

# 遠心成形プレキャストコンクリート部材の開発

——「プレカラム」の力学的諸性状について——

増田 安彦 吉岡 研三  
脇坂 達也

## Development of Precast Concrete Member Molded by Centrifugal Force

——Mechanical Properties of 「Pre-Column」——

Yasuhiko Masuda Kenzoh Yoshioka  
Tatsuya Wakisaka

### Abstract

To save labor for formwork and installation of reinforcement at the construction site and to shorten the construction period through the use of precast concrete members, 「Pre-Column」, which is a square pipe of centrifugally-compacted concrete, was developed and the method of using Pre-Column as a pillar member and a form for concrete was devised. There are two types of Pre-Column; one is a structure type containing shear reinforcement, and the other is a form type containing wire mesh. Both types are constructed by filling the interiors with cast-in-place concrete. The features of Pre-Column are high compressive strength and a very finely-textured surface.

This paper describes the results of watertightness tests performed to study the thickness required to prevent cracking of the Pre-Column by lateral pressure of interior concrete during placement and shear-flexure tests of precast concrete pillars aiming for confirmation of structural performance.

### 概要

建設工事における現場での型枠工事や鉄筋工事の省力化と、部材のプレキャスト化による工期の短縮をねらって、遠心力を応用して成形する、薄肉中空角型コンクリート管「プレカラム」を開発し、これを柱型枠兼用の構造部材として使用する工法を考案した。プレカラムはコンクリート強度が高く、表面が非常に緻密なことが特徴で、フープ筋を打ち込んだ構造体タイプと、ワイヤーメッシュを打ち込み、かぶりコンクリートの一部あるいは型枠としてのみ使用する型枠タイプの2種があり、いずれも現場にて内部コンクリートを充填し、柱部材を構築する。

本報告は、内部コンクリートの打ち込み側圧によって、プレカラムにひび割れが生じない厚さを検討するため実施した水密試験と、プレカラムを使用した半プレキャスト柱の構造性能を確認するため実施した曲げせん断加力実験の結果について述べたものである。柱の構造性能は、従来の一体打ち部材と同等以上であることが確認された。

## 1. はじめに

近年、建設労働者の不足や高齢化が深刻な問題となっており、建築工事の省力化、プレキャスト化が急務とされている。このような背景から、ヒューム管などのように遠心力を応用してコンクリートを締め固める成形方法を用いて、フープ筋や中子筋などを打ち込んだ、薄肉中空角型コンクリート管「プレカラム」を開発し、これを柱型枠兼用の構造部材として使用する工法を考案した。プレカラムの使用によって、柱の型枠工事、フープ筋の配筋工事が省略されることや、プレカラムの表面は非常に緻密で平滑なため、打放し仕上げだけでなく、塗料などの仕上げ下地としても使用が可能であるなど様々なメリットが得られるが、その使用にあたっては、現場施工による内部充填コンクリートの側圧によってプレカラムにひび割れが生じないことや、内部コンクリートとプレカラムとの一体性や部材の耐力などの諸性状について十分な検討が必要となる。本論文は、内部コンクリートの側圧に対するプレカラムの必要厚さの検討結果、およびプレカラムを使用した柱部材

の構造性能を確認するため、実大および小型試験体の曲げせん断加力実験を実施し、在来工法による一体打ち柱部材と比較した結果について述べたものである。

## 2. プレカラムの概要

プレカラムは、回転する鋼製型枠内に生コンクリートを流し込み、重力加速度の30倍の遠心力によって締め固め、その後蒸気養生を行なったのち脱型する、いわゆる遠心成形によって製造する。コンクリート強度（4週コア強度）は675 kg/cm<sup>2</sup>と高強度で、製品の表面は非常に緻密で平滑なのが特徴である。また、その製造方法上の特徴から、断面の厚さが一様でなく、各面中央部は円弧状にくぼみ、隅角部よりやや薄い形状をしている。

写真-1にプレカラムをセットした状況を示す。プレカラムには、フープ筋などを打ち込み、構造体の一部として使用する構造体タイプと、かぶりコンクリートの一部あるいは型枠としてのみ使用する、ひび割れ防止用ワイヤーメッシュを打ち込んだ型枠タイプの2種を考案した。

### 3. 実験目的

プレカラムの高い強度および剛性を利用して、柱の支保工を省略し、工事の省力化をより進めるためには、プレカラムに内部コンクリートを充填する際に生じる打ち込み側圧に対してひび割れが生じないように厚さを検討することが必要となる。本研究では、コンクリート打ち込み側圧を、圧力調節などの取り扱いが簡単な水圧に置き換えた、水密試験を実施し、プレカラムの必要厚さを調べることにした。

また、製作した半プレキャスト柱部材が通常の一打部材と異なる点としては、フープ筋が主筋と緊結されていないこと、プレカラムと内部コンクリートの強度、剛性が異なること、内外コンクリートの付着によって部材を一体化することなどが挙げられる。そのため、部材の耐力、内外コンクリートの一体性、せん断補強筋の補強効果、主筋の座屈などに関する半プレキャスト部材の構造性能を明らかにしなければならない。本研究では、フープ筋を打ち込んだ構造体プレカラム、およびワイヤーメッシュを打ち込んだ型枠プレカラムを使用した半プレキャスト柱部材の曲げせん断加力実験を実施し、各部材の構造性能を一体打部材と対比させて検討することを目的とした。

