

## 60 階 200m 級超高層 RC 造住宅の開発

内 田 和 弘      佐々木康人  
寺 岡   勝      桂   大 輔  
加 藤 泰 夫 \*1   中 根 宣 容 \*1

### 概 要

構造改革の一環である都市再生への取り組みに伴い、大都市圏の都心部における快適な都市生活の実現を目的として、駅周辺地区や大規模な低未利用地区を対象とした超高層住宅を中心とする複合用途施設の再開発が進められている。このような背景のもと、超高層住宅への多様なニーズに応えるため、「構造安全性」、「長寿命」、「更新性」を特長とした 60 階 200m 級 RC 造住宅の開発を行った。本報では、構法の特長、耐震設計法および試設計建物の概要について示す。

本構法は、バンドルチューブ構造の外周住戸部分と連層耐震壁構造の内部コア部分で構成され、両者を制振ダンパーで連結する構造となっている。設計クライテリアは通常の RC 造建物よりも厳しく設定し、高い耐震安全性を有している。材料には高強度コンクリート(最大強度 120N/mm<sup>2</sup>)を採用し、高耐久性を実現している。また、外周住戸部分は住戸内に柱・梁のない空間を実現するとともに、設備スペースを住戸外に設けることにより、フレキシブルな空間が確保でき、設備の更新も容易に行うことができる。制振ダンパーには変形能力が大きく、リリーフ弁により最大減衰力が制御可能なオイルダンパーを採用している。試設計において、ダンパーの量を地震応答解析により検討した。結果として、ダンパーの量には制振効果が最適となる値が存在することを確認し、ダンパーの性能範囲の条件とから、必要量を導いた。

### Development of 60 Story High-rise Reinforced Concrete Condominium Construction System

#### Abstract

Urban redevelopment projects (part of the national structural reform in Japan) play an important role in increasing the quality of urban life. A super-high-rise reinforced concrete (RC) condominium system was developed in order to meet the various requirements of such redevelopment. This system offers "structure stability", "long life housing", and "renewal readiness". In this paper, the characteristics of the system, earthquake resistance and trial design results are described.

The proposed structure was composed of a multi-story shear wall inner core surrounded by a bundle tube outer structure. Both structures were connected with the vibration control devices. The high strength (120N/mm<sup>2</sup>) concrete and the high strength reinforcement were used in RC part. Oil dampers with a large deformation capacity and the relief valve which can control the maximum damping force were used as vibration control devices. A simplified method to determine the optimum amount of damping was proposed. Earthquake response analyses of the trial design building were conducted for the design earthquake ground motion. From the analytical results, excellent earthquake resistant performance was confirmed.

キーワード: 超高層住宅, 鉄筋コンクリート,  
連結制振構造, ダンパー

\*1 建築本部 設計センター

§1. はじめに

構造改革の一環である都市再生への取り組みに伴い、大都市圏の都心部における快適な都市生活の実現を目的として、駅周辺地区や大規模な低未利用地区を対象とした超高層住宅を中心とする複合用途施設の再開発が進められている。需要面では、熟年層は安全性と永住性、若年層は利便性を求め、都市生活への回帰現象が生じている。

このような状況下で、より高性能な超高層住宅が求められるようになってきており、さまざまなものが開発されている。当社においても、これまで 40~70 階程度の超高層 RC造住宅の開発を行ってきた<sup>2),3)</sup>が、さらなる高性能化を実現するため、新たに「構造安全性」、「長寿命」、「更新性」を特長とする 60 階 200m級 RC造住宅の開発を行った。本報では構法の特長、耐震設計法および試設計建物の概要について示す。

