

# 論文 簡易プレキャスト耐震壁の耐震性能

ウサレム ハッサン\*1・石川 裕次\*2・池田 崇\*3・川野 翔平\*4

**要旨:** 地上15階までの中層建物を対象とした簡易プレキャスト耐震壁工法に関する耐震性能について検討を行った。本工法は、PCa壁パネルの横筋を機械式継手を用いてPCa付帯柱と接合し、各階壁パネルの縦筋をスリーブ継手を用いて上下階梁と接合して耐震壁を構築する簡易プレキャスト耐震壁工法である。曲げ降伏先行型として設計した簡易プレキャスト耐震壁の構造実験を行った。簡易プレキャスト耐震壁は、部材角R=1.50%まで耐力低下せずに紡錘形の復元力特性を示した。

**キーワード:** 鉄筋コンクリート造, プレキャスト工法, 水平接合部, 鉄筋継手, 耐震設計, 構造実験

## 1. はじめに

我が国では、板状集合住宅などの中低層建物において、耐震壁を用いた構造設計が一般的に行われている。一方で、近年は、建設労務職の減少に伴い、建築現場での施工合理化の必要性が高まっている。ここでは壁パネルと周辺の付帯柱・付帯梁（壁内梁）との接合に壁集約縦筋および壁集約横筋を介して接合する簡易プレキャスト耐震壁工法を提案した（図-1参照）。集約筋は壁縦筋および横筋と等価な太径鉄筋を必要本数配置した。壁集約縦筋はパネル内全長にわたり配筋し、集約横筋はパネル部と付帯柱の境界領域で機械式継手によって接合した。ここでは、その耐震性能を構造実験および非線形FEM解析を用いて検討した結果を以下に示す。