### 4. 水密試験

#### 4.1 実験概要

図-1に、水密試験に使用した試験体の形状、および試験体のセット状況を示す。試験体は両端にゴムパッキンをあて、その外側からPC鋼棒を締め付け、内部の加压水に対して漏水しない程度に鉄板を押し当てている。加压は図-2で示すようなステップで実施した。すなわち、0.1 kg/cm<sup>2</sup> ずつ単調に試験体内の水圧を上げていくもので、特に、試験体内を満水状態にしたとき、加压 0.5 kg/cm<sup>2</sup>、1.0 kg/cm<sup>2</sup> 時には、それぞれ3分間圧力を保ち、その間の変化を観察した。また、各面中央部の材軸と直行方向にひずみゲージを張付け、各ステップごとのコンクリート表面ひずみを計測した。

#### 4.2 実験結果および考察

加压 0.8 kg/cm<sup>2</sup> 前後でプレカラムの表面中央部付近に斑点状のにじみが見られ、0.9 kg/cm<sup>2</sup> ではそれらが材軸とほぼ平行につながり漏水が開始した。この時点のひび割れ幅は小さく、0.05 mm 以下であった。その後圧力を上げるに従い、ひび割れ幅、本数共に増加し、漏水が顕著になった。

図-3は試験体表面ひずみと圧力の関係を示したものである。0.5 kg/cm<sup>2</sup> 前後まではいずれの面も同様の増加傾向を示しているが、加压が 0.5 kg/cm<sup>2</sup> を超えると、ひび割れの発生した面では、中央部分の引張りひずみだけでなく、両端部の圧縮ひずみの増加傾向も大きくなっている。同図中に一点鎖線で示した直線は、図-4に示すようなプレカラムの1/4断面を取り出したモデルを用いたFEM解析の結果を示したものであるが、加压 0.5~0.6 kg/cm<sup>2</sup> 以下で実験値とよく一致していることが分かる。

