

[2128] 1方向及び2方向水平力を受ける外殻PCa柱に関する実験研究

津村浩三^{*1}・齊藤千紀^{*2}・芳村 学^{*3}・塙越英夫^{*4}

1. はじめに

本研究は、外殻PCa型枠を用いた柱部材及び在来工法による一体打ち柱部材の実大試験体に1方向または2方向の水平力を加える曲げ破壊実験を行い、その諸性状をそれぞれ比較検討したものである。ここで主眼をおいた工法は、遠心成形によりフープ筋や中子筋などを打ち込んだ中空角型の外殻薄肉プレキャスト型枠（外殻PCa型枠）を製作し、この内側に主筋を配置して内部コンクリートを打ち込むものである。このような半プレキャスト柱部材が通常の一体打ち柱部材と異なる点は、フープ筋が主筋と繋結されていないこと、外殻コンクリートと内部コンクリートの強度、剛性が異なること、内部と外部のコンクリートの一体性が保たれない可能性があることなどである。特に2方向の水平力を受けると柱脚隅角部の外殻コンクリートが早期に剥離する恐れがある。これらの点について検討するため実験を行った。

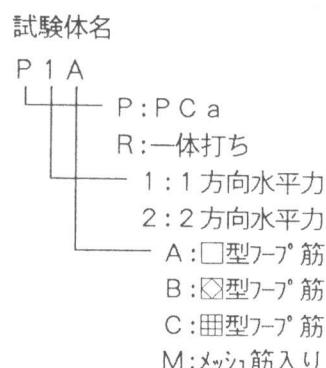
2. 実験計画と使用材料

試験体は表1に試験体一覧、図1に配筋例と断面を示す8体で、主な実験パラメーターはプレキャストと一体打ちの別、加力方法、フープ筋の形状等の工法、の3種類である。内訳は□型のフープ筋（スパイラル）を打ち込んだ厚さ50mmの外殻を用いたものをプレキャストの標準的工法として（P1A、P2A）、これらとフープ筋の形状の効果を調べるためにせん断補強筋比は等しいがフープ形状が□型のもの（P2B）と田型のもの（P2C）、比較のための通常の一体打ちのもの（R1A、R2A）、プレキャストのもう一つの工法として外殻厚が30mmでフープ筋を打ち込まずに縦横ワイヤメッシュ（以後メッシュ筋と呼ぶ）を打ち込んだもの（P1M）、メッシュ筋の効果を調べるため一体打ちのものにメッシュ筋を打ち込んだもの（R1M）の計8体である。1方向加力、2方向加力の別は表1に示す通りであるが、一体打ちとプレキャストの標

表1 試験体パラメータ一覧

試験体	外殻厚 (mm)	フープ筋	メッシュ筋	水平力	特 徴
P1A	50	□型D10 @80	—	1方向	PCa標準試験体
P2A	50	□型D10 @80	—	2方向	P1Aの2方向加力
P2B	50	□型D10@160	—	2方向	□フープ筋外殻部
P2C	50	田型D10@160	—	2方向	田フープ筋外殻部
R1A	—	□型D10 @80	—	1方向	一体打ち標準試験体
R2A	—	□型D10 @80	—	2方向	R1Aの2方向加力
P1M	30	□型D10 @80	Φ4@50	1方向	外殻厚30mmメッシュ筋入
R1M	—	□型D10 @80	Φ4@50	1方向	一体打ちメッシュ筋入

共通事項：シアスパン比2, 主筋16-D22, $p_t=0.75\%$, フープ筋 $p_w=0.3\%$



*1 東京都立大学助手 工学部建築学科、工博（正会員）

*2 東京都立大学学部生 工学部建築学科

*3 東京都立大学助教授 工学部建築学科、工博（正会員）

*4 清水建設㈱技術研究所構造技術研究部研究員、工博（正会員）

準的な試験体については1方向（P1A、R1A）と2方向（P2A、R2A）の2種類の水平加力を行い、加力方法の違いによる影響についても検討することとした。なお、各試験体は計算上せん断耐力と曲げ耐力が同程度となるように設計した。柱脚の打ち継ぎ面や外殻部の内側に目あらし等の特別な処置は施していない。外殻部は柱脚（タブのフェイス）までとしている。

