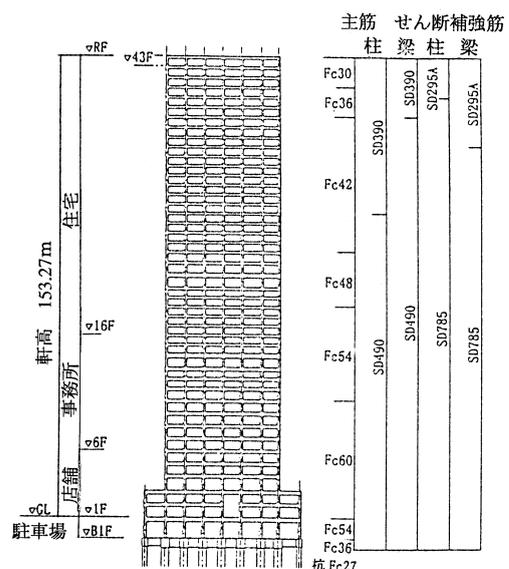


図-2 建築物の使用材料

\* 技術研究所 \*\* 本社建築設計部

深、N値60以上の強固な砂礫層に支持させる。

### 3. 設計概要

建物の構造設計は、静的設計及び動的設計から成り、それぞれ表-2、表-3に示す静的設計クライテリア及び動的設計クライテリアを満足するように設計する。

#### 3.1 静的設計

各部材の静的設計は、建物の耐用年限中に遭遇するであろう中小地震に対して許容応力度設計(1次設計)、大地震に対して終局強度設計を行う。また、それぞれの設計用地震力に対して架構の耐震性能を確認する。各部材及び架構の設計クライテリアとの検討は、X、Y及び45度方向に対して行う。

##### 3.1.1 1次設計

設計用外力分布系は、予備応答解析と応答スペクトル法を用いて設定する。1階の層せん断力係数は、質点系弾塑性モデルによる予備応答解析を実施し、1階の層せん断力係数を0.065とする。また、各層の層せん断力係数は、応答スペクトル法によって設定する。応答スペクトル法に用いる加速度応答スペクトルには、建築基準法施行令第88条<sup>1)</sup>の振動特性係数を用いる。

1次設計用地震層せん断力と設計用風荷重との比較を図-3に示す。風荷重は、建築基準法施行令第87条<sup>1)</sup>に準じて求める。図-3より本建物の設計風荷重の大きさは、1次設計用地震層せん断力に対して最大でも50%程度であるので風荷重に対する検討は、省略する。1次設計では、各部材が許容応力度以下であることを確認する。

##### 3.1.2 終局強度設計<sup>2)</sup>

終局強度設計に用いる設計用応力は、建物の各方向における保有水平耐力時の応力とする。目標保有水平耐力は、1次設計用地震力の1.5倍以上とし、図-4に示す架構設計変形時を建物の保有水平耐力とする。

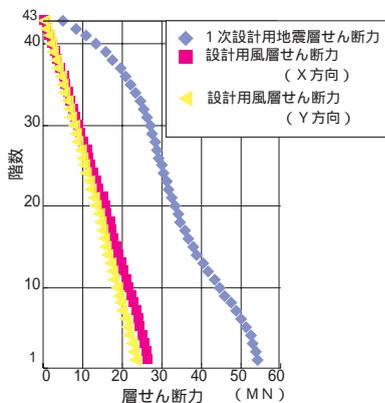


図-3 1次設計用地震層せん断力と風荷重との比較

表-1 柱、梁の標準断面

柱	B x D 750 x 750 - 1200 x 1200 主筋 20 - 28本 芯筋 4 - 8本 主筋径 D35 - D41 (SD490) 1階 - 27階 D29 - D35 (SD390) 28階以上	
大梁	用途: 事務所、住宅階 B x D 550 x 800 - 700 x 1500 (G1) D38 - D41 (SD490) 1階 - 38階 D32 - D35 (SD390) 39階以上	
	用途: 住宅階 (29階 - 43階梁住戸内) B x D 750 x 500 - 900 x 550 (G7) 主筋径 D35 - D38 (SD490) 29 - 38階 D29 - D35 (SD390) 39階以上	

表-2 静的設計クライテリア

対象	設計用地震力	部材の性能	架構の状況
一次設計時	・予備応答解析結果を参考に応答スペクトル法による外力分布とする	・柱、梁部材に軽微なひび割れを生じても降伏しない	層間変形角 1/200以下
架構設計変形時	・C Bが0.25RtZ以上	・ヒンジ計画部材に靱性能を確保する。 ・非ヒンジ部材に十分な強度を確保する。	層間変形角 約1/80以下