§2. 構法の特長



本構法を用いた試設計建物の外観、構造躯体、基準階平面図および断面図を図 1~4 にそれぞれ示す。本構法の特長を以下に示す。

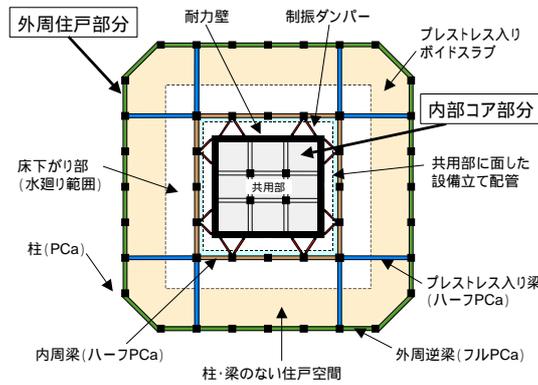
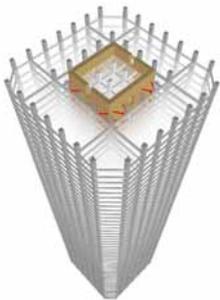


図 3 基準階平面図



・構造安全性

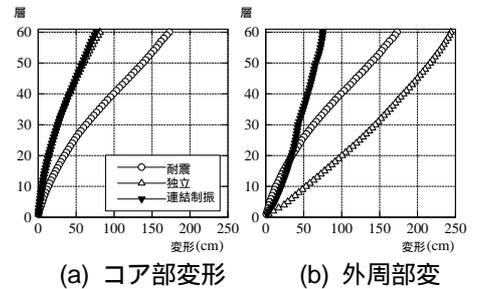
バンドルチューブ構造の外周住戸部分(以下、外周部)と連層耐震壁構造の内部コア部分(以下、コア部)で構成され、両者を制振ダンパー(以下、ダンパー)で連結する連結制振構造としている。振動特性の異なる外周部とコア部の相互干渉効果とダンパーによるエネルギー吸収効果により地震などによる建物の揺れを小さく抑えることができる<sup>4),5)</sup>。図 5 に、試設計建物において両者を剛結(耐震)、両者を独立、ダンパーで連結(連結制振)とした場合の地震応答解析結果の比較を示す。地震動はBCJ波レベル 2 とした。連結制振では耐震、独立の場合に比べ、特に外周部で変形が小さく、高い制振効果が確認できる。

・長寿命

高強度コンクリート(最大強度 120N/mm<sup>2</sup>)の採用などによる高耐久性により、長寿命化を実現している。これにより、ライフサイクルにおける 1 年あたりのエネルギー消費量(LCE)やCO<sub>2</sub>発生量(LCCO<sub>2</sub>)を抑えることができ、環境負荷低減効果が得られる。

・更新性

チューブ構造の外周部では住戸内に柱・梁のない空間を実現するとともに、設備の共用立て配管スペースを住戸外に設けることにより、フレキシブルな居住空間を確保している。内部間仕切りの変更が可能であり、また、二重床および水廻り範囲の床スラブに床下がり部分を設けることにより、設備の更新も容易に行うことができる(図 4)。



