

論文 水平つなぎ筋を有する RC 造プレキャストコア壁におけるせん断スパン比の影響

仲地 唯治*1・レー フィ ホアン*2

要旨：建設時の工期短縮，省力化のためにプレキャスト化が有効な方法である。そこで，RC 造コア壁を柱形に分割し，柱部材間の接合面にコッターを設け，接合筋を配筋せず，水平つなぎ筋で一体化することによってフルプレキャスト化した場合について，高圧縮力が作用する圧縮端部近傍を模擬した壁柱による水平加力実験を行った。実験の結果，水平つなぎ筋量，コッター数が異なる場合の，せん断スパン比が壁柱の構造性能に与える影響が明らかとなった。

キーワード：鉄筋コンクリート，コア壁，プレキャスト，水平つなぎ筋，コッター，拘束，せん断スパン比

1. はじめに

近年，建設業における労働力不足が深刻化しており，超高層建物の建設において，建設時の工期短縮，省力化のためにプレキャスト化が有効であると考えられる。超高層建物の連層耐震壁をプレキャスト化した例に関しては，向出ら¹⁾が断面両端部をプレキャスト化した壁柱について曲げせん断実験を実施し，構造性能を検討している。毛利ら²⁾は，隅角部及び先端部をプレキャスト化したコ型 PCaPC 造コア壁について静的交番載荷実験を実施している。また，中澤ら³⁾は両側端部にプレキャスト柱型を有する RC コアウォールについて性能確認実験を実施している。

一方，著者らは RC 造コア壁を全長さフルプレキャスト化した場合の構造性能を検討するため，コア壁の圧縮端部近傍を模擬したプレキャスト壁柱による水平加力実験を行った⁴⁾。壁柱のプレキャスト化は，壁柱を柱形に分割し，柱部材間の接合面にコッターを設けグラウトを充填する方法とした。柱部材間の接合には建設時の施工性を考慮し，鉛直接合部に分散して配筋する接合筋ではなく，床レベル等に集中配筋する水平つなぎ筋を用いた。

本研究では，これに対し，せん断スパン比が異なる場合の水平加力実験を実施し，水平つなぎ筋量，コッター数が異なる場合の，せん断スパン比が構造性能に与える影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体

図-1 に試験体の形状，配筋を示す。また，表-1，表-2 にコンクリート及び鉄筋の材料試験結果を示す。試験体は 25 階程度の超高層建物を想定した実大の約 1/8 のモデルで，コア壁の圧縮端部近傍壁板を模擬した長方形断面の壁柱試験体 PC2, PC3, PC4⁴⁾ (せん断スパン比 2.4) 及び PCS2, PCS3, PCS4 (同 1.4) の計 6 体である。

壁柱断面 $b \times D = 90 \text{mm} \times 405 \text{mm}$ ，コンクリート調合強度 60N/mm^2 ，最大骨材寸法 5mm ，軸力比 $\sigma_0 / \sigma_B = 0.2 (\sigma_0 = N/A, N: \text{軸力}, A: \text{断面積}, \sigma_B: \text{コンクリート圧縮強度})$ とした。

いずれの試験体も，正方形断面のプレキャスト柱を 4 本並べ，柱間は 7mm とし，深さ 6mm で平滑な面のコッターを設け，調合強度 80N/mm^2 のグラウトを充填した。2 階(PC2, PC3, PC4 においては 3 階も)の床部分はコンクリート後打ちとし，水平つなぎ筋を配筋した。また，1 階柱を 1 階中央高さ付近で 2 分割し，分割した上下柱間の部分を，2 階の床部分と同様にコンクリート後打ちとし，水平つなぎ筋を配筋した。水平つなぎ筋は後配筋で，両端主筋に水平つなぎ筋の両端フックを掛けるのが困難であるため，両端 180° フックとし，2 本一組で向い合せにして(フック部重ね長さ 87mm)試験体側面より主筋内側に差し込んだ。主筋は通し配筋，グラウトは流し込みで，グラウト充填性向上のため，試験体作製は横打ちとした。

主筋は D10(SD345)を用い，帯筋には高強度鉄筋 U5.1 (1300N/mm^2 級)を用い，ピッチを 55mm とした。水平つなぎ筋は，PC3, PCS3 では D6(SD345)を，その他の試験体では D10(SD345)を用いた。いずれの試験体もかぶり厚さは 6mm である。

