

論文 外殻薄肉プレキャスト RC 柱部材の一体性挙動に関する研究

松本 智夫*・西原 寛*・鈴木 英之*・田畑 卓*

要旨: 外殻薄肉PCa管として、遠心成形による薄肉中空角型コンクリート管および高流動コンクリートによる薄肉PCa管に、中詰めコンクリートを場所打ちした柱部材の曲げせん断加力実験を行い、耐力および変形能を在来の一体打ちRC柱部材と比較した。その結果、外殻PCa管のコンクリートが高強度となることにより耐力の上昇がみられたが、外殻PCa管に帯筋および主筋を有する試験体では、外殻PCa管と中詰めコンクリートとの一体性が十分ではなく、界面のずれ破壊が耐力低下の原因となった。

キーワード: 外殻薄肉PCa管, RC柱部材, 曲げせん断加力, 耐力, 変形, 一体性

1. はじめに

外殻を薄肉の中空角型コンクリート管によるプレキャスト(PCa)部材とし、中詰めコンクリートを場所打ちとした柱(薄肉PCa柱)部材を製作した。外殻薄肉PCa管としては、遠心力成形および高流動コンクリートで製造した薄肉PCa管を用いた。製作した試験体に対し曲げせん断加力実験を行い、在来の一体打ちRC柱部材と比較して、外殻と中詰めコンクリートの強度、剛性が異なること、帯筋と主筋とが直接は緊結されないこと、外殻と中詰めコンクリートの付着で一体化が図られていることなどに着目し、部材としての挙動の一体性について検証した。

2. 実験概要

2.1 試験体および使用材料

表-1に各試験体の構造諸元および断面の比較を示す。試験体は、主筋の降伏強度の大小から想定される柱部材の破壊モードにより、曲げ降伏先行型(Bシリーズ)とせん断破壊先行型(Sシリーズ)とに大別され、各々の想定破壊モードについて、表-1の4タイプの工法試験体を製作した。B(S)-1は、主筋のみが異なる在来工法の場所打ちRC柱試験体である。B(S)-2は、帯筋のみ内蔵の遠心成形管に主筋を挿入して中詰めコンクリートを場所打ちした試験体である。B(S)-3は、B(S)-2と同様な工法であるが、外殻薄肉PCa管が遠心成形管とほぼ同じ厚さの高流動コンクリートにより製作された。B(S)-4は、それぞれの主筋を帯筋に緊結した状態で高流動コンクリートを充填して製作されたやや厚めの中空角型PCa管に、中詰めコンクリートだけを打込んだ試験体である。

主筋については、全試験体とも継手のない一本ものを用い、継手工法の影響を本実験要因から除いた。なお、帯筋については、全試験体とも溶接閉鎖型で中子筋のない同一形状のものを同数配筋しているため、B(S)-1,4については主筋と緊結されており、B(S)-2,3については外殻PCa管内に帯筋が、中詰めコンクリート内に主筋があるため両者は直接緊結されていない。また、外殻の内側界面のコッターについては、遠心成形で製造される場合、四隅のみに深さ3mmのコッターが付いている。一方、高流動コンクリートによる試験体では、内型枠表面に深さ6mmのコッター

* 安藤建設(株)技術研究所(正会員)

ーを市松状に配している。

図-1に全体形状および配筋の一例を示す。試験体製作の手順は概ね実施工通りで、予め製造した外殻薄肉PCa管の建方を行い、中詰めコンクリートを場所打ちすることにより、外殻PCa管と下スタブとの隙間（本試験体では20mm）にもコンクリートが充填される。

表-2に使用した鉄筋およびコンクリートの材料試験結果を示す。遠心成形管に用いたコンクリートの強度は、遠心力締固めを行わず、PCa管と同様の蒸気養生とした供試体の実験実施時強度である。また、高流動コンクリートについても採取した供試体の締固めは行わず、試験体と同様な養生条件から求めた試験結果である。試験体用の高流動コンクリートの調合は表-3に示す通りである。

