

論文 超高層 RC を対象としたプレキャスト骨組の実験的研究

丸田 誠*1・境 治彦*2

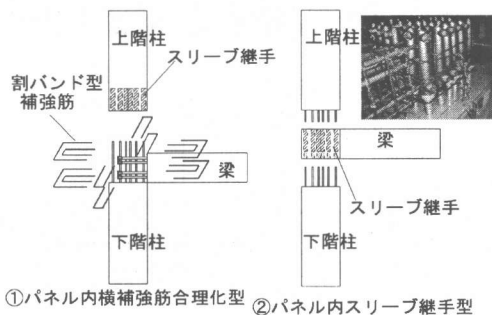
要旨：施工の合理化・省力化を目的に、超高層 RC 建物でも柱・梁部材のプレキャスト (PCa) 化が行われつつある。現状の PCa 工法の問題点である柱・梁接合部を合理化したディテールを開発し、大きな変動軸力が作用する PCa 外柱・梁骨組、厳しい応力状態となる PCa 内柱・梁骨組について構造実験を実施し、耐震性状を確認した。その結果、新規に開発した PCa 工法は、現場打設 (一体打ち) と同等以上の構造性能であることが確認された。

キーワード：プレキャスト, 骨組, 高層 RC 建物, 構造実験, 高変動軸力, 機械式継手

1. はじめに

超高層 RC 建物の施工法の合理化の一環として、柱・梁部材のプレキャスト (以下 PCa と称す) 化が多くの施工現場で進められている。この PCa 化により、躯体施工のサイクル工程が大幅に縮まる事例も見られる。また環境面、労働者不足の面からも、より合理的な PCa 工法が望まれている。従来一般的な柱・梁の PCa 化の方法は、柱や梁の可能な部分を PCa 化し、柱・梁接合部 (以下パネルと称す) は現場打設で行っている。これは、梁主筋の継手位置をヒンジゾーン (1.5D, D: 梁せい) 内に設けるのを避けたり、外柱での梁筋の定着に U 型定着を用いるなど制約が多いことに起因する。PCa 化率の向上や、鉄筋が混みあうパネルの施工合理化が要望されており、その合理的構工法を考案し構造実験により、厳しい応力下での耐震性状を確認したので報告する。

階柱でスリーブ継手を行うもの、④は柱+パネル PCa から梁主筋を 0.5D (D: 梁せい) と機械式継手に必要な分出しておき、ヒンジゾーン内で梁筋継手を行うものである。これらと⑤の比較用の一体打設のものをそれぞれ組み合わせて実験因子とした。④で 0.5D とした理由は、通常のヒンジゾーン 1.5D を避けて継手を設けた場合、柱側からの主筋長が長く PCa 率が下がり合理的でなく、またパネル近傍に継手を持ってくると梁耐力が上昇し、梁曲げ降伏先行の設計での想



2. 試験体

実験因子としては考案した PCa の方法であり、図-1 に示すように、①パネル現場打設を想定して、内部横補強筋を割バンド型として施工合理化図ったもの、②~④パネルも PCa 化することを想定したものがある。②は各階の柱間のスリーブ継手をパネルゾーン内に設けたもの、③はパネル内柱主筋部分にワインディングパイプを設置し、下層階柱からの柱主筋を通し上層

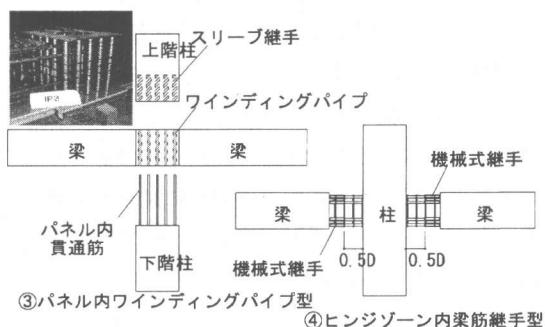


図-1 プレキャストの方法

* 1 鹿島 技術研究所 建築技術研究部 主管研究員 博士 (工学) (正会員)

