

10. プレキャスト鉄筋コンクリート造有開口耐震壁フレームのせん断性状に関する実験研究

(その1 1層1スパン耐震壁フレームの水平加力実験)

福本 昇 中澤 敏樹
佐藤 尚隆 森 浩二

要 旨

壁パネルおよび梁部材をプレキャスト鉄筋コンクリート（以下PCaと称す）造とし、柱部材を場所打ち鉄筋コンクリート造とした1層1スパンの耐震壁フレームについて、開口位置および水平接合部の鉛直方向接合筋量を変動要因として実験を行った。

実験の結果、以下のことが明らかになった。

- 1) PCa試験体は、水平接合部のずれ量が約2.5mmになったときに最大耐力を示した。
- 2) 無開口PCa試験体では、鉛直方向接合筋の降伏に伴って壁脚がせん断圧縮破壊した。
- 3) 壁パネルの上部に開口を有するPCa試験体では、鉛直方向接合筋が降伏した後に、壁脚がせん断圧縮破壊した。
- 4) 壁パネルの中央に開口を有するPCa試験体では、開口部でせん断破壊した。

キーワード

プレキャスト／開口／耐震壁／水平接合部／鉛直接合部／接合筋／せん断圧縮

目 次

- | | | |
|------------|----------|---------|
| 1. はじめに | 2. 実験概要 | 3. 実験結果 |
| 4. 実験結果の検討 | 5. ま と め | |

10. AN EXPERIMENTAL STUDY ON SHEAR BEHAVIOR OF PRECAST CONCRETE FRAMED SHEAR WALL WITH AN OPENING (Part1. Lateral Loading Tests of One-bay One-story Framed Shear Wall)

Noboru Fukumoto Toshiki Nakasawa
Hisataka Sato Koji Mori

Abstract

With regard to one-bay one-story framed shear wall with precast concrete wall panel and cast-in-place surrounding columns (hereafter referred to as "PCa framed shear wall"), tests were carried out. The main variables in the tests were the location of the opening and the sectional area of vertical joint bars in the horizontal joint.

The following conclusions were obtained from these tests.

- 1) When the shear displacement of the horizontal joint became approximately 2.5mm, strength capacity of the PCa framed shear wall showed the maximum.
- 2) PCa framed shear wall without the opening failed in shear-compression at the bottom of the wall panel with yielding vertical joint bars in the horizontal joint.
- 3) PCa framed shear wall with the opening at the upper of the wall panel failed in shear-compression at the bottom of the wall panel after yielding vertical joint bars in the horizontal joint.
- 4) PCa framed shear wall with the opening at the middle of the wall panel failed in shear beside of the opening.

1. はじめに

プレキャスト鉄筋コンクリート構造は、鉄筋工、型枠工などの熟練労働者の不足対策、現場生産の省力化、作業環境の改善、施工の安全性の向上など施工者側の各種要求に応えるため、また品質の向上、工期の短縮など発注者と施工者の共通の要求を満たすため、広く採用されるようになり¹⁾、その構造形式については種々の提案がなされている。

梁・壁パネルをPCa造とした連層耐震壁の場合は、壁パネルと側柱や下階床梁との間に鉛直接合部や水平接合部があり、一体打ち鉄筋コンクリート造の場合とは異なる複雑な抵抗機構を有している。望月²⁾は、PCa耐震壁における壁パネルの抵抗機構を各層の対角方向に幅をもった圧縮ストラット抵抗とし、それらが水平接合部や鉛直接合部にせん断力や垂直圧縮力となって作用するとしている。しかし、壁パネルに開口が設けられた場合は、対角方向の圧縮ストラットの形成が阻害され、鉛直接合部や水平接合部に伝達される応力の経路が変化すると考えられる。

