

### PCaPC 免震建物の構造特性について

(株) ピーエス三菱 正会員 ○傳 金華  
 (株) ピーエス三菱 正会員 林 三雄

#### 1. はじめに

最近、プレキャスト PC (以下、PCaPC と云う) 架構に免震システムを組合せた構造がよく計画されるようになった。この構法は、施工の省力化と PC 特有の力学的特性を巧みに利用したもので常時における PC 部材の優れた耐荷性能を活かし、かつ、地震時における建物への入力地震動の軽減を計ることにより建築物の対地震安全性の向上を計ったものである。免震システムと極めて相性のよい力学的特性を有する PCaPC 免震建築物の構造特性について、”仮称：千葉みなと計画” (図-1) を例に、その概要を報告する。

#### 2. 建物概要

##### 2.1 構造概要

PCaPC 免震建物の規模は地上 19 階・塔屋 1 階で、地下階は無い。建物高さは地上 59.1m で、1 階階高が 3.4m および基準階高が 3.1m である。平面は長辺方向が 8 スパン 51.8m および短辺方向が単スパンで 14.975m の整形な建物である。構造種別は長辺方向が PCaPC の純フレーム架構、短辺方向が境界柱を PCaPC および壁板を場所打ち RC とする連層耐力壁構造である。建物の基準階平面を図-2 に示す。長辺方向の梁断面は、X2 通りで 600mm×900mm、X3 通りで 475mm×1100mm である。柱の断面は、X2 通りで 900mm×1100mm、X3 通りで 800mm×1100mm である。短辺方向耐力壁の壁厚は 220mm である。また、建設地は千葉市で表層地盤を改良して GL-40m の N 値 60 以上の下総層群を支持層として場所打ち造成杭による杭基礎構造とした。

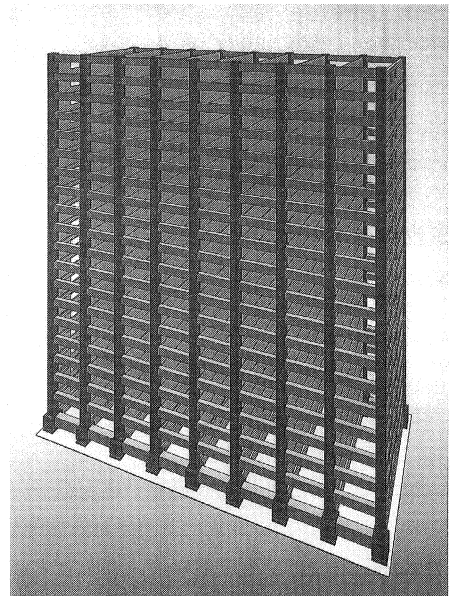


図-1 PCaPC 免震構造の概要

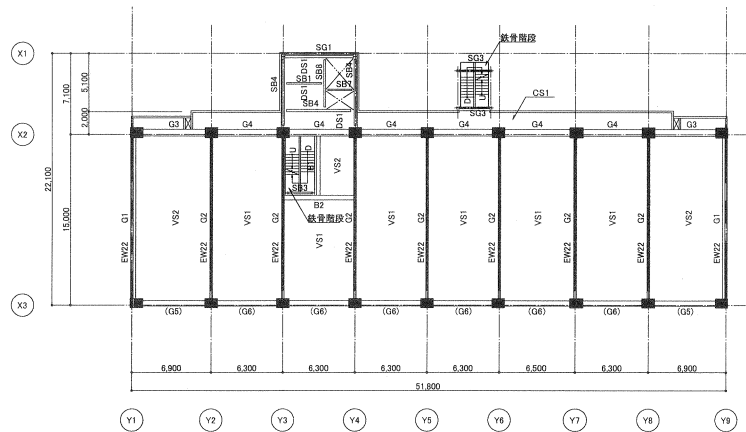
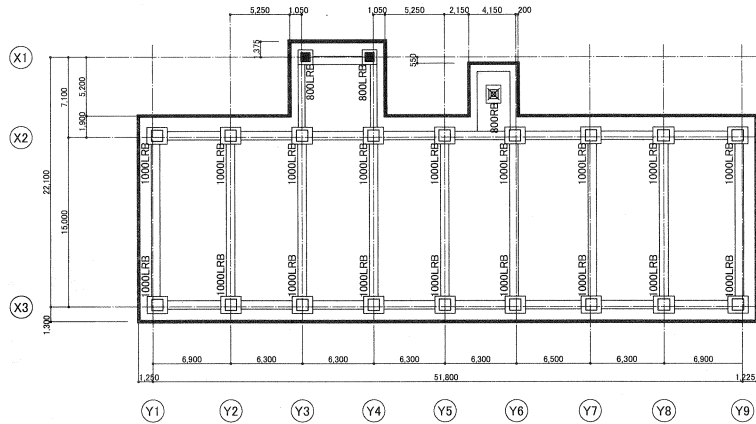