加力方法の概念を図2に示す。加力は、鉛直方向1基と水平方向2基の油圧ジャッキを用いて、試験体の柱頭に取り付けた3軸1点クレビスに1方向または2方向の水平力と軸力108tf（1体打ち試験体の軸力比にして約1/7）を加えることにより行った。1方向の水平加力（X方向）の履歴は、部材角 $R=1/400$ で正負1回、 $R=1/200$, $R=1/100$, $R=1/50$ でそれぞれ正負2回繰り返した後正側で水平力がある程度低下するまで行った。2方向加力は、一方向（Y方向）に耐力の約1/3の一定水平力20tfを加えた状態でそれと直交方向（X方向）に1方向（以後混乱しないと思われる場合には“水平”の字を省略する）加力時と同様の正負繰り返し載荷を行った。なお、Y方向の水平力を一定とした理由は従来の加力パスとは異なる条件下における柱の2軸曲げ挙動の性質を調べたいため、詳細な議論については機会を改めたい。

使用した材料の性質を表2に示す。表中の内部コンクリートは一体打ち試験体及びプレキャスト試験体の内部に使用したものである。外殻部コンクリートは外殻厚50mmの試験体、外殻部モルタルは外殻部30mmの試験体に使用したもので、圧縮強度は外殻部を切りとて試験した結果、ヤング係数はシリンダー型の遠心供試体から求めたものである。内部コンクリートに比べ、外殻部に用いた材料の圧縮強度及びヤング係数は相当高い。

3. 実験結果の概要

実験から得られた最大耐力等の値をまとめて表3に示す。なお、以後示す荷重変形等の値は特記しない限りX方向に関するものである。荷重については、試験体の傾きによって生ずる軸力用及びY方向用のジャッキ荷重のX方向成分を加えて補正した。変形は柱脚から1.25D（D：柱せい=60cm）の高さで柱脚に対する相対変位として測定したものである。