2.2 加力および測定方法

加力は、柱試験体に $\sigma_0=0.2F_c$ ($F_c=26.5\text{MPa}$: 場所打ち(中詰め)コンクリートの設計基準強度)に相当する一定の軸方向応力度を作用させた状態で、建研式加力装置を用いた逆対称の曲げせん断加力を行い、正負交番繰返し载荷とした。加力の履歴は、Bシリーズについては、上下スタブ間の相対変形角: $R(x1/1000\text{rad})=\pm 2, \pm 3.3$ で各1回、 $\pm 5, \pm 10, \pm 15, \pm 20, \pm 30$ で各2回繰返した後、 $R=+40/1000$ まで加力を行い終了とした。また、Sシリーズについては、 $R(x1/1000\text{rad})=\pm 2, \pm 3.3, \pm 5$ で各1回の加力の後、試験体の最大荷重を求めるため正側で漸増载荷を行い、耐力が下降することを確認し、 $R=\pm 30/1000, +40/1000$ まで载荷して終了とした。

測定については、加力を制御するための上下スタブ間の相対変位の他に、材軸方向の伸縮量、柱頭および柱脚部分の口開き量とずれ変位などについて測定を行った。また、外殻PCa管を製造する際、試験体柱側面の4箇所 $\phi 20\text{mm}$ 程度の有孔を設けておき、中詰めコンクリートを打込んでも塞がれないようにした上で、中詰めコンクリートに埋込まれたボルトを用いて両者の相対ずれ変位と離間について測定した。さらに、主筋と帯筋は、材軸方向に $200\text{mm}(D/2, D: \text{全せい})$ の間隔でひずみゲージを貼付して、両者が緊結されていないことの影響を調べた。

表-1 試験体一覧

試験体	断面の比較	構造諸元
B-1 S-1		Bシリーズ主筋: 12-D16 ($\rho_r = 1.49\%$) Sシリーズ主筋: 12-D19 ($\rho_r = 2.15\%$) 帯筋: □-D6@40 ($\rho_w = 0.40\%$) $b \times D = 40 \times 40\text{cm}$ $M_r/(Q \cdot D) = 2.0$ 場所打ちコンクリート: $F_c = 26.5\text{MPa}$ 軸力: $N = 0.2 F_c \cdot b \cdot D = 8.47\text{kN}$
内面コッター形状の比較		
B-2 S-2		
コッター深さ: 3mm コッター率: 2.0%		
B-3 S-3		
コッター深さ: 6mm コッター率: 3.9%		
B-4 S-4		
コッター深さ: 6mm コッター率: 3.7%		

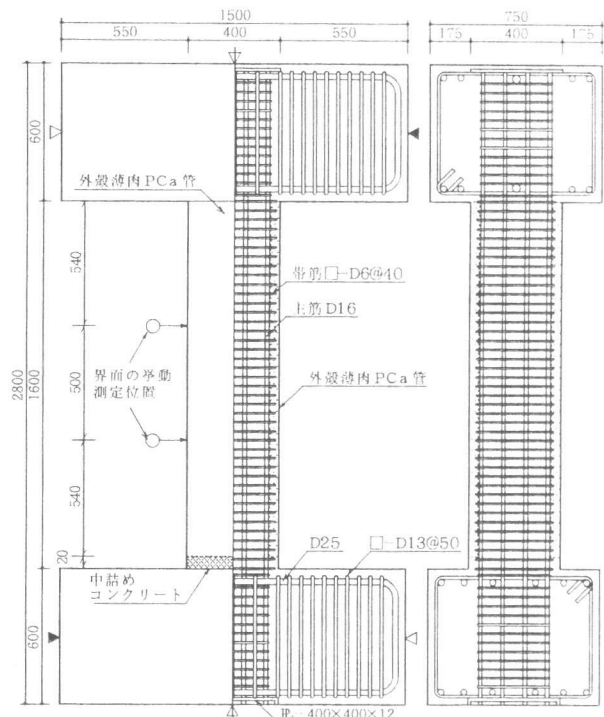


図-1 試験体(B-2)の形状および配筋

表-2 材料の強度試験結果(単位:MPa)