表-3 動的設計クライテリア

対象	架構の水平変形	架構の状態	部材の状態
レベル1	・最大層間変形角が1/200をこえない	・最大応答層塑性率が1.0以下	・部材の降伏が生じない
レベル2	・外力重心位置での応答変形角が応答限界変形角 <sup>1)</sup> 以下かつ、最大層間変形角が応答限界変形角の1.5倍 <sup>2)</sup> 以下	・最大応答層塑性率が2.0以下	・梁部材の降伏ヒンジの応答塑性率は、4.0以下とする。 ・柱頭、柱脚 <sup>3)</sup> 以外に降伏ヒンジが生じない

\*1: 本設計では応答限界変形角を1/210とする  
\*2: 各層の最大層間変形角は1/140以下とする  
\*3: 許容するヒンジ柱とする

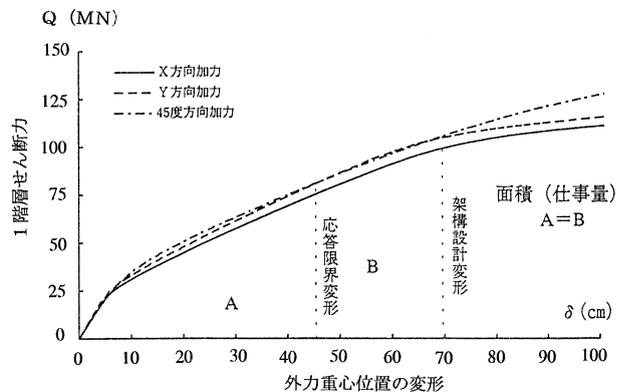


図-4 1階層せん断力と外力重心位置変形の関係

ここで、応答限界変形とは、レベル2地震動による応答変形角の上限値とし、外力重心位置での応答変形角で1/120以内に定める。また、架構設計変形とは、応答限界変形を上回る値とし、静的弾塑性解析による1階の層せん断力と外力重心位置の変形から応答限界変形までの面積の2倍以上の面積を確保できる骨組の変形と定める。

保有水平耐力の確認に際しては、梁主筋に規格降伏点強度を用いるが、部材の終局強度設計に際しては、計画した降伏機構が確実に形成されるように梁主筋の強度上昇分を考慮して行う。

表 - 4 は、主な終局強度設計クライテリアと設計値を示す。設計値は、X、Y及び45度方向の内、最も余裕度の小さいものを示している。各部材の設計値は、終局強度設計クライテリアを満足することを確認する。

3.2 基礎構造

下部構造の設計は、上部構造と同様に1次設計及び終局強度設計を行う。作用する地震力は、基礎部分の根入れ効果を考慮せず、全水平力を杭に負担させるものとする。地下水位下（GL-2m以深）では、水圧を考慮する。杭頭部分の位置は、細粒分・粘土分が多く、液状化する可能性はないと判断する。

4. 静的弾塑性解析

静的弾塑性解析は、各設計時の部材応力の算出と建物の崩壊形の確認のために、立体骨組モデルで行う。解析モデルは、部材を線材置換し、各階床を剛床と仮定する。梁は、材端弾塑性バネモデルとし、柱は、塑性論に基づき曲げ及び軸方向の相関関係を考慮した剛塑性バネモデルとする。

X方向の層せん断力と層間変形角の関係を図 - 5 に示す。また、架構設計変形時における本建物の降伏ヒンジ発生状況の代表例を図 - 6 に示す。外力の作用方向を

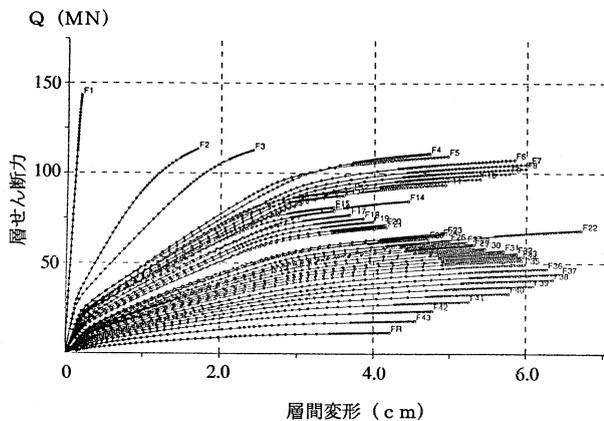


図 - 5 層せん断力と層間変形角の関係

表 - 4 終局強度設計クライテリアと設計値

部位	項目	目標余裕度	設計値
梁	せん断終局強度	1.1 (長期+架構設計変形時)	1.16
	付着割裂強度	1.1 (設計用付着応力度)	1.17
柱	曲げ終局強度	1.3 (架構設計変形時)	1.32
	潜在ヒンジ・柱軸力 中・側柱	0.75tNu Nu	0.45
		Nu 0.5cNu	0.47
	非ヒンジ柱軸力 中・側柱	0.75tNu Nu	0.47
		Nu 0.65cNu	0.54
せん断終局強度	1.3 (架構設計変形時)	1.35	
接合部	付着割裂強度	1.3 (架構設計変形時)	1.30
		せん断終局強度	1.1 (梁降伏時)

