

# 論文 プレキャスト鉄筋コンクリート造柱部材に関する実験研究

菊田 繁美\*1・千葉 脩\*2

要旨：純ラーメン構造の高層鉄筋コンクリート造建物をプレキャスト化するに際し、一定軸力および変動軸力下における柱の曲げせん断実験を行った。圧縮軸力時には1/50の部材角に至るまでの耐力が上昇し、引張軸力時には1/33の部材角においても耐力上昇過程にあった。諸強度は既往の計算式で評価することができた。スリーブ継手は引張域においてはスリーブ継手の下部の鉄筋に引張歪度を集中させたが、圧縮域においては圧縮歪度を抑制する効果があった。スリーブ継手の有無による柱端部の水平ずれ変形への影響はほとんど無かった。

キーワード：プレキャスト、柱、変動軸力、曲げせん断実験、スリーブ継手

## 1. はじめに

筆者らは超高層プレキャスト鉄筋コンクリート造建築物の設計施工システムの研究開発を行ってきた。部分プレキャスト梁を用いた純ラーメン構造に関しては構造実験・解析により耐震性能を確認し、既に3棟の設計施工実績がある。本報では、柱のプレキャスト化および高強度材料を用いることによる施工性の向上を目的として行ったプレキャスト鉄筋コンクリート造柱部材の曲げせん断実験の概要について報告する。既往の実験によると圧縮軸力が小さくなるに従いスリーブ継手の影響が見られるが、高引張軸力時におけるスリーブ継手の影響について既往の実験データが少ないため、この点についても検討した。

## 2. 試験体

試験体の一覧および試験体形状を表-1、図-1に示す。試験体は超高層建築物の下層部を対象と

表-1 試験体一覧

試験体	主筋		せん断補強筋			M-QD	軸力 Nt/Nu→Nc/Nu <N(ton)>	
	材種	Pg(%)	材種	Pw(%)				
HRPCC1 中柱	12-D19	2.15	4-S6.4 φ40	KSS80	0.75	1.5	0.25 <-290>	
HRPCC2 隅柱	16-D19						3.59	0.70 → 0.40 <200 → -400>
HRPCC3 隅柱	+4-D19	2.87						0.70 → 0.50 <200 → -400>
HRPCC4 中柱	16-D19						4.31	0.25 <-200>
HRPCC5 隅柱	16-D19 +8-D19							0.70 → 0.50 <200 → -400>

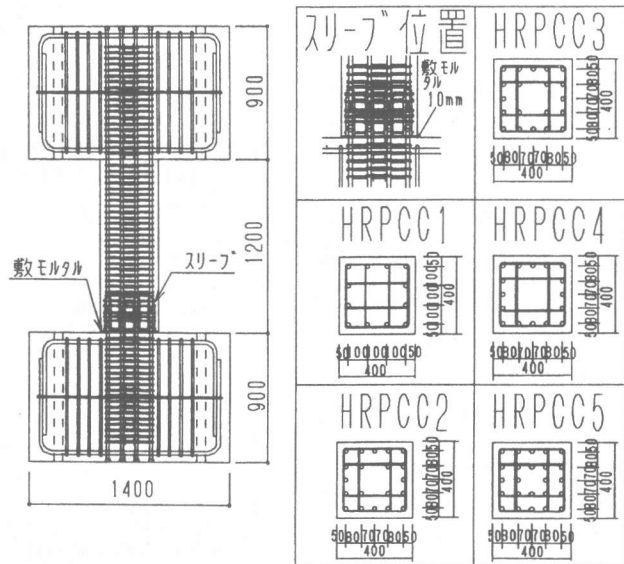


図-1 試験体形状

\*1 戸田建設(株)技術研究所研究第2室研究員、工修(正会員)

\*2 戸田建設(株)技術研究所研究第2室室長、工修(正会員)

した約 1/2縮尺の 5 体(HRPCC1~5)で、中柱を対象とした試験体が 2 体(HRPCC1, HRPCC4)、隅柱を対象とした試験体が 3 体(HRPCC2, HRPCC3, HRPCC5)である。各試験体とも、柱と上下スタブのコンクリートを分離して打設した。柱脚の柱主筋の接合部にネジスリーブ継手を用い、柱帯筋に高強度のせん断補強筋を用いた。HRPCC4, HRPCC5 は柱主筋がSD390 でコンクリートの圧縮強度が約480kgf/cm<sup>2</sup>の既往の建築物のプレキャスト化を目指すものであり、HRPCC3は柱主筋にSD490 を用いることでHRPCC5の芯筋本数の削減を目指すものである。HRPCC1, HRPCC2 はSD490 の鉄筋と圧縮強度が約600kgf/cm<sup>2</sup>のコンクリートを用いて、主筋本数の削減と耐震性能の向上を目指すものである。せん断スパン比は各試験体とも 1.5である。