いずれの試験体も曲げ破壊が生じた。最終破壊状況

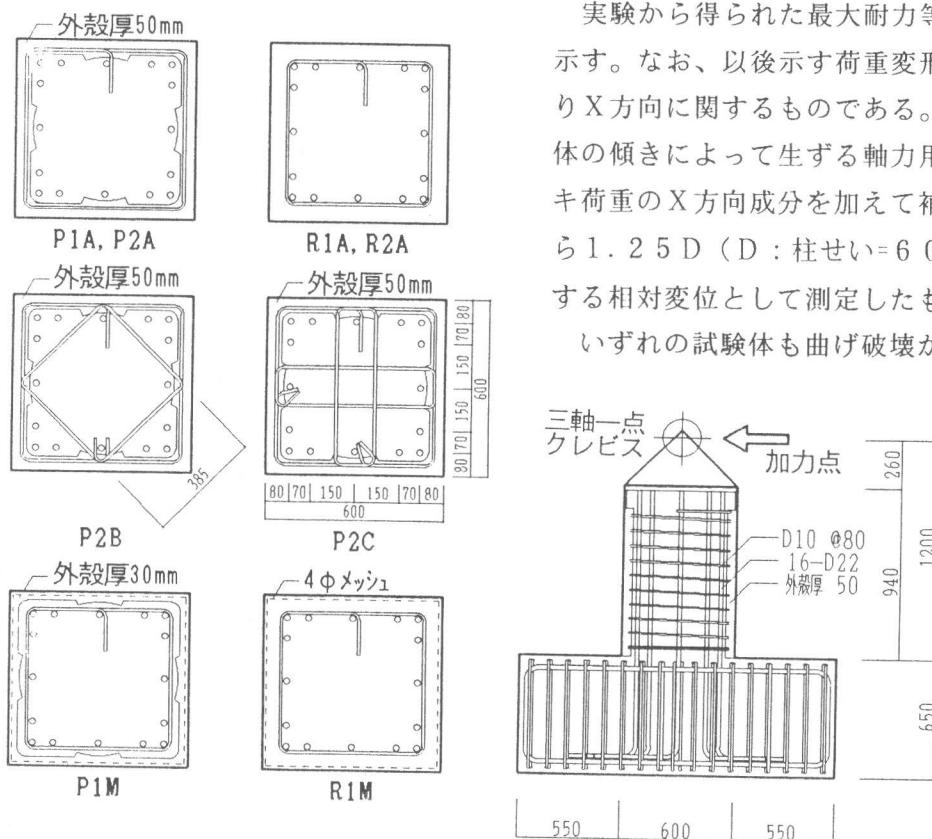


図1 試験体配筋及び断面

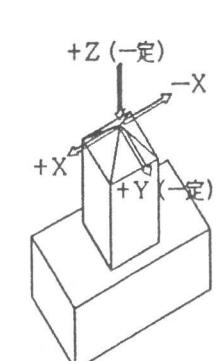


図2 加力方法概念

表2 材料の性質

鉄筋 注) カッコ内は破断時歪み(%)、SPはスパイラル

コンクリート

	圧縮強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (tf/cm ²)
内部コンクリート	211 (0.181)	208
外殻部コンクリート	699	303
外殻部モルタル	798	386

注) カッコ内は圧縮強度時歪み(%)

種類	降伏強度 (tf/cm ²)	降伏歪み (%)	最大強度 (tf/cm ²)	最大時 歪み(%)	ヤング係数 (tf/cm ²)
D22	3.77	0.197	5.68	14.1	1920
D10-SP	3.39	0.179	5.42	(16.5)	1900
D10中子	3.70	0.200	5.23	(19.7)	1840
Φ4	5.18	0.252	5.39	—	2050

表3 実験結果一覧

注) 初期剛性は最大耐力の1/4の割線剛性

試験体名	初期剛性 (t/cm)	曲げひび われ荷重 (tf)	せん断ひ びわれ荷重 (tf)	主筋降伏 (2段筋)		最大耐力		外殻部压 壊変形 R
				荷重(tf)	部材角R	荷重(tf)	部材角R	
P1A	246	34.4	36.0	56.4	1/107	71.2	1/18	1/15
P2A	237	15.5	41.9	45.4	1/187	67.0	1/29	1/24
P2B	251	23.5	41.9	44.3	1/150	69.2	1/16	1/16
P2C	253	15.5	42.8	51.3	1/166	69.0	1/29	1/25
R1A	231	23.9	39.8	58.8	1/115	65.2	1/54	—
R2A	238	15.5	37.5	48.3	1/149	59.9	1/50	—
P1M	325	33.7	50.3	62.0	1/107	73.9	1/14	1/14
R1M	278	33.9	47.9	61.5	1/125	66.3	1/54	—

の代表的な例を図3に示す。同図に示すように、当然のことながら、2方向加力のものは最終サイクル時に圧縮となる隅角部が圧壊し、一方向加力のものは圧縮となる縁が一様に圧壊した。

柱脚から0～0.5Dの高さの区間及び0.5D～1.25Dの2つの区間で、試験体に埋め込んだボルト間の相対変位を測定し、変形成分

を分析した結果の例を図4に示す。同図a) b)から曲率、せん断歪とともに下の区間に集中していること、また曲率とせん断歪の進展が連動している（比例的に増加している）ことがわかるが、この結果は他の試験体でも同様であった。同図c)は柱脚からの相対変位を測定した値とボルト間の変位測定値から求めた曲げ変形（下の区間での変形は

