

水平つなぎ筋を有する RC 造プレキャストコア壁の鉛直接合部における軸力の影響*

仲地 唯治^{*1}Effect of Axial Load on Vertical Joint of Precast Reinforced Concrete Core Wall
with Horizontal Tied RebarsTadaharu NAKACHI^{*1}^{*1} Faculty of Engineering, Department of Architecture and Civil Engineering

Precast core walls in high-rise buildings are effective for construction because they can be built more quickly than cast-in-place core walls. In this study, lateral loading test results were analyzed on wall columns simulating the corner and the area near the corner of an L-shaped core wall with horizontal tied rebars. The specimen consisted of four square-section precast columns. The vertical joints between the precast columns were grouted with high-strength mortar. Each precast column had cotters at the vertical joint, and horizontal tied rebars were concentrated at the second and third floor levels, and the mid height level of the first story. Based on the results of lateral loading tests, the effect of axial load on vertical joint was clarified.

Key Words : Reinforced Concrete, Core Wall, Precast, Horizontal Tied Rebar, Cotter, Axial Load

1. はじめに

建設業における労働力不足の深刻化に対し、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として、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 造コア壁を端部だけでなく全体を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。

また、同様のプレキャスト壁柱試験体により、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⁵⁾。

本研究では、これらに対し、軸力が異なる場合の水平加力実験を実施し、せん断スパン比が異なる場合の、軸力が構造性能に与える影響について検討した。

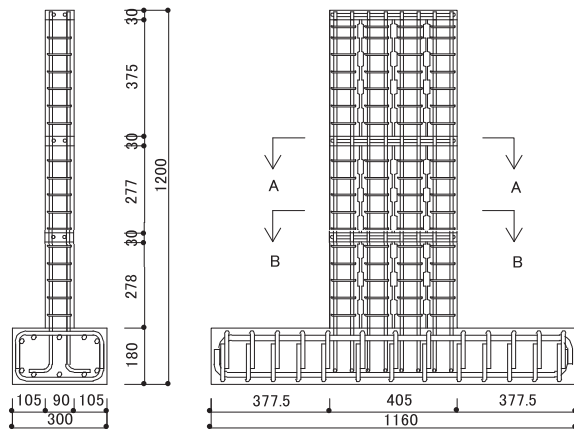
2. 実験概要

2.1 試験体

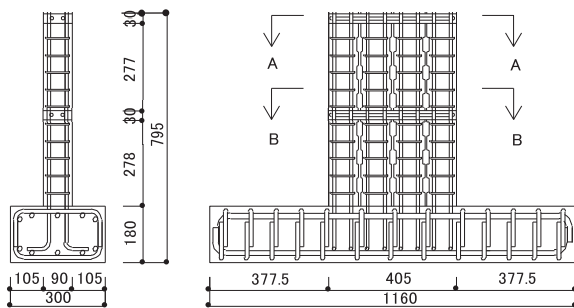
Fig.1 に試験体の形状、配筋を示す。また、Table 1, Table 2 にコンクリート及び鉄筋の材料試験結果を示す。試

* 原稿受付 2021 年 4 月 28 日

^{*1} 工学部 建築土木工学科
E-mail: nakachi@fukui-ut.ac.jp



PC3, PC5



PCS3, PCS5

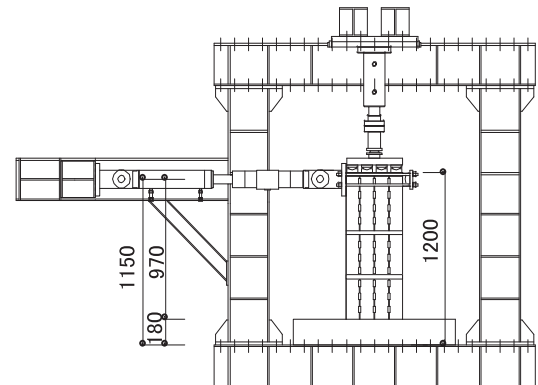
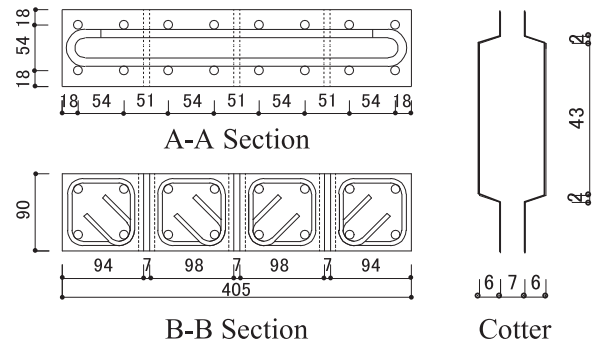