Nu : 軸力制限検討用軸力 Nu=NL+ Nm  
 NL:長期軸力 : 動的軸力低減係数 Nm: 架構設計変形時の変動軸力  
 tNu: 柱引張耐力  
 cNu: 柱圧縮耐力

⊖ : 曲げひび割れ  
 ⊕ : 曲げ降伏ヒンジ

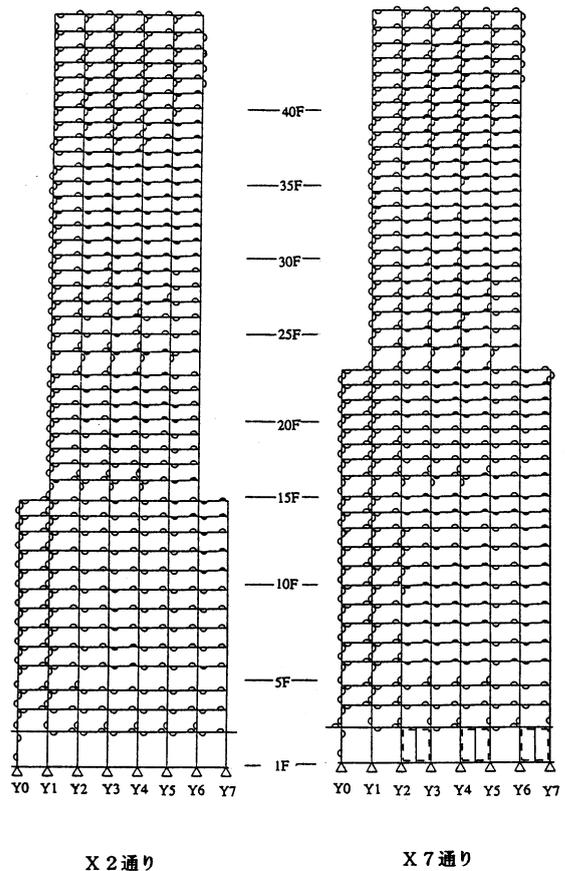


図 - 6 降伏ヒンジ発生状況

X, Y, 45度とした場合、各方向とも架構設計変形時における降伏ヒンジ発生部位は、梁端のみであり、全て降伏許容部位である。また、梁の最大塑性率は、X方向で1.65(30階)、Y方向で1.78(31階)、45度方向で1.22(37階)である。

5. 振動解析概要

5.1 検討用地震動

耐震安全性の検討に用いる地震動波形は、日本建築センター保有の観測波形の中から標準的な地震動としてEL Centro 1940 NS及びTaft 1952 EW、長周期成分を含む地震動波形としてHachinohe 1968 NSを選択する。また、地域特性を表す地震動は、当該の敷地地盤の動特性を考慮した模擬地震動を作成する。模擬地震動を除く各観測波の最大速度は、レベル1を25cm/sec、レベル2を50cm/secに基準化する。

模擬地震動作成フローを図-7に示す。模擬地震動

は、翠川・小林の手法<sup>3)</sup>を用いて工学的基盤上での速度応答スペクトルを算出し、その得られた速度応答スペクトルに適合するように地震動を作成する。

解析に使用するレベル1、レベル2地震動を表-5及び図-8(a)(b)に示す。図-8(a)(b)は、減衰5%の速度応答スペクトルである。図より模擬地震動は、固有周期0.5秒、1.0秒近辺に卓越周期がある。

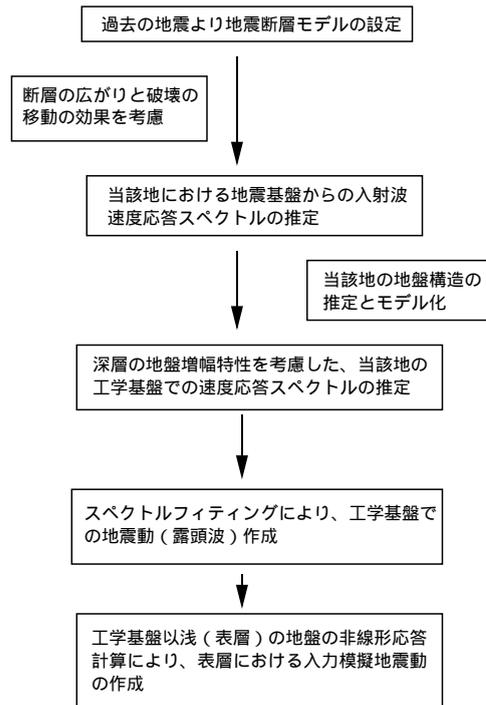
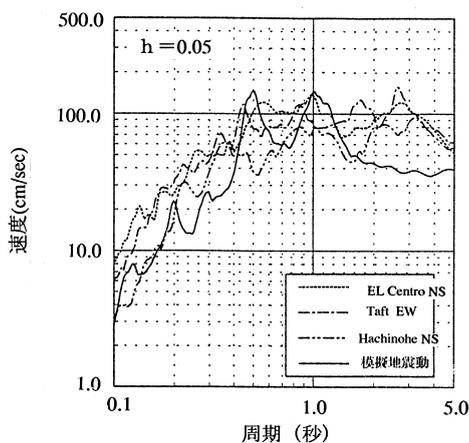


