

## 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コッター数の影響\*

仲地 唯治<sup>\*1</sup>, 高岡 颯汰<sup>\*2</sup>

### Effect of Number of Cotters on Vertical Joint of Precast Reinforced Concrete Core Wall with Horizontal Tied Rebars

Tadaharu NAKACHI<sup>\*1</sup> and Sota TAKAOKA<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup> Faculty of Engineering, Department of Architecture and Civil Engineering

In the core wall system in high-rise buildings, precast core walls 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 number of cotters on vertical joint was clarified.

**Key Words :** Reinforced Concrete, Core Wall, Precast, Horizontal Tied Rebar

#### 1. はじめに

超高層建物において、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<sup>1)</sup>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<sup>2)</sup>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<sup>3)</sup>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<sup>4)</sup>。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<sup>5)</sup>。

本研究では、これら著者らの実施した一連の水平加力実験に対し、コッター数が異なる場合の水平加力実験結果を検討し、せん断スパン比が異なる場合の、コッター数が構造性能に与える影響について検討した。

#### 2. 実験概要

\* 原稿受付 2022 年 4 月 28 日

<sup>\*1</sup> 工学部 建築土木工学科

<sup>\*2</sup> 社会システム専攻 大学院生

E-mail: nakachi@fukui-ut.ac.jp

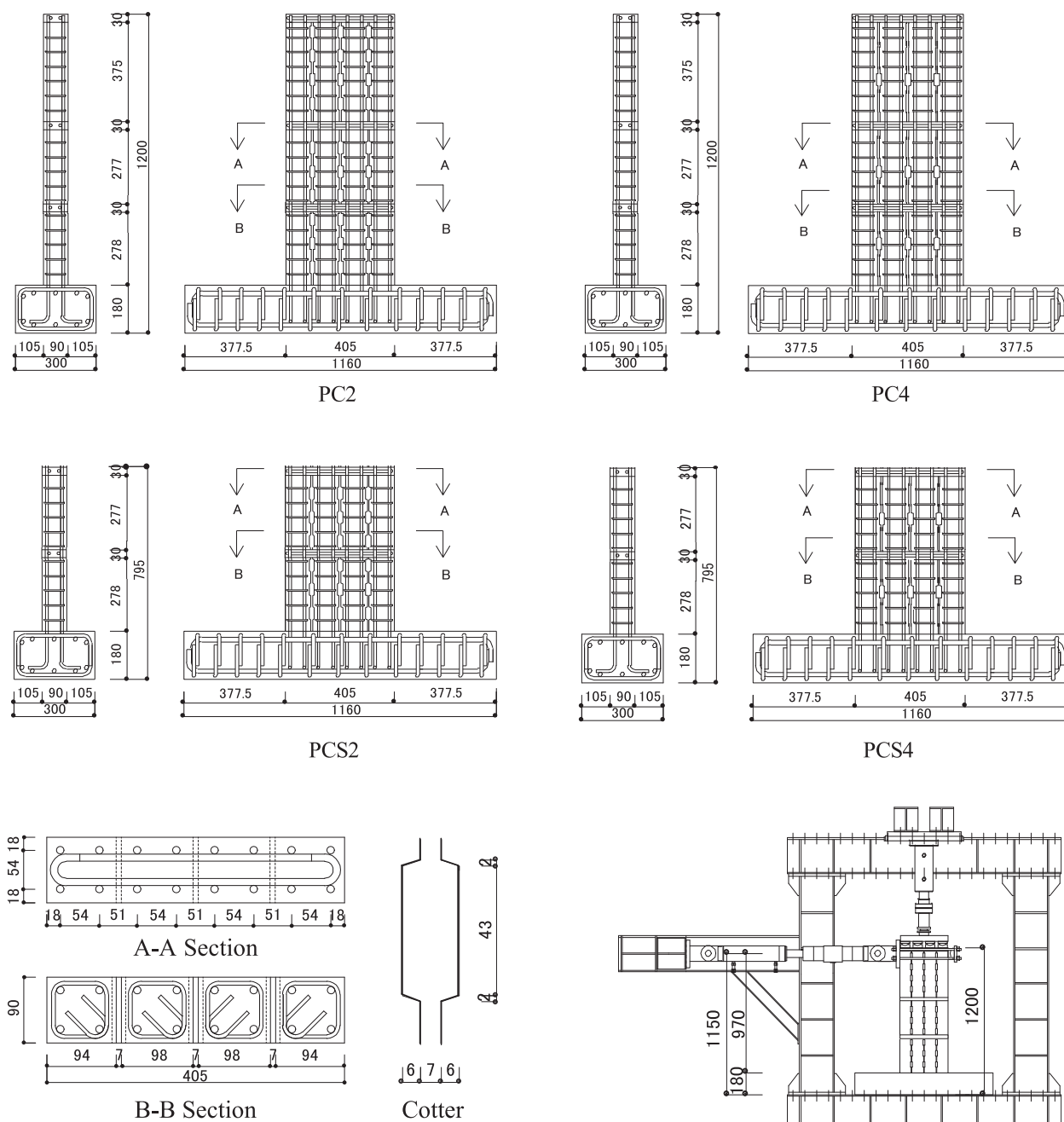


Fig. 1 Test Specimen

Fig. 2 Loading System

## 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<sup>4)</sup>、PC4（せん断スパン比2.4）及びPCS2<sup>5)</sup>、PCS4（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 $60\text{N/mm}^2$ 、最大骨材寸法 $5\text{mm}$ である。軸力は、いずれも軸力比 $\sigma_0/\sigma_B = 0.2$  ( $\sigma_0 = N/A$ ,  $N$ :軸力,  $A$ :断面積,  $\sigma_B$ :コンクリート圧縮強度)とした。

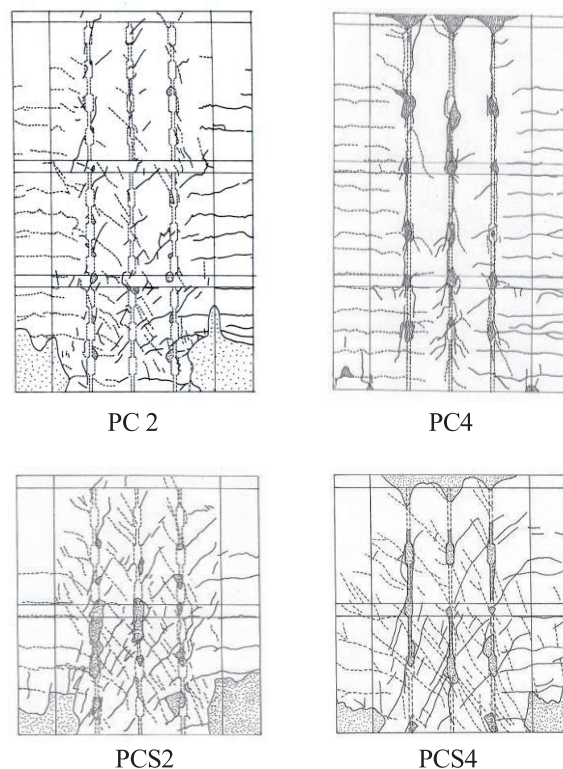
いずれの試験体も、正方形断面のプレキャスト柱を4本並べ、柱間は $7\text{mm}$ とし、深さ $6\text{mm}$ で平滑な面のコッターを設け、調合強度 $80\text{N/mm}^2$ のグラウトを充填した。2階(PC2, PC4においては3階も)の床部分はコンクリート後打ちとし、水平つなぎ筋を配筋した。また、1階柱を1階中央高さ付近で2分割し、分割した上下柱間の部分を、2階の床部分と同様にコンクリート後打ちとし、水平つなぎ筋を配筋した。

