

論文

[2145] プレキャスト連層耐震壁の接合筋の効果に関する解析

正会員○高見信嗣 (大林組技術研究所)  
 同 望月 重 (武蔵工業大学建築学科)  
 同 小林高志 (武蔵工業大学大学院)  
 同 吉岡研三 (大林組技術研究所)

1. はじめに

鉄筋コンクリート造のプレキャスト(以下PCa)化工法のひとつとして耐震壁の壁板のPCa化があり、省力化に対して有用となっている。PCa壁耐震壁の場合、壁板と周辺フレームとの一体性が場所打ちの場合と異なるので、接合面の鉄筋の有無がPCa耐震壁の挙動に大きな影響を与える。そこで本研究では、PCa連層耐震壁の壁板と周辺フレームの接合法(コッターの有無、接合筋の有無)及び梁筋量をパラメーターとした実験を解析対象として、有限要素法により2次元の非線形平面応力解析を行い、各パラメーターが変形状や破壊機構、接合面の滑り、鉄筋の歪状況に及ぼす影響について解析的な検討をした。

2. 解析対象試験体

解析対象とした試験体は2つのシリーズよりなる。試験体一覧を表1に、試験体の配筋を図1に示す。武蔵工大で行ったMシリーズが4体、当社で行ったOシリーズが4体<sup>1)</sup>の合計8体である。両シリーズともに3層の連層耐震壁であり、壁板をPCa板としている。Mシリーズはいずれの試験体も柱・壁接合面にコッターを施しており、パラメーターとしてはコッター筋の有無、梁・壁接合面における接合筋(ダボ筋)の有無及び中間梁筋量である。Oシリーズは梁・壁接合面にいずれの試験体もダボ筋を等量配筋しており、パラメーターとしては柱・壁接合面のコッターの有無及び梁筋量となる。なおMシリーズで加力梁の幅が柱幅より大きい、これは柱内面までとなる。加力方法は、いずれも正負交番の繰り返し水平力として最上層梁に載加しているが、Mシリーズでは、加力梁に引張加力用PC鋼棒を埋込み1/2ずつの荷重で押し引き同時加力としているのに対し、Oシリーズでは片側押しとなる。なお、Oシリーズでは軸力を加えていないのに対し、Mシリーズでは柱頂部に軸力を2880kgf(柱軸応力 $\sigma_o=20\text{kgf/cm}^2$ )ずつ導入している。表2、表3に使用材料の力学的性質を示す。

3. 解析方法

表1 試験体一覧

試験体	鉛 直 接 合 部				水平接合部	共 通 事 項
	コッターの有無 (%)	コッター筋比 (%)	中間梁筋比 (%)	水平接合筋比 (%)	鉛直接合筋比 (%)	
M シ リ ー ズ	No.1	有り	0.81	3.54	1.95	壁縦筋、横筋4φ@40,壁ハネ ル寸法 900・360・35,コッター面積 比0.5,柱主筋4-9.2φ,柱帯筋 筋D6@40,梁筋筋3.2φ@40
	No.2					
	No.3		0	5.07	1.89	
	No.4					
O シ リ ー ズ	PCW1	有り	0	3.98	1.73	壁縦筋、横筋D6@100,壁ハネ ル寸法1400・650・60,コッター面積 比0.5,柱主筋8-D19,柱帯筋 D6@50,梁筋筋D6@50
	PCW2			2.54	1.10	
	PCW3			0.95	0.41	
	PCW4			無し	2.54	

コッター筋比=コッター筋量/壁パネル部断面積

水平接合筋比=(コッター筋量+中間梁筋量)/(壁パネル水平接合部断面積+中間梁断面積)

鉛直接合筋比=ダボ筋比/壁パネル鉛直接合部断面積

### 3.1 解析モデル

図2に各シリーズの要素分割を示す。モルタル、鉄筋及び柱・壁接合面、梁・壁接合面の力学特性のモデル化を以下に述べる。なお、加力は単調載加とし、接線剛性法を用い初期には荷重増分で行い高荷重域では変位増分により解析を行った。解析には自社開発のFEMプログラムを用いた。

