

論文 鋼管スリーブによるグラウト充填式継手を有する PCa 柱の力学特性

中田浩之*1・林 芳尚*2・鈴木計夫*3・中塚 佑*4

要旨：内面にチェッカー状の突起を持つ電縫鋼管を利用したグラウト充填式継手を、材端部に有するプレキャスト柱部材の諸力学特性に及ぼす継手の有無の影響、ならびに継手に用いる鋼管スリーブ外面の付着の有無の影響について実験的に検討した。その結果、同継手を有するプレキャスト試験体では継手の無い一体打ち試験体に比べ、初期剛性、諸ひび割れ耐力、曲げ耐力およびせん断耐力はほぼ同等であり、変形性能は2倍以上であった。また、継手部鋼管スリーブ外面の付着がない場合、部材中央部の主筋の付着応力度は大きくなるが、この部分の付着破壊を防止すればせん断抵抗力を保持できる。

キーワード：プレキャスト、柱、鉄筋継手、スリーブ、鋼管

1. はじめに

内面にチェッカー状の突起を有する電縫鋼管スリーブを利用したグラウト充填式鉄筋継手が新たに開発され、同継手の単体試験により、鉄筋の定着長さやグラウト強度等が継手内鉄筋の付着応力度—すべり関係に及ぼす影響が明らかにされると同時に、日本建築センター「継手性能判定規準（1982）」におけるSA級の性能を有する継手が設計できることが確認されている[1]。本研究は、この鋼管スリーブによるグラウト充填式鉄筋継手を材端部に有するプレキャスト(PCa)柱の諸力学特性を調べるもので、鋼管スリーブ継手の有無、ならびに継手部鋼管スリーブ外面の付着の有無などの影響等について、実験的に検討したものである。

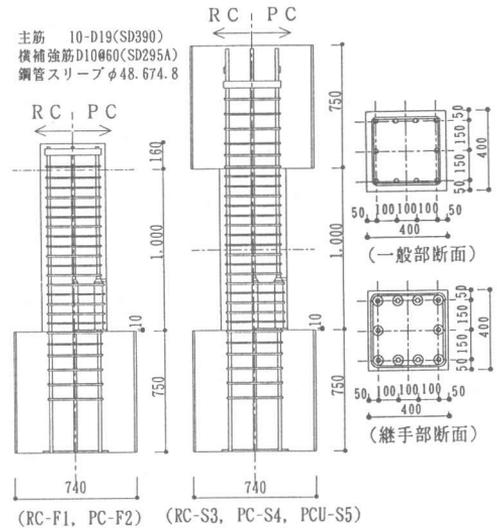


図-1 試験体形状および配筋

表-1 試験体一覧

試験体名	曲げ破壊型試験体		せん断破壊型試験体		
	RC-F1	PC-F2	RC-S3	PC-S4	PCU-S5
継手の有無	無 (一体打ち)	有 (プレキャスト)	無 (一体打ち)	有 (プレキャスト)	有 (プレキャスト)
スリーブ外面付着	—	有(ビード)	—	有(ビード)	無(ワックス塗)
試験体形状	I 形 (下スタブ付)		I 形 (上下スタブ付)		
加力方式	片持梁式加力		建研式逆対称加力		
軸力(軸力比)	65 [t] (N/bd $\sigma_B=0.1$)		130 [t] (N/bd $\sigma_B=0.2$)		
シアスパン比	2.5		1.25		

2. 実験概要

2.1 試験体及び使用材料

試験体の形状と配筋を図-1に、試験体一覧を表-1に、また継手部詳細を図-2に示す。試験体は、実大の約 1/2

*1 (株)奥村組建築設計部技術課係長、博(工)(正会員)

*2 (株)奥村組建築部係長(正会員)

*3 大阪大学教授 工学部建築工学科、工博(正会員)

*4 大阪大学講師 工学部建築工学科、工博(正会員)