ここでは、柱を鉄筋コンクリート造、梁・壁パネルをPCa造とした耐震壁フレームについて模型実験を行い、開口位置とその大きさおよび壁パネルの水平接合部の挙動が、耐震壁の耐力や変形性能にどのような影響を与えるかを検証することとした。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の諸元を表-1に、試験体の寸法・配筋の例を図-1に示す。試験体は壁パネルおよび梁スタブをプレキャスト鉄筋コンクリート造とし、側柱を場所打ち鉄筋コンクリート造として、実構造物に適用できる耐震壁フレームの模型とした。試験体の大きさは実大の約1/3とし、柱断面を200×200mm、壁厚さを50mmとした。壁パネルの開口の大きさは、高さを300mmとして、開口周比が0.3となるように幅を370mmとした。実験の変動要因は開口位置（中央、上端）と水平接合部の鉛直方向接合筋量（8-D6、8-D10）とした。試験体数はPCa有開口耐震壁試験体を4体、PCa無開口耐震壁試験体を1体、一体打ち無開口耐震壁試験体を1体

表-1 試験体の諸元

	試験体	WS1	WP2-6	WP3-6M	WP4-10M	WP5-6U	WP6-10U
柱	B×D(mm)	2 0 0 × 2 0 0					
	主筋(比)	4 -D16 (A g =1.99%)					
	帯筋(比)	D 6 @100 (P w =0.8%)					
梁	b×D(mm)	1 2 0 × 2 0 0					
	主筋(比)	上・下端筋共 2 -D16 (P t =1.95%)					
	あばら筋(比)	D6-@100 (Pw=0.64%)					
壁	壁厚(mm)	t = 5 0					
	縦筋(比)	D 6 @100 (P s =0.64%)					
	横筋(比)	D 6 @100 (P s =0.64%)					
鉛直接合部	コッター	なし	コッター 8 ヶ : 30×40× 8				
	水平方向接合筋(鉄筋比)	なし	7-D6 (P v =0.64%)				
水平接合部	コッター	なし	なし				
	鉛直方向接合筋(鉄筋比)	なし	8-D6 (0.28%)	8-D6 (0.28%)	8-D10 (0.63%)	8-D6 (0.28%)	8-D10 (0.63%)
開口	位置 大きさ(mm)	なし	なし	中央		上端	
				370×300 (開口周比 0.3)			
備考		一体打ち	プレキャスト				

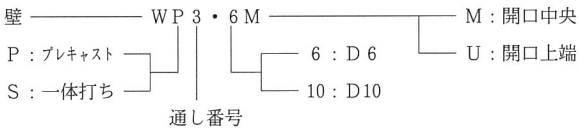


表-2 材料試験結果

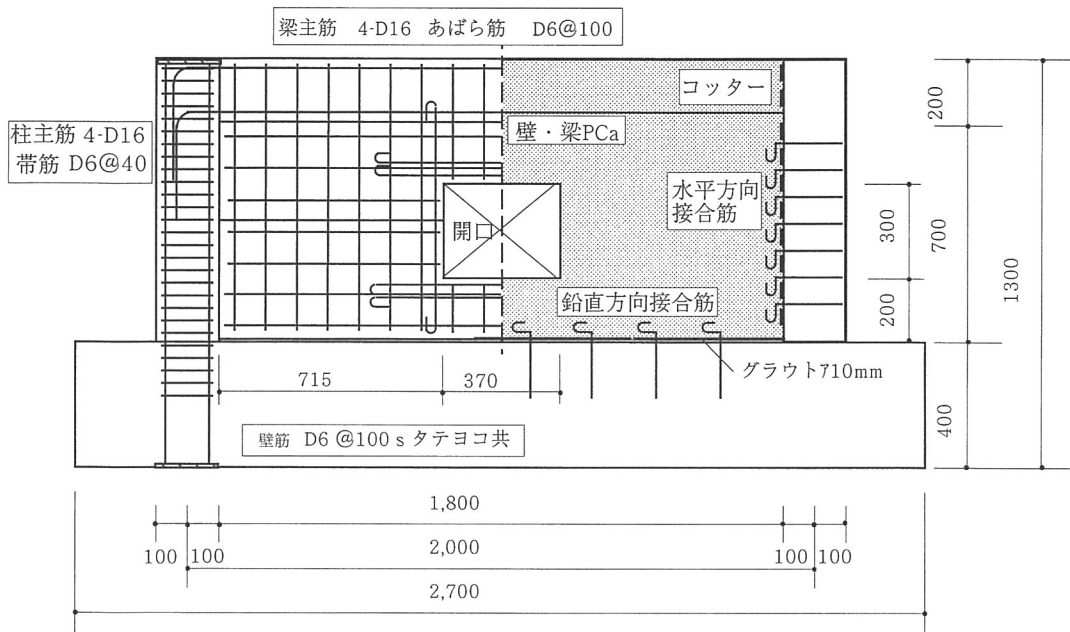
(a) コンクリート

コンクリート	部 位	圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)
プレキャスト 場所打ち グラウト	壁 柱・WS1	277	2.45×10 ⁵
		295	2.66×10 ⁵
		785	

