

柱・はり接合部 PC 化工法 (PG コネクション工法) を用いた RC 高層建物の開発 (その 1)

—1/2 スケール柱・はり接合部実験—

武田 寿一 吉岡 研三 関根 正孝

Study on Reinforced Concrete High-rise Building Using Prefabricated Beam-Column Joints (Part 1)

—Experimental Study on Half-scale Beam-Column Joint Subassemblages—

Toshikazu Takeda Kenzoh Yoshioka Masataka Sekine

Abstract

Two half-scale cruciform beam-column joint subassemblages cast with normal-strength concrete were made by the PG Connection Method and were tested for beam or column yielding. In addition, three beam-column joint specimens were made by the conventional monolithic construction method and the influence of the difference in anchorage methods of beam bars was investigated. The PG Connection Method has the feature that beam and beam-column joints are precast simultaneously. These precast members have several holes in the joints through which longitudinal bars of columns can pass, and these holes are grouted with high-strength mortar. Test specimens by the PG Connection Method using normal-strength concrete showed good load-deformation characteristics under load reversals of ductility factor 4. An anchorage capacity corresponding to yield strength of column bar was attained by the PG Connection Method. Beam bars anchored by steel plates within the joints showed adequate anchorage capacity.

概 要

普通強度のコンクリートを用い、PGコネクション工法によって製作したはり降伏形および柱降伏形の1/2スケールの十字形柱・はり接合部試験体2体の正負繰返し加力実験を行ない、当工法によるRC骨組の耐震性能を検討した。また、在来工法によるはり降伏形試験体3体の実験を行ない、はり主筋定着法の差の復元力特性に及ぼす影響を検討した。PGコネクション工法とは、はりおよび柱・はり接合部を同時にプレキャスト(PC)化するもので、PC柱・はり接合部内に柱主筋用の貫通孔を設けておき、現場打設された柱の柱頭上にこのPC部材を設置した後に、グラウトにより一体化する工法である。実験の結果、PGコネクション工法によるはり降伏形試験体は、普通強度のコンクリートの場合にも在来工法による試験体と同等以上の性能を示し、 $4\delta_y$ の変形においても耐力低下のない荷重～変位関係を示した。当工法による柱降伏形柱・はり接合部試験体は、 $6\delta_y$ の大変形時にもエネルギー吸収能力に富む復元力を示し、この時の柱・はり接合部内の柱主筋定着部の平均付着応力度は約 $38\text{kg}/\text{cm}^2$ で、定着部の劣化は見られなかった。はり主筋をナットにより鋼板へ定着した試験体は、 $6\delta_y$ の大変形時にも耐力低下は少なく、通常の通し配筋の試験体よりも優れた荷重～変位関係を示した。

1. 序

前報で、PGコネクション工法に関する実大施工実験および施工実験で製作したはり降伏形実大柱・はり接合部試験体の加力実験について報告した¹⁾。そこでは、高強度のコンクリートを使用した場合の当工法によるRC

骨組の耐震性能を確認した。今回は、普通強度のコンクリートを使用した場合のはり降伏形ならびに柱降伏形の実物の1/2スケール十字形柱・はり接合部試験体の弾塑性挙動などについて実験的検討を行なった。さらに在来工法によるはり降伏形の試験体の実験を行ない、はり主筋定着法の差の復元力特性に及ぼす影響を検討した。

鉄筋、鋼板

種別	σ_y	Es	σ_u	EL
D10	4040	1.88	5500	21.5
D13	3870	1.84	5380	18.7
D16	3960	2.08	5840	19.9
D19	4050	1.94	5840	20.5
E-9	3420	2.10	4810	27.2