図-2 基準階平面図

免震層は積層ゴムの常時面圧に上部構造の応答転倒モーメントと上下動応答による変動軸力を考慮して計画した。積層ゴムの常時許容面圧は、その形状係数およびせん断変形量で異なるが 10~15N/mm<sup>2</sup>の範囲で計画した。免震周期は極めて稀に発生する地震動時における等価周期が 4 秒を目標に計画した。免震層における各免震装置の配置を図-3 に示し、各振幅時における建物各方向の免震周期特性を表-1 に示す。

## 2.2 使用材料

コンクリート強度はPCa 柱・梁を  $60\text{N}/\text{mm}^2$  および場所打ち RC 部分を  $30\text{N}/\text{mm}^2$  とした。柱のPC鋼材はPC鋼棒 (SBPR1080/1230) および梁はPC鋼より線 (SWPR7B) とした。鉄筋はSD390, SD345 およびSD295Aを各部位毎に適宜使用し、免震部材は鉛プラグ入り角型積層ゴムとした。



名称	記号	符号	サイズ	基数	免震基礎サイズ
鉛プラグ挿入型積層ゴム支承 LRB	■	800LRB	□ 800	2	1300 × 1300 × 1750
天然ゴム系積層ゴム支承 RB	□	1000LRB	□ 1000	18	1500 × 1800 × 1750
	○	800RB	□ 800	1	1600 × 1300 × 1750
合計				21	

図-3 免震装置の配置

## 3. 設計検討

### 3.1 検討方針

PCaPC 免震建物の設計検討は、一般の免震構造と同様、常時荷重および地震時

と暴風時における外力に対して建物が十分な安全性を有していることを確認することとした。常時に対する検討は現行のPC建物に適用される関連告示および設計諸規準に従い、許容応力度設計と荷重係数を乗じた終局耐力設計で長期的な使用性を有することを確認することとした。地震時に対する検討は静的解析と動的解析を実施し、設定された目標性能を満足することを確認することとした。静的解析は建物各方向に対する非線形漸増載荷解析とし、その層せん断力と分布は免震部材を含む建物全体を対象にした稀に発生する地震動による予備応答解析の結果より求めるものとした。動的解析は建物各方向に対して静的解析より得られた層せん断力-層間変形関係を基に作成した質点系の振動モデルを対象に地震応答解析を実施し、それに対して設定された目標性能を満足することで地震動に対する建物の対地震安全性を確認することとした。

表-1 免震周期特性

振幅レベル	長辺方向		短辺方向	
	固有周期(秒)	刺激係数( $\beta$ )	固有周期(秒)	刺激係数( $\beta$ )
1. 基礎固定	1.014	1.306	0.613	1.506
2. 小振幅時( $\delta=2\text{cm}$ )	1.863	1.155	1.725	1.149
3. 稀に発生する地震動( $\delta=10\text{cm}$ )	2.951	1.063	2.871	1.054
4. 極めて稀に発生する地震動( $\delta=25\text{cm}$ )	3.809	1.038	3.748	1.031
5. 余裕度( $\delta=40\text{cm}$ )	4.198	1.031	4.142	1.026