Fig. 2 Loading System

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PC3⁴⁾、PC5（せん断スパン比2.4）及びPCS3⁵⁾、PCS5（同1.4）の計4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 である。軸力は、PC3及びPCS3では軸力比 $\sigma_0/\sigma_B = 0.2$ ($\sigma_0 = N/A$, N :軸力, A :断面積, σ_B :コンクリート圧縮強度)、PC5及びPCS5では $\sigma_0/\sigma_B = 0.005$ 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(PC3, PC5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。

水平つなぎ筋は後から配筋し、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、2本一組の向い合せで(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、柱間 7mm に対しグラウトの粘性が高く、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D6(SD345)を用いた。いずれの試験体もかぶり厚さは 6mm である。

2.2 実験方法

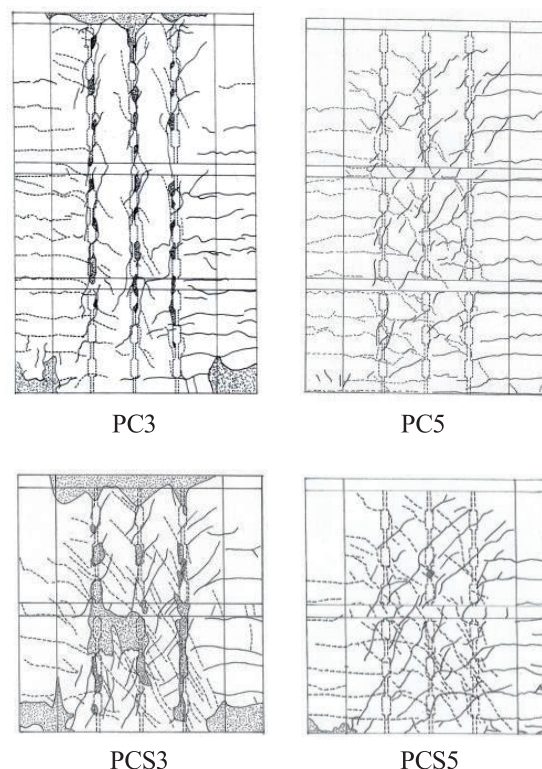
Fig.2に加力装置を示す。加力は一定軸力下における正負交番繰り返し加力とした。試験体の下端を加力フレームに固定し、キャンチレバー型で水平力を作用させた。図中、試験体左側より水平ジャッキで押す場合を負加力とした。正加力は、試験体右側に設置したピン支承及びPC鋼棒を介して、水平ジャッキで引くことにより载荷した。すなわち、試験体にとっては右側を押すこととなる。ただし、試験体をPC鋼棒で締め付けることがない

Table 1 Physical Properties of Concrete

Specimen		Compressive Strength (N/mm ²)	Young's Modulus ($\times 10^4$ N/mm ²)	Split Strength (N/mm ²)
PC3	Precast	65.1	2.97	2.92
	Latter	59.1	2.77	3.00
	Grout	92.1	2.89	6.59
PC5	Precast	54.0	2.69	2.09
	Latter	57.6	2.69	2.40
	Grout	96.1	3.26	5.32
PCS3	Precast	68.3	3.33	3.33
	Latter	73.8	3.41	3.89
	Grout	101.3	3.55	5.76
PCS5	Precast	66.1	3.19	2.87
	Latter	65.3	2.86	2.57
	Grout	106.8	3.51	5.67

Table 2 Physical Properties of Steel

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


Fig. 3 Crack Patterns

ようにして載荷した。

軸力は試験体上方の油圧ジャッキにより載荷し、PC3 及び PCS3 では軸力比 0.2 の定軸力（PC3、PCS3 でそれぞれ 474kN, 498kN）とした。また、PC5 及び PCS5 では軸力比 0.005（10kN）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（PC3、PC5 : 615mm、PCS3、PCS5 : 565mm）での変位制御とし、部材角 1/1000(rad.)（1 回）、2/1000(rad.)、5/1000(rad.)、7.5/1000(rad.)、10/1000(rad.)、15/1000(rad.)、20/1000(rad.)（各 2 回）、30/1000(rad.)（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、及び主筋のひずみを計測した。以下 1/1000 等の表記は部材角(rad.)を表す。

