

超高層RCプレキャストコンクリート工法の開発（その1） （柱および梁部材実験）

Development of High-rise Building Construction Method with Precast Reinforced Concrete Members (Flexural Test of Column and Beam Members)

笠松 照親*	飯塚 信一**
Teruchika Kasamatsu	Shin-ichi Iizuka
塩川 真**	金川 基**
Shin Shiokawa	Motoi Kanagawa

要 約

近年の労務事情の悪化、工期短縮といった社会的背景を踏まえ、当社では、超高層RC建物（40～50階）の施工における合理化を目的として、構造体コンクリート部材をプレキャストコンクリート（以下、PCaと称す）化する工法の開発を行うこととなった。

そこで、工法開発のための基礎資料を得ることを目的とし、柱および梁部材の曲げせん断実験を行った。柱部材実験では、モルタル充填式スリーブ継手を端部に適用したPCa柱部材と一体打ち柱部材を比較した結果、耐力および靱性能においてもPCa部材が一体打ち柱部材より向上することが認められた。梁部材実験では、ハーフPCa梁における工法上生ずる梁端部での鉛直打ち継ぎ部の形状が問題となるが、コッターを設けることで梁端部のすべり量を一体打ち梁部材と同程度にまで改善されることが分かった。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 柱部材実験
- § 3. 梁部材実験
- § 4. おわりに

§ 1. はじめに

近年、恒常的に建設技能者が不足し、また、日本の社会構造の変化にともなう建設技能者の労賃が急上昇して

いる。そのため、現場労務の簡素化、高品質化、さらには工期短縮という社会のニーズが生じている。これらの要望に応えるため、現場における作業をできるだけ減らし、工場生産された鉄筋コンクリート部材を建設現場で接合して組み立てるプレキャスト鉄筋コンクリート（以下、PCaと称す）構造に対する需要が高まっている。

PCa構造は、部材がよく品質管理された工場で製造されるため、場所打ち鉄筋コンクリートよりもコンクリート強度および配筋の精度がよく、工場生産された部材を相互に接合して構造物を組み立てるといった特徴があるが、設計は場所打ち鉄筋コンクリート構造と同等な性能をもたせるよう行われることが多い。一方、PCa構造に関する既往の実験的研究によれば、部材の接合部位の配筋詳

* 技術研究所研究部

** 技術研究所原子力課

細、定着方法を適切に行えば、一体打ちと同等の性能が得られるとされている。

このような状況下で、建設業界では生産性の向上を目指した施工システムの合理化・省力化工法の研究開発が盛んに行われている。そこで、当社としても在来工法の合理化だけにとどまらず、PCa工法の開発を推進するに至った。開発にあたっては、40～50階建ての超高層RC建物を想定し、部材のPCa化に当たっては、これまでの部分的（スラブ、外壁など）なものにとどまらず、超高層RC建物の構造躯体全体をPCa化する架構式PCa工法の研究開発を最優先することにした。

以上の経緯より、本報告は、工法開発のための基礎資料を得ることを目的として行った。柱および梁部材の曲げせん断実験について述べるものである。

§ 2. 柱部材実験

2-1 目的

本実験は、市販のモルタル充填式スリーブ継手を用いて、(財)日本建築センター鉄筋継手研究委員会会で提案されている部材試験法に基づいた片持ち方式によって、PCa部材の曲げ破壊実験を行い、スリーブ継手をPCa柱部材の端部に適用した場合の構造性能を調べると共に、継手を使用しない一体打ち（以下、RCと称す）の柱部材との比較を通して、主に継手が部材の挙動に及ぼす影響を検討することを目的としている。

2-2 実験概要

(1) 試験体

試験体諸元を表-1に示す。試験体の形状寸法および配筋の一例を図-1に示す。試験体は実大の約1/2模型とし、柱断面寸法は $B \times D = 500 \times 500 \text{ mm}$ である。せん断スパン比は $a/D = 2.0$ とし、全試験体とも共通である。PCa部材には、無収縮グラウトモルタルを注入する市販のスリーブ式継手（2種類）をPCa柱部材に適用した。試験体数は3体で、そのうち1体はPCa部材と比較するための継手のないRC部材である。PCa試験体は、基礎スラブ部分とPCa部分を別々に打設し、硬化後部材のジョイントを行った。継手は、スラブ面と脚部との間隔を20mmとし、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注入した。

