

論文 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

仲地 唯治^{*1}

要旨：コア部分を RC 造連層耐震壁とした超高層建物において、地震時にコア壁に大きな軸力が作用する。一方、建設時の工期短縮、省力化のためにプレキャスト化が必要である。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、水平つなぎ筋の配筋位置、水平つなぎ筋量、コッター数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

1. はじめに

超高層建物で、コア部分を RC 造連層耐震壁とした時、L 形断面コア壁等、地震時にコア壁に大きな軸力が作用する場合がある。これに対しては、高軸力下におけるコア壁の靱性の確保が必要である。著者らはこれまでに、L 形断面コア壁の隅角部およびその近傍の壁板部分を模擬した試験体による圧縮実験及び水平加力実験を行い、コア壁の端部拘束性状が靱性に及ぼす影響を検討した¹⁾。

一方、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必要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²⁾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³⁾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⁴⁾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。

本研究では 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。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。

実験パラメーターは、水平つなぎ筋の配筋位置、水平つなぎ筋量、コッター数とし、それらが壁柱の構造性能に与える影響について検討した。また、一体打ちの壁柱試験体を作製し、プレキャスト試験体との比較検討を行った⁵⁾。

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の最下層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プレキャスト壁柱試験体 PC1～PC4 の 4 体及び一体打ち壁柱試験体 1 体の計 5 体である。

いずれも、壁柱断面は $b \times D = 90\text{mm} \times 405\text{mm}$ で、コンクリート調合強度を 60N/mm^2 、軸力比 $\sigma_0/\sigma_B = 0.2$ ($\sigma_0 = N/A$, N : 軸力, A : 断面積, σ_B : コンクリート圧縮強度) とした。比較的階数の少ない超高層を想定し、主筋は D10 (SD345) を用いた。帯筋には高強度鉄筋 U5.1 (1300N/mm^2 級) を用い、ピッチを 55mm 、余長 41mm ($8d$, d : 鉄筋径) とした。一体打ち試験体 PC0 の横筋には D6 (SD345) を用い、ピッチは帯筋と同じ 55mm とした。水平つなぎ筋は、プレキャスト試験体 PC1, PC2, PC4 では D10 (SD345) を、PC3 では D6 (SD345) をそれぞれ用いた。いずれの試験体もかぶり厚さは 6mm で、試験体作製にあたっては横打ちとした。

プレキャスト試験体 PC1 は、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、3 階の床部分はコンクリート後打ちとし、水平つなぎ筋 (D10) 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試験体側面より主筋内側に差し込んだ。主筋は通し配筋とし、グラウトは流し込みである。

PC2 は PC1 に対しさらに 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、3 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 (D10) を配筋した。すなわち、PC1 に対し水平つなぎ筋の配筋

^{*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)