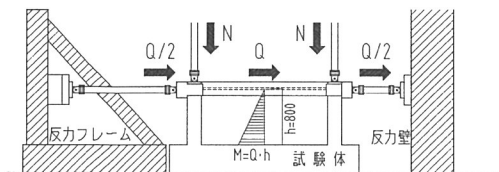
(b) 鉄筋

鉄筋の種類	降伏強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	伸び (%)
D6	4230	5600	1.95×10 ⁶	20
D10	3580	5200	1.97×10 ⁶	19
D16	3500	5180	2.05×10 ⁶	20

の合計6体とした。いずれの試験体も曲げ耐力がせん断耐力を上回るように計画した。PCa無開口耐震壁試験体(WP2-6)は水平接合部のすべり破壊で耐力が決まるように計画した。WP2-6試験体と同等の鉛直方向接合筋量を有するPCa有開口耐震壁試験体(WP3-6M、WP5-6U)は、開口低減率を乗じたせん断耐力が水平接合部すべり耐力とほぼ同等になるように計画した。鉛直方向接合筋量の多いPCa有開口耐震壁試



図－1 試験体の寸法・配筋の例

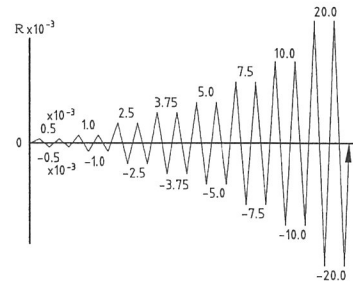


図－2 加力装置

験体(WP4-10M、WP6-10U)は、水平接合部のすべり耐力がせん断耐力を上回るように計画した。壁パネルの開口部は、文献3)によって補強した。曲げ変形によって鉛直方向接合筋に生じた引張力が、曲げ耐力に寄与しないように、鉛直方向接合筋の形状は図－1に示すような形状とした。使用した材料の試験結果を表－2に示す。

2.2 実験方法

加力装置を図－2に示す。加力は、側柱それぞれに一定の軸方向力11.4tf(0.1bDFc)を作用させ、上スタブの中心位置で、一端から圧縮力を、他端には引張力を同時に水平方向に作用させた。引張力は、上スタブに打ち込んだPC鋼棒をジャッキで引張することで与えた。荷重スケジュールは図－3に示すように、部材角が0.5/1000、1.0/1000、2.5/1000、3.75/1000、5.0/1000、7.5/1000、10/1000、20/1000radで、正負交番に各2サイクルずつ荷重することとした。



図－3 荷重スケジュール

2.3 計測方法

電気式変位計を用いて、部材角および鉛直・水平接合部のずれ・開き量を測定した。部材角は、上スタブの高さ方向中心で測定した変位の平均値を、下スタブ上面から測定位置までの距離($h=800\text{mm}$)で除したものとした。鉄筋のひずみは箔ゲージを鉄筋に貼付して測定した。

3. 実験結果

各試験体の実験終了後のひび割れ状況を図－4に、荷重・変形関係を図－5に示す。

一体打ち試験体WS1では $R=0.3/1000\text{rad}$ で壁パネルの上部隅角部から 45° 方向のひび割れが発生した。その後、壁全体にひび割れが発生し、 $R=7.5/1000\text{rad}$