**Table 1** Physical Properties of Concrete

Specimen		Compressive Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Young's Modulus ( $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> )	Split Strength (N/mm <sup>2</sup> )
PC2	Precast	60.6	2.63	2.75
	Latter	58.7	2.65	2.13
	Grout	91.7	3.24	4.85
PC4	Precast	62.7	2.96	2.47
	Latter	68.1	2.94	2.38
	Grout	100.1	3.29	5.71
PCS2	Precast	60.9	2.98	2.67
	Latter	56.5	2.67	2.27
	Grout	96.7	3.51	5.64
PCS4	Precast	68.4	3.21	2.90
	Latter	61.1	2.94	2.98
	Grout	102.5	3.80	5.00

**Table 2** Physical Properties of Steel

Bar Size	Yield Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Maximum Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Young's Modulus ( $\times 10^5$ N/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
D10	397	577	1.85	18.5
U5.1	1368	1491	2.11	9.3


**Fig. 3** Crack Patterns

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 (1300 N/mm<sup>2</sup>級)を用い、ピッチを55mmとした。水平つなぎ筋はD10(SD345)を用いた。いずれの試験体もかぶり厚さは6mmである。

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。同様に、PCS4はPCS2に対し、コッター数を減じ、一鉛直接合部あたりのコッター数は、PCS2では、1階下半分、1階上半分でそれぞれ3個、3個の計6個である。これに対しPCS4ではそれぞれ1個で計2個とし、PCS2に対し0.33倍の個数とした。

## 2.2 実験方法

Fig.2に加力装置を示す。但し、図はせん断スパン比 2.4 の PC2, PC4 の場合を示している。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らせた。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, 457kN, 444kN, 499kN)とした。試験体上面には、各柱部材の上部にピン支承を設け、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(PCS2, PCS4 : 565mm, PC2, PC4 : 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、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。

