重ね継手を有するハーフプレキャスト柱に関する研究

PRECAST REINFORCED CONCRETE COLUMN USING LAP SPRICES

増田 安彦*, 吉岡 研三**

Yasuhiko MASUDA and Kenzoh YOSHIOKA

New construction methods have been developed to save labor and wood resources at construction sites and shorten construction periods of reinforced concrete buildings. The joint method is a type of lap splice, in which main bars are butted together at the midheight of the column and reinforced with small-diameter splint bars. These splint bars are contained in a precast concrete shell form (PCa-shell) for columns.

The results of structural experiments on reinforced concrete members which have been designed by this method are explained in this paper. It appeared that the tie bars, which were installed in the PCa-shell, improved structural performance and that shear and flexural strengths were the same as with non-spliced PCa-shell members. Bond design methods for this joint type are further proposed.

Keywords : reinforced concrete, column, precast concrete, lap sprices, shear-flexural experiment

鉄筋コンクリート, 柱, 外殻プレキャストコンクリート, 重ね継手, 曲げせん断実験

1. 序論

現在、建築工事の大型化、高層化が進む傍ら、建設現場における技能工不足や高齢化は年々深刻さを増している。このような背景からRC建物では部材のプレキャスト化が推進され、様々なプレキャスト工法が考案・開発されている。特に柱、梁、耐震壁等を部材ごとに製作し、建設現場にて接合する方式が主流であるが、部材同士の接合方法をいかに簡単に信頼性の高いものにするかがこの工法の最も重要な検討項目になる。近年その接合を簡単にするため部材の外殻部分をプレキャスト化し、鉄筋継手に通常の圧接や重ね継手を用いる施工法が増加しつつある。

筆者らは施工が容易で天候に左右されない重ね継ぎ手に着目し、添え筋を用いて太径異形鉄筋の重ね継手部を補強した場合の部材の耐力性状について検討した¹⁾。しかしながら柱部材に通常の重ね継手を用いる場合、主筋位置が上階と下階で異なるため、柱主筋ばかりでなく梁主筋の位置も各階ごとにずれたり、かぶりコンクリート厚さを確保するために断面が大きくなるなど、設計上あ

るいは施工上の問題が生じる。これらの問題を解決するため、図1に示すような、主筋を重ねることなく柱部材の内のりスパンの中央で突合せ、同時に内のりスパンに主筋より細径の添え筋を配して、主筋と添え筋の重ね継手により応力を

伝達する突合せ式重ね継手（以後突合せ継手と省略する）を考案し、これを外殻プレキャストコンクリート管（以後PCa管と省略する）を用いる、いわゆるハーフPCa工法に採用し、より建築生産性の向上をねらった

図1 工法の概要

* ㈱大林組技術研究所 研究員

** ㈱大林組技術研究所 研究室長・工博

Research Engineer, Technical Research Institute of Obayashi Corporation
Manager, Technical Research Institute of Obayashi Corporation., Dr. Eng.

2)3)7)~9)。なお、柱内のりスパンに配する重ね鉄筋は、一種の主筋であるがここでは区別のため添え筋と称している。

本論文は、帯筋・添え筋をPCa管に内蔵させて使用し、突合せ継手を用いた柱部材(図1)を主な対象として、部材の耐力・変形性状、応力伝達機構の解明を試み、設計法を確立することを目指したものである。

表1 実験概要 (実大試験体)

試験体	L-1	L-2	L-3	L-4	L-5	L-6	L-7	L-8	L-9	L-10	L-11	L-12	L-13
断面 (mm)	600×600												
内り高さ	h0=1850 (mm), h0/D=3.08												
Fc (kgf/cm ²)	240												
主筋 pg(%)	12-D29 (2.14)	8-D35 (2.12)	12-D29 (2.14)	8-D35 (2.12)	12-D29 (2.14)				8-D35 (2.12)				
添え筋 中央部pg(%)	12-D19 (0.96)		12-D22 (1.29)	12-D19 (0.96)				8-D22 (0.97)					
せん断補強筋 pw(%)	Ⅲ-D16 @100 (1.33)		Ⅲ-D16 @65 (2.03)		Ⅲ-D16 @50 (2.65)	Ⅲ-D16 @65 (2.03)	□-D16 @80 (0.83)		□-D13 @80 (0.53)	Ⅲ-D13 @85 (1.00)	Ⅲ-D16 @80 (1.66)		
耐力比(FcbD)	0				1/6	1/3	1/6	0				1/6	
外周PCa管強度	使用せず (一体打ち)						621	一体打ち		524		一体打ち 524	
試験時コンクリート強度	187	207	207	233	276	289	315	269	279	278	292	292	263
試験時耐力強度	D35:3770, D29:3860, D22:3800, D19:3620, D16:3710							D35:3830, D22:3990, D16:3880, D13:3370					

