

論文 PC 構造内柱・梁接合部の 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、プレストレスト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。解析結果は、実験と比較して、履歴特性、破壊モードについて良好な対応を示した。更に、解析から得られた接合部内圧縮主応力分布を用いて、プレストレス力、プレストレスト材とグラウトの付着性状が、接合部せん断耐力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、有限要素法、グラウト付着

1. はじめに

プレストレストコンクリート(PC)構造は、PC鋼材を緊張することによりコンクリートにあらかじめ圧縮力を与え、コンクリートが圧縮に比べて引張に弱いという点を補い、部材の常時荷重下における性状を改善しようとする構造形式¹⁾である。

近年建築分野においても、このPC構造形式の利用が盛んに行われつつあるが、PC構造内柱・梁接合部の耐震設計において、明確な設計規定は設けられていないのが現状である。従って従来の柱・梁接合部のせん断設計は、経験や工学的判断によるものが多い。

そこで、PC構造物の合理的な耐震設計法を開発するための基礎データを得ることを目的として、PC内柱・梁接合部の 2 次元非線形有限要素法(FEM)解析を行い、プレストレスの効果と緊張材の付着特性が接合部のせん断挙動に与える影響について検討を行った。

尚、本研究では、プレストレス力を表現するために、梁端部に等分布圧縮荷重を与えた FEM 解析例²⁾より実状に近い解析モデルとして、PC鋼棒に引張力、梁端部にその圧縮反力を与え、その後グラウト注入により発生するPC鋼棒とグラウトの付着を考慮することにした。

2. 解析方法

2. 1 解析対象試験体

文献 3 の実験的研究の中から、接合部せん断破壊が顕著な PC-0, 1, 2, U 試験体³⁾を解析対象とした。解析対象試験体は、RC柱とPC梁の一体打ちシリーズ 4 体で、形状は実大の約 1/3 スケールの平面十字型内柱・梁接合部である。試験体の階高、梁スパンは 4 体共通で、それぞれ 147 cm, 270 cm である。更に、柱、梁断面は、それぞれ 30 cm×30 cm, 20 cm×30 cm である。

接合部のせん断補強には、D10 鉄筋を用い、横補強筋比 $p_w=0.22\%$ の補強がなされている。実験は、プレストレス導入レベル、PC鋼棒の付着(ボンド、アンボンド)を主なパラメータとして行われた。加力は、柱に定軸応力 $0.1F_c$ (F_c :コンクリート強度, kgf/cm^2)を与えた後、梁端に地震力を模擬した正負繰り返し載荷が行われた。**表-1**に試験体諸元、**表-2**に材料特性をそれぞれ示す。更に、**図-1**に試験体配筋図を示す。

PC-0, 1, 2, U の実験での破壊モードは、最大耐力まで PC鋼棒の降伏がみられなかったため、接合部せん断破壊先行型と判断された。

*1 千葉大学助手 工学部建築学科 工修(正会員)

*2 千葉大学教授 工学部建築学科 工博(正会員)

表-1 試験体諸元

試験体名	PC-0	PC-1	PC-2	PC-U	
構造形式	一体打ち				
柱	コンクリート	設計基準強度 $F_c=360$ (kgf/cm ²)			
	主筋	12-D19 (SD490)			
	フープ	4-D10@40(SD785) $p_w=1.19$ (%)			
接合部	コンクリート	$F_c=360$ (kgf/cm ²)			
	フープ	2-D10×1セット(SD785) $p_w=0.22$ (%)			
梁	コンクリート	$F_c=360$ (kgf/cm ²)			
	主筋	6-D19 (SD490)			
	スラッパ	2-D10@50(SD785) $p_w=1.43$ (%)			
	PC鋼材	2-φ23 (C種1号 SBPR110/125)			
	P_o (tf)	0	21.6	43.2	21.6
	$P_o/(A_o F_c)$	0	0.1	0.2	0.1
グラウト	あり	あり	あり	なし	

P_o : 有効プレストレス A_o : 梁断面積 $20 \times 30 = 600$ (cm²)

