

# 論文 PC 柱・梁接合部のせん断耐力に関する 2次元非線形有限要素法解析

柏崎隆志\*1・野口 博\*2

**要旨**：プレストレストコンクリート構造内柱・梁接合部を解析対象として、プレストレス材とグラウトの付着を考慮した2次元非線形有限要素法解析を行った。解析では、柱・梁接合部の接合方法として、一体打ち接合形式と圧着接合形式の2種類について検討を行った。解析から得られた履歴特性、破壊性状などの考察から、プレストレス力がせん断耐力、破壊性状に与える影響について検討を行った。

**キーワード**：プレストレストコンクリート、柱・梁接合部、せん断耐力、有限要素法

## 1. はじめに

プレストレストコンクリート(PC)構造は、部材内部に配筋されたプレストレス材を緊張することにより、コンクリートに予め圧縮力(プレストレス力)を与え、コンクリートが圧縮に比べて引張に弱いという弱点を補い、部材の常時荷重下における力学的性状を改善しようとする構造形式<sup>1)</sup>である。

また、従来PC構造形式は主に橋梁などの土木分野で活用され発展してきたが、最近では建築分野においてもPC構造形式が積極的に活用され、PC建物の合理的な耐震設計法の確立が望まれている。

本研究では、1996年度から3年間行われたPC共同研究の一環として、PC建物の内柱・梁接合部について2次元非線形有限要素法(FEM)

解析を行い、紅谷、柏崎、野口により行われた実験結果<sup>2)</sup>との比較検討、及び接合部のせん断挙動に関する考察を行った。更にプレストレス力を変数としたパラメータ解析を行い、プレストレス力がせん断耐力、破壊モードなどに与える影響について検討した。

尚、本FEM解析では、柱と梁のコンクリートを同時に打設して接合する一体打ち接合形式のほか、図-1に示すように、プレキャストの柱と梁にPC鋼棒を通し配筋し、プレストレス力を導入することにより接合する圧着接合形式の柱・梁接合部についても検討を行った。

## 2. 解析対象試験体

本解析では、紅谷らにより実験<sup>2)</sup>が行われた試験体の中から、実大の約1/3スケールの一体打ち、及び圧着接合形式の平面十字型柱・梁接合部試験体(PC-0, PC-1, PC-2, PC-U, PCa-1, PCa-2, PCa-U)を解析対象とした。表-1, 2に、それぞれ試験体諸元と材料特性を示す(その他実験詳細については、参考文献2)を参照)。表-1中の試験体名のPCは一体打ち接合形式を、PCaは圧着接合形式をそれぞれ表している。また、末尾の0, 1, 2はプレストレスレベル, Uはアンボンドを示す。プレ

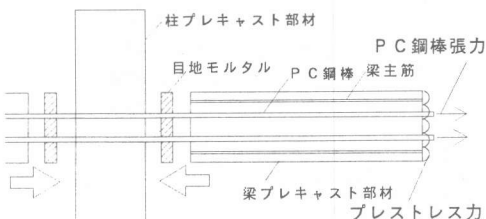


図-1 圧着接合形式

\*1 千葉大学助手 工学部デザイン工学科(建築系) 工修(正会員)

\*2 千葉大学教授 工学部デザイン工学科(建築系) 工博(正会員)