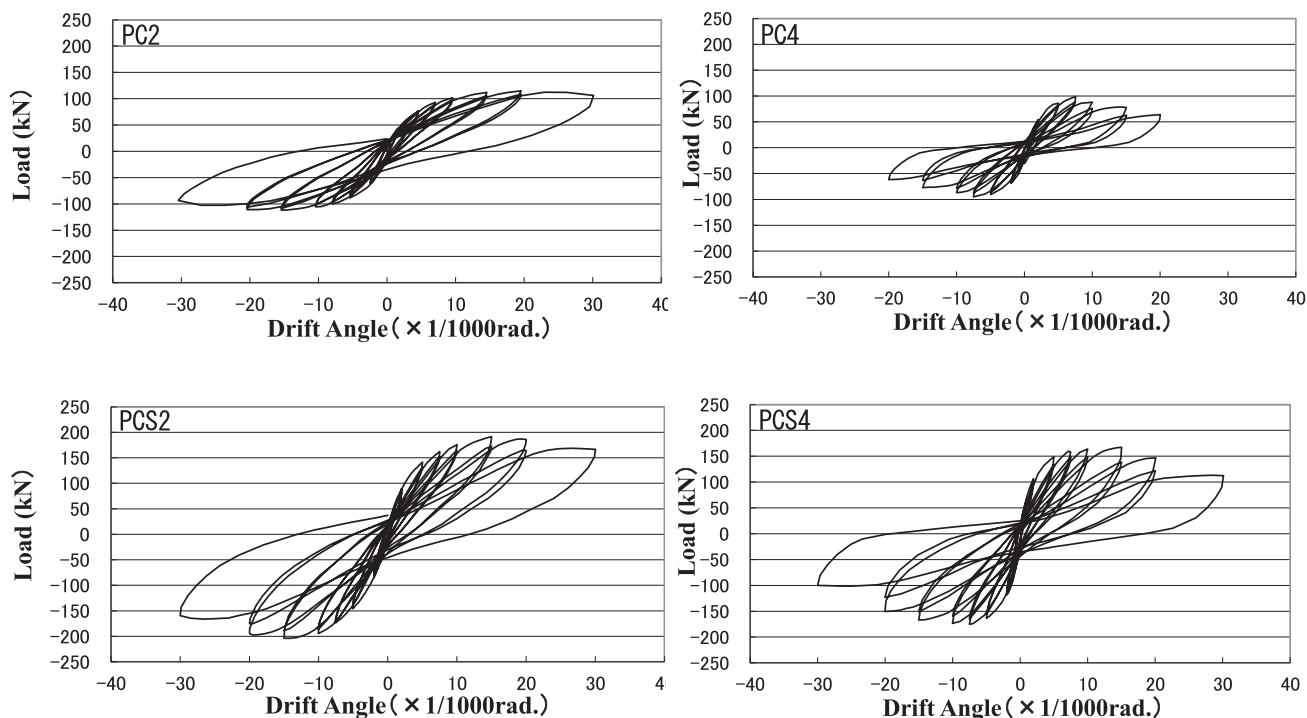


Fig. 4 Load - Deflection Curve

### 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。PCS4 では 1/1000 までに、PC2, PC4, PCS2 では 2/1000 までに曲げひび割れが試験体下部に発生した。その後、曲げひび割れは上方及び中央寄りに進展した。また、PCS2, PCS4 では 2/1000 までに、PC2, 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。

PC2, PC4 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、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、PCS4 では 5/1000 までに、PC2, PCS2 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 $\mu$ ）した。引張側に関しては、PC2 では 15/1000 までに、PC4 では 20/1000 までに、PCS2 では 30/1000 までに最外縁引張主筋が引張降伏し、PCS4 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。

#### 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。PC2 では、最大荷重は正加力時において 20/1000 で 114.8kN、負加力時において 15/1000 で 111.5kN であった。正側、負側とも、最終の 30/1000 のサイクルにおいて、荷重がやや低下した。PC4 では、最大荷重は正加力時において 7.5/1000 で 99.3kN、負加力時において 7.5/1000 で 95.3kN であった。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。PCS2 では、最大荷重は正加力時において 15/1000 で 191.5kN、負加力時において 15/1000 で 204.0kN であった。正負加力時とも 20/1000 から耐力が低下し始めた。PCS4 では、最大荷重は正加力時において 15/1000 で 167.3kN、負加力時において 7.5/1000 で 175.3kN であった。正加力時は 15/1000 から、負加力時は 15/1000 から耐力が低下し始めた。