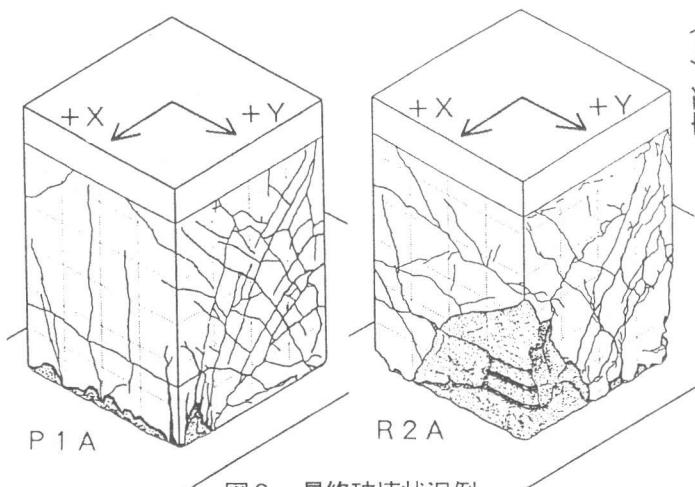
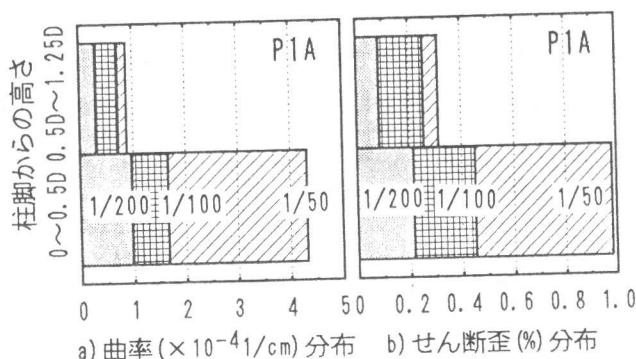
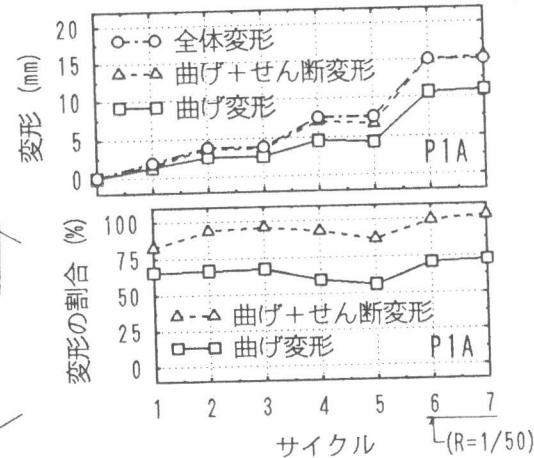


図3 最終破壊状況例

a) 曲率($\times 10^{-4} 1/cm$)分布 b) せん断歪(%)分布

c) 変形成分の推移

図4 変形成分分析例

柱脚に集中したと仮定)とせん断変形の推移を示した。せん断ひび割れが2サイクル時に発生した関係で1サイクルから2サイクルにかけてせん断変形が曲げ変形に比べて多少大きく増加したこと除けば、変形成分の割合に大きな変化は認められない。ここには示さないが他の試験体についても近似したグラフが得られた。

4. 考察

各試験体の荷重～変形関係を図5に示す。参考のために同図中にP1Aの変形～軸方向ひずみ関係とP2Cの変形～外殻部のはらみ関係を示した。また、最大耐力時を▽印、軸方向ひずみの増加が伸びる方向から圧縮方向に転じる軸方向ひずみ反転時を▲印、外殻部圧壊時(外殻部が圧壊し内部コンクリートから剥離する時点で、後述する)を○印で示した。また、2方向加力を行った試験体について変形～軸方向ひずみ関係を図6に、変形～(最終サイクル時に圧縮側となる位置での)隅角部ひずみ関係を図7に、X方向変形～Y方向変形関係を図8に示す(P2B、P2Cについては最後から正負1サイクル分)。ここで軸方向ひずみと隅角部ひずみは、柱脚から0.5Dの間の伸縮を4箇所で測定し、平面保持を仮定して最小2乗法を用いて求めたものである。

4.1 フープ筋を用いたPCa試験体の性能

初期剛性については表3によると、メッシュ筋を用いない試験体の値は240t/cm前後であり、一体打ち試験体とフープ筋を打ち込んだPCa試験体の間で特に差は認められない。最大耐力については1方向加力、2方向加力ともPCa試験体(P1A、P2A)の方が対応する一体打ち試験体(R1A、R2A)に比べ1割ほど高い。最大耐力時の変形は一体打ち試験体では $R=1/50$ のあたりであるのに対し、PCa試験体(P1A、P2A、P2B、P2C)ではこれの2倍以上となっている。また、軸方向ひずみの反転(▲印)はコン