* 2 鹿島 原子力部 企画室 工修

表-1 試験体一覧

試験体名	シリーズ	タイプ	継手・定着		パネル配筋	プレキャスト
			梁筋	柱筋		
外柱梁骨組	1	設計骨組	プレートナット	通し	溶接閉鎖型	⑤一体打設
			プレートナット	スリーブ継手(柱脚部)	割バンド型	①
			プレートナット	スリーブ継手(パネル内)	溶接閉鎖型	②
	2	パネル耐力確認	プレートナット	通し	溶接閉鎖型	⑤一体打設
			プレートナット	通し	割バンド型	①
			プレートナット	スリーブ継手(パネル内)	溶接閉鎖型	②
内柱梁骨組	3	設計骨組	通し	通し	溶接閉鎖型	⑤一体打設
			機械式継手	通し	溶接閉鎖型	④
			通し	ウインディングパイプ(パネル内) +スリーブ継手(柱脚部)	溶接閉鎖型	③
	4	パネル耐力確認	通し	通し	溶接閉鎖型	⑤一体打設
			通し	スリーブ継手(パネル内)	溶接閉鎖型	②
			通し	ウインディングパイプ(パネル内) +スリーブ継手(柱脚部)	溶接閉鎖型	③

試験体名: 先頭(O:外柱骨組, I:内柱骨組), 2番目(P:プレキャスト, N:一体打ち)
3番目(プレキャストの種類), 最後(D:設計, S:せん断)

表-2 使用材料の力学的性質

(コンクリート)

試験体	OND	OPUD	OPSD	ONS	OPUS	OPSS	IND	IPHD	IPWD	INS	IPSS	IPWS
柱	63.1 (3.02)	65.0 (3.04)	66.6 (2.91)	64.0 (3.06)	65.1 (3.13)	64.8 (3.03)	67.9 (3.17)	66.3 (3.12)	66.9 (3.13)	55.8 (2.77)	59.0 (2.73)	63.1 (2.74)
梁	45.2 (2.66)	46.4 (2.69)	52.3 (2.67)	60.9 (2.92)	62.3 (3.00)	64.5 (2.95)	49.4 (2.78)	49.9 (2.75)	48.7 (2.79)	55.8 (2.77)	59.0 (2.73)	63.1 (2.74)
パネル	63.1 (3.02)	65.0 ¹⁾ (3.17)	66.6 (2.91)	64.0 (3.06)	65.1 (3.13)	64.8 (3.03)	67.9 (3.17)	63.1 ²⁾ (3.08)	66.9 (3.13)	55.8 (2.77)	59.0 (2.73)	63.1 (2.74)

1) 柱後打部 2) 梁後打部 上段: 圧縮強度 (N/mm²) 下段()内: ヤング係数 (×10⁴ N/mm²)

(鉄筋)

呼び径	材質	降伏強度 σ_y (N/mm ²)	引張強さ σ_u (N/mm ²)	使用部位
D6	SD785	1203	1243	横補強筋
D16	SD685	746	928	外柱芯筋
D16	SD490	512	708	OND, OPUD, OPSD
D19	SD490	525	711	IND, IPHD, IPWD 柱筋
D19	SD490	530	715	INS, IPSS, IPWS
D19	SD685	711	892	INS, IPSS, IPWS 梁筋
D22	SD490	521	712	IND, IPHD, IPWD 梁筋
D22	SD490	524	706	ONS, OPUS, OPSS

定降伏機構が崩れる懸念があるためである。

試験体は、外柱梁骨組6体と内柱梁骨組6体の計12体であり、実験は4シリーズに分類される。外柱梁骨組と内柱梁骨組について、それぞれ梁曲げ降伏先行型(設計骨組)と接合部せん断破壊先行型(パネル耐力確認)に試験体を設計した。縮尺は実物の約1/2(シリーズ1のみ約1/2.5)である。試験体一覧を表-1に示す。