(2) 使用材料

試験体に使用した高強度コンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を表-2に示す。各試験体の解析に用いるコンクリートの材料特性に関しては、供試体強度のばらつきを考慮し、加力日に行った全ての供試体の平均値を用

表-1 試験体諸元

No	試験体	継手	共通事項
1	C-1	有	・断面 $b \times D = 500 \times 500 \text{ mm}$ ・主筋 16-D25 $Pt = 1.42\%$ ・補強筋 4-U10.7@150 $Pw = 0.48\%$ (継手部 4-U7.1@65) ・せん断スパン比 $a/D = 2.0$
2	C-2	有	
3	C-3	無	

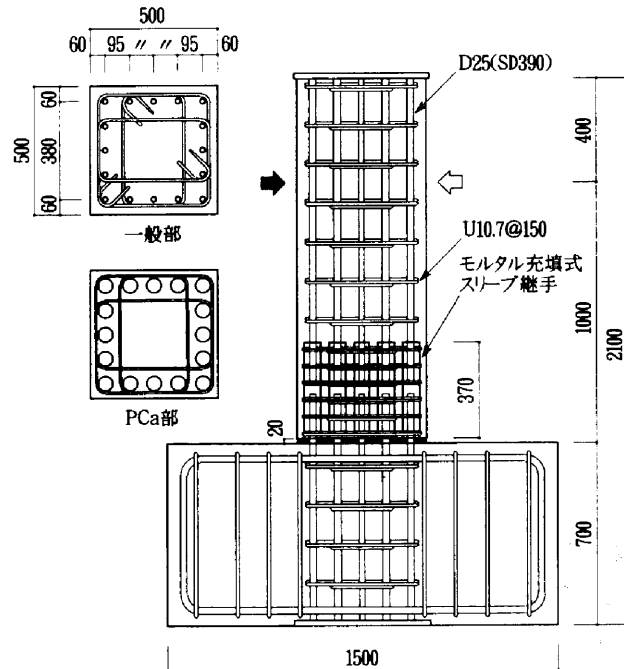


図-1 試験体形状および配筋（C-1）

表-2 材料試験結果

	コンクリート			グラウト材
	圧縮強度	割裂強度	弾性係数	圧縮強度
実験時平均	645	38.2	3.44×10^5	983, 1030
鉄筋	降伏強度	引張強度	弾性係数	伸び
U7.1*1	12742	16343	1.74×10^6	—
U10.7*1	13002	14199	1.73×10^6	—
D25	4698	6633	1.90×10^6	21.9%
D25*2	4825	6558	1.88×10^6	18.9%

*1: 異形PC鋼棒 *2: ネジ節鉄筋

いた。主筋は、異形棒鋼SD390のD25を、せん断補強筋は、継手部にはU7.1を、他の部分にはU10.7の異形PC鋼棒を使用した。

(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、片持ち形式で一点集中載荷とし、油圧ジャッキにより加力を行った。なお、軸方向力は加えていない。加力スケジュー

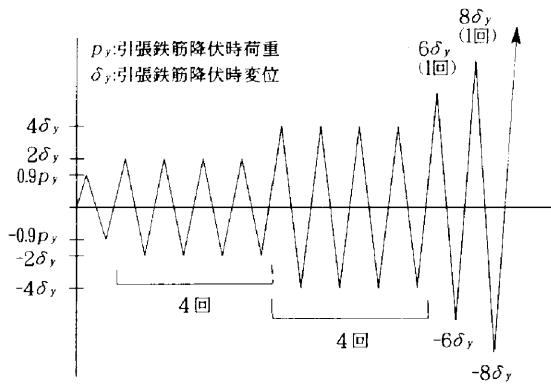


図-3 加力サイクル

を図-3に示す。加力の制御は、引張鉄筋の降伏時荷重 P_{fy} の0.9倍の荷重を1回、その後、引張鉄筋降伏時変位を δ_y とし、 $2\delta_y$ 、 $4\delta_y$ を各4回、 $6\delta_y$ 、 $8\delta_y$ を各1回でそれぞれ正負交番繰り返し加力を行った。