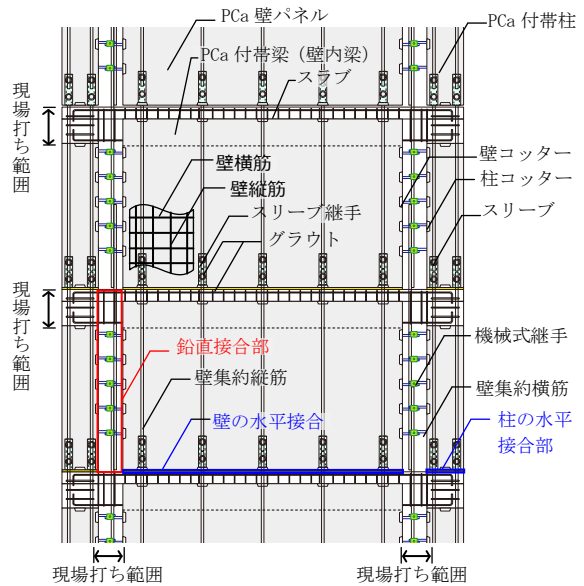


図-1 簡易プレキャスト耐震壁の概要

## 2. 簡易プレキャスト耐震壁の施工手順

提案する簡易プレキャスト耐震壁の施工手順を図-2

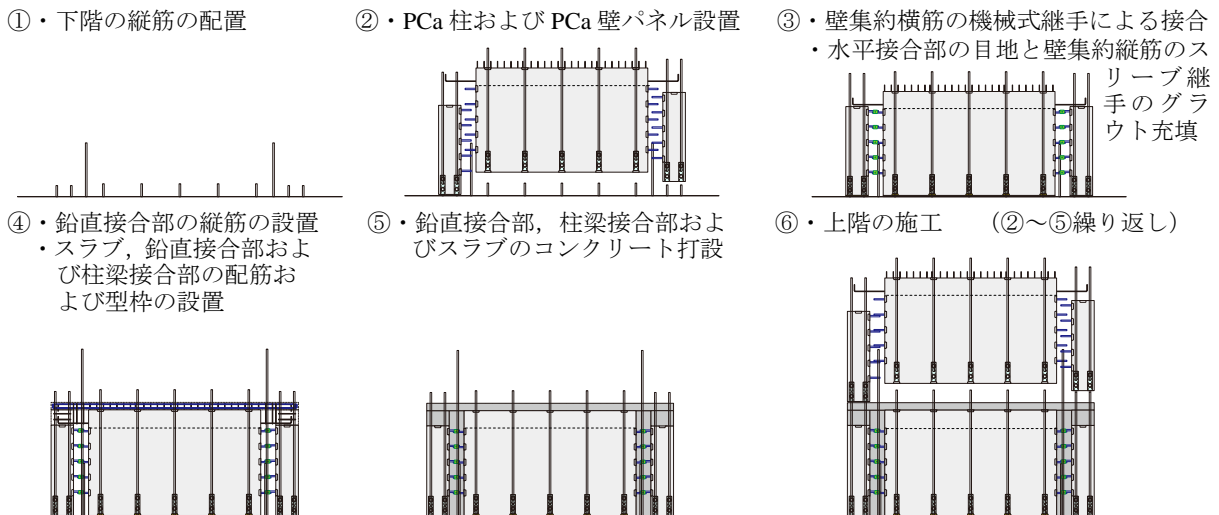


図-2 簡易プレキャスト耐震壁の施工手順

*1 竹中工務店技術研究所	構造部	RC 構造グループ	主任研究員	工博	(正会員)
*2 竹中工務店技術研究所	構造部	RC 構造グループ	グループ長	博士 (工学)	(正会員)
*3 竹中工務店名古屋支店	設計部	構造グループ	課長	工修	
*4 竹中工務店技術研究所	構造部	RC 構造グループ	研究員	工修	(正会員)

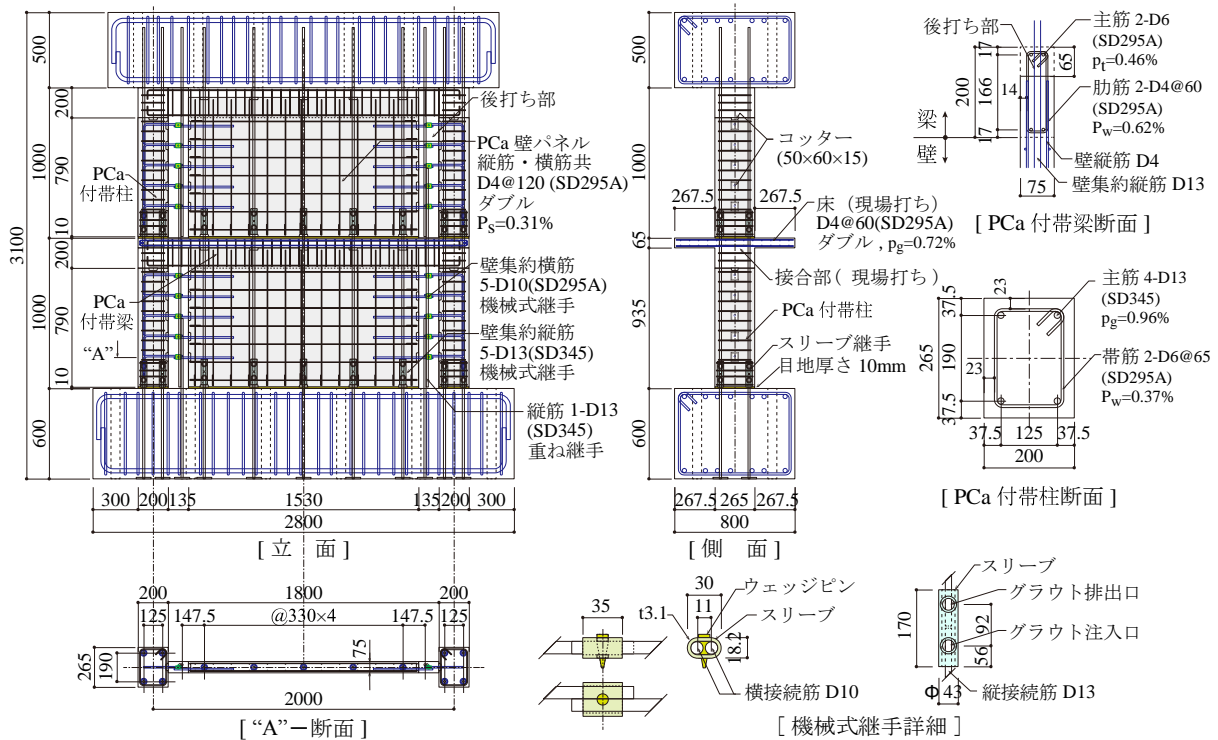


図-3 簡易プレキャスト耐震壁試験体の形状寸法および配筋詳細

に示す。本工法の主な特徴は、壁パネルと付帯柱および付帯梁との接合箇所数を減じるために、壁集約縦筋および壁集約横筋を用いて接合を行うことと鉛直接合部に機械式継手を用いて現場打ちコンクリート範囲を縮小することである。

### 3. 構造実験概要

#### 3.1 試験体

試験体は、中高層集合住宅の下層階耐震壁を想定した約 1/3 縮小モデルとした。シアスパン比 2.00、曲げ降伏先行型となる 2 層の連層耐震壁を想定した。図-3 に試験体の形状寸法、配筋状況および鉄筋量を示す。表-1 に試験体に用いたコンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を示す。