表-1 試験体諸元

試験体名	PC-0	PC-1	PC-2	PC-U	PC60	PC70	PC80	PCa-1	PCa-2	PCa-U	PCa60	PCa70	PCa80	
構造形式	一体打ち							圧着接合						
柱	コンクリート	設計基準強度 $F_c=360$ (kgf/cm <sup>2</sup> )							設計基準強度 $F_c=360$ (kgf/cm <sup>2</sup> )					
	主筋	12-D19 (SD490)							12-D19 (SD490)					
	フープ	4-D10 @40 (SD785) $p_w=1.19$ (%)							4-D10 @40 (SD785) $p_w=1.19$ (%)					
接合部	コンクリート	$F_c=360$ (kgf/cm <sup>2</sup> )							$F_c=360$ (kgf/cm <sup>2</sup> )					
	フープ	2-D10 × 1セット (SD785) $p_w=0.22$ (%)							2-D10 × 1セット (SD785) $p_w=0.22$ (%)					
	コンクリート	$F_c=360$ (kgf/cm <sup>2</sup> )							$F_c=500$ (kgf/cm <sup>2</sup> )					
梁	主筋	6-D19 (SD490)							6-D19 (SD490)					
	スターアップ <sup>†</sup>	2-D10 @50 (SD785) $p_w=1.43$ (%)							2-D10 @50 (SD785) $p_w=1.43$ (%)					
	PC鋼材	2-φ23 (C種1号 SBPR110/125)							2-φ23 (C種1号 SBPR110/125)					
	$P_e$ (tf)	0	21.6	43.2	21.6	54.8	64	73.2	21.6	43.2	21.6	54.8	64	73.2
	$P_e / (2 \cdot \sigma_y) \cdot 100$ (%)	0	23.6	47.3	23.6	60	70	80	23.6	47.3	23.6	60	70	80
	$P_e / (A_b F_c)$	0	0.1	0.2	0.1	0.25	0.3	0.34	0.1	0.2	0.1	0.25	0.3	0.34
	グラウト	あり	あり	あり	なし	あり	あり	あり	あり	あり	なし	あり	あり	あり

$P_e$ : 有効プレストレス力  $A_b$ : 梁断面積  $20 \times 30=600$  (cm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_y$ : PC鋼材の降伏強度

表-2 材料特性

コンクリート	圧縮強度	強度時ひずみ	1/3 $F_c$ 割断剛性	割断強度
設計強度 $F_c$	$\sigma_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_c$ ( $\mu$ )	( $10^5$ kgf/cm <sup>2</sup> )	(kgf/cm <sup>2</sup> )
360 PC-0,1	344	1820	2.80	30.1
PC-2	353	1860	2.81	30.1
PC-U	369	2030	2.73	30.1
鉄筋	降伏強度	降伏ひずみ	ヤング係数	引張強度
径(種別)	$\sigma_y$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_y$ ( $\mu$ )	( $10^6$ kgf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
D19 (SD490)	5170	2850	1.81	6920
D10 (SD785)	8970	4330	2.07	10700
PC鋼材	降伏強度	降伏ひずみ	ヤング係数	引張強度
径(種別)	$\sigma_y$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_y$ ( $\mu$ )	( $10^6$ kgf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
23φ (SBPR110/125)	11000	5500	2.00	12500

\* 製品規格値

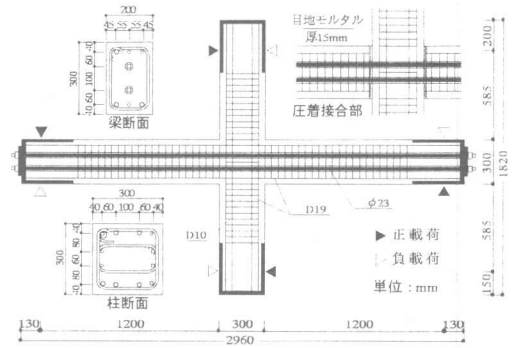


図-2 試験体配筋詳細

ストレスレベル 1, 2 は, それぞれ PC 鋼棒引張降伏応力度の 25%, 50% に対応し, 実験では実用プレストレスレベルの 85% までには達していない。そこで, 本解析ではプレストレス導入レベルを 60%, 70%, 80% まで上げて, パラメータ解析を行った。実験時の加力方法は, 一定柱軸力  $0.1F_c$  ( $F_c$ : コンクリート強度) 下で, 梁端に地震力を模擬した正負繰り返し載荷が行われた。図-2 に試験体の配筋詳細を示す。

