

超高層RCプレキャスト工法の開発（その2 柱部材実験）

Development of High-Rise Building Construction Method with Precast Reinforced Concrete Members (Part2 Experiment on Column Members)

金川 基*
Motoi Kanagawa

飯塚 信一*
Shin-ichi Iizuka

笠松 照親**
Teruchika Kasamatsu

塩川 真*
Shin Shiokawa

要 約

本報は、超高層RC建物（40～50階）の架構式プレキャスト鉄筋コンクリート工法の開発を目的とした柱部材の曲げせん断実験結果の報告である。柱部材のプレキャスト化は、モルタル充填式スリーブ継手を柱脚に適用し、一体打ち柱部材との比較を行った結果、耐力および靱性能においてプレキャスト柱部材は、一体打ち柱部材と同等以上の性能を有していることが分かった。また、プレキャスト部材で懸念される打継ぎ部の挙動については、一体打ち柱部材と明確な差はなかった。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 実験概要
- § 3. 実験結果
- § 4. おわりに

§ 1. はじめに

近年、現場作業の省力化・合理化を図る目的から、構造体コンクリート部材を、予め工場で製作する、架構式プレキャスト鉄筋コンクリート（以下、PCaと称す）工法の開発が盛んに行われている。柱部材をフルPCa化する

場合、柱主筋の継手位置を柱脚にし、スリーブ継手を用いて打ち継ぐ方法が一般的である、しかしながら、柱脚ならびに柱頭部の打継ぎ部における一体性が問題となり、脚部における力学的挙動に関する検討や、それに対する性能の確認を行う必要がある。

本報では、高強度材料を使用した柱のPCa化のための基礎資料を得ることを目的として実験を行った、PCa柱部材の曲げせん断実験の結果について報告する。

§ 2. 実験概要

2-1 使用材料

(1) コンクリート

本実験で使用したコンクリートは、設計基準強度 F_c が $F_c=480\text{kgf/cm}^2$ (47.1Mpa、以下、 F_c480 シリーズと称

* 技術研究所原子力課

** 技術研究所研究部

す) および $F_c=600\text{kgf/cm}^2$ (58.8Mpa, 以下, F_c600 シリーズと称す) の2種類の高強度コンクリートである。粗骨材は最大寸法13mmの碎石を使用した。また、セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。試験体に使用した高強度コンクリートの材料試験結果を表-1に示す。

(2) 鉄筋

本実験で使用した鉄筋は、主筋には、異形棒鋼SD390のD16およびSD490のD16の2種類を用いた。また、せん断補強筋には、U6.4の異形PC鋼棒を使用した。鉄筋の引張試験結果を表-2に示す。

2-2 試験体

試験体は、超高層RC建物の下層階中柱を想定し、実大の約1/3スケールとし、上下にスタブを設けている。形状寸法は、内法スパン長さ H が1320mm, 断面寸法が330×330mm, せん断スパン比 a/D ($a=2D$, a :柱の反曲点長さ, D :柱せい) が2.0である。試験体数は、制作方法、設計基準強度 F_c , 軸力比 η ($=N/(B \cdot D \cdot F_c)$, N :軸力, B :柱幅), 主筋強度および補強筋比を変化させた合計9試験体である。試験体の諸元を表-3に、試験体の形状寸法および配筋の一例を図-1に示す。

製作方法は、実際の施工方法を模擬し、柱脚にスリーブ継手を有するPCa柱部分と、下スタブを10mmかさ上げし、グラウトモルタルを注入して接合した後、上スタブを打継ぐ方法とした。柱脚の継手は、市販のグラウト充填式スリーブ継手を使用した。接合面には、敷きモルタルは使用せず、鉄筋継手に用いるものと同一のグラウトモルタルを用いた。なお、鉄筋継手に用いるグラウトモルタルの圧縮強度は、 F_c480 シリーズの場合、材令28日時で857kgf/cm² (84.0Mpa) であり、また、 F_c600 シリーズの場合、材令48~66日時で701kgf/cm² (68.8Mpa) であった。

(1) F_c480 シリーズ

F_c480 シリーズは、9試験体のうちの5試験体である。主筋は、C4-2,3,4の場合、主筋強度SD390を使用し、16-D16 ($p_g=2.92\%$, p_g :主筋の全断面積/柱の断面積) で配筋し、また、C4-1,5の場合、主筋強度SD490を使用し、16-D16 ($p_g=2.92\%$) で配筋した。せん断補強筋は、C4-2,3,4の場合、4-U6.4@60で配筋し、また、C4-1,5の場合、4-U6.4@50で配筋した。軸力比 η は、C4-2,3,4の場合、それぞれ $\eta=0.2, 0.3, 0.4$ とし、また、C4-1,5の場合、 $\eta=0.3$ とした。なお、C4-1はPCa柱部材C4-5と比較するため、継手のない一体打ち柱部材とした。

(2) F_c600 シリーズ

F_c480 シリーズは、9試験体のうちの4試験体である。主筋は主筋強度SD490を使用し、16-D16 ($p_g=2.92\%$)

で配筋し、せん断補強筋は4-U6.4@50で配筋した。軸力比 η は、C6-2~4の場合、それぞれ $\eta=0.2, 0.3, 0.4$ とし、また、C6-1の場合、 $\eta=0.3$ とした。なお、C6-1はPCa柱部材C6-3と比較するため、継手のない一体打ち柱部材とした。

