

# 論文 地震時における PC 造建物の立体弾塑性挙動

傅 金華<sup>1</sup>・林 三雄<sup>2</sup>・井上範夫<sup>3</sup>・柴田明徳<sup>4</sup>

**要旨:** 現在, プレストレストコンクリート(PC)造建物は数多く建てられている。しかし, 鉄筋コンクリート(RC)造建物に比べ, PC部材の設計種別およびその配置方法が多数あるため, 地震時におけるPC造建物の挙動が極めて複雑になる。このため, PC造建物の耐震性能を総合的に評価することは難しい。本研究は, 15層純ラーメンのPC造建物を対象にして部材の履歴モデルを替えることにより表現したPC, PPCおよびRC造各建物について, 2方向の静的および動的解析を行った。地震時における各建物の立体弾塑性挙動を報告する。

**キーワード:** PC造, 履歴モデル, 立体非線形, 地震応答

## 1. はじめに

PC構造はこれまで中低層建物に広く利用されてきたが, 現在, 高強度, 高品質材料の使用でPC造建物の高層化が可能になっている。しかし, PC造建物は, 主要構造部材の柱および梁がその設計種別によりPCからパーシャルプレストレストコンクリート(PPC)に分類され, さらに, RC柱と併用して架構を造ることが多い。これらの建物を構成する各部材は, いずれも個々の履歴特性を持つことになる[1,2,3]。このため, 地震時におけるPC造建物の弾塑性挙動は極めて複雑になり, その耐震性能を総合的に評価することは難しい。本研究は, 文献[1]で提案したPC部材の履歴モデルを用い, 15層の純ラーメンプレキャスト(PCa)PC造建物を解析対象にして, 各部材の履歴モデルを替えることにより表現したPC, PPCおよびRC造の各建物について, 静的非線形漸増載荷解析, 1方向および2方向の地震入力による立体地震応答解析を行い, その解析結果の比較からPC, PPCおよびRC造建物の地震応答挙動を検討した。

## 2. 建物の概要

解析に用いた建物は, 15層の純ラーメンPCaPC造建物である[1]。建物の平面は1層から最上層まで同一で, X方向が8スパン(各7.5m), Y方向が3スパン(中央スパン: 10m, 両側スパン: 各15m)の整形である。建物の平面形状を図1に示す。建物の高さは, 1層が5m, 2層以上を各4mとする61mである。各部材の断面寸法および配筋を表1に示す。PCa造の柱, 梁およびスラブのコンクリートの強度は61.74MPaとし, 場所打ちコンクリートの強度を35.28MPaとした。柱の主筋にはPC鋼棒(SBPR110/125)を

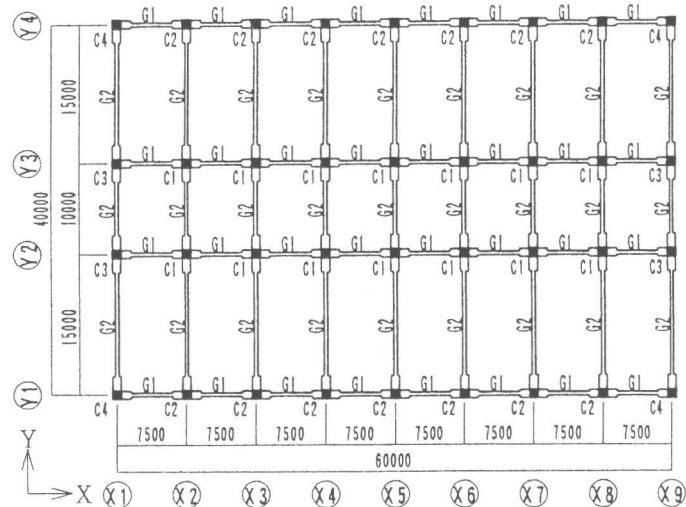


図-1 建物の平面図(単位: mm)

<sup>1</sup> (株)ピー・エス 建築技術部 工博 (正会員)  
<sup>2</sup> (株)ピー・エス 建築技術部 (正会員)  
<sup>3</sup> 東北大学助教授 工学部建築学科 工博 (正会員)  
<sup>4</sup> 東北大学教授 災害制御研究センター 工博 (正会員)