PC3 は水平つなぎ筋を D6 とし，PC2 の D10 に対し，水平つなぎ筋量を 0.45 倍に減じ，水平つなぎ筋量の影響を検討した。

PC4 は PC2 に対し，コッター数を減じ，コッター数の影響を検討した。プレキャスト柱間，すなわち鉛直接合部あたりのコッター数は，PC2, PC3 では，1 階下半分，1 階上半分，2 階部分でそれぞれ 3 個，3 個，4 個の計 10 個である。これに対し PC4 ではそれぞれ 1 個で計 3 個とし，PC2 に対し 0.3 倍の個数とした。

PCS2, PCS3, PCS4 はそれぞれ PC2, PC3, PC4 に対し 2 階部分を省き，せん断スパン比を 2.4 から 1.4 に減じ，せん断スパン比の影響を検討した。

*1 福井工業大学 工学部建築土木工学科教授 博士 (工学) (正会員)

*2 TSUCHIYA 株式会社

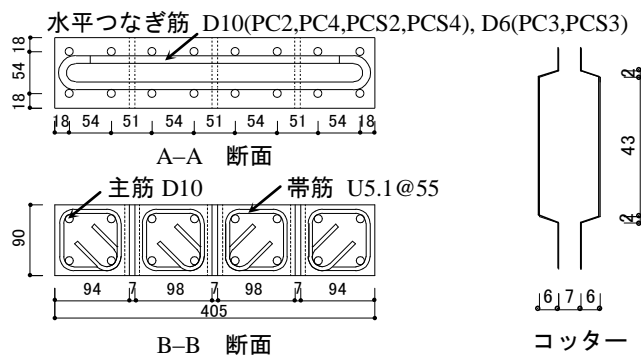
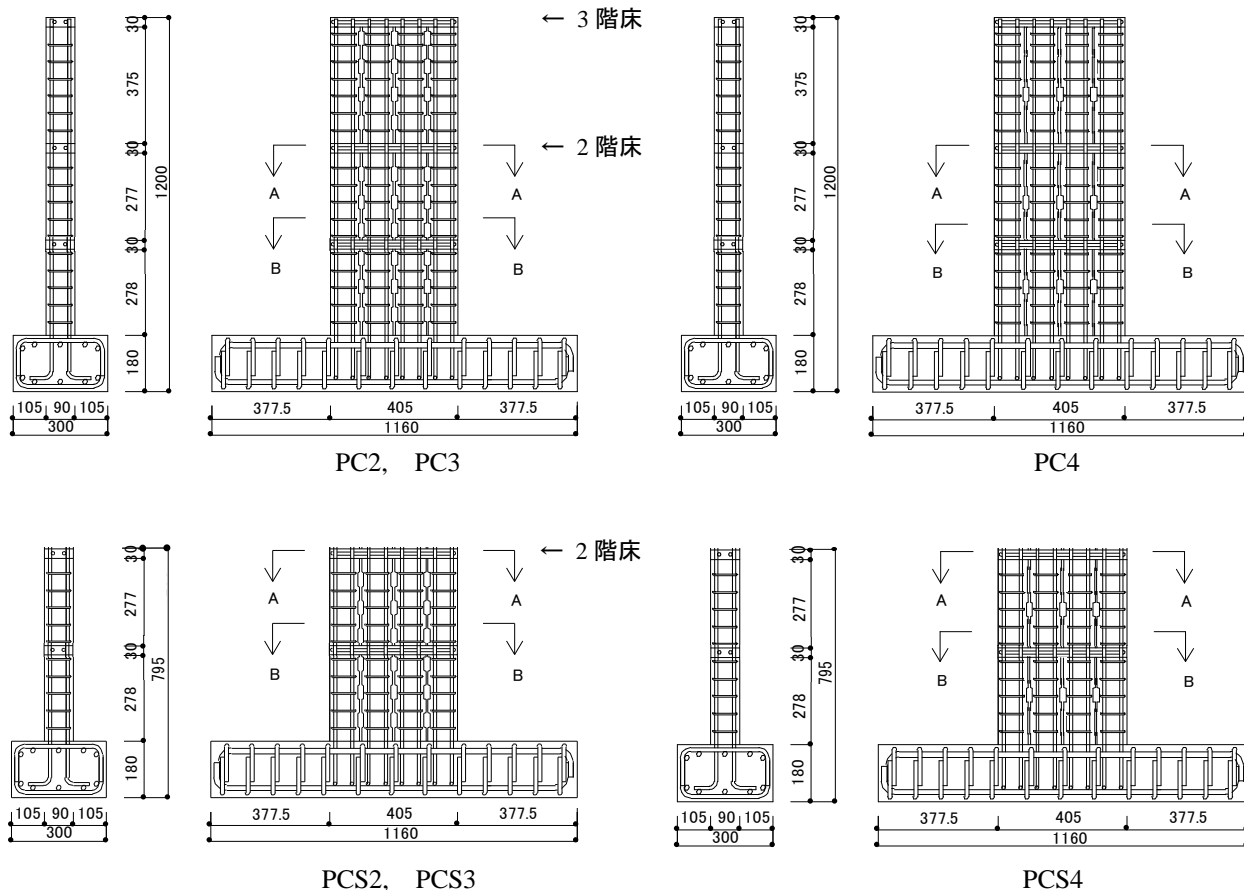