PCa 壁パネル脚部の水平接合部には鉛直接合筋として D13 を 5 本、PCa 壁パネル両側の鉛直接合部内にそれぞれ D13 を 1 本配置した。

PCa 付帯柱脚部の水平接合部に関しては、鉛直接合筋（壁縦筋）として D13 を 4 本配置した。また、PCa 壁パネル両側の鉛直接合部に関しては、壁集約横筋として D10 シングルを 5 本およびシアコッター 5 箇所を配置し、図-3 に示すクサビ圧入型の機械式継手にて接続した。さらに、本試験体では、付帯梁上端にスラブを設けた。スラブと柱梁接合部と鉛直接合部はコンクリートを後打ちした。

表-1 コンクリートおよび鉄筋の材料試験結果

コンクリート	圧縮強度 $f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 $E_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 $f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )
PCa 部分	36.4	$2.99 \times 10^4$	2.75
後打ち部分	29.0	$2.48 \times 10^4$	2.30
グラウト	126.3	$3.91 \times 10^4$	-

鉄筋	降伏強度 $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 $E_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び $\epsilon_u$ (%)
D4 (SD295A)	362	$1.94 \times 10^5$	17.9
D6 (SD295A)	364	$1.98 \times 10^5$	13.3
D10 (SD295A)	378	$1.90 \times 10^5$	20.5
D13 (SD345)	382	$1.94 \times 10^5$	19.8

#### 3.2 加力方法

加力装置を図-4 に示す。シアスパン比 2.00 となるように、2 層の連層耐震壁の試験体の上に RC ブロックを設置した。耐震壁の付帯柱の断面積に対して、軸力比 0.15（耐震壁全断面積に対しては 0.066）となるように軸力 572kN を作用させた。軸力を一定に保ちながら試験体の上に載せた鉄骨加力梁から 2 台のジャッキにより水平荷重を与えた。水平荷重は、変位制御による静的加力とした。部材角は、上スタブ位置（2 層の高さ）での水平変位から算出した。載荷履歴は、小変形時には部材角 0.5/1000 (rad) で 2 サイクルおよび 1.0/1000 (rad) で 10 サイ

クル、大変形時には各部材角 2.5/1000 (rad), 5.0/1000 (rad), 7.5/1000 (rad), 10/1000 (rad), 15/1000 (rad) で 2 サイクルの正負交番繰返し载荷を行った。正面および裏面のジャッキにロードセルを設置し、2 台のロードセルの計測値から水平荷重を測定した。試験体における変形やひずみを計測するために、38 台の変位計を設置し、試験体の主要な鉄筋にひずみゲージを 39 箇所貼付した。画像データ取込み計測システムを用いて、実験を行った。

### 3.3 実験結果

#### (1) 主な実験結果

図-5 に水平荷重-部材角関係および等価粘性減衰定数-部材角関係、写真-1 に部材角  $R=2.5/1000$  (rad),  $10.0/1000$  (rad) 時におけるひび割れ状況、表-2 に実験結果一覧および既往の設計指針<sup>1)</sup>および計算規準<sup>2)</sup>による計算値との比較を示す。

部材角範囲  $R=\pm 15/1000$  (rad.) では、水平接合部でのすべりは発生せず、試験体は紡錘形の履歴特性を示した。目地部の局所的な変形も見られずに、試験体の挙動は、一体打ちと同等な挙動を示した。部材角  $R=5.0/1000$  (rad) までに引張側柱の主筋および壁集約縦筋が降伏し、曲げ降伏に至った。試験体の最大耐力  $Q=382\text{kN}$  ( $Q=-388\text{kN}$ ) は部材角  $R=7.5/1000$  (rad) ( $R=-10/1000$  (rad)) 時に到達した。最大耐力後の耐力低下は比較的小さかったが、コンクリート圧壊現象は鉛直接合部の下角に集中し、 $R=+20/1000$  (rad) サイクルの正方向ピークに向かう途中で引張側柱の主筋の一部が破断し、耐力が急激に低下したため、実験を終了した。

