

大阪ビル（仮称）の構造設計



城戸 隆宏
日本郵政



川上 徹二
同



秋田 信行
久米設計



市川 水彩
応用地質

1 建築計画概要

本建物は地上8階、地下なしの日本郵政グループ関係の事務所ビルで、平面形状は約86.4m×43.2mである。建築面積は4,414m²、延床面積は28,422m²の規模を有している。階構成は、1階にエントランスホール、事務室および会議室、2階に倉庫、食堂および会議室、3～7階は事務室関連諸室、8階は電気室、機械室および屋外機置場が計画されている。主要な用途は高セキュリティを有した事務所ビルとなっている。

図1に完成予想パースを示す。

【建築概要】

建設地：兵庫県伊丹市
用途：事務所
階数：地上8階・地下なし
延床面積：28,422m²
最高高さ：37.85m
構造形式：基礎免震構造（純ラーメン構造）
構造種別：PcaPC造+PC-S造・RC造・鉄骨造
免震部材：天然ゴム系積層ゴム（G3）
鉛プラグ入り積層ゴム（G4）
弾性すべり支承（G6、 $\mu = 0.014$ ）
基礎構造形式：直接基礎（マットスラブ）
一部静的締固め砂杭工法（SAVE工法）



図1 完成予想パース

2 構造計画概要

本建物は建物の用途を考慮し、高度な耐震性能値を確保することに加え、大阪湾付近の盆地構造に起因する厳しい地震環境や長周期地震動を勘案し、基礎免震構造を採用している。

2.1 上部構造

無柱空間を確保しながら免震効果を最大限発揮させるため、柱の構造種別をPcaPC造、コア部および外周の短スパン（7.2m）梁をPcaPC造として層剛性を確保し、ロングスパン（21.6m）梁をPC-S造とした。免震構造を採用することで上部構造への地震入力を大幅に低減し、地震力は短スパン部のPcaPC造でほとんど抵抗することでPC-S梁は長期荷重のみを主に負担させた、適材適所に部材を配置した計画とした。図2に概略の構造図を示す。

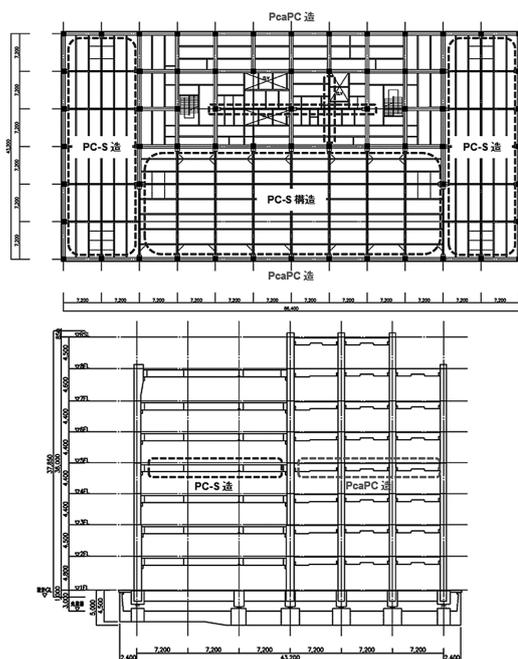


図2 概略構造図（伏図・軸組図）

2.2 PC-S造

本建物のロングスパン梁（最大スパン21.6m）については、PC-S造を採用した。PC-S造とは、RCS構造（柱を鉄筋コンクリート（RC）造、梁を鉄骨（S）造とした構造）の形態をもちながら、プレストレス技術を活用して優れた構造となるように開発されたものである。（MENSIN NO.100 P31～36参照）