測定は、荷重は100tfロードセルにて測定し、部材の加力点位置(2D)における全体変形と脚部の目開きおよびすべり量を測定した。また、曲げ変形の測定も行った。主筋のひずみ、せん断補強筋のひずみについても測定を行った。

2-3 実験結果および考察

(1) 破壊状況

各試験体の最終ひび割れ状況を図-4に示す。初曲げひび割れは、RC部材は柱脚部に生じたが、PCa部材は2体ともスリーブ上端部に生じた。PCa部材は加力が進むに従って継手位置の上下のひび割れが大きく開いた。そのほかに小さなせん断ひび割れが多数発生したが、コンクリートの剥離は軽微で大きな耐力低下は生じなかった。RC部材では、ひび割れ発生状況はPCa部材とあまり変化はないが、 $4\delta_y$ 以降かぶりコンクリートの剥離が生じた。

(2) 荷重-部材角関係

各試験体の実験結果を表-3に示す。各試験体の荷重-部材角曲線を図-5に示す。各試験体とも引張主筋降伏後も耐力は上昇し、 $4\delta_y$ サイクル（部材角 $R=25\sim 30\times$

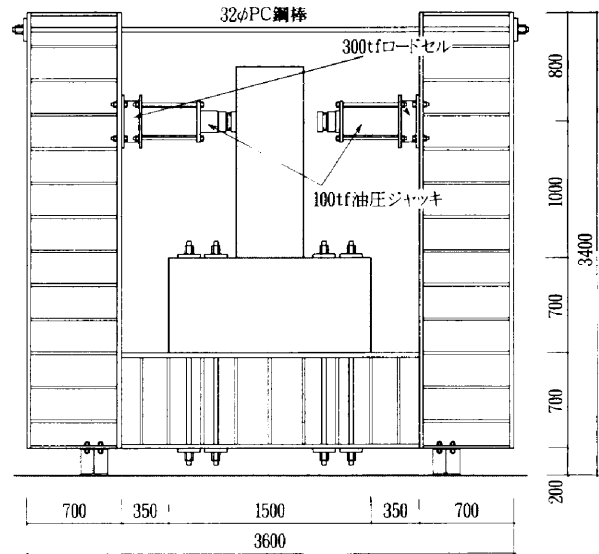


図-2 加力装置

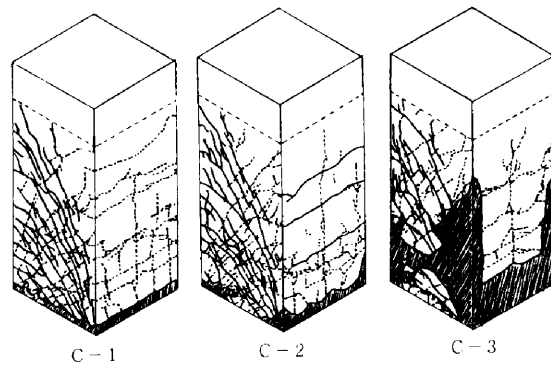


図-4 最終ひび割れ状況

表-3 実験結果

(tf)

試験	実験値		曲げ降伏耐力		曲げ終局耐力	
	eQy	eQu	cQy	実/計	cQmu	実/計
C-1	66.3	93.7	61.8	1.07	66.7	1.40
C-2	72.5	96.1	63.5	1.14	68.5	1.40
C-3	87.6	87.6	61.8	1.15	66.7	1.31