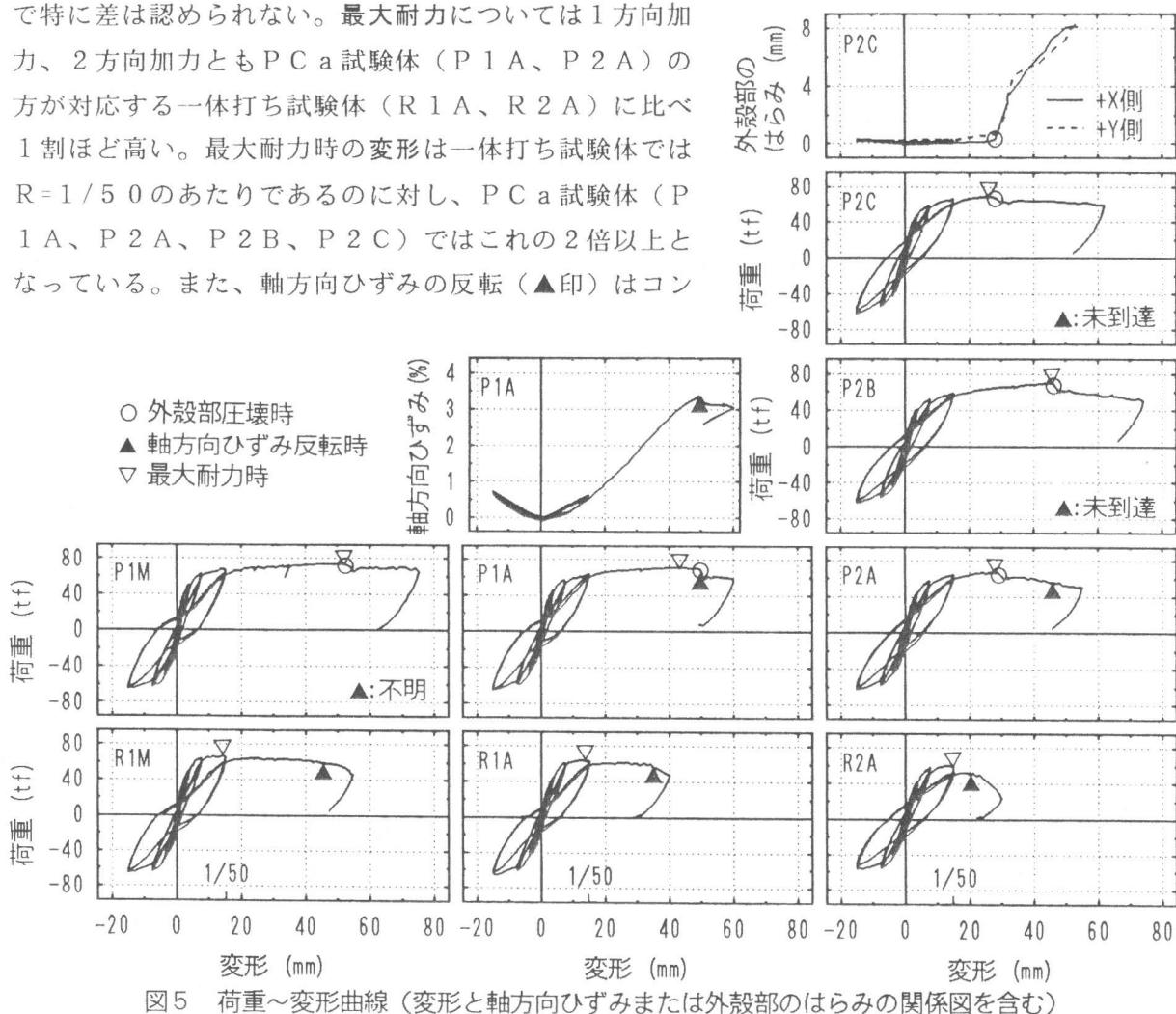


図5 荷重～変形曲線(変形と軸方向ひずみまたは外殻部のはらみの関係図を含む)

クリートの破壊が相当進んだことを示しているので、この時の変形を変形性能の指標とみなすと、これについても P C a 試験体のほうが大きく（図 5、6）、優れた変形性能を示したと言える。