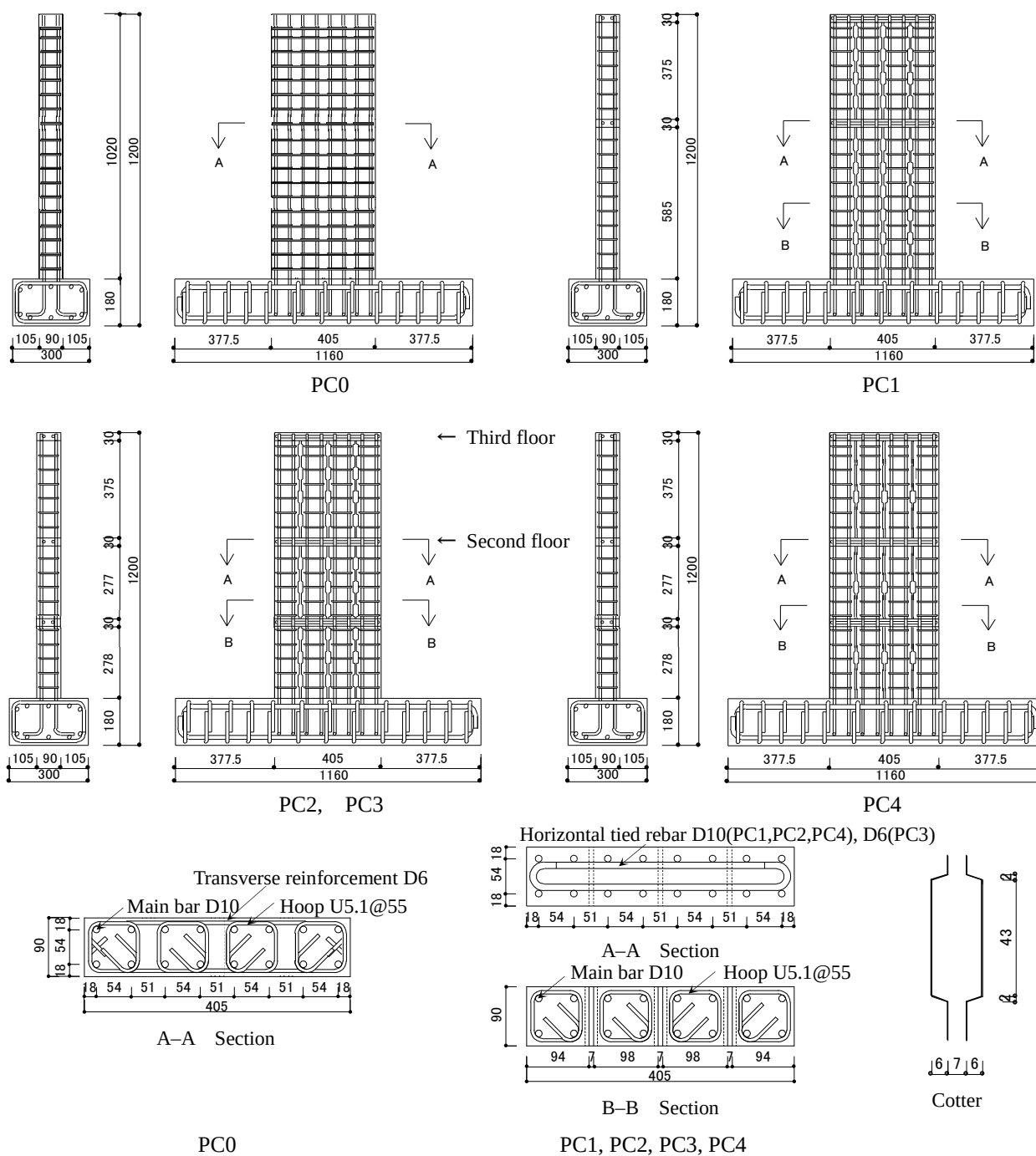


図-1 試験体配筋図

箇所を増し、本実験での標準試験体とした。

PC3はPC2に対し、水平つなぎ筋をD6として水平つなぎ筋量を0.45倍に減じ、構造性能に対する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、構造性能に対するコッター数の影響を検討した。プレキャスト柱間、すなわち一鉛直接合部あたりのコッター数は、PC2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。

2.2 実験方法

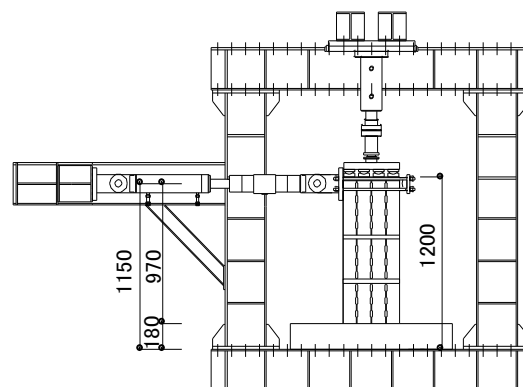
図-2に加力装置を示す。加力は一定軸力下における正負交番繰り返し加力とした。試験体の下端を加力フレームに固定し、キャンチレバー型で水平力を作用させた。図中、試験体左側より水平ジャッキで押す場合を負加力とした。正加力は、試験体右側に設置したピン支承及びPC鋼棒を介して、水平ジャッキで引くことにより載荷した。すなわち、試験体にとっては右側を押すこととなる。ただし、試験体をPC鋼棒で締め付けることがないようにして載荷した。