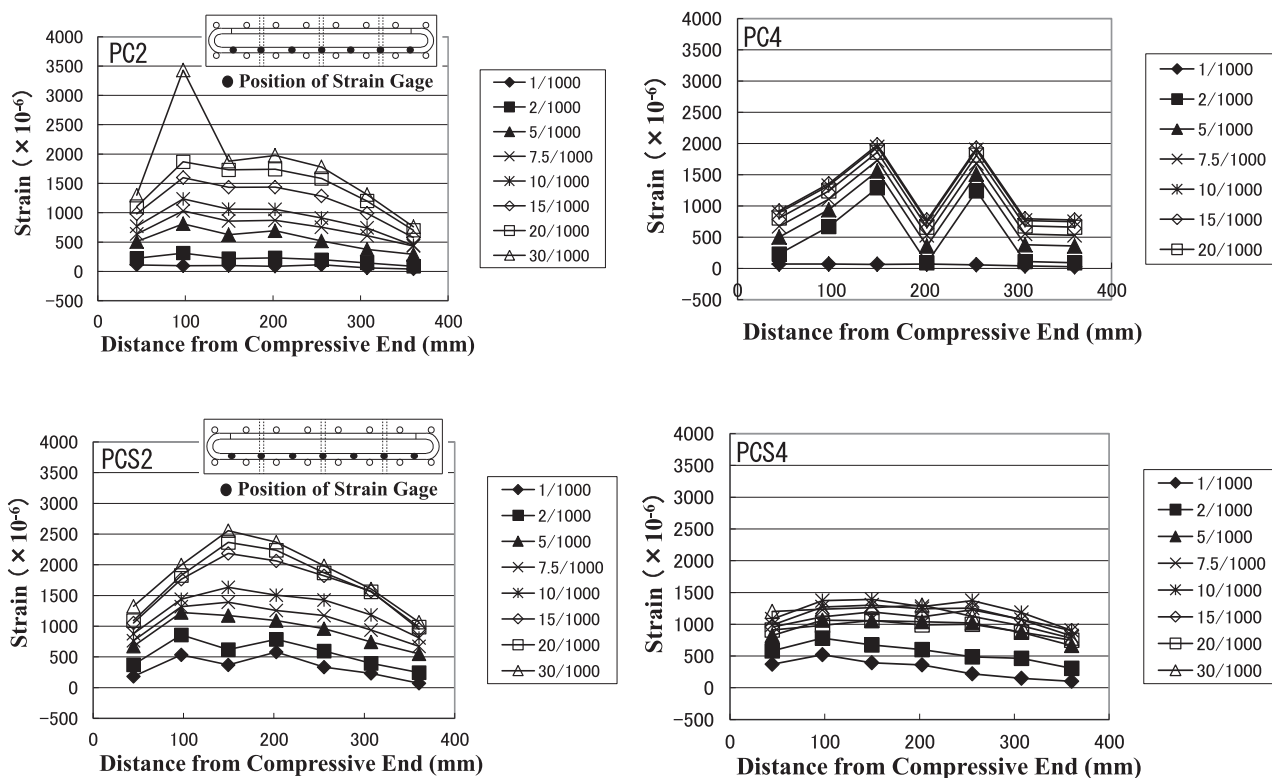


Fig. 5 Strain Distribution of Horizontal Tied Rebars

### 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。PC2、PCS2、PCS4は1階中央高さ、PC4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D10 (SD345,降伏ひずみ $2146\mu$ )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を超え、急激に増大している。PC2 では 30/1000 のサイクルで耐力がやや低下し、また、壁脚部における鉛直ひずみの水平方向分布等より、圧縮端部の柱と 2 番目の柱の独立した挙動を示している。よって、この境界部分での水平つなぎ筋の降伏により両柱の一体性が弱まり、耐力がやや低下したと考えられる。

PCS2 では、15/1000 で  $2184\mu$  となり、降伏ひずみを超えている。各部材角における最大値は 5/1000 までは圧縮端部から 97.5mm の点、7.5/1000 以降は圧縮端部から 149.5mm の点である。前報で示した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、圧縮端部柱と 2 番目の柱の間、2 番目と 3 番目の柱の間でそれぞれコンクリートの破壊が顕著で、それらの位置は破壊が顕著であった鉛直接合部の延長線上にある。これらコンクリートの破壊が顕著であった位置は、圧縮端部から 97.5mm 及び 202.5mm であり、水平つなぎ筋のひずみが特に大きい位置とほぼ一致する。よって水平つなぎ筋のひずみ分布は、鉛直接合部の破壊状況に対応していると考えられる。

2 体のひずみ分布を比較すると、降伏の生じた部材角が大きな差であるといえる。PC2 では最終の 30/1000 において、降伏によってプレキャスト柱間の一体性が弱まったと考えられる。一方、PCS2 では、15/1000 で降伏しており、鉛直接合部のせん断破壊によりプレキャスト柱間の一体性が弱まったことに対応すると考えられる。PCS4 では、最終の 30/1000 に至るまで降伏ひずみ ( $2146\mu$ ) に達していない。コッター数が少ない PCS4 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、20/1000 より耐力が低下し始めた。そのため、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。コッター数が少ないせん断スパン比 2.4 の PC4 も、PCS4 と同様、最終の 20/1000 に至るまで降伏していない。各部材角での最大値はせん断スパン比 2.4 の PC4 の方が大きい。