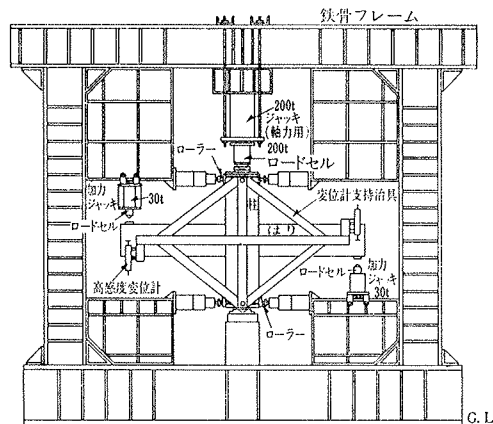
σ_y :降伏強度(kg/cm²), Es:ヤング係数($\times 10^6$ kg/cm²)
 σ_u :引張強度(kg/cm²), EL:伸び率(%)

コンクリート

試験体	Fc	Ec	Ft	
JN1	325	2.16	28.2	
JN2	309	2.14	31.3	
JN3	305	2.10	30.2	
JN4	上部柱	496	3.12	31.1
	はり・接合部、下部柱	248	2.18	25.9
JN5	上部柱	520	3.22	34.7
	はり・接合部、下部柱	293	2.06	27.1

グラウトFc:643kg/cm² (JN4, 材令49日)
 グラウトFc:724kg/cm² (JN5, 材令72日)
 Fc:圧縮強度(kg/cm²), Ec:ヤング係数
 Ft:引張強度(kg/cm²) ($\times 10^5$ kg/cm²)

表一 材料試験結果



図一 加力および測定装置

筋とし、共にPGコンクリート工法によって作製したもので、JN4 ははり降伏形、JN5 は柱降伏形である。同工法の特徴は、はりと接合部を同時にプレキャスト(PC)化した点にあり、現場打ち柱主筋がPC接合部内を貫通している(詳細は文献1参照)。

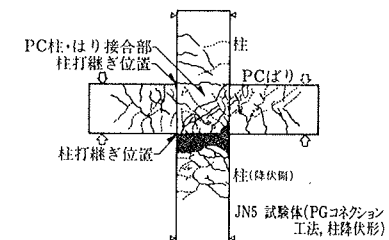
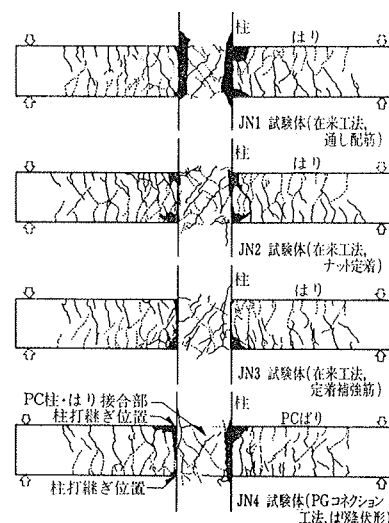
2.2. 使用材料の性質

鉄筋およびコンクリートの材料試験結果を表一に示す。はり主筋にはD13, D16, D19を、柱の主筋にはD16, D19を使用した。柱、はりのせん断補強筋にはD10, D13を使用した。いずれもSD35相当材である。

JN4, JN5の上部柱は早強コンクリートを用い、それ以外は普通コンクリートを使用した。JN1~JN3ははり、柱が水平の状態ですべて打設した。JN4, JN5はPGコンクリート工法の試験体のため、実際の施工時と同様に、あらかじめはりと接合部を一体としたPC部材を製作しておき、下部柱を鉛直打設し、コンクリートが所要強度に到達した後、その上に同PC部材を設置した。これらを受縮グラウト材で一体化した後、上部柱を鉛直打設した。

2.3. 実験装置

図一に、加力および測定装置を示す。試験体を、鉄骨フレーム内に柱が鉛直の状態ですべてセットした。上下柱端部をローラー支持し、柱に一定軸力を加えた状態で、はり端に正負交番繰返し荷重を加えた。柱軸方向応力度は48 kg/cm²(コンクリート設計基準強度の1/5)に制限した。但し、柱降伏形のJN5は、柱軸力による柱部材の耐力上昇を避けるため、軸力をゼロとした。載荷は、はり端の変形制御で行ない、柱面位置のはり主筋(JN5ははり面位置の柱主筋)降伏時変位 δ_y により制御した。1, 2, 3, 4, 5, 6 δ_y でそれぞれ2サイクルずつ正負交番繰返し載荷を行ない、13サイクル時に最終破壊まで変形を増大させた。変位測定用の治具を、柱上下端部でピンとロー