(a) コア部変形 (b) 外周部変形

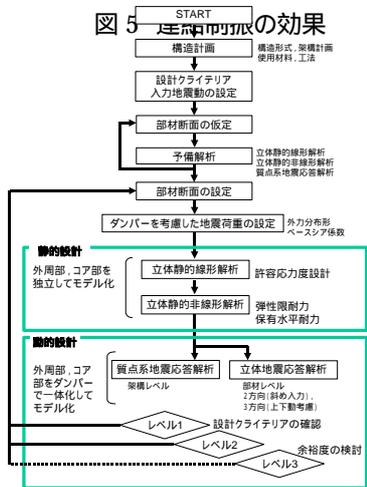


図 5 連結制振の効果

表1 設計クライテリア

		動的設計		静的設計
		質点系モデル	立体モデル	立体モデル
レベル1	地震荷重	レベル1地震動		レベル1応答に基づく地震荷重
	外周建物	短期許容耐力以下。 外力重心位置変形角は、1/240以下、 層間変形角は、1/200以下。	部材応力は、短期許容応力度による 許容耐力以下、せん断応力度は、ひ び割れ強度以下。	部材応力は、短期許容応力度による 許容耐力以下、せん断応力度は、ひ び割れ強度以下。
	内部コア建物	短期許容耐力以下。 外力重心位置変形角は、1/360以下、 層間変形角は、1/300以下。	耐力壁のせん断応力度は、ひびわれ 強度以下。	耐力壁のせん断応力度は、ひびわれ 強度以下。
	制振ダンパー	限界変形以下。	限界変形以下。	
レベル2	地震荷重	レベル2地震動		レベル2応答に基づく外力分布
	外周建物	弾性限耐力以下。 外力重心位置変形角は、1/160以下、 層間変形角は、1/133以下。	柱、梁に曲げ降伏を許容しない。	弾性限耐力はいずれかの部材で最初 に降伏ヒンジが生じるときの耐力。
	内部コア建物	弾性限耐力以下。 外力重心位置変形角は、1/240以下、 層間変形角は、1/200以下。	耐力壁に曲げ降伏を許容しない。	
	制振ダンパー	限界変形以下。	限界変形以下。	
地震荷重	レベル3地震動		レベル2応答に基づく外力分布	
レベル3 余裕度検討 レベル	外周建物	外力重心位置変形角は、1/120以下、 層間変形角は、1/100以下。	梁、引張柱に曲げ降伏を許容。	保有水平耐力は層間変形角が1/100 での水平力。その時の部材応力に対 して、終局強度設計を行う。
	内部コア建物	外力重心位置変形角は、1/180以下、 層間変形角は、1/150以下。	耐力壁に曲げ降伏を許容。	保有水平耐力は耐力壁が曲げ終局強 度時の水平力。その時の部材応力に 対して、終局強度設計を行う。
	制振ダンパー	限界変形以下。	限界変形以下。	

§3. 耐震設計法

3.1 耐震設計フロー

図6に耐震設計フローを示す。耐震設計は立体静的解析(線形および非線形)による静的設計と地震応答解析(質点系および立体)による動的設計からなる。

静的解析に先立ち、予備解析を実施し、外周部とコア部の応答せん断力をもとに、ダンパーを考慮した設計用地震荷重を設定し、2つの建物に対して別々に静的解析を行う。静的解析は立体モデルを用い、線形解析により許容応力度設計を行い、非線形解析により弾性限耐力および保有水平耐力を求める。地震応答解析は、外周部、コア部およびダンパーを一体化してモデル化し、すべての設計地震動レベルについて、質点系および立体モデルで行い、設計クライテリアの確認を行う。

3.2 設計入力地震動および静的地震荷重

設計入力地震動として、稀に発生する地震動(レベル1)、極めて稀に発生する地震動(レベル2)、余裕度検討レベルの地震動(レベル3)を設定する。レベル1地震動としては、告示波の他、過去の強震記録波(25cm/s)を、レベル2地震動としては、告示波、建設地の特性を考慮した模擬地震波(活断層分布、断層破壊モデル、地盤構造を考慮)、過去の強震記録波(50cm/s)をそれぞれ採用する。レベル3地震動は、余裕度の検討を行うことにより求まる地震動レベルで、RC造である外周部とコア部が保有水平耐力に達するときの地震動または2つの建物に衝突が生じる(ダンパーが限界変形に達するときの地震動のいずれかとする)。

3.3 設計クライテリア

表1に設計クライテリアを示す。3つの地震動レベルに対し、静的設計と動的設計についてクライテリアを設けている。長寿命建物を実現するために、通常のRC造建物よりも厳しいクライテリアとしている。

§4. 試設計

4.1 建物概要

試設計建物は、良好な地盤上に建つ地上60階、塔屋2階のRC造の住宅である。軒高は200.1m、外周部の建物幅は48.0m×48.0m、塔状比は4.2である。外周部はX、Y方向とも6m×8スパンであり、建物中央部に4×4スパンの吹き抜けを設けている。コア部は建物幅が17.8m×17.8mで、外周部とコア部の間には制振ダンパーを設置するクリアランスが2100mm設けている。階高は1階で5.0m、2～4階で4.5m、基準階で3.2m、58～60階で4.0mとなっている。