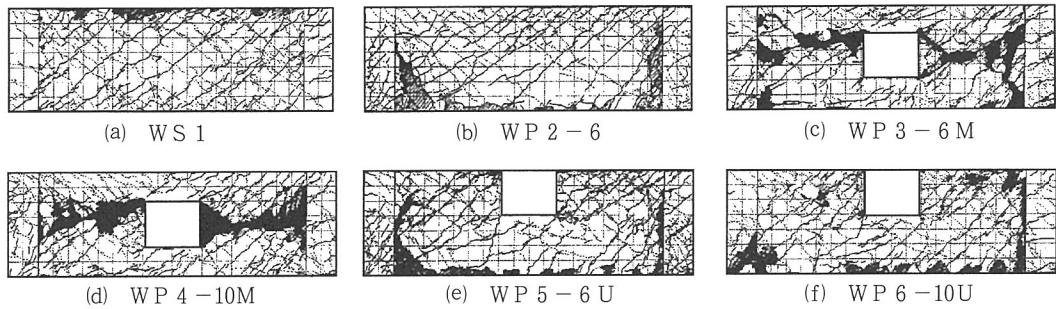


図-4 ひび割れ状況

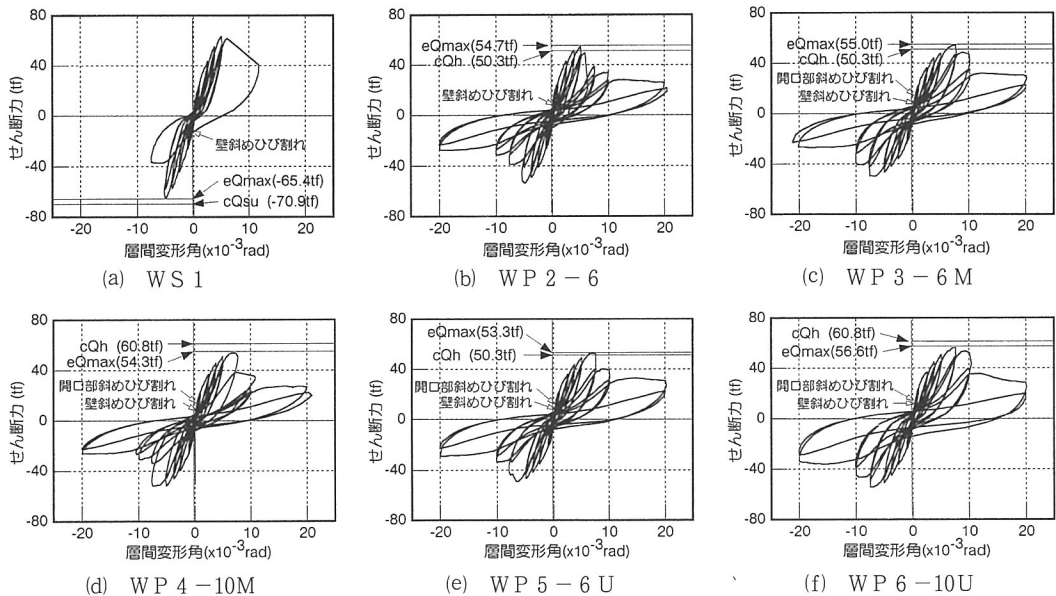


図-5 荷重・変形関係

に向かう途中で上スタブと壁パネルの境界面でコンクリートがはく落し、耐力が低下した。最大耐力は $R=-5/1000\text{rad}$ での $eQ=-65.4\text{tf}$ であった。

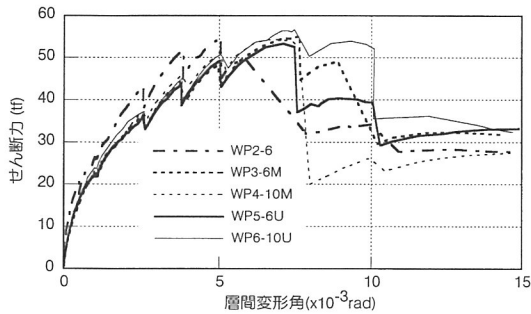
PCa無開口試験体では、 $R=0.1/1000$ で壁パネルに斜めひび割れが生じた。その後に斜め 45° 方向のひび割れが発生し、 $R=2.5/1000\text{rad}$ で水平接合部のずれ変形を目視で確認した。 $R=5.0/1000\text{rad}$ で最大耐力 $eQ=54.7\text{tf}$ を示し、その後の $R=6.0/1000\text{rad}$ で、壁脚部の柱近傍でせん断圧縮破壊が生じ、耐力が低下した。