注) 実験値 eQy: 引張鉄筋降伏時耐力 eQu: 最大耐力
計算値 cQy: e関数法による cQmu: 学会略算式

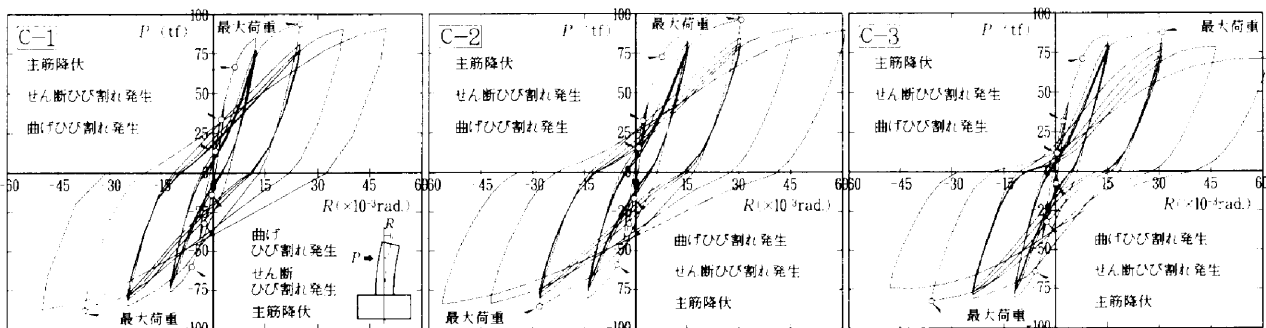


図-5 荷重-部材角曲線

10⁻³rad.)時に最大荷重に達し、その後、緩やかに荷重は低下している。最大荷重以降の耐力低下は、8thサイクル時においてPCa部材は約3～7%、RC部材では26%でPCa部材の方がRC部材に比べても十分な靱性能を有している。RC部材は最大荷重以降かぶりコンクリートの剥離が生じたため、荷重低下の割合がPCa部材よりも大きくなっていると考えられる。

最大耐力において、2体のPCa部材についてはスリーブ継手の違いによる耐力差はほとんど認められなかった。PCa部材とRC部材を比較した場合、約7～10%程度PCa部材の方が耐力が大きくなっており、降伏後の変形性能を見ても、RC部材よりもPCa部材の方が十分な靱性を持っていると考えられる。

(3) すべり変形量

部材脚部において計測されたすべり変位量の加力点の全水平変位に対する比と部材角との関係（正サイクル時）を図-6に示す。すべり変形量比は、RC部材は部材角に関係なく概ね5%のほぼ一定値を示しているが、PCa部材はR=45～50×10⁻³rad.で最大となり、13～14%となっている。R=15×10⁻³rad.まではPCa部材とRC部材との差は余り見られないが、それ以降、PCa部材はすべり変形量比が増加していく傾向にある。

(4) 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} の部材角に伴う推移（正サイクル時）を図-7に示す。R=30×10⁻³rad.までは、PCa部材はRC部材より h_{eq} は若干小さくなっているが、それ以降ほとんど差はみられない。また、各試験体とも部材角が増えるごとに h_{eq} は増加しているが、部材角が約15×10⁻³rad.以降は上昇率は緩やかになっている。

(5) 曲率分布

各試験体の材軸に沿う曲率分布（正サイクル時）を図-8に示す。図で見られるように、PCa部材はスリーブ位置での曲率は小さく、その区間は剛体のように振る舞っ

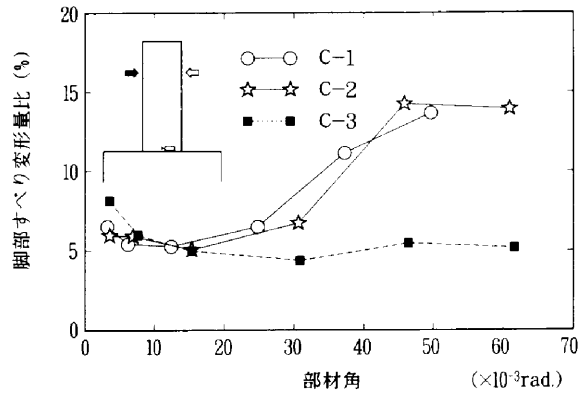


図-6 部材角とすべり変形量比の関係

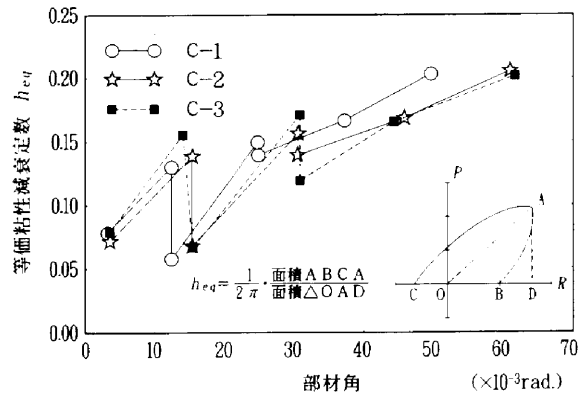


図-7 部材角と等価粘性減衰定数の関係

ていることが分かる。その反面、スリーブ上部に曲率は集中している。RC部材は端部に曲率が集中しているが、0.5Dから加力点までの区間では、6thサイクル以降、主筋が弾屈現象をおこし、曲率が負側に移行している。