表-2 材料特性

コンクリート	圧縮強度 σ_c (kgf/cm ²)	強度時ひずみ $\epsilon_c(\mu)$	1/3 F_c 割線剛性 $(\times 10^6 \text{kgf/cm}^2)$	割裂強度 σ_t (kgf/cm ²)
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 σ_y (kgf/cm ²)	降伏ひずみ $\epsilon_y(\mu)$	ヤング係数 $(\times 10^6 \text{kgf/cm}^2)$	引張強度 σ_t (kgf/cm ²)
径(種別)				
D19 (SD490)	5170	2850	1.81	6920
D10 (SD785)	8970	4330	2.07	10700
PC鋼棒	降伏強度 σ_y (kgf/cm ²)	降伏ひずみ $\epsilon_y(\mu)$	ヤング係数 $(\times 10^6 \text{kgf/cm}^2)$	引張強度 σ_t (kgf/cm ²)
径(種別)				
23φ				
(SBPR110/125)	11000	5500	2.00	12500

* 製品規格値

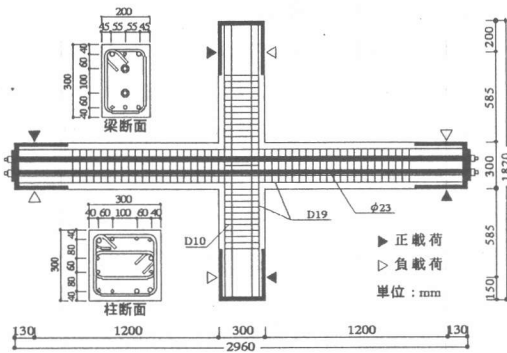


図-1 試験体配筋図

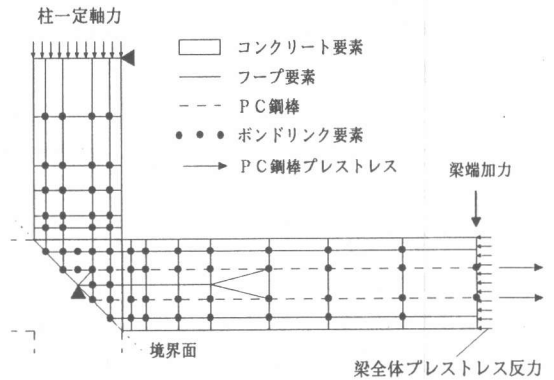


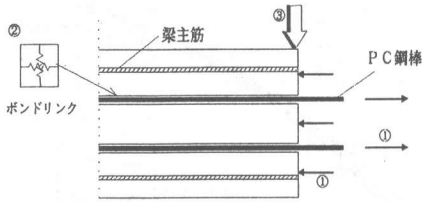
図-2 要素分割図

2.2 解析モデル

本FEM解析には、文献4の2次元非線形FEM解析プログラムをもとに、グラウト付着モデルを組み込んだプログラムを使用した。図-2に解析対象試験体の要素分割図を示す。図-2に示すように、点対称条件を用いて、実験試験体の1/2について要素分割を行った。また、加力は、柱一定軸力下での梁端への単調載荷とし、柱頭、柱脚の境界条件は、実験時の支持条件を与えた。

プレストレス導入とグラウト付着: 実験時のプレストレス導入を実状に近く表現するため、第一段階としてPC鋼棒に引張力、梁端部にそ

の反力として圧縮力を与える。プレストレス導入により、この段階では、PC鋼棒には初期引張ひずみ、梁主筋と梁コンクリートには初期圧縮ひずみが生じる。次にグラウト注入により生じるグラウトとPC鋼棒の間の付着は、離散型ボンドリンク要素を用いて表現した。このボンドリンク要素に、実験から求めた τ (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た(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、 τ - s 関係では初期すべりを無視する)(図-3参照)。



- ① PC鋼棒(フープ要素)を引っ張る。同時に反力を与える。
- ② コンクリートとPC鋼棒の間にボンドリンクによる付着($\tau-s$)関係を与え、グラウト注入による付着と同効果を与える。(初期ひずみを無視する。)
- ③ 地震力を模擬した逆対称加力を与える。

図-3 プレストレスモデル

コンクリート：要素剛性の評価を内部積分点で行う6節点及び8節点平面応力要素とした。2軸応力下の構成則には、Darwinらの等価1軸ひずみに基づく直交異方性モデル⁵⁾を用い、破壊条件はKupferらの研究⁶⁾に基づいた。圧縮応力-圧縮ひずみ関係の上昇域にはSaenzモデル⁷⁾を用い、ひずみ軟化域にはKent-Parkモデル⁸⁾を用いて横補強筋の拘束効果を考慮した。ひび割れコンクリートの圧縮低減係数には、飯塚、野口モデル⁹⁾を用いた。