1)モルタル モルタルは4節点の板要素で表現した。圧縮強度にはシリンダー試験結果を、引張強度には圧縮強度の平方根<sup>2)</sup>の値を用いた。材料構成則は文献<sup>3)</sup>のコンクリートのモデルを用いた。なお、MシリーズではPCa板下面と梁との境界部には厚さ5mmの細いモルタル目地部分があるが、細長い要素を作ると大きな不釣り合い力が生じるためこの部分は壁要素と同一として扱った。

2)鉄筋 鉄筋の応力～歪関係はバイリニア型とし、降伏後の剛性は弾性剛性の1/100とした。柱主筋、梁主筋、壁板と周辺フレームとの接合筋は線材要素とし、柱帯筋、梁帯筋並びに壁筋については単軸剛性のみを有する等価な面材要素とした。

3)接合面 壁板と周辺フレームの接合面については接合面において伝達されるせん断応力( $\tau$ )と滑り量(S)の関係をバネ要素を用いて表現した。図3にコッター付き接合面の $\tau$ ～S関係を、図4にコッターなし接合面の $\tau$ ～S関係を示す。せん断強度 $\tau_{max}$ についてはコッター有り接合面、コッターなし接合面ともに望月らの提案しているせん断強度算定式<sup>4) 5)</sup>により定め、各折れ点の相対滑り量(A,B,C)、 $\tau_{max}$ 及び $\circ\tau_{max}$ (後述)以外の各折れ点のせん断応力については文献<sup>6)</sup>を参考にして筆者らが便宜的に定めて $\tau$ ～S関係を決定した。望月式では接合面に生じる垂直方向圧縮応力( $\sigma_n$ )による強度の上昇分を $0.84\sigma_n$ としており、本モデルにおいてもステップごとに各折れ点のせん断応力が圧縮応力がゼロ(目開き状態)の時に比べ $0.84\sigma_n$ だけ上昇するようにした。履歴ルールは筆者らが便宜的に定めたものであり以下に述べる。目開きが生じている場合については、図3、図4中の圧縮応力をゼロにして求めたせん断強度( $\circ\tau_{max}$ )より決定される折れ線(O,A,B,C)上を移動するものとした。接合面に圧縮応力が生じた場合については、例えばD点以降目