2-3 加力および測定方法

加力装置の概要を図-2に示す。加力方法は、試験体に所定の軸力を与え、柱頭のL型加力梁を用いて、試験体の中央部が反曲点となるような逆対称加力とした。加力スケジュールを図-3に示す。加力の制御は、部材角 R

表-1 コンクリートの材料特性

呼び強度	試験体名	部 位	圧縮応力度		弾性係数 E _c ($\times 10^4\text{N/mm}^2$)	引張強度 σ_t (N/mm^2)
			σ_B (N/mm^2)	ϵ_B (μ)		
480	C4-1	後打ち部	54.9	2410	3.40	3.54
	C4-2	PCa部	52.8	2370	3.13	3.03
	C4-3		50.4	2230	3.18	3.14
	C4-4		52.8	2410	3.14	2.90
	C4-5		53.1	2330	3.15	2.87
600	C6-1	後打ち部	64.2	2420	3.50	3.83
	C6-2~4	PCa部	71.2	2290	3.88	4.14

表-2 使用鉄筋の材料特性

呼び名	種 別	No.	圧縮応力度		弾性係数 E _s ($\times 10^5\text{N/mm}^2$)	引張強度 σ_{max} (N/mm^2)	伸び (%)	
			σ_y (N/mm^2)	ϵ_y (μ)				
SD390		1	416.7	2360	1.83	641.2	22.5	
		2	417.6	2410	1.82	645.1	21.5	
		3	415.7	2440	1.82	644.1	21.2	
		4	416.7	2380	1.83	644.1	19.5	
		Ave.	416.7	2400	1.82	643.1	21.2	
	D16	SD490 ¹⁾	1	531.4	2980	1.81	715.7	19.5
			2	559.8	3040	1.87	720.6	18.8
			3	555.9	3070	1.84	725.5	18.5
			4				719.6	18.8
			Ave.	549.0	3030	1.84	720.6	18.9
	SD490 ²⁾	1	540.2	4910	1.85	767.6	17.9	
		2	529.4	4980	1.77	768.6	17.7	
		3	536.3	4970	1.80	771.6	17.1	
		4				761.8	18.0	
		Ave.	535.3	4950	1.81	766.7	17.7	
U6.4	ウルボン	1	1362.7	8490	2.10	1480.4	10.0	
		2	1362.7	8620	2.06	1480.4		
		3	1362.7	8410	2.13	1470.6	10.1	
		4	1362.7	8640	2.05	1470.6	10.5	
		Ave.	1362.7	8540	2.08	1475.5	10.2	

注: 1)はC4-4,5に、2)はC6-1~4に使用

表-3 試験体の諸元

試験体名	呼び強度	軸力比	種 類	主筋強度	補強筋比(%)
C4-1	480	0.3	一体打ち	SD490	0.73
C4-2		0.2	PCa	SD390	0.61
C4-3		0.3			
C4-4		0.4			
C4-5		0.3			
C6-1	600	0.3	一体打ち	SD390	0.73
C6-2		0.2			
C6-3		0.3	PCa		
C6-4		0.4			

($=H/L$, L : 柱上端部での水平変位) によって行い, $R=1.25 \times 10^{-3}$, 2.5×10^{-3} rad. を正負各1回, $R=5 \times 10^{-3}$, 10×10^{-3} , 20×10^{-3} , 30×10^{-3} rad. を正負各2回 づつ繰り返し加力した後, 最終的に $R=50 \times 10^{-3}$ rad. で正負1回の繰り返し加力を行った.

計測は, 部材の加力点位置における全体変形, 柱の曲げ変形, 柱端部のズレ変形を測定した.

§ 3. 実験結果

3-1 破壊状況

各試験体の最終ひび割れ状況を図-4に示す.

(1) F_{c480} シリーズ

曲げひび割れは, 部材角 $R=1.25 \times 10^{-3}$ rad. 時に, C4-2とC4-3の柱脚端部, もしくはスリーブ上端部に発生した. また, その他の試験体でも, 部材角 $R=2.5 \times 10^{-3}$ rad. 時に発生した.

