

(31) PC柱の実験的研究

(株)ピー・エス ○正会員 傅 金華
 (株)日建設計 同 向野聡彦
 鹿島建設(株) 同 牛尾俊行
 (株)ピー・エス 同 林 三雄

1. はじめに

1960年代後半より、プレキャストプレストレストコンクリート造(PCaPC)柱を用いた建物が多数建設されてきたが、当初よりPC柱に関する研究は少なく、その力学的性状が十分に把握されていない。また、日本建築学会発行の「プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説」においてもPC柱に関する設計クライテリアおよびその力学的性状に関する記述はない。このため、PC柱の設計に際しては、一般に鉄筋コンクリート造(RC)柱の設計法を参考にしてPC部材特有の力学的特性を付加して行われてきた。PCaPC柱の一般的な特性は、RC柱に較べて、1)主筋として予めプレストレスを与えられたPC鋼材が配置されるため普通鉄筋のように鋼材が柱の軸圧縮力および曲げ圧縮力を負担することができない、2)柱のコンクリートに曲げひび割れが生じてPC鋼材位置まで進展した時点で引張PC鋼材の有効プレストレスに相当する曲げ耐力を発揮する、および3)PC鋼材の引張力が有効プレストレス力に達するまでコンクリートとPC鋼材の間に付着力が発生しない、等の点が異なっている。

そこで、著者らは計画されたPCaPC高層建物^{[1][2]}に適用されたPC柱を対象にして基礎的な実験的研究を行い、PC柱の設計法を検討することにした。実施したPCaPC柱に関する実験的研究結果を報告する。

2. 実験計画

普通鉄筋を主筋として使用しないPCaPC柱に関する実験的研究は、殆ど行われていない。このため、高層建物の設計に必要なPCaPC柱の力学的特性を検証するために、対象高層フレームの下層階柱を対象に実験を計画した。本実験で確認するPC柱の力学的特性を、次に示す各項目(a~f)とした。表1に、計画した供試体の概要を示す。

- a) 一定軸力下におけるPCaPC柱の主軸方向曲げ耐力、
- b) 一定軸力下におけるPCaPC柱の45度方向曲げ耐力、
- c) 主軸方向曲げ耐力に対する45度方向の曲げ耐力比、
- d) 変動軸力に伴う「M-N Interaction curve」の検証、
- e) 降伏剛性低下率と履歴特性、および
- f) PC圧着接合部の挙動、等。

2.1 実験供試体の概要

実験供試体は、高層建物の純フレーム架構における下層階柱(階高さ: 4.5m, clear span: 3.4m)を対象に計画した。供試体数は、中柱を対象とする部材が2体および外柱を対象とする部材が1体の計3体とした。

供試体の寸法は、中柱を対象に一定軸力下における主軸方向の逆対称荷重加力用供試体(PC-1)と同45度方向加力用供試体(PC-2)を、実大の3/10のモデル(断面: 300mm×300mm, clear span: 1,020mm)とした。外柱を対象とする変動軸力下における主軸方向の逆対称荷重加力用供試体(PC-3)は、25/100モデル(断面: 250mm×250mm, clear span: 850mm)とした。

供試体の形状は、L型の載荷ビームを用いて逆対象荷重を載荷できるような柱の上下にスタブを設けた。

表1 試験供試体の概要

	断面(cm)	高さ(cm)	主筋	補強筋
PC-1	30×30	1020	23φ(A-1)	U7.1-@50
PC-2	30×30	1020	23φ(A-1)	U7.1-@50
PC-3	25×25	850	17φ(C-1)	U6.4-@50

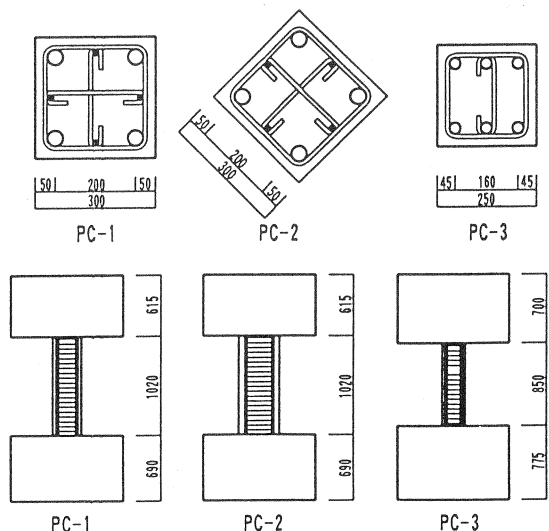


図1 供試体の断面および形状

供試体の製作は、柱とスタブを個別に製作し、上下のスタブと柱の間に接合用のモルタル目地(15mm)を設けて柱の主筋となるPC鋼棒を緊張して圧着接合した。各供試体に与えるプレストレス力は、PC鋼材の定着直後における緊張力が鋼材の規格降伏点強度の85%が確保できるよう調整した。図1に、各供試体の断面および形状を示す。