柱断面は1000mm×1000mm(内側チューブの隅柱:1300×1300mm)、外周梁断面は750×1100mm、内周梁断面は750×900mm、耐力壁の壁厚は600～1000mmである。外周住戸のスラブはプレストレス入りのボイドスラブで、スラブ厚は500mm(床下がり部:300mm)である。

使用材料に関しては、コンクリート強度はFc30～120とし、1～8階の柱および柱梁接合部にはFc120の超高強度コンクリートを用いた。主筋はSD490およびUSD685で最大径はD41、せん断補強筋は高強度せん断補強筋(685および1275N/mm<sup>2</sup>)で最大径はD16である。

ダンパーは、変形能力が大きく、リリーフ弁により最大減衰力が制御できるオイルダンパーとし、最大減衰力が約 500kN のものとした(表 2)。設置位置は、最上層から 5 層おきとし、各層で内側チューブの柱とコア部壁間の 4 面に各面 4 本づつ合計 16 本を主軸方向に対して 45° 方向で設置している(図 3 参照)。ダンパーの設置量に関する検討については後述する。

#### 4.2 ダンパーの設計

連結制振構造のダンパーの量には制振効果が最適となる値が存在することが既往の研究で指摘されている(4),5)。そこで、試設計建物のダンパーの必要量を地震応答解析によって検討する。必要量として、表 2 に示した性能を持つダンパーの高さ方向の連結位置および本数を定める。検討は、2 棟それぞれを 1 質点弾性モデルとして基準となるダンパー総量を設定する、多質点弾性モデルとして高さ方向の配分を定める、多質点弾塑性モデルとして最終的な必要量を定める、という手順で行う。なお、質点系モデルは建物主軸方向を対象とするため、ダンパーは表 2 に示す性能を主軸方向に換算して用いる。限界変形 50cm は 2 棟間の相対変形に換算すると約 70cm となる。

解析に用いる地震動は BCJ 波レベル 2 とする。また、ここでは、ダンパーの目標最大応答変形を限界変形の 1/2 (棟間変形に換算して約 35cm) とする。

##### 2 質点 2 柱列弾性モデルによる検討

ダンパーを線形ダッシュポットとし、基準となるダンパー総量としての基準粘性係数  $c_{00}$  を求める。解析モデルはコア部、外周部をそれぞれ等価 1 質点弾性モデルに置換し、2 棟を線形ダッシュポットで連結した 2 質点 2 柱列モデルである(図 7)。1 質点への置換は以下のように行う。

- ・静的増分解析により各層の荷重変形関係を求める。
- ・曲げばねを弾性とし、せん断ばねの剛性はひび割れを考慮した割線剛性として 60 質点弾性曲げせん断モデルを作成し、固有値解析により 1 次固有周期を求める。
- ・1 質点の等価質量 ( $M_A, M_B$ ) を建物の全質量とし、1 次固有周期から等価剛性 ( $k_A, k_B$ ) を求める。全質量を用いるのはエネルギー入力量を等価にするためである。

粘性係数  $c_0$  を解析変数とし、0 ~ 2000kN/(cm/sec) の範囲を 200kN/(cm/sec) ピッチで変化させた。減衰定数はコア部、外周部それぞれの 1 次固有周期 (3.00, 6.73sec) に対して 3% と設定した。図 8 はコア部、外周部の最大加速度および変形についてダンパーがないときの応答値に対する比として表したものである。

応答比が最小となる粘性係数の存在が確認できるが、その値は対象とする応答値によって異なっている。図 9 に最

表 2 オイルダンパーの性能

1次粘性係数	15kN/(cm/sec)
2次粘性係数	0.8kN/(cm/sec)
リリーフ速度	26cm/sec
限界変形	±50cm
限界速度	120cm/sec
剛性	250kN/cm

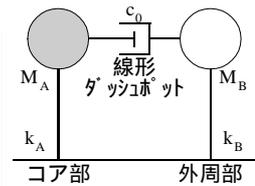


図 7 解析モデル (2 質点 2 柱列)