内部コンクリートと外殻部の一体性に関連して、最終サイクル時に圧縮側となる隅角部近くで内部コンクリートに埋め込んだボルトと外殻部の面外方向の相対変位（=外殻部のはらみ）を測定した。これと X 方向変形との関係の例を図 5 右上に示したが、そのすぐ下の荷重～変形関係のグラフと見比べてみれば、最大耐力時あたりに外殻部のはらみが急激に増大している（○印の時）ことが分かる。この時圧縮側となる隅角部に無数のひび割れ（外殻部圧壊）が発生し、外殻部にそったひび割れが発生して大きく開いて外殻部が内部コンクリートから剥離する現象が観察された。この外殻部圧壊は 1 割程度の荷重の低下（図 5）と軸方向ひずみの伸びの鈍化（図 6）、また、2 方向加力の場合には一定水平力を加えた Y 方向への変形の増大（図 8）を伴った。なお、外殻部圧壊は 2 方向加力の場合図 7 によると隅角部ひずみが 3 % 程度となったところで、図には示していないが一方向加力の場合縁のひずみが約 2 % の時に生じた。このように外殻部が圧壊し剥離する一連の現象はいずれの試験体でも生じ、1 方向加力の場合（P 1 A）より 2 方向加力の場合（P 2 A）の方が早い段階で生じている。とはいっても最も早いものでも $R = 1/50$ 程度であり、この時点まで内部コ

ンクリートと外殻部は剥離に伴う一連の現象が生じていないという意味で、構造的に一体であったと言えそうである。また、その時の荷重低下はせいぜい 1 割程度、その後の荷重低下もゆるやかであった。このことは主筋とフープ筋が緊結されていなくても、ある程度フープの拘束が有効であることを示していると思われる。

フープ筋の形状の違いに関して、図 5（P 2 A、P 2 B、P 2 C）によると $R = 1/50$ の近くまでの履歴性状はほとんど同じであった。外殻部圧壊時の変形を見ると □ 型が最大だが、それ以後の荷重の落ち方は ■ 型が最も小さい（図 5）。軸力比がさほど高くないためか