PCa有開口試験体では、 $R=0.2/1000\sim 0.4/1000\text{rad}$ で壁パネルに斜めひび割れが生じ、その後 $R=0.3/1000\sim 0.5/1000\text{rad}$ で開口部周辺にひび割れが生じた。水平接合部のずれ変形は $R=3.75/1000\sim 5/1000\text{rad}$ で目視できた。いずれの試験体も、最大耐力は11サイクル目の $R=7.5/1000\text{rad}$ 近傍で示し、WP3-6Mは $eQ=$

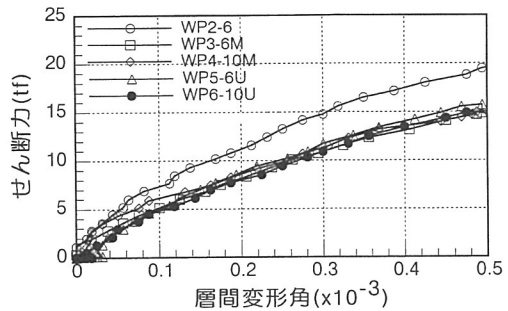
55.0tf 、WP4-10Mは $eQ=53.3\text{tf}$ 、WP5-6Uは $eQ=53.3\text{tf}$ 、WP6-10Uは $eQ=56.6\text{tf}$ であった。WP3-6Mは開口部のせん断破壊と水平接合部のすべり破壊がほぼ同時に発生し、WP4-10Mは開口部周辺のせん断圧縮破壊が顕著になって最大耐力に至り、WP5-6U、WP6-10Uは水平接合部のずれ変形および壁脚隅角部のせん断圧縮破壊が顕著になって最大耐力に至った。

PCa試験体の荷重・変形関係の包絡線を図-6に、初期剛性の比較を図-7に示す。

無開口試験体の初期水平剛性は有開口試験体のそれに比べて約30%大きかった。中央に開口を有する試験体の荷重・変形関係の包絡線については、鉛直方向接合筋量の違いにかかわらずほぼ同様であった。上部に開口を有する試験体では、鉛直方向接合筋量の多いWP6-10Uの包絡線がWP5-6Uのそれをやや上回った。



図－6 荷重・変形関係の包絡線



図－7 初期剛性

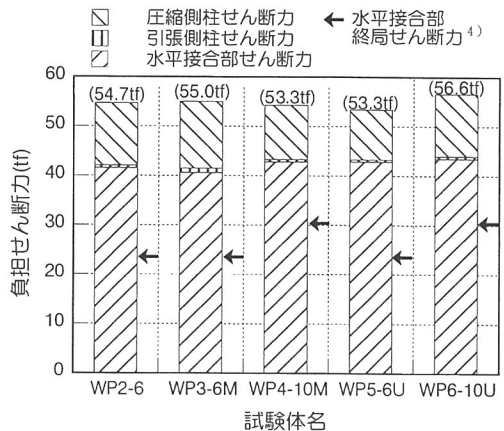
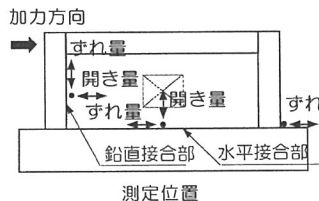
4. 実験結果の検討

4.1 耐力計算値の比較

図－8 に実験最大荷重時の側柱および水平接合部の負担せん断力の割合を示す。

水平接合部の負担せん断力は、実験最大荷重から側柱の負担せん断力を差し引いたものとした。ここで、圧縮側柱の負担せん断力は、柱の隅角主筋 4 ケ所のひずみから、平面保持の仮定に基づいて二次曲線に近似した曲げモーメント分布を算出し、それを高さ方向に微分して求めた。引張側柱の負担せん断力は、帯筋のひずみから求めた応力を全強式 ($Q=0.8 \times P_w \times \sigma \times b \times j$) に代入して求めた。