図3にPC-S造の概要を示す。

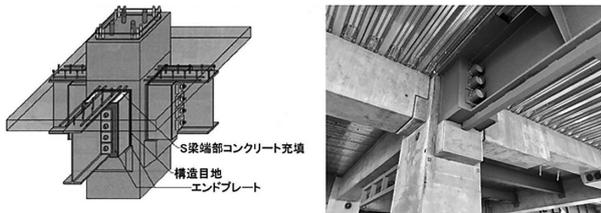


図3 PC-S造の概要

2.3 免震計画

使用する免震材料は、天然ゴム系積層ゴム（RB-R1000:11基、RB-R1300:4基-G3）、鉛プラグ入り積層ゴム支承（LRB-S1000:21基-G4）、弾性すべり支承（SSR-S300～750:36基-G6）およびオイルダンパー（OD-100:各方向6基-1000kN）である。

設置位置は1階柱直下とし、基礎免震構造とした。免震層のねじれ剛性を高めるため、鉛プラグ入り積層ゴム支承を極力、建物外周部に配置するとともに、偏心率が極力小さくなるように配慮している。鉛プラグ入り積層ゴムは設計用風荷重（平成12年第1461号告示第Ⅲ号口に定める風荷重1.25倍）に対して降伏しないように設定している。

また、長周期化を図るため、建物中央部は全て弾性すべり支承とし建物の四隅は地震時の引抜き対応として大口径（φ1300）の天然ゴム系積層ゴムを配置している。

図4に免震装置配置図を表1に免震装置の諸元について示す。

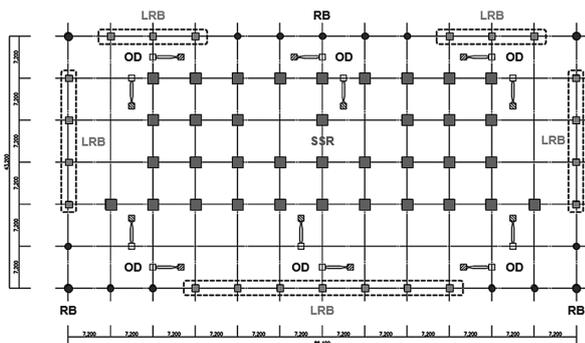


図4 免震装置配置図

表1 免震装置諸元

免震材料の種類	天然ゴム系積層ゴム【RB】	鉛プラグ入り積層ゴム【LRB】	弾性すべり支承【SSR】	オイルダンパー【OD:12基】
符号	LRB-R1000, R1300	LRB-S1000	SSR-S300, 550, 650, 750	OD100
基数	11基, 4基	21基	9基, 2基, 15基, 10基	X方向6基, Y方向6基
1次形状係数:S1	31以上	32以上	摩擦係数: $\mu=0.014$	
2次形状係数:S2	4.0, 5.1程度	4.0程度	摺動寸法: 750mm	
設計ゴム面圧(N/mm ²)	8.0, 10.0	10	20	減衰タイプ: リニア 最大減衰力: 1000kN ストローク: ±750mm 限界速度: 111cm/sec
ゴム層厚×層数(mm)	7.5×33/9, 8×26	8.0×31	1.9×19～6.0×16	
鉛プラグ径(mm)	—	90φ×4	—	
装置高さ(mm)	437.5	457.0	186.3～236.7	
せん断弾性率(N/mm ²)	G3: 0.290	G4: 0.392	G6: 0.588	

各支承はデバイスメーカーの全数性能検査結果の性能値（水平剛性）を反映して再配置し、更なる免震層の最適化（偏心率の極小化）を図っている。オイルダンパーに関しては全数第三者検査機関の立会いに基づく大臣認定適合品を使用している。

また、擁壁とのクリアランスは800mm（施工）、750mm（設計）および700mm（最小）以上とし、EXP.J及び設備可動継手は750mmの変位に追従可能な計画とした。

一般的に免震構造は地震時に大きな水平変形を伴う。免震層には設備関係（ダクト・配管・電気関係配線）の要素が数多く配置されるため、設計時に設定したクリアランスを確実に確保しているかが重要である。本計画では施工者（具体的な検査は特定の第三者検査機関が実施）による免震層の中間検査、ならびに竣工前の監理者検査を実施することで当該クリアランスを確実に確保する計画としている。