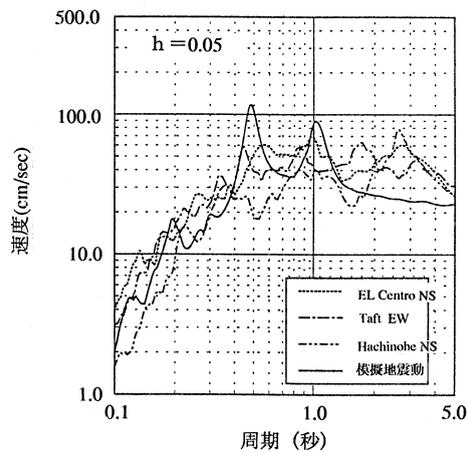
図-7 模擬地震動作成フロー

表-5 入力地震動

	レベル1の地震動		レベル2の地震動		備考
	最大加速度 cm/sec <sup>2</sup>	最大速度 cm/sec	最大加速度 cm/sec <sup>2</sup>	最大速度 cm/sec	
EL Centro 1940 NS	255	25	511	50	標準波
Taft 1952 EW	248	25	479	50	標準波
Hachinohe 1968 NS	165	25	330	50	長周期波
模擬地震動	263	19	336	36	地域特性波



(a) レベル1の地震動



(b) レベル2の地震動

図-8 地震動の速度応答スペクトル

5.2 解析概要

設計フローを図-9に示す。耐震安全性を検討するために、質点系地震応答解析、立体骨組地震応答解析を行う。質点系地震応答解析は、X方向、Y方向及び45度方向の3方向に対して検討する。立体骨組地震応答解析の入力地震動の大きさは、レベル2とし、質点系地震応答解析において、本建物に大きな応答を示した地震動とする。

5.3 質点系地震応答解析

弾塑性質点系地震応答解析の概要について以下に示す。

5.3.1 解析仮定

解析仮定を以下に示す。

重量は、各階床位置に集中させたモデルとする。

各層の復元力特性は、立体骨組モデルによる静的弾塑性解析によって得られた層せん断力と層間変形の関係から曲げ変形を弾性、せん断変形をTri-linear型の武田モデルとし、除荷時剛性低下指数 = 0.4とする。

固定位置は、B1階床とする。

減衰は、内部粘性系を仮定した瞬間剛性比例型とし、減衰定数は、1次固有周期に対して3%とする。

5.3.2 固有値解析結果

質点系モデル(平面質点系)の固有周期を表-6に示す。表-6には、立体骨組地震応答解析に用いた固有値解析結果を並記する。質点系モデルの1次、2次固有周期は、立体骨組モデルの1次、2次固有周期とよく対応している。

5.3.3 応答解析結果

X方向、Y方向のレベル1の応答解析結果を図-10、

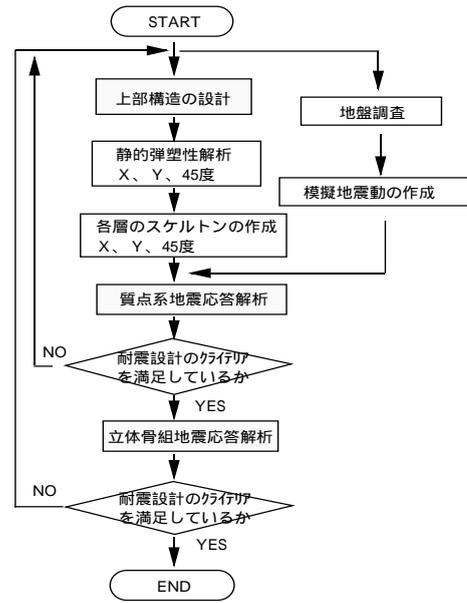
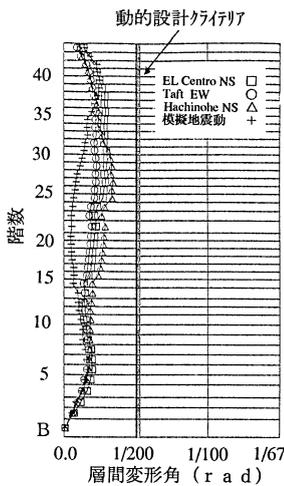


