

某研究施設

『可変性確保大スパン PCaPC 構造と BCP 対応免震構造の融合』

プラナス株式会社 柴川義智
有限会社 NCU 植畑寛志

1. はじめに

本建物は、北関東に位置し、様々な災害に対して対策をうった建物となっています。

BCP（事業継続計画）に対応するため、極めて稀に発生する 500 年に一度レベルの地震に備える仕様として免震構造を採用、また、近傍河川の氾濫による 1000 年に一度レベルの水害に耐えうる仕様として止水ドアやシャッター、耐水圧能力を満たす止水壁などを設置しています。設備的にも、十分な非常用発電を有しているほか、備蓄についても備えてあります。

また、施設として将来の変化に対しても柔軟に対応できる必要があるため、大スパンを計画できる PC 構造を採用しています。設備についても、各フロアに設備フロアを設けているほか、十分な DS を設けることで、どのような変化にも対応できるフレキシビリティを最大限持たせた計画となっています。

室内空間はすべての人の快適性と健康を促進する環境づくりを創出すると共に、コミュニケーションの障害となるものを取り除き、交流の触発を促す場や機能を充実させた計画となっています。

2. 建物概要

本建物の概要を以下に示す。

所在地：北関東
主要用途：事務所
延床面積：12,900 平米
意匠設計：プラナス株式会社一級建築士事務所
構造設計：有限会社 NCU 一級建築士事務所
施工会社：大成建設株式会社
PC 工事：黒沢建設株式会社



図 2.1 建物外観

3. 構造計画概要

(1) 上部構造の構造計画

本建物の主体構造形式は、上部構造（地上7階地下1階）を主にPCaPC造（地下階はRC造とPRC造の混合、7階はS造）とした、基礎免震構造です。

建物の用途上、地震時の層間変形および水平加速度を小さくすることが望ましいことと、大地震後にも継続利用できる高い耐震性能を有することが求められるため、PCaPC造と免震構造の組み合わせを採用しています。

スパン計画は、PCaPC造の特性を生かし、X方向は12.5m、Y方向は9.5mの均等ロングスパン構造とし、免震支承に荷重を集約することで免震構造としても有効な計画としています。

柱梁接合部は、フル圧着工法としています。

また、免震部材直上の1F梁については、地下階（ピット階）で梁せいが充分に確保できるため、両方向ともに現場打ちの鉄筋コンクリート（RC）造とし、地下階の無い範囲は現場打ちのPRC梁を採用しています。