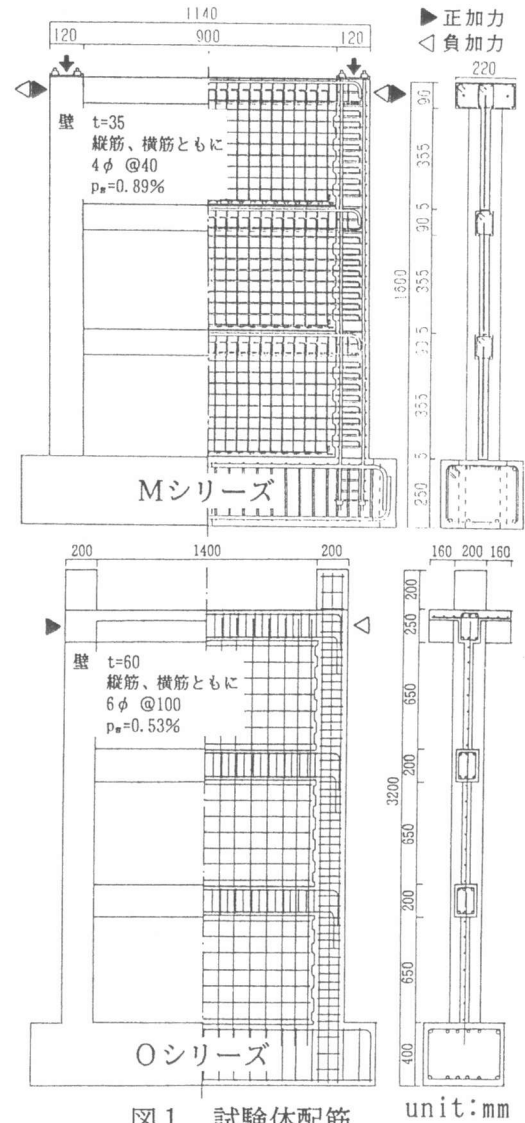


図1 試験体配筋

unit:mm

表2 モルタルの力学的性質

部位		圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	割裂強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 ( $\times 10^5$ kgf/cm <sup>2</sup> )
M シ リ ー ズ	No.1 PCa壁・梁	319	21.2	1.79
	No.3 目地	292	14.1	1.71
	No.2 PCa壁・梁	405	29.3	1.79
	No.4 目地	379	23.1	1.81
	No.1 柱・基礎	327	19.1	1.62
	No.2	409	29.0	1.87
	No.3	329	20.0	1.69
	No.4	387	26.5	1.81
Oシリーズ	PCa壁	268	22.8	2.09
PCW1~PCW4	柱・梁・基礎	241	23.7	1.85

表3 鉄筋の力学的性質

		降伏強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 ( $\times 10^5$ kgf/cm <sup>2</sup> )
M シ リ ー ズ	D10	3900	5395	1.80
	D6	3660	5125	1.71
	4φ	2390	3400	1.94
	3.2φ	2645	2645	1.98
	9.2φ	14775	14979	2.04
	O	D19	3600	5630
シ リ ー ズ	D16	3520	5640	1.78
	D13	3440	5400	1.85
	D10	2990	4650	1.78
	D6	3650	5580	1.82

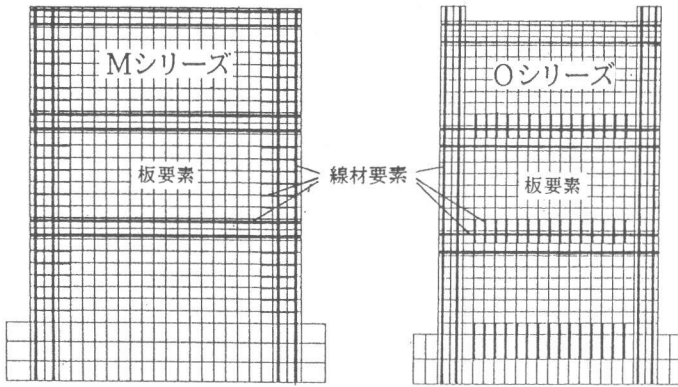


図2 要素分割

表4 実験結果及び解析結果一覧

	柱曲げひび割れ		柱せん断ひび割れ		最大耐力		
	実験	解析	実験	解析	実験	解析	実/解
No. 1	4.5	2.7	5.8	5.0	17.6	18.1	0.97
No. 2	3.3	2.7	6.2	5.0	16.0	15.7	1.02
No. 3	1.8	3.2	7.5	6.3	16.2	15.6	1.04
No. 4	1.6	3.2	4.0	5.5	14.0	14.5	0.97
PCW1	10.0	3.8	21.0	13.6	50.5	50.5	1.00
PCW2	10.0	3.8	24.6	13.7	48.8	48.8	1.00
PCW3	6.0	3.8	18.0	13.3	44.0	46.7	0.94
PCW4	6.0	3.5	16.8	12.9	53.2	48.4	1.10