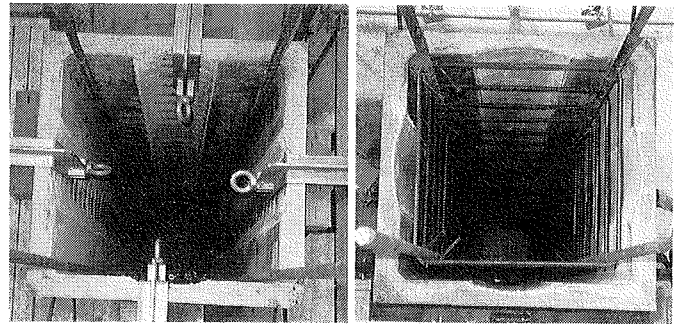


写真-1 プレカラムの形状

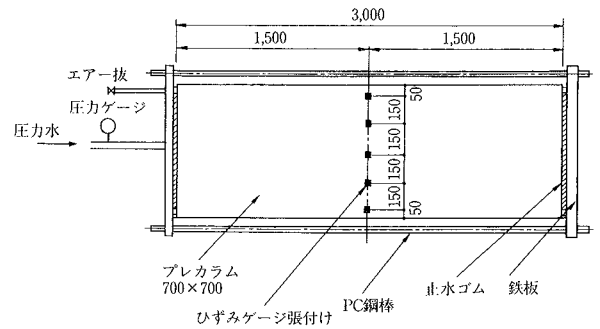


図-1 実験状況

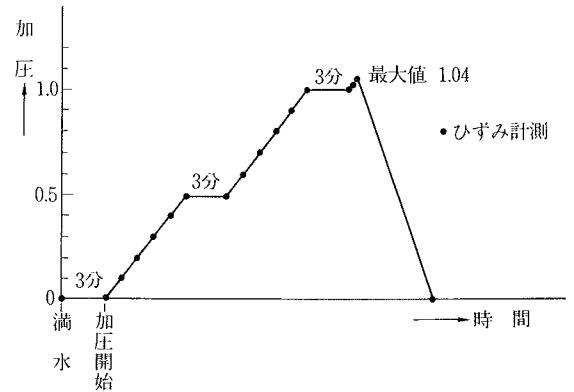


図-2 加压ステップ

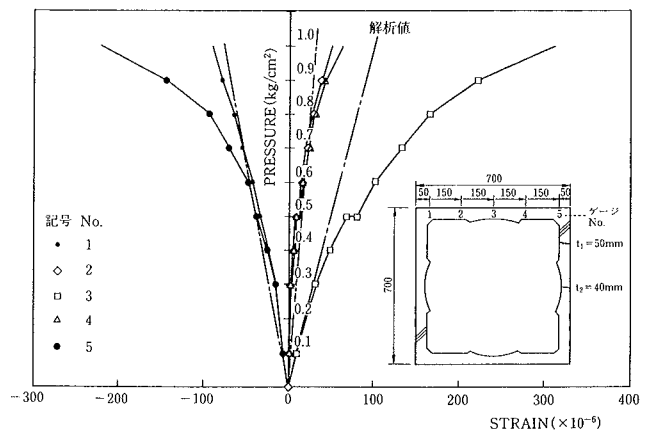


図-3 水圧—表面ひずみ関係

以上の結果から、柱型枠に生じる最大側圧を  $P_s \text{ kg/cm}^2$  とし、コンクリートの設計基準強度を  $F_c \text{ kg/cm}^2$ 、曲げ強度を  $F_b \text{ kg/cm}^2$  とし、プレカラムの隅角部の厚さ  $t_1$  と中央部の厚さ  $t_2$  を、簡単な弾性計算によって算出する。

解析結果から分かるように、側圧が作用したプレカラムの応力状態は両端固定ばりに類似しており、圧力  $P_s$  が作用した場合、長さ  $l$  で一定断面の両端固定ばりでは端部モーメントが  $P_s l^2/12$ 、中央は  $P_s l^2/24$  であるのに対して、プレカラムの場合端部でその0.9倍、中央で1.3倍となっている。そこで、端部モーメントを  $M = P_s l^2/12 \times 0.9$ 、中央を  $M = P_s l^2/24 \times 1.3$  とすると単位幅のプレカラムに対して次の各式が成り立ち、各部の所要厚さが求まる。

$$F_b > \frac{M}{Z} = \frac{P_s l^2/12 \times 0.9}{t_1^2/6}$$

$$F_b > \frac{M}{Z} = \frac{P_s l^2/24 \times 1.3}{t_2^2/6}$$

### 5. 曲げせん断加力実験

#### 5.1 実験概要

表-1 に実験概要を示す。実験は、軸力のない実大試験体の曲げせん断実験（シリーズ I）と、軸力を作用させた小型試験体（シリーズ II）の二つのシリーズよりなっており、試験体数は、シリーズ I が 6 体、シリーズ II が 4 体の計 10 体である。表-2 に材料強度を示す。

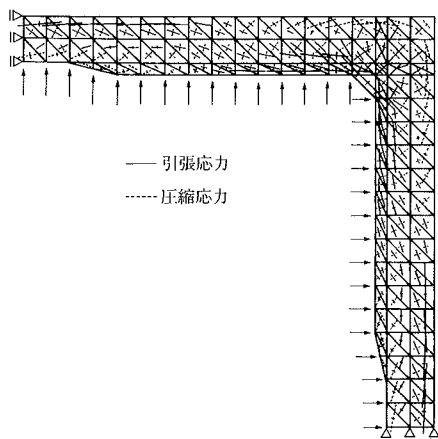
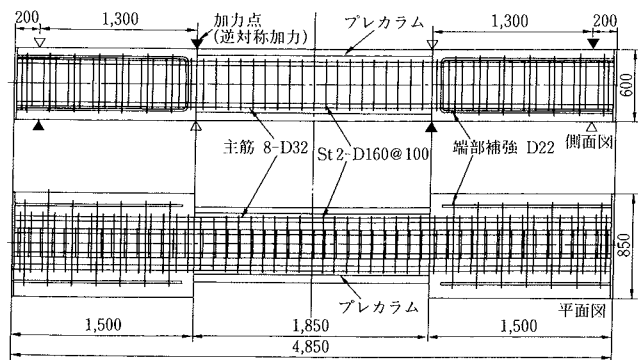


図-4 解析モデルと応力図



シリーズ I は、2 種のプレカラムを使用して、フープ筋量を 2 種に変化させた実験で、破壊モードが異なる場合、すなわち曲げ破壊とせん断破壊を生じた場合のそれぞれについて、半プレキャスト柱部材の諸性状を調べることを目的としている。試験体の断面および形状を図-5 に示す。

シリーズ II では、シリーズ I と同様に 2 種のプレカラムを使用し、軸力下の各柱部材の力学性状を調べたもので、断面の詳細、試験体形状を図-6 に示す。載荷はいずれのシリーズも、正負交番繰り返し載荷とした。

#### 5.2 実験結果および考察

##### 5.2.1 シリーズ I

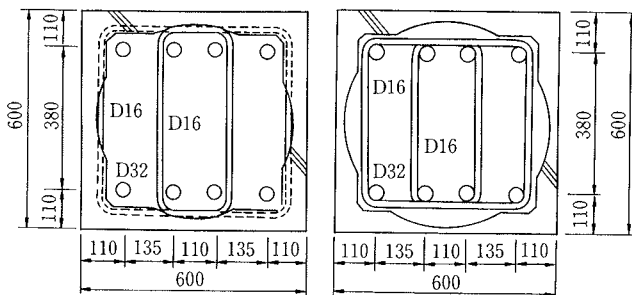
表-1 実験概要

試験体	断面 (mm)	主筋 (p <sub>s</sub> %)	フープ筋 (p <sub>w</sub> %)	軸力 (*F <sub>c</sub> BD)	PCa管 タイプ
シリーズ I	600×600	8-D32 (1.76%)	4-D16 @100 (1.33%)	なし	型枠
					構造体
					一体打ち
		12-D35 (3.19%)	4-D13 @120 (0.71%)		構造体
					型枠
					一体打ち
シリーズ II	400×400	12-D19 (2.15%)	2-D16 2-D13 @85 (1.92%)	1/3	構造体
				1/4	構造体
				1/4	型枠
				1/3	一体打ち