架構形式は、X方向、Y方向ともに純ラーメン構造を採用しています。

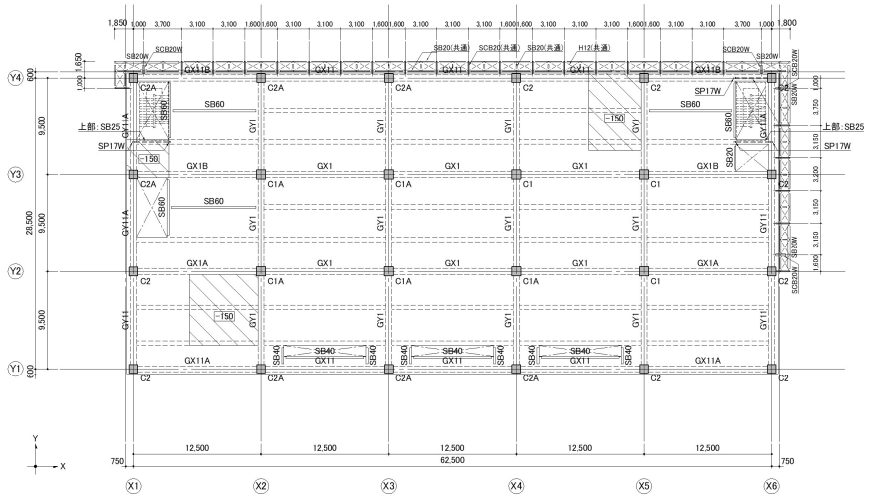


図 3.1 基準階床伏図（4階）

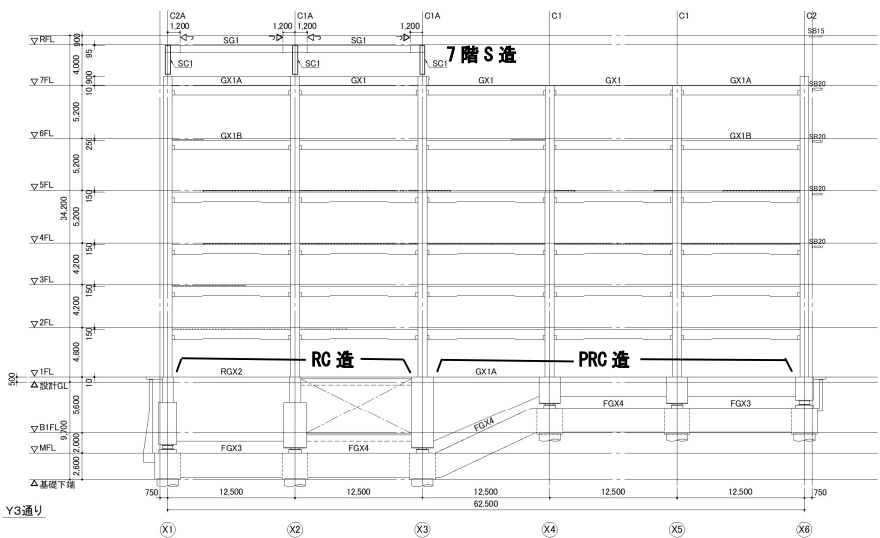


図 3.2 代表軸組図（Y3 通り）

(2) 免震層の計画

免震層は、支承材として天然ゴム系積層ゴム支承（ $G=0.39$ ）を8基、鉛プラグ挿入型積層ゴム支承（ $G=0.39$ ）を8基、弾性すべり支承を8基の合計24基を使用しています。

免震部材は、変動反力の大きい外周部に積層ゴム支承を、変動反力が小さく、また、用途上床積載荷重を大きく見込んでいることから内部に弾性すべり支承を配置し、十分な免震効果を発揮できるよう計画しています。

(3) 基礎の計画

計画敷地は、GL-22~24m以深でN値50以上の砂礫層が出現することから、この層を支持層とする杭基礎（場所打ちコンクリート杭）を採用しています。この砂礫層も含め表層地盤は杭孔が崩れやすいため、オールケーシングを用いたストレート杭としています。