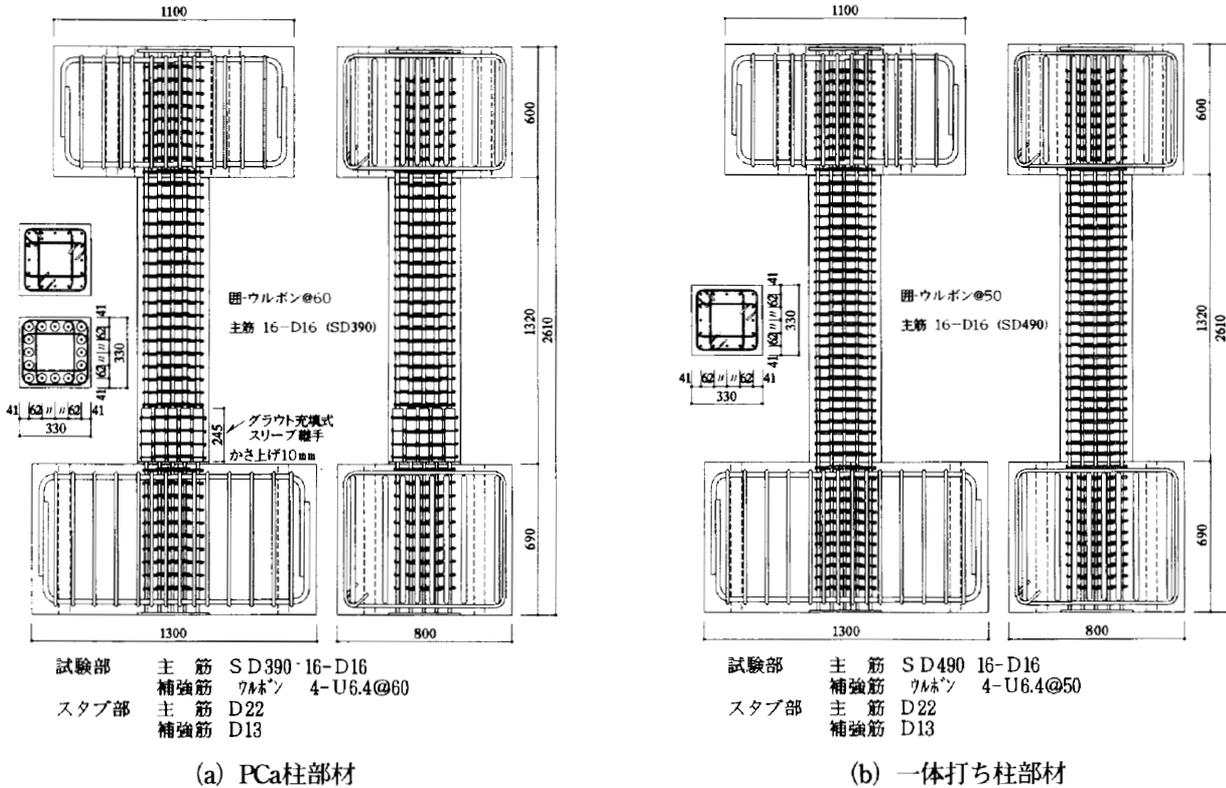


図-1 試験体の形状寸法および配筋

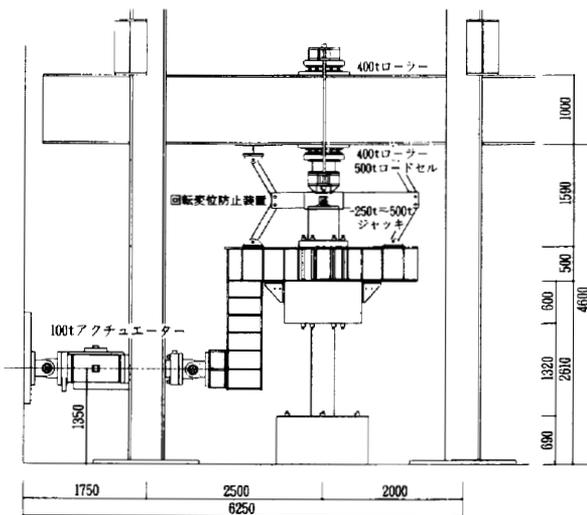


図-2 加力装置の概要

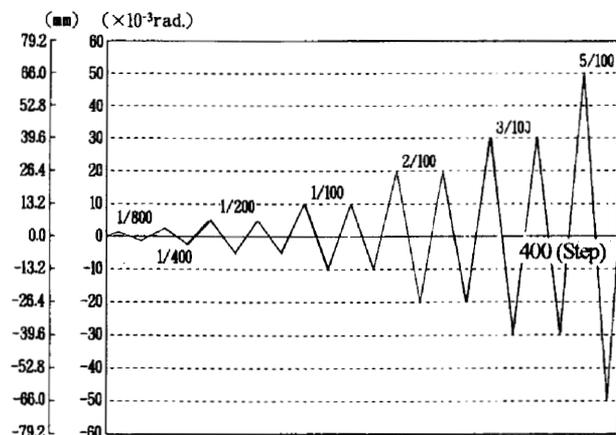


図-3 加力スケジュール

せん断ひび割れは、部材角 $R=5 \times 10^{-3}$ rad.時に、軸力比 η の高いC4-4を除いた全ての試験体で発生した。また、部材角 $R=20 \times 10^{-3}$ rad.時に、C4-3で、2段筋位置に沿って、細かな斜めのひび割れが多数発生した。しかし、その他の試験体では発生しなかった。なお、C4-4は、せん断ひび割れが発生する前に柱頭および柱脚が圧壊した。

一体打ち柱部材C4-1とPCa柱部材C4-3を比較すると、ひび割れ状況に顕著な差は見みられなかった。

(2) FC600シリーズ

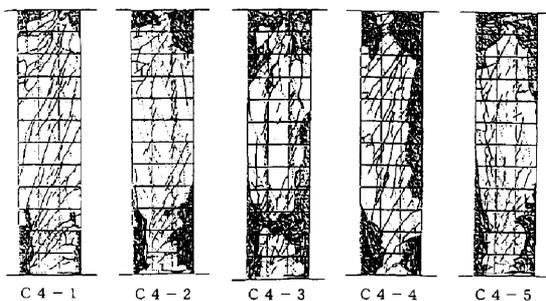
曲げひび割れは、部材角 $R=1.25 \times 10^{-3}$ rad.時に、C6-1とC6-2の柱脚端部、もしくはスリーブ上端部に発生した。また、その他の試験体でも、部材角 $R=2.5 \times 10^{-3}$ rad.時に発生した。