図-1 試験体配筋図

2.2 実験方法

図-2 に加力装置を示す。加力は一定軸力下における正負交番繰返し加力とした。試験体の下端を加力フレームに固定し、キャンチレバー型で水平力を作用させた。図中、試験体左側より水平ジャッキで押す場合を負加力とした。正加力は、試験体右側に設置したピン支承及びPC鋼棒を介して、水平ジャッキで引くことにより载荷した。すなわち、試験体にとっては右側を押すこととなる。ただし、試験体をPC鋼棒で締め付けることがないようにして载荷した。

軸力は試験体上方の油圧ジャッキにより载荷し、軸力比0.2の定軸力(PC2~PC4, PCS2~PCS4でそれぞれ441kN, 474kN, 457kN, 444kN, 498kN, 499kN)とした。試験体上面には、各柱部材の上部の位置にピン支承を設け、鋼板を介して油圧ジャッキにより軸力を加えた。加力は2階床レベル高さ(PC2~PC4: 615mm, PCS2~PCS4: 565mm)での変位制御とし、部材角1/1000(rad.) (1回), 2, 5, 7.5, 10, 15, 20/1000 (各2回), 30/1000 (1回)における正負交番繰返し加力とした。変位計で各区間の伸縮量、プレキャスト試験体における柱部材間の目開き及びずれを、また、箔ゲージで帯筋、水平つなぎ筋、及び主筋のひずみを計測した。

3. 実験結果

3.1 破壊状況

図-3 にひび割れ状況を示す。PC2~PC4, PCS2のいずれも2/1000までに、また、PCS3, PCS4では1/1000までにそれぞれ曲げひび割れが試験体下部に発生した。PC2~PC4では5/1000までに、PCS2~PCS4では2/1000までにコッター部にせん断ひび割れが発生し、進展した。圧縮側脚部においては、PC2~PC4, PCS3では5/1000までに、PCS4では7.5/1000までに、PCS2では10/1000までにコンクリートの圧壊(縦ひび割れ)が発生した。

7.5/1000以降、PC2以外ではコッター部のせん断破壊、

表-1 コンクリートの材料試験結果

試験体		圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 ($\times 10^4$ N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
PC2	プレキャスト部	60.6	2.63	2.75
	後打ち部	58.7	2.65	2.13
	グラウト	91.7	3.24	4.85
PC3	プレキャスト部	65.1	2.97	2.92
	後打ち部	59.1	2.77	3.00
	グラウト	92.1	2.89	6.59
PC4	プレキャスト部	62.7	2.96	2.47
	後打ち部	68.1	2.94	2.38
	グラウト	100.1	3.29	5.71
PCS2	プレキャスト部	60.9	2.98	2.67
	後打ち部	56.5	2.67	2.27
	グラウト	96.7	3.51	5.64
PCS3	プレキャスト部	68.3	3.33	3.33
	後打ち部	73.8	3.41	3.89
	グラウト	101.3	3.55	5.76
PCS4	プレキャスト部	68.4	3.21	2.90
	後打ち部	61.1	2.94	2.98
	グラウト	102.5	3.80	5.00

表-2 鉄筋の材料試験結果

呼び名	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 ($\times 10^5$ N/mm ²)	伸び (%)
D10	397	577	1.85	18.5
U5.1	1368	1491	2.11	9.3
D6	409	553	1.83	20.1