2.2 使用材料

供試体のコンクリート強度を、60N/mm²とした。主筋のPC鋼材は、供試体PC-1およびPC-2はPC鋼棒23φ(A種1号)、供試体PC-3はPC鋼棒17φ(C種1号)を用いた。横補強筋は、各供試体とも規格降伏荷重が1274N/mm²以上の高強度異形PC鋼線を用いた。柱とスタブの接合目地のモルタル強度は、60N/mm²以上の高強度モルタルとした。PC鋼材に付着を持たせるためのグラウトの圧縮強度は30N/mm²以上のセメントミルクを用いた。表2に、各供試体の実験時における主な使用材料の強度を示す。

2.3 荷重載荷方法

柱の軸力は2台のActuatorで載荷し、水平荷重はL型ビームを用いて柱の中間点が曲げ応力の変曲点になるよう水平せん断力を作用させた。一定軸力下で水平加力するPC-1とPC-2各供試体の載荷手順は、2台のActuatorで予め所定の軸力100ton(11N/mm²)を載荷した後、交番繰返し水平載荷を行った。変動軸力下で水平載荷するPC-3供試体については、各水平荷重段階毎に予め所定の軸力を載荷した後、交番載荷した。

水平載荷の制御は、柱に曲げひび割れが発生するまでの初期段階は荷重制御とし、曲げひび割れ荷重以降は変形制御にして部材角で1/400、1/200、1/100、1/50および1/25に達するまで交番に水平変形を与えた。また、変動軸力下の供試体PC-3については、供試体のM-N Interaction curveを作成して荷重制御により水平加力した。

2.4 実験供試体の予備解析

供試体の設計および予備解析には、文献^{[1][2]}と文献^[3]を参考に、初期剛性 K_E 、降伏時の剛性低下率 α_y 、曲げひび割れ耐力 M_c および曲げ降伏耐力 M_y の各式を、(1)~(4)式とした。ただし、変動軸力下で水平載荷するPC-3供試体の曲げ耐力の計算は、ACI方式とした。

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

$$\alpha_y = \{-0.0836 + 0.159a/D + 0.169(N + P_c)/(b \cdot D \cdot F_c)\} \cdot (d/D)^2 \quad (2)$$

$$M_c = \{(N + P_c)/A_c\} Z_c \quad (3)$$

$$M_y = A_{ps} \cdot f_{py} (1 - 0.5q)d + 0.5(D - q \cdot d)N \quad (4)$$

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_c :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(1.0)、n:コンクリートに対する鋼材に実弾性係数比、a:シアースパン、d:部材の有効成、D:部材成、 F_c :コンクリート強度、N:柱軸力、 P_c :有効プレストレス力、 A_{ps} :PC鋼材断面積、 f_{py} :PC鋼材の規格降伏点強度、およびq:PC鋼材係数($A_{ps} \cdot f_{py})/(b \cdot d \cdot F_c)$ を表す。

表3と図2に、予備解析の結果を示す。

3. 実験結果

図3に、各供試体における水平荷重と部材角の関係を示す。各供試体における軸力と曲げ応力の関係を、M-N Interaction curveを用いて図4に示す。実験による各供試体の力学的特性を、以下に示す。

3.1 最大耐力

各供試体における実験による最大曲げ耐力時の水平荷重は、次の通りであった。

3.1.1 PC-1供試体

最大耐力は、正荷重時は部材角0.8%で47.7ton、負荷重時には部材角0.5%で52.5tonに達して正負の平均水平耐力は50.1tonであった。また、計算による最大荷重が正負とも46.7tonで実験値が計算値を僅かに(1.07倍)上回った。

曲げひび割れ耐力については、正荷重時に水平力で24ton、負荷重時には同28.2tonに達して正負の平均水平ひび割れ耐力が26.1tonに達した。柱とスタブの圧着接合部におけるモルタルの引張強度を無視して計算した曲げひび割れ水平耐力は、正負とも17.6tonであったことから計算値を大きく(約1.5倍)上回り、接合部モルタルの曲げ引張強度が柱部材に匹敵する強度を有していた。

3.1.2 PC-2供試体

供試体の断面は、PC-1供試体と同一で水平荷重を柱断面の45度方向に加力した。最大水平耐力は、正荷重時の部材角0.71%で43.1tonおよび負荷重時の部材角0.53%で45.0tonを示し、正負の平均耐力が44.05tonであった。ストレスプロッ

