

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6）

——柱・はり接合部PC化工法（PGコネクション工法）を用いた
実大柱・はり接合部実験——

武田 寿一 吉岡 研三
関根 正孝

Study on Aseismic Design of High-rise Reinforced Concrete Buildings (Part 6)

——Experimental Study on Full-scale Beam-Column Joint Subassemblages
Using Prefabricated Beam-Column Joints——

Toshikazu Takeda Kenzo Yoshioka
Masataka Sekine

Abstract

Full-scale beam-column joint subassemblages constructed using prefabricated beam-column joints were tested under seismic loads and were compared with monolithic specimens. This method has the characteristic that beams 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 are set on top of the column cast in the field. The interfaces between precast members and columns or clearances of longitudinal bars of columns in the holes of joints are grouted with high-strength mortar. The precast specimens showed enough ductility or energy dissipation under load reversals of ductility factor 6 to 8 in comparison with monolithic specimens in these experiments.

概 要

超高層鉄筋コンクリート建物の構築法として開発した、柱・はり接合部PC化工法（PGコネクション工法）を用いた建物の耐震性能を確認するため、PGコネクション工法によって製作した実大柱・はり接合部試験体、および現場打ち工法による試験体の正負繰返し加力実験を行ない、結果の比較・検討を行なった。PGコネクション工法の特長は、はりおよび柱・はり接合部を同時にプレキャスト(PC)化した点にあり、PC部材の柱・はり接合部内に柱主筋の貫通孔を設けておき、現場打設された柱の柱頭に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試験体は、塑性率6～8の大変形における正負繰返し加力に対しても現場打ち工法による試験体と同様に、エネルギー吸収能力に富む復元力特性を示し、地震時の安全性が確認された。

1. 序

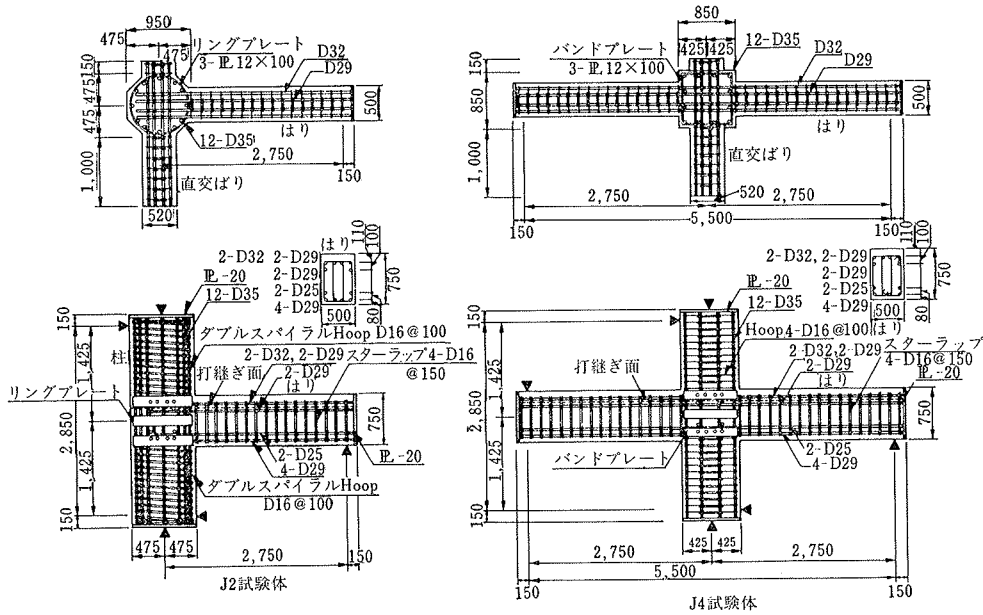
この報告は、前報（その5）で述べた施工実験によって製作された鉄筋コンクリート柱・はり骨組を切断して得られた実大柱・はり接合部試験体に正負繰返し加力を行ない、柱・はり接合部PC化工法（以後、PGコネクション工法とよぶ）と現場打ち工法による試験体の実験結果を比較・検討することによって、PGコネクション工法を用いた建物の耐震安全性を確認するものである。