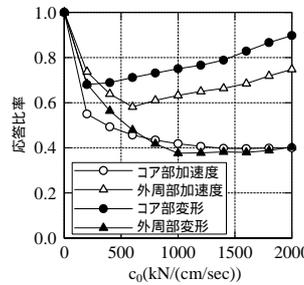


図 8 応答比

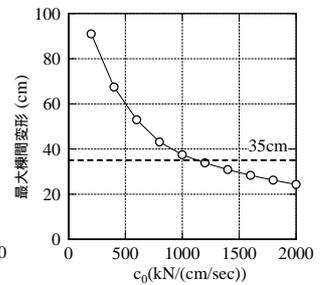


図 9 最大棟間変形

大棟間変形を示す。粘性係数が大きくなるにつれ、棟間変形は小さくなっている。以上の結果より、全体の応答をバランスよく低減しつつ外周部の変形を優先的に低減することと、棟間変形を 35cm 以下とすることを条件とし、 $c_{00}$  を 1200kN/(cm/sec) と設定する。

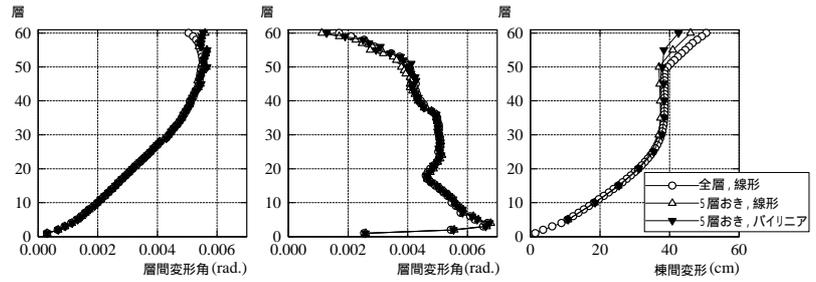
##### 120 質点 2 柱列弾性モデルによる検討

次に、 $c_{00}$  の高さ方向の配分を定める。解析モデルをコア部、外周部を前述の割線剛性を用いた 60 質点弾性曲げせん断モデルとし、線形ダッシュポットで連結した 120 質点 2 柱列モデルとする。配分方法は 全層均等分布、最上層から 5 層おきに均等分布の 2 種類を想定した。粘性係数の合計は  $c_{00}$  と等しくなるようにしている。減衰定数は、コア部、外周部それぞれの 1 次固有周期に対して 3% となるようにレーリー減衰で与えた。

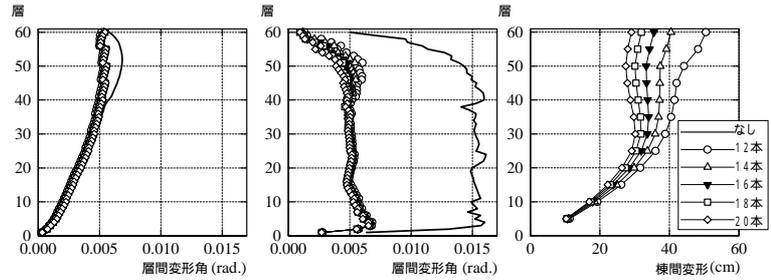
図 10 に最大応答値の比較を示す。層間変形角、棟間変形ともに両者の結果はほぼ一致している。これより、高さ方向の配分方法を実際の設置状況を踏まえ、最上層から 5 層おきに均等分布とする。ここで、5 層おき均等分布の場合について対象としているリリーフ弁付きオイルダンパーと対応するように、線形ダッシュポットの減衰力 - 速度関係をバイリニア曲線に置換する。バイリニア曲線は、文献 6) の方法と同様、図 11 に示すようにダンパーの最大速度時に荷重速度関係での面積が一定となるように求めた。リリーフ速度 ( $v_r$ ) と粘性係数比率 ( $c_2/c_1$ ) は表 2 から設置方向を考慮して換算した値を用いた。バイリニア置換したダンパーを用いたときの応答値を図 10 に併せて示す。なお、これは高さ方向均等分布を考慮し、置換した各層の粘性係数の平均値をすべての連結層に用いた場合の結果である。応答値は線形での値とよく一致しており、置換方法の妥当性が確認できる。これより、1 層あたりの 1 次粘性係数の基準値  $c_{110}$  を 110kN/(cm/sec) と定める。