3. 実験結果

3.1 破壊状況

Fig.3 に最終ひび割れ状況を示す。PC3 では 2/1000 までに、PC5、PCS3、PCS5 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。PC3、PC5、PCS5 では 5/1000 までに、PCS3 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、PC3、PCS3 では 5/1000 までに、PC5 では 30/1000 までに、PCS5 では正加力で 15/1000、負加力で 20/1000 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、PC3、PCS3 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。一方、PC5、PCS5 ではコッター部のせん断ひび割れがやや進展したが、ひび割れ幅の顕著な増大や、コッター部コンクリートの破壊等は見られず、耐力はほとんど低下しなかった。

主筋の降伏については、PC3 では 5/1000 までに、PCS3 では 7.5/1000 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。PC5、PCS5 は圧縮降伏しなかった。引張側に関しては、PC3 では 15/1000 までに、PC5 では 20/1000、PCS5 では 10/1000 までに引張主筋が引張降伏し、PCS3 では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。

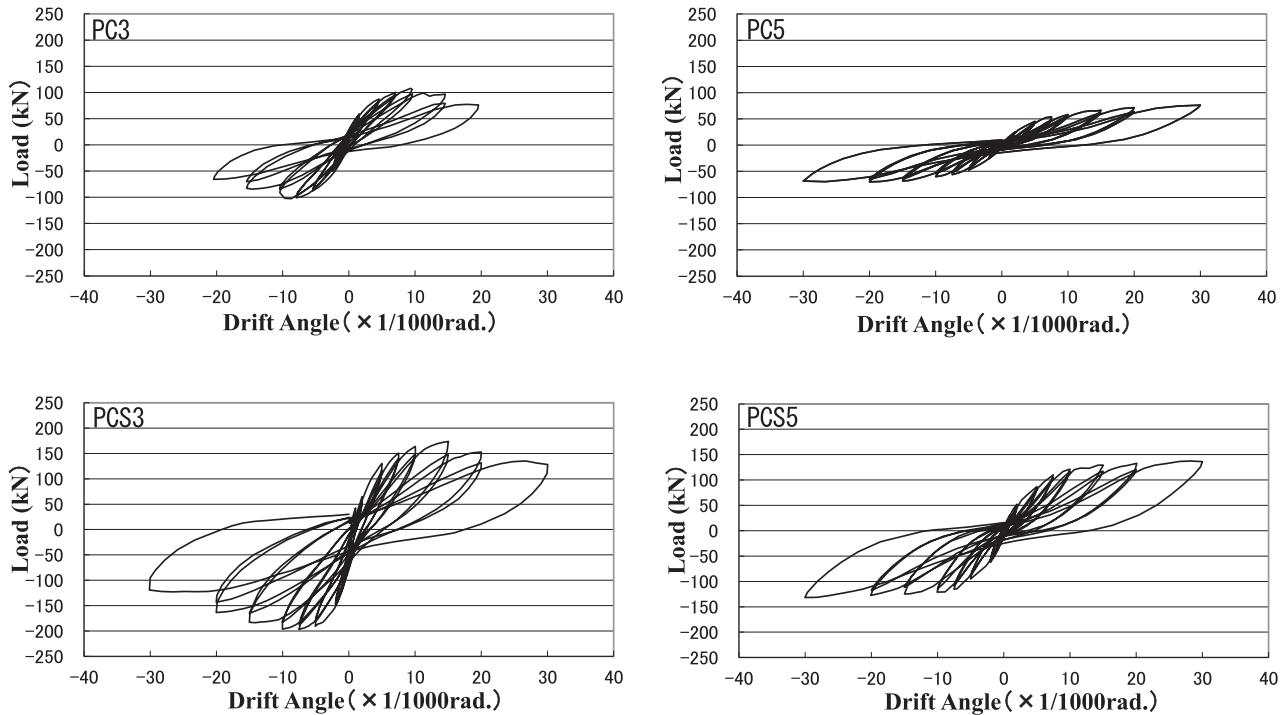


Fig. 4 Load - Deflection Curve

3.2 荷重－変形関係

Fig.4 に荷重－変形関係を示す．また，Table 3 に最大耐力を示す．表中（ ）内は負加力時の値を示す．軸力比 0.2 の場合，PC3 の最大荷重（正 107.8kN，負 103.5kN）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 では最大荷重の 80%以下の荷重となり，加力を終了した．PCS3 の最大荷重（正 173.8kN，負 197.3kN）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．

