

(71) プレキャストPCエレベーターシャフトの設計検討

(株)ピー・エス 正会員 ○古林 桂太  
 同上 正会員 戸潤 隆  
 同上 正会員 傅 金華  
 同上 正会員 林 三雄

1. はじめに

近年、エレベーター(EV)の設置されていない5階建以下の共同住宅建物では昇降機の後設置が大きく取り上げられている。これは、低層型共同住宅建物では居住者のプライバシー保護を目的に階段室型のプランが比較的多く採用され、昇降機を設置する場合に機数が多くなることから5階建程度を目途に設置が見送られてきたことによる。しかし、建設当初に較べ居住者の高齢化が進み、上層階に住む人達にとっては昇降機の有無が深刻な生活環境の問題になっている。そこで、旧基準(1981年の新耐震設計施行前)で建設された5階建鉄筋コンクリート造の事務所建物を対象に、簡便な施工で昇降機を設置することを目的として壁式のプレキャストPC造によるEVシャフトの設計検討を行った。設計検討の方針および検討結果について報告する。

2. 検討方針

旧基準による建物は、現行の耐震設計基準(2000年6月前)に照らして既存不適格となる構造が多い。このため、EVシャフトを既存建物に接合して地震時におけるEVシャフト自体の慣性力を設置対象に負担させることができない。従って、EVシャフト自体を独立した建物として計画し、さらに地震時におけるEVシャフトの応答変形を把握して設置対象から十分なクリアランスを確保することが必要である。以下、計画したEVシャフトの概要および耐震検討方針について記述する。

2.1 EVシャフトの概要

EVシャフトの構造形式は、X方向がコの字型およびY方向がU字型の壁式のPCaPC構造である。構造の塔状比は、X方向が7.34およびY方向が7.68の塔状構造物である。基礎構造は、剛性の高いフーチングを配した場所打ち鉄筋コンクリート造の杭基礎とした。図-1に、計画したEVシャフトの平面および立面を示す。

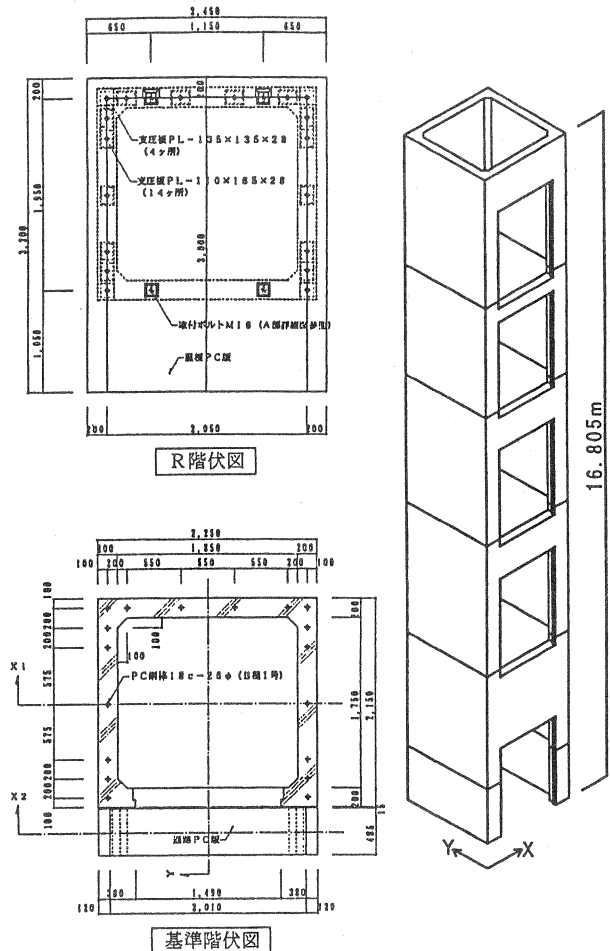


図-1 EVシャフトの平面と立面

## 2.2 耐震検討の方針

EV シャフトの耐震検討は、静的解析および動的解析の結果に対する目標性能クライテリアの確認で行うものとする。設計用せん断力およびその分布形は、構造の形状を考慮して EV シャフト各方向のレベル1地震動による予備応答結果より求める。

a) 設計用せん断力はシャフト各方向のレベル1地震動による応答せん断力を上回る値とし、その分布はレベル1地震動による応答せん断力の分布を上回る分布形とする。

b) 構造の崩壊形は、EV シャフト脚における PC 鋼材の曲げ引張降伏とする。

c) 基礎構造は、剛性の高いフーチングを配した場所打ち鉄筋コンクリート造の杭基礎とし、上部構造の反力および転倒モーメントを考慮して許容応力度設計を行う。

d) 特性の異なる標準3波 (EL CENTRO NS, TAFT EW, HACHINOHE EW) および日本建築センター発行の模擬地震波を使用地震波として、EV シャフトに直接入力した。