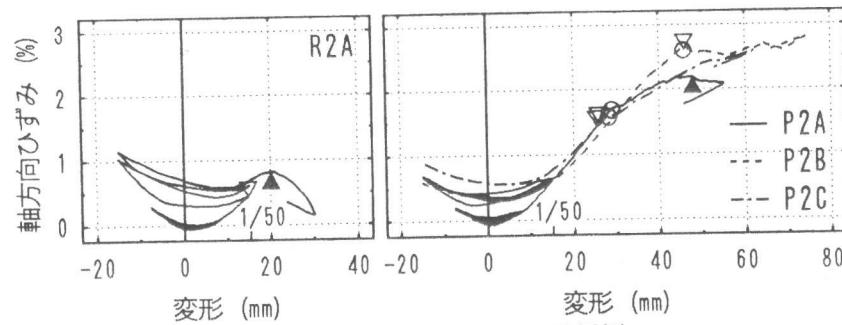


図 6 変形～軸方向ひずみ関係例

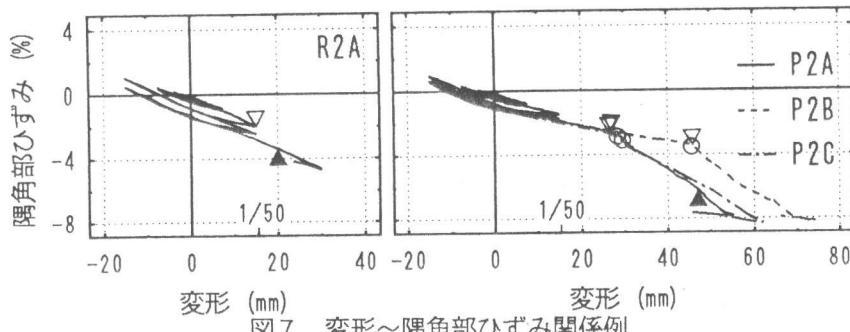


図 7 変形～隅角部ひずみ関係例

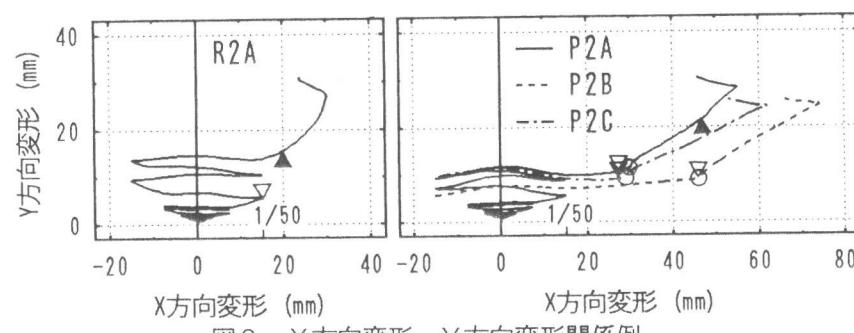


図 8 X 方向変形～Y 方向変形関係例

もしれないが、総合的にみてフープ筋の形状による構造性能の差はさほど顕著ではなかった。

2方向加力時にY方向への水平力は最大耐力の約1/3としたが、この程度の荷重でもその影響は大きく、図8によるとPCa、一体打ちどちらの場合でもX方向への加力が進むにつれてY方向への変形が進んでいるのが分かる。このY方向への変形はPCaの方が特にR=1/50の繰り返し時を見ると一体打ちに比べて小さい。1方向加力のP1Aと2方向加力のP2Aの結果を比べると最大耐力はあまり変わらないが、荷重の低下は2方向加力の場合の方が早い段階で生じており、一体打の場合も同様のことが言える(R1AとR2A)。また、当然のことながら、主筋降伏は2方向加力の方が早期に生じ、荷重も低い段階で生じた(表3)。

繰り返し加力時の履歴ループは1方向加力の場合(P1A)どちらかと言えば逆S字型、2方向加力の場合(P2A)紡錘型となった。一体打ちの場合も同様のことが言える。これは、一方加力の場合、ひび割れの開閉によってループ上にスリップの性質が現れると考えられるが、2方向加力の場合、+Y方向への加力によって常に引張軸力を受ける柱断面内の-Y側はひび割れが常に開いた状態になり、圧縮軸力を受ける+Y側の性状の影響が支配的となって、そちら側では軸力比が高めの柱と同様ひび割れがあまり開かなかったことが原因と考えられる。

4.2 メッシュ筋を用いた試験体の構造性能

表3によるとメッシュ筋を用いた試験体(P1M、R1M)は通常の一体打ち試験体(R1A)に比べて、初期剛性が高くまた、せん断ひび割れ荷重も高い。関連する試験体3体について、図9に載荷初期の荷重と各変形成分の関係を示した。メッシュ筋のみのもの

(R1M)についてはあまりはっきりしないが、外殻部にメッシュ筋を含むものは曲げ剛性が大きいことが分かる。最大耐力は通常の一体打ちのものに比べメッシュ筋のみのものはあまり変わらず、外殻部にメッシュ筋を含むものは1割程度増大している。最大耐力の増大は外殻部のモルタルの強度が非常に高いためと考えられる。P1Mについては柱脚部分に設けた変位計が途中で伸びきったために軸方向ひずみ反転時が不明であるが、R=1/10の大変形に至るまで荷重があまり低下せず優れた変形性能を示した。3体のうちではR1Aが最も早期に荷重低下を生じており、メッシュ筋のみ、またはメッシュ筋と強度の高い外殻部モルタルの組み合わせが変形性能に効果的であることが分かる。

5.まとめ

今回対象としたプレキャスト試験体は水平1方向加力の場合も水平2方向加力の場合も含め、総じて一体打ちに比べすぐれた構造性能を示した。

外殻部が圧壊しそれと同時に内部コンクリートから剥離する現象は、1方向加力時より2方向加力時の方が早い段階で生じたが、早いものでも部材角R=1/50程度には達していた。外殻部の圧壊時に多少荷重が低下したものとの割合は1割程度であり、その後の荷重低下もゆるやかであった。また、水平2方向加力は一方を最大耐力の1/3程度の定荷重としたが、外殻部の圧壊時に定荷重方向に大きく変形が進展した。

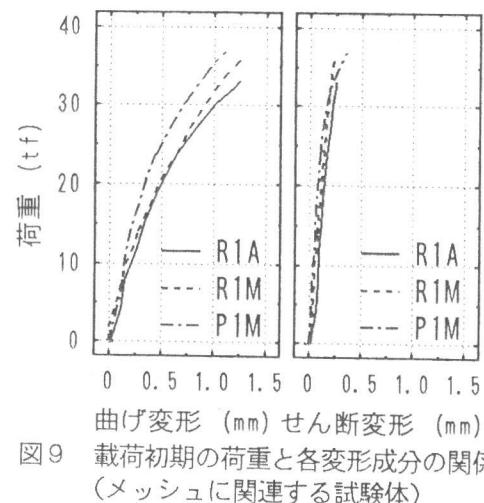


図9 載荷初期の荷重と各変形成分の関係
(メッシュに関する試験体)