軸力比 0.005 の場合，PC5 の最大荷重（正 76.0kN，負 69.8kN）は正負加力時とも最終の 30/1000 で生じ，荷重は部材角とともに増大し続け低下しなかった．PCS5 の最大荷重（正 137.3kN，負 131.8kN）は正加力において 28.2/1000 で，負加力において 30/1000 で生じ，最終までほとんど耐力低下しなかった．軸力比によって比較すると，軸力比 0.2 の場合，いずれも最大荷重以降の荷重低下が見られるのに対し，軸力比 0.005 の場合，最終の 30/1000 に至るまで荷重低下はほとんど見られず，軸力による変形性能低下が明らかである．また，同じせん断スパン比に対して，軸力比 0.2 の方が，軸力比 0.005 に対して最大荷重は大きく，軸力比の影響は明らかである．

3.3 水平つなぎ筋のひずみ分布

Fig.5に，正加力時の各部材角における水平つなぎ筋のひずみ分布を示す．PC3，PC5は2階床高さ，PCS3，PCS5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，いずれもD6(SD345,降伏ひずみ4229 μ ，降伏点不明確のため0.2%オフセット)である．

軸力比 0.2 の場合，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，急激に増大している．これは水平荷重増加に伴うせん断力増大によると考えられ，降伏によりコッター部がせん断破壊し，荷重－変形関係では，15/1000 以降，耐力が大きく低下したと考えられる．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．

軸力比0.005の場合，PC5では，5/1000から7.5/1000までの部材角でのひずみの増大が顕著で，その後，30/1000まで同程度の割合で増大が続く．また，全体に引張端部側よりも圧縮端部側の方がひずみが大きい傾向にある．