### 3. 解析モデル

本解析には, プレストレス材とグラウトの付着を考慮できる 2 次元非線形 FEM プログラム

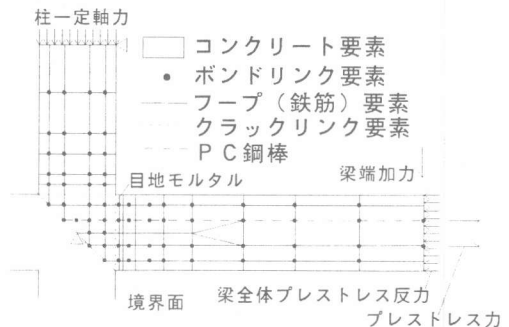


図-3 要素分割図

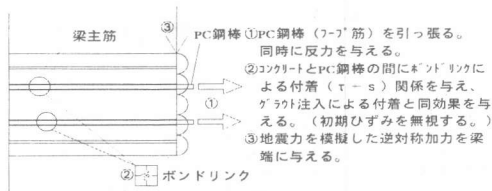


図-4 プレストレス導入モデルとグラウト付着

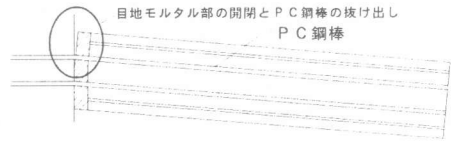


図-5 圧着接合形式の変形性状

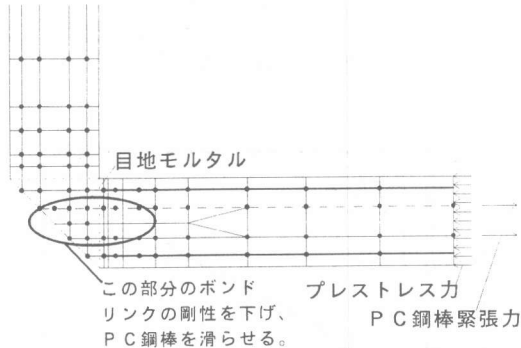


図-6 圧着接合形式のモデル化

<sup>3)</sup>を使用した。図-3に、解析で用いた圧着接合形式試験体の要素分割図を示す。図-3に示すように、点対称条件を用いて、実験試験体の半分を解析領域とした。また加力は、柱一定軸力下での梁端への単調荷重とした。その他柱頭、柱脚の境界条件は、実験時の支持条件に従った。

### 3.1 コンクリート

コンクリートには、要素内剛性を6節点及び8節点で評価する平面応力要素を用いた。二軸応力下の構成則には、Darwinらの等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデル<sup>4)</sup>を用い、破壊条件はKupferらの研究<sup>5)</sup>に基づいた。圧縮応力-ひずみ関係の上昇域にはSaenzモデル<sup>6)</sup>を用い、ひずみ軟化域にはKent-Parkモデル<sup>7)</sup>を用いて横補強筋の拘束効果を考慮した。ひび割れ発生後のコンクリートの圧縮強度低減係数には、ひび割れと直交する引張ひずみから求める飯塚、野口モデル<sup>8)</sup>を用いた。

### 3.2 鉄筋

柱、梁主筋とPC鋼棒は、2節点線材要素で、また柱、梁ともに横補強筋はRC積層要素を用いて表現した。応力-ひずみモデルとして、線材要素にはバイリニア型、横補強筋にはトリリニア型のモデルを用いた。

### 3.3 付着

コンクリートと線材要素間の付着は、離散型ボンドリンク要素を用いて表現した。前述した積層要素内の横補強筋については完全付着を仮定し、グラウト注入されていないアンボンド試験体については、PC鋼棒の材軸方向の付着を切ることにより表現した。

### 3.4 プレストレス導入とグラウト付着

プレストレス導入とグラウト付着のモデル<sup>3)</sup>について図-4に示す。第1段階として、PC鋼棒にプレストレス引張力、梁端断面にその反力として分布圧縮荷重を与える。次に、コンクリートとPC鋼棒の間に離散型ボンドリンク要素を用いて、 $\tau$  (付着応力) -  $s$  (すべり) 関係を与え、グラウト注入による付着発生と同様の効果を与える(PC鋼棒の引張応力-引張ひずみ関係においては、プレストレス導入による初期ひずみを考慮するが、 $\tau$ - $s$ 関係では初期すべりを無視する)。