(小型試験体)

試験体	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7	S-8	S-9	S-10	S-11	S-12	S-13	S-14		
断面 (mm)	400×400								425×425				400×400			
内り高さ (mm)	1200 , h0/D=3.0							1600 h0/D=4.0	1000 h0/D=2.35				1400 h0/D=3.5			
Fc (kgf/cm ²)	240								270		360		270			
主筋 pg (%)	8-D25 (2.54)								12-D19 (1.91)		16-D19 (2.54)		8-D22 (1.94)			
添え筋中央部 pg (%)	8-D16 (1.00)						8-D13 (0.64)	8-D16 (1.00)	12-D13 (0.84)		24-D13 (1.69)	—	8-D16 (1.00)			
せん断補強筋 pw (%)	□-D10 @100 (0.36)	Ⅲ-D10 @120 (0.60)	□-D13 @100 (0.64)	□-D13 ⑦75 (0.85 %)				Ⅲ-D13 @100 (1.19)	Ⅲ-D10 @120 (0.56)	Ⅲ-D13 @120 (1.00)		Ⅲ-D10 @100 (0.71)	□-D10 @50 (0.71)			
継手位置	内りの中央 (600mm:600mm の位置)							下から 1000mm	内りの中央		一本もの 継手なし		内りの中央			
耐力	FcbD/6					なし	~0.2Ag _{ey} ~FcbD/3	FcbD/6	なし		~0.5Ag _{ey} ~0.6FcbD		FcbD/3			
外周PCa管強度	562								495				一件打ち		743	
試験時コンクリート強度	235	248	256	273	272	285	285	283	354	331	441	436	287	267		
試験時耐力強度	D25:3860 , D16:4420 , D13:3450 , D10:3910								D19:4760 , D13:3370 , D10:3810				D22:3760 , D16:3460 , D10:3350

図2(a) 試験体断面・形状 (L-1~L-13)

2. 曲げせん断実験

2.1 実験目的

比較的短い柱が逆対称曲げモーメントを受けせん断ひびわれが生じると、主筋応力は部材中央でゼロにならない⁴⁾。この現象は、せん断力を負担するアーチ機構の反力やトラス機構におけるコンクリートの圧縮束の水平成分の一部が主筋に作用するためと推定される。そのため突合せ継手部材のスパン中央断面では添え筋に応力が生

じ、主筋応力を伝達するためには添え筋量の検討も必要となることが予想される。

実験は主筋・添え筋のひずみ分布あるいは添え筋の補強効果、部材の付着割裂耐力に及ぼす様々な影響を捕え、主筋同士の間隔位置が部材の内りスパン中央から離れた位置にある場合も含めて、突合せ継手部材の耐力・付着性状を明確にすることを目的とした。

2.2 実験概要

実験は実大試験体13体と、約1/2スケールの小型試験体14体の合計27体からなっている。試験体の概要および使用材料を表1に示す。

実大試験体は主筋に太径鉄筋を用いており、パラメータに主筋径、添え筋量、せん断補強筋量、軸

図2(b) 試験体断面・形状 (S-1~S-8)

力、およびPCa管使用の有無を取り上げた。主筋の突き合わせ位置はすべて内のりスパンの中央とし、添え筋は内のりスパン全長に配置した。添え筋量は主筋のない部材中央で $p_g' = 0.8\%$ 以上となることを基準としている。PCa管は遠心成形によって製造した薄肉の中空角型高強度コンクリート管⁵⁾で、帯筋、副帯筋（中子筋）、添え筋を内蔵させ、内部隅角部にはシアコッター

($\varnothing 100 \times 150 \times t_5 \text{mm}$ @50を8箇所)を設けた。

小型試験体は主筋の量および径、添え筋量、せん断補強筋量、軸力、コンクリート強度、突き合わせ位置を変数に取り上げた。せん断補強筋はその量(pw)と形状すなわち副帯筋の有無もパラメータとした。また、軸力比は変動軸力、軸力なしを含め4タイプとした。主筋の突き合わせは1体を除き内のり中央とし、ほぼ主筋同士が接する程度に、他の1体は内のりを5:4に内分する位置とした。図2に試験体の断面・形状の一例を示す。