また、一部の層で地震時に液状化の可能性があるので、液状化を考慮した設計をおこなっています。

基礎梁はRC造とし、地震時に杭から伝わる曲げ戻しモーメント、および、免震支承から伝わる付加曲げモーメントを負担できる基礎形式としています。

また、設計地下水位（GL-2m程度）に加えて、1000年に一度の水害（GL+2.4m程度）によって生じる水圧、浮力に対する検討もおこなっています。

表 3.1 主体構造および架構形式

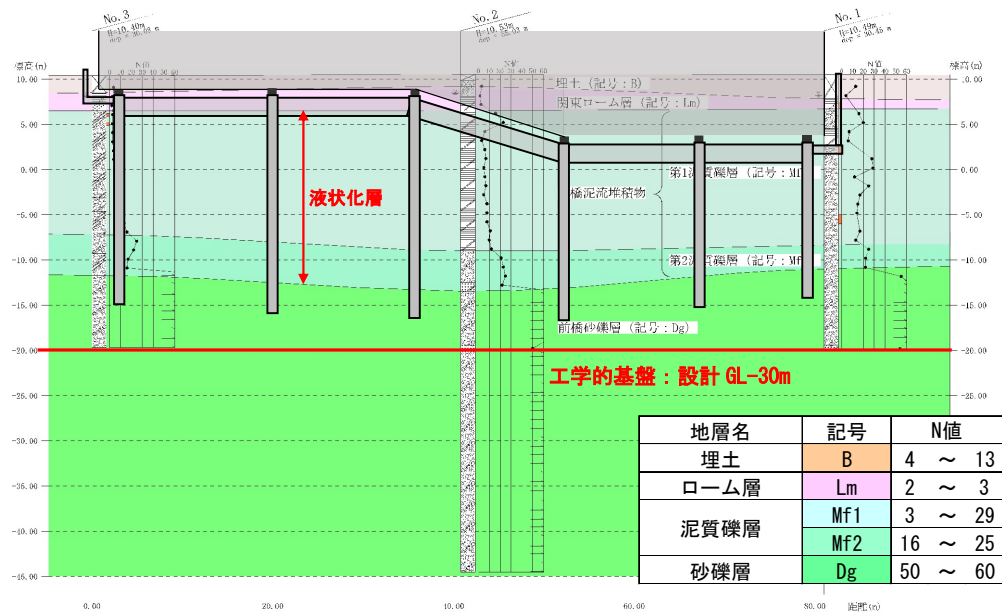
骨組形式	構造種別	PCaPC構造（7F：鉄骨造） （B1~1F：RC造、一部PRC造） （基礎：RC造）
構造種別	骨組形式	純ラーメン架構
主体構造	部材断面	<代表断面> 柱： 900×900, 850×850 mm (PC) 500×500 mm (S) 梁（基準階）： 650×950, 500×950 mm (PC) H-700×300 mm (S) 梁（1階）： 650×1,900, 650×6,400 mm 基礎梁： 1,200×2,400, 800×2,400 mm 杭基礎： φ2,000, 2,500, 3,000 mm <材 料> コンクリート： Pca柱・梁・小梁 Fc60 N/mm ² 2~RFL現場打ち Fc30 N/mm ² B1・1FL現場打ち Fc39 N/mm ² 杭・基礎 Fc36 N/mm ²
	材料	鉄筋： SD295A (D10~D16), SD345 (D19~D25), SD390 (D29~D38), SD490 (HD38) 26φ, 32φ B種 SBPR30/1080 PC鋼棒： 1-12.7φ, 7-12.7φ, 8-12.7φ SWPR7B 1-15.2φ, 7-15.2φ SWPR7B 鉄骨： SS400, SN400B, SN490B, BCR295 高力ボルト： F10T, F8T, S10T 機械式継手： FDグリップ, フリージョイント, リレージョイント, トップスジョイント, NMBスプラインスリーブ
	柱・はり	PC梁, PC柱： プレストレッシング定着工法 RC梁： 現場打ちコンクリートにて一体成形 鉄筋継手： ガス圧接継手, 機械式継手, 重ね継手 梁外端部： 曲げ定着 (RC梁), 固定端, 緊張端 (PC梁, PC柱) 一般部分： 通し配筋 (RC梁), 通し配筋 (PC梁, PC柱)
	床形式	在来型枠および捨て型枠としてフラットデッキスラブ を用いた現場打ちコンクリートスラブ, 合成山型デッキスラブ
	非耐	アスロック等
	内壁	乾式間仕切り壁等
	力壁	
	内壁	

4. 地盤・入力地震概要

(1) 敷地地盤概要

計画敷地は地表面近くに埋土層、それ以深は洪積層となっておりローム層、泥質礫層が堆積し、GL-22~24mから杭基礎の支持層となる砂礫層が出現します。洪積層に当たる泥質礫層ですが、液状化の可能性があります。

工学的基盤面としては $V_s \geq 400$ (m/s)となるGL-30m付近を工学的基盤面として設定しています。



地層名	記号	N値
埋土	B	4 ~ 13
ローム層	Lm	2 ~ 3
泥質礫層	Mf1	3 ~ 29
	Mf2	16 ~ 25
砂礫層	Dg	50 ~ 60

図 4.1 土質断面想定図

(2) 設計入力地震動

解析に使用した入力地震動の一覧を表 4.1 に示します。

記録された既往観測波として、EL CENTRO 1940 NS、TAFT 1952 EW、HACHINOHE 1968 NS を、稀に発生する地震動時に 25cm/s、極めて稀に発生する地震動時に 50cm/s に基準化し採用しています。

模擬地震動は告示波として 3 波と、計画敷地の近傍断層からの地震動を想定したサイト波 1 波を採用しています。告示波の位相特性は、直下地震動の特性を反映させたものとして乱数位相、JMA-KOBE 1995 NS 位相、および、遠距離地震動の特性を反映させたものとして HACHINOHE 1968 NS 位相の 3 位相を採用します。

加えて、液状化を考慮した模擬地震動として更に告示波 3 波、サイト波 1 波を追加しています。

模擬地震動については、表層地盤の増幅特性を考慮するために、工学的基盤面 (GL-30m) より上部の地盤をモデル化し増幅度特性を評価して作成した地震動を設計用入力地震動とします。液状化の考慮についても、有効応力解析を用いて対象層の時刻歴に応じた過剰間隙水圧を反映した地盤モデルで作成しています。