せん断ひび割れは、部材角 $R=5 \times 10^{-3}$ rad.時に、軸力比 η の高いC6-4を除いた全ての試験体で発生した。なお、PCa柱部材C6-4は、せん断ひび割れが発生する前に柱頭および柱脚が圧壊した。

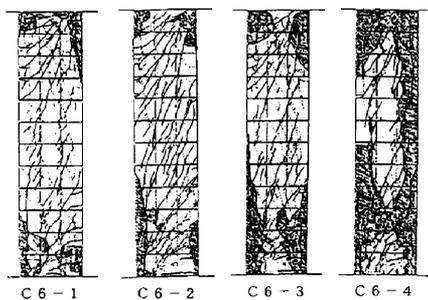
一体打ち柱部材C4-1とPCa柱部材C4-3を比較すると、部材角 $R=20 \times 10^{-3}$ rad.時に、一体打ち柱部材で、2段筋位置に沿って細かな斜めのひび割れが多数発生したが、PCa柱部材では発生しなかった。

3-2 荷重-変形関係

各試験体の実験結果を表-4, 5に示す。また、荷重-変形関係を図-5, 6に示す。



(a) F_c480 シリーズ



(b) F_c600 シリーズ

図-4 最終ひび割れ状況

(1) F_c480 シリーズ

図-5より、各試験体とも、部材角 $R=20 \times 10^{-3}$ rad.まで耐力を維持していることが分かる。その後、耐力低下は見られるものの、安定したループを描いている。

主筋にSD390を使用したC4-2~4の場合、最大耐力に対する部材角 $R=+50 \times 10^{-3}$ rad.時(以降、+の表示の付いている場合は、正の値を示す)の耐力の割合は、C4-2が90%、C4-3が94%、C4-4が74%であり、軸力比 η の大きいC4-4が、他の試験体に比べて、耐力低下の割合は若干大きかった。しかし、 $P-\delta$ 効果を考慮すると、C4-2が98%、C4-3が100%、C4-4が89%であり、大変形時においても、靱性に富んだ性能を有することが分かった。

一体打ち柱部材C4-1とPCa柱部材C4-5を比較すると、最大耐力に対する部材角 $R=+50 \times 10^{-3}$ rad.(一体打ち柱部材C4-1の場合、 $R=+45 \times 10^{-3}$ rad.)時の耐力の割合は、一体打ち柱部材が81%、PCa柱部材が92%であり、一体打ち柱部材よりも、PCa柱部材の方が靱性能を有していることが分かった。また、 $P-\delta$ 効果を考慮すると、一体打ち柱部材が91%、PCa柱部材が101%であり、大変

表-4 実験結果一覧 (F_c480 シリーズ)

試験体	曲げひび割		せん断ひび割		主筋降伏		最大耐力	
	Q	R	Q	R	Q	R	Q	R
C4-1	155	1.25	286	3.41	404	7.42	454	13.86
	161	1.26	296	3.42	339	6.90	453	19.88
C4-2	167	1.25	369	4.42	465	9.02	490	19.89
	172	1.26	331	3.42			487	15.89
C4-3	271	2.47	406	5.33	453	7.12	503	19.86
	220	1.70	386	4.18	432	5.77	505	19.89
C4-4	162	1.25	363	4.42	496	10.46	549	15.90
	205	1.48	361	3.95			529	19.89
C4-5	202	1.70	360	4.62	518	13.06	534	19.89
	191	1.48	330	3.77			534	19.87

注) Q: せん断力(kN), R: 部材角($\times 10^{-3}$ rad.)

上段: 正の値, 下段: 負の値

表-5 実験結果一覧 (F_c600 シリーズ)

試験体	曲げひび割		せん断ひび割		主筋降伏		最大耐力	
	Q	R	Q	R	Q	R	Q	R
C6-1	146	0.98	419	4.92	579	13.03	595	19.85
	129	0.84	432	4.66			595	19.89
C6-2	180	1.23	344	3.05	553	9.86	594	15.76
	178	1.22	387	4.09	549	9.86	582	19.88
C6-3	221	1.45	467	4.93	591	11.67	658	19.86
	209	1.23	464	4.67			645	19.92
C6-4	256	1.67	540	5.83	611	9.92	684	19.86
	230	1.45	516	4.96	578	7.22	655	19.89

注) Q: せん断力(kN), R: 部材角($\times 10^{-3}$ rad.)

上段: 正の値, 下段: 負の値

形時においても、一体打ち柱部材よりもPCa柱部材の方が韌性に富んだ性能を有していることが分かった。

(2) F_c 600シリーズ

図-6より、各試験体とも、部材角 $R=20 \times 10^{-3}$ rad.時まで耐力を維持していることが分かる。その後、耐力の低下は見られるものの、安定したループを描いている。

軸力比 η の高いC6-4は、他の試験体に比べ、耐力低下の割合が若干大きく、最大耐力に対する部材角 $R=+50 \times 10^{-3}$ rad.時の耐力の割合は70%であった。しかし、 $P-\delta$ 効果を考慮すると86%であり、大変形時において

も韌性に富んだ性能を有していることが分かった。

一体打ち柱部材C6-1とPCa柱部材C6-3を比較すると、最大耐力に対する部材角 $R=+50 \times 10^{-3}$ rad.時の耐力の割合は、両試験体とも90%であった。また、 $P-\delta$ 効果を考慮すると、両試験体とも101%であり、一体打ち柱部材とPCa柱部材の差は殆どなく、大変形時においても韌性に富んだ性能を有していることが分かった。