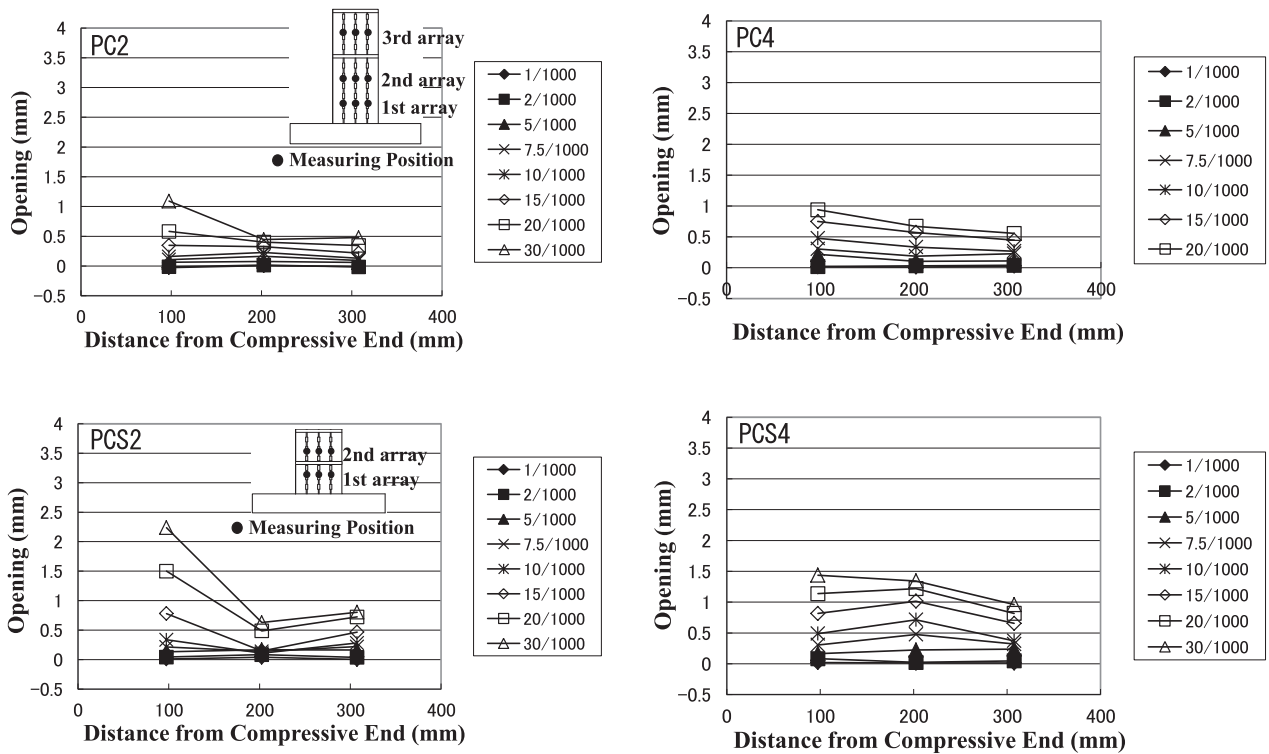


Fig. 6 Horizontal Distribution of Opening

### 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。目開きの測定位置は、1 段目は 1 階柱下部（高さ 170mm）、2 段目は 1 階柱上部（高さ 415mm）、3 段目は 2 階柱中央部（高さ 805mm、PC2,4 のみ）である。目開きは、柱部材間の水平方向相対変位を変位計で測定した。PC2、PCS2、PCS4 は 1 段目、PC4 は 2 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 では、10/1000 までと比べて、15/1000 から徐々に目開きが大きくなっている。水平方向で比較すると、特に 15/1000 以降、圧縮端部に近いほど目開きは大きい傾向にある。20/1000 から 30/1000 にかけて圧縮端部側で大きく増大し、最終的に 30/1000 で 1.1mm となった。

PC4 では 7.5/1000 以降、圧縮端部側が最も大きく、引張端部側に近づくにつれひずみが減少している。最終的に 20/1000 で 0.9mm となった。PC2 と PC4 を比較すると、値の大きい圧縮端部側では、20/1000 に至るまで PC4 の方が PC2 の約 2 倍の値となっている。これは、コッター数の少ない PC4 の方がより小さい部材角でコッター部のせん断破壊が生じ、目開きがより大きくなったと考えられる。

PCS2 では、7.5/1000 以降、中央部に比べて両端部の目開きが大きく、15/1000 以降では圧縮端部側で大きく増大し、最終的に 30/1000 で 2.2mm となった。