表1. 部材の断面寸法と配筋

| 階数 |    | 1~4 | 5~8     | 9~11    | 12~15   | 階数      |    | 1~4     | 5~8     | 9~11    | 12~15   |
|----|----|-----|---------|---------|---------|---------|----|---------|---------|---------|---------|
| 柱  | C1 | 断面  | 105x105 | 105x105 | 100x100 | 100x100 | C3 | 105x105 | 105x105 | 100x100 | 100x100 |
|    |    | 配筋  | 8-32φ   | 8-32φ   | 8-32φ   | 8-32φ   |    | 20-32φ  | 16-32φ  | 12-32φ  | 8-32φ   |
|    | C2 | 断面  | 105x105 | 105x105 | 100x100 | 105x105 | C4 | 105x105 | 105x105 | 100x100 | 105x105 |
|    |    | 配筋  | 16-32φ  | 12-32φ  | 12-32φ  | 8-32φ   |    | 20-32φ  | 16-32φ  | 12-32φ  | 8-32φ   |

| 階数 |    | 基礎梁                       | 2~4                       | 5~6         | 7~8         | 9                                |                                       |
|----|----|---------------------------|---------------------------|-------------|-------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| 梁  | G1 | 断面                        | 80x450                    | 95x100      | 95x100      | 95x100                           | 95x100                                |
|    |    | 配筋                        | 14-D41                    | 8-(12-12.7) | 4-(12-12.7) | 8-(10-12.7)                      | 6-(12-12.7)                           |
|    | G2 | 断面                        | 80x450                    | 95x120      | 95x120      | 95x120                           | 95x120                                |
|    |    | 配筋                        | 14-D41                    | 8-(12-12.7) | 4-(12-12.7) | 8-(10-12.7)                      | 6-(12-12.7)                           |
|    | 階数 |                           | 10                        | 11~12       | 13~14       | 15~R                             | Note:                                 |
|    | G1 | 断面                        | 90x100                    | 90x100      | 90x100      | 90x100                           | 柱: PC鋼棒<br>(SBPR110/125)<br>σ=1078MPa |
| 配筋 |    | 4-(12-12.7)<br>2-(7-12.7) | 4-(12-12.7)<br>2-(7-12.7) | 6-(7-12.7)  | 6-(6-12.7)  |                                  |                                       |
| G2 | 断面 | 90x120                    | 90x120                    | 95x120      | 95x120      | 梁: PC鋼線<br>(SWPR7B)<br>σ=1578MPa |                                       |
|    | 配筋 | 4-(12-12.7)<br>2-(7-12.7) | 4-(12-12.7)<br>2-(7-12.7) | 6-(7-12.7)  | 6-(6-12.7)  |                                  |                                       |

を用い、梁および柱梁の接合部はPC鋼線(SWPR7B)を用いた。柱および梁の横補強筋は、異形PC鋼棒(SBPD130/145)を用いた。普通鉄筋はSD295およびSD390の2種類とした。PC造床の固定荷重は、基準階を4.51KPa、屋根は防水を含め6.47KPaとした。積載荷重は事務所を想定し、フレームの設計および柱軸力の計算については、基準階が1.76KPaおよび屋根が1.27KPaと仮定した。地震時の計算については、基準階が0.78KPaおよび屋根が0.58KPaと仮定した。

### 3. 解析方法

解析モデルは、建物を構成するXおよびY方向のフレームを剛な床でつなぎ、非線形立体解析を行った。部材の解析モデルは、線材置換による材端剛塑性曲げバネモデルとし、柱梁の接合部は弾性シアーパネルモデルとした。部材の初期剛性( $K_E$ )、降伏剛性低下率( $\alpha_y$ )、曲げひび割れ強度( $M_c$ )および曲げ降伏強度( $M_y$ )は式1~4で求めた[1]。部材の解析モデルを図2に示す。

