

(72) プレキャストPC免震建物の地震挙動

(株)ピー・エス 正会員 ○ 浜田 公也
 同 上 正会員 傅 金華
 同 上 正会員 市澤 勇彦
 同 上 正会員 林 三雄

1. はじめに

プレキャストPC架構の力学的性状に関する特徴は、1)架構のひび割れ或いは降伏後におけるエネルギー消費が極めて小さい、2)部材断面が小さくRC造に較べ弾性周期が長い、3)終局耐力に対するひび割れ耐力の比が大きい、等である。これらPC造の特性から地震挙動を推定すると、その周期特性から応答せん断力は幾らか小さく、履歴性状から地震時における応答変形が大きくなることが理解できる。また、地震時における応答変形の幾らか大きい問題を除けば、1)地震時の応答変形が殆ど残存しない、2)地震動に対する損傷が小さい、3)常時荷重に対する構造性能が優れている、等の特長も多い。このため、PC造の特長を生かした架構を構成するには、地震による入力エネルギーをPC架構以外の機構で消費させることが極めて有効な手段となる。この手法の1つとして、PC架構と免震の組合せがある。実施例は極めて少ないが、計画された幾つかのプレキャストPC免震建物^{1) 2)}を参考に、検討法の概要とその地震挙動について報告する。

2. PC免震構造の検討概要

免震構造の検討項目を大別すると、上部構造、免震層および基礎構造の3つに分けることができる。上部構造の常時荷重に対する設計は一般のPC造と同様であるが、耐震設計は異なる。免震構造の対地震安全性は地震応答解析の結果に基づいて確認される。上部構造の設計用せん断力およびその分布は、地震動レベルをレベル2とする免震部材を含む上部構造の地震応答解析結果を上回るよう設定されるため、通常的设计用せん断力に較べて小さく、その分布も異なる。免震層の設計は建物単独の固有周期と地震動時における上部構造を含む免震層の等価周期が大きく離れるよう計画し、免震装置の水平変形能を考慮してダンパが配置される。一般にレベル2地震動に対しては免震装置の安定変形以内、余裕度検討用地震動に対しては性能保証変形以内となるよう計画される。上部PC構造、免震層および基礎構造に関する一般的な対地震検討について、概要を記述する。

2.1 上部構造

上部構造に対する耐震設計は一般の構造と異なり、本質的に地震応答に対する性能設計となる。これは、構造の対地震安全性が免震装置を含む地震応答解析で確認されることによる。このため、応答解析に必要な上部構造の振動モデルが作成でき、さらに構造性能がより確実に把握される方法が求められる。上部構造の耐震設計は、一般に非線形漸増増荷解析の結果に対する性能クライテリアの確認で行われている。表-1に、PC上部構造の非線形漸増増荷解析の結果に対する目標性能クライテリアの一例を示す。

表-1 上部構造の目標性能クライテリア例

設計用せん断力 (Ca)	最大層間変形角 (Radian)	PC梁 (塑性率)	1階PC柱脚 (塑性率)
0.150	1/200 以下	-	-
0.180	1/120 以下	1.0 以下	1.0 未満
0.225	1/100 以下	1.5 以下	1.0 以下

2.2 免震層

免震層の設計および免震装置(積層ゴムとダンパ)の配置は、常時荷重に対する積層ゴムの面圧と水平変形に対する性能を考慮して行われ、一般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支圧力を重

ね合わせた支圧力に対し、免震装置に引抜きが生じないよう計画される。積層ゴムの許容面圧は種類により異なるが、常時で概ね $10\sim 15\text{N/mm}^2$ 、短期が常時の約2倍程度である。ただし、面圧により変形能が変化することから、一般には変動面圧として常時の0.5~0.6倍程度を見込み計画されることが多い。また、積層ゴムの径によって許容面圧が異なるものもあり、面圧設定には注意を要する。積層ゴムの設定後にダンパの配置が計画される。履歴型ダンパの種類は、概ね鉛および鋼棒、或いは積層ゴムに内蔵される鉛プラグ等に分けられる。ダンパは、一般には変位依存型でその降伏変形により免震層の変形エネルギーを消費して地震時における応答変形を制御することを目的とする。また、上部構造に偏心が在る建物や応答変形が巨大で制御が困難な場合、速度依存型のオイルダンパなどを併用する。ダンパの設定は上部構造の重量と弾性周期に左右されるが、一般に上部構造を剛体と仮定した時のレベル2地震動による変形を想定した免震層の等価周期が、基礎を固定とした上部構造単独の弾性周期の概ね3倍以上を確保し、さらに3秒を上回るよう計画されることが多い。