a) 使用鉄筋						
	σ_y	ϵ_y (μ)	σ_t	E_s	伸び (%)	
主筋 D16	389	2010	532	1.95	26	
主筋 D19	704	3650	890	1.98	14	
帯筋 D6	415	2230	554	1.93	23	
b) コンクリート						
外殻薄肉PCa			場所打ち (中詰め)			
試験体	σ_{Bs}	E_{cs}	f_t'	σ_{Bc}	E_{cc}	f_t'
B-1	-	-	-	25.3	2.50	2.59
B-2	73.5	3.68	4.75			
B-3	81.1	3.87	5.31			
B-4	84.1	4.02	4.80			
S-1	-	-	-	25.9	2.46	2.64
S-2	68.0	3.58	3.97			
S-3	81.5	4.12	4.75			
S-4	87.8	4.01	5.83			

σ_y : 降伏強度, ϵ_y : 降伏歪, σ_t : 引張強度, E_s : ヤング係数 ($\times 10^4$)
 σ_{Bs}, σ_{Bc} : 圧縮強度, E_{cs}, E_{cc} : ヤング係数 ($\times 10^4$), f_t' : 引張強度

表-3 高流動コンクリートの調査

W/C (%)	S/u (%)	W	C	S	G	AE
30.6	53.0	165	540	885	779	7020

C: セメント (kg/m^3) = 低熱ポルトランドセメント, $\rho_c = 3.22$
 S: 細骨材 (kg/m^3), $\rho_s = 2.60$
 G: 粗骨材 (kg/m^3) = 粒径10mm以下の玉砂利, $\rho_g = 2.58$
 AE: 高性能 A E 減水剤 (g/m^3) = $C \times 1.3\%$

3. 実験結果の概要

図-2にBシリーズは最終の、Sシリーズは最大荷重時のひびわれ状況を、図-3,4にせん断力-相対変位(Q- δ)関係(図中の直線はP- δ 効果の影響)をそれぞれ示した。表-4は、全試験体の最大荷重およびその時点の相対変形角と、各試験体の材料特性値に基づく終局強度式による耐力算定結果とを比較した。

外殻PCa管試験体の曲げ初ひびわれ荷重は、一体打ち試験体との有意な差は認められなかったが、せん断初ひびわれ荷重は、Sシリーズで外殻PCaコンクリートの圧縮強度が高いものほど、その荷重も大きくなっていった。

Bシリーズの主筋降伏荷重は、試験体B-1に比べ、外殻PCa管試験体がいずれも若干大きくなっており、試験体B-2,3では、B-1,4よりも主筋位置が内側で、なおかつ帯筋とは緊結されていないことによる影響も特にみられなかった。なお、Sシリーズでは最大荷重時まで主筋の降伏は生じなかった。

各試験体の最終破壊形式は、試験体B-1, 2, 3はいずれも曲げ破壊であったが、試験体B-1, B-3は柱頭、柱脚部に圧潰を生じた。

表-4 最大荷重・破壊形式の比較(単位:kN)

試験体	B-1	B-2	B-3	B-4	S-1	S-2	S-3	S-4
Q_{max} (実)	350	382	365	382	429	535	497	499
(R)	(15.05)	(29.91)	(19.97)	(29.93)	(11.88)	(17.16)	(16.59)	(13.46)
Q_{mi} (計)	313.1	299.2	299.2	313.1	548.4	512.0	512.0	548.4
実/計	1.12	1.28	1.22	1.22	0.78	1.05	0.97	0.91
Q_{mi}' (計)	-	328.2	329.7	344.1	-	538.9	541.6	579.0
実/計	-	1.17	1.11	1.11	-	0.99	0.92	0.86
Q_{mi}'' (計)	322.6	364.2	372.2	387.4	-	-	-	-
実/計	1.09	1.05	0.98	0.99	-	-	-	-
Q_{su} (計)	355.0	372.9	389.9	456.0	370.5	384.7	408.5	486.6
実/計	0.99	1.03	0.94	0.84	1.16	1.39	1.22	1.03
V_u (計)	-	-	-	-	438.7	476.9	499.6	597.0
実/計	-	-	-	-	0.98	1.12	1.00	0.84
破壊形式	F, C	F	F, C	F, Z	S, B	S	S	S, Z