2. 実験概要

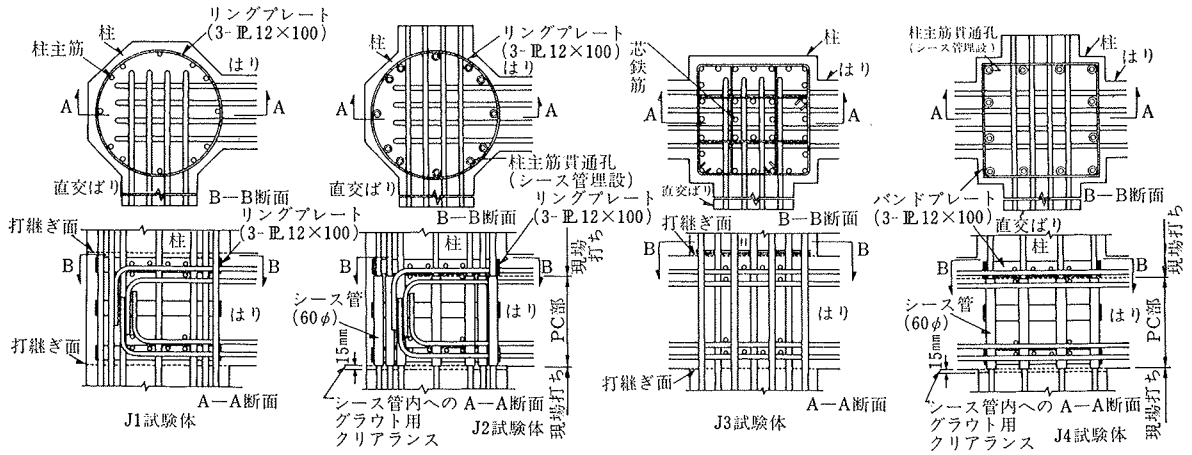
2.1. 試験体

試験体一覧を表-1に、試験体の形状・寸法（配筋）、柱・はり接合部内の配筋詳細をそれぞれ図-1、2に示す。

試験体はJ1～J4の4体で、いずれもはり曲げ降伏型で、先に提案した超高層鉄筋コンクリート建物の耐震設計法¹⁾に準じて設計されている。J1、J2は、外柱とはりの接合部を対象としたT形接合部試験体、J3、J4は、中



図一 試験体の形状・寸法 (配筋)



図二 柱・はり接合部内の配筋詳細図

柱とはりの接合部を対象とした十字形接合部試験体である。T形試験体の柱断面は八角形で、十字形試験体は正方形である。J1とJ3は、現場打ち工法、J2とJ4は、PGコネクション工法によって製作されたものである。

PGコネクション工法の特長は、はりと柱・はり接合部を同時にプレキャスト化した点にあり、現場打ち柱の主筋がプレキャスト部材の柱・はり接合部を貫通している(詳細は前報(その5)参照)。

柱主筋は、全試験体とも通し配筋である。PGコネクション工法のJ2、J4の柱主筋は、プレキャスト柱・はり接合部に埋設されたシース管内を貫通しており、グラウトによって接合部コンクリートと一体化している。

T形試験体のはり主筋は接合部内で折曲げ定着しており、定着長は30d(d:はり主筋径)である。十字形試験体のはり主筋は通し配筋で、定着長は27d~34dである。はり主筋量は引張鉄筋比で約1.0~1.4%である。はりのせん断補強量は、J1、J3試験体は、はりの曲げ耐力

試験体名	J1	J2	J3	J4
形状	T形	T形	十字形	十字形
製作方法	現場打ち工法	PGコネクション工法	現場打ち工法	PGコネクション工法
はり	上端筋	2-D32, 4-D25	2-D32, 2-D29, 2-D25	2-D32, 4-D29
	下端筋	2-D29, 4-D25	2-D25, 4-D29	2-D25, 4-D29
せん断補強	せん断補強	4-D13, @150	4-D16, @150	4-D16, @150
	幅×丈, mm	520×750	500×750	520×750
	主筋	12-D35	12-D35	32-D38
柱	せん断補強	2-D16, @100 ダブルSP.	2-D16, @100 ダブルSP.	4-D16, @100 フープ
	断面形状	八角形 (一辺394mm)	八角形 (一辺394mm)	正方形 (850×850)
接合部	せん断補強	3- Φ 12×100 リングプレート	3- Φ 12×100 リングプレート	なし
				3- Φ 12×100 バンドプレート