図一 最終破壊状況

ラー支持で取り付け、はり端部の全体変位を測定した。また接合部の斜め方向の変位を測定してせん断変形を求めた。柱・はり主筋およびせん断補強筋のひずみ、接合部内補強プレートのひずみを測定した。

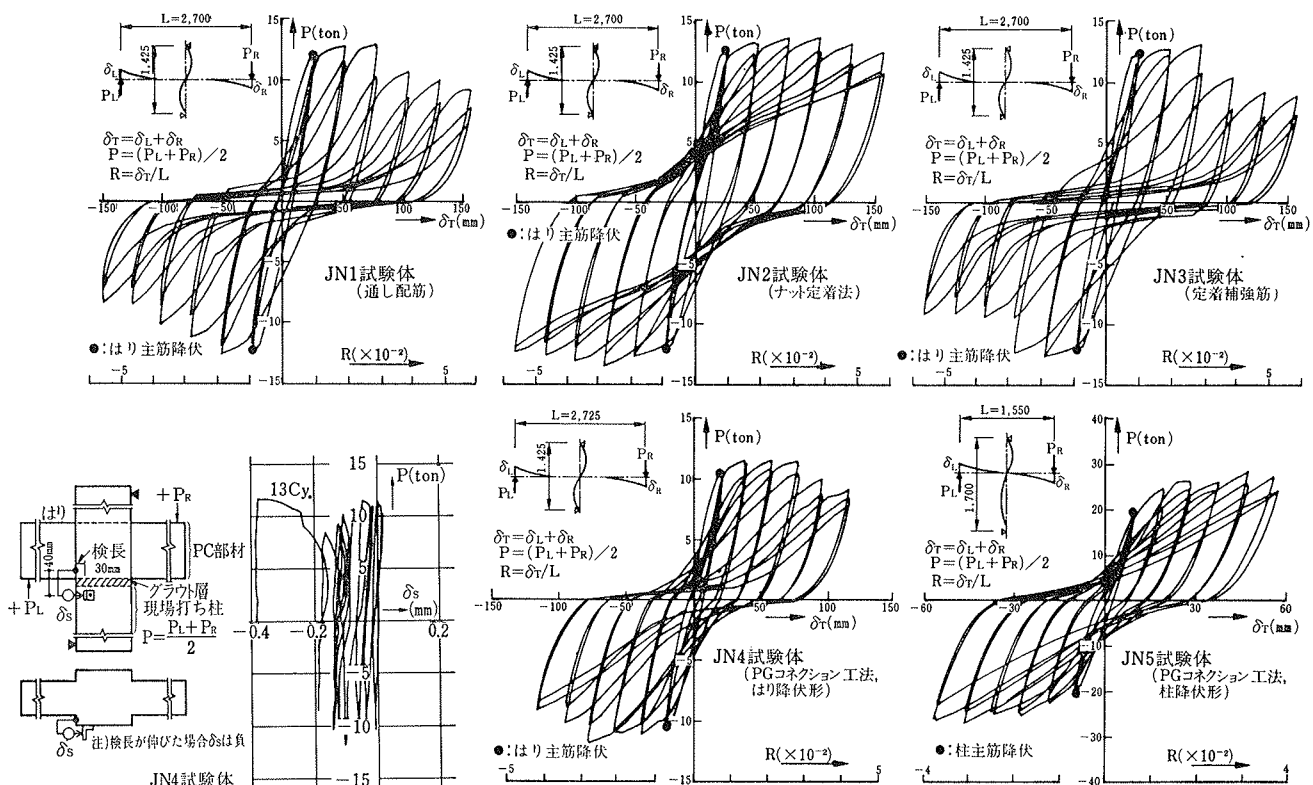
3. 実験結果および検討

3.1. 破壊経過

図一に、各試験体の最終破壊状況を示す。

はり降伏形のJN1~JN4は、はりの柱側端部に曲げおよび曲げせん断ひび割れが発生した後、接合部に対角線方向のせん断ひび割れが発生した。はりの曲げせん断ひび割れと前後して、柱にも曲げひび割れが発生した。はり主筋降伏までは、加力点側の一部を除くはりの全域に、ひび割れが分散して発生した。最大耐力まで柱には顕著なひび割れの進展はなく、接合部寄りのはり取り付き付近のかぶりコンクリートがわずかにひび割れあるいははく落した。破壊モードは、JN1, JN3, JN4は、はりの曲げ降伏後の荷重繰返しによる接合部内の定着破壊、JN2は、はり曲げ降伏後のはりの曲げ圧壊であった。

柱降伏形のJN5では、下部柱の柱頭、はり端部、上部柱の柱脚部の順に曲げひび割れが発生した後、接合部内に対角線方向のせん断ひび割れが発生した。下部柱の柱頭部の柱主筋が降伏するまでに、接合部や隣接する柱、はりにひび割れが分散した。下柱主筋降伏時変形の4倍(4 δ_y)の変形頃から、下柱打継面でのひび割れ幅の開き、ずれが顕著になった。最終的には、下部柱の柱頭部コンクリートが、かなりはく落して曲げ破壊した。



図一六 PC部材と下部柱打継面との相対すべり(S)と荷重(P)との関係

図一五 荷重(P)～変位(δ)曲線