表-1 目標性能の層間変形角

設計用地震荷重	せん断力係数 ( $C_D$ )	最大層間変形角
設計用せん断力	レベル1 応答結果	1/300以下
終局強度設計用	レベル1 応答の1.5倍	1/150以下

表-2 使用地震波記録(単位:  $\text{cm}/\text{sec}^2$ , 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
日本建築センター波	L1	207.3	-	60.0
	L2	-	355.7	120.0

## 2.3 解析結果に対するクライテリア

### 2.3.1 非線形漸増載荷解析

非線形漸増載荷解析に用いる設計用せん断力 ( $C_D=0.30$  以上) およびその分布は、レベル1の標準3地震波および日本建築センター発行の模擬波 L1 を用いた地震応答解析による応答結果を上回る値とする。解析結果に対する目標性能を以下に示している通りとする。表-1 に、目標性能とする層せん断力と層間変形角の関係を示す。

a) 構造の設計用せん断力に対しては、

①最大層間変形角が 1/200 以下であること。

b) 構造の終局強度設計用せん断力に対しては、

①部材が曲げ終局耐力に達しないこと。

②最大層間変形角が 1/150 以下であること。

### 2.3.2 地震応答解析

解析モデルは非線形漸増載荷解析に同じとする。応答計算は Newmark の  $\beta$  法 ( $\beta=0.25$ ) による。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する。使用地震記録は次表に示す標準3記録および日本建築センター作成の模擬波と

する。地震記録の増幅は、地表の最大速度で 25cm/s および 50cm/s に規準化した記録を、それぞれレベル 1 およびレベル 2 の地震動とする。表-2 に、使用地震記録を示す。地震応答解析の結果に対して次の事柄を満足していることを確認する。

- a) レベル 1 の地震動に対しては、
  - ①最大応答層間変形角が 1/200 を超えないこと。
  - ②各層の応答せん断力が構造の終局耐力の 1/1.5 以内であること。
- b) レベル 2 の地震動に対しては、
  - ①最大応答層間変形角が 1/100 を超えないこと。
  - ②各層の応答せん断力が、構造の終局耐力以内であること。

### 3. 非線形漸増載荷解析

#### 3.1 EV シャフトの概要

EV シャフトの構造は、コの字型のプレキャスト PC ブロックを 5 層積み重ねた壁式構造である。基礎梁を含む構造高さは 16.805m で、1 階から 5 階までの各階高さがそれぞれ 4.315m, 3.565m, 3.100m, 2.875m および 2.950m である。壁厚は各階等厚の 20cm で、X 方向および Y 方向の壁心寸法がそれぞれ 2.05m および 1.95m である。

表-3 設計用せん断力

階	階高 (m)	Wi (t)	X方向				Y方向および45度方向			
			Co=0.4		CB=0.6		Co=0.6		CB=0.9	
			Ci	Qi(t)	Ci	Qi(t)	Ci	Qi(t)	Ci	Qi(t)
5	2.950	9.7	0.71	6.9	1.07	10.4	1.07	10.4	1.60	15.6
4	2.875	8.5	0.64	11.6	0.96	17.4	0.96	17.4	1.44	26.1
3	3.100	8.9	0.56	15.2	0.84	22.7	0.84	22.7	1.26	34.1
2	3.565	9.9	0.48	17.9	0.72	26.8	0.72	26.8	1.08	40.2
1	4.315	12.1	0.40	19.6	0.60	29.4	0.60	29.4	0.90	44.1

#### 3.2 設計用せん断力

検討方針に基づきレベル 1 地震動に規準化した標準 3 地震波および建築センター波 L1 を用いた地震応答解析の結果より求めた設計用せん断力は、X 方向がベースシア係数で 0.40 および Y 方向と 45 度方向が 0.60 であった。求めた設計用せん断力を用いて EV シャフトの X, Y および 45 度各 3 方向に対して非線形漸増載荷解析を実施した。表-3 に、EV シャフト各方向の設計用せん断力を示す。