2.4 耐震設計方針

告示平12建告第1461号に示されている稀に発生する地震動のレベルをレベル1、極めて稀に発生する地震動のレベルをレベル2とする。各地震動入力レベルに対して設定した耐震性能の目標値を表2に示す。本計画ではレベル2地震時にPC-S造の端部において、鉄骨との圧着部の離間を起こさせないことを設計クライテリアの一つとして設定していることが特徴的である。

表2 耐震性能の目標値

項目	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）		
		1/300以下	1/200以下		
上部構造	層間変形角	短期許容応力度以内			
	部材応力	短期許容応力度以内			
	PC-S部材	圧着部・離間モーメント以内 ※4			
	PCaPC部材	鉄骨梁部：短期許容応力度以内 短期許容応力度以内 ※3			
免震層	水平移動量	300mm以下	600mm以下 ※1		
	積層ゴム系支承	せん断歪み	125%以内	250%以内 ※2	
		引張応力度	生じない	限界引張強度-1.0N/mm ² 以内	
	弾性すべり支承	変形	300mm以下	600mm以下	
オイルダンパー	引張力	浮き上がりは生じない			
	速度	111cm/s以下			
基礎構造（マツスラブ）	地盤の支持力	短期許容支持力以内			
	部材応力	短期許容応力度以内			

※1 積層ゴムのせん断歪み耐震性能目標値×RBの最小ゴム総厚（=250%×247.5mm=618mm～600mm）で決定する
 ※2 積層ゴムの250%変形以内とする
 ※3 曲げモーメントについては終局曲げ耐力の0.9倍とする
 ※4 上下動を考慮した場合の圧着部は、終局耐力以内とする

3 時刻歴応答解析概要

3.1 はじめに

時刻歴応答解析により設計する際に用いる設計用入力地震動では、サイト波の長周期地震動を波数積分法によって検討する場合が多い。その理由としては、他の長周期地震動の解析手法と比較して解析に要する機器や時間の負担が少ないことや、平行成層（一次元）地盤で近似が可能であれば精度の高い地震動予測が可能であることが挙げられる。

しかし、本手法では複雑な地盤構造を想定した地震動の挙動を適切に評価することは難しく、過小あるいは過大な地震動評価となる可能性がある。

一方で、同じく長周期地震動の算定に用いられる三次元有限差分法（以下、差分法）では三次元の地盤構造を考慮した地震動評価が可能であり、内閣府による長周期地震動の算定等に用いられている。

計画地周辺の工学的基盤面は盆地状に形成されていることから、成層地盤での評価（近似）が困難である。そこで、活断層帯を対象としたサイト波を用いて地震波の評価方法について検証し、時刻歴応答解析を実施した。図5に敷地周辺の工学的基盤面深さとサイト波の作成を行った断層帯の震源モデル図を示す。本章では以上の結果について報告する。

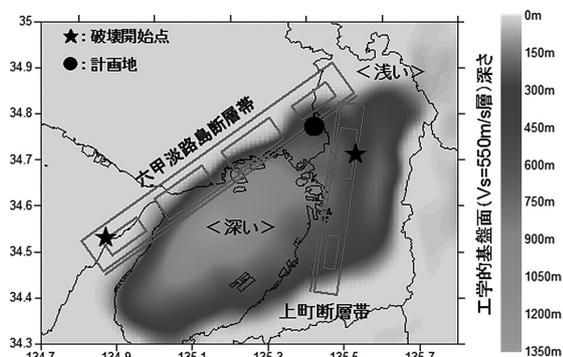


図5 工学的基盤面深さと震源モデル

※破壊開始点は上町断層帯ケース2、六甲淡路島断層帯ケース4を示す

3.2 入力地震動

採用した地震波の概要を表3に示す。設計用層せん断力の設定は、地震動に対する応答解析を実施して行う。設計に用いる地震動波形は、平成12年建設省告示第1461号に示されている方法から求めた地震動波形3波、既往の観測波3波および建設地の地盤特性を反映したサイト波11波の計17波を選定した。サイト波には上町断層帯、六甲淡路島断層帯を採用し、破壊開始点などの不確定要素を考慮して複数の破壊ケースを想定した。なお、本論では敷地への影響が大きいケース2およびケース4による応答解析結果を中心に示す。