図-2, 3に外柱梁骨組(シリーズ1, 2), 内柱梁骨組試験体(シリーズ3, 4)の一体打設試験体の概要を示す。

外柱梁骨組試験体の梁主筋定着には、プレート

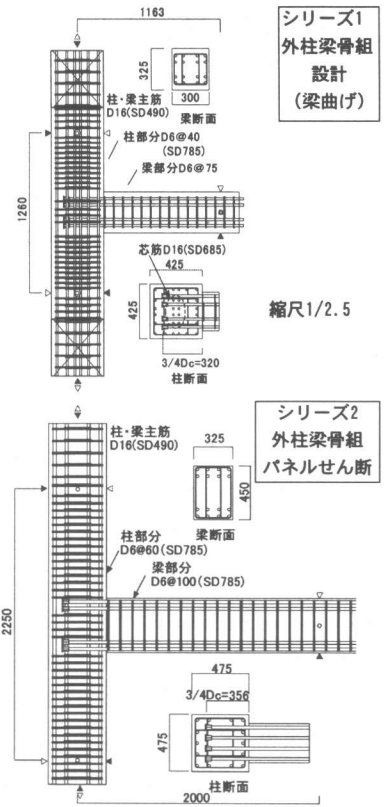


図-2 外柱骨組概要

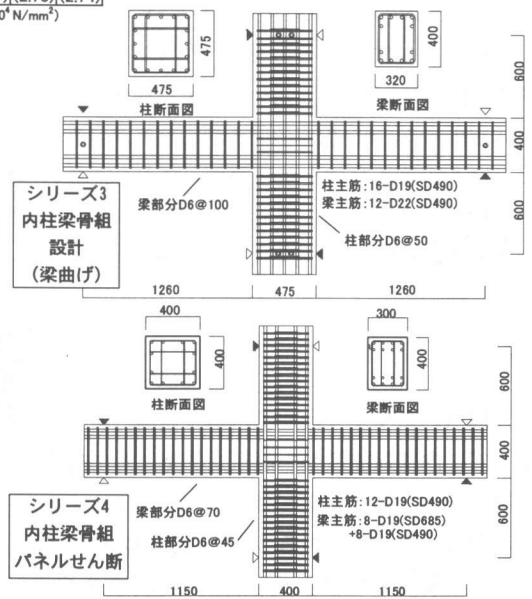


図-3 内柱骨組概要

ナット¹⁾を用いた。使用材料の力学的性質を表-2に示す。PCa部材間には、高強度モルタルを10mmグラウトし、一体化を図っている。この

高強度モルタル材料は平均で圧縮強度 85N/mm^2 、ヤング係数 $3.2 \times 10^4\text{N/mm}^2$ の力学性状を有していた。

図-4に外柱梁骨組の変動軸力の与え方を示す。大きな変動軸力下での構造実験例²⁾は少なく、シリーズ1の高引張から高圧縮までの変動軸力下の外柱骨組実験は初めてとなるため、その性状にも着目する。外柱梁骨組では、図-4に示すように、梁端荷重に柱軸力を連動させた。梁端荷重が梁曲げ降伏想定荷重に達する時に最大軸力になるように設定した。それ以上の梁端荷重となる場合は軸力は最大軸力を保持することとした。シリーズ1（外柱梁骨組・設計骨組）とシリーズ2（外柱梁骨組・パネル耐力確認）では、変動軸力の与え方が異なっている。シリーズ1では、変動軸力範囲を高引張軸力（ $0.75tNu$, tNu :柱の引張軸耐力）～高圧縮軸力（ $0.7cNu$, cNu :柱の圧縮軸耐力）³⁾までとしたが、シリーズ2では、高圧縮域でのせん断性状に着目したため、 $0 \sim$ 高圧縮軸力（ $0.7cNu$ ）までとした。シリーズ3（内柱梁骨組・設計骨組）とシリーズ4（内柱梁骨組・パネル耐力確認）では、一定軸力下（各々 $0.2cNu$, $0.26cNu$ ）で梁端荷重を与えた。

シリーズ1～4まで制御は、層間変形角 R で行い、 0.0013rad を1回、 0.0025rad , 0.005rad , 0.01rad , 0.02rad , 0.04rad を各2回づつ、 0.1rad を1回目標に正負繰り返し加力した。