2-4 まとめ

実験結果より、以下の知見が得られた。

- 1 最大耐力は、PCa部材の方が約7～10%程度RC部材よりも耐力が大きく、また、最大耐力以降、RC部材ではコンクリートの剥離が著しく、最大耐力以降の耐力低下は8thサイクル時に対して26%であるが、PCa部材は約3～7%程度で極めて小さく、靱性能においても

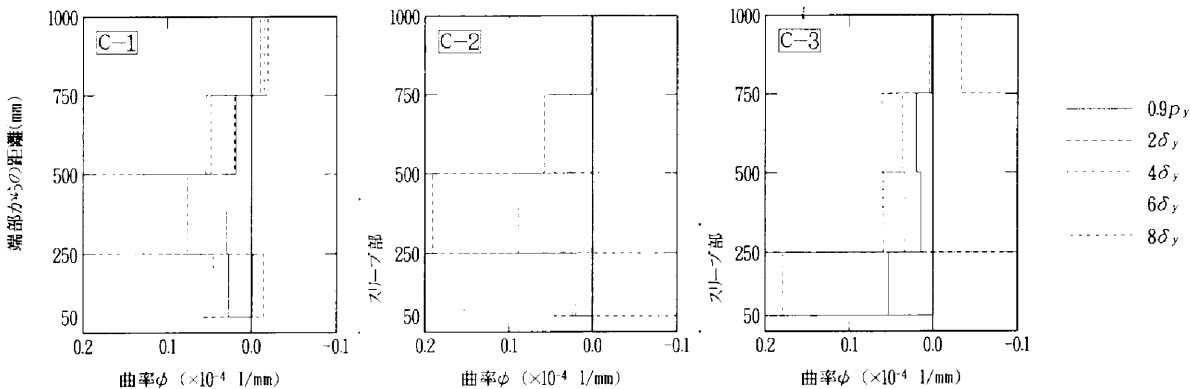


図-8 曲率分布

PCa部材がRC部材より向上することが認められた。
 ② すべり変形量比は、RC部材は部材角に関係なく概ね5%のほぼ一定値を示しているが、PCa部材は部材角の増加に伴い大きくなる傾向にある。

§ 3. 梁部材実験

3-1 目的

本報は、ハーフPCa梁の、主に梁端部境界面のすべり性状に関する曲げせん断実験を行い、PCa梁端部の耐震設計のための基礎的資料を得るものである。

ハーフPCa梁部材は、打ち込みコンクリートにより部材相互の接合が可能であることから、在来工法との適応性がよいという利点を有している。その半面、断面内に新旧コンクリートの打ち継ぎ面が必ず存在することになり、この工法上生ずるスラブ下面での水平打ち継ぎ部および梁端部での鉛直打ち継ぎ部における一体性が問題となる。本実験は、打ち継ぎを有するハーフPCa梁試験体について、片持ち方式の曲げせん断実験を行い、一体打ち梁と比べて、工法上生ずる打ち継ぎ部、主に梁端部打ち継ぎ部が構造性能に与える影響を検討することを目的としている。

3-2 実験概要

(1) 試験体

試験体諸元を表-4に示す。試験体の形状寸法および配筋の一例を図-9に示す。試験体は実尺の約1/2模型とし、梁断面寸法は $b \times D = 350 \times 500 \text{ mm}$ である。想定した破壊モードは曲げ破壊先行型で、せん断スパン比は $a/D = 2.0$ とし、全試験体共通とした。コンクリートの打設方向は平打ちとし、水平打ち継ぎ面の処理はワイヤ

ーブラシによる粗面仕上げとした。試験体パラメータは、梁端部の鉛直打ち継ぎ部の形状であり、コッターおよびかかりを有するものを基本形とした。B-4試験体は現場一体打ちである。