载荷はいずれも変位制御とし、個々の部材角で各2回繰返す正負交番繰返し载荷とした。

2.3 実験結果

2.3.1. 破壊・耐力性状

(1) 実大試験体

表2に実験結果の一覧を示す。実大試験体の内L-8, L-9, L-10を除くすべての試験体が部材角 $R=1/50$ 以上でも耐力が低下しない靱性的な破壊を生じた。L-8, L-9, L-10は主筋降伏が生じる直前あるいは降伏とほぼ同時に付着割裂破壊を生じた。図3(a)に試験体に作用するせん断力と層間変位の関係(Q- δ 関係)の一例をPCa管の使用の有無を比較し、図3(b)にその他の試験体の包絡線図を示す。曲げ破壊を生じた試験体ではPCa管を使用した試験体の降伏および最大耐力は使用しない場合に比べ同等以上の値を示し、Q- δ 曲線もより大きなループを描いているが、付着破壊を生じた場合、逆にPCa管を用いた方が耐力性状が悪いと言える。

L-1, L-2, L-3は主筋曲げ降伏後、変位 $R=1/50$ 前後で部材中央部に添え筋の曲げ降伏を生じ、 $R=1/40$ をピークに比較的靱性的な耐力低下を示した。このことから、添え筋が降伏すると2.1節で述べたトラス機構が成立しない一種のせん断破壊が生じるものと推定される。

表2 実大試験体実験結果一覧

試験体	L-1	L-2	L-3	L-4	L-5	L-6	L-7	L-8	L-9	L-10	L-11	L-12	L-13
弾性剛性 tf/cm	433	337	354	307	315	419	369	310	370	337	302	267	328
曲げひびわれ tf	20.5	20.5	17.5	14.6	51.2	61.8	42.6	17.5	29.2	23.4	35.0	52.6	46.7
せん断ひびわれ tf	35.0	35.0	35.0	35.0	70.1	87.6	105.1	46.7	46.7	46.7	40.9	58.6	75.9
降伏荷重 tf	実験値	75.4	80.0	75.4	80.8	102.2	125.9	109.3	77.3	—	—	76.0	105.3
	計算値	58.2	59.3	58.7	59.3	85.8	113.9	93.2	60.1	65.2	65.2	88.1	93.4
	実/計	1.30	1.35	1.28	1.36	1.19	1.11	1.17	1.29	—	—	1.17	1.20
最大耐力 tf	実験値	95.8	97.8	99.9	109.9	139.5	171.0	141.5	77.3	69.7	65.2	89.0	128.1
	曲げ	72.3	68.2	72.3	68.2	96.0	120.5	110.0	68.4	74.8	74.8	74.8	96.3
	せん断	164.2	149.4	164.2	196.6	240.8	290.0	256.9	150.1	159.8	133.6	162.6	209.1
	付着割裂	—	—	—	—	—	—	—	—	—	57.2	—	—
実/計	1.33	1.43	1.38	1.61	1.45	1.42	1.29	1.13	0.93	1.14	1.19	1.33	1.26
	破壊性状	曲げ破壊							降伏後付着破壊	付着破壊	曲げ破壊		

曲げひびわれおよびせん断ひびわれ荷重は目視による。
最大耐力の実/計は曲げ、せん断、付着割裂の内、最も低い値を用いて計算した。

図3(a) 付着破壊と曲げ破壊のQ- δ 関係一例

上段がRC下段がPCa試験体

図3(b) Q- δ 曲線
包絡線図

せん断補強筋量(pw)が異なるL-2, 4, 8を比較すると、 $p_w=2.0\%$ で曲げ破壊、 1.3% で添え筋降伏破壊、 0.8% で付着割裂破壊となり、せん断補強筋が少ない場合にはせん断破壊が生じることも予想され、破壊性状は4種に大別されること、せん断補強筋量が破壊性状に及ぼす影響が大

きいことが分かる。

(2) 小型試験体

表3に実験結果の一覧を示す。小型試験体は実大試験体に比べ比較的せん断補強筋量が少ないため、14体中8体が主筋降伏に前後して付着破壊を生じた。曲げ降伏前に付着破壊を生じた5体の試験体は、せん断補強筋に副帯筋を使用せず、外周筋のみで補強したもので、PCa管とコアコンクリートの一体性が比