【破壊モード】

No. 1, No. 2: 2層壁板のせん断破壊、No. 3: 1層壁板のせん断破壊  
 No. 4: 2層柱脚部せん断破壊、PCW1, PCW2: 柱筋曲げ降伏後の2層柱脚部のせん断破壊、PCW3, PCW4: 柱筋曲げ降伏後の1層壁板のせん断破壊

unit:tf

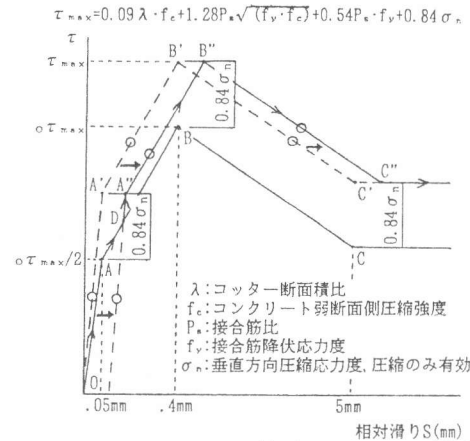


図3 コッターあり接合面のτ～S関係

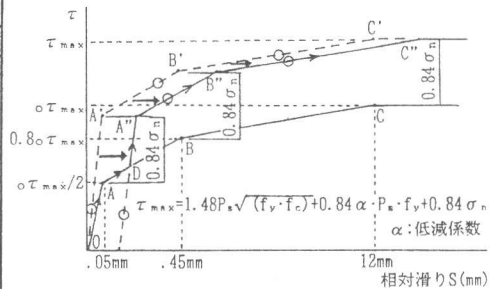


図4 コッターなし接合面のτ～S関係

開きが閉じ圧縮応力(σ<sub>n</sub>)が生じた場合、各折れ点(A, B, C)のせん断応力を0.84σ<sub>n</sub>だけ上昇させた折れ線(O, A', B', C')をD点に交わるまで平行移動させた折れ線(D, A'', B'', C'')上を移動するものとした。圧縮応力が減少する場合は、逆に耐力低下した折れ線を現ステップでの移動点に交わるまで平行移動させた折れ線上を移動するものとした。以後、ステップ毎に圧縮応力の増大及び減少に対し、同様の行程を行い随時変化する履歴線上を移動するものとした。なお、この際に生じる不釣り合い力は等価接点力として解除した。

#### 4. 解析結果及び考察

##### 4.1 荷重-変形関係

表4に実験結果及び解析結果一覧を示す。最大耐力はNo. 1～No. 4, PCW1～PCW4ともに実験値との対応が良い。またひび割れ荷重では柱曲げひび割れ発生荷重、壁せん断ひび割れ発生荷重ともに、試験体によって実験値との対応にばらつきがあった。図5に各試験体の荷重-変形関係を解析結果と実験を比較して示す。実験ではMシリーズの場合、ダボ筋の有無で比較するとNo. 1に対するNo. 2, No. 3に対するNo. 4とダボ筋なしの方が初期剛性、最大耐力ともに低くなっていた。コッター筋の有無で比較するとNo. 1に対するNo. 3, No. 2に対するNo. 4とコッター筋なしの方が最大耐力は低くなるが初期剛性には顕著な違いはなかった。Oシリーズの場合、PCW1, PCW2, PCW3と梁筋量が少なくなるに従い最大耐力が低くなっていた。破壊性状はMシリーズではNo. 1, No. 2が2層壁板のせん断破壊、No. 3が1層壁板のせん断破壊、No. 4が2層柱脚部のせん断破壊を起こし、終局に至っていた。Oシリーズではいずれも柱筋の曲げ降伏が先行した後にPCW1, PCW2では2層柱脚のせん断破壊、No. 3では1層壁板のせん断破壊が起き終局に至っていた。No. 4はNo. 3とほぼ