(R)は、その時点の相対変形角 ($\times 1/1000$) を示す。
 破壊形式の記号 F: 曲げ破壊, C: 端部の圧潰, B: 付着剥離破壊
 S: せん断破壊, Z: 界面のずれ破壊

$$Q_{mi} \text{ (計)} = [0.5 a_g \cdot \sigma_y \cdot g_t \cdot D + 0.5 N \cdot D \{1 - N / (b \cdot D \cdot \sigma_{Bs})\}] / (h_0 / 2) \quad [\text{kN}] \quad (1)$$

Q_{mi}' (計): 式(1)中の σ_{Bs} を外殻PCa管のコンクリート圧縮強度 σ_{Bs} とした場合

Q_{mi}'' (計): 外殻PCa管のコンクリート強度を考慮した断面曲げ解析による最大強度、圧縮縁コンクリートのひずみ: $\epsilon_{cu} = 0.0035$

$$Q_{su} \text{ (計)} = [0.068 \rho_s^{0.23} (\sigma_{Bc} + 180) / (M / (Q \cdot d) + 0.12) + 2.7 \sqrt{\rho_s \cdot \sigma_y} + 0.1 \sigma_y] \cdot b \cdot h_0 \quad [\text{kN}] \quad (2)$$

V_u (計): 終局強度型指針(B法)に基づくせん断強度[1]、ただし、外殻PCa管を用いた試験体の場合は下式による[2]。

$$V_u = V_f + V_{cs} + V_{ac} \quad (3)$$

$$V_f = b \cdot j_t \cdot \rho_w \cdot \sigma_{wy} \cdot \cot \phi \quad (\text{トラス機構による負担せん断力}) \quad (3.1)$$

$$V_{cs} = \tan \theta \cdot b_s \cdot D \cdot v \sigma_{Bc} / 2 \quad (\text{外殻コンクリートのアーチ機構による負担せん断力}) \quad (3.2)$$

$$V_{ac} = \tan \theta \cdot b_c \cdot D \cdot v \sigma_{Bc} / 2 \quad (\text{中詰めコンクリートのアーチ機構による負担せん断力}) \quad (3.3)$$

$$\tan \theta = \sqrt{(2M / (V \cdot D))^2 + 1} - 2M / (V \cdot D), \quad b_s = 2(t_s - b_{cs}), \quad b_c = b - 2t_s, \quad b_{cs} = a_w \cdot \sigma_{wy} / (x \cdot \sin^2 \phi \cdot v \sigma_{Bs}), \quad v = 1.0$$

ここに、 j_t : 主筋中心間距離, a_w : 帯筋1本の断面積
 x : 帯筋の間隔, ρ_w : 帯筋比
 σ_{wy} : 帯筋の降伏強度, t_s : 外殻PCa管の厚さ
 ϕ : コンクリート圧縮歪の角度で45°とする