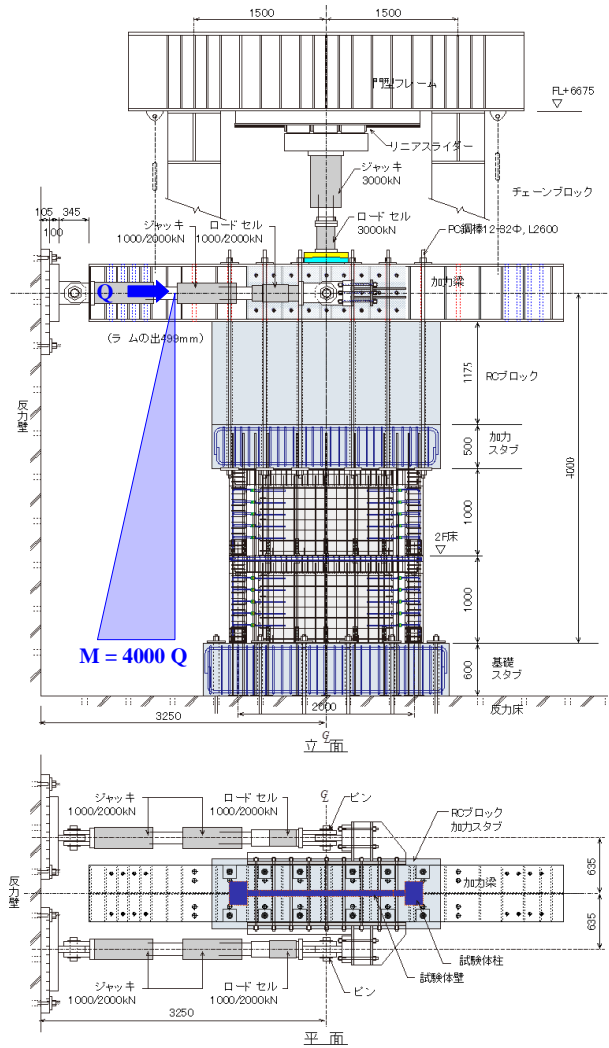


図-4 加力装置および作用させたモーメント分布

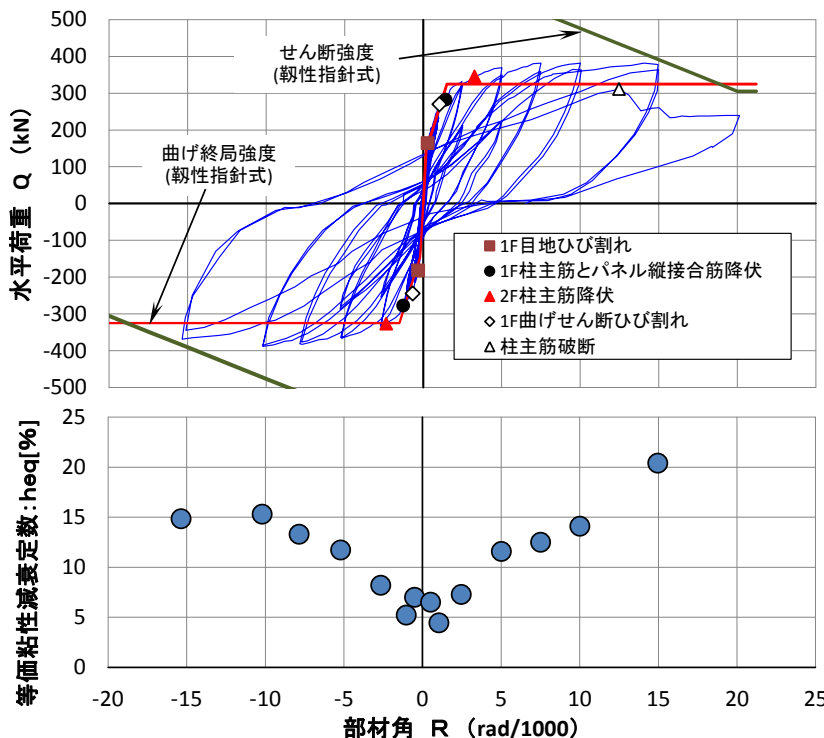


図-5 水平荷重, 等価粘性減衰定数-部材角関係

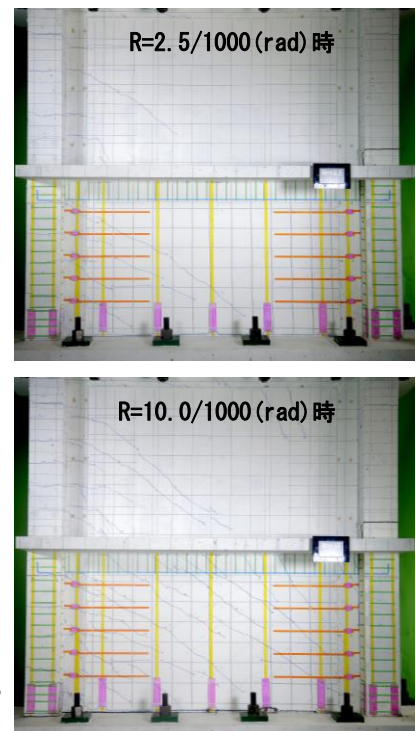


写真-1 ひび割れ状況

表一2 実験値と計算値の比較

	単位	実験値	計算値	実験値 計算値
初期剛性	kN/mm	249	176	1.42
曲げ降伏点剛性	kN/mm	101	53	1.91
曲げひび割れ強度	kN	164	145	1.13
曲げ終局強度 <sup>2)</sup>	kN	382	325	1.17
せん断強度(靱性指針式) <sup>2)</sup>	kN	-	391*	-
せん断強度(広沢 mean 式) <sup>3)</sup>	kN	-	553	-
水平接合部せん断強度 <sup>1)</sup>	kN	-	528	-