実験最大荷重時における圧縮側柱の負担せん断力は 10.0～13.5tf となった。引張側柱の負担せん断力は、0.4～0.9tf で非常に小さい値となった。以上から、水平接合部の負担せん断力は 40.6～43.5tf となり、これらは水平接合部終局せん断力学式⁵⁾の 1.42～1.83 倍となった。



図－8 負担せん断力の割合

4.2 鉛直接合部のずれ、開き量

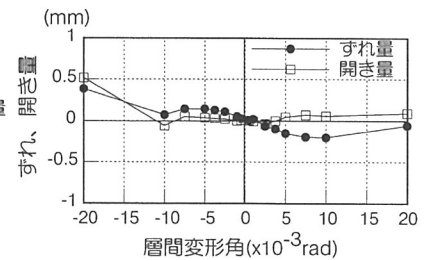
図－9 に WP3-6M と WP6-10U の鉛直接合部のずれ量と開き量を示す。

各試験体とも、最大耐力を示した後の $R=10/1000$ rad まで、ずれ、開き量ともに小さく 0.5mm 以下であった。なお、鉛直接合部の水平方向接合筋のひずみは最大耐力時で 800μ であった。

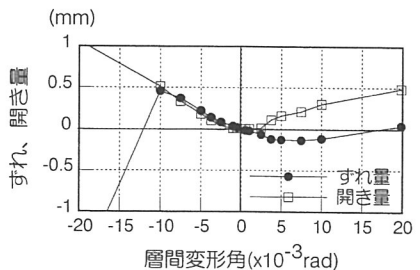
4.3 水平接合部のずれ、開き量

各試験体の水平接合部中央位置のずれ量を図－10 に、代表的な試験体のずれ変形と全体変形の割合を図－11 に示す。

鉛直方向接合筋量が等しい WP2-6、WP3-6M およ

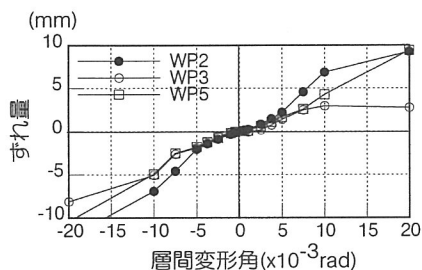


(a) WP3-6M

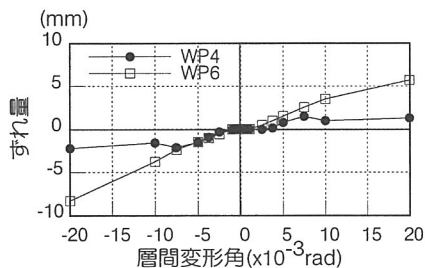


(b) WP6-10U

図－9 鉛直接合部のずれ・変形量

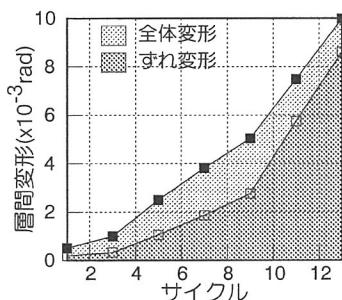


(a) WP2-6, WP3-6M, WP5-10M

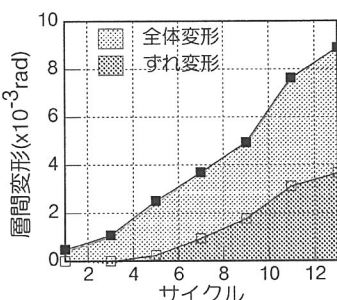


(b) WP4-10M, WP6-10U

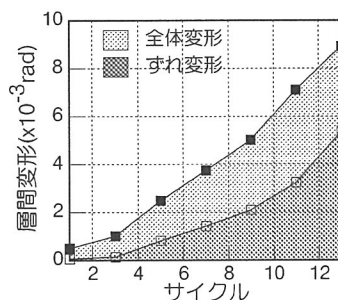
図-10 水平接合部のずれ量



(a) WP2-6



(b) WP3-6M



(c) WP5-6U

図-11 ずれ変形と全体変形の割合

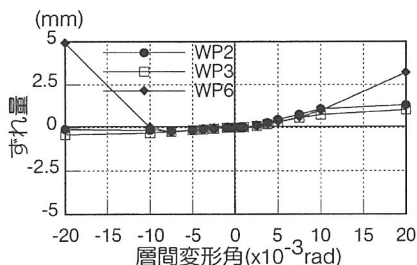


図-12 柱脚のずれ量 (WP2-6, WP3-6M, WP6-10U)