(2) 使用材料

試験体を使用したコンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を表-5に示す。各試験体の解析に用いるコンクリートの材料特性に関しては、供試体強度のばらつきを考慮し、加力日に行った全ての供試体の平均値を用いた。また、一体打ち試験体は後打ち部の値を用い、他の試験

表-4 試験体諸元

No.	試験体	梁端部		共通事項
		コッター	かかり	
1	B-1	有	有	・断面 $b \times D = 300 \times 500 \text{ mm}$ ・主筋 4-D25 $P_t = 1.42\%$ ・補強筋 4-U10.7@150 $P_w = 0.48\%$ ・せん断スパン比 $a/D = 2.0$
2	B-2	無	有	
3	B-3	無	無	
4	B-4	—	—	

表-5 材料試験結果

(kgf/cm^2)

コンクリート	圧縮強度	割裂強度	弾性係数	ポアソン比
PCa部	763	37.2	3.75×10^4	0.21
後打ち部	761	35.6	3.59×10^4	0.20
鉄筋	降伏強度	引張強度	弾性係数	伸び
D13	4661	6342	1.83×10^4	19.8%
D25	4698	6568	1.90×10^4	21.9%
D25*1	4675	6501	1.75×10^4	23.9%

*1: B-3試験体

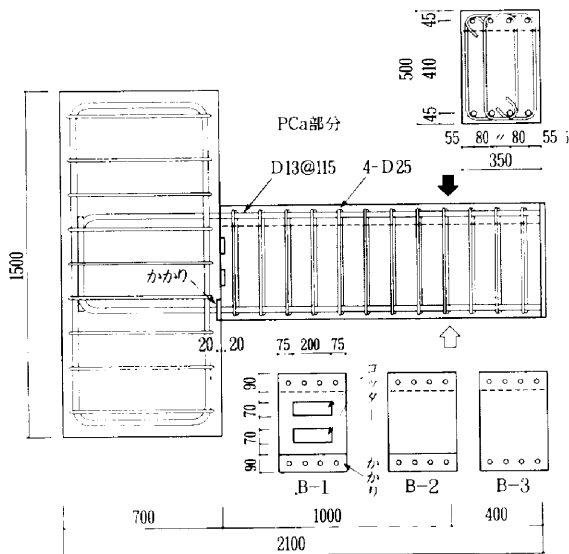


図-9 試験体形状および配筋 (B-1)

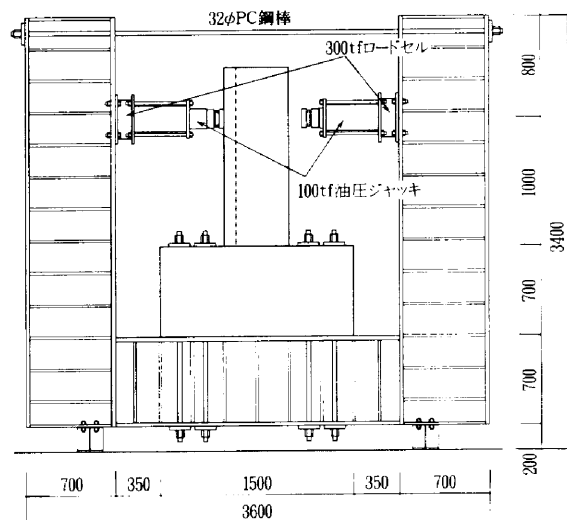


図-10 加力装置

体はPCa部と後打ち部の平均値を用いた。主筋は異形棒鋼SD390のD25を、せん断補強筋はSD390のD13を使用し、全試験体とも同一配筋とした。

(3) 加力および測定方法

加力装置の概要を図-10に示す。加力方法は、片持ち形式で一点集中荷重とし、油圧ジャッキにより正負交番繰り返し加力を行った。加力の制御は、「§2. 柱部材実験」と同様である。(図-3参照)

測定は、加力点位置(2D)における全体変形、水平打ち継ぎ部の水平ずれ変位および鉛直方向変位、梁端部の目開きおよびすべり量を測定した。また、曲げ変形の測定も行った。主筋のひずみ、せん断補強筋のひずみについても測定を行った。