表一 試験体一覧

時のせん断力に割増し係数1.3をかけて全補強式により算定した。J2、J4は更に靱性を向上させるため2.0の割増し係数を用いて全補強式により算定した。

柱・はり接合部内のせん断補強は、J3試験体以外は

鋼板によって補強を行なった。柱・はり
 接合部の表側には、いずれの試験体も直
 交ばりが取付いており、J2, J4は裏側
 にも直交ばりが取付いている。

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
 果を表一2に示す。はり主筋には SD40
 の D25, D29, D32 を、柱主筋には SD40
 の D35, D38 を用いた。柱・はりのせん
 断補強筋には SD35 の D13, D16 を使用
 した。コンクリートは普通コンクリート
 を使用し、設計基準強度は 480 kg/cm²,
 実験時の圧縮強度（気中養生）は全試験
 体で 583 kg/cm²~636 kg/cm² であった。

グラウト材の圧縮強度は、1週時で
 469 kg/cm², 4週時で 595 kg/cm² であ
 った。

2.3. 実験装置

図一3に、加力および変形測定装置を示す。

実験時には、試験体を変形拘束の少ない
 支承上に柱が水平となる状態でのせて、
 試験床上に設置した。加力は、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。この実験では、柱軸方
 向力が柱、柱・はり接合部の耐力および
 柱と PC 部材の一体性に有利に働くため
 に、柱軸方向応力度は 48 kg/cm²（コン
 クリート設計基準強度の1/10）と低い
 値とした。

変位測定は、柱の上、下端部でそれぞれ
 ピン、ローラー支持となるように治具を
 取付け、はり端部にて全体変形を測定
 した。また、試験体裏側で柱・はり接
 合部の斜め方向の変位を測定し、接合
 部のせん断変形を求めた。柱、はり部
 材の主筋およびせん断補強筋のひずみ、
 柱・はり接合部内補強プレートのひずみ
 を測定した。

载荷は、変位制御で行ない、柱面位置
 におけるはり主筋の降伏時の変位 δ_y に
 より制御した。T形試験体は、1, 2, 3,
 4, 5, 6, 8 δ_y でそれぞれ2サイクルず
 つ正負交番繰返し载荷を行ない、15サ
 イクル時に最終破壊（13 δ_y ）まで
 変形を増大させた。十字形試験体は、
 8 δ_y の繰返し载荷は行なわず、6 δ_y
 後13サイクル時に最終破壊（13 δ_y ）
 させた。

3. 実験結果およびその検討

3.1. 破壊経過

図一4に、各試験体の最終破壊状況を
 示す。いずれの試験体も、はりの柱側
 端部に曲げひび割れおよび曲げせん断
 ひび割れが発生し、その後変位の増大
 に伴い、はり

コンクリート

試験体	部位	Fe	Ec	Ft
J1	上柱, はり, 接合部	632	3.62	34.5
	下柱	636	3.56	34.2
J2	上柱	632	3.62	34.5
	PC部(はり, 接合部)	583	3.67	37.8
J3	上柱	633	3.68	38.7
	下柱	632	3.62	34.5
J4	上柱	632	3.62	34.5
	PC部(はり, 接合部)	583	3.67	37.8
	下柱	633	3.68	38.7