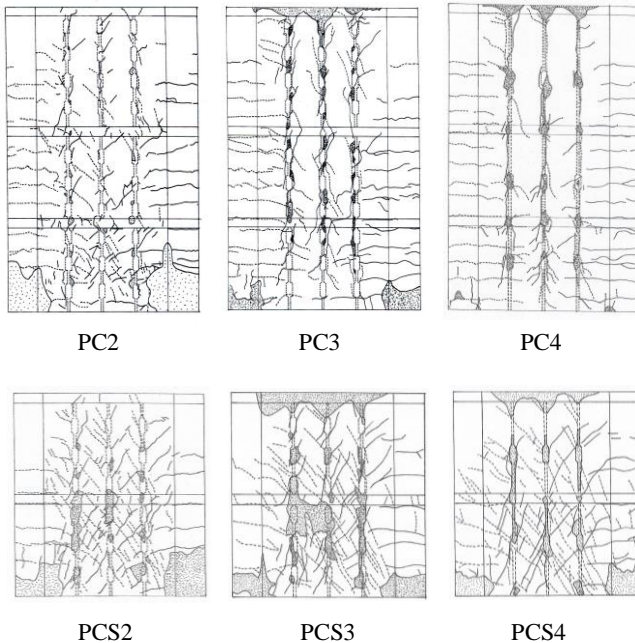
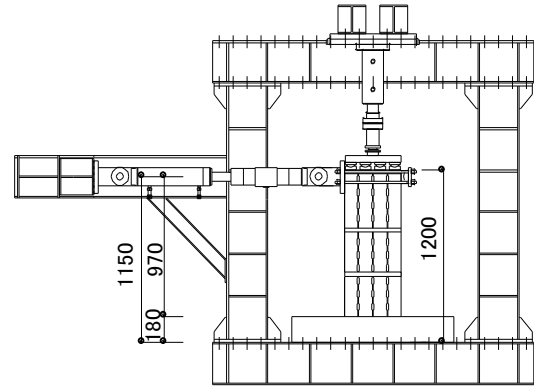


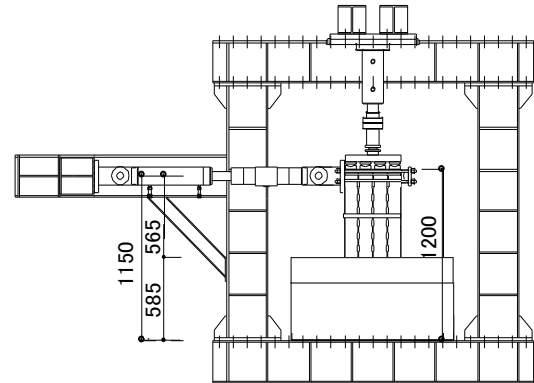
図-3 ひび割れ状況（最終状況）

すなわち、コッター部せん断ひび割れの進展、ひび割れ幅の拡大、さらには、コッターのグラウトおよび周辺コンクリートの剥落が生じた。また、PC4 以外では、脚部のコンクリート圧壊（かぶりコンクリートの剥落）が生じている。

主筋の降伏については、PC3、PCS4 では 5/1000 までに、PC2、PCS2、PCS3 では 7.5/1000 までに、PC4 では 15/1000 までに正加力時に最外縁圧縮主筋が圧縮降伏(降伏ひずみ 2146 μ)した。引張側に関しては、PC2、PC3 では 15/1000 までに、PC4 では 20/1000、PCS2 では 30/1000 までに最外縁引張主筋が引張降伏し、PCS3、PCS4 では



PC2, PC3, PC4



PCS2, PCS3, PCS4

図-2 加力装置

引張降伏はみられなかった。なお、いずれの試験体も、最終の部材角に至るまで軸力を保持していた。

3.2 荷重-変形関係

図-4に荷重-変形関係を示す。また、表-3に最大荷重を示す。PC2の最大荷重は正加力において20/1000で、負加力において15/1000で生じた。正負とも、最終の30/1000のサイクルの30/1000に近いあたりでやや低下した。PCS2の最大荷重は正負とも15/1000で生じた。正負とも20/1000から低下し始めた。

PC3の最大荷重は正負とも10/1000で生じ、15/1000から低下し始め、20/1000で大きく低下した。20/1000では最大耐力の80%以下の荷重となり、加力を終了した。PCS3の最大荷重は正加力において15/1000で、負加力において7.5/1000で生じた。正加力時は20/1000から、負加力時は15/1000から低下し始めた。