較的早期に失われたことが原因と推定され、後述する特有の割裂パターンによる破壊が考えられる。また、図4(a)に $Q-\delta$ 関係を比較した例を、図4(b)では断面および h_0/D が等しい試験体の包絡線を、図4(c)はその他の試験体の $Q-\delta$ 関係を示す。S-1～S-7試験体はいずれも部材角 $R=1/100\sim 1/50$ 程度で最大耐力に達し、その後脆性的な耐力低下を示すこと、 $Q-\delta$ 曲線はエネルギー吸収能力に乏しく原点指向型であることが特徴である。また、部材角 $R=1/100$ 以降は柱主筋の抜け出しによると推定される変形を生じており、これを拘束するせん断補強筋の量が多い試験体ほど変形能力が大きい傾向が見られる。S-2試験体は曲げ降伏後にせん断補強筋が降伏し、荷重が低下したため、表3ではせん断破壊としたが、付着とせん断による複合的な破壊と思われる。この試験体の最大耐力時の変形量および $Q-\delta$ 曲線は、前述の付着破壊を生じた試験体とあまり変わらないが、最大耐力は同一軸力でせん断補強筋の多いS-3、S-4よりも高い。

さらに図4(a)に示すように、同一pwのS-13、S-14を比較すると明らかに副帯筋を有する

表3 小型試験体実験結果一覧

試験体	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6		S-7	S-8	S-9	S-10	S-11		S-12		S-13	S-14	
弾性率 t/cm	239	277	264	256	226	228		224	130	189	190	439	—	490	—	193	154	
白けひびわれ t	11.0	9.0	16.0	11.2	4.0	26.0	-6.0	18.0	5.0	30.0	26.0	60.0	-13.5	53.0	-10.0	19.1	21.2	
せん断ひびわれ t	44.0	42.0	44.0	43.0	28.0	56.0	-20.0	42.0	30.0	32.0	36.0	66.0	-28.0	62.0	-15.0	41.3	39.8	
降伏荷重 t	実験値	—	57.1	—	—	40.9	—	-36.2	—	42.9	41.8	41.4	64.4	-31.8	76.0	-42.0	53.5	52.4
	計算値	54.5	54.5	54.5	54.5	39.4	68.1	-32.1	54.4	40.8	38.4	44.5	120.0	-33.4	118.9	-32.1	47.5	47.5
	負/計	—	1.05	—	—	1.04	—	1.13	—	1.05	1.09	0.93	(0.54)	0.95	(0.64)	1.31	1.13	1.10
最大耐力 t	実験値	48.1	58.7	55.6	58.2	44.7	68.9	-36.2	56.9	48.1	60.8	53.5	101.0	-32.0	90.0	-43.9	68.5	61.2
	白け	58.7	58.7	58.8	58.8	45.4	71.7	-39.1	58.8	44.1	50.0	57.0	120.0	-50.0	118.9	-45.4	51.4	51.4
	せん断	50.5	59.6	59.3	67.0	67.0	68.2	-68.2	68.2	59.3	92.4	73.8	98.6	-98.6	95.7	-95.7	52.5	50.3
	付着割断	44.6	—	49.5	54.1	39.3	68.7	-33.1	54.4	40.6	—	—	—	-21.4	—	—	—	—
	負/計	1.08	1.00	1.11	1.08	1.14	1.01	1.09	1.05	1.18	1.07	0.94	1.02	1.50	0.94	0.97	1.33	1.22
破壊状況	せん断降伏 付着割断	主筋降伏 降伏→せん断 付着割断	付着破壊	付着破壊	主筋降伏 降伏→付着破壊	付着破壊	せん断降伏	せん断降伏→ 付着破壊	主筋降伏 降伏→付着破壊	白け破壊	主筋降伏 降伏→付着破壊	せん断破壊	せん断降伏	せん断破壊	白け破壊	降伏後主筋 降伏→付着割断	主筋降伏 降伏→付着破壊	

白けひびわれおよびせん断ひびわれ荷重は目視による。
最大耐力の負/計は白け、せん断、付着割断の内、最も低い値を用いて計算した。

図4(a) $Q-\delta$ 関係

図4(b) $Q-\delta$ 包絡線図

試験体の耐力性状が良いことがわかる。副帯筋を用いることによりコアコンクリートの拘束効果が向上し、付着強度が上昇することは以前から指摘されており、多くの研究がなされている¹⁰⁾が、本論文で対象とする構造形式でもこの副帯筋の拘束効果により、外殻とコアコンクリートの一体性が高まるため付着強度性状が改善されると考えられる。加えて副帯筋のダボ効果も期待できることから、この工法における付着耐力の評価に副帯筋の効果をより大きく考慮する（あるいは副帯筋がない場合の耐力を低く評価する）必要があることがわかる。