3-3 等価粘性減衰定数

各試験体の履歴曲線より求めた等価粘性減衰定数 h_{eq} の部材角 R による変化を図-7, 8に示す。

(1) F_c 480シリーズ

図-7より、軸力比 η による違いをみると、軸力比 η の大きいC4-3が、他の試験体よりも等価粘性減衰定数 h_{eq} が若干大きな値となっているが、明確な差はなかった。

一体打ち柱部材C4-1とPCa柱部材C4-5を比較すると、部材角 $R=10 \times 10^{-3}$ rad.まではほぼ同じ傾向で推移しているが、それ以降では、PCa柱部材の方が一体打ち柱部材よりも3~4%程度小さな値となった。

(2) F_c 600シリーズ

図-8より、軸力比 η による違いをみると、軸力比 η の大きいC6-4が、他の試験体よりも等価粘性減衰定数

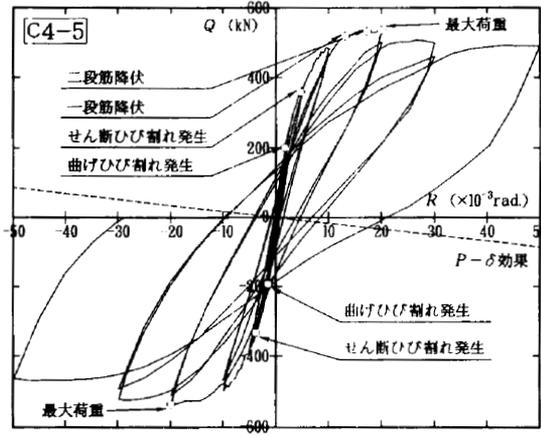
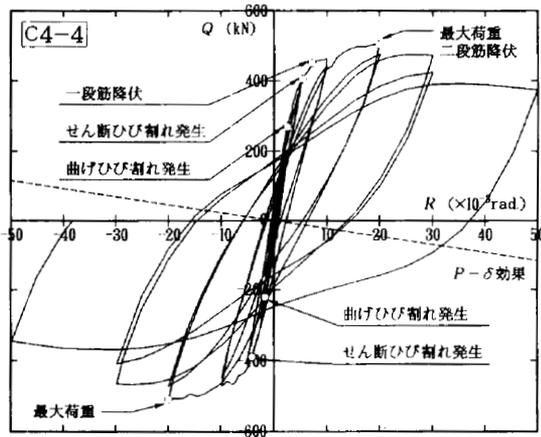
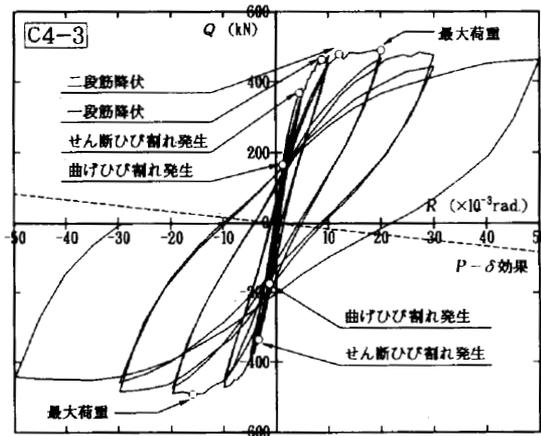
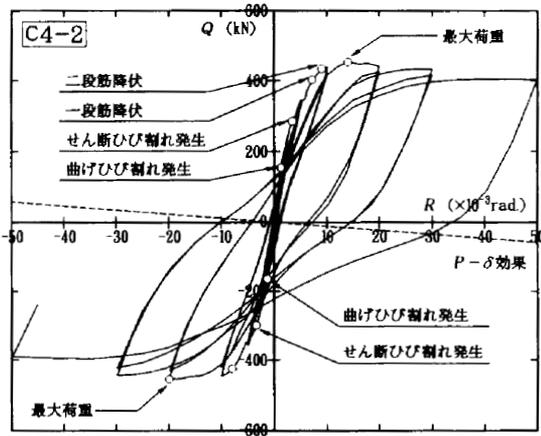
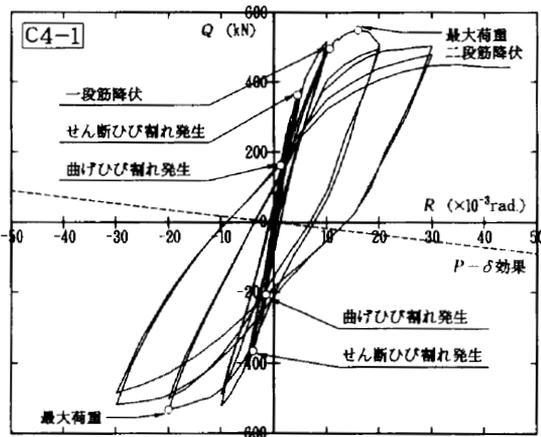


図-5 荷重-変形関係 (F_c 480シリーズ)