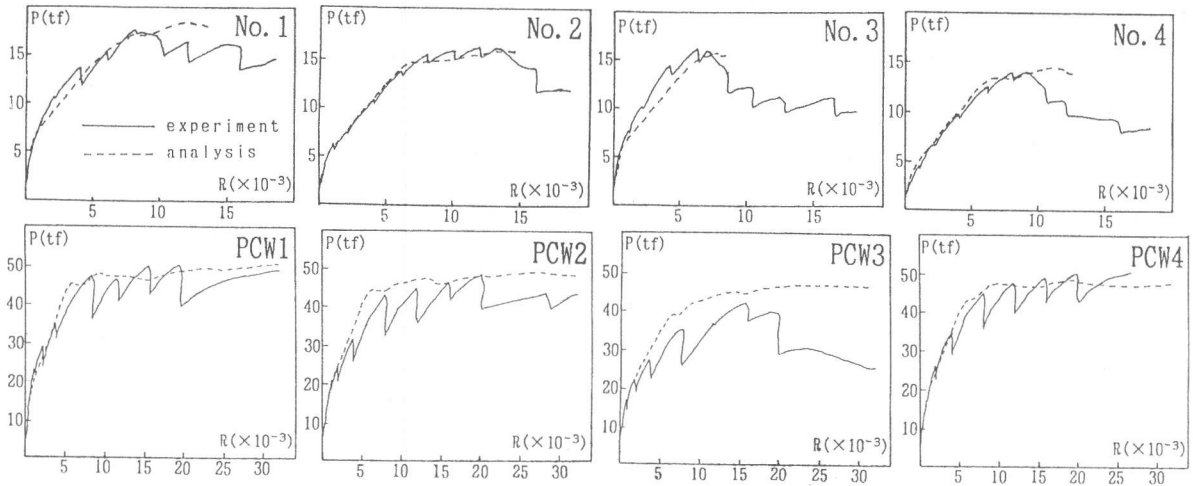


図5 荷重～変形関係

同様な破壊ではあるが壁板の損傷はNo. 3ほど激しくなかった。解析結果を見るとMシリーズについては水平接合部にダボ筋を持たないNo. 2, No. 4では、初期剛性、剛性が低下し始める時期の荷重、実験での最大荷重時の変位付近までの軌跡と解析値は実験値を比較的良く追跡できていた。水平接合部に接合筋を持つNo. 1, No. 3では初期剛性こそ実験値との対応がとれたものの荷重7ton付近からの剛性の低下が実験値より解析値の方が大きくなっており、ダボ筋の有無が荷重～変形関係に及ぼす影響を解析では十分には表現しきれない結果となった。Oシリーズについては、PCW1, PCW2, PCW4では初期剛性、剛性の低下、最大荷重及びそれ以降の軌跡ともに実験値との対応がほぼ良好であった。一方、梁筋量のもっとも少ないPCW3については剛性の低下が実験値を再現しきれず解析値の方が荷重が高くなっていた。本解析に限れば梁筋量の違いによる影響を解析では再現しきれない結果となった。さらに、実験で耐力の低下が著しい試験体についてはその耐力の低下までは解析では再現しきれなかった。しかし、総じてせん断破壊型、柱筋曲げ降伏後のせん断破壊型ともに実験値の最大耐力時変形までは実験と解析の対応は比較的良好であった。

#### 4.2 主応力状態

図6にNo. 1, No. 2の部材角1/100時での主応力分布を示す。両試験体ともに主応力は各層壁パネルの対角線位置で大きくなっており、全体の抵抗機構としてはトラス的な要素が卓越していることが分かる。一体打RC耐震壁のように接合面に目開きや滑りがほとんど生じない試験体の場合、目開きや滑りが生じるPCa壁試験体に比べれば主応力が最上層から最下層まで連続的に流れて、アーチ的な抵抗機構が卓越することが分かっており、その意味で今回の解析で用いた接合面での $\tau$ ～ $s$ モデルがその滑りを表現しえたことが確認できる。またダボ筋の有無の影響を見るとダボ筋があり接合面のせん断強度が高いNo. 1の方がストラットの幅が大きくなっていた。