3. 実験結果と考察

3.1 荷重－変形関係

各試験体の梁端荷重 P －梁端変形 δ 関係を図-5に示す。

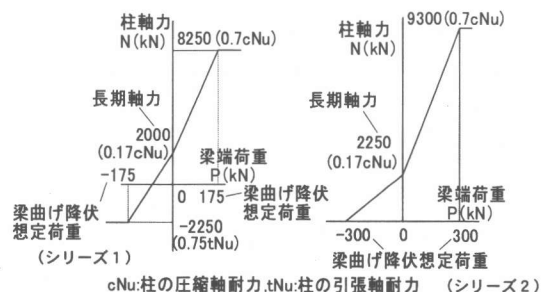


図-4 外柱骨組変動軸力载荷履歴

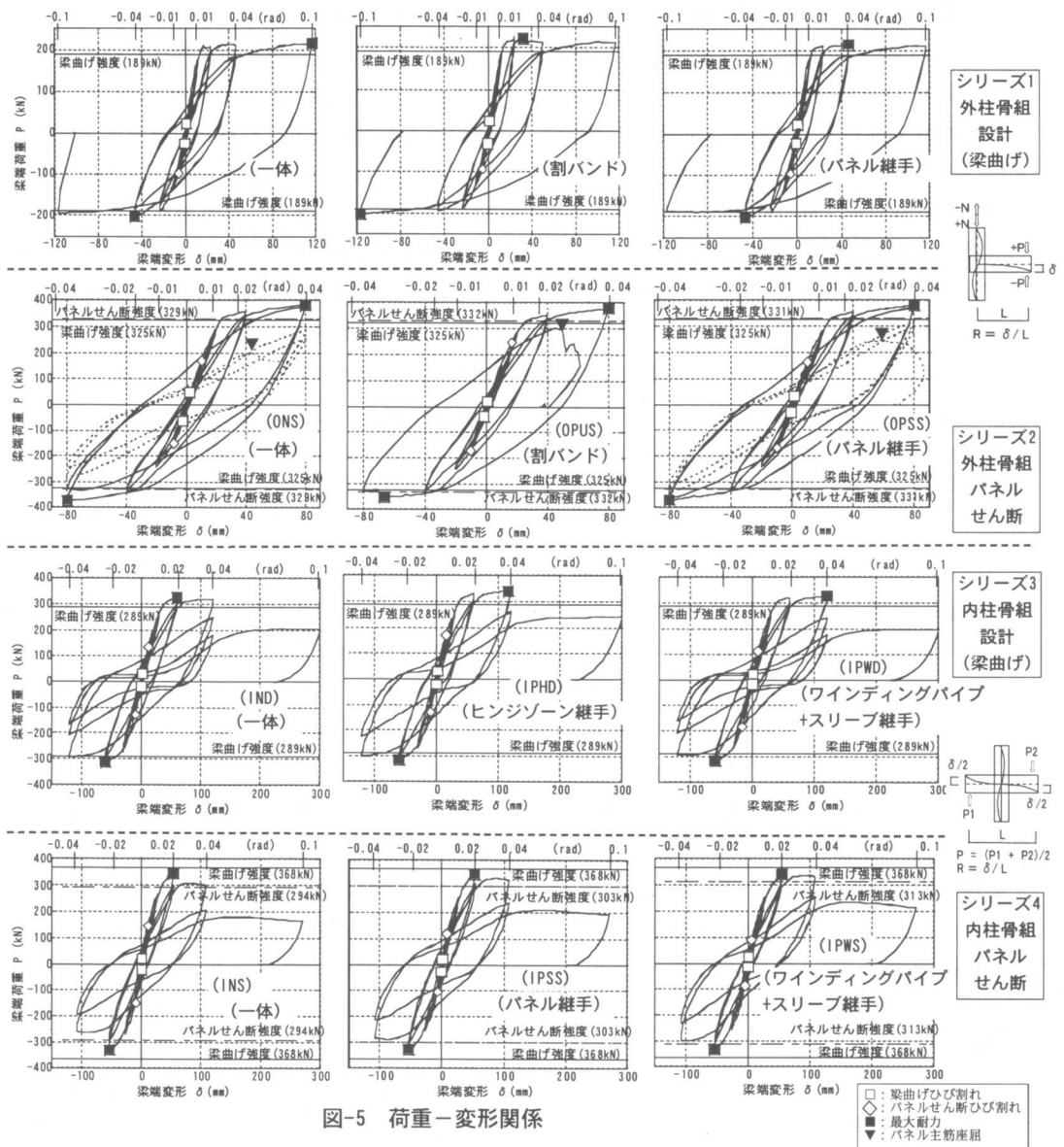
(1) 外柱梁骨組

シリーズ1の設計骨組の大きな変動軸力下での性状は3試験体とも梁曲げ降伏先行で、その後の耐力低下も殆どなく良好な履歴ループを描き、PCa化による影響は見られなかった。また柱部分のPCa接合面は、ひび割れは生じたが高引張軸力下でも、その幅は 0.2mm 以上広がらなかった。圧縮軸力下では、ひび割れは生じていない。3試験体とも、梁のヒンジゾーンの曲げ圧壊が $R=0.02\text{rad}$ サイクル以降顕著となった。