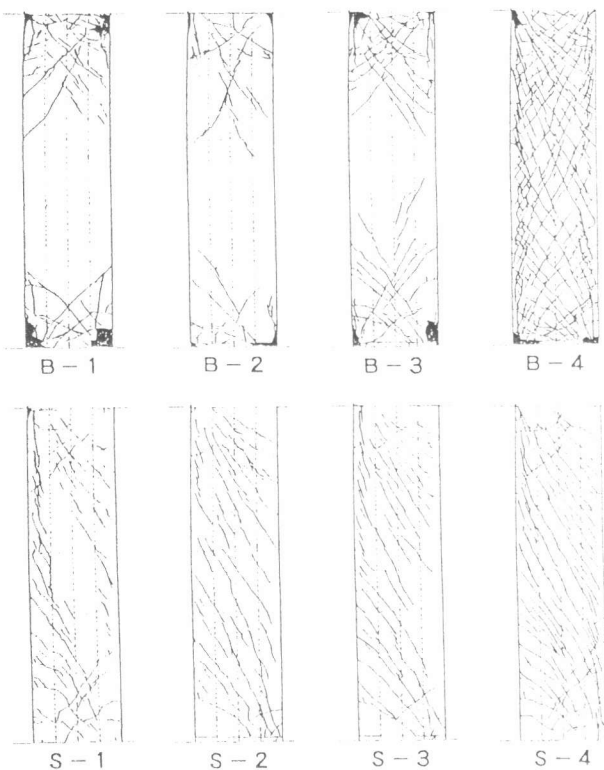


図-2 各試験体のひびわれ・破壊状況

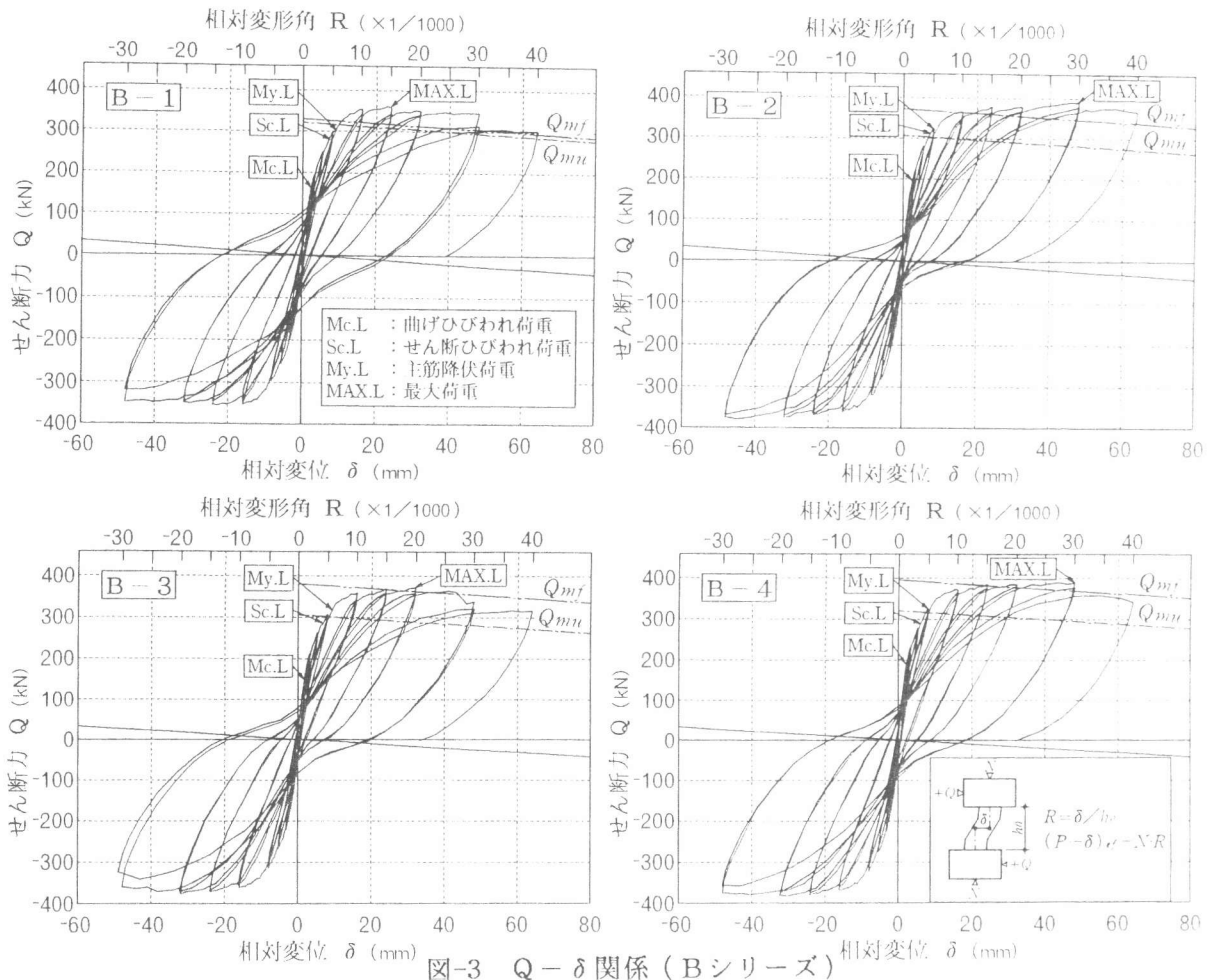


図-3 Q-δ関係 (Bシリーズ)