のスケールをもつ一辺が40cmの正方形断面の鉄筋コンクリート柱である。ヒンジ部材を想定して曲げ破壊型に設計されたI形試験体2体と、非ヒンジ部材を想定してせん断破壊型に設計されたI形試験体3体とからなる。曲げ破壊型試験体は、後述するような外面に突起を付加した鋼管スリーブを用いた継手を柱脚部に有するPCa柱試験体(PC-F2)と、継手を有しない一体打ち柱試験体(RC-F1)である。せん断破壊型試験体は、外面突起付き鋼管スリーブ継手を柱脚部に有するPCa柱試験体(PC-S4)と、継手のない一体打ち柱試験体(RC-S3)、および外面に突起が無く、さらにその外面にワックスを塗布し当該部分のコンクリートとの付着を除去した鋼管スリーブをもつ継手を柱脚部に有するPCa柱試験体(PCU-S5)である。なお、PCU-S5試験体は、主筋の付着応力状態がより厳しい短柱となりやすい非ヒンジ柱のせん断抵抗機構を調べるためのものである。

継手に用いた鋼管スリーブは、図-2中に示すようなチェッカー状の突起を有する鋼板を加工・成形した、内面に突起を持つ電縫鋼管であり、外面に溶接ビードによる横節状の突起(高さ2.5mm、間隔30mm)を付加したものと付加しないものとがある。

使用したコンクリートは骨材最大粒径が15mmのレディミクストコンクリートである。鋼管スリーブ内部および接合目地部に充填するグラウト材には、プレミックスタイプの無収縮高強度モルタルを用いた。表-2、3に使用材料の力学的性質を示す。なお、柱試験体と同時に製作した継手の単体試験結果によれば、この鉄筋継手の性能は「鉄筋継手性能判定基準」によるSA級と判定された。

2.2 荷重および測定方法

荷重は、曲げ破壊型試験体では片持梁式加力方式、せん断破壊型試験体では建研式逆対称加力方式の荷重装置を用いて行い、一定の軸力を加えた状態の試験体に油圧ジャッキで正負交番繰り返し水平力を作用させて行った。荷重プログラムは、表-4に示すとおりである。柱の部材角(R)の測定は、曲げ破壊型試験体では下スタブに対する柱頂部荷重点の相対水平変位を、せん断破壊型試験体では上下スタブ間の相対水平変位をそれぞれ電気式変位計で測定することにより行った。材端部5cm区間の水平(ずれ)変形(δ_{jh})の測定は柱側面に貼り付けたプレート片の、また、材端部1D(=40cm)区間の回転角(θ)の測定は柱コンクリートに埋め込んだボルトの、スタブに対する相対変位を測定することにより行った。主筋および横補強筋のひずみ度は検長3mmのひずみゲージにより測定した。

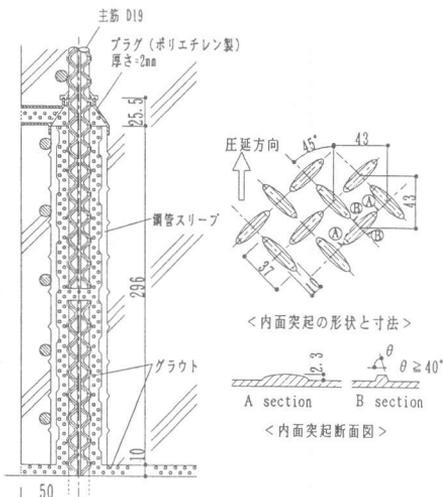


図-2 鋼管スリーブ継手部詳細

表-2 コンクリートとグラウトの力学的性質

コンクリート			グラウト
圧縮強度 σ_c [kg/cm ²]	ヤング係数*1 E _c [×10 ⁵ kg/cm ²]	割裂強度 σ_t [kg/cm ²]	圧縮強度 [kg/cm ²]
416	2.61	35.9	982

*1) 圧縮強度の1/3の応力度における割線剛性

表-3 鉄筋と鋼管スリーブの力学的性質

	断面積 [cm ²]	降伏強度 σ_y [kg/cm ²]	引張強度 σ_u [kg/cm ²]	伸び [%]
D10鉄筋	0.7133	3570	5140	27
D19鉄筋	2.865	5040	6880	24
φ48.6スリーブ	6.967	4780*1	5120	22