シリーズ2では、3体とも $R=0.04\text{rad}$ の繰り返し载荷以前では同様な荷重変形関係となった。最大耐力は、梁曲げ耐力およびパネルのせん断耐力計算値を上回った。圧縮軸力が梁端荷重とともに上昇していく正側ではせん断ひび割れが $R=0.04\text{rad}$ までパネルには殆ど生ぜず、負側の軸力が小さくなる加力方向で、ひび割れが大きく開いた。その影響で、割バンド型のOPUSは負側で梁の直交方向の割バンドフープが $R=0.04\text{rad}$ で外にはらみ出し、繰り返しの正側（図-5中央OPUS）▼で、軸力が負担できなくなり接合部で破壊した。他の2体は $R=0.04\text{rad}$ の繰り返しでも耐力低下が小さかったため、軸力零で $R=0.04\text{rad}$ 繰り返し载荷（2サイクル：図-5シリーズ2の点線）を行った。その結果、ONSでは接合部のせん断圧壊が顕著となり、耐力も変動軸力時の75%程度となった。その後、もう一度変動軸力に戻して、正側の载荷をしたところ、接合部での主筋の座屈により軸力の負担ができなくなり破壊した（図-5左▼）。スリーブ継ぎ手のOPSSでは、スリーブの影響で鉄筋座屈がONSより遅く、軸力零で $R=0.04\text{rad}$ の繰り返し载荷でも曲げおよびせん断の計算値程度まで耐力が回復した。その後の破壊はONSと同じとなった。OPSSのパネル内スリーブ継手試験体は接合部が破壊する場合でも、一体打設と同程度以上の性能を有していた。

(2) 内柱梁骨組

シリーズ3の設計骨組は、3体とも同様な実験経過であった。梁の主筋の降伏は、



R=0.01radのサイクルで始まり、R=0.02radでほぼ全主筋が降伏した。パネルの横補強筋の降伏はR=0.04radで始まった。R=0.04radの繰り返しはINDとIPWDでは3回行ったため、その後のR=0.1rad時の耐力がIPHDより小さいが、最大耐力は3体でほぼ同様な値となっている。R=0.04rad以上の大変形では耐力低下、繰り返しによるスリップが顕著となった。ヒンジゾーン内継手のIPHDでも継手近傍打ち継ぎ部位置に曲げひび割れは生じたが、幅も広がらず構造的な影響は殆ど無かった。

シリーズ4の実験経過は、シリーズ3とほぼ同様となった。3体ともパネルの横補強筋降伏後も安定した履歴性状を示し、シリーズ3と同傾向となった。PCaの方法による差異は無く、最大耐力もパネルのせん断耐力計算を上回り、PCa骨組でも既往のせん断耐方式で安全側に評価できることが分かった。最終的な耐力低下は、一体打設よりPCaの方が小さかった。

3.2 柱主筋ひずみ性状

スリーブ継手あるいはワインディングパイプを有する試験体の付着性状確認のために、両

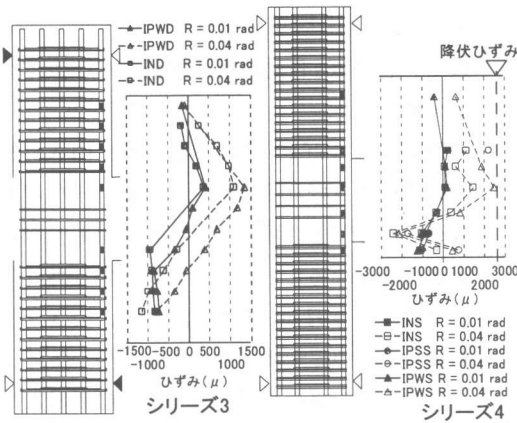


図-6 柱主筋ひずみ分布 (シリーズ3, 4)

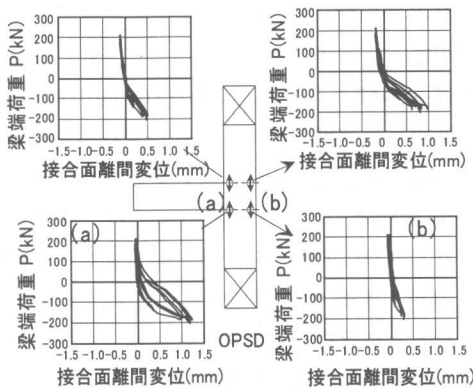


図-7 PCa接合面の変位 (OPSD)