2.3 基礎構造

免震建物を支える基礎は常時に対する安全性の他に、基礎構造自体の設計震度、上部構造の応答せん断力およびその応答変形に伴う付加応力を考慮して許容応力度設計がなされる。基礎構造自体の設計震度は、一般にレベル2地震動における地表の最大加速度が用いられ、検討地震波にもよるが、概ね0.5G程度を見込み設計がなされる。上部構造の応答に伴う設計応力については、レベル2地震動或いは余裕度レベルの応答せん断力が対象となる。上部構造の応答変形に伴う付加応力は、上部構造最下階の梁も同様に考慮され、一般にレベル2地震動による最大応答変形或いは免震装置の安定変形または性能保証変形を目途に検討される。また、上部構造の応答せん断力と応答変形に伴う付加応力は単純加算され、それに基礎構造自体の設計震度による応力を重ね合わせて検討される。各基礎は、一般に剛な基礎梁で繋ぎ、基礎構造全体が一体として挙動するよう計画される。

基礎杭の検討は、常時の支持耐力の他に、杭頭に作用する慣性力による杭応力と、地盤の変形に伴う杭応力とを重ね合わせた応力に対して安全性が確認される。地盤の応答変形に伴う杭応力は、基礎底(杭頭)から杭支持層(工学的基盤)に至る各表層地盤を自由地盤と見なした地震応答解析による最大応答変形を各地盤ばねを介して杭に与えて求められる。

2.4 地震応答解析

免震建物の地震応答解析は、建物を各方向毎に等価な振動モデルに置換した解析モデルを対象に実施される。地震動レベルは、一般に中小地震動を想定したレベル1および大地震動を想定したレベル2地震動の各レベルについて行われる。また、レベル2地震動に対する余裕度検討のためにレベル2を超える地震動に対する検討も行われる。建物の対地震安全性は、応答解析の結果を基に考察・判断され、その妥当性が確認される。表-2に、地震応答に対する目標性能クライテリア例を示す。

表-2 地震応答に対する目標性能クライテリア例

	上部構造		免震装置	下部構造
	最大層間変形角	応答層せん断力		
レベル1	1/400 以下	層のひび割れ耐力以内	—	許容応力度以内
レベル2	1/200 以下	層の降伏耐力の1/1.5以内	安定変形以内、引抜き力が生じない	許容応力度以内
余裕度検討	1/100 以下	層の弾性限耐力以内	性能保証変形以内	弾性限耐力以内

3. 検討対象建物

計画した建物は7階建てのプレキャストPC造で、平面はX方向が50.4m(7スパン×7.2m)、Y方向が23.1m(12.6m+10.5mの2スパン)である。建物高さは、1階階高が4.5m、2階から7階が4.2mの29.7mである。免震装置上端から1階床梁天端までの高さが1.5mで免震装置上端からの高さが31.2mである。図-1に、検討対象建物の平面および軸組を示す。