PC4の最大荷重は正負とも7.5/1000で生じ、10/1000から低下し始めた。20/1000では最大耐力の80%以下の荷重

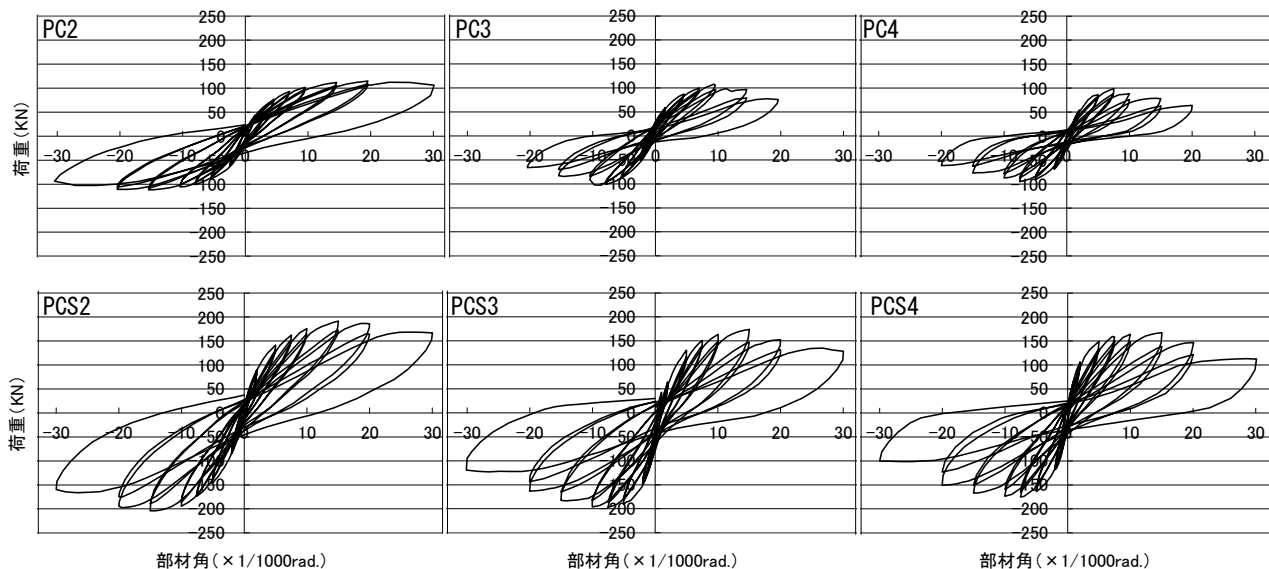


図-4 荷重-変形関係

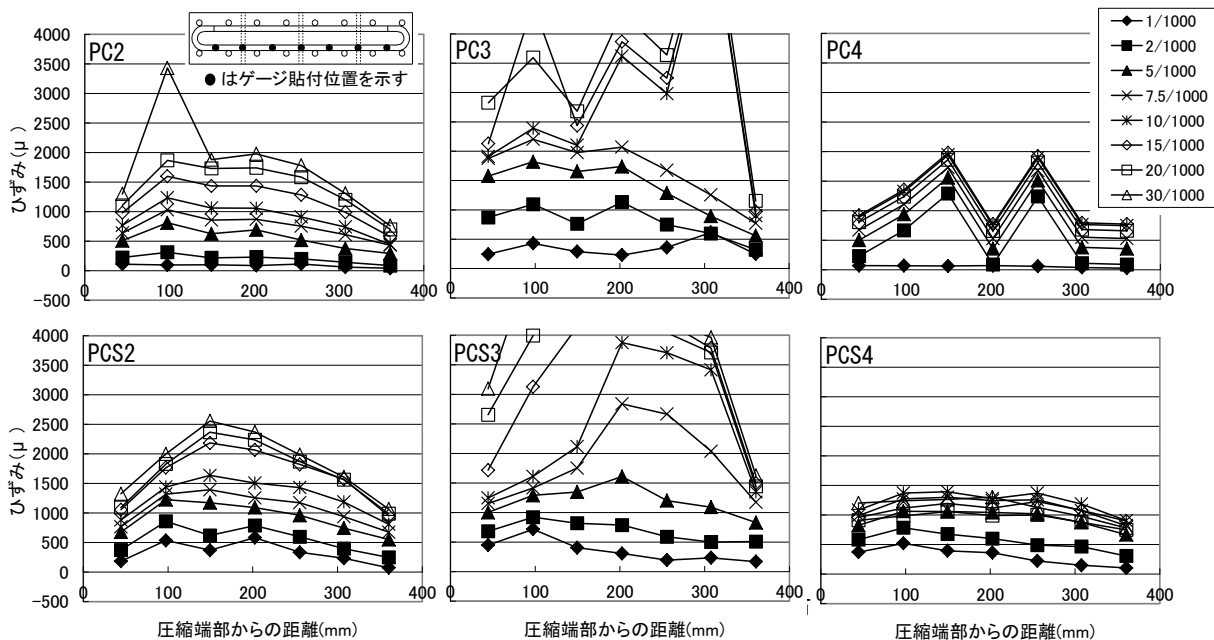


図-5 水平つなぎ筋のひずみ分布

となり、加力を終了した。PCS4の最大荷重は正加力において15/1000で、負加力において7.5/1000で生じた。正負とも20/1000から顕著に低下し始めた。