表3 採用地震波の概要

地震動	内容	地震波
告示スペクトル適合波	国土交通省告示1461号に規定される解放工学的基盤スペクトルに適合するように作成された模擬地震動	八戸位相波 神戸位相波 ランダム位相波
観測地震波	標準的な強震記録のもの(HACHINOHEは翠川による再数値化)	ELCENTRO1940_NS TAFT1952_EW HACHINOHE1968_NS
サイト波	地震環境から建設地盤において予想される地震波	上町断層帯による地震(6ケース) 六甲淡路島断層帯による地震(4ケース)
長周期地震動	超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について示されたもの	長周期地震動OS3

3.3 解析概要

(1) 振動解析モデル概要

解析モデルは、各方向別に1階以上の各床位置に質量を集中させた9質点の等価せん断モデルとした。上部構造および下部構造の減衰は内部粘性型とし、減衰定数は1階床下をそれぞれ固定としたときの1次固有振動数に対して2%とする。

なお免震層は、鉛プラグの履歴減衰および弾性すべり支承の摩擦以外の減衰を考慮しない。

(2) サイト波概要

サイト波は、表4に示すとおり短周期帯と長周期帯を別々に作成し合成した、ハイブリッド波としている。ここでは短周期帯の解析方法は全て統計的グリーン関数法とし、長周期帯の解析手法に波数積分法を用いたモデルBと三次元地盤を考慮した差分法によるモデルCを用いて作成した地震波による建物の応答比較を行った。なお、設計においては建設地周辺の地盤構造を考慮したモデルCによる地震波を採用している。

表4 地盤モデルと解析手法の違いによるモデル設定

	モデルA	【モデルB】	【モデルC:設計用】
地盤モデル	J-SHIS公開モデル	公開モデル + 地盤調査 <一次元成層地盤>	公開モデル + 地盤調査 <三次元地盤>
短周期帯解析手法	統計的グリーン関数法		
長周期帯解析手法	波数積分法		差分法

※地盤調査にはPS検層および常時微動検査結果を用いた

(3) 基礎底面レベルにおける入力地震動

地盤調査より得られた工学的基盤面から地表面までの約105mの浅部地盤モデルを用いて、逐次積分非線形解析の全応力解析を行い、基礎底面レベル(GL-3.8m)における地震波を抽出したものとした。