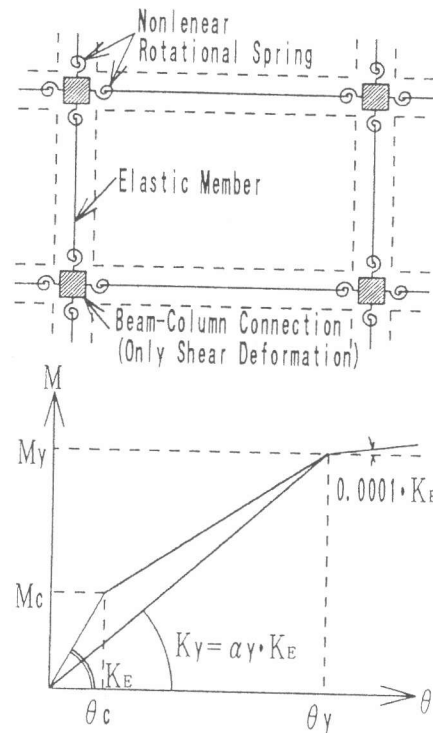


図-2 解析モデル

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

$$\alpha_y = (0.043 + 1.64n \cdot P_t + 0.043a/D + 0.33\eta)(d/D)^2 \quad (2)$$

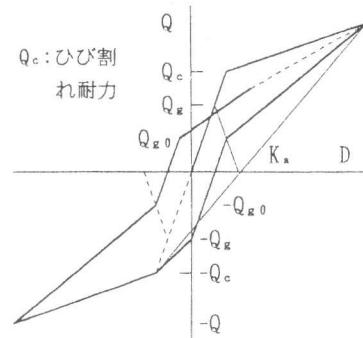
$$M_c = (1.8\sqrt{F_c + P_c/A_c}) \cdot Z_c \quad (3)$$

$$M_y = 0.9\sigma_y \cdot a_t \cdot d + f_{py} \cdot a_{pc} \cdot d_p (1 - 0.5q) \quad (4)$$

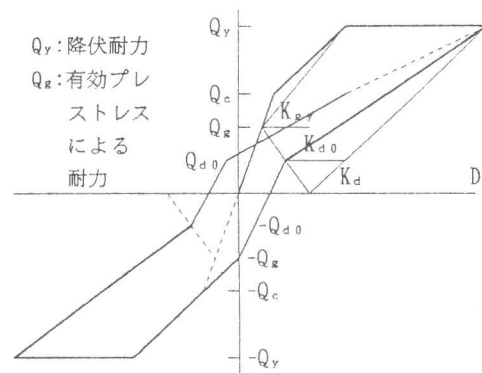
ここに、 $\eta = (P_c + N)/(F_c \cdot b \cdot D)$ 、 $q = (f_{py} \cdot a_{pc})/(F_c \cdot b \cdot d)$ 、 $L$ : 部材フェースから反曲点までの距離、 $E_c$ および $G_c$ : コンクリートの弾性係数およびせん断弾性係数、 $I_c$ および $Z_c$ : 部材の有効断面2次モーメントおよび断面係数、 $A_c$ : コンクリートの断面積、 $k$ : せん断形状係数、 $n$ : コンクリートに対する鋼材の弾性係数比、 $P_t$ :

PC鋼材を考慮した引張鉄筋比,  $a$ : シアースパン,  $D$ および $d$ : 部材せいおよび部材の有効せい,  $F_c$ : コンクリートの圧縮強度,  $P_c$ : 有効プレストレス力,  $N$ : 軸力,  $\sigma_y$ : 鉄筋規格強度の1.1倍,  $f_{py}$ : PC鋼材の規格降伏強度,  $a_t$ : 鉄筋の断面積,  $a_{pc}$ : PC鋼材の有効断面積,  $d_p$ : PC鋼材に関する有効せい。  $P_t$ の計算に用いるPC鋼材の断面積は, 曲げ強度に有効断面積に $(f_{py}/\sigma_y) \cdot (d_p/d)$ を乗じた値とする。ただし, PC鋼材のみ配置した場合, PC鋼材の有効断面を3倍した値とする。

本研究では, PC造に加えて部材の履歴モデルを替えて, PPCおよびRC造を表現した建物の弾塑性挙動も検討し, PC造との応答比較を行った。PPCおよびRC造建物の部材断面寸法, 配筋および部材の解析モデルはPC造と同じとした。PC造は, 柱および梁ともPC部材の履歴モデル, PPC造は, 柱はPC, 梁はPPC部材の履歴モデルを用いた。また, RC造は, 柱および梁ともRC部材の履歴モデルを用いた。PC, PPCおよびRC部材の履歴復元力特性は, 文献[1]で提案した部材の履歴モデルを用いた。この履歴モデルは2つの係数で構成され, 1つはPC鋼材による曲げ終局強度比に関連する係数 $\lambda'$ , 他は降伏後の復元剛性の低下を表す係数 $\gamma$ である。この2つの係数の組み合わせにより, PCからRC部材までその履歴性状を表した(RCの場合, 武田モデルに一致)。PPC造建物は, PC鋼材による曲げ終局耐力が部材の曲げ終局耐力の半分になるPPC造を対象にして検討した。文献[1]に示す実験および解析の結果を参考にしてPC部材については,  $\lambda'=1.0, \gamma=0.8$ , PPC部材については $\lambda'=0.3, \gamma=0.7$ , およびRC部材については $\lambda'=0.0, \gamma=0.4$ (武田モデルと同じ)とした。PCおよびPPC部材に用いた部材の履歴モデルを図3に示す。この中に, 図(a)はひび割れ後, 図(b)は降伏後の履歴である。