表記 \* : 部材角 15/1000 時による値

### (2) 破壊過程

試験体に軸力 (572kN) を作用させた時点で、軸ひずみ (計測値) が (計算値) と同様であることを確認し、水平荷重を作用させた。以下に、主な破壊過程を示す。

曲げひび割れが、部材角  $R=+0.30/1000(\text{rad})$ ,  $Q=164\text{kN}$  (負方向  $R=-0.31/1000(\text{rad})$ ,  $Q=-182\text{kN}$ ) で1層目の壁脚に発生した。部材角  $R=+0.63/1000(\text{rad})$ ,  $Q=219\text{kN}$  (負方向  $R=-0.66/1000(\text{rad})$ ,  $Q=-245\text{kN}$ ) で2層目の壁脚に発生した。その後、発生した曲げひび割れが伸展し、ひび割れ幅が拡大、ひび割れ本数も徐々に増加した。

曲げせん断ひび割れは、部材角  $R=+1.04/1000(\text{rad})$ ,  $Q=270\text{kN}$  ( $R=-0.66/1000(\text{rad})$ ,  $Q=-245\text{kN}$ ) で1層目の壁に発生した。部材角  $R=+2.47/1000(\text{rad})$ ,  $Q=332\text{kN}$  ( $R=-1.79/1000(\text{rad})$ ,  $Q=-311\text{kN}$ ) で2層目の壁に発生した。

スラブでは、部材角  $R=+2.50/1000(\text{rad})$  ( $R=-5.00/1000$ ) にひび割れが発生した。これは、2層目の壁に発生した曲げせん断ひび割れが伸展したものである。

鉛直接接合部のPCa壁パネル界面にはひび割れが全く発生しなかった。一方、PCa付帯柱界面には、部材角  $R=2.5/1000(\text{rad})$  ( $R=-2.5/1000(\text{rad})$ ) 時に、ひび割れが発生したが、ひび割れの幅が小さかった。コンクリート圧壊現象は、部材角  $R=+9.54/1000(\text{rad})$ ,  $Q=380\text{kN}$  ( $R=-8.81/1000(\text{rad})$ ,  $Q=-375\text{kN}$ ) に1層目の柱脚部に発生したが、その後、1層目脚部周辺の鉛直接接合部に破壊が移行したため、付帯柱における圧壊現象は進展しなかった。

### (3) 変形割合

試験体の水平変形比の推移を、図-6に示す。水平変形は、2層目の水平変位 (計測値) を、全体変形とし、各層の曲げ変形および、せん断変形を計測結果から求めて図-6のそれぞれの変形比を算出した。曲げ変形は、各層の柱の鉛直変位を用いて、計算し、せん断変形は、各層の壁の対角で計測した変位を用いて、計算した。