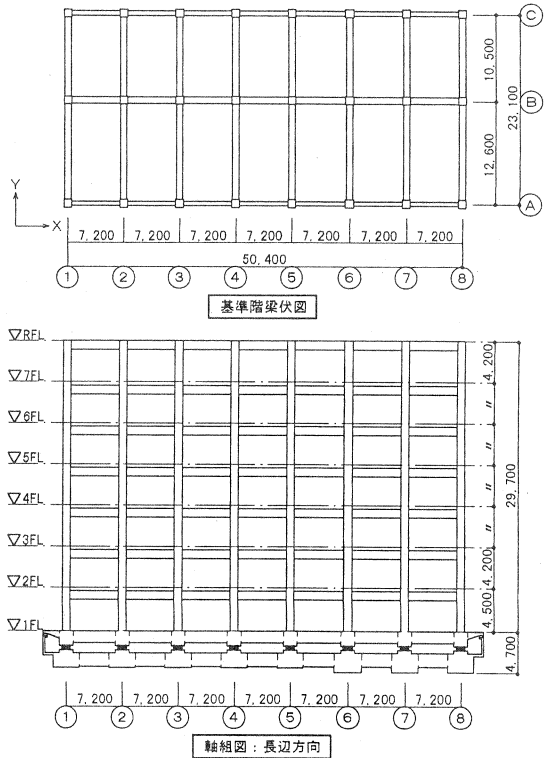


図-1 建物の平面および軸組

3.1 部材断面

PCa柱の断面(b×D)は各階とも800×800mmとした。X方向1階の桁梁断面(b×D)は600×1200mm、2階からR階のPCa桁梁断面を600×800mmとした。Y方向1階の大梁断面(b×D)は600×1200mm、2階からR階のPCa大梁断面を600×900mmとした。RC基礎梁の断面は全て800×1500mmとし、スラブ厚さはPCa合成スラブの板部を含めて130mmとした。

3.2 材料強度

場所打ちコンクリートの強度は、基礎構造とその他の場所打ち部を24N/mm²、1階のPC梁を含む床構造を30N/mm²とした。PCa部材は、柱、桁梁、大梁、スラブとも全て60N/mm²とした。PC鋼材はSWPR7B, SBPR(930/1180), SBPD784とし、普通鉄筋をSD295A, SD345, SD390とした。

3.3 上部構造の設計

架構および部材の設計は常時荷重時を含め現行の設計諸規準・指針による。耐震検討は、架構非線形漸増載荷解析に対する性能クライテリアの確認で行う。非線形漸増載荷解析は、建物のX方向およびY方向について、単独に平面フレームの連成モデルで実施した。設計用せん断力は、免震部材を含むレベル2地震動の応答解析結果を上回るようC_Bで0.15とし、設計用せん断力の1.5倍(C_B=0.225)を架構の終局強度設計用せん断力とした。層せん断力分布は、レベル2地震動の地震応答解析結果を上回るA_i分布とした。解析結果に対する目標性能クライテリアは、表-1に従った。表-3に、設計用せん断力を示す。

表-3 設計用せん断力

階	階高(m)	W _i (t)	C ₀ =0.150		C _B =0.180		C ₀ =0.225	
			C _i	Q _i (t)	C _i	Q _i (t)	C _i	Q _i (t)
7	4.2	1866	0.289	596	0.347	715	0.434	894
6	4.2	1541	0.243	877	0.292	1052	0.365	1316
5	4.2	1541	0.216	1111	0.259	1333	0.324	1667
4	4.2	1541	0.195	1306	0.234	1567	0.293	1959
3	4.2	1519	0.178	1464	0.214	1757	0.267	2196
2	4.2	1519	0.164	1591	0.197	1909	0.246	2387
1	4.5	1525	0.150	1687	0.180	2024	0.225	2531
免震層	-	2137	-	-	-	-	-	-

3.4 非線形漸増載荷解析

建物の解析モデルは基礎を固定とし、各フレームを剛な床で繋ぎ剛床仮定が成立するものとした。部材の解析モデルは、線材置換による材端剛塑性ばねモデルとし、その復元力特性をコンクリートの曲げひび割れおよび引張鋼材の降伏を折れ点とするトリリニア型とした。解析に用いる部材の初期剛性K_E、降伏時の剛性低下率α_v、曲げひび割れ耐力M_c、および曲げ終局耐力M_uの各式は、文献³⁾に従い次の通りとした。

$$K_E = L [L^2 / (3E_c \cdot I_c) + k / (G_c \cdot A_c)] \tag{1}$$

$$\alpha_y = [0.043 + 1.64n \cdot p_t + 0.043a/D + 0.325(N + P_e) / (b \cdot D \cdot F_c)] \cdot (d/D)^2 \tag{2}$$