表－1 コンクリートの材料試験結果

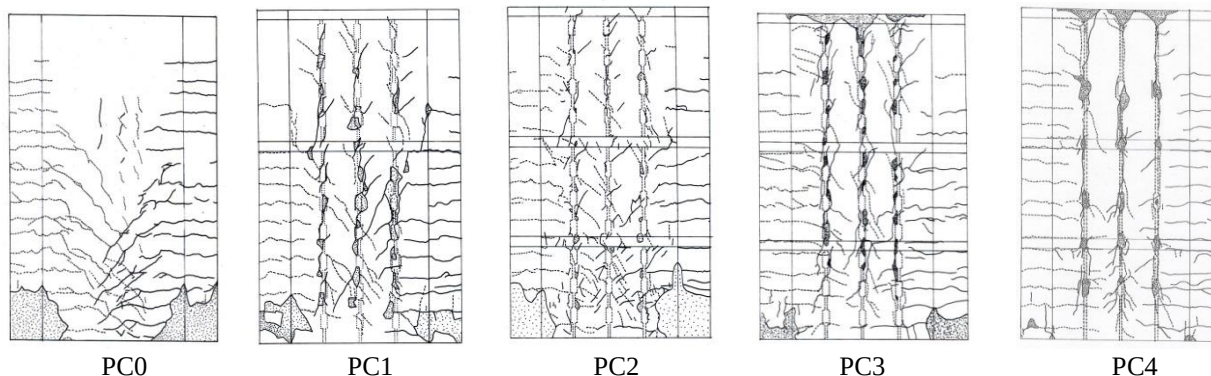
Specimen		Compressive strength (N/mm ²)	Young's modulus ($\times 10^4$ N/mm ²)	Spritz strength (N/mm ²)
PC0		67.4	2.91	2.57
PC1	Precast	67.0	2.94	2.45
	Latter	65.3	2.85	2.34
	Grout	89.6	2.89	6.08
PC2	Precast	60.6	2.63	2.75
	Latter	58.7	2.65	2.13
	Grout	91.7	3.24	4.85
PC3	Precast	65.1	2.97	2.92
	Latter	59.1	2.77	3.00
	Grout	92.1	2.89	6.59
PC4	Precast	62.7	2.96	2.47
	Latter	68.1	2.94	2.38
	Grout	100.1	3.29	5.71

表－2 鉄筋の材料試験結果

Bar size	Yield strength (N/mm ²)	Maximum strength (N/mm ²)	Young's modulus ($\times 10^5$ N/mm ²)	Elongation (%)
D10	397	577	1.85	18.5
U5.1	1368	1491	2.11	9.3
D6	409	553	1.83	20.1



図－2 加力装置



図－3 ひび割れ状況（最終状況）

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（PC0～PC4でそれぞれ491kN,488kN,441kN,474kN,457kN）とした。試験体上面には、プレキャスト試験体PC1～PC4の各柱部材の上部の位置にピン支承を設け、また、一体打ち試験体PC0においてもプレキャスト試験体と同じ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(615mm)での変位制御とし、部材角1/1000(rad.)（1回）、2/1000、5、7.5、10、15、20、（各2回）、30/1000（1回）における正負交番繰り返し加力とした。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、横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。いずれの試験体も、

2/1000までに曲げひび割れが試験体下部に発生し、5/1000までに曲げせん断ひび割れが発生した。圧縮側脚部では5/1000までに、コンクリートの圧壊（縦ひび割れ）が発生した。プレキャスト試験体PC1～PC4では、5/1000までにコッター部にせん断ひび割れが発生し、進展した。

7.5/1000以降、標準試験体PC2に対し水平つなぎ筋の配筋箇所が少ないPC1、水平つなぎ筋量の少ないPC3、コッター数の少ないPC4では、コッター部のせん断破壊、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。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、PC0、PC1、PC3では5/1000までに、PC2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、PC0では7.5/1000までに、PC1、PC2、PC3では15/1000までに、PC4では20/1000までに最