材料試験結果を表-2に示す。

### 3. 加力方法

加力装置を図-2、加力スケジュールを図-3に示す。柱試験体の柱脚を固定し、柱頭のL型加力梁を用いて試験体中央部が反曲点となるように逆対称繰返し加力を行った。中柱対象試験体には一定圧縮軸力(0.25  $c\sigma_B$ )、隅柱対象試験体には変動軸力を作用させた。変動軸力を水平力の1次関数(N=10Q-100)として圧縮および引張軸力の上限値を-400tonf、200tonf に設定した。これら上限値は、圧縮軸応力度がHRPCC2で約 0.4  $c\sigma_B$ 、HRPCC3,5で約 0.5  $c\sigma_B$  であり、引張軸応力度が各試験体とも約 0.7  $s\sigma_y$  である。

### 4. 実験経過

各試験体の部材角1/50におけるひびわれ状況を図-4に示す。各試験体とも主筋の圧縮および引張降伏後に柱頭部が曲げ圧縮破壊した。

一定軸力のHRPCC1,4には部材角1/400で柱頭部に曲げひびわれが発生し、1/200のサイクルで柱脚部の曲げひびわれとせん断ひびわれが発生した。HRPCC1のせん断ひびわれは柱中央部に縦方向に多数発生したが、HRPCC4では端部に45°方向のひびわれが発生した後に対角線方向のひびわれが多数発生した。HRPCC1は1/200、HRPCC4は1/100で柱頭部が圧壊した。両試験体とも1/100で柱頭柱脚部の主筋が

表-2 材料試験結果

コンクリート	圧縮強度 $c\sigma_B$ kgf/cm <sup>2</sup>	割線剛性 $E_c$ $\times 10^5$ kgf/cm <sup>2</sup>	割裂強度 $c\sigma_t$ kgf/cm <sup>2</sup>
HRPCC1	602	3.60	40.8
HRPCC2	619	3.63	39.7
HRPCC3	485	3.55	35.2
HRPCC4	478	3.68	31.5
HRPCC5	485	3.56	32.6

鉄筋	降伏強度 $s\sigma_y$ kgf/cm <sup>2</sup>	引張強度 $s\sigma_u$ kgf/cm <sup>2</sup>	ヤング係数 $E_t$ $\times 10^6$ kgf/cm <sup>2</sup>	伸び %
D19*1	5340	7200	1.98	20
D19*2	4650	6550	1.96	21
D6*3	9100	10080	1.99	15

\*1 SD490 (HRPCC1、HRPCC2の主筋)  
\*2 SD390 (HRPCC3~HRPCC5の主筋)  
\*3 高強度鉄筋 (せん断補強筋) 0.2%オフセット