### 3.5 圧着接合

プレストレス導入により圧着接合された柱・

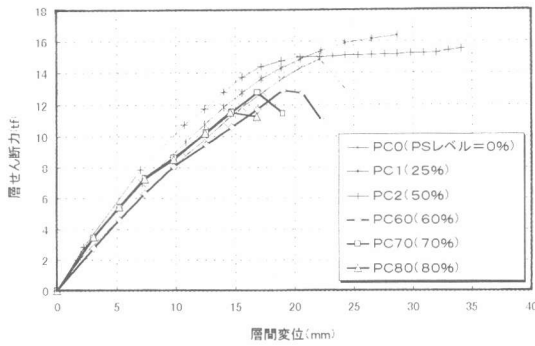


図-7 層せん断力-層間変位関係

梁接合部には、プレキャスト柱とプレキャスト梁の間に目地モルタルを設けるのが一般的である。また、梁端にせん断力がかかると、図-5のように、梁と柱の境界面でのひび割れ開閉、せん断ずれ並びに PC 鋼棒の抜け出しにより変形が起こるといった特徴がある。

そこで本解析では、実験と同様に柱と梁の境界面に、厚さ 15 mm の目地モルタルをコンクリート要素 ( $F_c = 800 \text{ kgf/cm}^2$ ) として入れ、図-5に示すような圧着接合特有の変形状態を、図-6のように梁危険断面付近の梁主筋、PC 鋼棒の離散型ボンドリンク剛性を小さくし、梁主筋、PC 鋼棒を滑らすことで、間接的に表現するようなモデル化を行った。

#### 4. 解析結果

##### 4.1 一体打ち接合形式

図-7に、FEM 解析から得られた一体打ち接合形式の層せん断力-層間変位関係を示す。初期剛性は、PC-2 が最も大きく PC70、PC80 に比べ PC60 はやや小さい値となった。

図-8に最大耐力付近の PC70 と PC80 の破壊状況を示す。PC70 は PC80 に比べ、接合部パネル内及び梁危険断面付近から中央部にかけて、より幅の広いひび割れが見られ、プレストレス力がひび割れ幅を抑制していることがわかる。またコンクリート圧壊については、PC70 は接合部パネル内と梁かぶり部分に発生してい