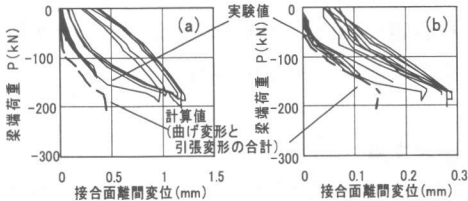


図-8 PCa接合面の変位比較

PCa試験体と一体打設試験体の柱主筋のひずみ分布を $R=0.01, 0.04 \text{ rad}$ 時についてシリーズ3, 4とも比較し図-6に示す。シリーズ3の一体打設INDに比べるとIPWDでは、 $R=0.01, 0.04 \text{ rad}$ 時とも若干ひずみの値が大きい分布傾向はほぼ同じであり、降伏ひずみにも達していないことからワインディングパイプによる付着劣化の影響は少ない。シリーズ4でも、一体打設INSに比べIPSS, IPWSのひずみが、引張側の一部で大きくなっているが、このひずみの大きさの違いが荷重変形等の構造性能に与える影響は小さく、これらのスリーブ継手あるいはワインディ

ングパイプ+スリーブ継手が一体打設(無継手)と遜色のない性能を有することが分かった。

3.3 PCa接合面の挙動

大きな引張(変動)軸力を与えたシリーズ1のOPSDについてPCa接合面のひび割れ幅を定量的に検討する。PCa接合面に設置した変位計により計測された変位を図-7に示す。離間変形はこの図から最大でも 1.2 mm 程度であった。この変形には、柱の曲げ変形と引張力による変形が合わせて入っているため、図-7の(a), (b)点について①柱の曲げ平面保持解析(ファイバーモデル)⁴⁾のモーメント曲率関係から求めた曲げによる変形と②引張軸変形(柱主筋のみ軸剛性 \times 軸力:全引張)を加えた計算値と実験結果を比較し図-8に示す。この図から、実験での離間変形は、柱の曲げによる変形とひび割れ後の引張変形計算値の和と大きく異なる。よって、PCa面に極端に変形が集中しておらず、一体打設と同等で想定可能な離間変形であると言える。大きな引張軸力下においてもPCa接合面が骨組の構造性能に与える影響は、殆ど無かったことが分かった。

3.4 最大耐力の検討

表-3に実験の最大耐力と計算値を比較して示す。計算値は、曲げに関してはACIの方法⁵⁾, AIJ・RC規準での簡略法⁶⁾およびファイバーモデル⁴⁾で、パネルのせん断耐力に関しては文献7)に基づき算定した。シリーズ1では、実験の最大耐力は最大圧縮軸力下で生じた。実験耐力は梁の曲げ耐力計算値を上回ったが、パネル耐力計算値には達しなかった。シリーズ2では、実験の最大耐力は正側の高圧縮軸力下で生じたが、パネル破壊(J破壊)が生じたのは軸力零の状態であった。高軸力側では、梁曲げ降伏も確認されており梁曲げ降伏後パネル破壊(BJ破壊)の様相も呈している。実験耐力は梁曲げ耐力やパネル耐力を $14\% \sim 17\%$ 上回った結果となった。現行のパネル耐力式では、軸力を考慮していないため高軸力下でのパネルのせん断耐力評価は今後の検討課題と考えられる。シリー

表-3 最大耐力の実験値と計算値の比較

	実験値		計算値							破壊形式
	最大耐力		梁曲げ耐力				パネルせん断耐力			
	ePmax (kN)	eR (×10 ⁻³ rad)	bPu (ACI) (kN)	ePmax (ACI) (kN)	bPu (AJJ) (kN)	ePmax (AJJ) (kN)	p _{Tu} (N/mm ²)	pPu (kN)	ePmax (kN)	
OND	216	100.0	178	1.21	189	1.15	8.3	289	0.75	B
OPUD	220	27.9	179	1.23	189	1.17	8.4	253	0.87	
OPSD	211	40.0	182	1.16	189	1.12	8.5	256	0.83	
ONS	380	40.0	324	1.17	325	1.17	8.3	329	1.16	J
OPUS	377	40.0	325	1.16	325	1.16	8.4	332	1.14	
OPSS	379	40.0	325	1.17	325	1.17	8.4	331	1.14	
IND	323	20.0	281	1.15	289	1.12	12.9	390	0.83	B
IPHD	337	38.8	286	1.18	289	1.17	12.7	395	0.85	
IPWD	324	40.1	281	1.15	289	1.12	12.8	387	0.84	
INS	346	20.0	353	0.98	368	0.94	11.7	294	1.18	J
IPSS	344	19.2	354	0.97	368	0.94	12.0	303	1.14	
IPWS	340	20.0	356	0.95	368	0.92	12.4	313	1.09	