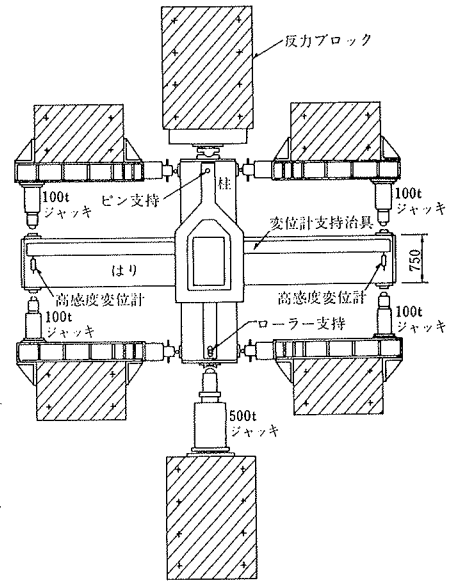
Fe: 圧縮強度 (kg/cm²), Ft: 引張強度 (kg/cm²)
 Ec: ヤング係数 (×10³ kg/cm²)

鉄筋

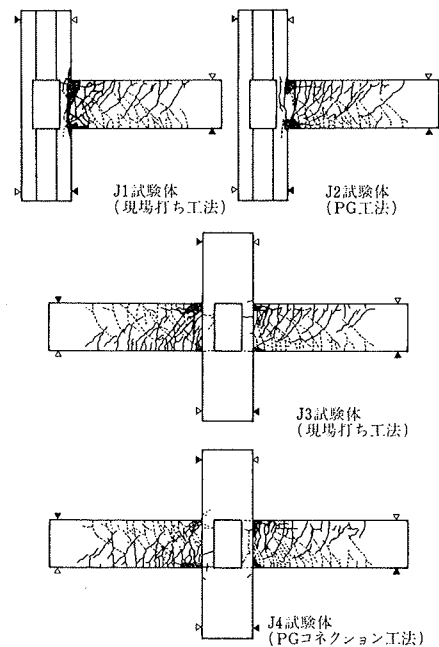
径	σ_y	Es	σ_u	EL
D13	3930	1.88	5,370	19.3
D16	3720	1.87	5,440	18.1
D25	4010	1.81	6,570	16.8
D29	4150	1.86	6,270	22.7
D32	3970	1.75	6,500	18.5
D35	4050	1.83	6,460	19.5
D38	4070	1.81	6,700	19.0

σ_y : 降伏強度 (kg/cm²)
 Es: ヤング係数 (×10³ kg/cm²)
 σ_u : 引張強度 (kg/cm²)
 EL: 伸び率 (%)

表一2 材料試験結果



図一3 加力および測定装置



図一4 最終破壊状況

主筋が降伏し、はり全体にひび割れが分散して発生した。柱は破壊せず、接合部寄りのはり取付き部近くに、わずかに曲げひび割れが発生する程度であった。PG コネクション工法による試験体の、現場打ち柱とプレキャスト柱・はり接合部の打継ぎ面には、短い曲げひび割れが発生したが、その後大きく進展することはなかった。

破壊モードは、J1 は、はりの曲げ降伏後のヒンジ発生領域のせん断破壊、J2~J4 は、はりの曲げ降伏後のヒンジ発生領域の曲げ破壊であった。PG コネクション工法の J2, J4 の柱とプレキャスト柱・はり接合部の打継ぎ部は、実験終了時まで健全であった。また、実験終了後、

J2, J4 の柱・はり接合部(はりせいのほぼ中央高さ部)を、ダイヤモンドカッターにより柱軸に垂直に切断して、柱主筋周辺のグラウト部を調査した結果、両試験体とも、グラウトの充填性は良好であり、荷重によるひび割れも発生していない事が確認された。