#### 3.3 解析モデル

EV シャフトの解析モデルは立体 3 次元モデルとした。部材の解析モデルは、4 隅の仮想柱および各階の仮想梁を線材置換による材端剛塑性曲げばねモデルとした。構造壁は両隅に仮想柱および各階に仮想梁を配した立体 3 次元の壁谷澤モデル 1) とし、柱は剛体と仮定した境界梁にピン接合して非線形の軸ばねに置換した。壁板部分は材端に剛塑性曲げばねを配した曲げせん断部材として扱った。曲げせん断部材の復元力特性はコンクリートのひび割れおよび引張 PC 鋼材の降伏を折れ点とするトリリニア型とした。基礎杭は弾性の軸方向ばねに置換した。曲げせん断部材の初期剛性  $K_b$ 、降伏剛性低下率  $\alpha_v$ 、曲げひび割れ耐力  $M_c$  および終局耐力  $M_u$  は、文献 2) より下式とした。

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

$$\alpha_y = (0.043 + 1.64n \cdot p_t + 0.043a / D + 0.33\eta) \cdot (d / D)^2 \tag{2}$$

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

$$M_u = 0.9\alpha_y a_t d + f_{py} \cdot a_{pe} (1 - 0.5q) \cdot d_p \tag{4}$$

ここに、L:部材フエ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、 $I_e$ 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、 $D$ : 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  $(N + A_p \cdot f_{py}) / (b \cdot d \cdot F_c)$  を表す。また、柱の軸引張に対してはコンクリートのひび割れおよび PC 鋼材の引張降伏を折れ点とするトリニア型とし、軸圧縮に対してはコンクリートの圧縮降伏を折れ点とするバイリニア型とする。柱の初期軸剛性  $K_{V1}$ 、軸ひび割れ後の剛性  $K_{V2}$ 、軸ひび割れ耐力  $N_{ic}$ 、軸引張耐力  $N_{iu}$  および軸圧縮耐力  $N_{cu}$  の式は、 $K_{V1} = E_c \cdot A_c / L_c$ 、 $K_{V2} = E_{ps} \cdot A_{ps} / L_c$ 、 $N_{ic} = N + P_e + (0.07F_c \cdot A_c)$ 、 $N_{iu} = 0.85a_{ps} \cdot f_{py}$ 、および  $N_{cu} = 0.67F_c \cdot A_c$  とした。ここに、 $A_c$ :柱の断面積、 $E_{ps}$ :PC 鋼材の弾性係数、 $a_{ps}$ :柱の PC 鋼材の全断面積、および  $L_c$ :柱の内法寸法を表す。解析モデルを、図-2 に示す。

### 3.4 漸増解析結果

表-4 に各方向の解析結果を示し、ベースシアー係数に対する壁脚の転倒モーメントを表-5 に示す。表の

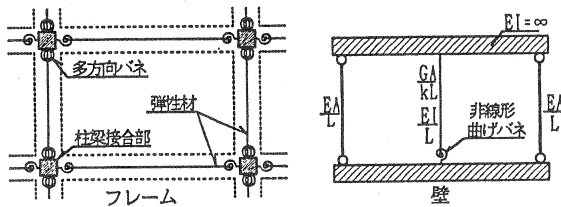


図-2 解析モデル

各段は各ベースシアー係数時の解析結果である。各方向の層せん断力と層間変形関係を図 3-(a) から図 3-(c) に示す。漸増载荷解析の結果は、設定した耐震性能目標を満たしている。

表-4 解析結果

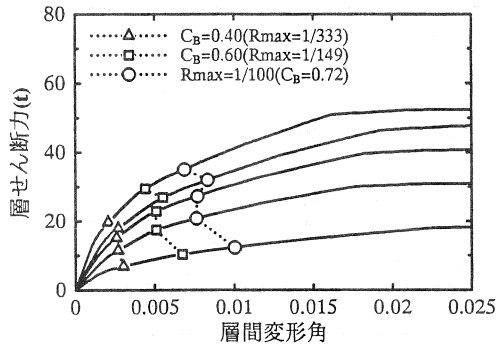
ベースシアー係数 ( $C_B$ )			最大層間変形角 (Radian)			1階壁脚の塑性率		
X	Y	45度	X	Y	45度	X	Y	45度
0.40	0.60	0.60	1/333	1/303	1/257	-	-	-
0.60	0.90	0.90	1/149	1/178	1/111	0.71	0.87	0.94
0.72	1.17	0.94	1/100	1/100	1/100	1.21	2.02	1.06