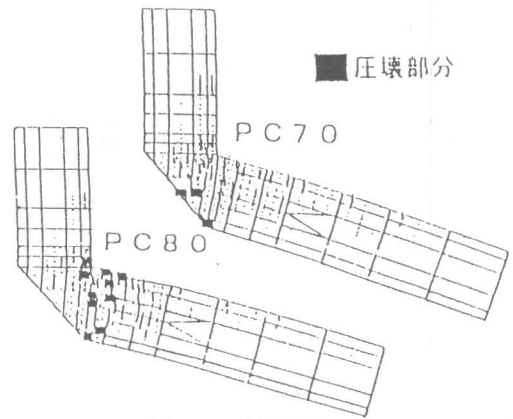


図-8 破壊状況

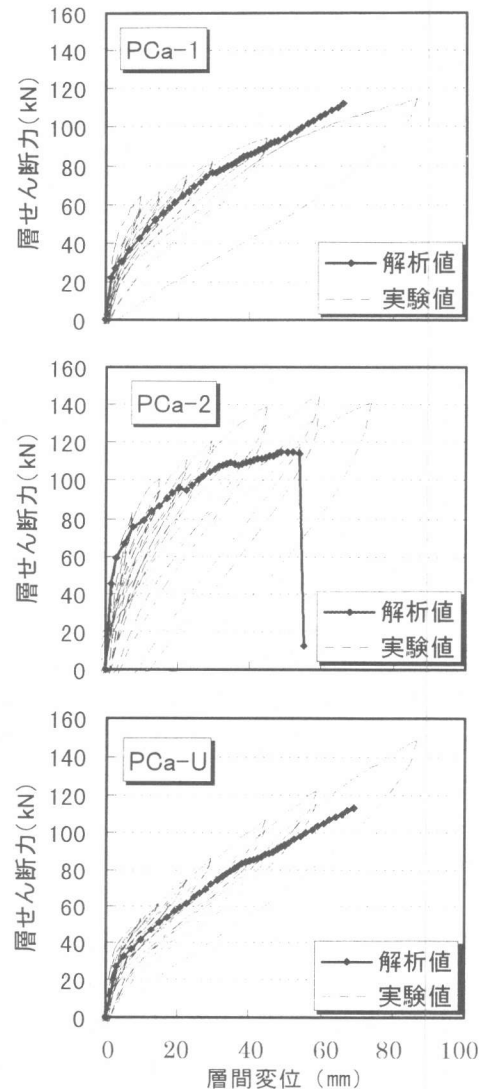


図-9 層せん断力-層間変位関係

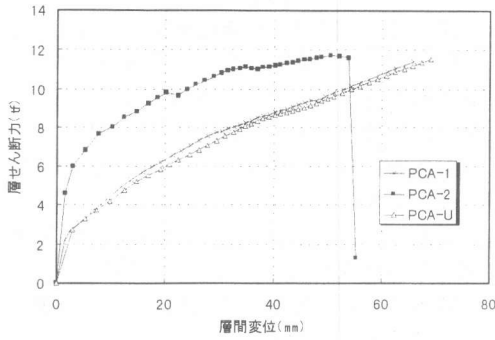


図-10 プレストレス力と付着の影響

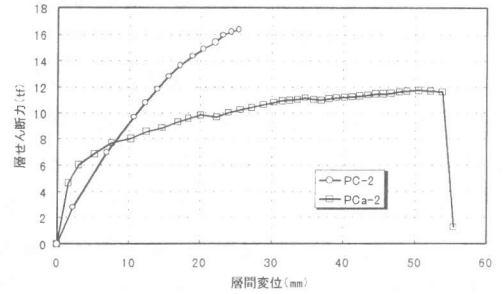


図-11 一体打ち接合形式と圧着接合形式の比較

るのに対し、PC80は梁危険断面付近に集中し、接合部内にはコンクリート圧壊が生じていない。プレストレス導入レベルが70%以下の試験体は全て接合部せん断破壊型であったことを考えると、高プレストレスになるに従って、柱・梁接合部の破壊モードが接合部せん断破壊型から、梁曲げ破壊型へと移行していくことが確認できた。

#### 4.2 圧着接合形式

図-9に、圧着接合試験体の層せん断力-層間変位関係について、実験とFEM解析の比較を示す。初期剛性については、いずれの試験体についても実験結果と解析結果は良い対応を示したが、最大耐力に関しては、PCa-1以外の試験体において、解析値が実験値を下回っている。また、最大耐力時の層間変位についても、全試験体とも実験値と比較して、小さめの値となった。

また、図-10に示すように、解析結果をプレストレスレベルで比較すると、PCa-2の方がPCa-1よりも初期剛性がかなり高いことが分かる。この原因としては、プレストレス力の影響だけでなく、PCa-2の入力データで与えたポンドリンク定数が、実際の付着特性を過大評価していたためであるとも考えられる。PC鋼棒の付着の有無について検討してみると、付着のあるPCa-1と付着のないPCa-Uの変形性状

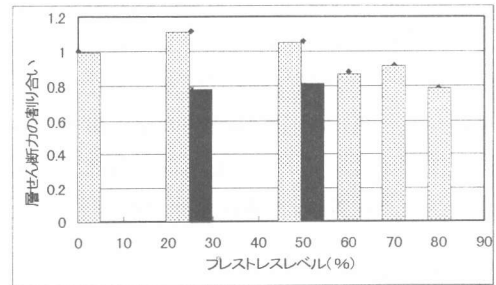


図-12 プレストレス力と最大層せん断力

が極めて近いものとなった。また、最大層せん断力については、いずれの試験体も12tonf程度となった。すなわち、実験で用いられたような丸鋼PC鋼棒では、加力早期に付着すべりが生じて、グラウト注入による付着が与える影響はあまり現れない結果となった。

#### 4.3 一体打ち接合形式と圧着接合形式との比較

図-11に、PC-2とPCa-2の層せん断力-層間変位関係を示す。同プレストレスレベルの一体打ち接合形式と圧着接合形式試験体を比較すると、初期剛性は圧着接合試験体の方が高くなったが、その後急激に剛性が小さくなり、一体打ち接合形式試験体の方が小さい変形で最大耐力に達した。