120質点2柱列弾塑性モデルによる検討ダンパーの連結位置を最上層から5層おきとし、各層対象としているダンパーを同数設置するものとして、コア部、外周部は静的増分解析により得られた60質点弾塑性曲げせん断モデルとし、連結ダンパーは剛性を考慮したMaxwellモデルとする。基準となる $c_{110}$ はダンパー14.7本分の1次粘性係数に相当するため、ダンパー本数は各層12,14,16,18,20本と変化させた。減衰定数はコア部の1次振動が卓越する連成系の2次固有周期(2.76sec)に対して3%となるように瞬間剛性比例型で与えた。

図12に最大層間変形角および棟間変形を示す。図にはダンパーを設置しない場合のコア部、外周部それぞれの応答値も併せて示している。ダンパーを設置すると応答低減効果が見られ、特に外周部では低減効果大きい。ダンパーの本数が増えると、外周部の上層部では変形が抑えられる傾向があるが、層間変形角の最大値で評価する上では顕著な違いはない。棟間変形は2質点モデルでの検討結果と同様、ダンパー本数が増えると小さくなっている。なお、いずれの場合もダンパーの最大速度は限界速度以下であった。以上の結果からダンパーの本数は各層16本、計192本とした。



(a) コア部層間変形角 (b) 外周部層間変形角 (c) 棟間変形  
図10 最大応答値(120質点2柱列弾性モデル)



(a) コア部層間変形角 (b) 外周部層間変形角 (c) 棟間変形  
図12 最大応答値(120質点2柱列弾塑性モデル)

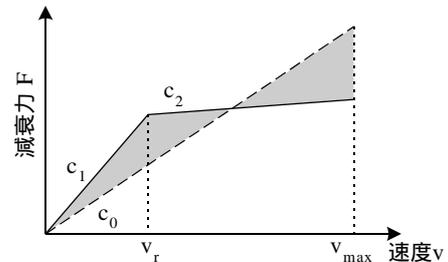


図11 減衰力 - 速度関係のバイリニア置換

4.3 地震応答解析

解析モデルを図13に示す。質点系では主軸方向、立体では主軸方向と45°方向を対象とした。減衰定数は、コア部の1次振動が卓越する、質点系では2次固有周期、立体では3次固有周期に対して3%となるように瞬間剛性比例型で与えた。入力地震動を表3に示す。告示波に関しては工学的基盤において位相差を考慮して作成した10波のうち最も速度の大きい波を採用した。なお、立体応答解析については、レベル2地震動で、結果として、質点系応答解析結果で最も応答値の大きい告示波とした。

表4に各地震動レベルの最大応答値の一覧を示す。また、図14~16に、最大応答値を示す。

レベル3地震動は、本建物の場合、外周部が保有水平耐力に達するときの地震動として求め、レベル2の入力レベル(最大速度)と比較すると1.6~2.0倍であった。

各地震動レベルで、設計クライテリアを満足していることが確認できる。また、主軸方向と45°方向では、最大層間変形角の差が小さくなっている。柱の軸力比は45°方向では主軸方向に比べ、変動幅が大きくなるが、外チューブの隅柱でも引張軸力は発生していないことがわかる(表4)。