3-3 実験結果および考察

(1) 破壊状況

各試験体の実験結果一覧を表-6に示す。各試験体の最終ひび割れ状況を図-11に示す。各試験体とも、ほぼ同様の破壊経過を示し、部材角 $R=0.2\sim 0.4\times 10^{-3}\text{rad}$ で部材端部より曲げひび割れが発生し、 $R=2.5\sim 2.7\times 10^{-3}\text{rad}$ でせん断ひび割れが発生した。その後、荷重の増加につれて、 $R=3.9\sim 4.1\times 10^{-3}\text{rad}$ で端部から1.5D付近に水平打ち継ぎ部にひび割れが発生した。コンクリートの剥離状況は、一体打ちのB-4試験体では破壊による剥離が多少見られる程度であるが、コッターの無いB-2、3試験体は端部全域にわたって剥離が生じた。水平打ち継ぎ部は、ひび割れが発生したが、大きなずれが発生することはなかった。

(2) 荷重-部材角関係

各試験体の荷重-部材角曲線を図-12に示す。正加力時において、B-1、2試験体は6 σ_y サイクル($R=34\sim 38\times 10^{-3}\text{rad}$)時に最大荷重に達し、その後の耐力低下はほとんどなかった。B-3、4試験体は、最終サイクル時まで耐力が上昇した。負加力時においては、コッターの有るB-1と一体打ちのB-4試験体は6 σ_y サイクル($R=34\sim 39\times 10^{-3}\text{rad}$)時に最大荷重に達し、その後