*1) 0.2%オフセットひずみ度時の応力度

表-4 荷重プログラム

(1) 曲げ破壊型試験体 RC-F1、PC-F2

部材角 [rad.]	$\pm \frac{5}{1000}$	$\pm \frac{10}{1000}$	$\pm \frac{20}{1000}$	$\pm \frac{33}{1000}$	$\pm \frac{50}{1000}$	$\pm \frac{67}{1000}$	片押し
回数	1	4	4	4	1	1	0.5

(2) せん断破壊型試験体 RC-S3、PC-S4、PCU-S5

部材角 [rad.]	$\pm \frac{5}{1000}$	$\pm \frac{10}{1000}$	$\pm \frac{20}{1000}$	$\pm \frac{33}{1000}$	$\pm \frac{50}{1000}$	片押し
回数	4	1	1	1	1	0.5

3. 実験結果及び考察

3. 1 荷重-変形関係および破壊経過

各試験体の水平荷重

(Q) - 部材角 (R) 関係を図-3に、最大耐力時近傍のひび割れ状況を図-4に示す。各試験体の破壊経過は概ね以下の通りである。

曲げ破壊型試験体RC-F1、PC-F2では、いずれも曲げひび割れ、曲げせん断ひび割れおよびせん断ひび割れが材端部1.5D区間に順次発生し、 $R = 8 \sim 10 \times 10^{-3} \text{ rad}$. 時に主筋が引張降伏した後、試験体RC-F1では $R = 20 \times 10^{-3} \text{ rad}$. 時、試験体PC-F2では $R = 31 \times 10^{-3} \text{ rad}$. 時に、材端部コンクリートの圧壊を伴い最大耐力に達した。この時点で横補強筋のひずみ度の最大値はほぼ降伏ひずみ度に達していた。その後、一体打試験体RC-F1では、 $R = 67 \times 10^{-3} \text{ rad}$. 時には材端部の主筋の座屈を伴い耐力が著しく低下した。

PCa 試験体PC-F2では、 $R = \pm 33 \times 10^{-3} \text{ rad}$. 時に主に梁型スタブからの抜出しによると思われる材端部打継ぎ界面のひび割れ幅が10mm程度まで進展した。しかし、それ以後も材端部コンクリートの著しい圧壊や主筋部の座屈はみられず、最終変形時 ($R = 100 \times 10^{-3} \text{ rad}$.) においても最大耐力の80%程度の耐力を保持し、RC-F1に比べ優れた変形性能を示した。