変動軸力下で載荷し、曲げ降伏後に付着破壊を生じたS-6試験体は引張軸力作用時に部材中央で添え筋が降伏し、その後耐力が低下している。また同様に高圧縮軸力から高引張軸力まで変動させたS-11, S-12で従来の継手のないRC柱と突合せ継手を有するPCa柱を比較すると、図4(a)にQ- δ 関係を示すように、圧縮軸力時は高強度のPCa管が有効に作用するため耐力性状がよいが、引張軸力時は主筋に先行して添え筋が降伏するため逆に耐力性状が劣ることがわかる。

突合せ位置が部材中央ではないS-8試験体は、曲げ降伏後に突合せ位置から柱端部までの長さが短い方の主筋が付着破壊を生じた。

2.3.2 付着性状

図5に主筋および添え筋に貼付したひずみゲージから得られたひずみ分布の一例として、図5(a)では軸力のない曲げ破壊を生じた同一試験体の主筋降伏時と最大耐力時のひずみ分布を、(b)は軸力のある試験体の分布状況を示す。軸力のない場合、添え筋のひずみは、部材端部危険断面で0であるが、部材中央に向かって徐々に増加し、曲げモーメントが0となる中央部で引張ひずみを生じている。これらのひずみは中央部付近にせん断ひびわれが生じた後に顕著になり、軸力が作用すると小さくなる傾向がある。また、変位が小さく、鉄筋応力も低い段階では主筋と添え筋の応力がほぼ一致する区間、いわゆる平面保持の成り立つ区間が存在するが、変形が進むにつれて主筋、添え筋ともスパン中央まで直線分布となる傾向がある。また主筋の降伏区間が曲げ破壊試験体でも層間変形

図4(c) その他の試験体Q- δ 関係

図5(a) 主筋・添え筋ひずみ分布 (L-11試験体)

図5(b) ひずみ分布 (中子筋の有無, 隅主筋と内部主筋の比較)

図5(c) ひずみ分布 (引張軸力時)

角R=1/50で約D/4と小さいのが特徴である。図5(b)のひずみ分布では副帯筋の有無および隅角部主筋と内部主筋

図6 最大耐力時ひずみ分布 (上段: 主筋, 下段: 添え筋)

図7 セン断補強筋のひずみ

写真1 試験体写真

を比較しているが、副帯筋の有無により添え筋のひずみ分布に若干差が見られるものの、隅角部と内部主筋とは殆ど差が見られない。

図5(c)は変動軸力試験体の引張軸力時ひずみ分布を示している。添え筋が引張降伏すると部材耐力が頭打ちとなっていることがわかる。

図6は、せん断補強筋量の違いが主筋・添え筋のひずみ分布性状に及ぼす影響を調べたもので、せん断補強筋量が多い試験体ほど同一部材角時および最大耐力時における主筋ひずみ分布の勾配が大きく付着応力度が高いことがわかる。副帯筋を用いた場合はすでに述べたように外殻とコアコンクリートの一体性が向上するため主筋の最大付着強度も高い。

図7はS-13試験体のせん断補強筋ひずみ計測結果の一例として、危険断面から1.4D(D:柱せい)の位置で計測した荷重-ひずみ関係を示している。S-14も同様に計測したが、いずれもせん断耐力計算値より低荷重でせん断補強筋の隅角位置が曲げを伴う引張降伏を生じ、特に副帯筋を使用していないS-14では降伏直後に最大耐力に達している。一方、副帯筋を使用したS-13では外周筋隅角部が降伏した後も荷重は増加したが、副帯筋隅角部の降伏に伴い耐力低下を生じている。これらの現象と前述した隅角部主筋と内部主筋のひずみ分布に差が見られないこ

とを合わせて検討すると、ここで観察された付着破壊は主筋を含むコアコンクリートと添え筋を内蔵する外殻PCa管の滑りによって生じる継手破壊であると推定される。

2.3.3 ひびわれおよび破壊状況

写真1に試験体の最終ひびわれ状況の一例を示す。写真は付着破壊を生じた試験体で、主筋に沿った割裂ひびわれが大きく開いているが、これらのひびわれは最大耐力後に生じたものである。

3. 耐力特性

3.1 各種耐力式の適用性の検討

試験体の弾性剛性、曲げ・せん断ひびわれ荷重、曲げ及びせん断耐力の計算値は文献5)に示される計算式を用いて算出した。そのうち弾性剛性は外殻強度を考慮しない計算式によっている。それぞれ図8～図10(曲げ、せん断耐力の比較は表2および3)に実験値と比較した結果を示すが、これらの図の(実験値/計算値)の分布状況は文献5)に示されたデータの分布状況とほぼ同様であること、表2、3の計算値は比較的实验値を良く捉えていることから、添え筋を内蔵するPCa管を用いる場合も、原則として主筋が一本もののハーフプレキャスト柱部材の各種耐力式を適用可能であると言える。