表-2 使用材料

シリーズ	鉄筋			コンクリート		
	径	弾性係数 kg/cm <sup>2</sup>	降伏強度 kg/cm <sup>2</sup>	引張強度 kg/cm <sup>2</sup>	弾性係数 kg/cm <sup>2</sup>	
I	D13	1.85 × 10 <sup>6</sup>	3,530	5,160	181	1.61 × 10 <sup>5</sup>
	D16	1.78 × 10 <sup>6</sup>	3,500	5,100	1-1~3	1-1~3
	D32	1.95 × 10 <sup>6</sup>	3,560	5,490	196	2.35 × 10 <sup>5</sup>
	D35	1.95 × 10 <sup>6</sup>	3,860	6,230		
II	D13	1.86 × 10 <sup>6</sup>	3,470	5,160	252	2.37 × 10 <sup>5</sup>
	D16	1.82 × 10 <sup>6</sup>	3,710	5,660		
	D19	1.85 × 10 <sup>6</sup>	3,650	5,970		

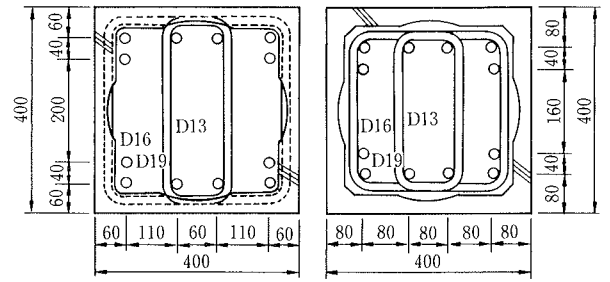
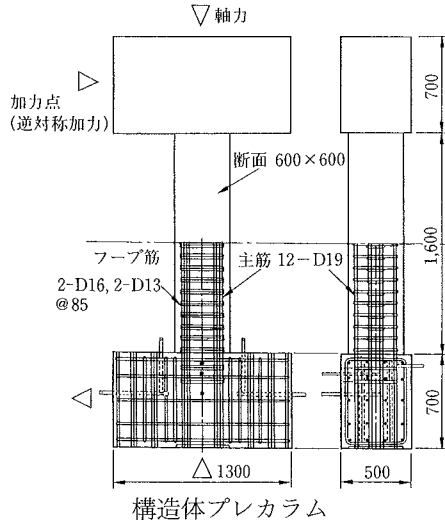
\*コンクリートの弾性係数は1/3割線弾性係数



構造体プレカラム

型枠プレカラム

図-5 シリーズ I の試験体



型枠プレカラム

図-6 シリーズIIの試験体

(1) 耐力性状 表-3 にシリーズ I の実験結果の一覧を、図-7 に各試験体のせん断力-層間変位関係(Q- $\delta$  関係)を示す。まず、フープ筋量が多く、部材が曲げ破壊を生じる試験体 I-1 ~ I-3 では、主筋降伏変位の 7 倍まで繰り返し荷重を行なったが、いずれの試験体も、耐力性状、Q- $\delta$  関係に大差なく、プレカラムの種類にかかわらず、曲げせん断荷重下における履歴性状、耐力性状は一体打ちのものと同等であることが分かる。一方、せん断破壊を生じる試験体 I-4 ~ I-6 のうち、I-5 試験体は、型枠プレカラムの厚みの関係上、他の試験体より主筋が内側にあるため耐力が低いが、最大耐力時の変形量も小さい結果を得た。この試験体 I-5 のせん断破壊は、プレカラムに打ち込んだワイヤーメッシュの破断とほぼ同時に生じた。I-4、I-6 試験体は主筋位置が同じであるにもかかわらず、構造体プレカラムを使用した I-4 試験体のほうが、一体打ちの

表-3 シリーズ I 実験結果

試験体	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6
弾性剛性 実験値t/cm	202	200	192	420	358	333
弾性剛性 計算値t/cm	239	239	239	349	349	349
実/計	0.85	0.84	0.80	1.20	1.03	0.95
Qy 実験値 t	59.9	58.2	58.3	115.9	104.7	—
Qy 計算値 t	51.7	51.7	51.7	—	—	—
実/計	1.16	1.12	1.13	—	—	—
Qu 実験値 t	66.9	67.4	65.5	124.0	107.5	120.7
Qu 計算値 t	53.7	53.7	53.7	78.2	76.1	78.2
実/計	1.25	1.26	1.22	1.59	1.41	1.54