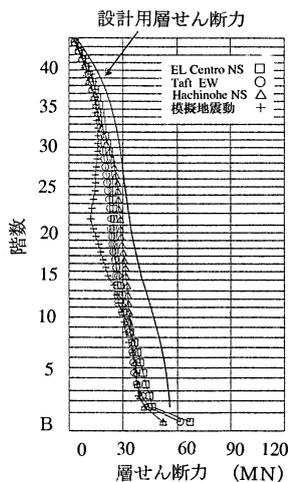
図-9 設計のフロー

表-6 固有値解析結果

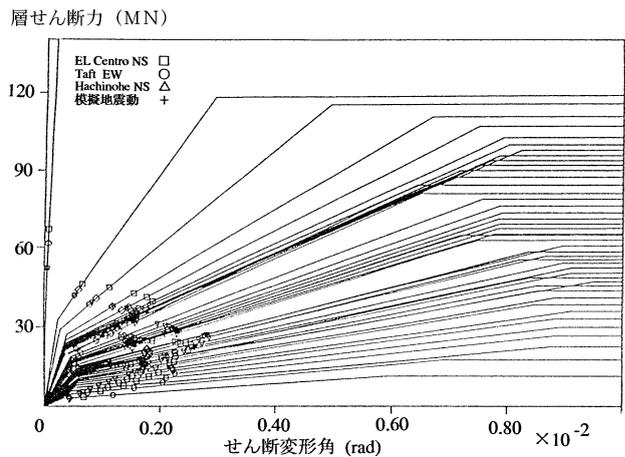
	X方向			Y方向			斜め方向		
	1次	2次	3次	1次	2次	3次	1次	2次	3次
質点系	2.74	0.961	0.570	2.61	0.927	0.560	2.67	0.94	0.56
刺激係数	1.54	0.842	0.501	1.530	0.841	0.508	1.533	0.841	0.504
立体解析	2.74	0.958	0.538	2.61	0.921	0.533	—	—	—



(a) 応答層間変形角



(b) 応答層せん断力



(c) 塑性域進入図

図-10 レベル1の地震動による応答値(X方向)

図 - 1 1 に示す。さらに、X 方向、Y 方向のレベル 2 の  
応答解析結果を図 - 1 2、図 - 1 3 に示す。レベル 2 の

最大応答値のまとめを表 - 7 に示す。

レベル 1、レベル 2、X 方向、Y 方向、45 度方向とも、

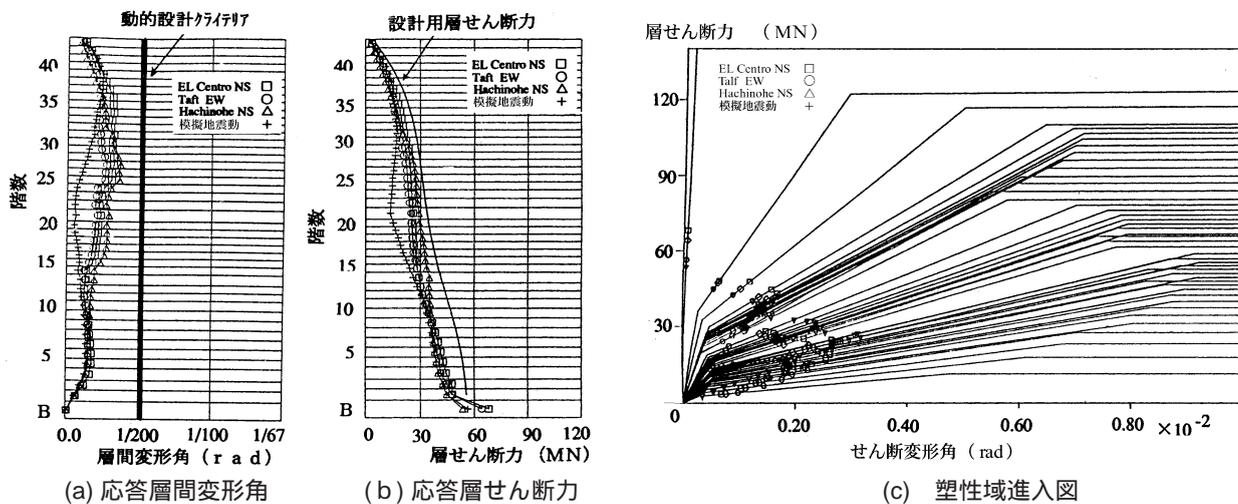


図 - 1 1 レベル 1 の地震動による応答値 (Y 方向)