### 3.2 静的解析

上部構造の耐震検討は建物各方向の非線形漸増載荷解析に対して設定された目標性能を満足することを確認することとした。実施した建物の解析条件とその目標性能を次に示す。

- 建物は剛床仮定が成立するとして基礎固定の平面フレームモデルとした。
- 部材はトリリニア型の材端剛塑性曲げばねモデルとした。
- 設計用せん断力とその分布は極めて稀に発生する地震動による予備応答解析より求めた。使用地震波は建告1461号に定める加速度応答スペクトルに適合する告示波3波と標準観測波3波(EL CENTRO 1940 NS,

TAFT 1942 EW および HACHINOHE 1968 EW) とした。

d) 常時荷重による力は有効部材力を架構の解析前に各部材端に载荷した。ただし、不静定力が当該材端の曲げ耐力の30%以下の場合には省略した。

e) 架構の降伏形は梁降伏先行型とし、解析は長辺・短辺方向とも単独に実施した。

f) 解析結果より建物各方向における動的解析用の質点系振動モデルを作成した。

設定された静的解析に対する目標性能を表-2に示す。

表-2 静的解析に対する目標性能

設計用ベースシアー係数	最大層間変形角 (短辺方向)	PC梁 (塑性率)	1階PC柱脚 (塑性率)	耐力壁 (せん断耐力)	境界柱 (軸塑性率)
$C_B=0.10$	1/200以下 (1/400以下)	0.8以下	0.8以下	—	—
$C_B=0.12$	—	1.0以下	1.0未満	短期許容耐力以内	1.0未満
$C_B=0.15$	1/100以下 (1/200以下)	1.5以下	1.0以下	終局耐力以内	1.0以下

3.3 解析モデル

建物は剛床仮定が成立するとして平面フレームモデルとした。柱梁部材は線材置換による材端剛塑性ばねモデルとし、復元力特性を曲げびび割れとPC鋼材の降伏を折れ点とするトリリニア型とした。耐力壁は同一平面上で壁周辺が境界柱と境界梁に囲まれた壁谷澤モデルとした。架構と耐力壁の解析モデルを図-4(a)と図-4(b)に示す。耐力壁のPC境界柱は剛体仮定した境界梁にピン接合した非線形の軸ばねに置換した。図-5にPC境界柱の軸ばね復元力特性を示す。軸ばねの圧縮側はバイリニア型で、コンクリートの降伏耐力  $P_{cy}$  を折れ点とした。軸ばねの引張側はトリリニア型で、柱のプレストレス力を考慮したコンクリートのひび割れ耐力  $P_e$  およびPC鋼材の引張降伏耐力  $P_y$  をそれぞれ第一、第二折れ点とした。壁板は上下の境界梁に剛塑性曲げばねを配した曲げせん断部材に置換した。連層耐力壁の復元力特性は曲げ成分とせん断成分に分け、各変形を連成するモデルとした。柱、梁部材の初期剛性  $K_E$ 、降伏剛性低下率  $\alpha_y$ 、曲げひび割れ耐力  $M_c$ 、および曲げ耐力  $M_u$  式は文献<sup>1~4)</sup>に従った。

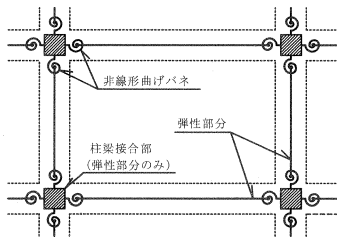


図-4(a) 架構の解析モデル

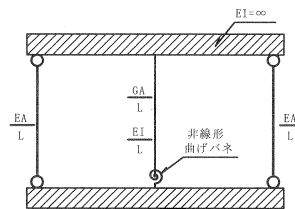


図-4(b) 耐力壁の解析モデル

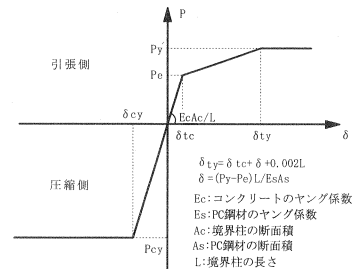


図-5 PC境界柱の軸ばね復元力特性

3.4 静的解析結果

上部構造の静的解析は予備応答解析から求めた層せん断力分布を用いて各方向の平面フレームの連成モデルを対象に実施した。建物の各方向の層せん断力-層間変形角関係を図-6に示す。解析の結果は目標性能を全て満足している。