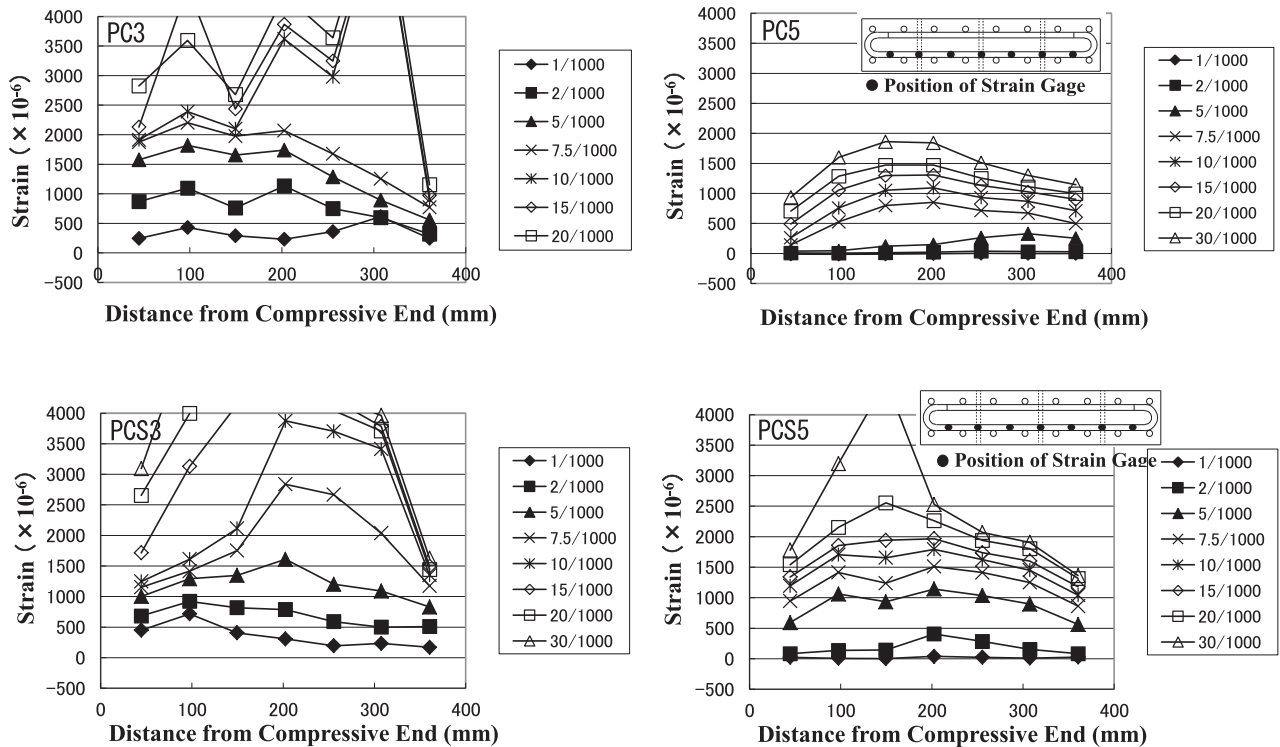


Fig. 5 Strain Distribution of Horizontal Tied Rebars

最終の30/1000に至るまで降伏していない。PCS5では、2/1000から5/1000までの部材角でのひずみの増大が顕著で、その後、30/1000まで同程度の割合で増大が続く。PC5と同様、全体に引張端部側よりも圧縮端部側の方がひずみが増大する傾向にある。但し、ひずみの増大に関してはPC5と異なり、20/1000において、圧縮端部より97.5mm, 149.5mm, 202.5mmの点でやや大きく増大し、30/1000において、149.5mmの点で降伏した。

軸力比によって比較すると、軸力比 0.2 の場合、PC3, PCS3 ではそれぞれ 10/1000, 15/1000 で降伏しているのに対し、軸力比 0.005 の場合、PC5 では降伏せず、PCS5 では最終の 30/1000 で降伏している。すなわち、軸力比の大きい方が明らかに小さい部材角で降伏しており、これは、同じ部材角では軸力比 0.2 の方がせん断力が増大するためと考えられ、荷重-変形関係において、軸力比 0.2 の場合、いずれも最大耐力以降の耐力低下が見られるのに対し、軸力比 0.005 の場合、最終の 30/1000 に至るまで耐力低下はほとんど見られなかったことに対応すると考えられる。

3.4 鉛直接合部の挙動

3.4.1 目開きの水平方向分布

Fig.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目開きの水平方向分布を示す。測定位置は 1 段目（高さ 170mm）、2 段目（高さ 415mm）、3 段目（高さ 805mm）で、柱部材間の水平方向相対変位を変位計で測定した。PC3, PC5 では 2 段目の最大値が、PCS3, PCS5 では 1 段目の最大値が各試験体中で最も大きく、図はそれらの段での分布を示している。

軸力比 0.2 の場合、PC3, PCS3 の最大値はそれぞれ 1.3 mm, 2.3mm である。せん断スパン比 1.4 の PCS3 の方が 2.4 の PC3 よりも全体的に目開きは大きい。

軸力比 0.005 の場合、PC5, PCS5 の最大値はそれぞれ 0.5mm, 1.4mm である。いずれも圧縮端部側の値の方が大きい傾向にあり、せん断スパン比 1.4 の PCS5 の方が 2.4 の PC5 よりも全体的に目開きは大きい。軸力比で比較すると、軸力比 0.2 の方が 0.005 の場合より大きい。