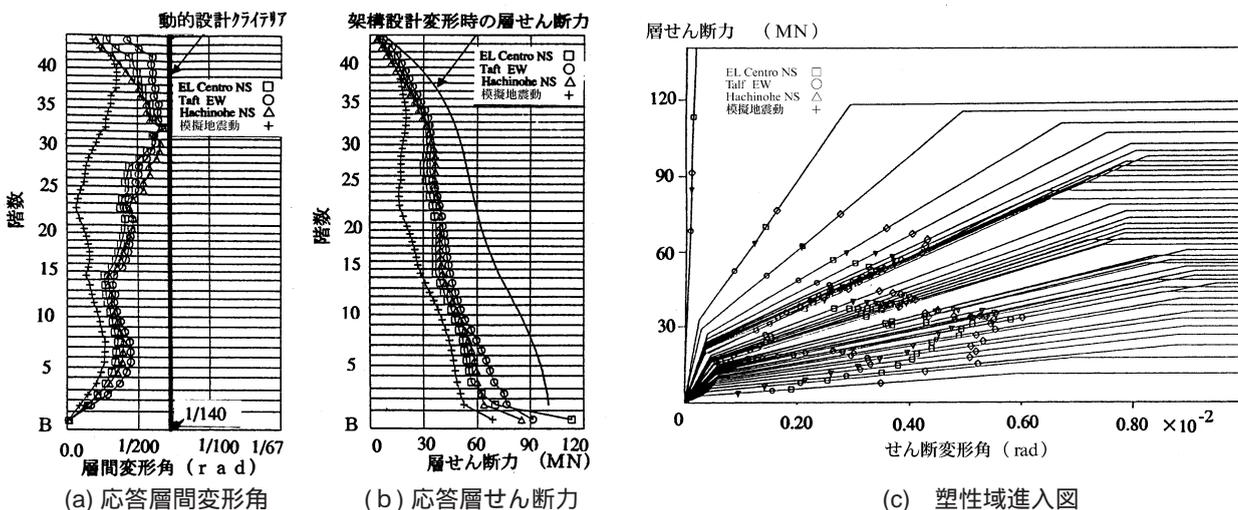


図 - 1 2 レベル 2 の地震動による応答値 (X 方向)

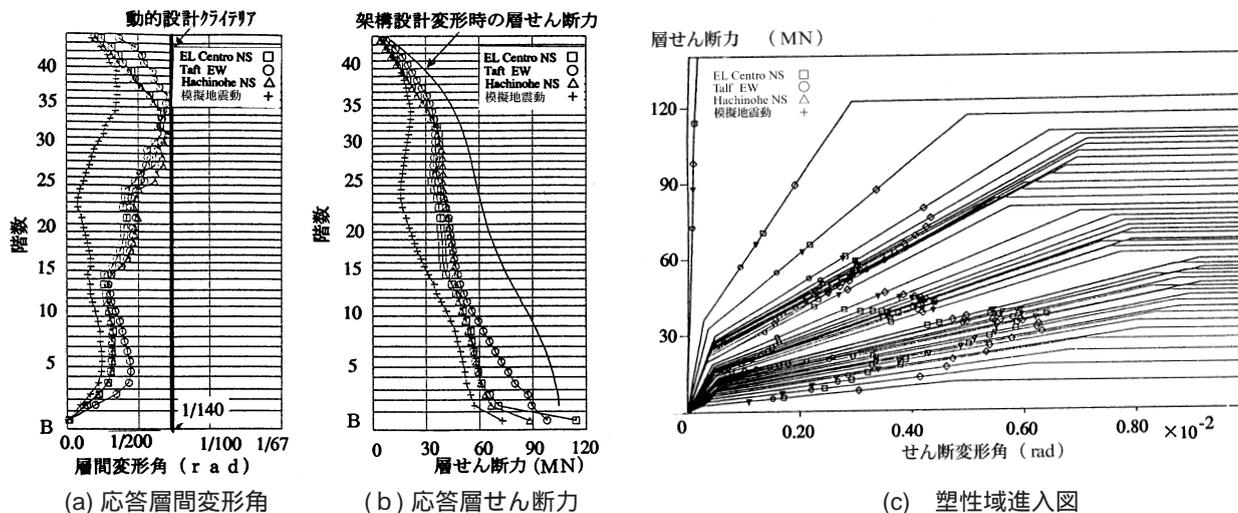


図 - 1 3 レベル 2 の地震動による応答値 (Y 方向)

いずれも、表 - 3 の動的設計のクライテリアを満足しており、本建物の耐震安全性は、確保されていると判断する。

5.4 立体骨組地震応答解析

5.4.1 解析モデル

解析モデルは、弾塑性立体骨組モデルとする。

5.4.2 部材の復元力特性

解析に使用する部材の剛性、耐力及び部材のスケルトンカーブは、静的弾塑性解析と同じとする。本解析に使用する部材の復元力特性を表 - 8 に示す。柱梁接合部の復元力特性は、弾性とする。なお、武田モデルにおける除荷時剛性低下指数は0.4とする。