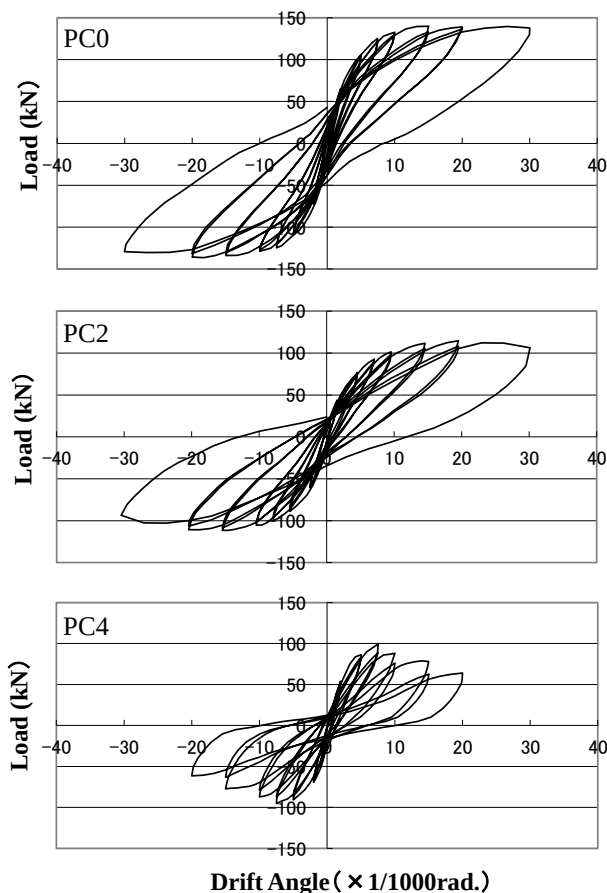


図-4 荷重－変形関係

外縁引張主筋が引張降伏した。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。

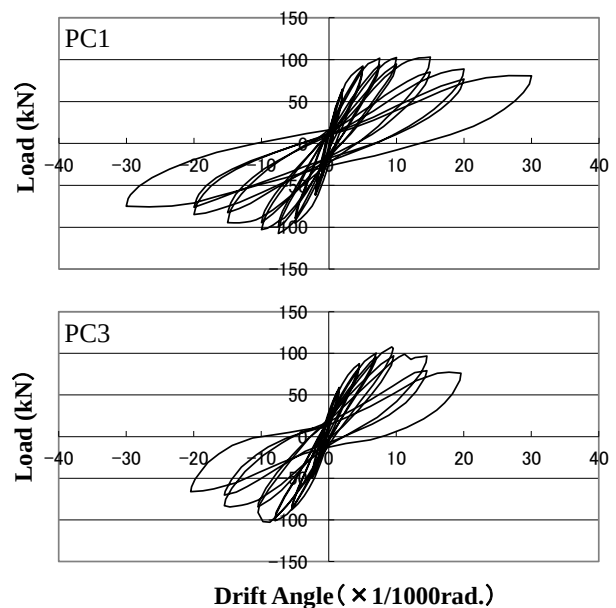
一体打ち試験体PC0と、プレキャスト試験体で最も一体性の高いと考えられる標準試験体PC2の破壊状況を比較すると、5/1000における曲げひび割れの進展状況は、上方及び中央寄りへの進展はいずれも一体打ちのPC0の方が顕著であった。一方、PC2は鉛直接合部のコッター部において、せん断ひび割れが発生、進展している。

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。PC0の最大荷重は正加力時において15/1000で、負加力時において20/1000で生じた。最終の30/1000のサイクルにおいて、正側ではほとんど荷重は低下せず、負側ではわずかに低下した。

PC1では、最大荷重は正加力時において15/1000で、負加力時において7.5/1000で生じた。正側では20/1000以降、負側では10/1000以降、荷重がやや低下した。PC2の最大荷重は正加力時において20/1000で、負加力時において15/1000で生じた。正側、負側とも、最終の30/1000のサイクルの30/1000に近いあたりで荷重がやや低下した。

PC3の最大荷重は正加力時において10/1000で、負加力時において10/1000で生じた。正負加力時とも15/1000から耐力が低下し始め、20/1000で大きく耐力が低下した。



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。PC4の最大荷重は正加力時において7.5/1000で、負加力時においても7.5/1000で生じた。正負加力時とも10/1000から耐力が低下し始めた。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。

3.3 水平つなぎ筋のひずみ分布

図-5に、プレキャスト試験体PC1～PC4の正加力時の水平つなぎ筋ひずみ分布を示す。PC2とPC4は1階中央高さ、PC1とPC3は2階床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。

PC1では、20/1000に達すると圧縮端部より93mmの点、すなわち、圧縮端部の柱と2番目の柱の境界部における測定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。これは、PC1における20/1000以降の耐力低下に対応すると考えられる。すなわち、この境界部での水平つなぎ筋の降伏で両柱間の一体性が低下し、両柱間で独立した動きとなり、耐力が低下したものと考えられる。

PC2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。

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を超え(両面のひずみがそれぞれ6213 μ , 5756 μ)、急激に増大している。また、15/1000では圧縮端部より97.5mmの点(同1614 μ , 7385 μ)、20/1000では圧縮端部より202.5mmの点(同3553 μ , 5183 μ)で降伏し、後者2点は曲げ成分が大きい。荷重－変形関係では、15/1000、20/1000のサイクルで耐力が大きく低下し、ま