$$M_c = [0.1F_c + (N + P_e) / A_c] \cdot Z_e \tag{3}$$

$$M_u = A_p s \cdot f_{py} (1 - 0.5q) d + 0.5(D - q \cdot d) N \tag{4}$$

ここに、L:部材フェースから反曲点までの距離、E_cとG_c:コンクリートの弾性係数とせん断弾性係数、I_cとZ_e:部材の断面2次モーメントと有効断面係数、A_c:部材の断面積、k:せん断形状係数、n:コンクリートに対する鋼材の実弾性係数比、p_t:曲げに有効な引張鋼材比、a:シアースパン、d:有効成い、D:部材成、F_c:コンクリート設計基準強度、N:柱軸力、P_e:有効プレストレス力、A_p:PC鋼材断面積、f_{py}:PC鋼材の規格降伏強度、f_y:鉄筋の規格降伏強度、q:鋼材係数(N + A_p・f_{py})/(b・d・F_c)、を表す。

3.5 非線形漸増載荷解析の結果

建物各方向の非線形漸増載荷解析の結果の内、層せん断力-層間変形角関係を図-2に示し、表-4に各ベースシア係数における最大層間変形角、PC梁の塑性率、1階PC柱脚の塑性率を示す。表より、非線形漸増載荷解析結果は、表-1に示す上部構造の目標性能クライテリアを満足していることがわかる。

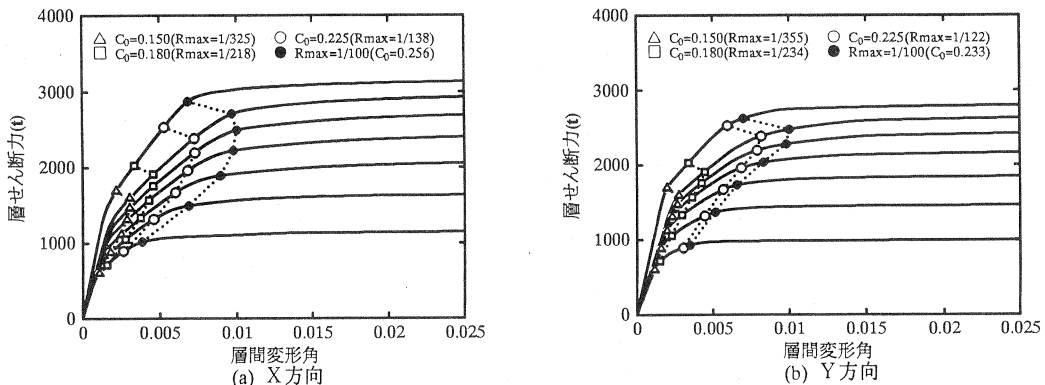


図-2 層せん断力-層間変形角関係

3.6 免震層の設定

免震装置は鉛プラグ入り積層ゴムを使用した。免震装置の台数はゴム径1000φが8台およびゴム径900φを16台とし、それぞれX方向の中通りおよび各外通りに配置した。鉛プラグは、建物層重量の約3.9%で降伏するよう設定し、プラグ径200φを8台およびプラグ径170φの16台を、それぞれ積層ゴム径1000φおよび径900φの積層ゴムに内蔵した。図-3に、免震装置の配置を示す。

表-4 非線形漸増載荷解析結果

ベースシア係数 (C _b)		最大層間変形角 (Radian)		PC梁の塑性率		1階PC柱脚の塑性率	
X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向
0.150		1/325	1/355	-	-	-	-
0.180		1/218	1/234	0.63	0.74	0.37	0.34
0.225		1/138	1/122	1.07	1.45	0.64	0.65
0.256	0.233	1/100		1.71	1.96	0.86	0.76

4. 地震応答解析

プレキャストPC上部構造の解析モデルは前項で実施した非線形漸増載荷解析の結果の内、層せん断力-層間変形関係より作成した各層を1質点および各階を1等価せん断バネに置換した振動モデルとした。免震層の解析モデルは、層全体を弾性のロッキングばねおよびトリリニア型のスウェイばねに置換したSRモデルとした。図-4に解析モデルを示し、表-5に建物各方向の振動モデルを示す。