3.4.2 ずれの水平方向分布

Fig.7 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

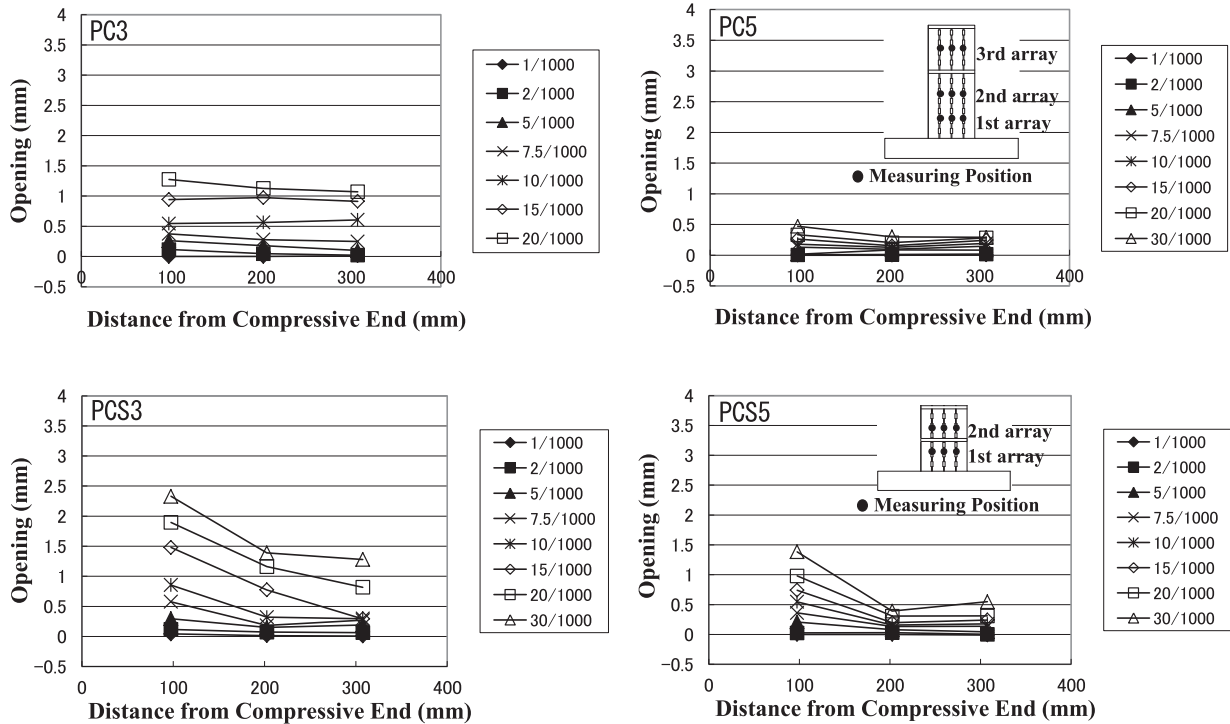


Fig. 6 Horizontal Distribution of Opening

は1段目（高さ170mm）、2段目（高さ415mm）、3段目（高さ805mm）で、目開きの測定位置と同じである。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。PC3では2段目の最大値が、PC5、PCS3、PCS5では1段目の最大値が各試験体中で最も大きく、図はそれらの段での分布を示している。

軸力比0.2の場合、PC3、PCS3の最大値はそれぞれ2.6mm、3.7mmである。いずれも圧縮端部側の値の方が大きい傾向にあり、せん断スパン比1.4のPCS3の方が2.4のPC3よりも全体的にずれは大きい。

軸力比0.005の場合、PC5、PCS5の最大値はそれぞれ0.4mm、1.0mmである。いずれも圧縮端部側の値の方が大きい傾向にあり、せん断スパン比1.4のPCS5の方が2.4のPC5よりも全体的にずれは大きい。

軸力比によって比較すると、軸力比0.2の場合のずれが軸力比0.005の場合より大きい傾向が明らかである。

3.5 最大耐力

Table 3に最大耐力を示す。水平耐力計算は、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（最大耐力時の両端を除く縦筋6段の内、降伏した段数がPC3、PC5、PCS3、PCS5でそれぞれ0段、2段、0段、4段）と異なる為、Table 3の既往の柱の曲げ耐力式を用いた。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、PCS3では、それぞれ11～15%、8～19%低い。一体性がほぼ保たれたPC5、PCS5ではそれぞれ58～72%、74～81%高い。鉛直接合部耐力はTable 3に示す式を用い、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PC3、PCS3で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軸力比の低いPC5、PCS5ではせん断耐力が上回った。

4. まとめ

RC造フルプレキャストコア壁における軸力の影響に関し、水平加力実験より以下のことが明らかとなった。

- 1) 軸力比が小さく、水平つなぎ筋が最終に至るまでほぼ降伏せず、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を上回った。
- 2) 軸力比の大きいPC3、PCS3は、小さい場合より水平つなぎ筋が早い段階で降伏し、各部材角での鉛直接合部