表 4.1 設計用入力地震動

入力地震波 (略記号)	解析時間 (s)	稀に発生する地震動時		極めて稀に発生する地震動時	
		加速度 (cm/s ²)	速度 (cm/s)	加速度 (cm/s ²)	速度 (cm/s)
EL CENTRO 1940 NS (EL CENTRO)	50	255	25	510	50
TAFT 1952 EW (TAFT)	50	248	25	497	50
HACHINOHE 1968 NS (HACHINOHE)	35	174	25	349	50
告示波 (八戸位相) (KOK HCH)	234	115	15	435	76
告示波 (神戸位相) (KOK JMA)	120	102	13	464	66
告示波 (乱数位相) (KOK RAN)	120	99	13	438	64
サイト波 (SITE)	120	-	-	344	53
告示波 (八戸位相) 液状化考慮 (KOK HCH E)	234	-	-	122	34
告示波 (神戸位相) 液状化考慮 (KOK JMA E)	120	-	-	151	41
告示波 (乱数位相) 液状化考慮 (KOK RAN E)	120	-	-	135	40
サイト波 液状化考慮 (SITE E)	120	-	-	115	42

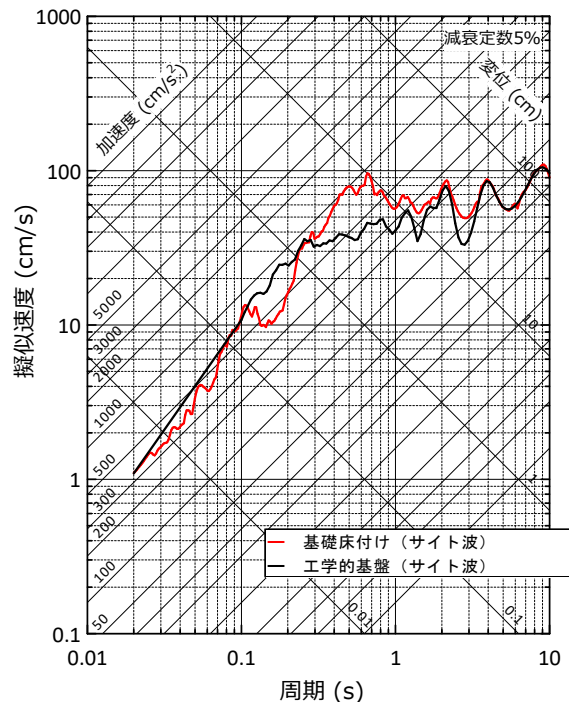
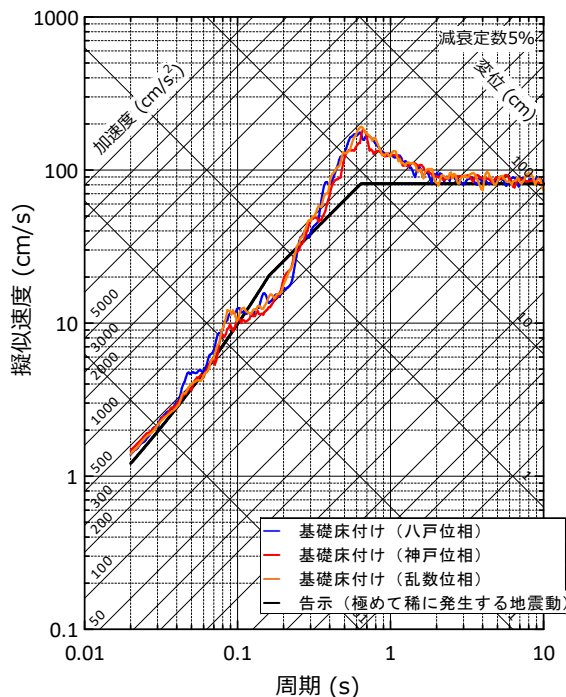


図 4.2 極めて稀に発生する応答スペクトル (左:告示波、右:サイト波)

5. 構造設計概要

(1) 上部構造の設計

上部構造の各部材の設計は、静的弾性解析による応力に対しておこないます。

静的線形解析に用いる設計用層せん断力は、予備応答解析により設定した分布形を用い、ベースシアを 0.115 としています。

設計用層せん断力時の応力に対して、各部材が終局耐力以下であることを確認します。その際、設計用応力として、免震層に働く $P-\delta$ 付加曲げモーメント、および、PC 緊張による不静定曲げ応力を考慮します。