表-5 壁脚転倒モーメント

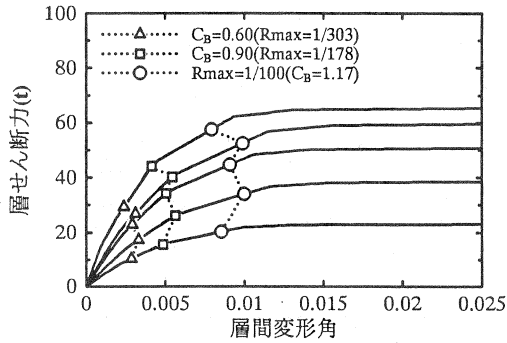
ベースシアー係数 ( $C_B$ )			転倒モーメント (ton·m)		
X	Y	45度	X	Y	45度
0.40	0.60	0.60	249.3	374.0	374.0
0.60	0.90	0.90	374.0	560.9	560.9
0.72	1.17	0.94	445.9	732.2	579.6

### 4. 地震応答解析

地震応答解析は、地震動レベルをレベル1 (中小地震動を想定) およびレベル2 (大地震動を想定) に対して実施する。EV シャフト構造に対する地震波の入力は構造基部とし、X 方向、Y 方向および 45 度方向の 3 方向に、それぞれ単独に入力する。応答計算は、Newmark の  $\beta$  法 ( $\beta = 0.25$ ) による数値積分とし、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する。解析モデルは、静的解析に同じとし、3次元の立体モデルを用いる。



(a) X方向層せん断力と層間変形角の関形



(b) Y方向層せん断力と層間変形角の関形

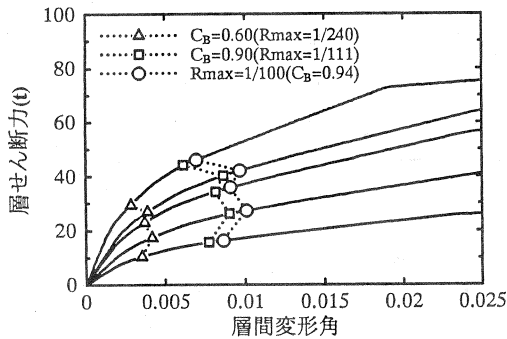


図3 (c) 45度方向層せん断力と層間変形角の関係

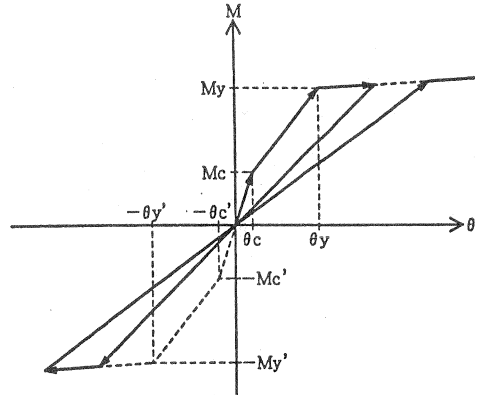


図-4 部材の履歴モデル

表-6 応答解析結果

地震動レベル	方向	最大応答層せん断力 (t)	最大応答転倒モーメント (t·m)	最大応答層間変形 (cm)	最大応答層変形 (cm)	1階壁脚の塑性率
レベル1	X	19.4	239.0	1.08	5.25	0.13
	Y	28.8	351.3	0.76	3.68	0.16
45度	X	19.2	236.0	0.64	3.08	0.13
	Y	28.8	351.3	0.76	3.68	0.16
レベル2	X	34.9	399.4	2.53	11.84	0.30
	Y	47.9	584.1	1.26	6.12	0.33
45度	X	33.9	410.1	1.21	5.90	0.29
45度	Y	47.9	584.1	1.26	6.12	0.33