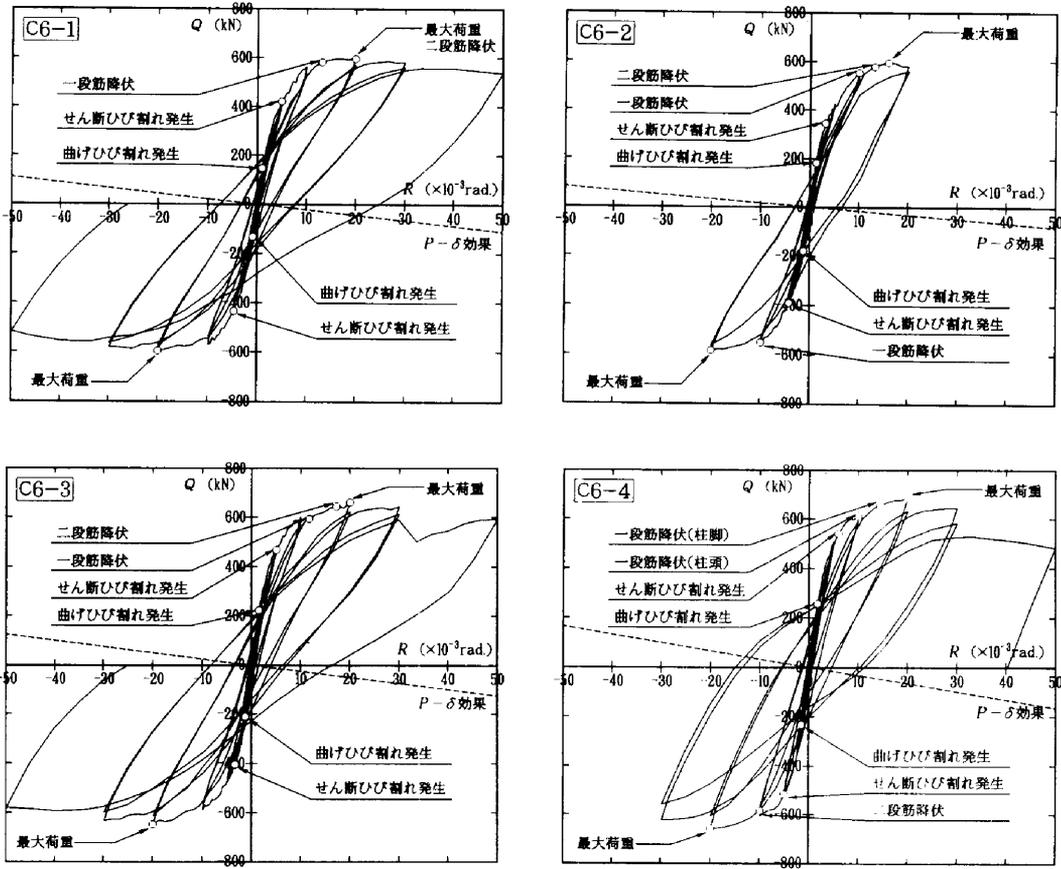
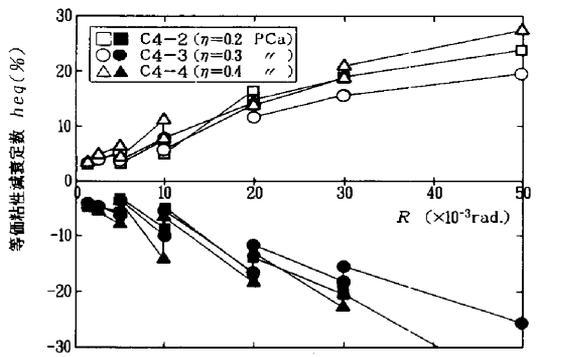
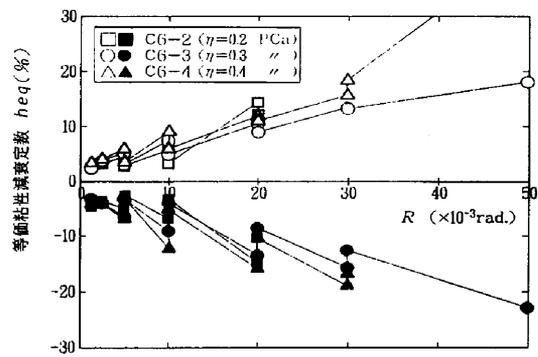


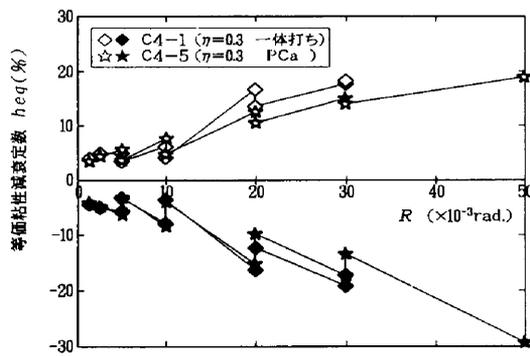
図-6 荷重-変形関係 (F_600 シリーズ)



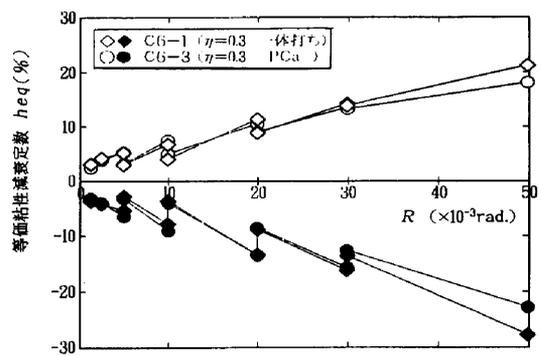
(a) 軸力比の違いによる比較



(a) 軸力比の違いによる比較



(b) 一体打ちとPCaの比較



(b) 一体打ちとPCaの比較

図-7 部材角の変化に伴う等価粘性減衰定数の変化 (F_480 シリーズ)