鉄筋：柱の主筋、中段筋と梁の主筋、PC鋼

棒には2節点線材要素、横補強筋はRC積層要素で表現した。応力-ひずみ関係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。

付着：線材要素とコンクリート要素間の付着は、離散型ボンドリンク要素で表現した。鉄筋を積層要素で表現したものは完全付着を仮定した。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によりモデル化を行った。

ひび割れ：コンクリート要素内のひび割れには、分布型ひび割れモデルを使用した。

コンクリート、鉄筋、PC鋼棒の応力-ひずみ関係は、実験時の材料試験結果を用いた。また、ボンドリンクの材料定数は、鉄筋、PC鋼棒に貼付したひずみゲージの実験値から算出した。具体的には、鉄筋、PC鋼棒のひずみデータから応力度を求め、ひずみゲージ間の応力度差から平均付着応力度を求めた。更に、その区間のひずみ分布の積分値を相対すべり量と仮定した。

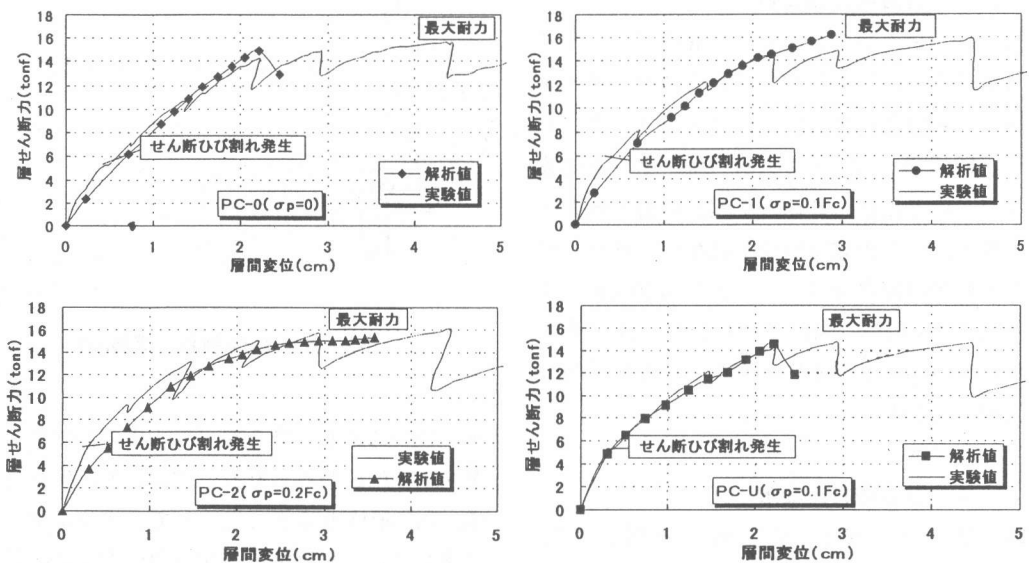


図-4 層せん断力-層間変位関係

3. 解析結果

3. 1 層せん断力-層間変位関係

各試験体の層せん断力-層間変位関係の実験と解析の比較を図-4に示す。初期剛性は、アンボンド試験体のPC-Uを除き、PC-0, 1, 2とも、解析の方が実験よりもやや低い値となった。また、最大耐力に関しては、全試験体とも実験値と比較すると良好な対応を示しているが、耐力時の層間変位は、全体的に解析の方が実験よりも小さな層間変位で最大耐力に達している。

3. 2 プレストレスレベルによる比較

各試験体の解析から得られた層せん断力-層間変位関係を図-5に示す。プレストレスレベルの高いPC-1, 2の解析結果は、プレストレスなしのPC-0よりも初期剛性がやや高い結果となった。また、最大耐力に関しては、全試験体とも層せん断力=14~15 tonf程度となった。すなわち、実験と同様、プレストレスレベルによる大きな差はみられず、プレストレス力の増大に伴う最大層せん断力の上昇は、あまりみられなかった。