(2) 免震層の設計

免震層の大地震時の等価固有周期は、5~6 秒程度を目標とします。

積層ゴム支承は、安定した性能を発揮するため、極めて稀に発生する地震動時に性能保証変形以下、かつ、せん断ひずみ 260%以下となるように設計します。

免震層は、中小地震時から大地震時にいたるまで偏心率が 3.0%以下となるようにバランスよく免震部材を配置します。

支承材の面圧検討は、極めて稀に発生する地震動相当時の静的線形解析での支点反力を用いて、地震時の鉛直震度 ± 0.3 を加算しておこないます。

(3) 基礎の設計

杭基礎は支持力の検討に加えて、設計水位、および、水害によって生じる浮力も考慮した支点反力を反映して基礎の安全性を確認しています。

杭の水平力検討は上部構造からの慣性力、および、地盤からの強制変位を考慮して終局耐力以下であることを確認しています。

基礎梁の設計は、杭からの曲げ戻しモーメント、および、免震部材からの $P\delta + Qh$ 曲げモーメントを加えても終局耐力以下であることを確認しています。

表 5.1 免震部材表および免震層偏心率

記号	免震部材	基数	
○	天然ゴム系積層ゴム支承 $G=0.39\text{N/mm}^2$ ゴム層厚200mm	N85 4 N90 2 N95 2	
	●	鉛プラグ挿入型積層ゴム支承 $G=0.39$ ゴム層厚200mm	L95 6 L100 2
		弾性すべり支承 $\mu=0.014$	SSR85 4 SSR95 4

免震層の偏心率		
	L1相当 変形時	L2相当 変形時
変位	120mm	370mm
X方向	0.4%	0.4%
Y方向	0.3%	2.4%

表 5.1 耐震設計のクライテリア

荷重及び外力について想定する状態		稀に発生する地震動時 (レベル1地震動時)	極めて稀に発生する地震動時 (レベル2地震動時)	
主要構造部に生じる応力・状態 (基礎・免震材料を除く)		短期許容応力度以下	終局耐力以下	
構造上主要な部分の変形		層間変形角 1/400以下	層間変形角 1/200以下	
免震部材の状態	変形	積層ゴム支承 安定限界変形以下かつ せん断ひずみ130%以下 ($\delta_i=256\text{mm}$)	性能保証変形以下かつ せん断ひずみ260%以下 ($\delta_i=512\text{mm}$)	
		可動範囲: $\pm 600\text{mm}$		
	面圧	上限	標準面圧の2倍以下	標準面圧の2倍以下
		下限	引張面圧を生じない	積層ゴム支承 -1.0N/mm^2 以上 すべり支承 引張面圧を生じない
基礎構造に生じる応力・状態		短期許容応力度以下 短期許容支持力以下	終局耐力以下 短期許容支持力以下	
免震クリアランス	水平	600 mm		
	鉛直	50 mm		