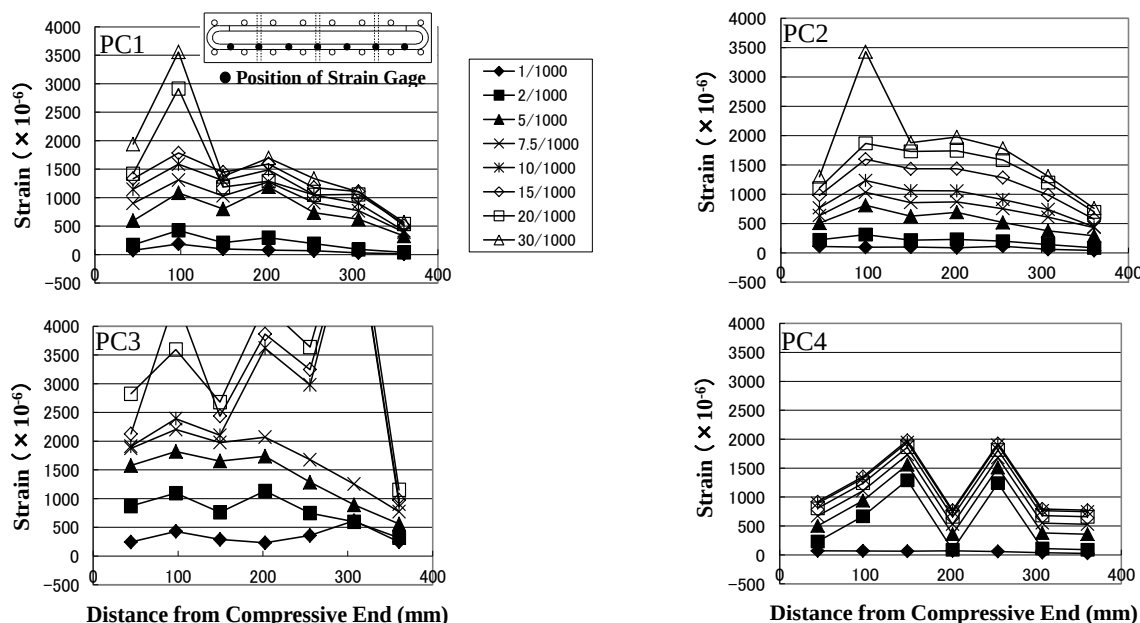


図-5 水平つなぎ筋のひずみ分布

た、後述のように、ずれの水平方向分布において、圧縮側及び中央部で15/1000、20/1000においてずれが大きく増大している。これらのずれの増加は水平つなぎ筋の降伏に対応していると考えられる。

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。他のプレキャスト試験体に比べてコッター数が0.3倍と少ない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、他のプレキャスト試験体に比べて、プレキャスト柱の一体化に対する水平つなぎ筋の効果が少なく、降伏にも至らなかったと考えられる。

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階柱上部（高さ415mm）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。

PC1では、水平方向で比較すると、圧縮端部に近いほどずれは大きい傾向にある。圧縮端部側では、最終的に30/1000で3.9mmとなった。PC2においては、圧縮端部側と引張端部側でずれが大きく、中央部では小さい。20/1000から30/1000にかけて圧縮端部側および中央部で大きく増大し、30/1000では圧縮端部側が最も大きくなり、最大値は1.5mmとなった。

PC3とPC4の水平方向分布はPC1とほぼ同様で、圧縮端部に近いほどずれは大きい傾向にある。PC3は、10/1000までと比べ15/1000から大きく増大し、圧縮端部側で、最終的に20/1000で2.6mmとなった。PC4は、7.5/1000から20/1000にかけて大きく増大し、圧縮端部側で、最終的に

20/1000で2.6mmとなった。

4試験体を比較すると、PC2が特に小さい。これは、PC2において、4本のプレキャスト柱を一体化するために十分な水平つなぎ筋量と鉛直接合部におけるコッターを有していたためと考えられる。これに対し、PC1、PC3、PC4のずれが大きい理由として、PC1は1階中央高さに水平つなぎ筋が配筋されていない、PC3は水平つなぎ筋量がPC2に対して0.45倍と少ない、PC4は鉛直接合部におけるコッター数がPC2に対して0.3倍と少ない、ことが考えられる。

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 PC0, PC1, PC2, PC3, PC4 でそれぞれ 0.33, 0.09, 0.24, -0.004, 0.01）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、一体打ちの PC0 は 10～13%高い。鉛直接合部の破壊により一体性の弱まった PC1, PC3, PC4 では、それぞれ、13～17%, 11～15%, 16～19%, 低い。一体性がほぼ保たれた PC2 では 1 に近い値となった。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。作用せん断力は、鉛直接合部破壊の顕著であった PC1, PC3, PC4 ではせん断耐力計算値を上回り、顕著な破壊のなかった PC2 ではせん断耐力計算値まで達しなかった。