図-8 部材角の変化に伴う等価粘性減衰定数の変化 (F_600 シリーズ)

h_{eq} が若干大きな値となっているが、明確な差はなかった。一体打ち柱部材C6-1とPCa柱部材C6-3を比較すると、両試験体とも、ほぼ同様の値であった。

3-4 曲率分布

各試験体の各加力サイクルのピーク時における曲率分布状況を図-9, 10に示す。

(1) F_c 480シリーズ

図-9より、各試験体とも、端部に曲げ変形が集中す

る傾向がある。また、PCa柱部材は、スリーブ位置での曲率が小さく、部材角 $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$.以降殆ど変化はなく、その区間は剛体変形のような性状であることが分かった。

(2) F_c 600シリーズ

図-10より、各試験体とも、部材端部に曲げ変形が集中する傾向がある。また、スリーブ位置での曲率は、小さくなっていることが分かった。

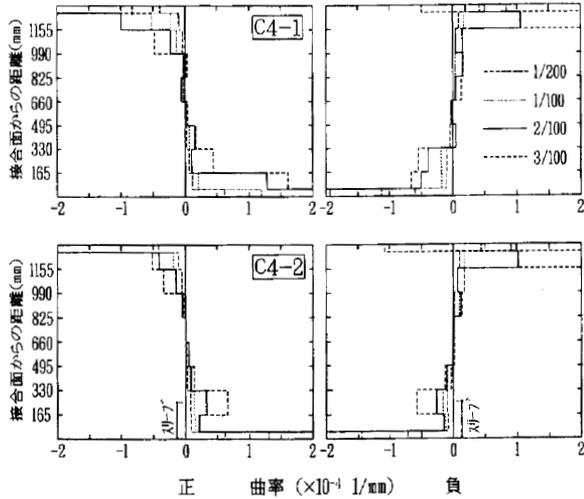


図-9 曲率分布 (F_c 480シリーズ)

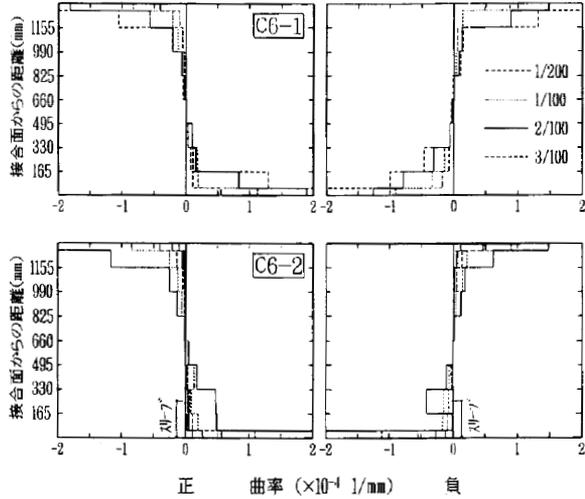
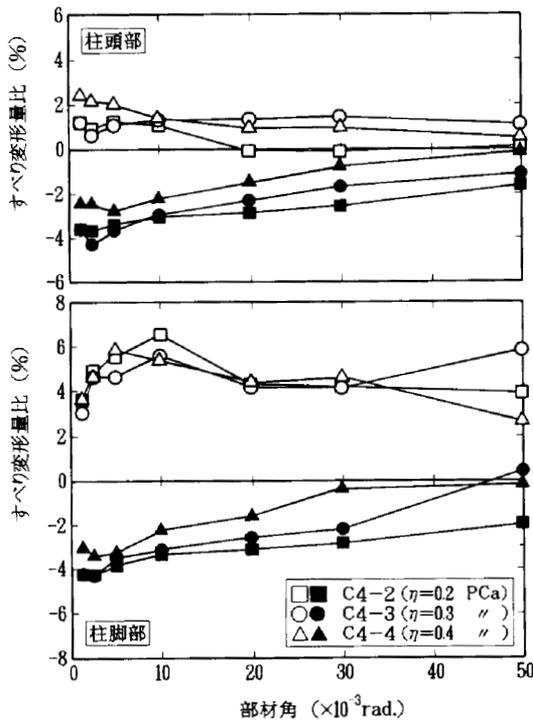
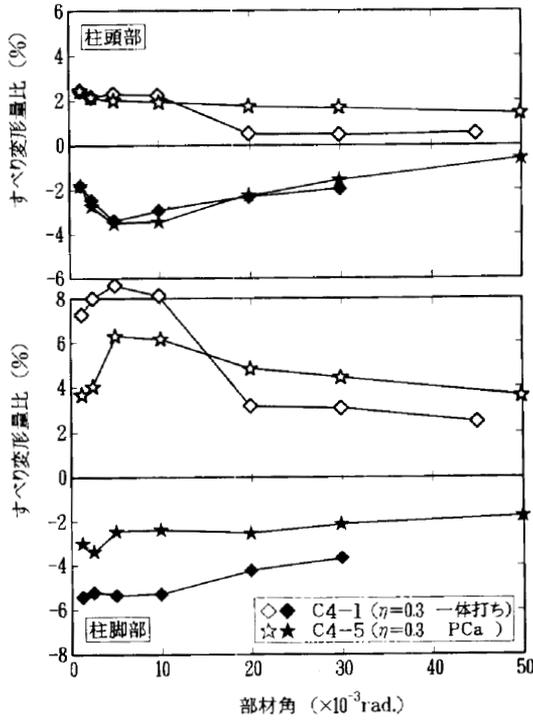