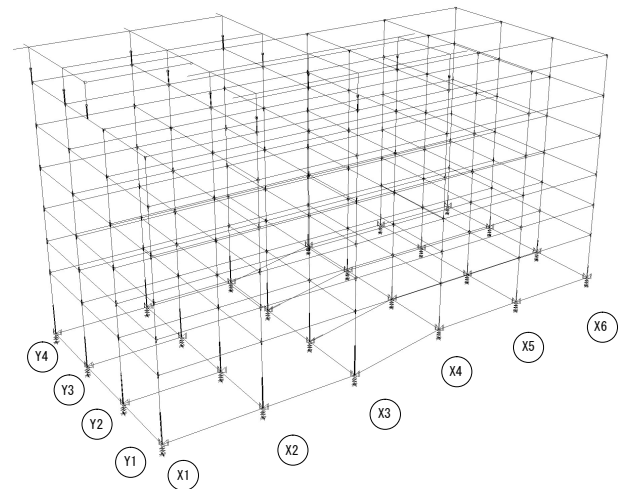


図 5.1 上部構造立体解析モデル

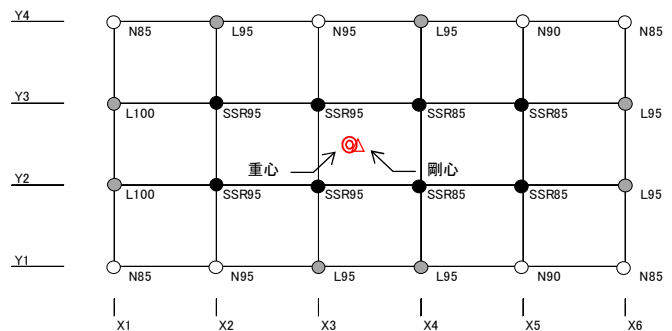


図 5.2 免震部材配置図

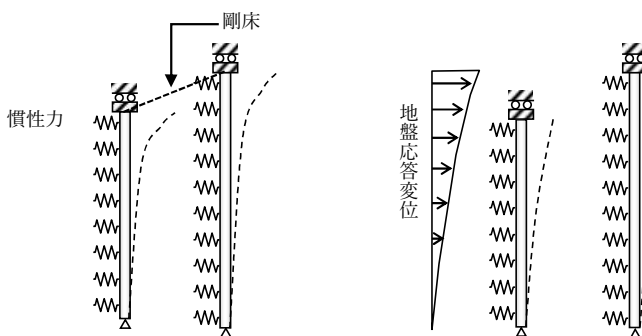


図 5.3 杭設計水平力

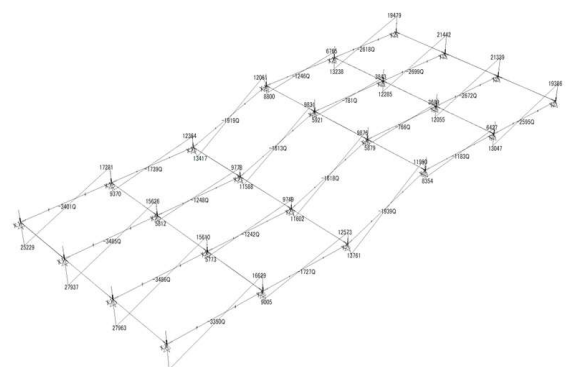


図 5.4 基礎梁曲げモーメント図 (X 方向)

6. 地震応答解析概要

(1) 振動解析モデル

振動解析モデルは、基礎梁芯位置を固定（地震動入力位置）とした1層1質点の等価せん断型モデルとします。

上部構造は、荷重増分解析をもとに、トリリニアモデルとした。免震層は、天然ゴム系積層ゴム支承を線形、鉛プラグ挿入型積層ゴム支承、および、すべり支承をバイリニアでモデル化しています。

免震部材については、製作誤差、環境温度、経年変化などにより特性にばらつきがあるため、標準状態のほかに、ばらつきによる剛性増加側と低下側のモデルを作成し検討をおこなっています。

(2) 固有周期

積層ゴムの歪レベルに応じた等価剛性を設定した場合の1次固有周期を表6.1に示します。微小変形時は約2.1秒、レベル1地震相当時には約3.9秒であり、レベル2地震相当時に約5.3秒となっています。

(3) 応答解析結果

レベル2地震動に対する応答解析結果を表6.2に示します。居室となる階の応答加速度は最大256galであり、最大応答層間変形角は1/348となりました。ベースシアは剛性増大側で最大となり0.097、免震層変形は剛性低下側で最大となり49cmでした。いずれも設計クライテリア内となりました。エネルギー分担率は、免震層で90%以上を負担していることを確認しました。

表 6.2 最大応答値（レベル2）

	極めて稀に発生する地震動 (標準状態)		極めて稀に発生する地震動 (免震ばらつき剛性増加側)		極めて稀に発生する地震動 (免震ばらつき剛性低下側)		
	X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向	
上部構造	1-7階床の最大 加速度 (cm/sec ²)	199 告示波 (乱数)	233 告示波 (八戸)	256 告示波 (乱数)	244 ELCENTRO NS	167 告示波 (乱数)	182 告示波 (八戸)
	最大層間変形角	1/515 告示波 (乱数)	1/520 告示波 (乱数)	1/348 告示波 (乱数)	1/448 告示波 (乱数)	1/641 告示波 (乱数)	1/719 告示波 (乱数)
	1階の最大 せん断力係数	0.079 告示波 (乱数)	0.094 告示波 (乱数)	0.088 告示波 (乱数)	0.097 告示波 (乱数)	0.066 告示波 (乱数)	0.086 告示波 (乱数)
	最大転倒モーメント (kN・m)	362,090 告示波 (乱数)	422,740 告示波 (乱数)	432,113 告示波 (乱数)	427,961 告示波 (乱数)	313,543 告示波 (乱数)	351,976 告示波 (乱数)
免震層	最大層間変位 (cm)	36.7 告示波 (神戸)E	35.6 告示波 (神戸)E	32.5 告示波 (神戸)	30.3 告示波 (神戸)	49.0 告示波 (神戸)E	48.3 告示波 (神戸)E
	最大せん断力係数	0.054 告示波 (神戸)E	0.053 告示波 (神戸)E	0.065 告示波 (神戸)	0.062 告示波 (神戸)	0.055 告示波 (神戸)E	0.054 告示波 (神戸)E
	最大せん断力 (kN)	11,977 告示波 (神戸)E	11,761 告示波 (神戸)E	14,298 告示波 (神戸)	13,765 告示波 (神戸)	12,056 告示波 (神戸)E	11,935 告示波 (神戸)E