図-6に示すように、初期サイクルから変形は1層目に集中しており、曲げ変形比は50%以上、せん断変位比

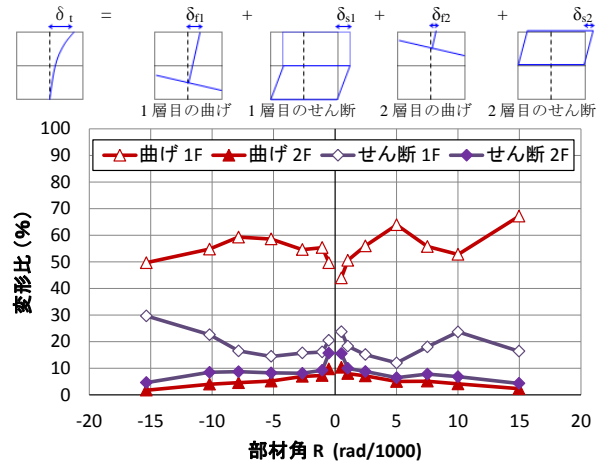


図-6 変形比の計算方法および試験体の変形比推移

は15%以上であった。2層目の変形では、曲げ変形比は10%以下、せん断変形比は10%以下であった。

### (4) 鉄筋ひずみ

PCa付帯柱主筋、せん断補強筋のひずみ、PCa付帯梁主筋、せん断補強筋のひずみ、PCa壁パネルの縦筋および横筋のひずみ、水平接合部および鉛直接接合部の接合筋の計測を行った。PCa付帯梁主筋、PCa壁パネルの横筋およびPCa付帯柱とPCa壁パネルの鉛直接接合部のすべての集約筋は降伏には至らなかった。1層目の柱主筋は、部材角  $R=1/1000(\text{rad})$  時に、2層目は、部材角  $R=5/1000(\text{rad})$  前後で降伏に至った。1層目の鉛直接接合部筋 (柱主筋および壁縦筋) は、部材角  $R=2.5/1000(\text{rad})$  時に、2層目は、部材角  $R=10/1000(\text{rad})$  後に全て降伏した。正加力方向および負加力方向のPCa壁脚の鉛直接接合筋のひずみ推移を図-7に示す。

## 4. 解析

構造実験で得られた実験結果を検証するために、水平接合部をバネ要素としてモデル化を行った。非線形FEM解析を行い、実験結果との比較を行った。

### 4.1 解析プログラムの概要

解析では、3次元非線形FEM解析プログラムを用いた。解析プログラムでは、鉄筋コンクリート (RC) 板の面内および面外の挙動を解析するため、図-8に示すRC積層シェル要素を用いた。このモデルはRC板の断面を鉄筋層とコンクリート層としてモデル化し、要素節点の変位 (回転角を含む) から断面内ひずみ分布を平面保持の仮定より求め、各層の材料モデルにより断面内応力を算定している。

鉄筋層は鉄筋軸方向のみに剛性をもつ異方性板としており、構成モデルとしてはバイリニア型の塑性特性を設定している。要素応力は鉄筋応力とコンクリート応力を累加して算出している。鉄筋とコンクリートの応力負担割合は、実際にはひび割れ面近傍で鉄筋の抜け出し等の