#### 4. 4 プレストレス力が最大層せん断力に与える影響

図-12に、プレストレス力とFEM解析から得られた各試験体の最大層せん断力との関係を示す。ここで、縦軸の層せん断力の割合とは、プレストレス力のないPC-0試験体の解析から得られた最大耐力に対する、各試験体の最大耐力の割合を表す。また、図中の網掛け棒グラフは一体打ち接合形式を、黒塗り棒グラフは圧着接合形式をそれぞれ表す。この図から、一体打ち接合形式では、プレストレスレベルが25%のPC-1の最大耐力が最も高く、それよりもプレストレスレベルが増大すると、最大耐力が減少していく傾向があった。しかしながら、プレストレスレベルが60%のPC60よりもプレストレスレベルが70%のPC70の方が最大耐力が若干高いなど、プレストレスレベルが最大層せん断力に与える影響は、明確にはみられなかった。

#### 5. まとめ

一体打ち接合形式に関する解析では、PC鋼棒降伏応力度の80%程度のプレストレス力がかかると、破壊形式が接合部せん断破壊型から梁曲げ破壊型へ移行することが認められた。また、プレストレス力が最大層せん断力に与える影響は、明確にはみられなかった。

圧着接合形式に関しては、プレストレス力の導入が、初期剛性を高める働きをしても最大耐力にはあまり影響を与えず、また付着の有無は、初期剛性、最大耐力に大きな影響を与えないという結果となった。これは、実験で用いられたような丸鋼PC鋼棒では、加力早期に付着すべりが生じて、グラウト注入による付着が与える影響があまり現れない結果となった。

本解析では、柱・梁接合部の圧着接合部を離散型ボンドリンク要素を用いた間接的なモデルで表現した。今後は、既往の実験的研究なども参考にしながら、圧着接合部のひび割れ開閉やせん断ずれをより正確に再現するようなモデルの検討が必要である。

#### 【謝辞】

本研究は、(社)建築研究振興協会に設けられた共同研究「PC構造設計・施工指針作成」の研究調整委員会(委員長:岡本伸(社)日本建設業経営協会中央技術研究所所長)における構造性能評価WG(主査:渡辺史夫 京都大学教授)で行われました。ご協力頂いた関係者各位に謝意を表します。更に、本研究の一部は、文部省科学研究費補助金による奨励研究(A)(課題番号:09750645, 研究代表者:柏崎隆志 千葉大学助手)によった。

#### 【参考文献】

- 1) 川村政美: コンクリート系構造の設計, 新建築学大系 41, 彰国社, 1983年11月
- 2) 紅谷信行, 柏崎隆志, 野口博: プレストレストコンクリート柱・梁接合部のせん断性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, 第19巻, 第2号, pp.1179~1184, 1997年6月
- 3) 柏崎隆志, 野口博: PC構造内柱・梁接合部の2次元非線形有限要素法解析, コンクリート工学年次論文報告集, 第20巻, 第3号, pp.757~762, 1998年7月
- 4) Darwin, D. and Pecold, D. A.: Nonlinear Biaxial Stress - Strain Law for Concrete. Journal of the Engineering Mechanics Division. ASCE, Vol. 13, No. EM2, pp.229~241. April 1977
- 5) Kupfer, H. B. and Gerstle, K. H.: Behavior of Concrete under Biaxial Stresses. Journal of the Engineering Mechanics Division. ASCE, Vol.99, No. EM4, pp.853~866. August 1973
- 6) Saenz, L. P.: Discussion of "Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete" by Desayi and Krishnan. Proceedings of ACI. Vol. 61, No. 9, pp.1229~1235. 1964
- 7) Kent, D. C. and Park, R.: Flexural Members with Confined Concrete. Journal of the Structural Division. Proceeding of the ASCE. ST7, pp.1969~1990. July 1971
- 8) 飯塚崇文, 野口博: 普通強度から高強度までの材料を用いた鉄筋コンクリート部材の非線形有限要素解析, コンクリート工学年次論文報告集, 第14巻, 第2号, pp.9~14, 1992年6月