\* 1 負荷重の値、正荷重では降伏なし

\* 2 荒川式 (mean) による。

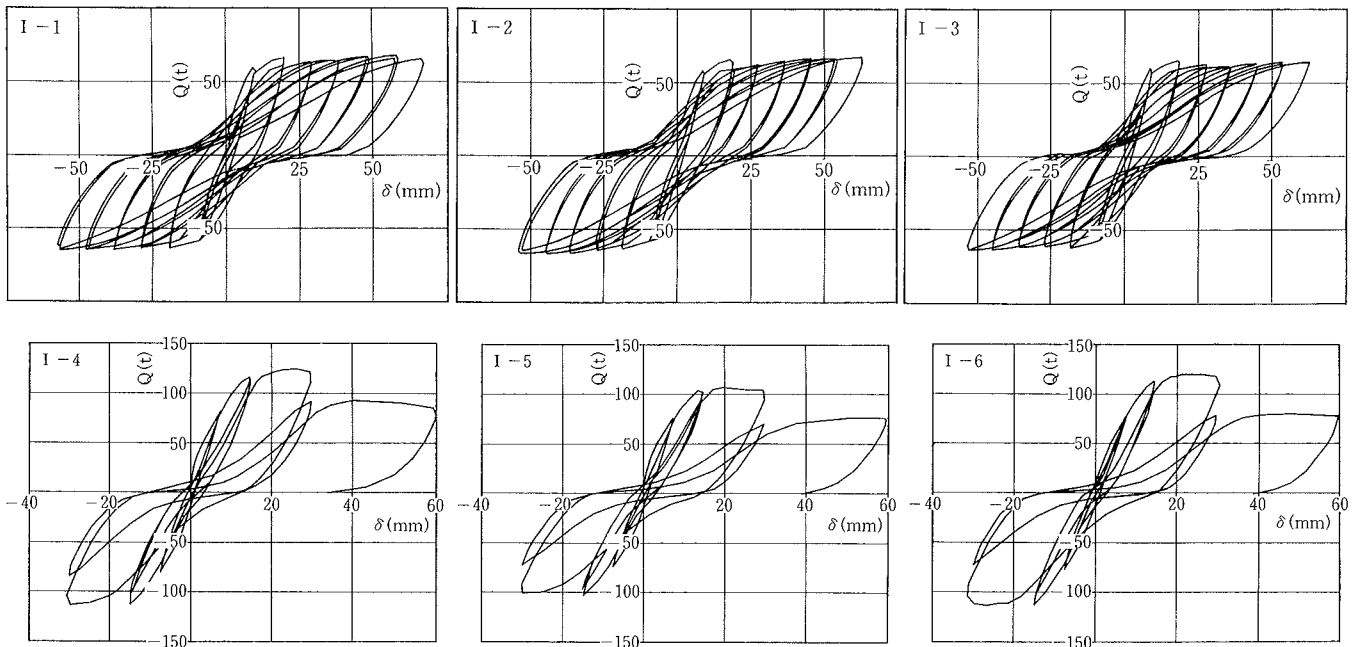


図-7 シリーズ I せん断力-層間変位関係

I-6 試験体よりも、最大耐力、およびその時の変形量共にやや優れている。また、I-4 試験体では主筋の降伏がフープ筋の降伏に先行して生じたのに対して、I-6 試験体では、主筋は降伏せず、変位14.8 mm(部材角 R=8/1,000)でフープ筋が降伏し、せん断破壊を生じた。さらに、図-7より、破壊後の耐力低下もI-6 試験体の方が大きいことが分かる。

図-8は、各試験体の初期剛性を比較したもので、図中の太い実線は、内部充てんコンクリートの1/3割線弾性係数を用いた計算値を示している。いずれの実験値も計算値より小さい傾向があるが、プレカラムの有無、種類による差はない。

以上のことから、主筋とフープ筋とが緊結されていないことが、部材の曲げおよびせん断耐力、変形性状、弾性剛性に及ぼす影響はほとんど無く、むしろ高強度コンクリート内にフープ筋を打ち込む構造体プレカラムを使用した試験体の方が、一体打ち試験体よりもせん断耐力が高い傾向にあることが分かる。

(2) ひび割れ性状 荷重後のI-1～I-3試験体のひび割れ状況を図-9に示す。I-1試験体は、材軸方向に1本大きなひび割れが生じている。この位置には内部コンクリート打ち込み時の側圧が原因と思われるひび割れが既に生じていたが、変位が $\delta_y$ を超えると、このひび割れ周辺からプレカラムのかぶりコンクリートははく離し始め、この部分のひび割れだけが拡大する傾向が見られた。I-2試験体はI-3とほぼ同様のひび割れ性状を示しており、かぶりコンクリートの浮きも4 $\delta_y$ を超えるまで生じなかった。これはプレカラム内に中子筋を打ち込んだこと、プレカラムの形状の特徴からフープ筋の一部が露出していたことが有効であったためと考えられる。