表2 材料強度(N/mm²)

種別	番号	PC-1	PC-2	PC-3
グラウト	No.1	38.9	35.3	44.2
	No.2	38.2	34.9	40.2
	No.3	39.1	40.1	42.0
	平均値	38.7	36.8	42.1
目地 モルタル	No.1	56.0	53.3	68.1
	No.2	53.0	63.7	73.7
	No.3	48.0	71.7	56.8
	平均値	52.3	62.9	66.2
柱の コンクリート	No.1	53.0	55.7	47.5
	No.2	57.2	56.3	60.1
	No.3	54.2	55.9	57.3
	平均値	54.8	56.0	55.0

表3 予備解析の結果

	曲げひび割れ	曲げ降伏荷重	降伏剛性低下率
PC-1	18.6	46.7	0.173
PC-2	13.0	44.7	0.173

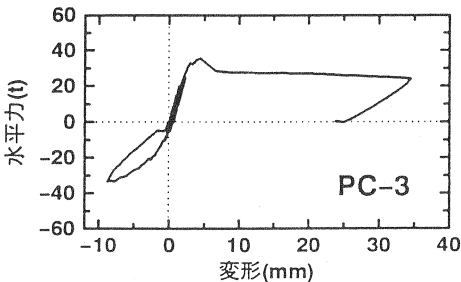
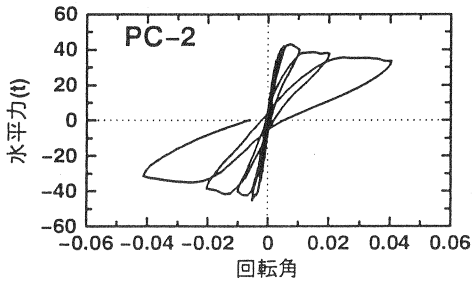
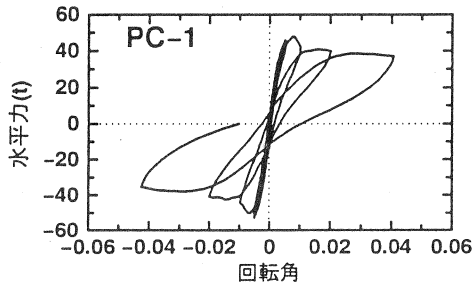


図3 水平荷重と部材角の関係

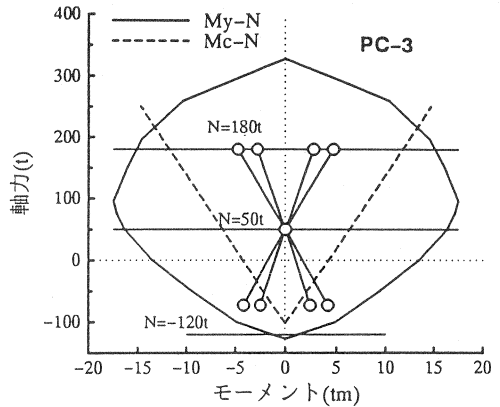


図2 予備解析の結果

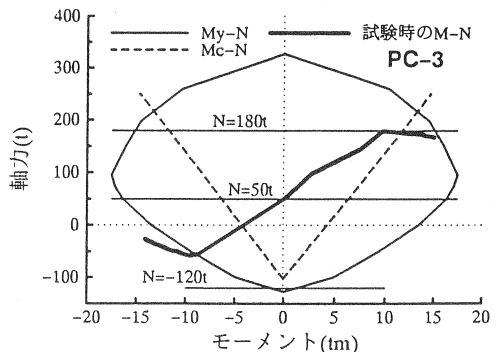
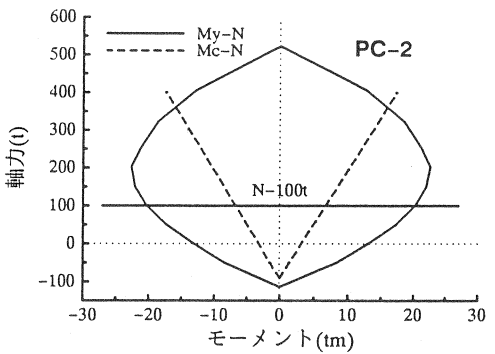
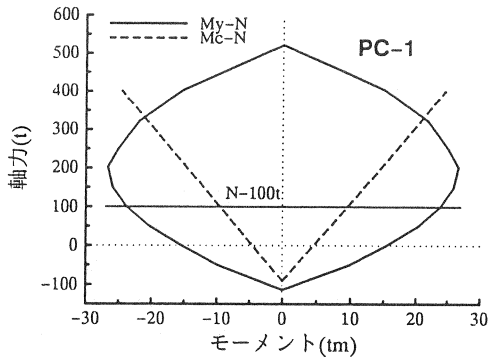