#### 4.3 梁筋の歪状況

図7にNo. 3, No. 4の2、3層間梁上端筋の歪状況を実験結果との比較として示す。ダボ筋を持つNo. 3と持たないNo. 4ではダボ筋を持つNo. 3の方が歪は実験、解析ともに低い値となっていた。よってダボ筋が壁板の横滑りを押さえる効果により梁筋に加わる引張力が低減

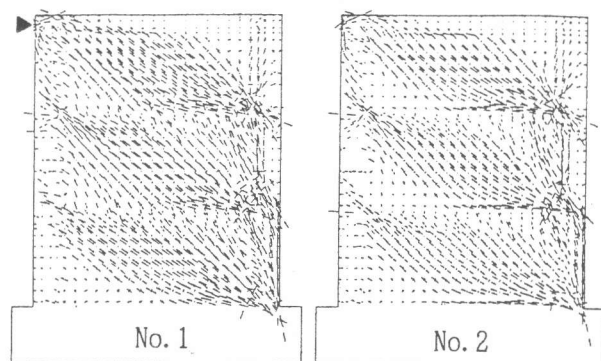


図6 主応力分布

することが実験、解析両方から確認できる。図8にNo. 1, No. 3の1, 2層間梁上端筋の歪状況を示す。実験でコッター筋がないNo. 3よりもコッター筋があり、梁筋量の少ないNo. 1の方が歪が大きくなっていたが解析でも同様の傾向を示していた。

#### 4.4 壁・梁及び壁・柱接合面の滑り性状

図9に代表例としてNo. 1, No. 2の壁パネル下側と梁上側の水平接合面の相対滑り状況を実験結果とあわせて示す。実験よりダボ筋があるNo. 1よりもダボ筋がないNo. 2の方が同部材角時での滑り量が大きくなっているが、解析の方もNo. 2の方が滑り量が大きくなっており、実験結果に追従する結果となっていた。また、両試験体ともに実験値と解析値を比較して特に部材角8/1000までは比較的良く追跡ができていた。図10に解析結果による加力点水平変位1.0mmまでのNo. 1の各層水平接合面の相対滑り状況を示す。上層になるに従い滑り量が大きくなっている。これは水平力により発生する転倒モーメントが下層ほど大きく、壁パネルと梁の接合面に生じる圧縮応力が大きくなり接合面の滑りに対するせん断強度が上昇したためと考えられる。一方図9に示したNo. 1の2層と3層の滑り量を比較すると部材角8/1000以降では2層の方が滑り量が大きくなっていた。よって図10の様な状態は大変形時には必ずしも成り立たないと思われる。図11にPCW2及びPCW4の2層鉛直接合面の相対滑り状況を示す。コッター付き接合面のPCW2、コッター無し接合面のPCW4ともに特に高剛性域での対応性が乏しく、解析の方が滑り量が小さい結果となった。

#### 4.5 壁のせん断力分担

図12に2層柱脚高さ領域における荷重に対する壁の負担せん断力の比率を示す。これは壁の負担せん断力を柱脚高さ上面の壁の各要素に生じているせん断力の総和として求め、これを同高さの柱の各要素のせん断力の総和と壁のせん断力の総和との合計で除した値としたものであり、以下の式により求めた。

壁のせん断力負担率＝

壁要素の負担せん断力の総和 / (壁要素の負担せん断力の総和 + 柱要素の負担せん断力の総和)