3.3 水平つなぎ筋のひずみ分布

図-5に試験体PC2~PC4, PCS2~PCS4の正加力時における水平つなぎ筋ひずみ分布を示す。PC3は2階床高さ、その他は1階中央高さでのひずみ分布で、いずれもひずみ分布中の最大ひずみが各試験体中で最も大きい高さでの分布である。鉄筋は、水平つなぎ筋量の少ないPC3, PCS3ではD6(SD345,降伏ひずみ4229 μ , 0.2%オフセット)で、その他の試験体はD10(SD345,降伏ひずみ2146 μ)である。

PC2では、30/1000に達すると圧縮端部より93mmの

点でひずみが降伏ひずみ(2146 μ)を超え、急激に増大している。PC2では30/1000のサイクルの最終付近において耐力がやや低下しており、降伏によるものと考えられる。PCS2では15/1000で圧縮端部から149.5mmの点で降伏ひずみを超えている。最終ひび割れ状況では、1階中央高さレベルの後打ちコンクリート部においてコンクリート破壊部が水平つなぎ筋のひずみが大きい位置と一致している。各部材角でのひずみはせん断スパン比2.4のPC2よりも大きく、鉛直接合部破壊に対応している。

PC3では、10/1000で圧縮端部より307.5mmの測定点でひずみが降伏ひずみ(4229 μ)を超え、急激に増大している。荷重-変形関係では、15/1000, 20/1000のサイクル

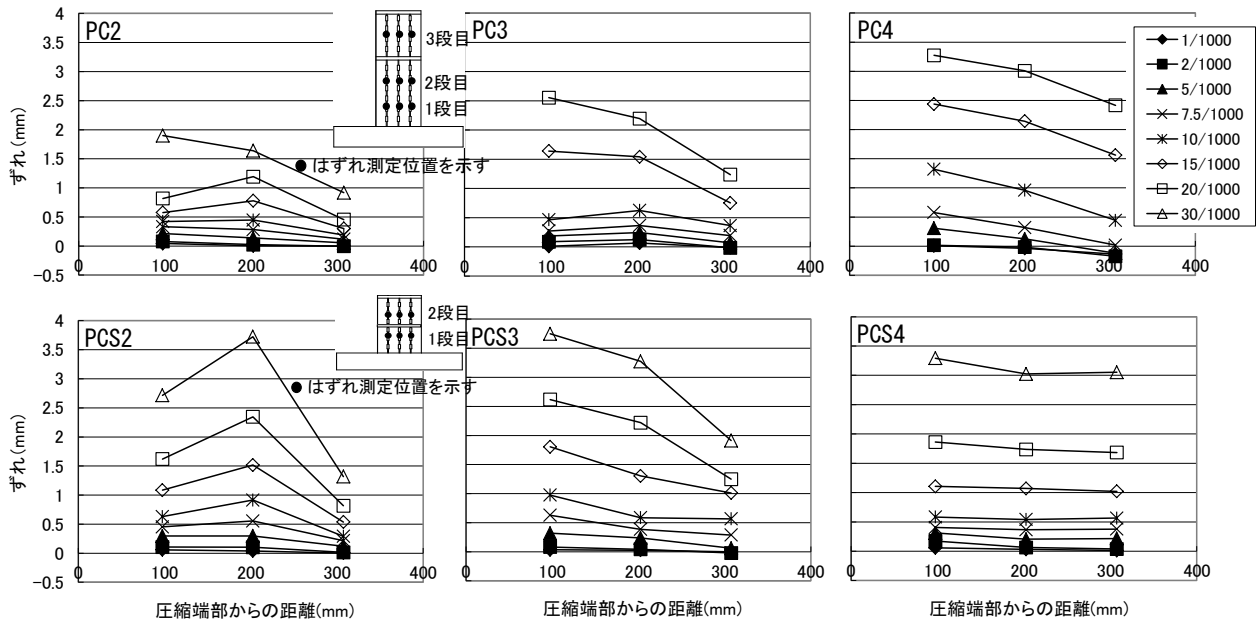


図-6 ずれの水平方向分布

で耐力が大きく低下しており、水平つなぎ筋の降伏に対応していると考えられる。PCS3では、15/1000において202.5mmの点で降伏している。20/1000以降さらに増大し、荷重低下に対応していると考えられる。PC3、PCS3とも降伏が顕著で、水平つなぎ筋量が少ないためであると考えられる。せん断スパン比2.4のPC3の方がより早い段階で降伏し、早い段階での耐力低下に対応している。