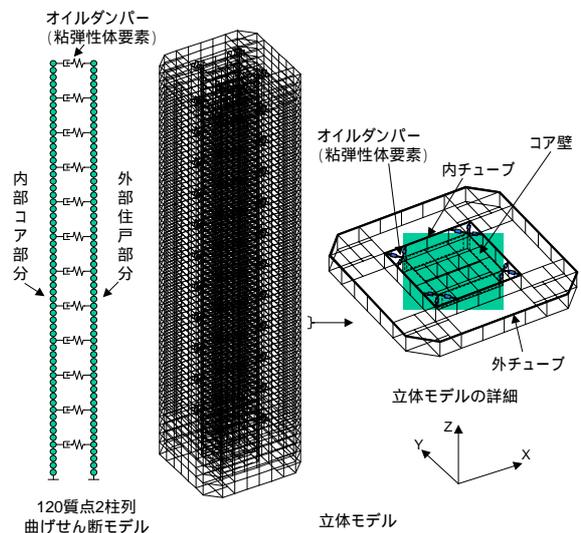
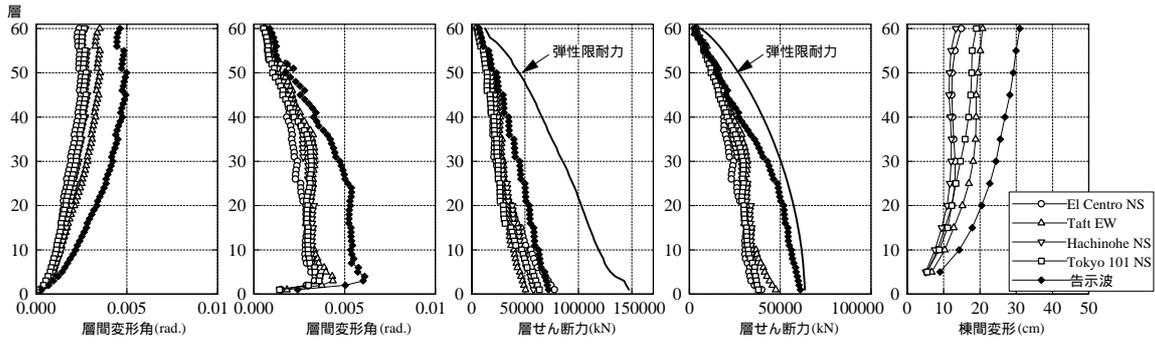


図13 解析モデル

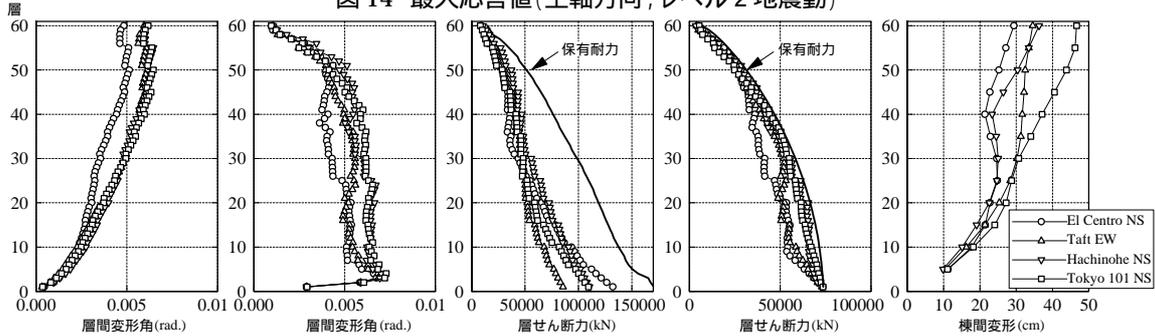
表3 地震動一覧

地震動		レベル1	レベル2	レベル3
(1) 過去の強震記録	標準的な記録波	EL CENTRO 1940 NS	25	50
		TAFT 1952 EW	25	50
	地域性を考慮した記録波	TOKYO101 1956 NS	25	50
	長周期成分を含んだ記録波	HACHINOHE 1968 NS	25	50
(2) 応答スペクトルに基づく模擬地震動	告示波			-
(3) 建設地の特性を考慮した模擬地震動				

単位: cm/sec



(a)コア部層間変形角 (b)外周部層間変形角 (c)コア部層せん断力 (d)外周部層せん断力 (e)棟間変形  
 図 14 最大応答値(主軸方向, レベル2地震動)



(a)コア部層間変形角 (b)外周部層間変形角 (c)コア部層せん断力 (d)外周部層せん断力 (e)棟間変形  
 図 15 最大応答値(主軸方向, レベル3地震動)