3.2. 荷重(P)～変位(δ)関係

図-5 に、P～δ 曲線を示す。十字形柱・はり接合部試験体の荷重は両側のはりの荷重の平均値であり、変位は両側のはりの加力点位置の変位の和である。

いずれの試験体も $6\delta_y$ (部材角 $R=30.5\sim 32.7\times 10^{-3}$) の大変形における繰返しに対しても耐力低下、はり主筋の抜け出しによるスリップ現象のない良好な復元力特性を示している。現場打ち工法の J1 試験体は、 $+8\delta_y$ ($R=40.7\times 10^{-3}$) の 2 サイクル時には、荷重は前サイクルの 85% に低下し、 $13\delta_y$ ($R=66.2\times 10^{-3}$) では最大荷重の 77% であった。PG コネクション工法の J2 は $+8\delta_y$ ($R=40.7\times 10^{-3}$) の 2 サイクル時にもほとんど荷重低下はなく $13\delta_y$ ($R=66.2\times 10^{-3}$) でも荷重は最大荷重の 93% であった。十字形試験体の場合も、PG コネクション工法の J4 は、 $13\delta_y$ ($R=74.5\times 10^{-3}$) においても荷重低下がなく、靱性に富む挙動を示した。J2, J4 試験体が、 $+8\delta_y$, $13\delta_y$ の大変位でも耐力低下のない良好な挙動を示したのは、はりのせん断補強量を J1, J3 試験体よりも多くしたことが、曲げ降伏後の正負繰返し荷重に対して、有効だったものと考えられる。