PC4では、最終の20/1000に至るまで降伏ひずみ(2146 μ)に達していない。コッター数が少ないPC4では、コッター部の破壊に伴いプレキャスト柱の一体性が弱まり、10/1000より耐力が低下し始めた。そのため、水平つなぎ筋の付着作用低下に伴う柱の一体化効果の低下により、降伏にも至らなかったと考えられる。コッター数が少ないせん断スパン比1.4のPCS4も、PC4と同様、最終の20/1000に至るまで降伏していないが、各部材角での最大値はせん断スパン比2.4のPC4の方が大きく、PC4の、より早い段階での耐力低下に対応している。

3.4 鉛直接合部におけるずれの挙動

図-6に、正加力時のプレキャスト柱部材間の鉛直接合部におけるずれの水平方向分布を示す。ずれの測定位置は1段目(高さ170mm)、2段目(高さ415mm)、3段目(高さ805mm)で、柱部材間の鉛直方向相対変位を変位計で測定した。正加力時に鉛直接合部の圧縮端部側が、引張端部側よりも相対的に上方にずれる場合を正とした。PC2、PCS2、PCS3は1段目、PC3、PCS4は2段目、PC4は3段目の分布を示し、いずれも各分布中の最大値が各試験体中で最も大きい段での分布である。

PC2の最大値は6体のなかで最も小さく、1.9mmである。

6体中唯一、鉛直接合部せん断破壊が顕著でなかったことに対応し、ほぼ最終まで一体性が保たれたと考えられる。せん断スパン比2.4のPC2に対し1.4のPCS2では最大値が大きく3.7mmである。

水平つなぎ筋量の少ないPC3、PCS3の最大値はそれぞれ2.6mm、3.7mm、コッター数の少ないPC4、PCS4の最大値はいずれも3.3mmである。PC3とPCS3の各部材角におけるずれの値はほぼ同程度で、せん断スパン比2.4のPC3の最大値の方が小さいのは、最大荷重以降の耐力低下が大きく、20/1000で載荷を終了したためである。せん断スパン比2.4のPC4は1.4のPCS4に比べて、各部材角でのずれは大きく、PC4の、より早い段階での耐力低下に対応している。

4. 最大耐力

表-3に最大耐力を示す。水平耐力の計算は、既往の壁、壁柱の式が中間の全縦筋引張降伏を仮定し、本実験結果(降伏ひずみに対する、最大耐力時の両端を除く縦筋ひずみの平均値の比がPC2、PC3、PC4、PCS2、PCS3、PCS4でそれぞれ0.24、-0.004、0.01、0.21、-0.03、-0.02)と異なる為、表-3に示す既往の柱の曲げ耐力式を用いた。但し、ここでは両端部縦筋それぞれ5本のみを主筋とし、主筋すべてが降伏しているものとし、その他の縦筋は上記の通り、ひずみが降伏ひずみに比較して十分小さい為、すべて計算から除外している。実験値は計算値に対し、鉛直接合部の破壊により一体性の弱まったPC3、PC4、PCS3、PCS4では、それぞれ、11~15%、16~19%、8~19%、19~22%低い。一体性がほぼ保たれたPC2では

表-3 最大耐力

(単位:kN)

試験体	水平耐力			鉛直接合部耐力		
	実験値(負側)	計算値	実/計(負側)	作用せん断力A	せん断耐力B	B/A
PC2	114.8(111.5)	115.7	0.99(0.96)	374.6	415.7	1.11
PC3	107.8(103.5)	121.2	0.89(0.85)	392.5	342.2	0.87
PC4	99.3(95.3)	118.3	0.84(0.81)	383.1	246.5	0.64
PCS2	191.5(204.0)	199.4	0.96(1.02)	389.3	261.5	0.67
PCS3	173.8(197.3)	214.9	0.81(0.92)	419.6	218.3	0.52
PCS4	167.3(175.3)	215.1	0.78(0.81)	420.0	168.9	0.40