最大荷重およびその時点の相対変形角がB-2とほぼ同じである試験体B-4は、後述の界面の挙動についての検討によれば、破壊形式は曲げとコンクリート界面のずれによる複合破壊であると判断された。一方、Sシリーズ試験体S-1の破壊形式は、せん断および付着割裂による複合破壊であると考えられる。試験体S-2、S-3はせん断破壊であったが、S-4はせん断破壊と同時に界面でずれ破壊を生じた。

表-4の Q_{mu} (計)は中詰めコンクリートの圧縮強度(σ_{Bc})を、 Q_{mu}' (計)は外殻PCa管のコンクリート圧縮強度(σ_{Bc})をそれぞれ用いて式(1)の曲げ強度を計算している。一体打ちのB-1に対し、外殻PCa管試験体は、 Q_{mu} (計)では安全側に、 Q_{mu}' (計)では同等の精度で算定できている。さらに、 Q_{mf} (計)は、外殻PCa管、中詰めコンクリートの強度の相異および主筋位置の相異を考慮した断面曲げ解析を行った結果であるが、ほぼ精度よく最大荷重の実験値を追跡できることが分かる(図-3参照)。なお、図-3の各試験体のQ-δ履歴性状を比較すると、一体打ちのB-1に対して、外殻PCa管試験体は3体とも荷重0点での残留変位の小さい絞れたループ形状を示している。これは、全試験体一律に同じ定軸力を载荷していることから、外殻PCa管と中詰めコンクリートの圧縮強度の相異を

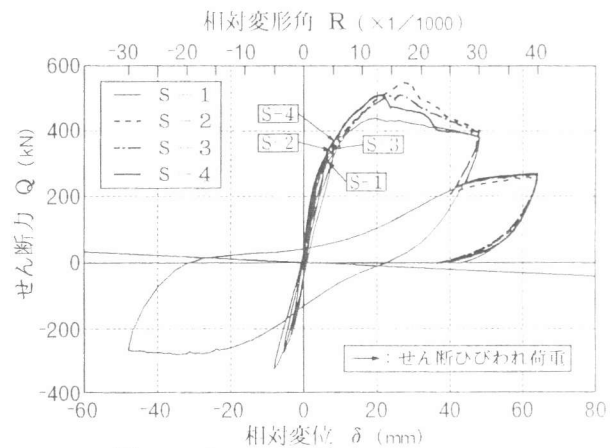


図-4 Q-δ関係 (Sシリーズ)

考慮した軸応力度としては、外殻PCa管試験体の方が一体打ちより小さくなっていることによるものである。

せん断終局強度： Q_{su} (計)については、式(2)第1項のコンクリート圧縮強度を、外殻と中詰めコンクリートの断面積に応じた等価強度(σ_{Be})として算定している。これは一種の簡便法であり、安全側に評価できるが、本実験値との対応はあまりよいとはいえない。そこで、Sシリーズ試験体について、終局強度型指針に示されている柱のせん断強度式を適用して求めたものが、式(3)の V_u (計)である[1]。試験体S-1についてはB法をそのまま用い、外殻PCa管試験体S-2~4では、増田らの研究[2]を参照してせん断強度を算定した。その結果、破壊形式がせん断破壊であった試験体S-2, 3では、 Q_{su} (計)に比べ V_u (計)は実験の最大荷重に近い値となった。しかしながら、外殻PCa管試験体の実験値に対する安全率が低下したことについては、式(3.2)において有効係数 $\nu=1.0$ としたことに一因があると思われる。

次に、柱頭、柱脚部を対象に、口開き量をBシリーズについて図-5に示した。試験体B-2,3の口開き量は、試験体B-1,4に比べて大きくなっているが、柱脚側と柱頭側ではあまり差がないことから、この主な理由は試験体B-2,3の主筋がB-1,4よりも外縁から内側にはいつていることによるものであり、この傾向はSシリーズ試験体についても同様であった。

4. 挙動の一体性に関する検討

外殻PCa管と中詰めコンクリートとが界面において一体として挙動するか否かは、外殻部分を構造体の一部として評価する上で特に重要である。図-6は、界面の(a)ずれ量(界面で材軸方向に生じたずれ)、(b)はがれ量(外殻部のはらみだし)、(c)むくり量(界面に生じた肌すき)を、それぞ