図8 弾性剛性の（実験値／計算値）と軸力比の関係（PCa管強度を考慮せず）

図9 曲げひびわれ荷重の（実験値／計算値）とh0/Dの関係

図10 せん断ひびわれ荷重の（実験値／計算値）とh0/Dの関係

図11 割裂パターン

3.2 添え筋応力と耐力性状の関係

内のりスパン中央の突合せ位置では曲げモーメントが0であることを用いて、この位置で添え筋が降伏することによる最大耐力は、せん断補強筋の引張力、コンクリートの圧縮ストラット、および添え筋の引張力によるトラスの関係から次のように求められる。

$$V_{us} = A_{sp} \sigma_s / \cot \phi \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma_s = \sigma_y - \sigma_{ns} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\sigma_{ns} = n_r N / (bD + (n_r - 1) A_{sp}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{ただし、引張軸力時 } \sigma_{ns} = N / A_{sp} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、

V_{us} : 添え筋降伏による破壊時層せん断力

σ_s : 軸力を考慮した添え筋最大負担応力

σ_{ns} : 軸力による付加応力、ただしコンクリートの引張強度を超える場合は全軸力を添え筋が負担する。

n_r : ヤング係数比 (=15)

A_{sp} : 添え筋の全断面積

N : 軸力

b, D : それぞれ断面の幅、せい

ϕ : コンクリートの圧縮角度で45度とする。

以上の式では、せん断補強筋は降伏しないことを仮定した。また、実際にはトラス機構に加えてアーチ機構も作用していると考えられる。従って、せん断力が最大となるように添え筋の鉄筋力をそれぞれトラスおよびアーチ機構寄与分に配分すべきであるが、簡便でかつ安全側の評価となるように、添え筋の鉄筋力は全てトラス機構に寄与するものとした。さらに引張軸力が作用した場合、コンクリートの引張強度を無視し、全軸力を添え筋が負担するとしている。

軸力のない実大試験体L-2, 3, 4で添え筋降伏後に若干の耐力上昇が観察されたが、これらの試験体は主筋の降伏が先行しており、主筋と添え筋のひずみ効果の影響が表れたものと推定される。また小型の引張軸力を作用させた試験体(S-6, S-11)では、添え筋が降伏するとその後の耐力上昇がほとんどなかった。表3中の変動軸力試験体の引張軸力時計算値は上式による計算結果を示している。

3.3 付着耐力

PCa管を用いた試験体の付着破壊タイプは載荷終了時の

試験体の状態から、図11 (a)に示すように外殻とコアコンクリートが一体となって全割裂を生じるもの、同図 (b)に示すように外殻PCa管の割裂とコアのコーナー割裂、外殻とコアの界面付着破壊によるもの、同図 (c)に示す、外殻の割裂にともなう界面付着破壊による継手破壊の3通りが推定された。(a) (b)タイプの破壊は継手のないPCa試験体⁵⁾で観察された割裂パターンである。このうち軸力のない試験体では、最大耐力後に隅角部コンクリートを含むコアコンクリートがPCa管から抜け出す現象が観察されたことから、明らかに (c)タイプの破壊を生じたと考えられる。軸力のある試験体では判別が困難であったが、2.3.2項で述べた現象やびびわれ発生状況から判断すると (c)が生じて耐力低下後にコアコンクリートの割裂を生じるものと思われ、最大耐力は (c)タイプで決まると推定される。以下に (c)タイプの割裂強度すなわち最大耐力時主筋付着強度について検討する。この主筋付着強度は (5)式で示すようにコンクリートの割裂強度と拘束筋の補強効果による強度上昇の和として求められると仮定している。また文献⁵⁾では繰返しによる強度低減係数 α を採用しているが、 α は鉄筋とコンクリート間の付着特性を検討した文献⁶⁾に基づく係数であり、コアコンクリート全体が抜け出す継手破壊には適用できないと考えられる。

(1) コンクリートの割裂強度

コンクリートの割裂強度は日本建築学会「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」（以後終局強度型指針と省略する）におけるコンクリートの割裂強度式を準用した。

すなわち外殻とコアコンクリートの界面付着を無視し、PCa管に設けたシアコッターの付着抵抗は考慮しない条件のもとで外殻コンクリートの割裂強度のみで評価することとした (式 (6))。