### 5.2.2 シリーズII

(1) 耐力性状 表-4に実験結果の一覧を、図-10に各試験体のせん断力-層間変位関係(Q- $\delta$ 関係)を示す。図中のX-軸と平行な一点鎖線は、コンクリートの応力-ひずみ( $\sigma$ - $\epsilon$ )関係をe-関数で表わす梅村式を用い、鉄筋の $\sigma$ - $\epsilon$ 関係をひずみ硬化を弾性係数の3%としたバイリニア曲線を用いた断面解析によって算出した、一体打ち部材の最大耐力計算値を示す。まず、軸力が等しいII-1とII-4試験体を比較すると、最大耐力およびその時の変位ともに構造体プレカラムを用いたII-1試験体のほうが一体打ちのII-4試験体より大きいことが分かる。この結果より、軸力が作用し、最大耐力が圧縮側コンクリートの圧壊によって決まる部材では、かぶりコンクリートであるプレカラムの強度が内部コンクリートの強度の2倍以上と高いことが、部材の最大耐力に影響を及ぼすことがうかがえる。

また、表-4で、軸力の異なる構造体プレカラム使用試験体、II-1とII-2を比較すると、主筋降伏荷重および最大耐力の実験値と、各々の計算値との比がほぼ一定値を示すことから、軸力が変化しても半プレキャスト部材の耐力性状はあまり変わらないことが推定される。

表-4によれば、型枠プレカラムを使用したII-3試験

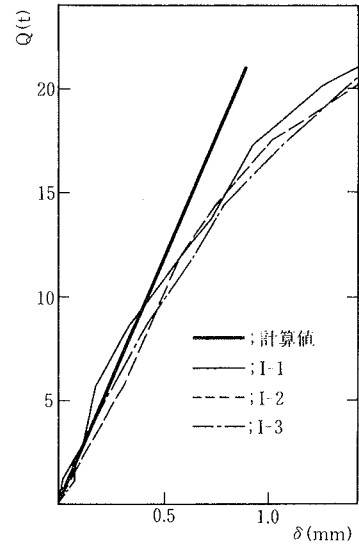


図-8 弾性剛性

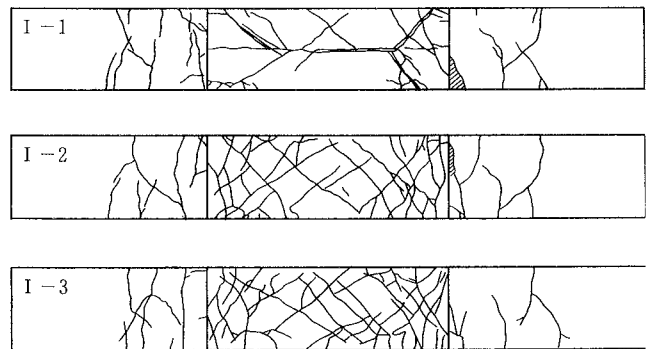


図-9 ひび割れ状況

表-4 シリーズII 実験結果

試験体	II-1	II-2	II-3	II-4
弾性剛性 実験値t/cm	112	114	103	98
弾性剛性 計算値t/cm	120	120	120	120
実/計	0.93	0.95	0.86	0.82
Qy 実験値 t	43.9	40.2	40.1	41.3
Qy 計算値 t	39.1	35.3	32.9	39.1
実/計	1.12	1.14	1.22	1.06
Qu 実験値 t	49.7	46.8	40.4	44.7
Qu 計算値 t	41.0	38.2	35.0	41.0
実/計	1.21	1.23	1.15	1.09
主筋の座屈	有 R=60/1,000	無	無	有 R=60/1,000

体は、他のプレカラム使用試験体と比べ、主筋降伏が計算値に対して比較的高く、逆に最大耐力が比較的低い。また、図-10からも、II-3試験体は同軸力のII-2試験体よりも最大耐力時の変位が小さいことが分かり、主筋降伏時と、最大耐力時の荷重および変位にあまり差がないことがうか