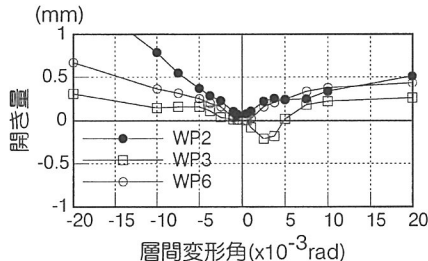


図-13 水平接合部の開き量 (WP2-6, WP3-6M, WP6-10U)

びWP5-6Uの最大耐力時における水平接合部のずれ量は、それぞれ2.2mm、2.6mmおよび2.6mmとなり、開口の有無および開口位置の違いによる大きい差はみられなかった。WP4-10Mの最大耐力時におけるずれ量は1.5mmで、同量の鉛直方向接合筋を有するWP6-10Uの2.6mmにくらべて小さい値となった。このことは、WP4-10Mでは鉛直方向接合筋量が多くなったことによって水平接合部のすべり耐力が大きくなり、開口部でのせん断破壊が先行したことによる。また、今回の実験の範囲では、水平接合部で2.2mm～2.6mm程度のずれが生じたときに最大耐力に至ったと考えられる。

全体変形に占めるずれ変形の割合は、WP2-6, WP3-6M, WP5-6Mともに最大耐力に至るまではほぼ等しく、WP2-6ではその後ずれ変形量の割合が増大して全体

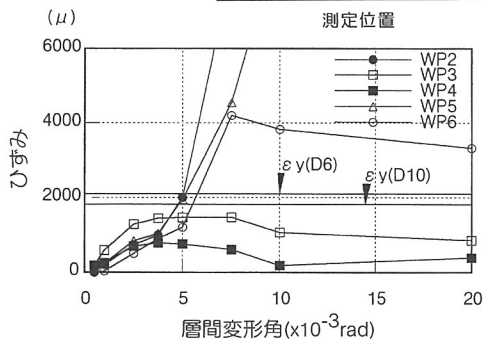
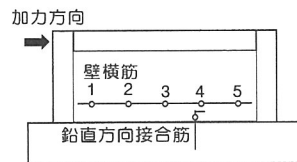


図-14 鉛直方向接合筋のひずみ分布

変形の大部分を占めるが、WP3-6Mでは、ずれ変形の占める割合が減少している。このことは、中央に開口を有するWP3-6Mについては、最大耐力以後、開口部のせん断破壊が顕著になったものと考えられる。WP5-6UはWP2-6と同様に最大耐力後にずれ変形の割合が増加した。

代表的な試験体の柱脚のずれ量を図-12に示す。いずれの試験体も柱脚のずれ量は $R=7.5/1000\text{rad}$ まで0.6mm程度の小さい値であった。

代表的な試験体の水平接合部の開き量を図-13に示す。いずれの試験体も水平接合部位置での開き量は最大耐力時において0.5mm以下の小さい値であった。

4.4 水平接合部の鉛直方向接合筋のひずみ

図-14に水平接合部の鉛直方向接合筋のひずみ分布を示す。ひずみゲージは、曲げ変形の影響が生じないように鉛直方向接合筋の加力方向と平行な面に貼り付けた。

PCa無開口試験体では、 $R=5/1000\text{rad}$ の負サイクルに鉛直方向接合筋が降伏し、この時の正サイクルの荷重が最大耐力になったことから、鉛直方向接合筋が降伏したことによって耐力が上昇しなかったと考えられる。上部に開口を有する試験体では、 $R=5/1000\text{rad}$ で鉛直方向接合筋が降伏した後に、 $R=7.5/1000\text{rad}$ で最大耐力に達した。このことは、鉛直方向接合筋が降伏した結果、水平接合部に作用する水平力が壁脚に集中し、壁脚のせん断圧縮破壊を助長したと考えられる。中央に開口を有する試験体では、鉛直方向接合筋の最大ひずみは、WP3-6Mが 1480μ 、WP4-10Mが 614μ で、最終サイクルまで降伏ひずみに至らなかった。