実験終了後、柱降伏形試験体をはつて、接合部内から柱主筋のグラウト定着部を切り出し、シーす管内側のグラウト部表面の状況を観察した。その結果、グラウト材の充填は良好であったが、引張降伏後に $6\delta_y$ 相当の大変形を経験した鉄筋の場合、定着起点から接合部内へ約 12 cm の範囲に、柱主筋引抜力によるとみられるひび割れが、鉄筋軸とほぼ直角に発生していた。

3.2. 荷重(P)～変位(δ)関係

図一五に、各試験体の P～δ 曲線を示す。荷重は、柱両側はりの平均値であり、変位は両側加力点変位の和である(以下同様)。はり主筋が通し配筋の JN1 は、 $3\delta_y$ の変形で最大耐力 (12.9 ton) を示し、以後繰返しサイクルの増加と共に徐々に耐力が低下した。はり主筋の軸方向に長円形のリング鉄筋を配して定着性状の改善をはかった JN3 も、JN1 と同様 $3\delta_y$ 時に最大耐力 (13.2 ton) を示し、その後耐力が低下した。これに対して、はり上端、下端筋の一部を、接合部内の鋼板へナットによって定着した JN2 は、 $4\delta_y$ 時まで耐力低下がなく、 $5\delta_y$ 、 $6\delta_y$ 時荷重もそれぞれ $4\delta_y$ 時 (13.6 ton) の 96%、91% の耐力を維持し、紡錘形のエネルギー吸収能力に富む性状を示した。PG コネクション工法の JN4 は、正負両荷重時に $4\delta_y$ の変形まで、耐力低下がなく良好な復元力特性を示した。 $5\delta_y$ 、 $6\delta_y$ では、はり主筋の接合部からの抜け出しによるとみられるループの逆 S 化が生じ、耐

力が低下した。同工法で柱降伏形の JN5 の P～δ 曲線は、 $6\delta_y$ の正負繰返し変形に対しても、靱性、エネルギー吸収能力に富む復元力特性を示した。以上より、PG コネクション工法で採用しているシーす管内グラウト方式による接合部内柱主筋定着工法は、下部柱主筋降伏時に対しても有効であったと考えられる。