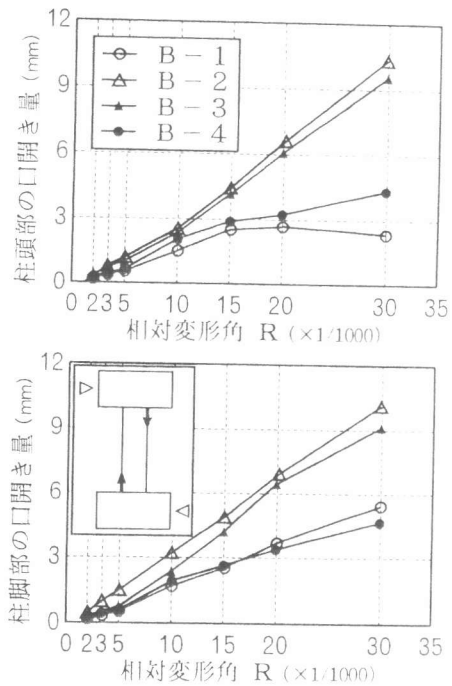


図-5 柱頭、柱脚部の口開き量

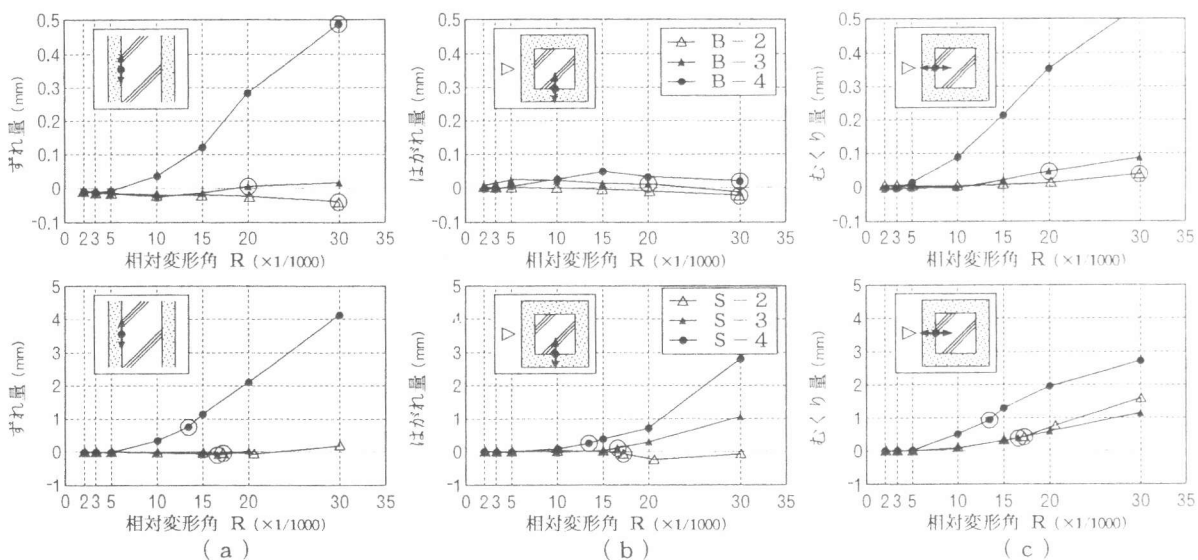


図-6 外殻PCa管と中詰めコンクリートとの界面の挙動

れ示した(図中の○囲みは最大荷重時を示す)。図-6によると、全般的に外殻に帯筋のみ内蔵した試験体ではいずれの変位量も小さく、Bシリーズでは最終加力時まで、Sシリーズでは最大荷重時まででは、ほぼ完全に外殻と中詰めコンクリートとが一体であったと推定される。一方、帯筋と主筋をともに外殻に内蔵した試験体B-4およびS-4については、外殻PCa管と中詰めコンクリートとが界面で分離したことにより、最大荷重およびその後の耐力低下を生じたものと思われる。