表 4 最大応答値一覧

レベル1地震動				
応答値	コア部		外周部	
	地震動	応答値	地震動	応答値
重心位置変形角(rad.)	Taft	1/1178	Taft	1/766
層間変形角(rad.)	Taft	1/606 (F56)	Taft	1/455 (F5)
層塑性率	-	-	Taft	0.317 (F3)
ベースシア係数	El Centro	0.107	Taft	0.019
レベル2地震動				
応答値	コア部		外周部	
	地震動	応答値	地震動	応答値
重心位置変形角(rad.)	告示波	1/347	告示波	1/239
層間変形角(rad.)	告示波	1/201 (F51)	告示波	1/164 (F5)
層塑性率	-	-	告示波	0.855 (F7)
ベースシア係数	El Centro	0.188	告示波	0.046
立体応答値	主軸(X)方向			
	外チューブ	内チューブ	外チューブ	内チューブ
	0.765(2F)	0.912(2F)	0.542(2F)	0.653(2F)
	柱軸力変動	0.11~0.22	0.17~0.30	0.06~0.30
レベル3地震動(余裕度検討レベル)				
応答値	コア部		外周部	
	地震動	応答値	地震動	応答値
重心位置変形角(rad.)	Taft	1/297	Tokyo 101	1/196
層間変形角(rad.)	Hachinohe	1/155 (F56)	Tokyo 101	1/137 (F5)
層塑性率	-	-	Hachinohe	1.117 (F25)
ベースシア係数	El Centro	0.320	Tokyo 101	0.056

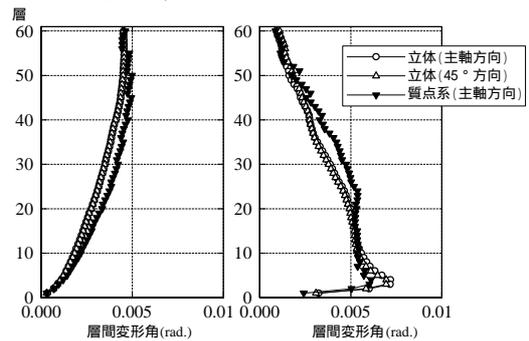


図 16 立体応答解析結果(主軸および45°方向)

§ 5 . まとめ

60階 200m 級超高層 RC 造住宅で適用した構法の特長, 設計法および試設計建物についての概要を紹介した。試設計では, ダンパー量の検討を地震応答解析により行い, その結果, 制振効果が最適となる量が存在することを示し, ダンパーの許容変形とから必要量を導いた。

参考文献

- 1) 内田和弘, 寺岡勝, 加藤泰夫ほか: 60 階 200m 級超高層住宅の開発 その 1~4, 建築学会大会学術講演梗概集, 投稿中, 2003
- 2) 佐藤和彦, 寺岡勝ほか: 高軸圧下における鉄筋コンクリート造短柱の力学性状に関する研究, フジタ工業技術研究所報, 第 22 号, pp.13-22, 1986

- 3) 田中清, 宗村美貞, 寺岡勝ほか: 超高層建物の構造形式と耐震設計法に関する研究, フジタ工業技術研究所報, 第 26 号, pp.85-90, 1990
- 4) 蔭山満, 安井謙, 背戸一登: 連結制振の基本モデルにおける連結バネとダンパーの最適解の誘導, 建築学会構造系論文集, No.529, pp.97-104, 2000.
- 5) 宮川伸幸, 小堀鐸二ほか: ジョイントダンパーを用いた構造物の設計法に関する研究その 1, 建築学会大会学術講演梗概集, pp.959-960, 1990.
- 6) 笠井和彦ほか: オイルダンパーをもつ制振構造の等価線形化について, パッシブ制振構造シンポジウム論文集, pp.291-300, 2002



内田和弘

ひとこと

構造性能も含め住宅の性能に関する関心は高まっています。快適な超高層住宅の実現に向けて, さらなる技術の洗練化を行っていきます。