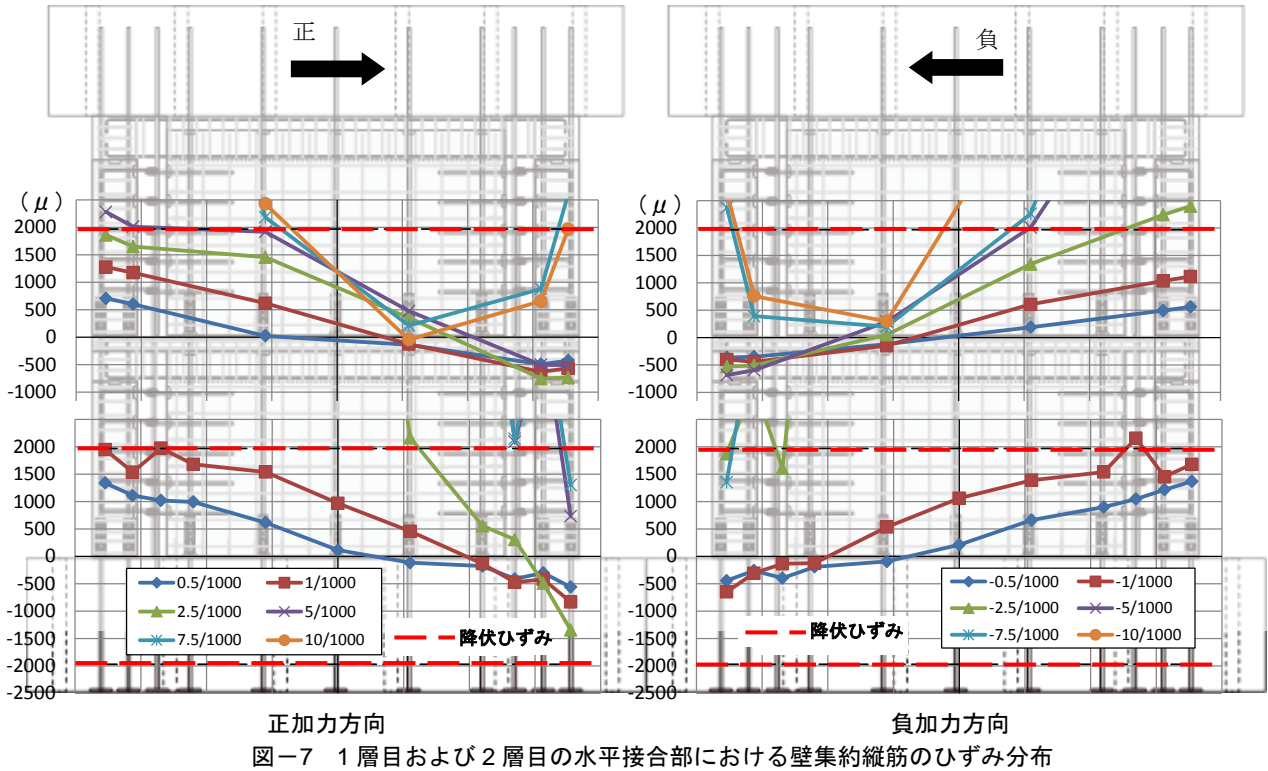


図-7 1層目および2層目の水平接合部における壁集約縦筋のひずみ分布

影響により複雑となるが、ここでは、ひび割れは一様に分散すると仮定して、ひび割れ後のコンクリート軟化特性のみで応力分担をモデル化した。

#### 4.2 解析条件

図-9 に要素分割及び境界条件を示す。

- 1) 解析モデルは 4.1 に示した通り、コンクリートおよび鉄筋の非線形性を考慮した積層シェル要素にてモデル化を行った。
- 2) 柱主筋、柱せん断補強筋、壁パネルの縦筋・横筋、接合部の集約鉄筋は、配筋状況を考慮して積層シェル要素としてモデル化を行った。解析は、水平荷重を単調載荷させて行った。
- 3) PCa 柱梁の鉛直接合部および柱梁接合部は、一体打ちと同等なモデルとした。
- 4) 材料特性は材料試験の結果を使用した。
- 5) 鉄筋は、バイリニア型の復元力特性を用いた。
- 6) コンクリートの一軸圧縮応力-ひずみ関係はトリリニア型とした。終局圧縮ひずみ  $\epsilon_u$  を超過後は、 $4\epsilon_u$  までを負勾配とし、それ以後は圧縮強度の 10% を保持するとした。2 軸圧縮応力下での降伏曲面は、Drucker-Prager の降伏条件に従い、第 1, 2 次の降伏曲面は相似とし、降伏後は塑性流れ則に従うものとした。また、ひび割れ直交方向の応力は、ひび割れ間で鉄筋との付着作用によって引張応力を負担するテンションステイフネス効果を考慮してモデル化を行った。
- 7) ひび割れたコンクリート面でのせん断力はコンクリー