(2) セン断補強筋の補強効果による付着強度上昇

セン断補強筋の補強効果に関する考え方は文献⁵⁾と同様で式 (7)を基本とする。一体打ち試験体の付着割裂強度は式 (7)で外殻厚さを0として算出した。

PCa管を用いる場合、2.3.2項のひずみ計測結果から得られたように隅角部と内部主筋の付着強度を別々に求めるのではなく、部材の最大耐力時にはすべての主筋の付着強度は等しいとして求め、同時に τ_{bu} に及ぼすセン断補強筋の降伏強度の影響を考慮する必要があると考えられる。図12は付着破壊を生じたPCa試験体を対象に、最大耐力時主筋付着強度の実験値 τ_{bu-exp} から τ_{co} (計算値)を引いた値 (τ_{st}')と $\sqrt{(pw \sigma_{wy})}$ の関係、および τ_{st}' と式 (7)中のコンクリート強度に関する項、セン断補強筋の拘束に関する項との関係をそれぞれ調べたもので、図中の直線は最小二乗法による近似直線である。同図からこれら各項目が τ_{st}' とほぼ比例関係にあることがわかる。データ数が少なく使用した補強筋の降伏強度、補強筋形

図12 τ_{st}' に及ぼす要因の検討

図13 τ_{bu} 実験値と計算値の比較

状が非常に限られた範囲であるが、セン断補強筋の降伏強度を考慮する項として式 (7)の pw に代えて $\sqrt{(pw \sigma_{wy})}$ を用い、 τ_{st}' との一致性を考慮して決定した係数(1/600)を乗じることで τ_{st} を評価することができる (式 (8))。

$$\tau_{bu} = \tau_{co} + \tau_{st} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\tau_{co} = (0.8t_s / \sum db + 0.5) \sqrt{\sigma_{Bs}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\tau_{st} = \left\{ \left(\frac{20}{N_t} + \frac{5N_u}{N_t} + \frac{20N_s}{N_t} \right) pw (2t_s \sqrt{\sigma_{Bs}} + (b - 2t_s) \sqrt{\sigma_{Bc}}) \right\} / db \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\tau_{st} = \left\{ (20/N_t + 5N_u/N_t + 20N_s/N_t) \sqrt{p_w \sigma_{wy}/600} \cdot (2t_s \sqrt{\sigma_{Bs} + (b-2t_s) \sqrt{\sigma_{Bc}}}) \right\} / d_b \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、

p_w, σ_{wy} : せん断補強筋比及びせん断補強筋降伏強度

σ_{Bs}, σ_{Bc} : それぞれ外殻、コアコンクリート強度

d_b : 隅角部の主筋直径

Σd_b : 一列に並ぶ主筋直径の総和

N_s, N_u : それぞれ一列の主筋のうち直接副帯筋のかかっているものといないものの本数。

N_t : 一列の全主筋本数 ($N_t = 2 + N_s + N_u$)。

t_s : PCa管の厚さ

表2及び3の付着耐力計算値は上式による τ_{bu} 計算値を用いて、部材端部で主筋応力を算出し($\sigma = \tau_{bu} \cdot \phi \cdot h/2$)、断面解析による主筋応力と一致する時点の耐力を算出して実験値と比較している(ただし $\sigma > \sigma_y$ となる時は“—”を記入している)。曲げ破壊を生じなかった試験体の計算結果は主筋径、軸力にかかわらず精度良く実験結果を捉えており、各試験体の破壊モードも一致している。また図13は実験値(τ_{bu-exp})と計算値(τ_{bu-est})を比較したものである。

4. 部材靱性の評価

本論文で対象としている構造形式においては付着に対する設計法を確立することが不可欠であるといえる。特にぜい性的な付着破壊を避けるため、せん断補強筋量、コアコンクリート強度等を総合的に評価し、部材に欲求される性能を確保できるような設計法の確立が望まれる。

本構法は柱内のりスパン中央の主筋端部で応力が0であるので、例えば部材の曲げ降伏に必要な主筋の付着応力度(τ_{by})は(9)式で与えられるなど、部材耐力と付着強度の関係を比較的捉えやすい。これを用いて、付着破壊、曲げ降伏後の付着破壊、曲げ破壊を生じた各試験体を付着強度と変形能の関係で捉えることを試みる。図14は軸力が $1/3F_{cbD}$ 以下のPCa試験体を対象に、 τ_{by} に対する τ_{bu} 実験値(最大耐力時の付着強度で主筋の降伏域を除いたもの)の比を縦軸に、横軸に各試験体の最大耐力時層間変形角をとって示したものである。また図中の矢印はジャッキのストローク等実験上の都合で決まった最大変形角で、未だ最大耐力に至っていないことを示している。