3.3. 荷重(P)～ひずみ(ε)関係

図-6 に、J4 試験体の通し配筋のはり主筋の P～ε 曲線を示す。柱・はり接合部端付近 ㉑、㉒におけるはり主

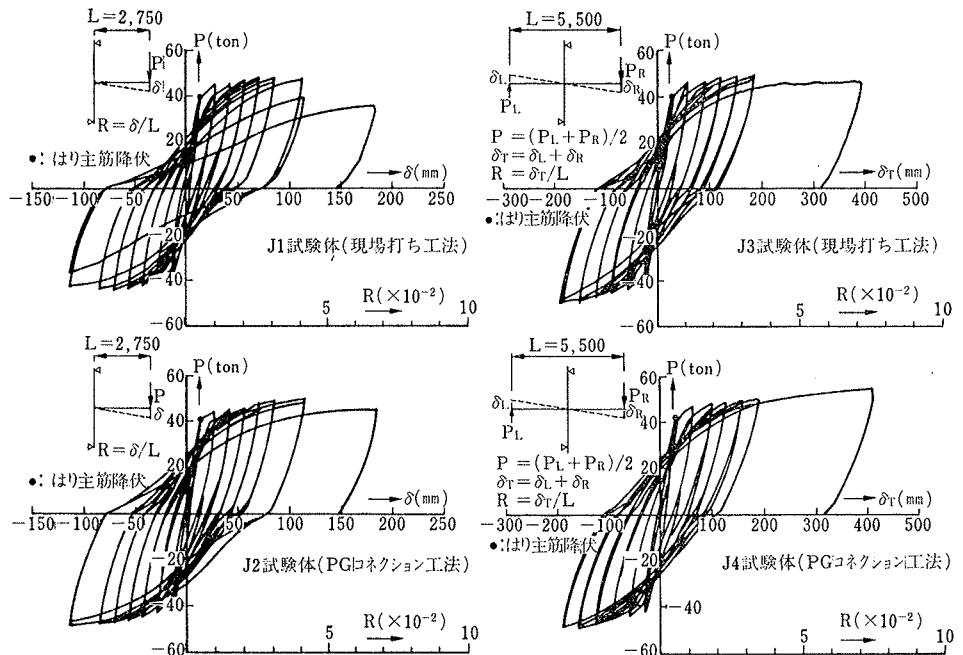


図-5 荷重(P)～変位(δ)曲線

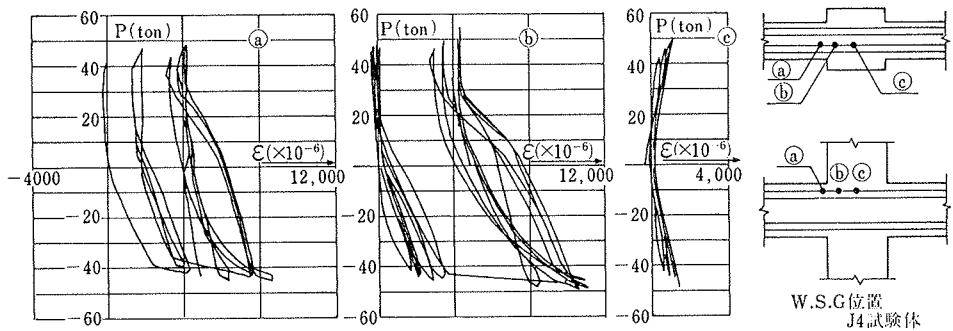


図-6 はり主筋の荷重(P)～ひずみ(ε)曲線

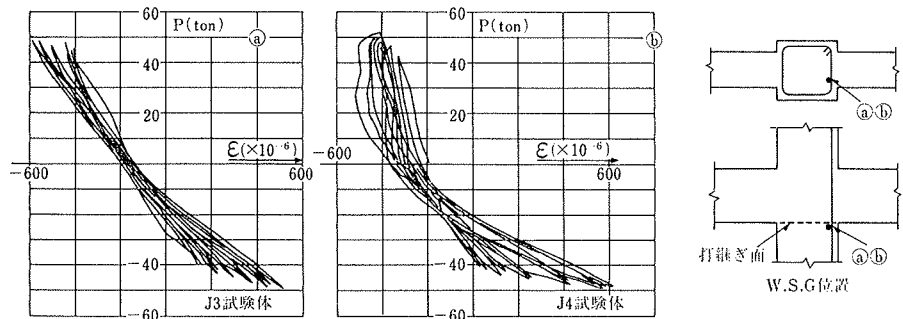


図-7 柱主筋の荷重(P)～ひずみ(ε)曲線

筋のひずみは、降伏後紡錘形に近い曲線を示し、接合部中央部㉑におけるひずみは降伏せずに安定した曲線を描いている。このことから、柱・はり接合部内からのはり主筋の抜け出しは少なく、接合部内におけるはり主筋の定着性は良好であったと考えられる。

図-7 に、J3, J4 試験体の柱主筋の P～ε 曲線を示す。PG コネクション工法の J4 は、現場打ち工法の J3

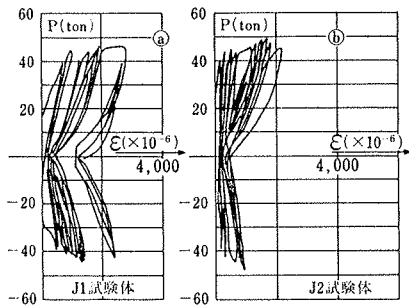


図-8 はりせん断補強筋の荷重(P)～ひずみ(ε)曲線と同様安定した曲線を示した。

図-8に、J1, J2試験体のはりのせん断補強筋のP～ε曲線を示す。せん断補強筋量が1.06%のJ2では、せん断補強筋は降伏せず、 $8\delta_y$ の変形(最大荷重)時のひずみは約 1700μ であった。せん断補強筋量が少ないJ1は $8\delta_y$ (最大荷重の98%)時にせん断補強筋が降伏した。

図-9に、J2, J4試験体の柱・はり接合部内のせん断補強プレートのP～ε曲線を示す。J2のリングプレートのひずみは、 $8\delta_y$ の変形(最大荷重)に至るまで 200μ 以下、J4のバンドプレートのひずみは、 $13\delta_y$ の変形(最大荷重)時でも $1,080\mu$ であり、柱・はり接合部のせん断耐力は十分余裕があると考えられる。

3.4. 初期剛性および諸荷重

表-3に、初期剛性(K)、諸ひび割れ荷重、鉄筋降伏荷重および最大荷重の実験値と計算値の一覧を示す。初期剛性の計算値は次式により求めたものである。

$$\delta = b\delta_b + b\delta_s + c\delta_b + c\delta_s + p\delta_s$$

$$K = P/\delta$$

P: はりの荷重

$b\delta_b$: はりの曲げ変形による加力点の変位

$b\delta_s$: はりのせん断変形による加力点の変位

$c\delta_b$: 柱の曲げ変形による加力点の変位

$c\delta_s$: 柱のせん断変形による加力点の変位

$p\delta_s$: 柱・はりの接合部のせん断変形による加力点の変位

初期剛性の計算に使用した諸定数のうち、コンクリートおよび鉄筋のヤング係数は4試験体の平均値を用いた。J1, J2試験体の八角形柱断面は、等断面積の正方形断面に置換した。