表 6.1 免震層を考慮した1次固有周期

1次固有周期 (sec)	X方向 Y方向	微小変形時 (初期剛性)	$\delta=120\text{mm}$ レベル1相当	$\delta=370\text{mm}$ レベル2相当
		2.158 2.121	3.932 3.915	5.276 5.262

表 6.3 エネルギー分担率

	エネルギー分担率		
	X方向	Y方向	
運動エネルギー	0.1%	0.1%	
上部構造	内部粘性減衰	3.6%	1.5%
	履歴減衰	0.0%	0.0%
免震部材	天然ゴム	54.3%	55.2%
	弾性すべり	42.0%	43.1%
免震層全体	96.3%	99.1%	

*L2 告示波 (八戸)

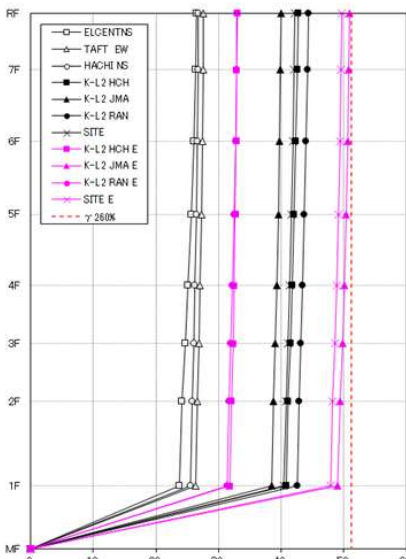


図 6.2 最大応答変位図
レベル2時刻歴応答解析結果
(X方向：ばらつきマイナス)

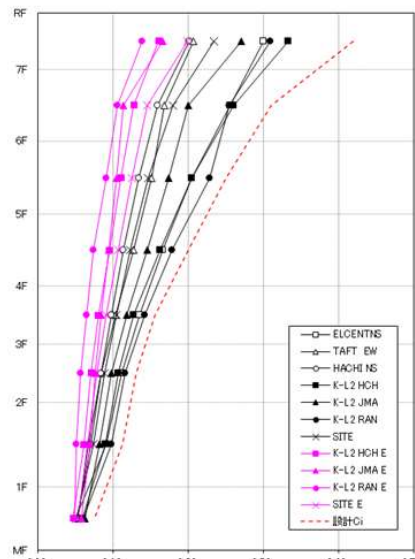


図 6.3 最大応答せん断力係数
レベル2時刻歴応答解析結果
(Y方向：ばらつきプラス)

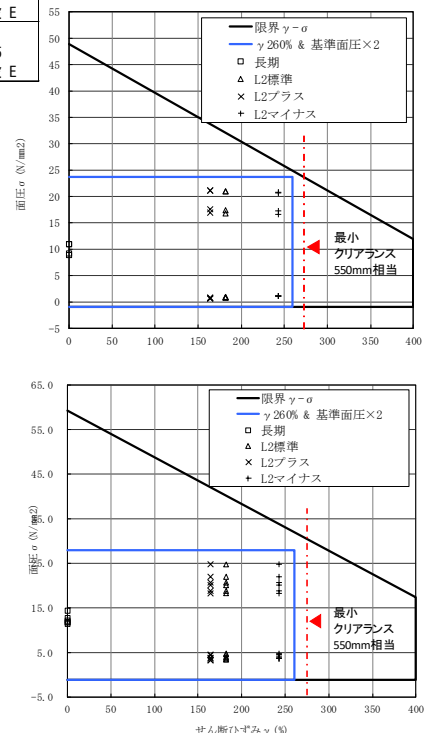


図 6.4 免震部材応答面圧-歪関係
(上:N80、下:L95)