せん断破壊型試験体RC-S3、PC-S4、PCU-S5では、いずれも材端部に曲げひび割れおよびせん断ひび割れが生じ

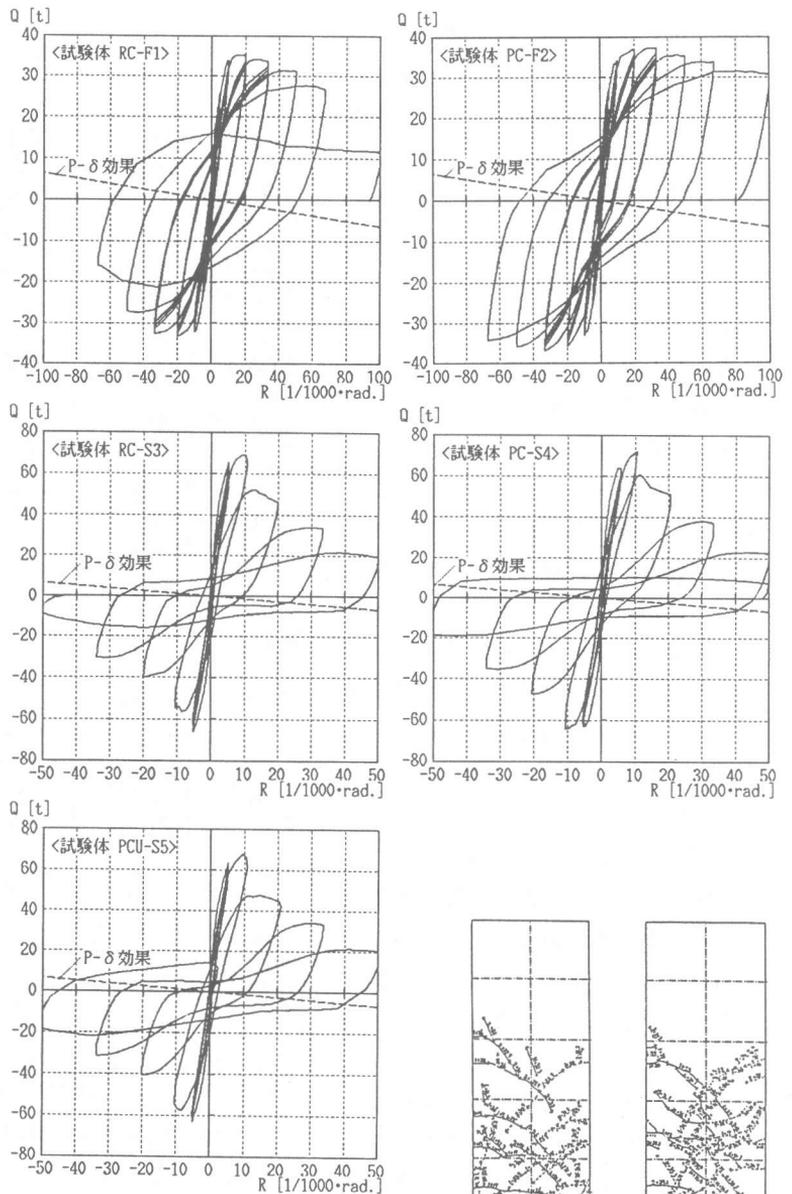
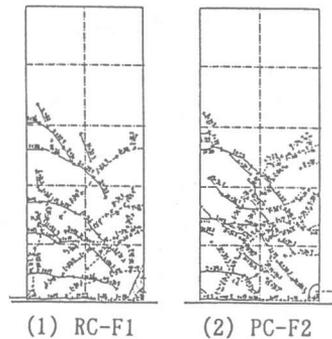
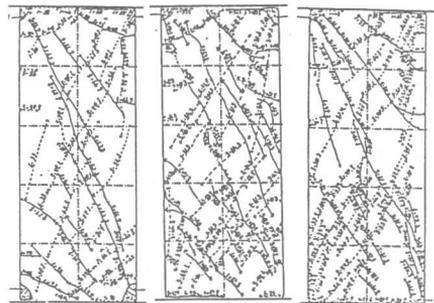


図-3 水平荷重 Q -部材角 R 関係



(1) RC-F1

(2) PC-F2



(3) RC-S3

(4) PC-S4

(5) PCU-S5

図-4 ひび割れ状況 (スケッチ)

た後、 $R = 3 \sim 6 \times 10^{-3}$ rad. 時において、部材中央部にせん断ひび割れが生じた。その後、中央部せん断ひび割れの進展とともに横補強筋が降伏し、 $R = 9 \sim 10 \times 10^{-3}$ rad. 時に最大耐力に達した。

3. 2 初期剛性と諸耐力および限界変形

表-4に初期剛性（ひび割れ発生前の剛性）、諸ひび割れ耐力、降伏耐力、最大耐力ならびに限界変形時部材角の実験値および各種計算値を示す。なお、限界変形時部材角実験値 R_u は、 $Q-R$ 関係の各所定部材角時の1回目の包絡線が最大耐力の80%に低下した時点での部材角とした。また、同表には参考までに、最大耐力時における部材中央区間の主筋の平均付着応力度の実験値（せん断破壊型試験体の隅角部主筋と中間部主筋の平均）と各種付着応力度計算値も併記している。

初期剛性および諸ひび割れ耐力については、実験値と計算値の間に差異は見られるが、曲げ破壊型、せん断破壊型のいずれの試験体も、継手の有無による著しい違いは見られなかった。