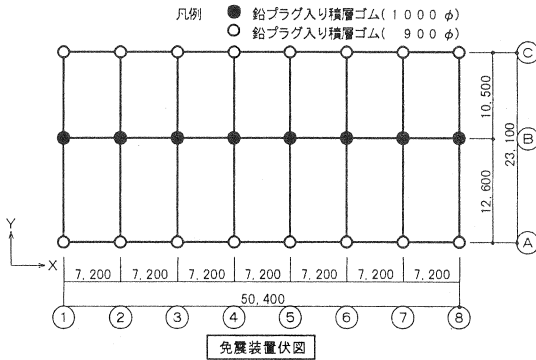


図-3 免震装置の配置

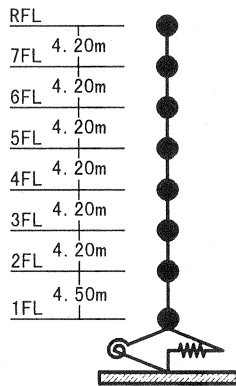


図-4 解析モデル

4.1 地震応答解析

応答計算は、Newmarkの β 法($\beta=0.25$)による数値積分とする。上部構造モデルに対する減衰マトリクスは、瞬間剛性に比例すると仮定して弾性1次モードに対する減衰定数を3%、高次モードに対しては振動数に比例すると仮定した。免震層の解析モデルに対する減衰は、弾性のロッキングばねに2%、スウェイばねには減衰は無いものとした。建物の応答計算は、水平2方向に対し、それぞれ単独に行った。

4.2 使用地震記録

使用地震波は標準3地震波(EL CENTRO 1940 NS, TAFT 1952 EW, HACHINOHE 1968EW) および日本建築センター発行の模擬地震波(原波)とした。標準3地震波を最大速度で25cm/sおよび50cm/sに規準化した波を、それぞれレベル1およびレベル2地震動とした。規準化した2レベルの地震波を、SRモデルに置換した建物各方向の免震装置の基部より入力した。表-6に、使用地震波を示す。

表-5(a) X方向の Tri-linear 振動モデル

階	重量	初期	第1折点		第2折点	
	(t)	剛性(t/cm)	dc(cm)	Qc(t)	dy(cm)	Qy(t)
7	1866	1465.2	0.316	462.9	1.360	1036.8
6	1541	1505.0	0.453	681.3	2.498	1526.1
5	1541	1513.0	0.491	743.5	2.907	1889.0
4	1541	1532.0	0.571	874.2	3.306	2221.2
3	1519	1559.8	0.645	1006.6	3.559	2490.8
2	1519	1632.7	0.677	1105.0	3.617	2737.9
1	1525	2012.3	0.607	1220.7	3.023	2937.2
免震層	2137	429.8	1.170	502.1	1.290	524.9

表-5(b) Y方向の Tri-linear 振動モデル

階	重量	初期	第1折点		第2折点	
	(t)	剛性(t/cm)	dc(cm)	Qc(t)	dy(cm)	Qy(t)
7	1866	1247.2	0.536	668.5	1.393	959.2
6	1541	1328.8	0.706	938.1	1.992	1396.7
5	1541	1365.7	0.856	1169.0	2.495	1749.9
4	1541	1396.6	0.919	1283.5	2.935	2080.4
3	1519	1428.3	0.972	1388.3	3.335	2332.9
2	1519	1518.9	0.993	1508.3	3.494	2534.6
1	1525	1955.6	0.833	1629.0	3.000	2688.0
免震層	2137	429.8	1.170	502.1	1.290	524.9

表-6 使用地震記録(単位: cm/sec², sec)

使用地震記録	レベル1	レベル2	継続時間
	最大加速度	最大加速度	
El centro NS (1940)	255.4	510.8	30.0
Taft EW (1952)	248.4	496.8	30.0
Hachinohe EW (1968)	127.7	255.4	30.0
日本建築センター原波	207.3		60.0
		355.7	120.0

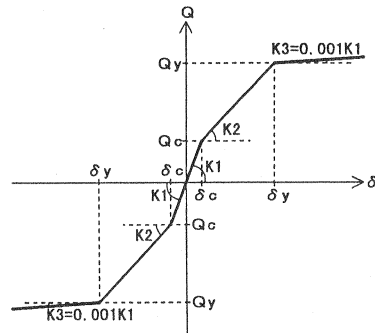


図-5 上部構造の履歴モデル

4.3 使用履歴特性

上部構造モデルの履歴特性は、プレキャストP C 圧着構造の履歴エネルギーの消費が小さいことを考慮してトリリニア型の非線形弾性とした。免震層は、トリリニア型の等価せん断ばねと弾性のロッキングばねに置換したS Rモデルとした。図-5に、各履歴特性モデルを示す。