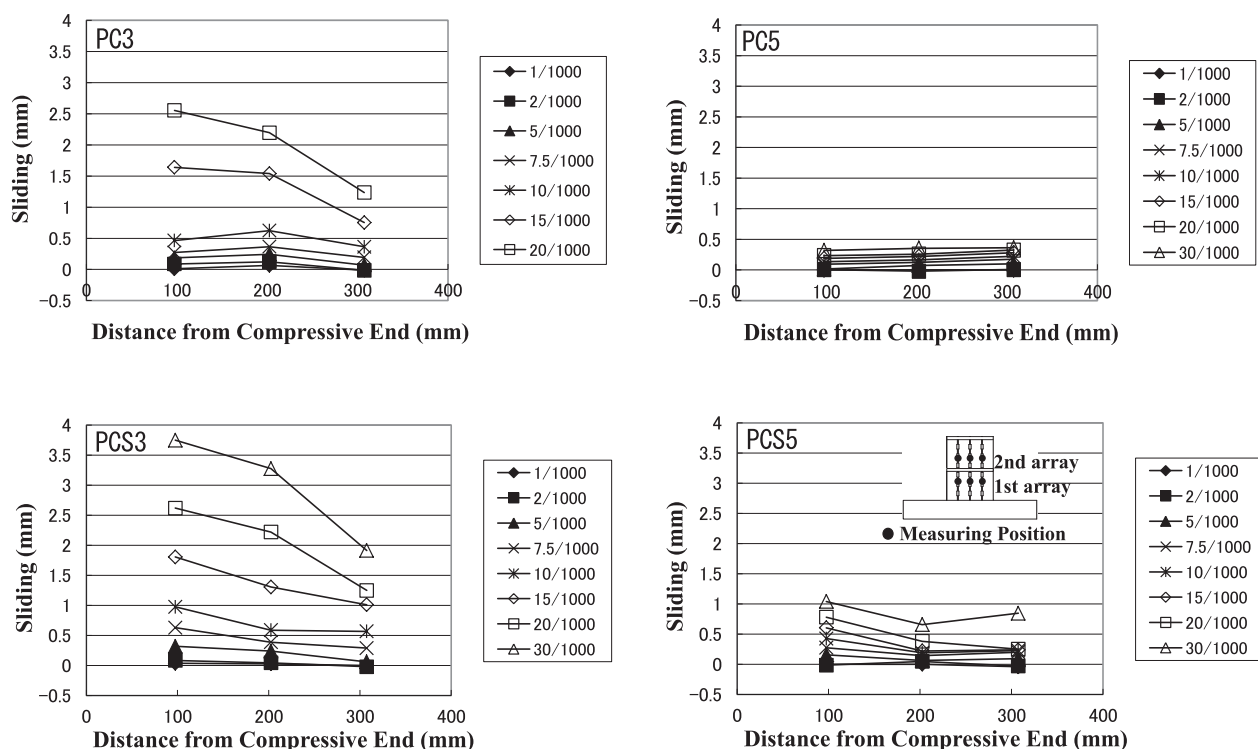


Fig. 7 Horizontal Distribution of Sliding

Table 3 Maximum Strength

unit(kN)

Specimen	Horizontal Strength			Strength of Vertical Joint	
	Exp. Load	Cal. Load	Exp./Cal.	Shear Force	Shear Strength
PC3	107.8(103.5)	121.2	0.89(0.85)	392.5	342.2
PC5	76.0(69.8)	44.1	1.72(1.58)	142.8	342.2
PCS3	173.8(197.3)	214.9	0.81(0.92)	419.6	218.3
PCS5	137.3(131.8)	75.7	1.81(1.74)	147.8	218.3

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: $P_{NU}H_w/L_w$ H_w : Height of Wall Column

L_w : Distance between Centers of Both Side Columns

Shear Strength of Vertical Joint: REFERENCES ⁽⁷⁾ Equation(9.3) $Q_{DV}=0.10F_c \cdot A_{sc}+\sigma_y \Sigma a_v$

の目開き及びずれは大きく、早い段階での耐力低下に対応した。

3) 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（せん断耐力と作用せん断力の大小関係）が破壊形式（鉛直接合部破壊の有無）に対応していた。

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) 仲地唯治他: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.41, pp.361-366, 2019.7
- 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

(2021 年 9 月 13 日受理)