3. 3 付着による比較

同一プレストレスレベルで付着をパラメータとしたPC-1とPC-Uの解析結果(図-5参照)から付着についての検討を行う。アンボンド試験体PC-Uの最大耐力は、ボンド試験体PC-1と比較して約1 t程度の耐力低下がみられたが、その差は明確ではない。また、最大耐力時の層間変位は、PC-1が1/50 rad.(層間変位=2.9 cm), PC-Uが1/66 rad.(層間変位=2.2 cm)となりアンボンドの方が早期に最大耐力に達した。

3. 4 ひび割れ, 変形

図-6に、ひび割れ, 変形状況の一例として、PC-1とPC-Uの最大耐力付近のひび割れ, 変形図を示す。両試験体とも梁かぶりコンクリ

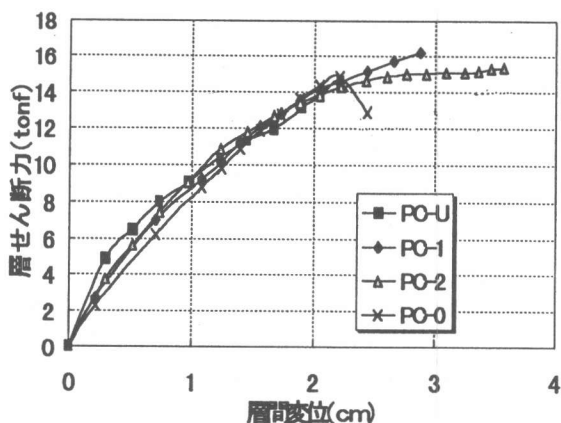


図-5 層せん断力-層間変位関係

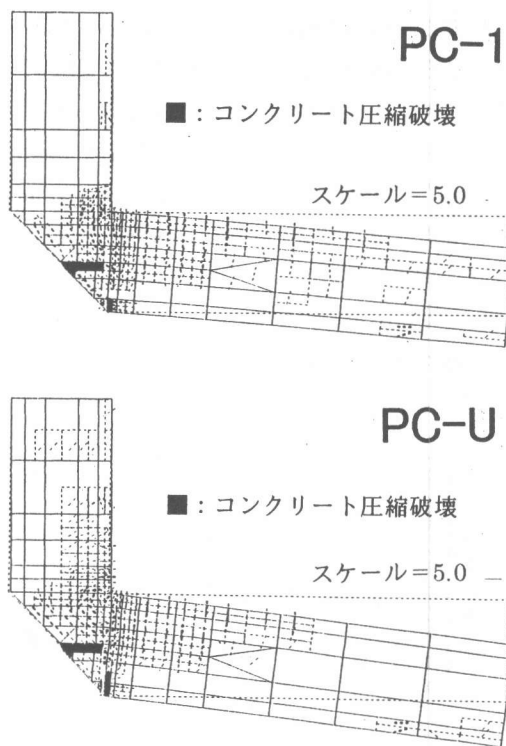


図-6 ひび割れ, 変形図

ートの一部圧壊, 接合部パネル中央部でのコンクリート圧壊がみられる。すなわち、実験と同様、PC鋼棒の降伏に先行して、接合部せん断破壊が生じ、本解析モデルを用いたFEM解析結果は、破壊モードについても実験と比較して、

良好な結果が得られた。

3. 5 接合部の圧縮主応力図

図-7に、本FEM解析から得られたPC-0, 1, 2, U試験体の最大耐力付近の圧縮主応力分布状況を示す。プレストレスなしのPC-0に対して、プレストレスレベルの高いPC-1, 2では、梁から入力されるプレストレス力により梁曲げ圧縮領域が増大し、接合部圧縮ストラットが幅広く形成されていることがわかる。一方、アンボンド試験体PC-Uでは、PC鋼棒の付着がないため、接合部パネル内には幅の狭い圧縮ストラットが形成されていることがわかる。

また、柱軸応力(0.1Fc)と同程度のプレストレス応力を受けるPC-1は、接合部内圧縮主応力角度が、梁材軸に対してほぼ45度となっている。PC-2のように、更に梁プレストレス力が増大すると接合部右上部分の圧縮主応

力角度が増大する傾向がみられた。すなわち、圧縮主応力の角度が増大するとせん断力に対する抵抗が小さくなるので、このことがプレストレス力増大に伴う接合部のせん断耐力上昇が明確でない一因であると考えられる。