5.4.3 減衰

減衰は、内部粘性型を仮定した、瞬間剛性比例型とし、減衰定数は、1次固有周期に対して3%とする。

5.4.4 入力地震動

入力地震動は、質点系応答解析で用いた4種類の地震動の中で、比較的大きい応答を示した Taft 1952 EW とする。入力はX方向、Y方向ともに同じ地震動とする。

5.4.5 固有値解析

立体骨組モデルによる固有値解析結果を表 - 9 に、1次の固有モードを図 - 14 に示す。

表 - 7 レベル2の最大応答値

項目		X方向	Y方向	斜め*	X, Y, 斜め 動的設計クライテリア
1階 層せん断力	単位:(MN)	76.9	89.3	86.5	X : 100
	発生階	1	1	1	Y : 104
	地震動	Taft EW	Taft EW	Taft EW	斜め : 106
1階層 せん断力係数	—	0.089	0.105	0.101	X : 0.117
	発生階	1	1	1	Y : 0.122
	地震動	Taft EW	Taft EW	Taft EW	斜め : 0.124
最大応答 層間変形角	単位:(rad)	1/144	1/140	1/153	1/140
	発生階	32	31	31	(X, Y, 斜め)
	地震動	Taft EW	EL Centoro NS	Hachinohe NS	
外力重心位置 の全体変形角	単位:(rad)	1/359	1/335	1/334	1/210
	発生階	25	25	25	
	地震動	EL Centoro NS	Hachinohe NS	Hachinohe NS	(X, Y, 斜め)
層塑性率	—	0.646	0.719	0.691	2.00
	発生階	33	36	B	
	地震動	Taft EW	Taft EW	EL Centoro NS	(X, Y, 斜め)
1階 転倒E-マト	単位:(MNm)	4607	4732	4818	X : 9688
	発生階	1	1	1	Y : 10118
	地震動	Hachinohe NS	Hachinohe NS	Hachinohe NS	斜め : 10280

\*斜めとは、45度方向を言う。

表 - 8 部材の復元力特性

部材	曲げ	せん断
柱	Tri-linear型の武田モデル	Tri-linear型の原点指向モデル
はり	Tri-linear型の武田モデル	曲げ剛性の低下と共にせん断剛性も低下する

表 - 9 固有値解析一覧

固有周期	次数	1	2	3	4	5	6
	方向		2.737	2.608	1.859	0.958	0.921
有効質量比	X	0.567	0	0	0.186	0	0
	Y	0	0.567	0.001	0	0.183	0.002
	Z	0	0	0	0	0	0
	R Z	0	0.001	0.519	0	0.001	0.133
刺激係数	X	1.547	0.021	0.003	0.849	0.005	0.004
	Y	0.02	1.595	0.078	0.005	0.899	0.099
	Z	0	0	0	0	0	0
	R Z	2.90	139.7	3205.8	6.10	143.2	1634.4

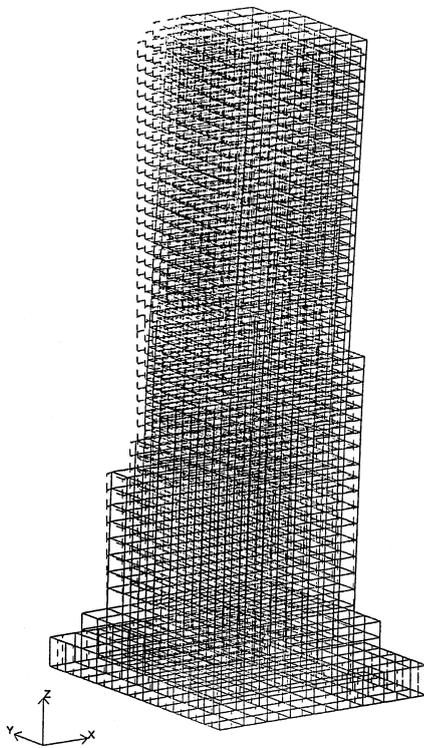
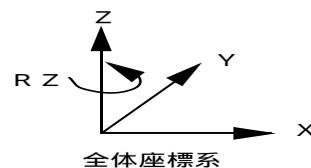


図 - 14 1次の固有モード



5.4.6 応答解析結果

立体骨組モデルによる部材の降伏ヒンジ発生状況を図-15に示す。立体骨組モデルの降伏ヒンジ発生状況は、1部の梁に曲げ降伏ヒンジが発生してしているものの柱にはヒンジの発生はなく表-3の動的設計クライテリアを満足している。各階の梁の最大応答塑性率を図-16に示す。最大応答塑性率は、いずれの方向も2.0未満であり、動的設計クライテリアの4.0以下を満足している。