曲げ破壊型試験体（RC-F1, RC-F2）の降伏耐力および最大耐力実験値は、PCa試験体の方が、剛性の高い継手部による材端曲げ圧縮部の強化ならびに後述の主筋のひずみ硬化等のために数%程度大きいものの大差は無かった。

せん断破壊型試験体の最大耐力実験値は、RC指針式[2]によるせん断耐力計算値の1.0~1.1倍程度であった。しかし、外面の付着を除去した鋼管スリーブ継手を持つPCa試験体PCU-S5では、外面突起付き鋼管スリーブ継手を持つ試験体PC-S4に比べやや劣っていた。これは、後述のようにPCU-S5の主筋の一部で付着破壊が生じていたためと考えられる。また、曲げ破壊型試験体の限界変形時部材角の実験値はいずれも計算値を上回ったが、PCa試験体PC-F2では一体打ち試験体RC-F1の2倍以上の変形性能を有していた。この一因として、PCa試験体では、材端部に剛性の高い継手スリーブがあるために曲げ圧縮部コンクリートの強化が図られるとともに、主筋の座屈が生じにくいことが考えられる。

表-5 初期剛性と諸耐力および限界変形の実験値と計算値

		曲げ破壊型試験体		せん断破壊型試験体		
		RC-F1	PC-F2	RC-S3	PC-S4	PCU-S5
初期剛性 K_e [$\times 10^3$ t/rad]	実験値	12.0	12.1	26.3	28.9	27.2
	計算値 ¹⁾ (実/計)	13.4 (0.90)	13.4 (0.90)	34.2 (0.77)	34.2 (0.85)	34.2 (0.80)
曲げひび割れ耐力 Q_{bc} [t]	実験値	9.1	11.0	30.1	30.0	30.0
	計算値 ²⁾ (実/計)	9.7 (0.94)	9.7 (1.13)	29.5 (1.02)	29.5 (1.02)	29.5 (1.02)
曲げせん断ひび割れ耐力 Q_{bsc} [t]	実験値	19.0	20.0	-	-	-
	計算値 ³⁾ (実/計)	19.3 (0.98)	19.3 (1.04)	-	-	-
せん断ひび割れ耐力 Q_{sc} [t]	実験値	27.9	25.1	57.9	54.8	49.9
	計算値 ⁴⁾ (実/計)	19.2 (1.45)	19.2 (1.31)	33.8 (1.71)	33.8 (1.62)	33.8 (1.48)
降伏耐力 Q_y [t]	実験値	32.0	33.2	-	71.9	-
	計算値 ⁵⁾ (実/計)	29.0 (1.10)	29.0 (1.14)	73.2 (-)	73.2 (0.98)	73.2 (-)
最大耐力 Q_u [t]	実験値	35.2	37.2	69.0	71.9	67.8
	計算値 Q_{bu} ⁵⁾ (実/計)	32.9 (1.07)	32.9 (1.13)	79.0 (0.87)	79.0 (0.91)	79.0 (0.86)
	計算値 Q_{su} ⁶⁾ (実/計)	36.1 (0.98)	36.1 (1.03)	66.1 (1.04)	66.1 (1.09)	66.1 (1.03)
	付着応力度 τ_{bu} [kg/cm ²]	-	-	56.6	65.2	72.5
限界変形時部材角 R_u [$\times 10^{-2}$ rad]	実験値	50	≥ 100	10	13	10
	計算値 ¹⁰⁾ (実/計)	17.0 (2.94)	17.0 (≥ 5.88)	9.8 (1.02)	9.8 (1.33)	9.8 (1.02)
	計算値 τ_{bu} ⁷⁾ (実/計)	64.1	64.1	64.1 (0.88)	64.1 (1.02)	64.1 (1.13)
	計算値 τ_{sc} ⁸⁾ 計算値 τ_{st} ⁹⁾	29.0	-	73.7	71.1	-