(a) ひび割れ後

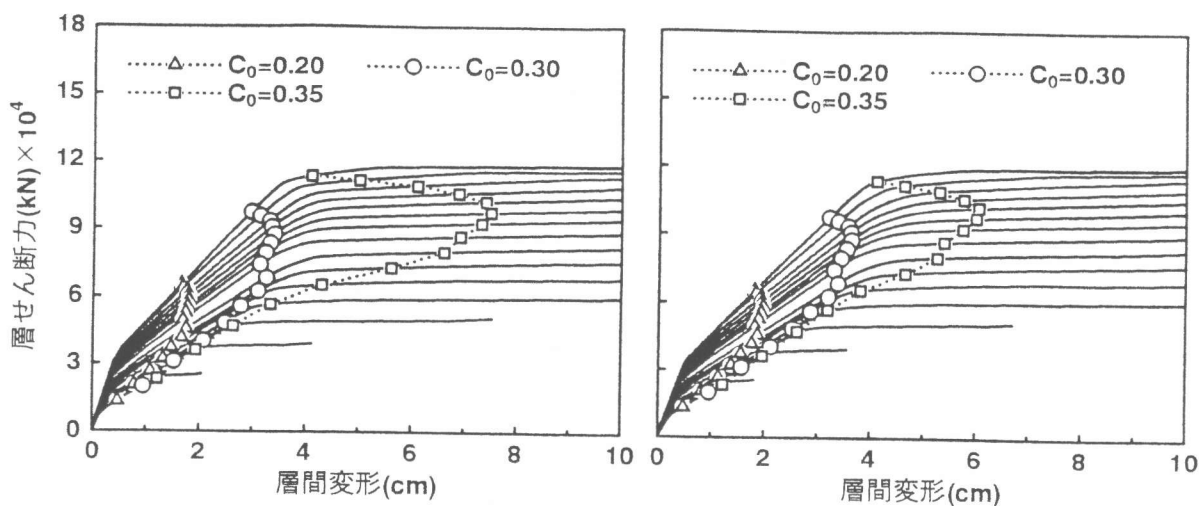


(b) 降伏後

図一 3 部材の履歴モデル

#### 4. 静的非線形解析

建物の層せん断耐力と層間変形の関係をみるために, XおよびY各方向の静的非線形漸増解析を行った。解析に用いた漸増荷重の層せん断力分布は, Aiモードとした。この建物の耐震設計の方針は, 梁降伏型とし, 最大層間変形角が1/200, 1/100および1/50に達した時, 標準せん断力係数(C0)で0.20, 0.30および0.35に達することにした。建物のXおよびY方向における層せん断力-層間変形の関係を図4に示す。この中に, 図(a)はX方向, 図(b)はY方向の解析結果である。最大層間変形角が1/50の時, XおよびY方向とも梁降伏の全体崩壊型を示した。X方向の解析結果は, 梁の最大塑性率が2.69(Y2フレームの7階側スパンの外端部)に達し, Y方向の梁の最大塑性率が1.50(X3フレームの7階側スパンの外端部)に達した。また, 立体解析では, 解析方向に対する直交梁の拘束作用を見るために, 直交梁を無視した解析も行った。しかし, 直交梁を無視したモデルのXおよびY方向の最大抵抗層せん断力は, 直交梁を考慮したものに比べ, わずか2%の減少に止まった。また, 塑性率については, X方向梁の最大塑性率が2.77(Y2フレームの7階側スパンの外端部), Y方向梁の最



(a) X方向の層せん断力-層間変形

(b) Y方向の層せん断力-層間変形

図-4 建物の層せん断力-層間変形の関係

大塑性率が1.60(X3フレームの7階側スパンの外端部)となり、僅かに増大した。この建物のXおよびY方向の各フレームは、純ラーメン架構で、各フレーム間の剛性および耐力に大きな差が無く、直交梁の拘束作用が小さかったものと考えられる。