図-10 曲率分布 (F_c 600シリーズ)



(a) 軸力比の違いによる比較



(b) 一体打ちとPCaの比較

図-11 部材角とすべり変形量の関係 (F_c 480シリーズ)

一体打ち柱部材C6-1とPCa柱部材C6-3を比較すると、スリーブの有無に関わらず、部材角 $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$.までは、両試験体とも、同様な曲率分布であった。それ以降では、PCa柱部材は、スリーブ部の曲率は殆ど変化しないのに対し、一体打ち柱部材は、曲率が急激に大きくなる。しかしながら、柱中央部から柱頭部にかけては、ほぼ同様な曲率分布であった。

3-5 打継ぎ部における挙動

各試験体のすべり変形量比と部材角 R との関係を図-11, 12に示す。

(1) $F_c 480$ シリーズ

図-11より、すべり変形量比の関係をみると、C4-2~4では、正加力時において、軸力比 η の違いによる影響はない。柱頭部では、柱脚部よりもすべり変形量比は小さく、柱脚部では、部材角 $R=5 \sim 10 \times 10^{-3} \text{rad}$.ですべり変形量比は最大となり、それ以降減少していく傾向があった。負加力時においては、柱頭部・柱脚部とも、同程度のすべり変形量比であり、軸力比 η が大きいものほどすべり変形量比は小さくなった。

一体打ち柱部材C4-1とPCa柱部材C4-5を比較すると、柱頭部では両試験体とも、変形量比は、ほぼ同様な値であった。柱脚部では、部材角 $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$.まではPCa柱部材の方が小さい値を示した。

(2) $F_c 600$ シリーズ

図-12より、すべり変形量比の関係をみると、C6-2~

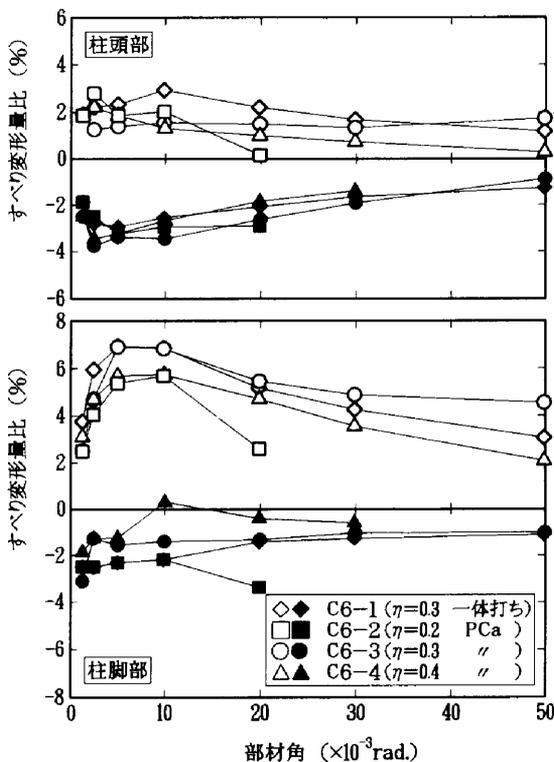


図-12 部材角とすべり変形量の関係 ($F_c 600$ シリーズ)

4では、軸力比 η の違いによる差は明確ではなかった。柱脚部では、正加力時の部材角 $R=5 \sim 10 \times 10^{-3} \text{rad}$.で、すべり変形量比は最大となり、その以降減少していく傾向があった。

一体打ち柱部材C6-1とPCa柱部材C6-3を比較すると、柱頭部では両試験体とも、変形量比は、ほぼ同様な値を示している。また、柱脚部では、正加力時の部材角 $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$.以降、若干PCa柱部材の方が大きい値を示しているものの、両試験体に明確な差はなかった。

§ 4. おわりに

PCa柱部材の曲げせん断実験で得られた知見を以下に列挙する。

- ①荷重と全体変形関係は、両シリーズとも、部材角 $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$.時まで耐力を維持している。またそれ以降では、耐力低下はみられるものの、安定したループを描き、大変形時においても、韌性に富んだ性能を有していることが分かった。
- ②曲率分布は、PCa柱部材においては、スリーブ位置での曲率は小さく、部材角 $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$.以降殆ど変化がなく、剛体変形のような性状を示していることが分かった。
- ③試験体端部のすべり量は、全試験体で、柱頭部より柱脚部の方が大きくなる傾向がある。また、一体打ち柱部材との比較では、明確な差はなかった。
- ④各種の検討結果から、PCa柱部材は、一体打ち柱部材と同等の性能を有していることが分かった。

最後に、本研究を行うに際して、関東学院大学工学部建築学科植谷栄次教授に貴重な御指導御助言を賜りました。ここに謹んで感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築センター：建築物の構造規定, 1994.
- 2) 日本建築センター：鉄筋継手の性能試験及び設計 (報告書), 1986.
- 3) 塩川 真他：超高層RCプレキャストコンクリート工法の開発 (その3, 4), 日本建築学会大会学術講演梗概集C-2, pp.5-8, 1996.