4.5 壁パネル横筋のひずみ

図-15に各試験体の最大耐力時における壁横筋のひずみ分布を示す。

WS-1では、壁横筋の全般にわたって引張りひずみが生じた。WP2-6では、加力側（以下測定位置を数字で表記：1、2）で引張りひずみが生じたが、壁中央を境にして加力点の対角側（4、5）では圧縮ひずみが生じた。WP3-6MおよびWP4-10Mでは、加力側（1）で引張りひずみが生じたが、測定位置2では引張りひずみに転じ、加力点の対角側（4、5）では引張りひずみが減少した。WP5-6UおよびWP6-10Uでは、加力側（1）で引張りひずみが生じたが、測定位置2を境にして、加力点の対角側で引張りひずみが生じた。これらのことから、一体打ち試験体では壁全般に圧縮ストラットが形成される

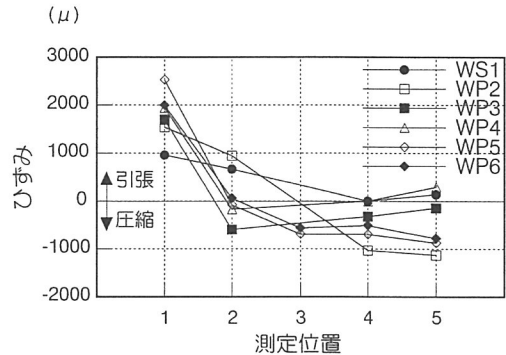


図-15 壁横筋のひずみ分布

が、無開口PCa試験体では、加力点から対角点に向かって、強い圧縮ストラットが形成される。また、有開口PCa試験体では、水平接合部に作用すると考えられる圧縮ストラットは開口位置が上部から中央に移るに従って、その角度が大きくなると考えられる。

5. まとめ

実験の結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 無開口PCa試験体の初期水平剛性は有開口PCa試験体に比べて30%大きかった。
- 2) 無開口PCa試験体および上部に開口を有するPCa試験体の鉛直方向接合筋は $R=5/1000\text{rad}$ で降伏したが、中央に開口を有するPCa試験体では、最終サイクルまで降伏しなかった。
- 3) 今回の実験の範囲では、水平接合部のずれ量が約2.5mmになったとき、最大耐力を示した。
- 4) 各試験体の最大耐力時の破壊状況の特徴は、無開口PCa試験体では鉛直方向接合筋の降伏に伴って、水平接合部に作用する水平力が壁脚に集中した壁脚せん断圧縮破壊、上部に開口を有する試験体では鉛直方向接合筋の降伏後、水平接合部に作用する水平力が壁脚に集中した壁脚せん断圧縮破壊となり、中央に開口を有する試験体では、鉛直方向接合筋量の少ない場合は壁脚のせん断圧縮破壊と開口部のせん断破壊がほぼ同時に発生し、鉛直方向接合筋量の多い場合は開口部のせん断圧縮破壊となった。
- 5) 無開口PCa試験体では加力側から対角側に強い圧縮ストラットが形成され则认为られる。また、有開口PCa試験体では、水平接合部に作用すると考えられる圧縮ストラットは開口位置が上部から中央に移るにしたがって、その角度が大きくなる。

本研究を行うにあたり、武蔵工業大学 望月 重教授・工博にご指導をいただきました。ここに記して深甚の謝意を表します。

[参考文献]

- 1) 日本建築学会関東支部構造専門研究委員会：プレキャスト工法の現状と将来への展望、構造と接合部
- 2) 望月、小林：プレキャスト連層耐力壁の水平接合部のすべり強度に関する実験、日本建築学会構造系論文報告集、第486号、pp63～73、1996.8
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説
- 4) 日本建築学会：壁式プレキャスト鉄筋コンクリート造設計規準・同解説