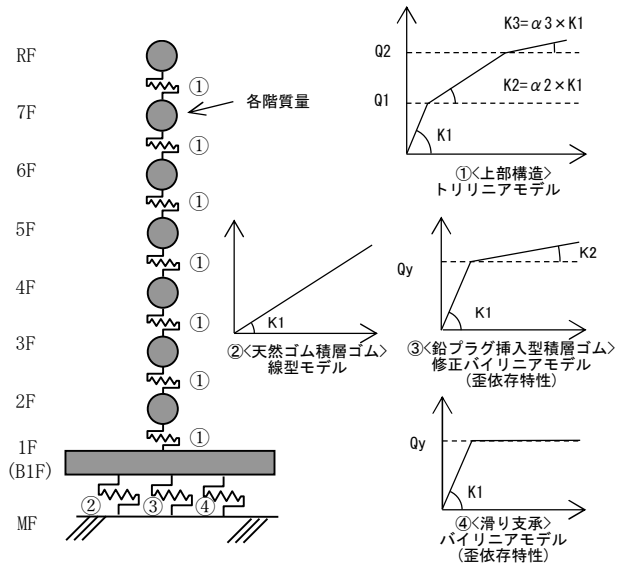


図 6.1 解析モデル

7. 施工概要

(1) 施工計画に際して

本建物の構造は PCaPC 基礎免震構造であり、建築計画や耐震性耐久性的な側面からではなく、コストおよび工期の優位性も含め、採択した理由となっています。

したがって、現場が品質および工期コストが最も有利に進められるよう、設計段階から施工計画も同時におこないながらプロジェクトを進めました。

(2) 下部構造(基礎、免震層)

杭工事は杭径が $\phi 2000 \sim \phi 3000$ と大口径のため、鉄筋籠を現場にて加工制作し建て込みを行いました。

また、基礎梁は一部傾斜した形状があるため、当該箇所についてはコンクリートの流れ出し防止を目的としたラス網 2m ピッチを配置する打設計画としました。

免震部材は製作、搬入、設置までスケジュール通り進めることが出来ました。また、上部構造が立ち上がる過程で、初期は免震層を固定とし、過半からは免震構造を解放した施工計画としました。

(3) 上部構造(PCaPC 構造)

上部構造(1階柱以上)は PCaPC 造を採用し、工期短縮を図っています。建て方は1層30日のサイクルとして計画し、約6ヶ月での上棟を目指しました。

免震層直上1階の現場打ちコンクリートは、ボリュームが大きく、また PC ケーブルによる緊張力導入も行うため、打設を6回に分けた計画としました。

施工計画上、建物中央にタワークレーンを設置するため、当該箇所の各階床スラブに開口を設け、施工中に地震が起きてもクレーンと衝突しないようにクリアランスを設けた開口形状としました。



図 7.1 免震部材設置



図 7.2 PC 柱建て方

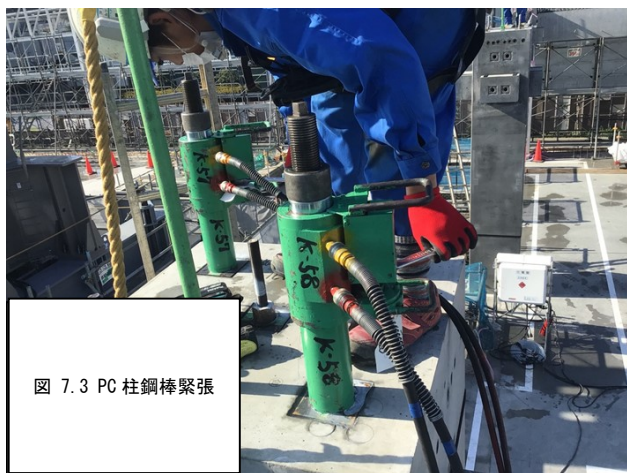


図 7.3 PC 柱鋼棒緊張



図 7.4 PC 梁建て方

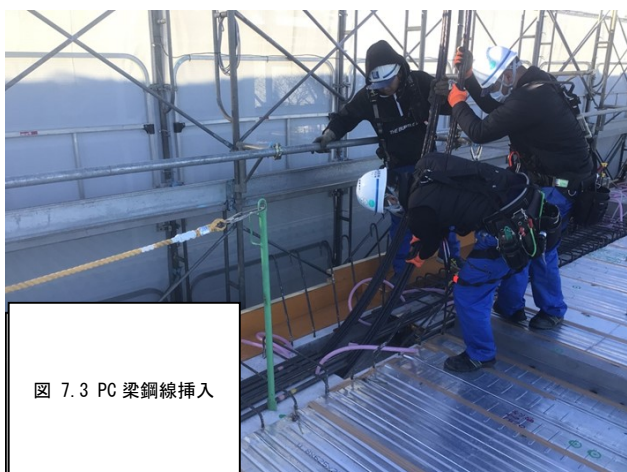


図 7.3 PC 梁鋼線挿入



図 7.3 PC 梁鋼線緊張