3.5 振動モデルの作成

建物各方向の層せん断力-層間変形角関係を用い、上部構造を等価曲げせん断ばねモデルに置換した。曲げばねを弾性とし、せん断ばねを層のひび割れ耐力と降伏耐力を折れ点とするトリリニアモデルとした。免

震層は各免震部材を種類毎にまとめたバイリニア型の等価せん断ばねを並列に並べ表現した。また、各杭と各免震部材の軸剛性をまとめて弾性の曲げばねに置換した。

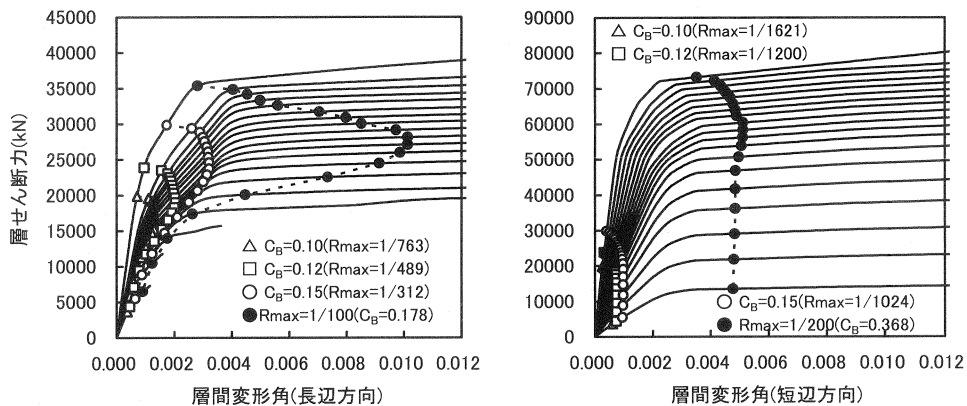


図-6 層せん断力-層間変形角関係

4. 地震応答解析

静的解析結果を基に作成した建物各方向の質点系の振動モデルを対象に地震応答解析を実施し、建物各方向の対地震安全性を検証した。地震応答解析に設定した目標性能を表-3に示す。

表-3 応答結果に対する目標性能

地震レベル	層間変形角	応答層せん断力	免震材料(免震層)	下部構造
稀に発生する地震動	1/400以下	層のひび割れ耐力以内	安定変形30cm( $\gamma=150\%$ )以内 引抜力が生じない	許容応力度以内
極めて稀に発生する地震動	1/200以下	層の弾性限耐力以内	性能保証変形50cm( $\gamma=250\%$ )以内 引抜力が生じない	許容応力度以内

4.1 解析モデル

建物の上部構造は質点系の等価曲げせん断ばねとした。免震部材と杭の軸ばねは質点系上部構造モデルの1階に等価な弾性の曲げばねとして配置して下部構造を含めた上部構造の周期特性が等価になるよう考慮した。

4.2 使用地震動

使用地震動記録は建告第 1461 号に定める加速度応答スペクトルを満足する工学的基盤波 3 波 (kokuji RAND, kokuji HANS および kokuji KONS, 以下、告示波と云う) と観測波 3 波の計 6 波とした。地震動レベルは稀に発生する地震動と極めて稀に発生する地震動の 2 レベルとし、観測波は最大速度で 25cm/s と 50cm/s に規準化した波をそれぞれ稀に発生する地震動と極めて稀に発生する地震動とした。告示 3 波は表層地盤の振動特性に基づく shake 波を入力地震動とした。入力地震動一覧を表-4に示す。

4.3 履歴特性

地震応答解析に使用する履歴特性は上部構造の長辺方向を PC 架構の特性を考慮して非線形弾性とし、短辺方向の連層耐力壁架構を非線形弾性の特性を持つ PC 境界柱と武田履歴モデルの特性を持つ RC 壁板を考慮して原点指向型とした。免震層は歪み依存型の修正バイリニアとした。図-7(a)と図-7(b)に上部構造の各履歴特性を示す。