モデルB、Cの擬似速度応答スペクトルの比較を図6に示す。地盤構造の影響が大きい六甲淡路島断層帯の応答レベルの低減が特に大きいことが分かる。

本建物の免震層の周期5秒（積層ゴム200%歪時）において、モデルBに対してモデルCでは上町断層帯で約70%、六甲淡路島断層帯で約60%に擬似速度

応答スペクトルが低減された。

また表5に採用した入力地震動の一覧を示す。

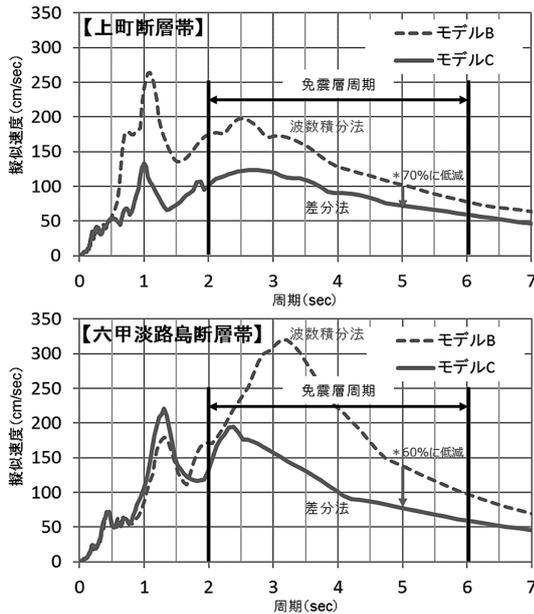


図6 擬似応答スペクトルの比較

表5 入力地震動の一覧

種類	地震動波形 (略称)	極めて稀に発生する地震動		解析時間 (s)
		速度 (cm/s)	加速度 (cm/s ²)	
告示 スペクトル 適合波	告示1: 八戸位相	56.4	293.0	327.68
	告示2: 神戸位相	58.7	287.3	163.84
	告示3: ランダム位相	48.9	262.1	163.84
観測 地震波	El Centro NS	50.0	511.0	53.76
	Taft EW	50.0	497.0	54.38
	HACHINOHE NS	50.0	348.9	234.00
サイト波	上町断層帯による地震 ケース2 EW	62.9	285.1	163.84
	六甲淡路島断層帯による地震 ケース4 EW	73.5	291.0	163.84

4 時刻歴応答解析結果

4.1 固有値解析結果

各方向の上部構造基礎固定時の免震層の層間変形が2.5cm (微小変形)、15cm (レベル1)、50cm (レベル2)、62cm (余裕度) としたときの等価剛性による固有周期、刺激関数を表6に示す。

上部構造 (免震層固定時) の一次固有周期は略算により求められる設計用一次固有周期Tと比較すると、X方向は0.025h、Y方向は0.027hとなっており、RC造とS造の中間的な数値を示している。

表6 固有周期と刺激関数

変形状態	次数	X方向			Y方向		
		1次	2次	3次	1次	2次	3次
上部構造 (免震層固定)	固有周期T (sec)	0.93	0.32	0.20	1.00	0.34	0.22
	刺激係数β	1.29	-0.47	0.35	1.31	-0.54	0.51
2.5cm (10%歪)	固有周期T (sec)	2.36	0.53	0.27	2.38	0.57	0.30
	刺激係数β	1.09	-0.11	0.03	1.10	-0.13	0.04
15cm (L1) (60%歪)	固有周期T (sec)	3.97	0.55	0.27	3.98	0.59	0.30
	刺激係数β	1.03	-0.04	0.01	1.04	-0.04	0.01
50cm (L2) (225%歪)	固有周期T (sec)	5.12	0.55	0.27	5.13	0.59	0.30
	刺激係数β	1.02	-0.02	0.01	1.02	-0.03	0.01
62cm (余裕度) (250%歪)	固有周期T (sec)	5.28	0.55	0.27	5.28	0.59	0.30
	刺激係数β	1.02	-0.02	0.01	1.02	-0.03	0.01

4.2 応答解析結果の比較

免震材料の材料特性のばらつきを考慮した建物の応答比較を図7 (変位)、図8 (層せん断力係数) にそれぞれ示す。層せん断力係数、応答変位ともにモデルC (差分法) の応答低減が大きいことが分かる。上町断層帯について、モデルBに対してモデルCでは層せん断力係数で約73%、免震層の変位で約77%に、六甲淡路島断層帯については、層せん断力係数で約76%、免震層の変位で約55%に低減された。