同図によれば、(τ_{bu}/τ_{by})と最大耐力時層間変形角の間には強い相関が見られ、矢印付き試験体を除く最小二乗法による近似(図中破線)の相関係数は $\gamma = 0.71$ であった。また同図より $1.0 < (\tau_{bu}/\tau_{by}) \leq 2.0$ の範囲に曲げ降伏後に付着破壊を生じた試験体が集中している。以上から降伏ヒンジを計画する柱では、 $R > 1/100$ で $\tau_{bu}/\tau_{by} > 2.0$ を確保するように、図14中に直線で示し

図14 付着強度比と変形能の関係

た近似式を平行移動した(10)式で部材終局時層間変形角に対応する必要付着強度を算定する設計法が一例として考えられる。

$$\tau_{by} = \sigma_y A_s / (h/2 \cdot \phi) = \sigma_y d_b / 4h \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\tau_{bu} / \tau_{by} > 1.37 + 62.9 R_u \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 σ_y, A_s, ϕ : 主筋降伏強度、断面積及び周長

h : 柱内のり高さ

R_u : 最大耐力時層間変形角

5. 結論

本研究により以下に示す知見が得られた。

- (1) PCa管を用いた突合せ継手試験体は同一せん断補強筋量であれば副帯筋(中子筋)を使用するほうが外殻とコアコンクリートの一体性が向上することにより付着性状が優れる。
- (2) 部材の曲げおよびせん断耐力はPCa管の強度を考慮する継手のない場合の提案式によって求められる。
- (3) 逆対称荷重ではモーメントが0となる部材中央で添え筋に引張りずみが生じ、添え筋が部材中央付近で降伏すると部材の耐力上昇が望めなくなる。この現象は、軸力とせん断ストラットの材軸方向成分によると考えられ、添え筋を降伏させない設計が必要である。
- (4) 付着破壊試験体は本構造形式特有の外殻とコアが一体性を失う割裂パターンを生じ、主筋と添え筋間に応力伝達となされなくなる一種の継手破壊によって耐力が低下したと考えられる。
- (5) 添え筋降伏による破壊耐力、付着割裂破壊耐力の算定方法を提案し、本実験結果との対応性が良いことを確認するとともに、部材の靱性を考慮した付着設計法を提案した。
- (6) 突合せ継手部材の曲げおよびせん断耐力はPCa管を使

用した継手のない部材の耐力式で評価可能である。

謝辞

本研究を行うにあたり、遠心成形PCa管の製作には三菱マテリアル建材㈱のご協力を得た。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 増田安彦, 吉岡研三, 脇坂達也: 添え筋を用いた太径異形鉄筋継手に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol. 1, No. 1, pp. 91~103, 1990年7月
- 2) 増田安彦, 吉岡研三, 脇坂達也: 突合せ式重ね継手を有するハーフプレキャスト柱部材に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 2, pp. 113~118, 1992年
- 3) 増田安彦, 吉岡研三: 突合せ式重ね継手を有するハーフプレキャスト柱部材の耐力性状に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 2, pp. 113~118, 1994年
- 4) 六車照, 渡辺史夫: 鉄筋コンクリート柱のせん断抵抗機構に関する研

- 究, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 341, pp. 11~18, 1984年7月
- 5) 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報告集, No. 458, pp. 109~118, 1994年4月
 - 6) 森田司郎, 角徹三: 繰り返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究, 日本建築学会論文報告集, No. 229, pp. 15~24, 昭和50年3月
 - 7) 増田安彦, 吉岡研三, 脇坂達也: 太径異形鉄筋の重ね継手に関する研究 その4) 突き合わせ継手工法の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 681~682, 1990年6月
 - 8) 増田安彦, 吉岡研三, 脇坂達也: 太径異形鉄筋の重ね継手に関する研究 その6) 突き合わせ継手工法の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 337~338, 1991年9月
 - 9) 増田安彦, 吉岡研三, 脇坂達也: 太径異形鉄筋の重ね継手に関する研究 その8) 突き合わせ継手工法の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 947~948, 1992年8月
 - 10) 前田匡樹, 小谷俊介, 青山博之: RC部材の付着割裂強度に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, No. 2, pp. 145~150, 1991年

(1995年2月9日原稿受理, 1995年6月22日採用決定)