- $K_e = \frac{L}{\frac{L^3}{12E_c \cdot I_e} + \kappa \frac{L_0}{G_c \cdot A_c}}$ $L_0 = L + 2 \cdot 0.25D$ L : 柱の内法長さ (=2a)
 a : 柱のシフト I_e : 柱の等価断面二次モーメント
 $\kappa = 1.2$ G_c : コンクリートのせん断弾性係数 A_c : 柱断面積 D : 柱せい
 N : 軸力 Z_e : 柱の等価断面係数
- $Q_{bc} = (1.8\sqrt{\sigma_B} + \frac{N}{A_c}) \cdot Z_e / a$ b : 柱幅 d : 柱の有効せい
 $M_{bc} = Q_{bc} \cdot a$ $M/Q = a$
- $Q_{bsc} = 0.265b \cdot d \cdot \sqrt{\sigma_B} + \frac{M_{bc}}{M/Q - d/2}$ $\sigma_0 = N/A_c$ $kc = 0.72$
 $j = 7/8 \cdot d$
- $Q_{sc} = (1 + \frac{\sigma_0}{150}) \{ \frac{0.085 \cdot kc \cdot (500 + \sigma_B)}{M/(Q \cdot d) + 1.7} \} \cdot b \cdot j$ $\sigma_0 = N/A_c$ $kc = 0.72$
 $j = 7/8 \cdot d$
- e 関数による主筋降伏時耐力 (Q_y)、曲げ耐力 (Q_{bu})、 $\epsilon_c = 0.3\%$
- RC指針[2]によるせん断耐力 (以下の式中の記号は文献参照)
 $Q_{su} = p_w \cdot \sigma_{wy} \cdot D \cdot j \cdot t \cdot \cot \phi + \tan \theta / 2 \cdot (1 - \beta) \cdot D^2 \cdot v \cdot \sigma_B$
 ヒンジ領域回転角 $R_p = 1/67$ (曲げ破壊型試験体)、0 (せん断破壊型試験体)
- RC指針[2]による付着強度 $\tau_{bu} = \tau_{co} + \tau_{st}$
 $\tau_{co} = (0.4bi + 0.5) \sqrt{\sigma_B}$
 $\tau_{st} = (\frac{20}{N_t} + \frac{5N_u}{N_t} + \frac{15N_s}{N_t}) \cdot \frac{p_w' \cdot b \cdot \sqrt{\sigma_B}}{db}$ ($bi = bsi < bci$)
- 曲げ作用による付着応力度[2] $\tau_f = db \cdot 2 \sigma_y / 4 (L - d)$
- トラス機構形成に必要な付着応力度[2] $\tau_t = b \cdot p_{wt} \cdot \sigma_{wy} \cdot \cot \phi / \Sigma \phi$
- RC指針[2]のヒンジ部材に対するせん断耐力算定式より逆算したヒンジ領域の回転角 R_p に、菅野式[3]による剛性低下率 α_y を考慮した降伏時部材角 R_y を加えたもの。

3. 3 材端部の変形状

曲げ破壊型試験体の材端部1D区間の曲げ回転角 (θ) と材端部5cm区間の水平変形 (δ_{jh}) の推移 (正加力ピーク時) を、横軸に部材角 (R) をとって図-5、6に示す。図-5より、一体打ち、PCa 両試験体とも部材角 R と材端部の曲げ回転角 θ はほぼ等しく、継手の有無によらず材端部ヒンジ領域における変形が支配的であることがわかる。

また、図-6によれば、材端部の水平変形量 δ_{jh} は、両試験体とも $R = 20 \times 10^{-3}$ rad. 時には0.8~1.0mm程度となったが、この時点まで両試験体で著しい差は見られなかった。

3. 4 主筋のひずみ度

各試験体において、各載荷階第1サイクルの正加力ピーク時における主筋のひずみ度分布の一例を、破壊形式毎にまとめて図-7に示す。曲げ破壊試験体では、部材角 $R = 5 \times 10^{-3}$ rad. の載荷階ではいずれも弾性で継手の有無による差は殆ど見られない。しかし、いずれも降伏ひずみ度を超える $R = 10 \times 10^{-3}$ rad. 以降の載荷階では材端部のひずみ度は一体打ち試験体RC-F1よりPCa試験体PC-F2の方が大きく、この部分に変形が集中しひずみ硬化が進展していると推測される。