3.3. PC部材と下部柱打継面との相対すべり

図一六に、はり降伏形の JN4 について、PC 接合部と現場打ち柱の柱頭部との相対すべり (δ_s) と荷重 (P) との関係を示す。 δ_s は、同図内の略図に示したように、打継面 (20 mm 厚) をはさんで上方向へ 20 mm、下方向へ 10 mm の位置の、相対的な水平方向の変位量である。 δ_s は非常に少なく、 $6\delta_y$ の変形後も 0.2 mm 以下、13 サイクルの最終破壊時でも 0.4 mm 以下の値であった。

3.4. はり主筋ナット定着形式の定着効果

図一七に、JN2 の各加力サイクルの荷重ピーク時における接合部内のナット定着筋および鋼板のひずみ変化を示す。実線がナット定着筋(略図中の B17 位置ひずみ)、白丸の実線破線が 2 本のナット定着筋間の定着力伝達用クロスプレート (BA9, BA10)、黒丸の実線破線が接合部外側の鋼板 (BA7, BA8) のひずみである。サイクルが増すにつれて、クロスプレートひずみは徐々に増大し、13 サイクルで 2 本のナット定着筋の定着力(降伏強度)の 72% を同プレートは負担した。

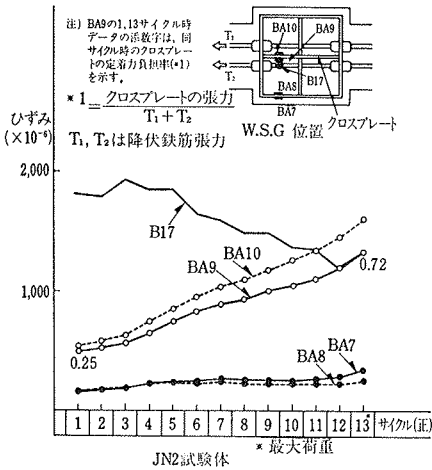


図-7 各サイクル荷重ピーク時のナット定着筋および鋼板のひずみ変化

3.5. 柱主筋の荷重(P)～ひずみ(ε) 関係および接合部内平均付着応力度

図-8に、PGコネクション工法試験体のはり上端・下端位置における柱主筋のP～ε曲線を示す。はり降伏形のJN4は、最大荷重時にも降伏せず、約-800～500μで、荷重の正負繰返しに対し安定した曲線を描いた。これらのひずみ差から求めた、接合部内柱主筋の平均付着応力度τ(鉄筋表面)は、+1サイクルで18kg/cm²、+13サイクルで28kg/cm²であった。

柱降伏形のJN5は、はり下端位置のひずみ(C14)は1サイクルから降伏し、サイクル数が増すにつれて紡錘形の曲線を示した。はり上端位置のひずみ(C13)は、10サイクルまでほとんどひずみの急変のない同一曲線を示し、11サイクル時に降伏した。-11、-12サイクル時のひずみ変化は小さく、降伏以前と同様にほぼ鉛直に立上る曲線を描いていることから、下側柱からの柱主筋の引抜き力に対する接合部内の付着抵抗は健全であったと考えられる。これらのひずみから求めた降伏直前のτは、38kg/cm²であった。この値は、許容付着応力度にほぼ等しい値であるが、同P～ε性状より判断し12サイクルまでは、維持されたと考えられる。

3.6. 初期剛性および諸荷重

表-3に、初期剛性および諸荷重の一覧を示す。荷重は両側のはりの平均値で、変位は両側変位の和である。初期剛性の実験値は、ひび割れ発生前の荷重と変位により求めた。計算値は、はり、柱の曲げおよびせん断変形と接合部のせん断変形を考慮して求めた弾性剛性である。初期剛性の実験値と計算値の差は10%以内で両者はよく一致している。柱降伏形試験体の柱の曲げひび割れ発生荷重は、実験値が計算値をかなり下まわった。はり・柱の主筋降伏荷重、曲げせん断ひび割れ荷重の実験値と