PC2 と PCS2 を比較すると、最大値は PC2 の 1.1mm に対し、PCS2 では 2.2mm と 2 倍程度であり、せん断スパン比の小さい PCS2 の方が大きい。これは、破壊状況において、PC2 が主に脚部圧壊であったのに対し、PCS2 では脚部圧壊に加えて鉛直接合部のせん断破壊が顕著であったためと考えられる。

PCS4 では、最終の部材角においては圧縮端部側が 1.4mm と最も大きく、引張端部側に近づくにつれひずみが減少している。但し、20/1000 までは中央部の値が最も大きい。PCS2 と PCS4 を比較すると、圧縮端部側の 20/1000、30/1000 では PCS2 の方が大きく、その他は全体にコッター数の少ない PCS4 の方が大きい傾向にある。

#### 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

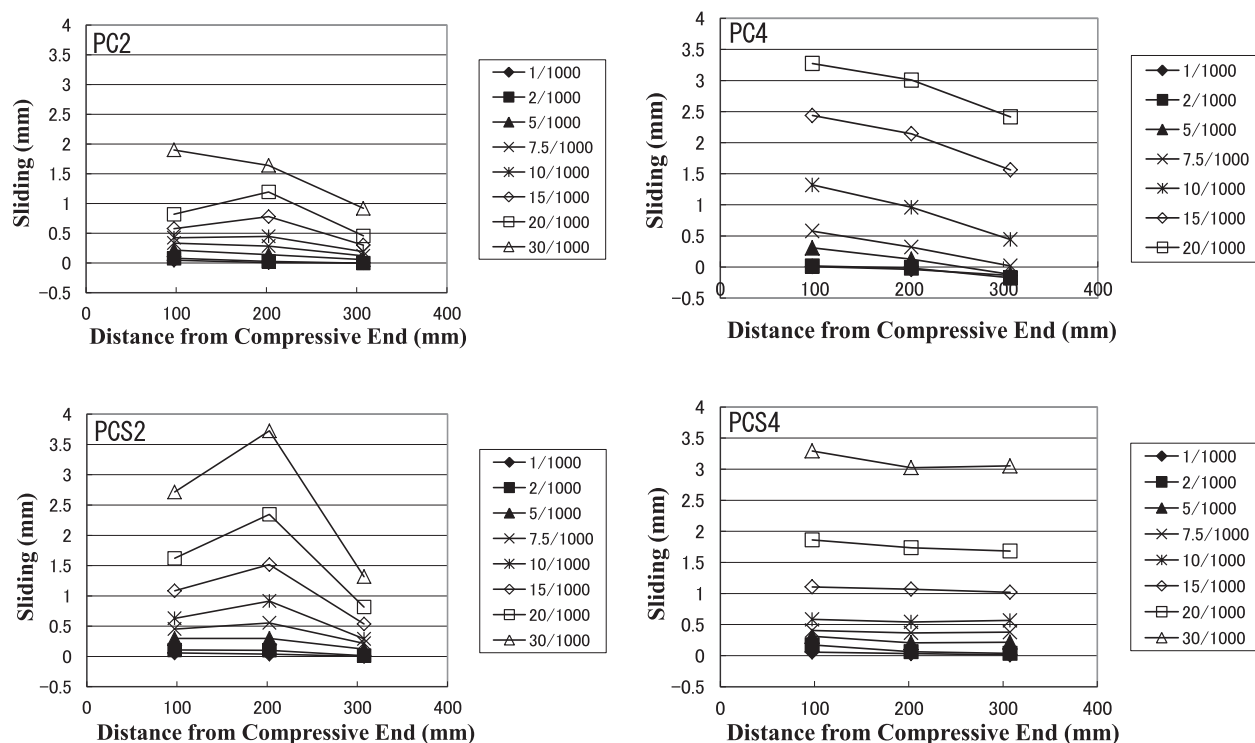


Fig. 7 Horizontal Distribution of Sliding

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 は 1 段目, 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4体のなかで最も小さく、1.9mmである。4体中唯一、鉛直接合部せん断破壊が顕著でなかったことと対応し、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。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。