## 5. 地震応答解析

解析に用いた地震波記録は、EL-CENTRO波(1940)および東北大学波(1978)の2記録とした。この両地震波のNS成分を50cm/secに規準化し、EW成分に対して等倍率を乗じた。解析は1方向および2方向入力とした。1方向入力は、スパンの長いY方向に地震波のNS成分を入力した。2方向入力については、建物のY方向に地震波のNS成分、X方向には地震波のEW成分を同時入力した。地震波の継続時間は、EL-CENTRO波を12秒、東北大学波を10秒とした。数値計算は、Newmarkの $\beta$ 法( $\beta=0.25$ )を用いた。減衰マトリクスは瞬間剛性に比例すると仮定し、弾性1次モードに対する減衰定数は5%、高次モードに対しては振動数に比例すると仮定とした。

### 5.1 最大層間変形

この建物のX方向の固有周期は1.19秒、Y方向の固有周期は1.31秒である。EL-CENTRO波および東北大学波による各建物の重心位置における最大層間変形を図5に示す。この中に、図(a)(b)は1方向入力、図(c)(d)は2方向入力の結果である。各地震波記録による応答を比較すると、EL-CENTRO波による応答は各層とも層間変形角が1/100以下であるのに対し、東北大学波による応答はPC造建物のみ中層部で最大層間変形角が1/100を超えた。また、設計種別による応答を見ると、RC造とPPC造の応答層間変形に大差はない。これは、普通鉄筋が約半分配置されたPPC部材は曲げ降伏後の剛性低下がRC部材と比べ、大差がないからである。このことから、普通鉄筋が約半分配置されたPPC造は、RC造とおおむね同程度の応答性状であったといってもよい。一方、PC造建物の最大応答層間変形は、RC造に較べて約1.5倍の応答を示した。PC部材の履歴モデルでは、係数 $\lambda$ が1であるため、曲げ降伏後の履歴が原点指向型に近い挙動を示し、RC部材と比べ、エネルギー吸収が少ないと考えられる。また、1方向入力と2方向入力による応答結果の比較では、最大層間変形については、各構造とも特に差は見られなかった。

## 5.2 床のねじれ回転角

2方向入力における建物各層の床の重心回りのねじれ回転角を図6に示す。全体的にねじれ回転は小さく、RC造建物ではねじれが殆ど生じていない。一方、PC造建物については、各層のねじれ回転角が下層から上層部にかけて次第に大きくなる傾向を示した。PPC造建物各層のねじれ回転角は、おおむねRC造とPC造の中間の値であった。すなわち、本解析例に限れば、PC造はRC造建物に較べて地震応答が大きく、更に、建物にねじれが生じやすい傾向を持つことを示した。

## 5.3 梁の最大塑性率

1方向および2方向入力による各層の梁の最大塑性率を図7および図8に示す。この中に、図(a)(b)はX1フレーム、図(c)(d)はX2フレームの結果である。入力地震波による応答を比較すると、東北大学波による梁の塑性率はEL-CENTRO波より大きい。建物の設計種別で見ると、EL-CENTRO波による応答は、PPC造とRC造では梁の塑性率に大差はないが、東北大学波ではRC造よりPPC造の塑性率がやや大きくなる。また、PC造とRC造における梁の最大塑性率は、PC造の方がRC造の約1.6倍を示した。ただし、1方向と2方向入力による応答塑性率の比較では、その差は小さい。

## 6. まとめ

本研究は、文献[1]で提案したPC部材の履歴モデルを用い、15層の純ラーメンPCaPC造建物を解析対象として、各部材の履歴モデルを替えることにより表現したPC、PPC