* B: 梁曲げ破壊, BJ: 梁曲げ降伏後パネルせん断破壊, J: パネルせん断破壊
 ** 計算値も含め各荷重Pは、梁端荷重に変換した値

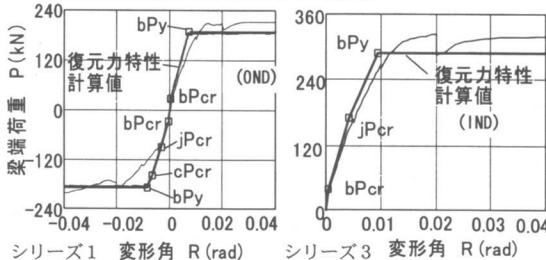


図-9 復元力特性算定結果

ズ3では、実験耐力が梁の曲げ耐力を15%程度上回ったが、接合部耐力には達していない。シリーズ4では、実験でパネル破壊が先行した。実験耐力はパネル耐力を上回り、梁の曲げ降伏耐力に近い。破壊形式としてはJ破壊と思われる。

3.5 復元力特性評価

骨組の復元力特性の評価を、設計骨組のシリーズ1, 3について算定した結果を図-9に示す。文献8)にならい、全体復元力特性を梁の復元力特性、柱の復元力特性、パネルの復元力特性(各トリリニア型)と組み合わせたものとし算定する。全体変形はそれぞれ梁, 柱, パネルを足し合わせて求める。

変動軸力のシリーズ1では、変動軸力も考慮して各ひび割れ点を算出した。シリーズ1, 3とも仮定した復元力と実験結果が概ね対応しており、このような復元力特性計算で骨組性状が表せることが分かった。

4. まとめ

以上、各種PCa骨組の構造実験を行い以下のことが分かった。

- 1) 今回提案したPCa工法は外柱骨組, 内柱骨組ともすべて良好な耐震特性を有し、一体打設骨組と同等以上の耐力(パネル耐力も含む)、変形性能となることが分かった。特に外柱骨組では、一体打設, PCaを問わず、大きな変動軸力下での健全性が確かめられた。ただし、割バンド型の横補強筋を接合部内に設けた場合、パネルせん断ひび割れが大きく開くような大変形時には、十分な効果を発揮できなかった。
- 2) 高引張軸力下においても柱PCa間の接合(モルタル充填部分)は、大きなずれが生じるようなことはなく一体に近い状態であった。
- 3) 0.7cNuという高圧縮軸力下では、接合部にせん断ひび割れが生じず、接合部のせん断耐力が、低軸力(0を含む)のそれより大きくなるため既往の耐力式では評価できない。これは今後の課題である。
- 4) 復元力特性は、内柱骨組および変動軸力の外柱骨組においても既往の算定式で十分評価可能であることが分かった。

参考文献

- 1) 加藤, 別所; 新考案定着金物を用いた高層RC柱梁接合部内の梁主筋定着法に関する実験研究, 鹿島技術研究所年報, 第45号, pp. 75~pp. 80, 1997. 12
- 2) 川合ほか; 高強度材料を用いたRC柱梁接合部の力学的性状に関する実験的研究, JCI年次大会, 19-2, pp. 1011~pp. 1016, 1997
- 3) 丸田, 別所; 高強度材料を用いた超高層鉄筋コンクリート柱の構造性能, 鹿島技術研究所年報, 第41号, pp125~pp130, 1993. 10
- 4) 鈴木ほか; ファイバーモデルによるRC短柱と十字型部分骨組の解析, JCI年次論文, Vol.15-2, pp. 577~pp. 582, 1993
- 5) ACI: State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete, ACIJournal July-August, 1984
- 6) 日本建築学会; 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1999
- 7) 加藤, 別所; 高強度材料を用いた超高層鉄筋コンクリート造柱梁接合部の構造特性評価, 鹿島技術研究所年報, 第42号, pp157~pp162, 1994. 10
- 8) 丸田ほか; 高強度材料を用いた高層RC十字型接合部加力実験(その2 荷重-変形関係), AIJ大会 構造II pp585~586, 1991. 09