表-5は、高流動コンクリートを用いた外殻PCa管と中詰めコンクリートの界面での一体性を調べた結果である。いま、外殻と中詰めコンクリートの界面でのせん断耐力： Q_{s1} に対して、界面に作用するせん断力： Q_{s2} が上回れば、外殻と中詰めコンクリートの界面での一体性は失われると考えられる。表-5で仮定したせん断耐力式(4)と作用せん断力式(5.1),(5.2)との比較によれば、試験体B-3, S-3では界面のずれは生じない。しかしながら、外殻PCa管に主筋を有する試験体B-4では、界面のせん断耐力と作用せん断力とが拮抗しており、試験体S-4では界面にずれが生じて分離破壊したことが示唆される。

5. まとめ

薄肉PCa柱部材の曲げせん断加力実験を行い、次のような知見が得られた。

1) 曲げ降伏型のBシリーズ試験体については、外殻PCa管試験体の曲げ降伏荷重、最大荷重がともに一体打ちの試験体よりも大きくなっており、これらは外殻PCa管のコンクリート強度を考慮した断面曲げ解析によってもほぼ裏付けることができた。一方、履歴ループの形状を比較すると、定軸力を全試験体同一とした場合には、外殻PCa管試験体の方が一体打ちに比べて残留変位が小さくなる傾向を示した。

2) せん断破壊型のSシリーズ試験体については、外殻PCa管試験体のせん断ひびわれ荷重および最大荷重は、Bシリーズと同様に一体打ちの試験体よりも大きい。これらは、外殻と中詰めコンクリートの各々の圧縮強度を、その試験体に占める断面積に応じた等価強度として、従来の強度算定式に適用することでおおむね評価できるが、十分ではなかった。

3) 外殻PCa管に帯筋、中詰めコンクリート中に主筋があり、両者が直接緊結されていないことが部材の強度特性に与える影響は、本実験では特に認められなかったが、緊結されている場合に比べ主筋位置が内側にあることから、柱頭、柱脚部の口開きが大きくなっていった。

4) 曲げ降伏型のBシリーズ、せん断破壊型のSシリーズ試験体のうち、ともに外殻PCa管に帯筋および主筋を有する試験体では、最大荷重時近傍で外殻と中詰めコンクリートとの一体性が十分ではなく、界面に生じたずれが耐力低下の原因となった。

参考文献

- [1]日本建築学会：鉄筋コンクリート建物の終局強度型耐震設計指針・同解説，pp.104-121,1990.11
 [2]増田安彦，吉岡研三：外殻に薄肉プレキャスト管を使用した鉄筋コンクリート柱の耐力特性に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第458号，pp.109-118,1994.4

表-5 界面での一体性の検討(単位:kN)

試験体	B-3	B-4	S-3	S-4
Q_{s1}	1631	1769	2092	2315
Q_{s2}	1020	1777	1025	2868
Q_{s2}/Q_{s1}	0.63	1.00	0.49	1.24

$$Q_{s1} = 0.1\sigma_{Bc}Ac_c + 1.5\sqrt{\sigma_{Bc}Ac_c} + \sigma_{sv}\Sigma a_w \quad [\text{kgf}] \quad \dots (4)$$

ただし、Bシリーズでは主筋の降伏域を考慮して、式(4)に $(h_0-d)/h_0$ を乗じている。

$$Q_{s2} = \begin{cases} 0.85\sigma_{Bc}t_s \cdot b & \text{：外殻部に主筋を含まない場合} \quad \dots (5.1) \\ (a_t + a_c)\sigma_s + N & \text{：外殻部に主筋を含む場合} \quad \dots (5.2) \end{cases}$$

ここに、 Q_{s1} ：界面でのせん断耐力

Q_{s2} ：界面に作用するせん断力

Ac_c ：外殻内側のコッター断面積の和

$Ac_s = 2t_s \cdot h_0$ 、 t_s ：外殻PCa管の厚さ、 h_0 ：柱の内法高さ

Σa_w ：帯筋の断面積の和、 $a_t + a_c$ ：有効な主筋の断面積の和

σ_{Bc} (σ_{Bc})：外殻PCa管(中詰め)コンクリートの圧縮強度

σ_{sv} (σ_s)：帯筋(主筋)の降伏強度

N ：柱の軸方向力