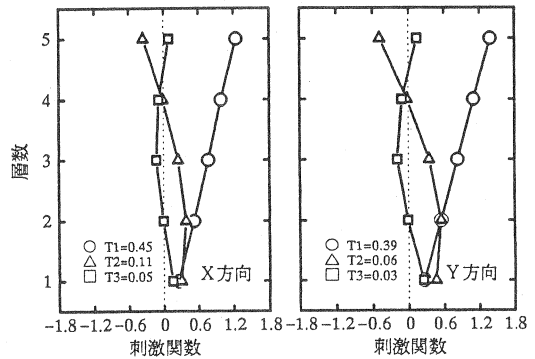


図-5 構造の弾性3モード

#### 4.1 履歴特性モデル

部材の履歴特性モデルは、全部材とも原点指向モデルとする。図-4に、各部材の履歴特性モデルを示す。

#### 4.2 解析結果

解析結果を表-6に示す。また、図-5に構造の弾性3モード、図-6にレベル1地震動による最大応答層間変形と層変形、および図-7にレベル2地震動による最大応答層間変形と層変形を示す。地震応答解析の結果は、設定した耐震性能目標を満たしていた。

5. まとめ

検討方針に基づき、EV シャフト構造の各方向を対象にして非線形漸増荷重解析と標準3地震波および日本建築センター波を用いてレベル1およびレベル2地震動に対するよる地震応答解析を実施した。解析結果からEVシャフトの耐震性能について、次の事項を纏めることができた。

1) 静的非線形漸増荷重解析の結果は、計画した目標性能を全て満足した。

2) レベル2地震動によるEVシャフト構造の最大応答せん断力は何れの応答も終局耐力以内で、最大応答層間変形角もEL CENTRO波入力時にX方向の5層で2.5cm(1/118)を示したが、目標応答層間変形角(1/100)以内であった。

3) シャフト壁脚の最大応答転倒モーメントは建築センター波入力時にY方向が584.1t.mを示し、これに常時軸力を加算した杭反力は+130t および-112.3t で、許容耐力以内であった。

4) 静的解析および動的解析の結果は、設定した設計目標を全て満足し、十分な耐震性能を有していることが確認された。

参考文献:

- 1) Toshimi Kabeyasawa, Hitoshi Shiohara, Shunsuke Otani and Hiroyuki Aoyama, "Analysis of the Full-Scale Seven-Story Reinforced Concrete Test Structure", JOURNAL OF THE FACULTY OF ENGINEERING, THE UNIVERSITY OF TOKYO(B), Vol. X X X VII, No. 2(1983).
- 2) 林, 岡本, 小谷, 加藤, 傳, "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, 1995.

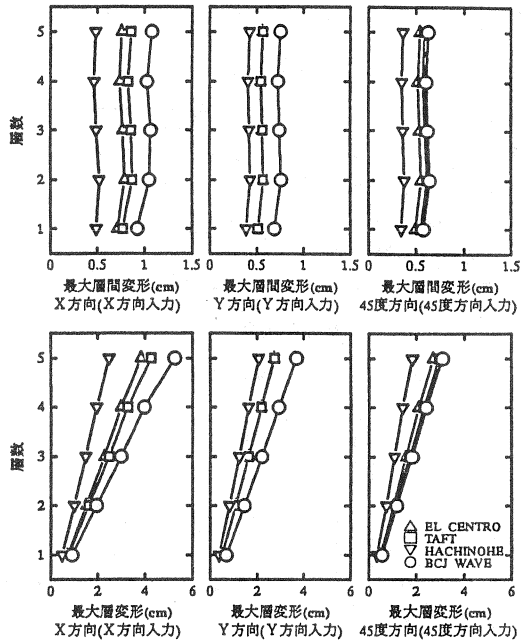


図6 レベル1の地震動の解析結果

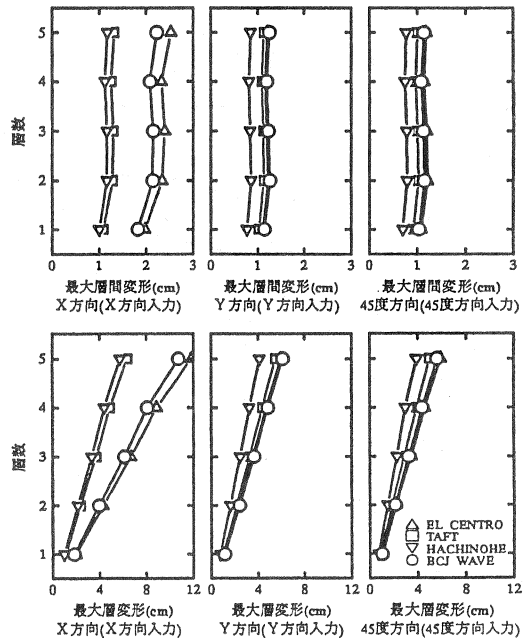


図7 レベル2の地震動の解析結果