図-17は、立体骨組モデルの各層の重心位置の最大応答値と質点系モデルの最大応答値の比較を示す。質点系の応答値は、最大応答値、応答分布形とも立体骨組を良く再現している。

6.まとめ

43階建超高層RC造複合建物の耐震設計を行った結果、静的設計、動的設計ともに設計クライテリアを満足しているので本建物の耐震安全性は、確保されていると判断する。

参考文献

- 1) (財)日本建築センター：建築物の構造規定、1997年度版
- 2) (財)国土開発技術センター：鉄筋コンクリート構造物の超軽量・超高層化技術の開発報告書、平成5年度
- 3) 翠川三郎・小林啓美：地震断層を考慮した地震動スペクトルの推定、日本建築学会論文報告集、第282号、pp.71～81、1979

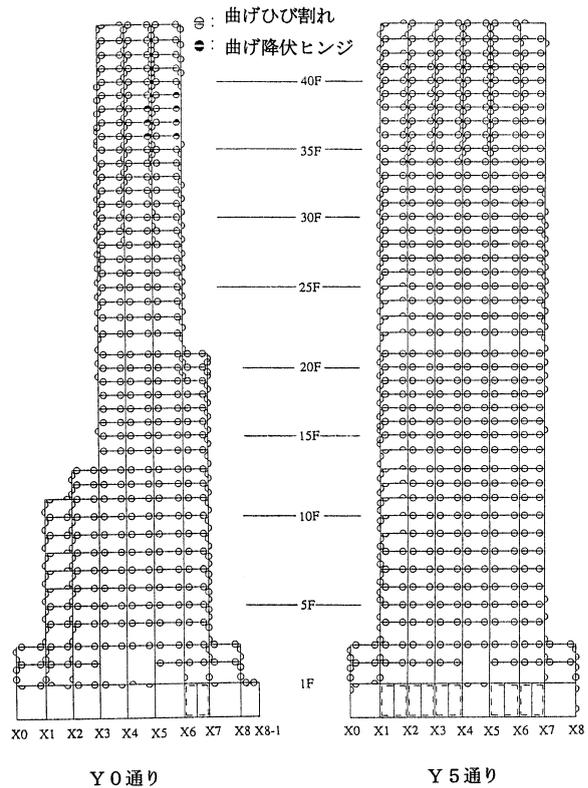


図-15 応答解析による降伏ヒンジ発生状況

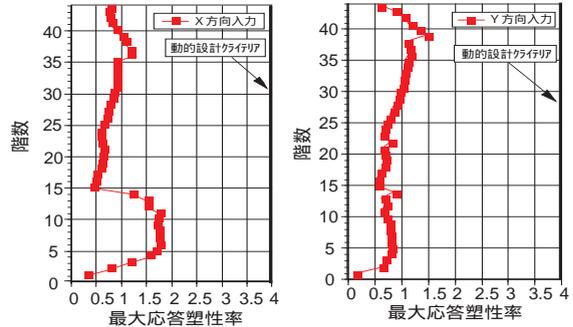


図-16 梁の最大応答塑性率

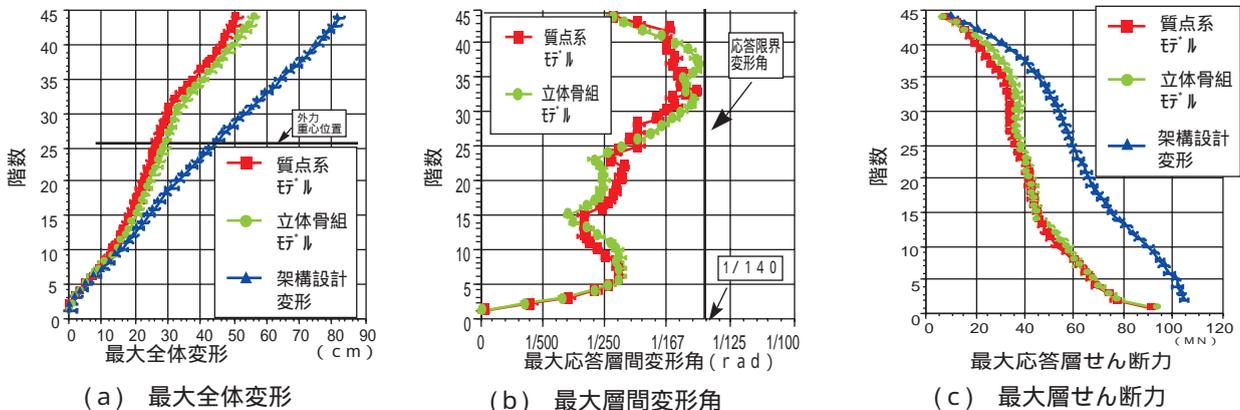


図-17 質点系と立体モデルの応答値の比較 (X方向入力)