PC2 では 2/1000 までと比べて、5/1000 から徐々にずれが大きくなっている。水平方向で比較すると、7.5/1000 までは圧縮端部に近いほどずれは大きい傾向にあるが 10/1000 以降は中央部が大きく、20/1000 から 30/1000 にかけて圧縮端部側で大きく増大し、再び圧縮端部側が最大となる。圧縮端部側では、最終的に 30/1000 で 1.9mm となった。

PC4 ではいずれの部材角においても圧縮端部側が最も大きく、引張端部側に近づくにつれひずみが減少している。PC2 と PC4 を比較すると、明らかに、コッター数の少ない PC4 の方が値は大きい。これは、目開きの場合と同様、コッター数の少ない PC4 の方がより小さい部材角でコッター部のせん断破壊が生じ、ずれがより大きくなったと考えられる。

PCS2 では 7.5/1000 以降、両端部に比べて中央部のずれが大きく、その傾向は最終の 30/1000 まで続く。特に 15/1000 以降、中央部のずれの増大は大きく、最終的に 30/1000 で 3.7mm となった。

PC2 と PCS2 を比較すると、最大値は PC2 の 1.9mm に対して PCS2 では 3.7mm で、PCS2 が明らかに大きい結果となった。これは目開きの場合と同様、せん断スパン比の小さい PCS2 の鉛直接合部においてせん断破壊が顕著であったためと考えられる。

PCS4 では、最終の部材角においては圧縮端部側が最も大きく、引張端部側に近づくにつれずれが減少している。15/1000 においてずれの増加が大きく、ひび割れ状況におけるコッター部のせん断破壊、荷重-変形関係における荷重の低下に対応している。PCS2 と PCS4 を比較すると、コッター数の影響としては、分布形状が PCS2 において中央部で大きい形状であるのに対し、コッター数の少ない PCS4 では、端部、中央部とも大きい値となっていることが挙げられる。

**Table 3** Maximum Strength

unit(kN)

Specimen	Horizontal Strength			Strength of Vertical Joint	
	Exp. Load	Cal. Load	Exp./Cal.	Shear Force	Shear Strength
PC2	114.8(111.5)	115.7	0.99(0.96)	374.6	415.7
PC4	99.3(95.3)	118.3	0.84(0.81)	383.1	246.5
PCS2	191.5(204.0)	199.4	0.96(1.02)	389.3	261.5
PCS4	167.3(175.3)	215.1	0.78(0.81)	420.0	168.9

Cal. Load of Horizontal Strength  $P_{NU}$ : REFERENCES<sup>(6)</sup>

$P_{NU}=M_u/H$ , 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<sup>(7)</sup> Equation(9.3)  $Q_{DV}=0.10F_c \cdot A_{sc} + \sigma_y \Sigma a_v$

### 3.5 最大耐力

Table 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, PC4, PCS2, PCS4 でそれぞれ 0.24, 0.01, 0.21, -0.02）と異なる為、Table 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、コッター数が少なく、鉛直接合部の破壊により一体性の弱まった PC4, PCS4 では、それぞれ、16～19%, 19～22%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 Table 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。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。

## 4. まとめ

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

- 1) 最大耐力において、コッター数が少なく、鉛直接合部の破壊により一体性の弱まった PC4, PCS4 では、水平耐力の実験値が計算値に対しそれぞれ、16～19%, 19～22%低かった。また、PC4, PCS4 の鉛直接合部耐力は、いずれもせん断耐力が作用せん断力を下回った。
- 2) コッター数が少ない PC4, PCS4 は鉛直接合部の破壊により一体性が弱まり、そのため、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、水平つなぎ筋は降伏にも至らなかったと考えられる。
- 3) 鉛直接合部における目開き、ずれに関しては、コッター数が少ない PC4, PCS4 の値が大きい。これは、接合部耐力が作用せん断力を下回り、コッター部がせん断破壊したことにより、一体性が弱まったことと対応していると考えられる。

## 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

(2022年8月4日受理)