壁の負担率は低変形域では高い値を示しているが変形が進むにつれて負担率が低下していく。よってその分だけ柱の負担率が大きくなることわかる。ダボ筋の有無

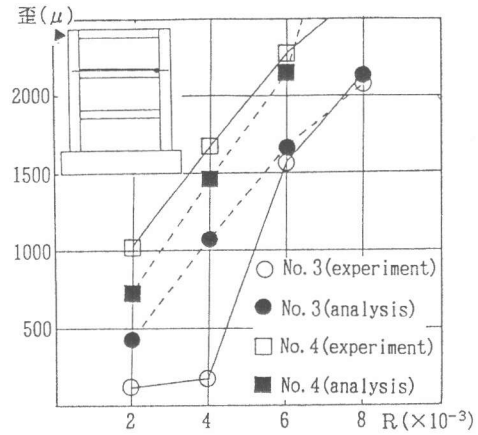


図7 梁筋歪状況

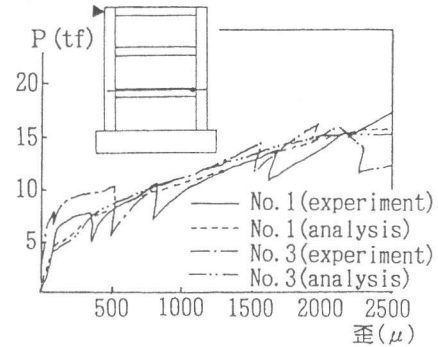


図8 梁筋歪状況

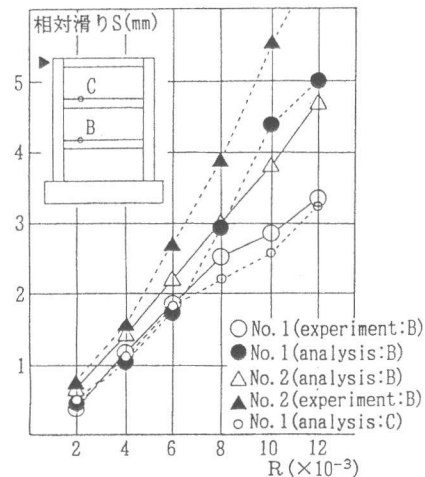


図9 水平接合面の相対滑り状況

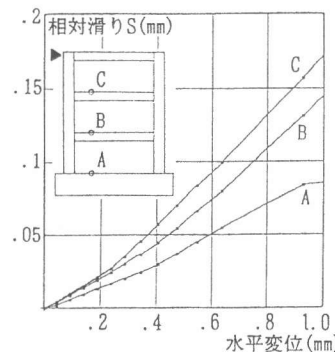


図10 水平接合面の相対滑り状況

による影響で見るとダボ筋が存在するNo. 1, No. 3は実験で壁パネルがせん断破壊していた。これはダボ筋があるために接合面の滑りが押さえられ壁の負担が高くなるためと考えられる。解析でもNo. 2, No. 4より壁の負担率が高くなっており、これを裏づける結果となっていた。一方、ダボ筋が存在しないNo. 2, No. 4では接合面の滑りが大きいため壁の負担率が低く、柱の負担率が高くなる。これは、No. 4が実験で柱のせん断破壊により耐力の低下を招いていたことからわかる。よってPCa耐震壁において水平接合部のダボ筋を省略することは柱崩壊型の構造になる可能性が大きくなると考えられるであろう。また、PCW1, PCW2, PCW3と梁筋量が低くなるに従って壁の負担率が高くなっている。これは梁筋量が少なく梁筋が降伏するとフレーム部の剛性が低下して柱の負担せん断力が上昇しやすくなるためと考えられる。PCW3で部材角4/1000から8/1000の間に壁の負担率が上昇している理由は、この時に梁筋各所が降伏し始めており、上述のようにフレーム部の剛性が低下したためと考えられる。

### 5. まとめ

有限要素法によりPCa連層耐震壁の非線形解析を行い、壁パネルと周辺フレームの接合方法等が力学的挙動に及ぼす影響について検討を行った。以下に本解析により得られた知見を述べる。

- 1) 水平及び鉛直接合部において伝達されるせん断力と滑り量の関係を簡便な解析モデルで表現することにより、荷重～変形関係を概ね追跡することができた。
- 2) 接合方法が壁パネル内の力の流れ方に及ぼす影響を定性的に把握することができた。
- 3) 解析結果によるとダボ筋があると壁パネルの横滑りを低減させる効果により壁のせん断力負担率は高くなり、ダボ筋がないと横滑りが大きくなり柱の負担率が高くなる。また、梁筋量が少なくなるほどフレームの剛性が低くなり、壁のせん断力負担率は高くなる。