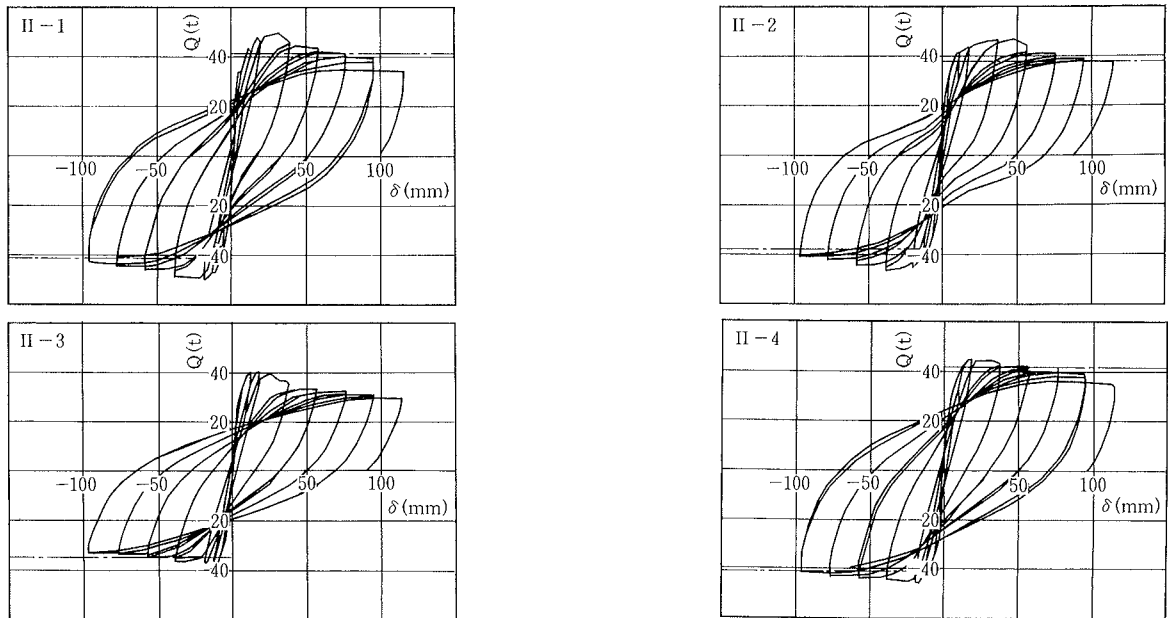


図-10 シリーズII セン断力一層間変位関係

がえる。これらの現象は、型枠プレカラムに打ち込んだワイヤメッシュが、主筋の引張降伏とほぼ同時に破断し、その後プレカラムと内部コンクリートのはく離が著しかったことが原因と思われ、軸力の作用する部材では、内部コンクリートと型枠プレカラムがはく離した場合、部材耐力の上昇は望めなくなることが分かる。

図-11は各試験体の弾性剛性の実験値と計算値を比較したものである。計算値は断面の鉄筋量を考慮せずに求めたものであるが、同図によれば、プレカラム使用試験体の弾性剛性が一体打ちよりも高いことが分かる。これは軸力が作用することで、プレカラムの強度、剛性の影響が表われたものと思われる。同時にひび割れ発生荷重以下では、プレカラムはその種類にかかわらず、内部コンクリートとよく一体化した挙動を示すことがうかがえる。

(2) 主筋の座屈 軸力の大きいII-1およびII-4試験体において、共に層間変位96mm(部材角 $R=60/1,000$ )で主筋の座屈が生じた。いずれの試験体も、かぶりコンクリートがはく落し、主筋が露出した状態となった時に生じたが、図-12のせん断力(Q)-軸方向変形量( $\delta_N$ )関係が示すように、座屈後の軸方向変形状および荷重の低下傾向は両者全く同様であった。構造体プレカラム使用部材において、主筋がフープ筋と緊結されていないことが、主筋座屈に及ぼす影響は、あまり明確ではないと言える。

(3) ひずみ計測結果 図-13は、軸力の等しいII-1とII-4試験体の主筋のひずみ分布を示す。同図によれば、主筋ひずみの材軸に沿った分布形状は、プレカラムを使用したII-1試験体の方が、同一変位のひずみ値が小さく、かつ一体打ちのII-4では変位 $R=12/1,000$ で、ひずみはほとんど直線分布となっているのに対して、II-1試験体では $R=24/1,000$ となっても圧縮ひずみが引張ひずみより分布勾配が小さい。これらは、II-1試験体断面の圧縮縁コンクリートが高強度であるためと推定されるが、同時に構造体プレ

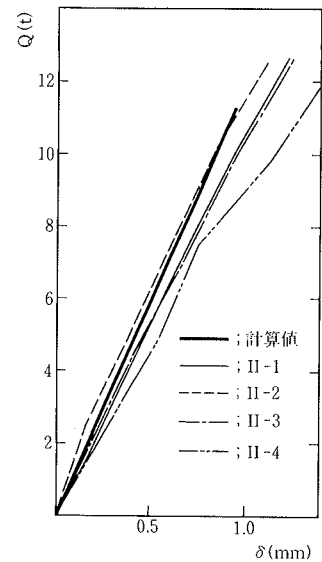


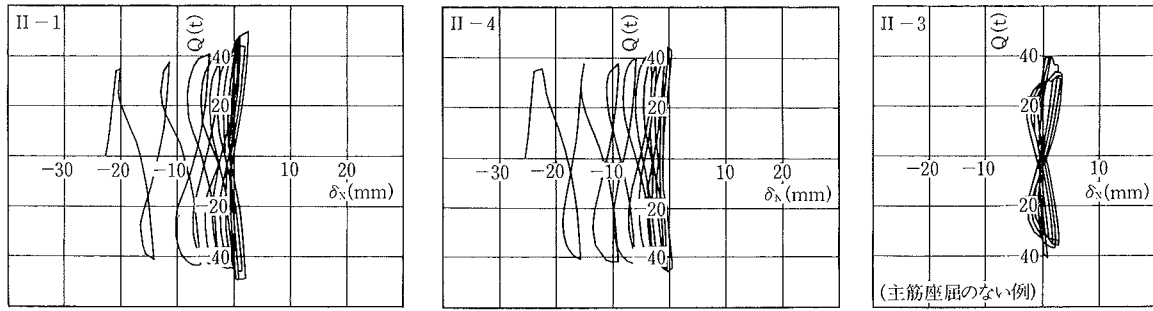
図-11 弾性剛性

カラムと内部コンクリートの一体性が変位 $R=24/1,000$ を超えても保たれていることが推定される。

(4) ひび割れおよび破壊状況 図-14に載荷後の試験体状況を示す。II-3試験体を除く全ての試験体で、試験区間の両端すなわちヒンジゾーンでかぶりコンクリートのはく落が見られる。II-3試験体では変位19.2mm( $R=12/1,000$ )で、かぶりコンクリートが試験区間ほぼ全域ではく離し、 $R=12/1,000$ 以後にひび割れは発生せず、中央のひび割れだけが開いていく結果となった。