図4 供試体M-Nの相関関係

クを仮定した計算による曲げ耐力時の最大荷重が正負とも44.0tonで、計算値と概ね一致する。また、主軸方向の正負平均耐力に対する45度方向の正負平均耐力の比が0.88(44.05/50.1)を示し、仮定した主軸方向に対する45度方向の耐力比(85%)を僅かに上回った。曲げひび割れ耐力時の水平荷重は、正荷重時が23tonおよび負荷重時で22.6tonを示し、正負平均で22.8tonに達した。PC-1供試体と同様の仮定で計算した曲げひび割れ耐力時の水平荷重が、正負とも12.4tonであったことから計算値を大きく(約1.8倍)上回った。

3.1.3 PC-3供試体

参考文献^{[1][2]}で想定されている保有水平耐力時の正軸力下(180ton)の水平耐力は、部材角0.5%で35.4tonを示した。また、想定される負の最大軸力(-80ton)を与えて水平加力が続けたが、部材角0.2%で水平荷重が5tonを示した後、軸力が徐々に-25tonまで低下して部材角1%で最大水平荷重33.4tonを示した。一方、M-N Interaction curveによる正軸力180ton時の最大水平耐力は約35.3ton($M_u=15^{\text{tm}}$)、負軸力-25ton時の水平耐力が27.5ton($M_u=11.7^{\text{tm}}$)であった。

水平耐力の計算値に対する実験値の比は、最大正軸力時における水平耐力は概ね一致するが負軸力時の水平耐力は計算値の約1.2倍を示した。

3.2 PC柱の降伏剛性低下率

前項の予備解析に基づき計算した供試体の降伏剛性低下率 α_y は、一定軸力下で水平載荷したPC-1およびPC-2供試体では、0.173($a/D \leq 2.0$ 式)および0.39($a/D > 2.0$ 式)であった。一方、実験による両供試体の α_y は、正荷重時、それぞれ0.22および0.21を示し、負荷重時には0.40および0.33を示した。PC-1およびPC-2各供試体における降伏剛性低下率の計算値に対する実験値の比は、正荷重時で1.25倍、負荷重時には、それぞれ2倍および1.7倍を示した。

3.3 各供試体の破壊モード

PCaPC柱の水平加力実験における破壊モードは、各供試体とも曲げ降伏であった。また、最大荷重を僅かに超えて部材角で約0.8~1%の間で、変動軸力下のPC-3供試体の軸引張時の除き、上下スタブの接合部付近で柱主筋のカバーコンクリートが圧壊・剥離して耐力が低下した。柱主筋のカバーコンクリートの剥離後における水平耐力は、PC-1供試体で84%、45度方向載荷のPC-2供試体で90%に低下した。各供試体における耐力低下の比較では、45度方向に載荷したPC-2供試体が、主軸方向に載荷したPC-1供試体に較べ耐力低下が幾らか小さい。その他の挙動として、各供試体とも圧着接合部におけるスベリ現象は、見られなかった。

4. まとめ

PCaPC柱の力学的性状を検証するために、計画されたPCaPC高層建物の下層階柱を対象にして製作した3体の実験供試体を用い、一定軸力下における主軸方向および45度方向ならびに変動軸力下における主軸方向の逆対称交番繰返し載荷実験を行った。これらの実験結果からPCaPCの力学的特性について、次の事柄を纏めることができた。

- 1) PCaPC柱の主軸方向に対する45度方向の耐力比は0.88を示し、計画時に想定した0.85を上回った。
- 2) PCaPC柱の曲げ耐力は、ACI方式によるM-N Interaction curveで表現することができた。
- 3) 高強度コンクリートを用いたPCaPC柱は、曲げ降伏後に主筋の被りコンクリートが剥落して曲げ耐力が低下する。
- 4) PCaPC柱の曲げひび割れは、圧着接合部の近辺に集中する。

参考文献

- [1]向野聡彦, 北村晴彦, 渡辺一成, "PCaPC高層免震建物の設計(その1 構造計画と設計)", 1998年日本建築学会大会学術講演梗概集。
- [2]渡辺一成, 北村晴彦, 向野聡彦, "PCaPC高層免震建物の設計(その2 解析による検証)", 1998年日本建築学会大会学術講演梗概集。
- [3]林, 岡本, 小谷, 加藤, 博, "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, July, 1995.