なお、モデルCのサイト波において、上町断層帯と六甲淡路島断層帯ともに各応答値が全て設計クラ

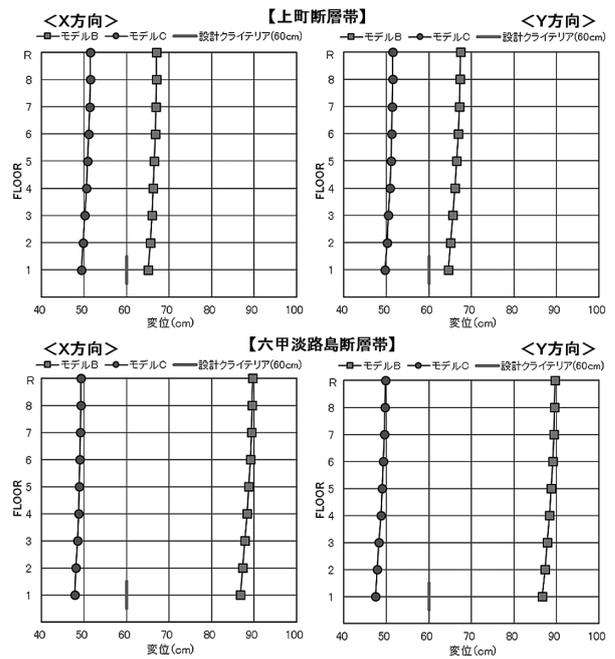


図7 応答結果比較: 変位

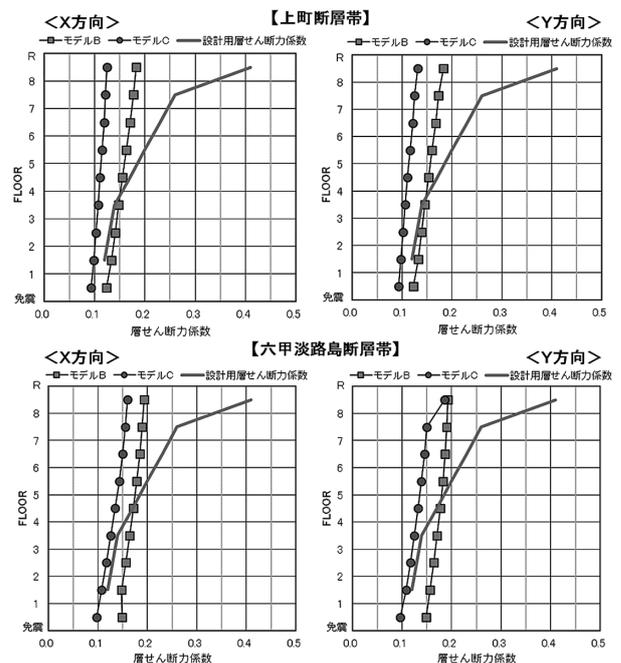


図8 応答結果比較: 層せん断力係数

イテリア以内であることを確認した。

また表5に示した各地震波に関しても全て設計クライテリア以内であることを確認している。

4.3 モデルBをクライテリアに納めた場合の比較

モデルBの入力地震動を用いた場合に設計クライテリア内に納めるための検討を参考として行った。具体的には免震層の変形に着目して、免震層の変位を設計クライテリアの60cm以下（擁壁のクリアランスは更に余裕をみて75cmとしている）となるようオイルダンパーの台数を調整した。

ただし、オイルダンパー増加に伴う、上部構造の応答性状については、非考慮としている。

モデルBのオイルダンパーの必要台数は、表7のようにモデルCに対して上町断層帯では2.50倍、六甲淡路島断層帯では6.17倍となった。

なお、オイルダンパーの増加、およびそれに伴う上部の設計層せん断力の増加を仮に考慮した場合、更にコストアップとなることが予想される。このことから、三次元地盤構造を考慮した設計用地震動の有用性が確認できた。

表7 オイルダンパーの数量比較

	六甲淡路島断層帯	上町断層帯
モデルB：波数積分法	74台	30台
モデルC：三次元差分法	12台	12台
比率 (B/C)	6.17	2.50

4.4 想定外の地震に関する参考検討

前述した様に差分法を採用した地震波を採用することによって、上町断層帯および六甲淡路島断層帯によるサイト波が全て設計クライテリア以内となった。ただし、これはあくまでもある理論に基づいた、机上の計算の検討結果である。

そこで設計者としては、上部構造の更なる安全性を確認するために、建物と擁壁が衝突する（応答変位が水平クリアランス750mmに到達）地震のレベルを想定し、レベル3地震動として扱い、その場合の挙動について確認した。なお、前述したように擁壁のクリアランスは最も大きい免震層応答変位の1.5倍の安全率を有している。

免震材料の材料特性を標準状態として検討した場合、設計波（モデルC）の倍率を増加させた結果、建物と擁壁が衝突する直前の地震動の入力倍率は上町断層帯で決まり、地震波のレベルとしてX、Y方向共に約1.5倍となった。