せん断破壊型試験体では、いずれの試験体も最大耐力を示す $R = 10 \times 10^{-3}$ rad. 載荷階まで主筋のひずみ度はほぼ降伏ひずみ度以内に留まっていた。また、試験体PCU-S5では鋼管スリーブ外面の付着がないため継手両端での主筋のひずみ度が等しくならざるを得ないが、部材中央側のひずみ度が部材端側のひずみ度と等しくなり、結果として他の試験体に比べ部材中央区間の主筋のひずみ差、すなわち主筋の付着応力度が大きくなっている。このことは、せん断ひび割れのために材端部引張側の主筋では見かけの付着応力度が小さくなることを考慮すれば、継手部が引張側となる場合より、継手部が圧縮側となる場合において、部材中央部の付着応力度状態がより厳しくなることを示している。

3. 5 主筋の付着

応力度とトラス機構

によるせん断抵抗力
ここでは、せん断破壊型試験体の最大耐力時における付着破壊の有無を検討するため、いずれも最大耐力を迎えた $R = 10 \times 10^{-3}$ rad. 載荷階の正加力時における、柱の両端部を除く部

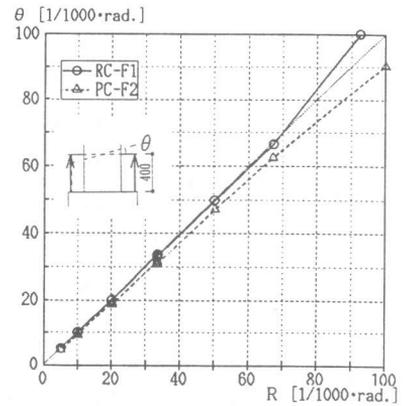


図-5 端部1D区間の回転角の推移

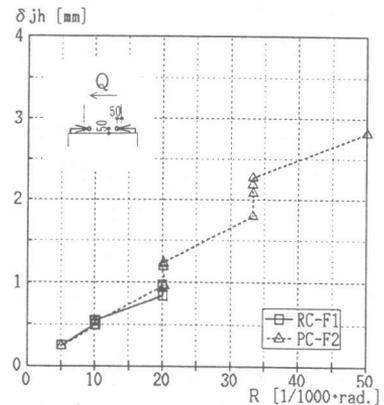
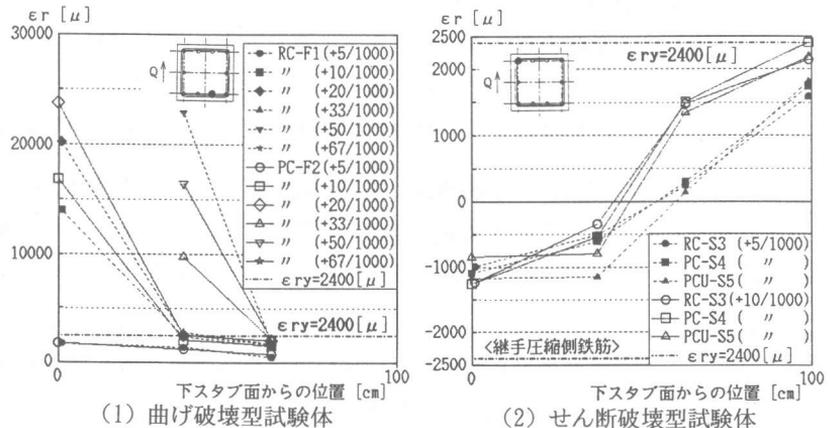


図-6 端部水平変形の推移



(1) 曲げ破壊型試験体

(2) せん断破壊型試験体

図-7 主筋ひずみ度分布

材中央区間での主筋の平均付着応力度 (τb) と柱せん断力 (Q) との関係を図-8にまとめて示す。ここで τb は、いずれも継手部が圧縮側となる隅角部主筋と直接横補強筋のかかっていない中間部主筋の値である。