表-4 入力地震動一覧

地震記録名	最大加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	最大速度 (cm/s)	最大加速度(cm/s <sup>2</sup> )		継続時間 (s)
			稀に発生する地震動	極めて稀に発生する地震動	
Kokuji RAND	392.14	47.73	198.82	386.87	120.0
Kokuji HANS	428.43	43.41	228.31	398.99	120.0
Kokuji KONS	383.85	56.01	195.64	406.14	75.0
EL CENTRO 1940 NS	341.70	33.45	255.45	511.00	50.0
TAFT 1942 EW	175.90	17.71	248.33	496.76	50.0
HACHINOHE 1968 EW	182.90	35.81	127.69	255.38	50.0

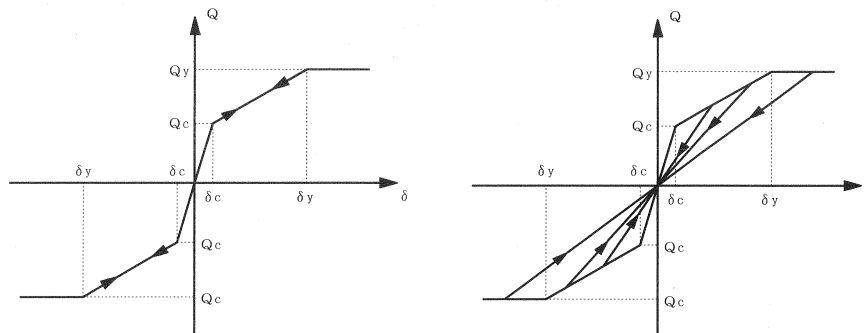


図-7(a) 上部構造長辺方向の履歴モデル 図-7(b) 上部構造短辺方向の履歴モデル

#### 4.4 応答計算

応答計算は Newmark のβ法 ( $\beta=0.25$ ) による数値積分とした。上部構造の内部粘性減衰は瞬間剛性に比例すると仮定して弾性1次周期に3%を考慮した。免震層は内部粘性減衰を考慮せず履歴エネルギーの消費のみとした。

#### 4.5 地震応答解析結果

静的解析結果を基に作成した建物各方向の質点系振動モデルを対象に地震応答解析を実施した。ここで、極めて稀に発生する地震動による解析結果について検討する。表-5 に上部構造および免震層の地震応答解析結果を示し、図-8 に上部構造の最大応答層間変形角を示す。免震装置の最大応答変形は長辺・短辺とも kokuji KONS 波によるもので、長辺方向では 30.29cm、短辺方向では 31.02cm で、目標性能の安定変形 50cm 以内を満足している。上部構造の最大応答層間変形角は、長辺方向では EL CENTRO 波で 1/777、短辺方向では kokuji KONS 波で 1/1643 で、目標性能の 1/200 以下を満足している。また、柱の最大応答軸力比は長辺・短辺とも kokuji KONS 波によるもので、長辺方向では 0.42、短辺方向では 0.57 で、柱に引張応力を生じておらず、目標性能を満足している。

#### 5. まとめ

19階の高層 PCaPC 免震建物を対象に解析的な検討を行ってみた。これらの検討結果から、免震システムを併用することにより架構自身の履歴エネルギー消費が小さい PCaPC 建物の地震応答変形を十分に制御できることが確認された。