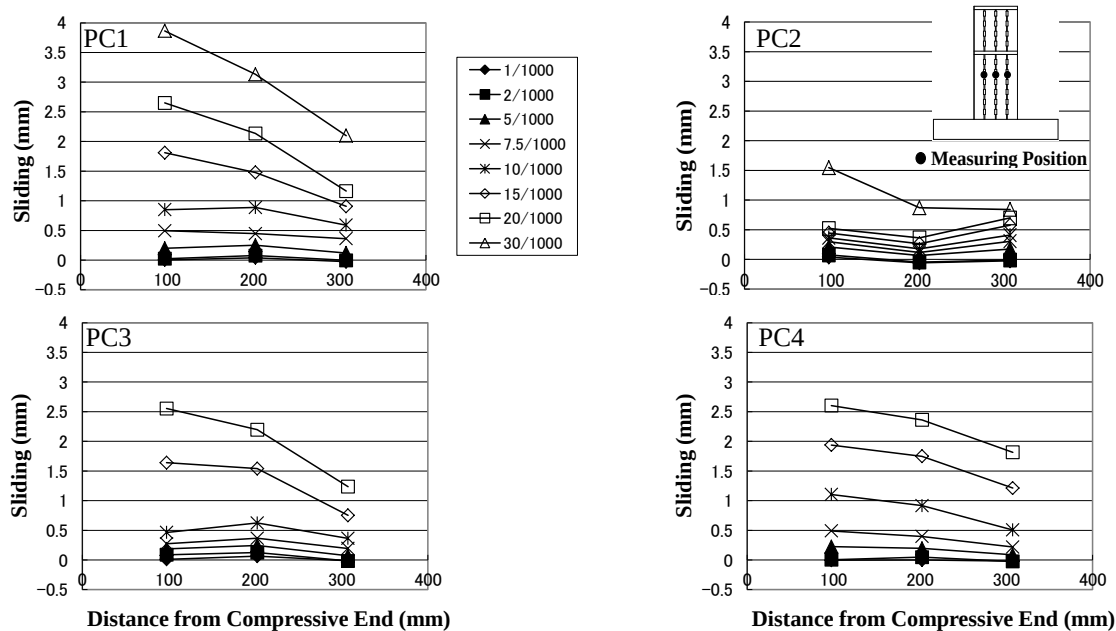


図-6 ずれの水平方向分布

表-3 最大耐力

unit(kN)

Specimen	Horizontal strength			Strength of vertical joint	
	Exp. load	Cal. load	Exp./Cal.	Shear force	Shear strength
PC0	139.8(136.5)	124.0	1.13(1.10)	—	—
PC1	103.0(107.5)	123.5	0.83(0.87)	399.9	384.9
PC2	114.8(111.5)	115.7	0.99(0.96)	374.6	415.7
PC3	107.8(103.5)	121.2	0.89(0.85)	392.5	342.2
PC4	99.3(95.3)	118.3	0.84(0.81)	383.1	246.5

Cal. Load of horizontal strength P_{NU} : References[6]

$P_{NU} = M_u/H$, H: Height of loading

$M_u = 0.5a_g \sigma_y g_1 D + 0.5ND(1-N(bDF_c))$

Shear force of vertical joint: $P_{NU}Hw/Lw$ Hw: Height of wall column

Lw: Distance between centers of both side columns

Shear strength of vertical joint: References[7] Equation(9.3) $Q_{DV} = 0.10F_c \cdot A_{sc} + \sigma_y \Sigma A_v$

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、プレキャスト壁柱による水平加力実験を行った。実験の結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 充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。
- 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した場合、水平耐力は既往の柱の曲げ耐力式でほぼ算定できる。
- 3) 水平つなぎ筋を所定の量配筋することで、鉛直接合部のずれが 1.9mm 以下となり、プレキャスト柱間の一体性をほぼ保つことができる。
- 4) 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。
- 5) 水平つなぎ筋の配筋箇所が少ない時、水平つなぎ筋量が少ない時、鉛直接合部のコッター数が少ない時、鉛直接合部でずれが増大、せん断破壊してプレキャスト柱が独立した挙動を示し、耐力、靱性が低下する。

参考文献

- 1) 仲地唯治, 徳永諒太: 鉄筋コンクリート造コア壁の端部拘束効果に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.379-384, 2011.7
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 仲地唯治: 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.35, pp.391-396, 2013.7
- 6) 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
- 7) 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