表8に入力地震動の倍率を示す。

この時の応答変位は、積層ゴムのせん断歪みが約

300%となり、一般的にはハードニング領域にあるが、メーカーの見解等から性状を保持できると考えた。

またオイルダンパーについても限界速度を超えているが、即座に性能低下が発生しないと考えた。

表8 設計クリアランスに到達した場合の倍率

項目	X方向	Y方向
入力地震動の倍率	1.53	1.52
応答変位（設定値≒75.0cm）	74.72cm	74.60cm
設計クリアランスに達した波形	上町断層C2_EW	上町断層C2_EW

表9に検討結果の一覧を、図9に応答層せん断力のグラフを示す。

仮に免震材料が許容範囲を越えて性状を保持できたと考えた場合、応答層せん断力は、設計用層せん断力を下回っており、想定外の地震においても上部構造は弾性範囲内にあり、主要構造に損傷が生じないことを確認した。

表9 設計クリアランスに到達した場合の最大応答結果

項目	X方向	Y方向	耐震目標値
免震層相対速度 (cm/sec)	157.0 上町断層C2_EW	153.8 上町断層C2_EW	111cm/sec
免震層変位 (cm)	74.72 (γ=302%) 上町断層C2_EW	74.60 (γ=301%) 上町断層C2_EW	60cm (γ=250%)
層間変形角 (rad)	1/676 (2F) 上町断層C2_EW	1/598 (3F) El Centro_NS	1/200
1階層せん断力係数	0.114 上町断層C2_EW	0.114 上町断層C2_EW	0.120

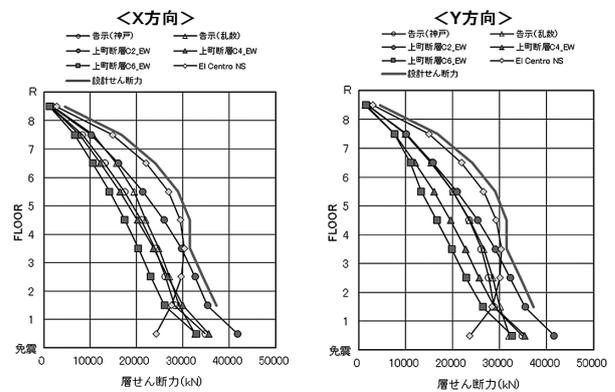


図9 応答解析結果：応答層せん断力

以上の結果から、地盤構造を三次元構造として評価することで、地震波のレベルは小さくなったが、本建物の上部構造の安全性および耐震性能としての余裕度は非常に高いレベルにあることが確認できた。

5 長周期地震動に対する検討

5.1 はじめに

平成28年6月24日付けで、国住指第1111号「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動対策について（技術的助言）」が示された。ここでは、技術的助言にもとづく対策のう

ち、長時間の繰り返しの累積変形により免震材料の特性が変化する可能性について確認する。

入力地震動は、建設地が技術的助言に示される区域のうち、OS3の区域に含まれることから基礎底面レベルまで増幅させたOS3を採用する。

図10に建設位置と各区域の簡略スペクトルを示す。

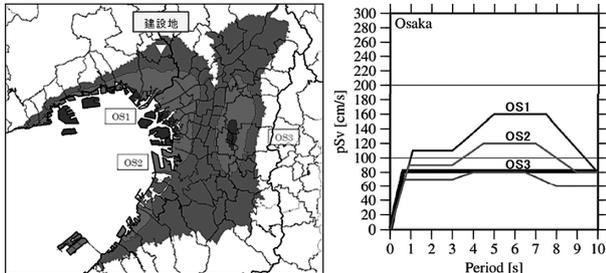


図10 建設地の位置と各区域の簡略スペクトル

5.2 免震材料の繰り返しの評価方法

長周期地震動による繰り返しでは、免震材料が軟化側に変化することが考えられる。各免震材料の繰り返しの評価方法を下記に示す。なお、本検討では、免震材料の製造ばらつき、温度変化、経年変化によるばらつきは考慮しないこととしている。