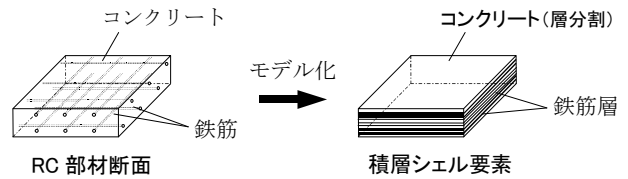


図-8 RC 積層シェル要素

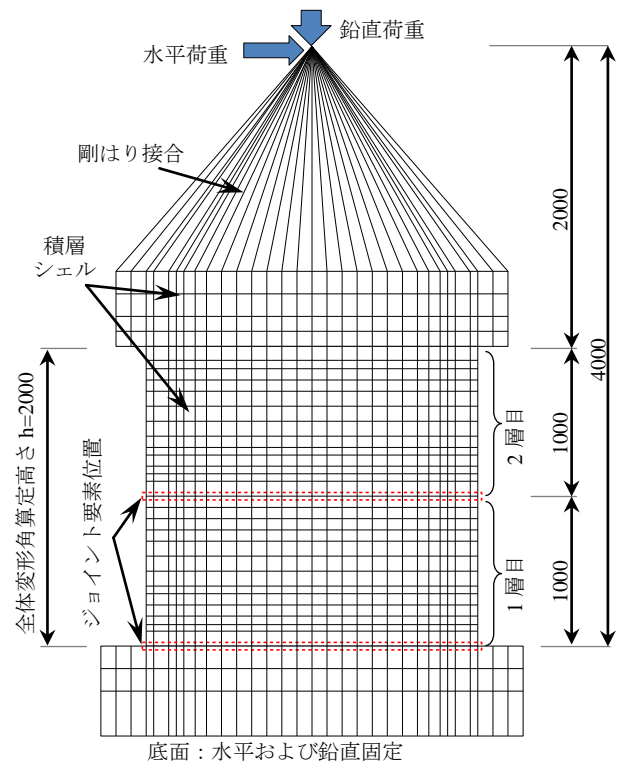


図-9 解析モデル

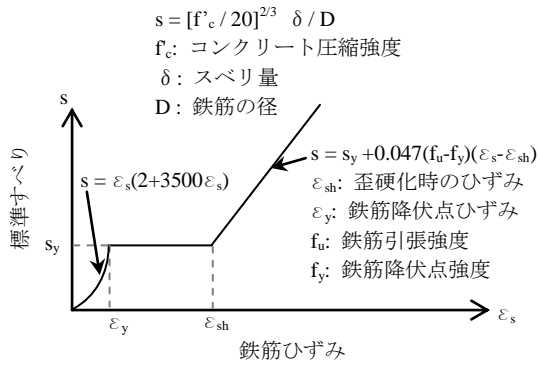


図-10 水平接合部の鉛直バネ要素の特性

ト面間の摩擦力や骨材の凹凸および鉄筋のダボ作用により伝達されるものとしてモデル化を行った。PCa 壁の水平接合部は、実験時において、壁の曲げ変形により、部分的に浮き上がりが生じた。この現象を考慮するため、水平接合部には、鉛直集約鉄筋の箇所に鉛直バネを設定している。バネの特性は、文献4)を参照し、図-10に示す鉛直方向の鉄筋のすべり-ひずみ関係を考慮した。鉛直バネは図-9に示すジョイント要素位置の各節点に設置した。

#### 4.3 解析結果

図-11に、解析結果および実験結果(正方向加力のみ)の荷重-部材角関係を示す。解析モデルの破壊モードは、実験と同様に曲げ破壊となった。部材角  $R=0.35/1000(\text{rad})$  で、壁脚部で曲げひび割れが発生した。部材角  $R=2.94/1000(\text{rad})$  で引張側柱の主筋が降伏し、壁の曲げ降伏に至った。解析の最大耐力は、 $Q=415\text{kN}$  で部材角は  $R=14.1/1000(\text{rad})$  であった。その時、鉛直接合部の脚部の応力はコンクリート圧縮強度に達していた。その後、耐力は急激的に低下した。引張側柱の主筋ひずみは降伏ひずみの20倍程度となっており、実験で引張側柱の主筋が破断した現象と対応する結果となった。表-3に示す通り、降伏点剛性(割線剛性)を除き、解析結果は実験結果よりやや大きな値を示した。積層シェル要素での鉄筋とコンクリートとの付着をモデル化し、鉛直接合部のバネと水平接合部の水平バネを考慮することで、さらに、解析と実験の適合性が向上するものと考えられる。

#### 5. まとめ

曲げ降伏先行型の簡易プレキャスト耐震壁について、構造実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) PCa 壁パネル横筋の接合に機械式継手およびPCa 壁パネル縦筋の接合にスリーブ継手を用いた曲げ降伏先行型の簡易PCa耐震壁は、部材角  $R=15/1000$  までは紡錘形の復元力特性を示した。
- (2) 既往のRC耐震壁およびプレキャスト接合部の設計

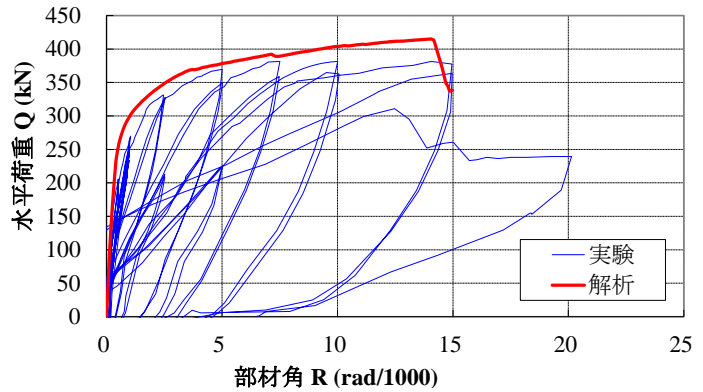


図-11 荷重-部材角関係の解析結果と実験結果の比較

表-3 実験値と解析値の比較

	単位	実験値	計算値	実験値 計算値
初期剛性	kN/mm	249	299	0.83
曲げ降伏点剛性	kN/mm	101	61	1.66
曲げひび割れ強度	kN	164	213	0.77
曲げひび割れ発生時の部材角	rad/1000	0.31	0.35	0.86
曲げ降伏点強度	kN	282	358	0.79
曲げ降伏時の部材角	rad/1000	1.42	2.94	0.48
最大耐力	kN	382	415	0.92
最大耐力時の部材角	rad/1000	7.51	14.1	0.53

式により、試験体の破壊モードを、想定することができた。

- (3) プレキャスト接合面の設計を、既往の設計式によって設計した簡易PCa耐震壁試験体では、水平接合部および鉛直接合部において、局所的な破壊には至らなかった。
- (4) 簡易プレキャスト耐震壁を想定したFEM解析を行った結果は、実験結果をやや過大評価したが、概ね同等な復元力特性が得られた。

今後は、積層シェル要素での鉄筋とコンクリートとの付着などを考慮することで、解析と実験の適合性が向上するものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会：現場打ち同等型プレキャスト鉄筋コンクリート構造設計指針(案)・同解説、日本建築学会、2002
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針(案)・同解説、日本建築学会、1999
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、日本建築学会、2010
- 4) 岡村甫、前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則、技報堂出版、1991