#### 参考文献

1) 武田寿一, 吉岡研三: プレキャストコンクリートパネルを内蔵する鉄筋コンクリート耐震壁の実験的研究, 大林組技術研究所報, No26, PP45~51, 1983 2) 長沼一洋: 鉄筋コンクリート耐震壁の非線形解析手法と適用性, 日本建築学会構造系論文報告集, 第431号, pp7~16 3) 長沼一洋: 平面応力場における鉄筋コンクリート板の非線形解析モデル, 日本建築学会構造系論文報告集, 第421号, pp39~48 4) 望月 重, 横谷栄次, 永坂具也: 壁式プレキャスト構造鉛直接合部のせん断耐力, 日本建築学会構造系論文報告集, 第424号, pp11~22 5) 望月 重, 井口雅章: 壁式プレキャスト鉄筋コンクリート造水平接合部に関する実験研究, 日本建築学会大会学術講演集, pp217~218, 1989. 10 6) 壁式プレキャスト構造の鉛直接合部の挙動と設計法, 日本建築学会, 1989. 4

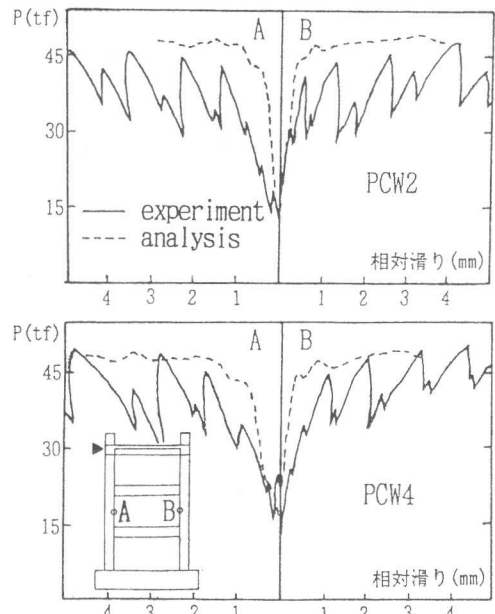


図 1.1 鉛直接合面の相対滑り状況

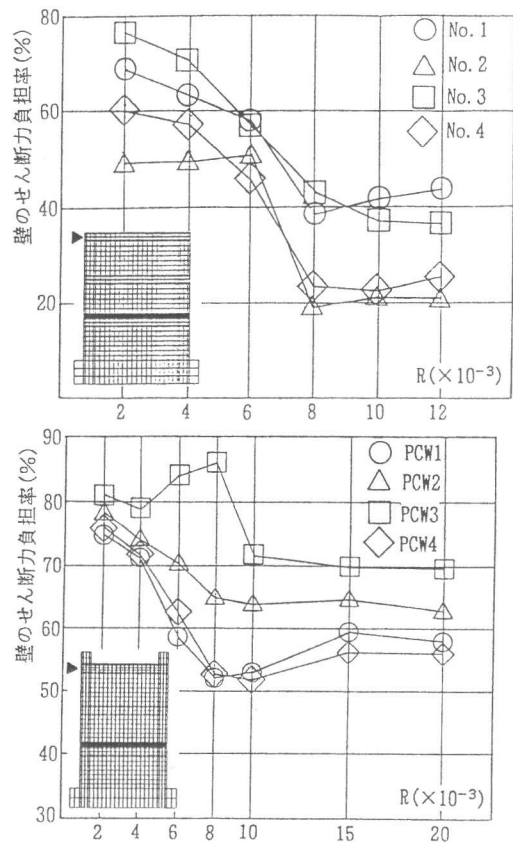


図 1.2 壁のせん断力負担率