4. まとめ

1. プレストレスを導入することにより、初期剛性は増大するが、その後のせん断耐力には、プレストレスレベルによる大きな差はあまりみられない。また、同一プレストレスレベルのボンド試験体PC-1とアンボンド試験体PC-Uの解析結果の比較から、PC鋼棒の付着が接合部せん断耐力に与える影響はそれ程明確ではない。

2. プレストレスなしやアンボンド試験体では、梁からの圧縮入力領域が狭く、またPC鋼棒の付着がないため、接合部パネル内には幅の狭い圧縮ストラットが形成されているのに対し、

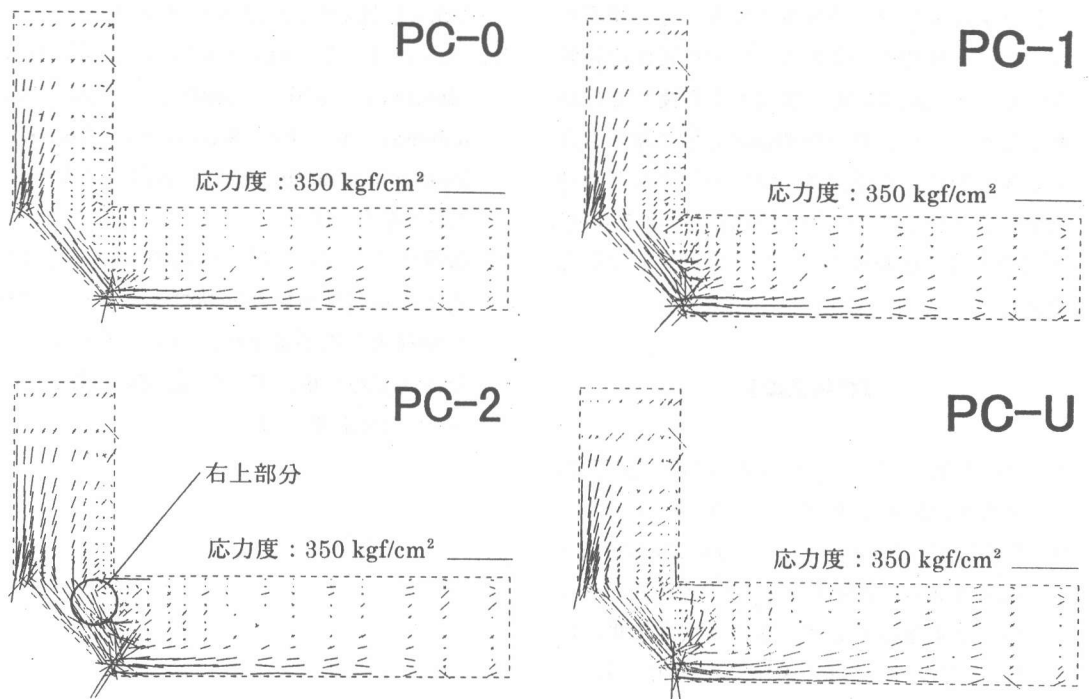


図-7 主応力図

高プレストレスを受ける試験体は、梁曲げ圧縮領域が増大し、圧縮ストラットが幅広く形成されていることがわかる。また、高プレストレスの場合、接合部右上部分の圧縮主応力角度（梁材軸を基準）が増大する傾向がみられた。すなわち、圧縮主応力角度が増大するとせん断力に対する抵抗が小さくなるので、このことがプレストレス力の増大に伴う接合部のせん断耐力上昇が明確でない一因であると考えられる。

3. 本 FEM 解析では、実験時の PC 鋼棒のグラウト付着を表現できるようなグラウト解析モデルを導入し、実験結果と比較することにより、解析モデルの検証を行った。今後は、更に数値パラメータ解析を行い、PC 内柱・梁接合部のせん断耐力を定量的に把握する必要がある。

【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 建築センター技術研究所所長）のもとで構造性能評価 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）の研究である。

【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) 柏崎隆志，野口 博ほか：PC 構造内柱・梁接合部のせん断性状に関する研究（その 3），日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2，構造IV，pp.845～846，1997 年 9 月
- 3) 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

- 4) 柏崎隆志，野口 博：RC 内柱・梁接合部のせん断耐力に与える横補強筋の効果に関する有限要素法解析，コンクリート工学年次論文報告集，第 19 巻，第 2 号，pp.999～1004，1997 年 6 月
- 5) Darwin, D. and Pecnold, 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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