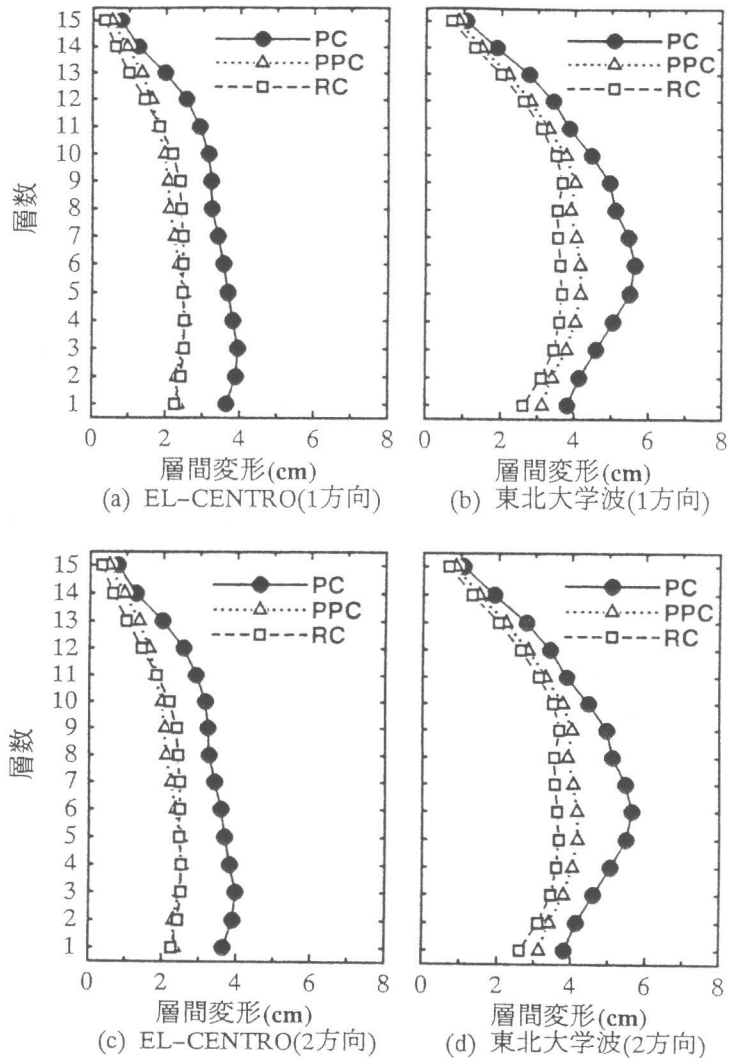


図-5 Y方向の最大層間変形

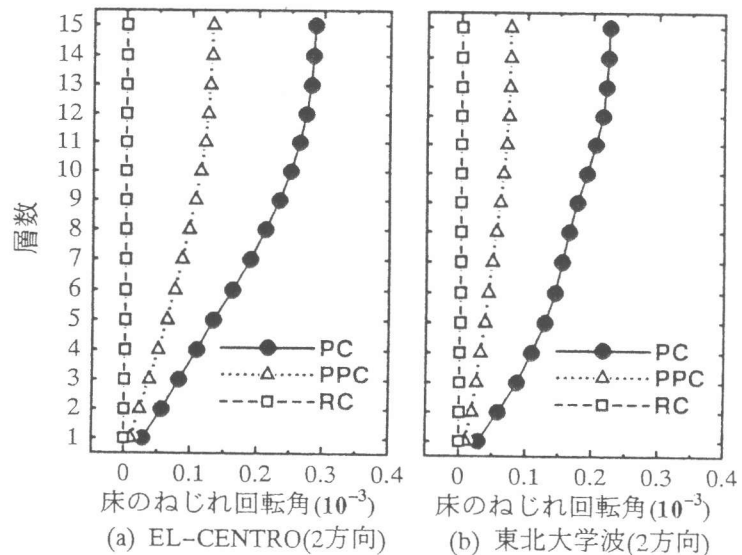
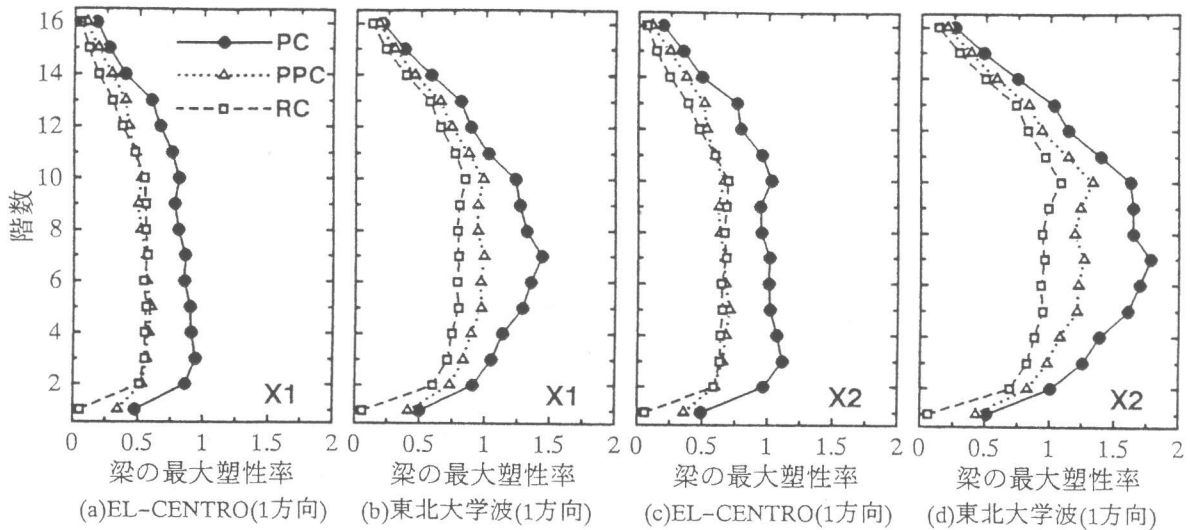
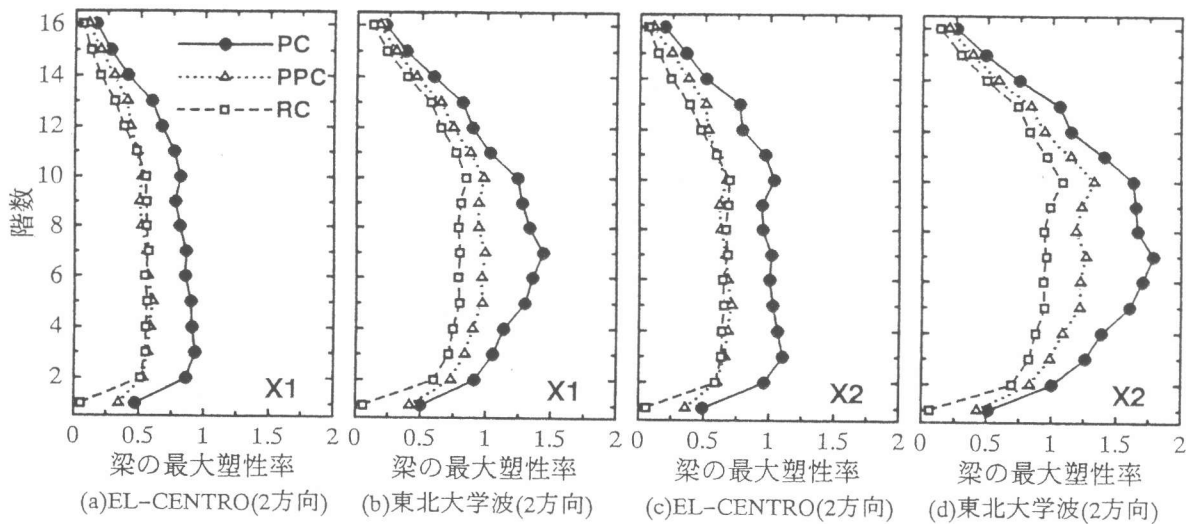


図-6 床のねじれ回転角



図一七 梁の最大塑性率(1方向入力)



図一八 梁の最大塑性率(2方向入力)

およびRC造の各建物に対して、静的非線形および地震応答解析を行った。各建物の解析結果の比較から、PC、PPCおよびRC造建物の地震応答性状について、以下のことが言える。

1. RC造とPPC造建物では、最大応答層間変形に大きな差が見られない。一方、PC造建物の応答はRC造建物の約1.5倍に達した。
2. 2方向入力によるPC造建物のねじれ回転角は、RC造建物に較べ、大きくなる傾向を示した。
3. PC造建物の梁の最大応答塑性率は、RC造建物に較べ、約1.6倍に達した。
4. 2方向入力と1方向入力の応答を比較すると、建物重心位置の層間変形および梁の塑性率とも、その差は小さい。

【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, Vol.37, No.4, pp.57-67, July 1995  
 [2] 林,傅,小谷,岡本: プレストレストコンクリート造部材の非線形性状および履歴特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, pp.731-736, 1995年7月  
 [3] 西山,渡辺,六車: PC, PPCおよびRCの地震応答性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.2, pp.1125-1130, 1993年6月