4.4 応答結果

解析結果の内、レベル1およびレベル2地震動に対する建物各方向の最大応答層間変形および最大応答層変形を、それぞれ図-6および図-7に示す。レベル1地震動において、上部構造の最大応答層間変形は、1/724で目標層間変形角1/400以下であり、最大応答せん断力は、ベースシア係数 C_B で0.073で設計せん断力 $C_B=0.15$ 以下である。レベル2地震動において、上部構造の最大応答層間変形は、1/358で目標層間変形角1/200以下であり、最大応答せん断力は、ベースシア係数 C_B で0.13で設計せん断力 $C_B=0.15$ 以下である。また、免震層の最大応答変形は33.32cmであり、目標性能変形(安定変形)35cm以内である。

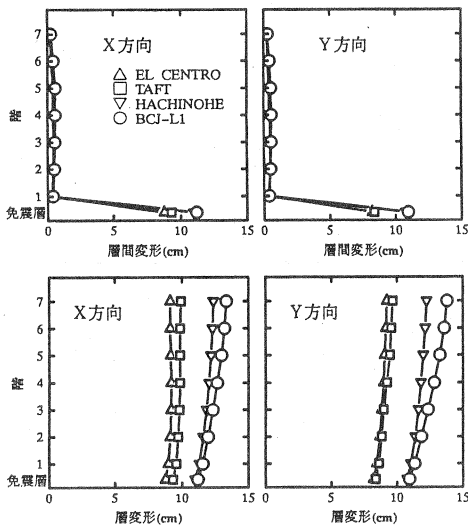


図-6 レベル1の地震動の解析結果

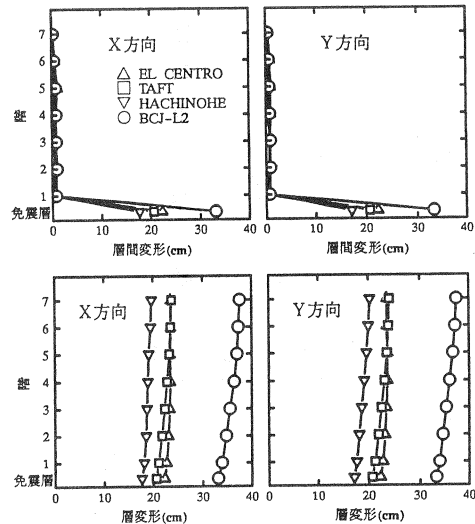


図-7 レベル2の地震動の解析結果

5. まとめ

プレキャストP C 免震構造の性能を検討するために計画した建物モデルを対象に、非線形漸増載荷解析および地震応答解析を実施した。結果から対地震挙動について、次の事柄を纏めることができた。

- 1) レベル1地震動による上部構造の応答は、全て目標性能以内であった。
- 2) レベル2地震動による上部構造の最大応答層間変形角は1/358、最大応答せん断力はベースシア係数で0.13、および免震層の最大応答変形は33.32cmであり、何れも目標性能を満足した。
- 3) 計画されたプレキャストP C 免震建物の耐震性能は、設定した目標性能クライテリアを全て満足しており、極めて効果的な免震構造であることがあった。

参考文献

- 1) 向野, 北村, 渡辺: PCaPC 高層免震建物の設計, -その1-, -その2-, 日本建築学会大会, C-2, pp. 999-1002, 1998
- 2) S.Okamoto, M.Ozaki, M.Hayashi, T.Yasiro, K.Nakamura, M.Matuie, Y.Tanaka, J.Gu: EARTHQUAKE SAFETY ASSESSMENT OF PROPOSED OPEN BUILDING SYSTEM WITH TARGET SERVICE LIFE OF 200 YEARS, RILEM/CIB/ISO International Symposium, Integrated Life-Cycle Design of Materials and Structures, 2000, Helsinki
- 3) 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", PC 技術協会誌, Vol.37, No.4, pp.57-67, 1995.