■天然ゴム系積層ゴム支承 (RB)

採用メーカーの「長周期地震動に対する免震材料の性能変化について」に示されるとおり、繰り返しの影響は小さいので、繰り返しの影響は0とする。

■鉛プラグ挿入型積層ゴム支承 (LRB)

採用メーカーの方法を用いて、Qdの低下率 k_{LRB} を計算し、本低下率を用いてQdを再設定する。

本計画において計算の結果、当該材料の採用ばらつき(繰り返し)は-26%を採用した。

■弾性すべり支承 (SSR: $\mu = 0.014$)

採用メーカーの「長周期地震動を考慮した応答評価法」に示されるとおり、繰り返しの影響を考慮した場合において摩擦係数は一律 $\mu = 0.010$ に低減した値を用いる。また、一次剛性はSSRの積層ゴム部分によって決まるため、繰り返しの影響は0とする。

■オイルダンパー (OD)

繰り返しの影響は小さいことが確認できているので、繰り返しの影響は0とする。

5.3 検討結果

長周期地震動による各免震材料のばらつきを考慮し、SSRの摩擦係数を低減した場合の免震層の累積変形量を表10に示す。

累積変形量は、許容累積変形量に比べて十分に小さいことを確認した。

表10 長周期地震動 (OS3) の累積変形量

免震材料		免震層累積変形量		判定
種類	許容累積変形量(m)	X方向	Y方向	
天然ゴム系積層ゴム	-	16.76	16.65	-
鉛プラグ入り積層ゴム	-			-
弾性すべり支承	100			OK
オイルダンパー	83			OK

長周期地震動OS3による建物の地震応答解析結果について、鉛プラグの繰り返しの影響を考慮した場合と考慮しない場合を比較して表11に示す。結果として全てのクライテリアを十分に満足している。

表11 長周期地震動 (OS3) の最大応答値

項目	OS3 (繰り返し考慮)	OS3 (繰り返し非考慮)	耐震目標値と判定
免震層相対速度 (cm/sec)	43.66 (X方向)	40.50 (X方向・Soft)	111cm/sec: OK
免震層変位 (cm)	29.83: $\gamma = 121\%$ (Y方向)	31.91: $\gamma = 129\%$ (Y方向・Soft)	60cm: OK $\gamma = 250\%$
層間変形角 (rad)	1/1396 (Y方向・2F)	1/1118 (Y方向・3F・Hard)	1/200: OK
1階層せん断力係数	0.052 (XY方向)	0.054 (XY方向・Hard)	0.120: OK

また結果の妥当性確認として、長周期成分を含む告示波(八戸位相)において総入力エネルギーと等価速度の観点から考察した。表12に総入力エネルギーと等価速度について示す。OS3における値は告示波よりも小さい。なお、OS3におけるLRBの吸収エネルギーは告示波よりも小さく72%程度であった。このことから、OS3における地震動の大きさはそれほど大きくないことが確認できる。

表12 総エネルギーEと等価速度VEの比較

項目	告示波(八戸)	OS3
総入力エネルギーE(kNm)	89,370	71,840
等価速度VE(cm/sec)	203	182

6 おわりに

本検討の調査地は近畿圏の堆積盆地構造の境界に位置しているため、数km離れた地点でも地盤構造が大きく異なる場合がある。現状においても調査地における地盤調査の実施及びその結果を加味した地震動評価は多く行われている。一方で、三次元地盤モデルを用いた差分法による設計波の検討は一般化されていない。しかしながら、本検討のように調査地周辺の地盤構造を見直すことによって設計波への影響が大きく表れる場合がある。これは設計における構造計画や建設費にも関わる可能性があることから、近畿圏などにおける長周期地震動評価では解析条件に留意した評価方法の選択が必要である。

【参考文献】

- ・ MENSIN NO.100
- ・ 市川、城戸他、近畿圏の活断層帯を対象とした長周期地震動の評価方法、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北) 2018.9