## 6. まとめ

遠心成形による薄肉中空角型コンクリート管「プレカラム」の水密試験、およびプレカラムを型枠兼用部材として



図一12 せん断力—軸方向変位関係

使用した、半プレキャスト柱部材の曲げせん断加力実験によって以下に示す結果が得られた。

(1) 水密試験の結果と弾性解析によって、プレカラムに無支保工状態で内部コンクリートを打ち込んでも、その打ち込み側圧によるひび割れが発生しない肉厚を算定することができた。

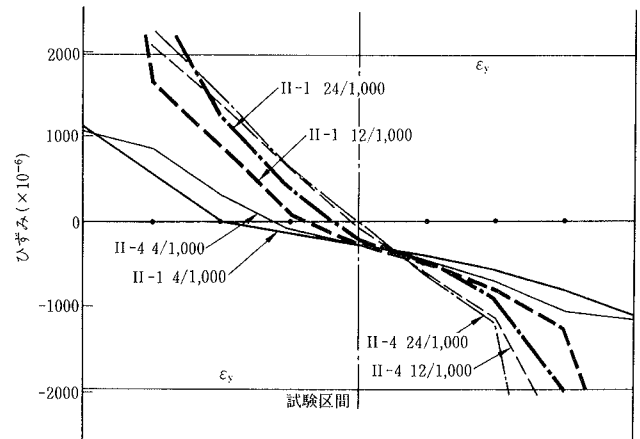
(2) 実大試験体の曲げせん断実験において、主筋曲げ降伏型の半プレキャスト柱部材は一体打ち部材と比べて、荷重—変位関係、弾性剛性、主筋降伏荷重において同様の性状を示した。一方、試験体のひび割れ状況は、型枠プレカラムを使用した試験体に、主筋降伏後ひび割れが一か所に集中する傾向が見られたが、構造体プレカラムを使用した試験体のひび割れ状況は、一体打ち試験体のそれと大差なく、内外コンクリートの一体性はおおむね良好であった。

(3) せん断破壊型の半プレキャスト柱部材の実験結果より、構造体プレカラムを使用した部材のほうが、プレカラムが高強度で内部コンクリートとの一体性も良いため、従来の一体打ちよりもせん断耐力にやや優れることが分かった。型枠プレカラムを使用した部材は、プレカラム内部のワイヤメッシュが破断するのとほぼ同時にせん断破壊を生じた。

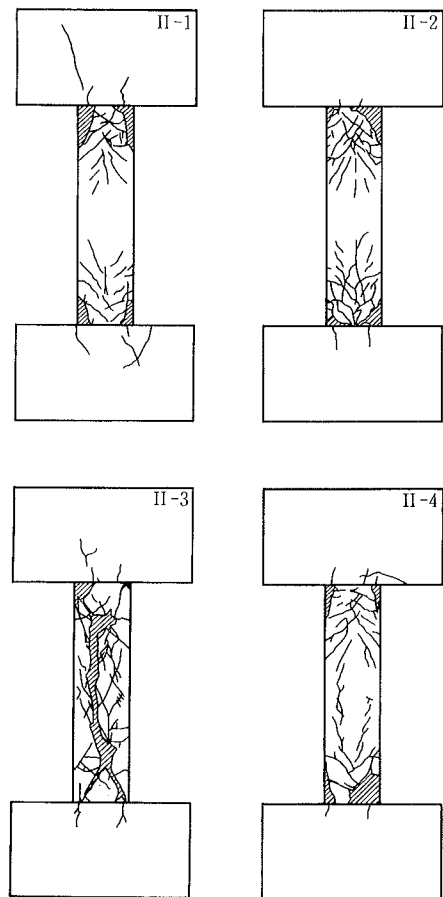
(4) 軸力を加えた小型試験体の曲げせん断実験において、構造体プレカラムを使用した試験体は、そのコンクリートの強度の影響によって、一体打ち試験体よりも最大耐力が高く、弾性剛性も高い結果が得られた。一方、主筋の座屈性状は、両者ほとんど同様であった。型枠プレカラムを使用した試験体では、ワイヤメッシュが破断すると、その後の耐力上昇は望めないことが分かった。また、ひび割れ状況は軸力のない試験体と同様の傾向が見られた。

### 謝 辞

当研究は、ZR コンクリート（株）との共同研究であるが、特に水密試験の遂行にあたり、終始御助力、御助言をいただき、かつ各種プレカラムの製造に御協力いただいた、同社技術部 辺見和俊氏ならびに関係者の方々に深く感謝いたします。



図一13 主筋ひずみ分布



図一14 ひび割れ状況