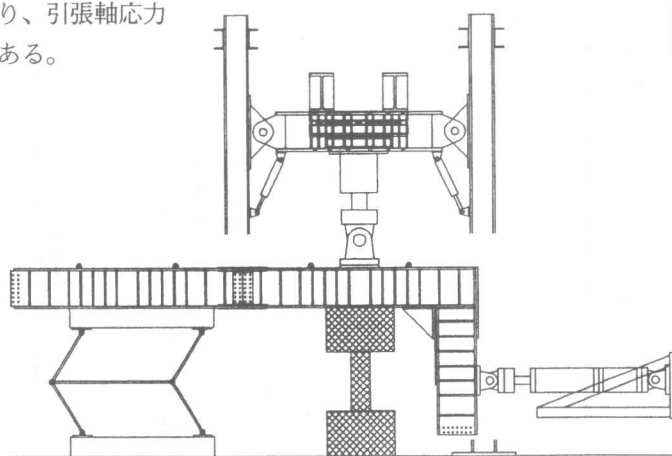


図-2 加力装置

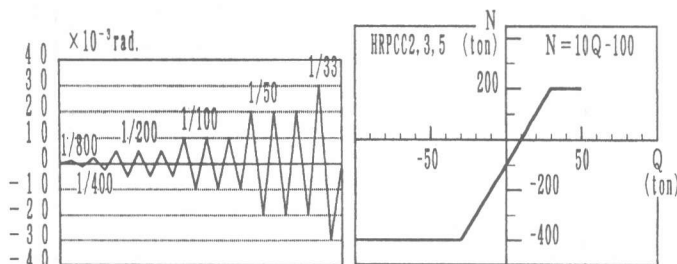


図-3 加力スケジュール

圧縮降伏し、その後に引張降伏したが主筋が圧縮域で塑性化しているため引張降伏時は特定できなかった。部材角1/50で、HRPCC1は対角線方向の数本のひびわれ幅が増大したのに対し、HRPCC4は対角線方向にひびわれが分散した。

変動軸力のHRPCC2, 3, 5のひびわれ発生状況は同様であった。部材角1/800で軸力がほぼ0の時に曲げひびわれが発生し、1/400の引張軸力時に試験体全面にはほぼ水平方向の曲げひびわれが発生した。圧縮軸力時において、HRPCC2は1/100、HRPCC3, 5は1/200で対角線方向に多数のせん断ひびわれが発生した。HRPCC2, 3, 5とも1/200で柱頭部が圧壊し、HRPCC3, 5が1/50で柱脚部が圧壊した。HRPCC2は1/100で柱頭柱脚部の主筋が圧縮降伏したが、HRPCC3, 5は1/200で柱脚部、1/100で柱頭部の主筋が圧縮降伏した。その後に引張降伏したが主筋が圧縮域で塑性化しているため引張降伏時は特定できなかった。HRPCC2, 3, 5とも圧縮軸力時の1/50で対角

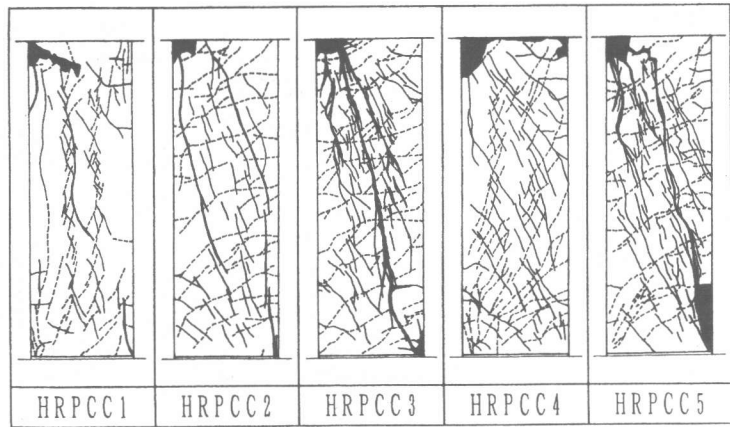


図-4 ひびわれ状況 (1/50rad.)