初期剛性の実験値と計算値の差は、10%以内で、実験値と計算値は比較的よい一致を示している。なお、J2, J4試験体の初期剛性が、実験値、計算値ともにJ1, J3よりも低いのは、J2, J4のはり断面がJ1, J3よりも小さいためである。

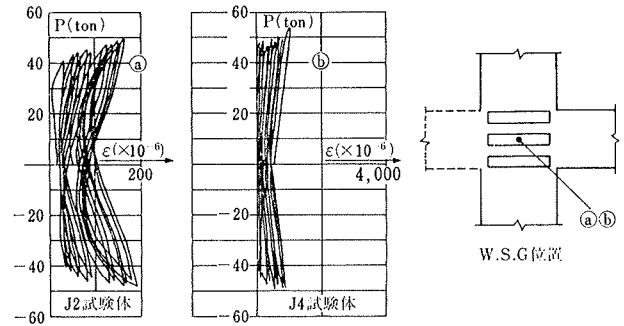


図-9 柱はり接合部補強プレートの荷重(P)～歪(ε)曲線

試験体	加力方向	初期剛性 (ton/cm)		はり曲げひび割れ荷重 (ton)		はり曲げせん断ひび割れ荷重 (ton)		はり主筋降伏荷重 (ton)		はり最大荷重 (ton)			
		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/計	
J1	+	135	131	1.03	9.8	10.4	0.94	25.9	0.81	39.8	1.07	47.1	1.17
	-	—	—	—	8.1	—	0.78	28.1	0.88	37.8	1.02	44.0	1.09
J2	+	118	127	0.93	11.8	9.6	1.23	23.9	0.81	39.7	0.96	49.5	1.11
	-	—	—	—	7.9	—	0.82	27.8	0.95	40.5	0.98	48.2	1.08
J3	+	53.2	54.8	0.97	7.9	10.4	0.76	23.8	0.75	40.7	1.03	48.9	1.15
	-	—	—	—	7.9	—	0.76	19.9	0.63	38.7	0.98	49.3	1.16
J4	+	47.6	52.9	0.90	7.9	9.6	0.82	23.8	0.81	41.8	1.04	54.4	1.25
	-	—	—	—	8.0	—	0.83	23.8	0.81	42.0	1.04	50.0	1.15

計算値1 : 本文参照
 計算値2 : $P=1.8\sqrt{F_c}Ze/L$
 計算値3 : $P=0.265\cdot b\cdot d\cdot F_c+Mcr/(M/Q\ d/2)$
 計算値4,5 : e関数法

ここに P: 荷重(ton), Ze: 等価断面係数
 Fc: コンクリート圧縮強度(kg/cm²)
 L: はりモーメントアーム, b: はり幅,
 d: はり有効丈, Mer: 曲げひび割れモーメント
 M/Q: 曲げひび割れ位置までのせん断スパン

表-3 初期剛性および諸荷重の一覧

曲げせん断ひび割れ荷重の実験値は、コンクリート強度が 500 kg/cm^2 以上と高かったためか、計算値とあまり良い適合性を示さなかった。

はり主筋の降伏荷重および最大荷重の実験値は、e関数法による計算値に近い値であった。

4. まとめ

柱・はり接合部PC化工法(PGコネクション工法)を採用した鉄筋コンクリート柱・はり接合部実大試験体の正負交番繰返し加力実験を行ない、現場打ち工法による試験体と耐震性能の比較・検討を行なった。その結果、PGコネクション工法の試験体(J2, J4)は、降伏変位の6~8倍の大変位(部材角約 $30\sim 40\times 10^{-3}$)での繰返しに対しても一体性が保たれ、耐力低下のない、紡錘形の復元力特性を示し、現場打ち工法の試験体(J1, J3)と同様に良好な耐震性状を示した。

参考文献

- 1) 武田, 吉岡, 江戸, 多田: 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1) —耐震設計法と30層建物の設計—, 大林組技術研究所報, No. 30, (1985), pp. 48~55