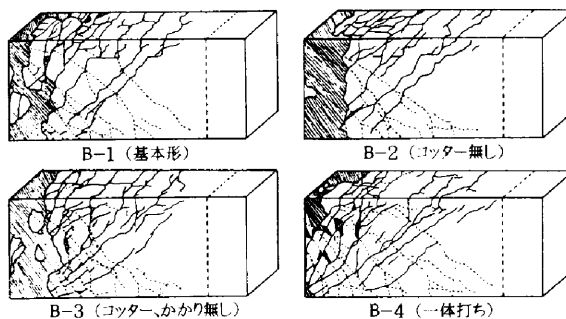


図-11 最終ひび割れ状況

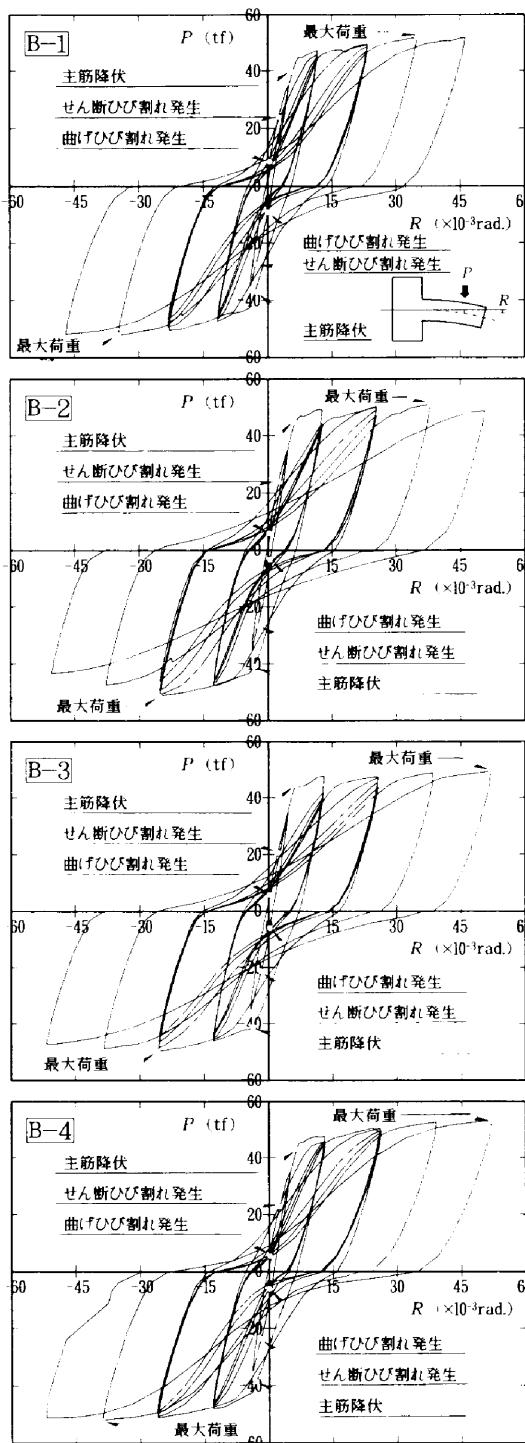


図-12 荷重-部材角曲線

表-6 実験結果

試験	実験値		曲げ降伏耐力		曲げ終局耐力	
	eQy	eQu	cQmu	実/計	cQmu	実/計
B-1	39.7	51.8	39.0	1.02	39.0	1.33
B-2	41.7	50.9	39.0	1.15	39.0	1.30
B-3	43.0	52.9	39.0	1.10	39.0	1.36
B-4	41.4	49.3	38.8	1.11	38.8	1.27

注) 実験値 eQy: 引張鉄筋降伏時耐力 eQu: 最大耐力
計算値 cQmu: 学会略算式

の耐力低下はほとんどなかった。コッターの無いB-2、3試験体は最大耐力後、最終サイクル時では5~15%程度耐力は低下しているが、大きな耐力低下はしておらず、安定したループを描いている。

（3）すべり変形量

部材脚部において計測された鉛直方向すべり変形量の加力点の全鉛直変位に対する比と部材角との関係（正サイクル時）を図-13に示す。すべり変形量比は、 $R=13 \times 10^{-3} \text{rad}$ までは各試験体とも5~7%とほぼ一定値を示しているが、それ以降、コッターの無いB-2、コッターとかかりの無いB-3試験体のすべり変形量比は急激に大きくなり、最終サイクル時では39~42%と大きく、一体打ちのB-4試験体の16%に比べて2倍以上の大きな値となっている。また、 $R=38 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時で、上記2体を比較すると、B-3はB-2より6%値が小さくなっており、かかりを設けることによりすべり変形量比は若干減少している。コッターの有るB-1試験体と一体打ち試験体B-4を比較すると、 $R=13 \times 10^{-3} \text{rad}$ 以降、B-1試験体は若干すべり変形量比は大きい。その差は2%程度で $R=40 \times 10^{-3} \text{rad}$ まではあまり差はなく、コッターを設けることですべり変形量比は改善される結果となった。

3-4 まとめ

- 1 一体打ちのB-4試験体と他のPCa試験体の荷重-変形曲線においては、ほとんど差はなく安定したループを描いている。
- 2 すべり変形量比は、コッターの有無により大きな違いがあり、コッターを設けることで脚部のすべり量は改善される。

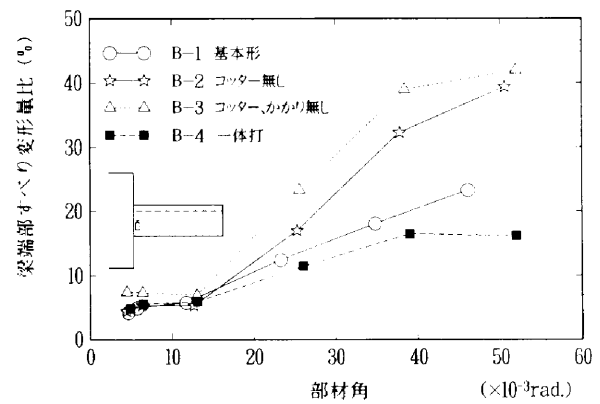


図-13 部材角とすべり変形量比の関係

§ 4. おわりに

本研究を行うに際しては、関東学院大学工学部教授、榎谷栄次先生に貴重なるご指導ご助言を賜りましたことを、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：鉄筋継手の性能試験及び設計（報告書）、1986。
- 2) 日本建築センター：鉄筋継手性能基準、1982
- 3) 榎谷栄次、望月一重、松崎育弘、小椋克也：ネジスリーブ継手を有するプレキャスト部材の力学的挙動に関する研究、JCI年次論文報告集第13巻2号、pp175~180、1991年6月
- 4) 塩川、金川 他：超高层RCプレキャスト工法の開発（その1、その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp421~424、1995