図-8によれば、いずれの試験体も Q の増加とともに τb は増加するが、継手スリーブ外面の付着がないため載荷初期から他の試験体より主筋の付着力が大きくなる試験体 PCU-S5 の中間部主筋の τb は、最大耐力時直前に Q の増大にも関わらず低下性状を示す。このことは、試験体 PCU-S5 では主筋の一部で付着破壊が生じたことを示唆するものと考えられる。次に、図-9は、図-8と同様に $R=10 \times 10^{-3}$ rad. 載荷階の正加力時における、主筋のひずみ度分布から算定した主筋の付着力から得られるトラス機構 (角度 $\phi=45^\circ$ と仮定) によるせん断力 Qtb と柱のせん断力 Q との関係を、せん断破壊型試験体について示したものである。柱中央部の主筋の付着応力度には前出の図-8で示されるように明確な差が認められたにも関わらず、図-9によれば各試験体の $Qtb-Q$ 関係はほぼ同等となっている。このことは、部材中の主筋の一部に付着がない部分があっても、その他の部分で部材に必要な付着力を確保するように付着設計を行えば通常の RC 部材と同等のせん断抵抗力を保持できることを示している。

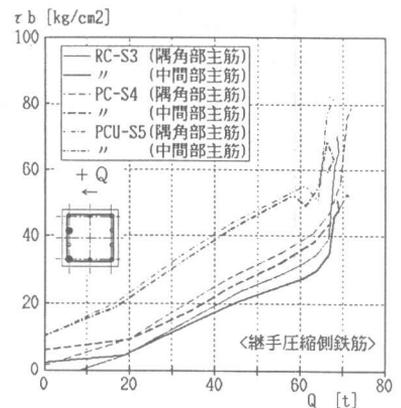


図-8 $\tau b-Q$ 関係

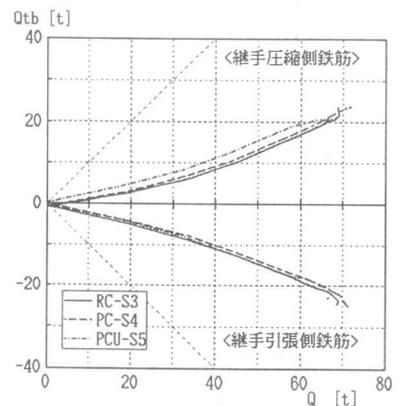


図-9 $Qtb-Q$ 関係

4. まとめ

本実験より得られた主な結果を以下にまとめる。

- (1) 鋼管スリーブ継手を有するPCa柱試験体は、継手のない一体打ち試験体に比べ、ほぼ同等の初期剛性、諸ひび割れ耐力、降伏耐力および曲げ耐力、ならびに2倍以上の変形性能を示した。
- (2) 外面に突起を付加した鋼管スリーブ継手を有するPCa柱試験体は、継手のない一体打ち試験体と同等のせん断耐力を有していた。
- (3) 外面の付着を除去した鋼管スリーブ継手を有するPCa柱試験体では、部材中央部の主筋の付着応力度が大きくなり、この部分の主筋の一部が付着破壊したためせん断抵抗力が若干低下した。付着有効部分のみで部材に必要な付着力が確保できれば、せん断耐力は確保できる。

[謝辞] 本実験に際し、日本鋼管(株)と電気化学工業(株)より種々のご助力と資材の提供を賜りました。また、日本建築総合試験所・益尾潔室長ならびに(株)奥村組の継手研究会の皆様には、種々のご助言とご協力を賜りました。ここに記して謝意を表します。

- [参考文献] 1) 林芳尚・清水良平・中塚侖・鈴木計夫：電縫鋼管スリーブを用いたグラウト充填式鉄筋継手の基礎的性能：コンクリート工学論文集，第5巻第2号，pp.65~75，1994.7
 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説(1990)、pp.104-150
 3) 菅野俊介：鉄筋コンクリート部材の復元力特性に関する研究，コンクリートジャーナル，Vol.11，pp.1~9，1973