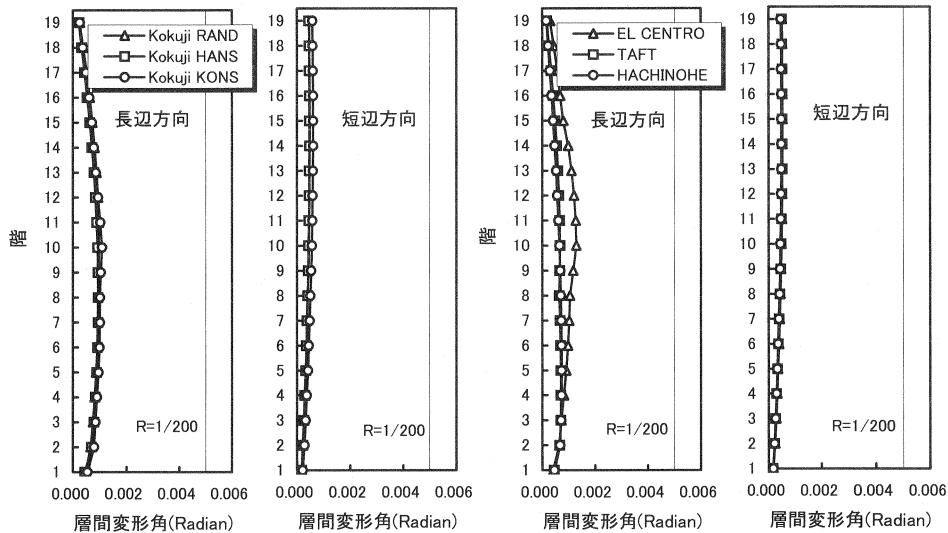
謝辞：千葉みなと計画を進めて戴いた関係諸氏一同に心より敬意と感謝の意を表します。

表-5(a) 応答解析の結果(上部構造, 極めて稀に発生する地震動)

入力地震動		長辺方向				短辺方向			
		加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	速度 (cm/s)	層間変形角 (Radian)	1層せん断力係数(C <sub>p</sub> )	加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	速度 (cm/s)	層間変形角 (Radian)	1層せん断力係数(C <sub>p</sub> )
告示波	Kokuji RAND	263.8	57.3	1/1033	0.075	209.0	58.4	1/2108	0.075
	Kokuji HANS	219.3	64.5	1/1064	0.070	201.4	68.0	1/2147	0.075
	Kokuji KONS	248.0	75.2	1/913	0.085	289.3	75.3	1/1643	0.083
観測波	EL CENTRO	310.0	78.0	1/777	0.065	229.5	72.5	1/1907	0.074
	TAFT	172.1	56.0	1/1491	0.071	249.9	69.0	1/1931	0.064
	HACHINOHE	148.5	64.0	1/1364	0.071	208.1	59.4	1/2094	0.076

表-5(b) 応答解析の結果(免震層, 極めて稀に発生する地震動)

入力地震動		長辺方向				短辺方向			
		せん断力 (kN)	水平変形 (cm)	転倒モーメント (×10 <sup>6</sup> kNm)	最大軸力比	せん断力 (kN)	水平変形 (cm)	転倒モーメント (×10 <sup>6</sup> kNm)	最大軸力比
告示波	Kokuji RAND	16098	25.70	0.76	0.39	15997	25.39	0.67	0.46
	Kokuji HANS	15903	25.11	0.76	0.39	15684	24.45	0.68	0.45
	Kokuji KONS	17601	30.29	0.81	0.42	17838	31.02	0.83	0.57
観測波	EL CENTRO	14534	21.03	0.80	0.41	14956	22.27	0.73	0.50
	TAFT	14510	20.95	0.55	0.28	14493	20.90	0.68	0.46
	HACHINOHE	15669	24.41	0.60	0.31	15953	25.26	0.67	0.46



(a) 告示波

(b) 観測波

図-8 最大応答層間変形角(極めて稀に発生する地震動)

参考文献

- 1) 林, 岡本, 小谷, 加藤, 傅"PC部材の履歴特性とPC造建物の地震応答性状", プレストレストコンクリート技術協会誌, pp57~7, Vol. 37, No. 4, Jul, 1995.
- 2) 浜田, 市澤, 傅, 他"PCaPC 免震建物の地震挙動"(その1 検討方針), (その2 上部構造の静的解析検討), (その3 地震応答解析による検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集, No. 23469~71, 2000年9月, 東北.
- 3) 小堀, 佐藤, 林, 他"PCaPC 免震共同住宅の地震挙動"(その1 構造計画と検討方針), (その2 上部構造の静的解析検討), (その3 地震応答解析による検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集, No. 23453~55, 2001年9月, 関東.
- 4) 時本, 大迫, 傅, 他"PCaPC 超高層免震建築物の検討"(その1 基本計画), (その2 静的解析による検討)(その3 動的解析による検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集, No. 23507~09, 2002年8月, 北陸.