水平耐力計算値 P_{NU} : 文献⁵⁾(4.7.e)式による $P_{NU}=M_u/H$, H: 加力点高さ $M_u=0.5a_g\sigma_{y_g}D+0.5ND(1-N/(bDF_c))$ a_g : 柱主筋全断面積 σ_y : 鉄筋降伏点強度, g_1 : 引張筋重心と圧縮筋重心との距離の全せいに対する比, D: 柱断面せいN: 柱軸方向力, b: 柱断面幅, F_c : コンクリート圧縮強度鉛直接合部作用せん断力: $P_{NU}H_w/L_w$ H_w : 壁柱高さ, L_w : 両端柱中心間距離鉛直接合部せん断耐力: 文献⁶⁾(9.3)式による $Q_{DV}=0.10F_c\cdot A_{gc}+\sigma_y\sum a_v$ F_c : ジョイントコンクリートの設計基準強度, A_{gc} : 鉛直接合部のシャコッターの鉛直断面積の和 σ_y : コッター筋の降伏点強度, $\sum A_v$: 鉛直接合部のコッター筋断面積

1に近い値となった。鉛直接合部のせん断破壊が認められるものの、上記のように縦筋引張ひずみの大きかったPCS2もやや1に近い値となった。計算値に対する実験値の比率は、正負の平均で比較すると、せん断スパン比による差はほとんどみられない。

鉛直接合部耐力についても表-3に示す式を用いた。ただし、せん断耐力を求める際、水平つなぎ筋量を接合筋量とみなした。鉛直接合部破壊が顕著なせん断スパン比1.4のPCS2はせん断耐力が作用せん断力を下回り、顕著な破壊のなかったせん断スパン比2.4のPC2ではせん断耐力が上回った。すなわち、せん断スパン比の違いにより、せん断耐力と作用せん断力の大小関係が逆転し、異なる破壊形式となったと考えられる。水平つなぎ筋量の少ないPC3とPCS3、コッター数の少ないPC4とPCS4はいずれもせん断耐力が作用せん断力を下回った。先に述べた破壊状況では、これらの試験体は鉛直接合部でせん断破壊が顕著であったことから、計算結果は破壊形式に対応していると考えられる。作用せん断力に対するせん断耐力の比は、PC3とPCS3がそれぞれ0.87、0.52、PC4とPCS4がそれぞれ0.64と0.40となり、せん断スパン比の大きい方が大きな比率となった。せん断破壊後はいずれも低いせん断力負担となり、PC3、PC4の方が破壊前後のせん断力負担の差が大きく、荷重-変形関係における最大耐力後の荷重低下が大きかったと考えられる。

5. 結論

RC造コア壁をフルプレキャスト化した場合の構造性能を検討するため、せん断スパン比の異なる壁柱による水平加力実験を行い、以下のことが明らかとなった。

1) 十分な水平つなぎ筋とコッターが配置された場合に、鉛直接合部に接合筋がなくともプレキャスト柱の一体性が高まり、所定の耐力、靱性を確保できる。但し、せん断スパン比によっては、鉛直接合部のせん断破壊

により一体性が低下し、耐力、靱性の低下につながる。

2) 接合筋を用いずに水平つなぎ筋によりプレキャスト柱を一体化できた場合、水平耐力は既往の柱の曲げ耐力式でほぼ算定できる。

3) 水平つなぎ筋量の少ないPC3、PCS3においては、せん断スパン比の大きいPC3の水平つなぎ筋がより早い段階で降伏し、早い段階での耐力低下に対応していた。

4) コッター数の少ないPC4、PCS4では、せん断スパン比の大きいPC4の方が各部材角での鉛直接合部のずれは大きく、早い段階での耐力低下に対応していた。

5) 鉛直接合部耐力に関しては、既往の耐力式による検討結果が破壊形式に対応していた。

参考文献

- 1) 向出静司, 古宮嘉之, 山本憲一郎, 益尾 潔: 鉛直接合部を介してプレキャスト部と現場打ち部を一体化したRC造壁柱の曲げせん断性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.805-810, 2003.7
- 2) 毛利浩他: コ型PCaPC造コア壁に関する実験的研究(その1, その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.805-808, 2007.8
- 3) 中澤春生, 大久保香織, 刑部 章, 淵本正樹: プレキャスト柱型を内蔵するRCコアウォールの耐力及び変形性能評価に関する実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.463-468, 2009.7
- 4) 仲地唯治: 水平つなぎ筋を有するRC造プレキャストコア壁の構造性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.39, pp.295-300, 2017.7
- 5) 日本建築学会: 建築耐震設計における保有耐力と変形性能, 1990
- 6) 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, 1982