試験体名	初期剛性 (t/cm)		はり、柱の曲げひび割れ発生荷重(t)*1			はり、柱の曲げせん断ひび割れ発生荷重(t)*1			はり、柱主筋降伏荷重(t)*1			最大荷重(t)		柱・はり接合部せん断ひび割れ荷重(t)				
	実験値	計算値1	実験値	計算値2	実験値	計算値3	実験値	計算値4	実験値	計算値5	実験値	計算値6	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値/計算値	
JN1	15.6	17.0	0.92	1.98	2.36	0.84	6.46	7.01	0.92	12.1	12.0	1.01	12.9	12.2	1.06	8.90	7.02	1.27
JN2	18.5	17.0	1.09	2.02	2.30	0.88	6.49	6.83	0.95	12.5	12.0	1.04	13.7	12.2	1.12	7.48	7.53	0.99
JN3	16.7	17.0	0.98	1.52	2.28	0.67	7.50	6.79	1.10	12.5	12.0	1.04	13.2	12.2	1.08	7.51	7.35	1.02
JN4	17.1	17.9	0.96	1.99	1.95	1.02	5.99	5.85	1.02	10.5	10.2	1.03	11.8	10.8	1.09	9.00	7.06	1.27
JN5	110.3	103.3	1.07	3.12	5.16	0.60	12.0	12.5	0.96	20.5	18.9	1.08	31.7	20.7	1.53	9.51	7.57	1.26

注) *1 JN1～JN4は、はりの諸ひび割れ・降伏時の値であり、JN5は柱の値である。
 計算値1: 本文参照
 計算値2: $Mcr = 1.8\sqrt{F_c} \cdot Ze$ により荷重に換算
 計算値3: $P = 0.265 \cdot b \cdot d \cdot \sqrt{F_c} + Mcr / (M/Q \cdot d/2)$
 計算値4,5: e関数法
 計算値6: 主応力式 $\tau = \sqrt{F_t^2 + F_t \cdot \sigma_o}$ により荷重に換算
 P: 荷重, F_c : コンクリート強度, Z_e : 鉄筋を考慮した断面係数
 b: はり、柱の幅, d: はり、柱の有効せい
 Mcr: 曲げひび割れ発生モーメント
 M/Q: 曲げひび割れ発生位置までのせん断スパン
 Ft: コンクリート引張り強度
 σ_o : 柱軸方向応力度

表-3 初期剛性および諸荷重の一覧

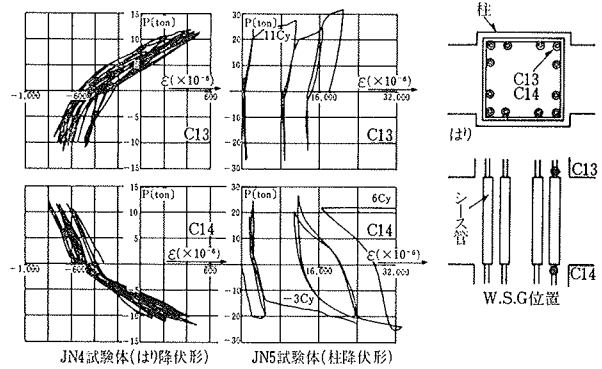


図-8 柱主筋の荷重(P)～ひずみ(ε)曲線

計算値の差は10%以内で、よく一致している。

4. まとめ

普通強度のコンクリートを使用したPGコネクション工法による、はり降伏形柱・はり接合部試験体は、在来工法による試験体と同等以上の性能を示し、4δ_yの変形においても耐力低下のない荷重～変位関係を示した。当工法による柱降伏形柱・はり接合部試験体は、6δ_yの大変形時にもエネルギー吸収能力に富む復元力を示し、この時の柱・はり接合部内の柱主筋定着部の平均付着応力度は約38kg/cm²で、定着部の劣化は見られなかった。はり主筋をナットにより鋼板へ定着した試験体は、6δ_yの大変形時にも耐力低下は少なく、通常の通し配筋の試験体よりも優れた荷重～変位関係を示した。

参考文献

- 1) 武田, 吉岡, 江戸, 他: 超高層鉄筋コンクリート建物の耐震設計法に関する研究(その5), (その6), 大林組技術研究所報, No. 34, (1987), pp. 104～113