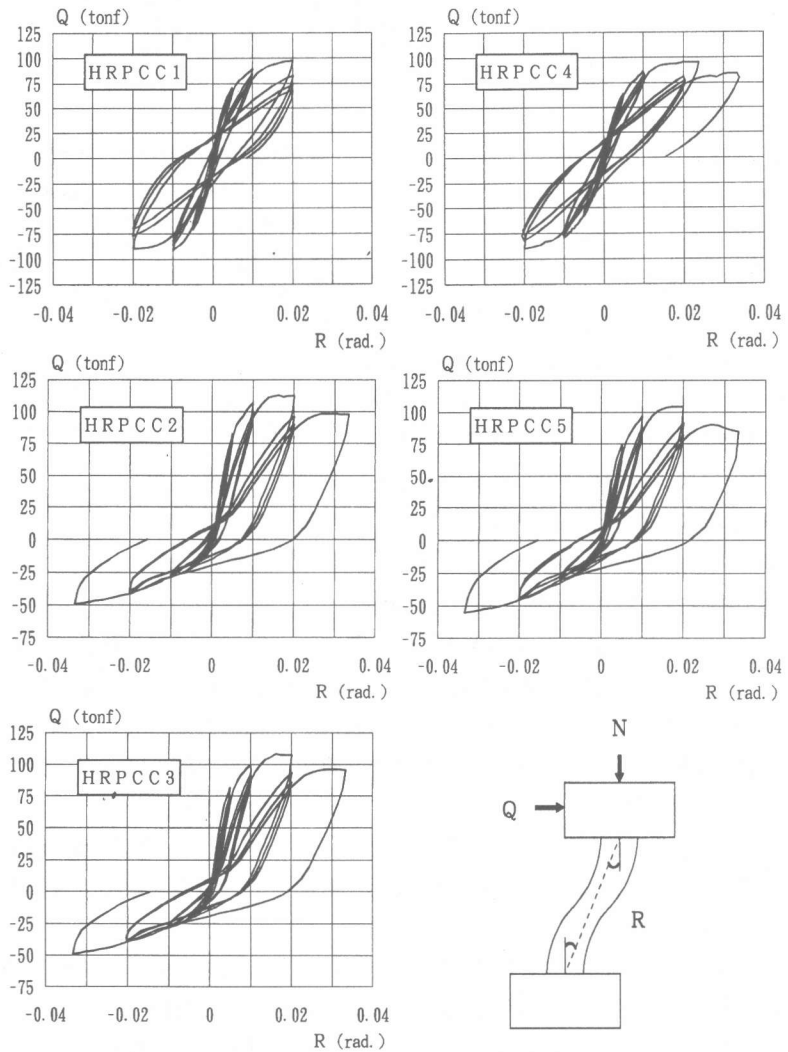


図-5 荷重-変形関係

線方向の数本のひびわれにひびわれ幅が集中した。

各試験体の荷重-変形関係を図-5に示す。各試験体とも圧縮軸力時には1/50に至るまで耐力が上昇し、引張軸力時には1/33においても耐力が上昇した。HRPCC1,4はほぼ同様の紡錘型の履歴ループを示した。HRPCC2,3,5はほぼ同様の履歴ループを示しており、HRPCC3に比べてコンクリートの圧縮強度の高いHRPCC2は圧縮軸力時の耐力が若干大きくなった。

### 5. 実験結果

柱試験体の諸強度に関する実験値と計算値の比較を表-3に、隅柱対象試験体について、曲げ耐力と軸力の相関関係を図-6に示す。曲げひびわれ強度については、実験値が計算値を2~3割上回った。せん断ひびわれ強度については、実験値が計算値を大きく上回った。柱主筋の圧縮降伏耐力については、比較的圧縮応力度の大きい変動軸力のHRPCC2,3,5で実験値が計算値を下回った。圧壊強度については、スリーブの無い柱頭において実験値が計算値を下回っており、スリーブの有る柱脚においてはコンクリート強度が約480kgf/cm<sup>2</sup>で軸応力度の大きいHRPCC3とHRPCC5でのみ圧壊がみられ、実験値はスリーブの無い場合の計算値を2割程度上回った。最大耐力については、曲げ耐力と軸力の相関関係からも判るように、圧縮軸力時にはコンクリート強度が約600kgf/cm<sup>2</sup>のHRPCC1とHRPCC2で実験値が計算値を1割程度下回っており、その他の試験体は実験値が計算値を若干上回った。引張軸力時にはHRPCC2,3,5とも曲げ耐力の実験値が計算値を大きく上回った。

6. 軸方向変形

HRPCC1とHRPCC4およびHRPCC2とHRPCC3について軸方向変形の比較を図-7に示す。軸力応力度を0.25 $\sigma_B$ としたHRPCC1とHRPCC4を比較すると、高強度コンクリートを使用し軸力応力度の大きいHRPCC1の方が軸圧縮変形が大きくなった。軸圧縮応力度が同じHRPCC2とHRPCC3を比較すると、HRPCC3は高強度コンクリートを使用したHRPCC2に比べて圧縮軸変形が大きくなった。

表-3 実験値と計算値の比較

	HRPCC1	HRPCC2	HRPCC3	HRPCC4	HRPCC5
曲げひびわれ強度 Q <sub>c</sub> (tonf)	48.4 (41.2)	67.1 (56.0)	-7.7 (-9.6)	65.2 (52.8)	-13.3 (-8.6)
せん断ひびわれ強度 Q <sub>sc</sub> (tonf)	71.0 (53.7)	88.8 (63.6)	—	76.2 (56.0)	58.2 (40.2)
主筋圧縮降伏耐力 Q <sub>yc</sub> (tonf)	柱頭 92.0 (100)	96.3 (115)	—	85.8 (95.6)	82.4 (80.0)
	柱脚 91.2 (100)	96.3 (115)	—	74.0 (95.6)	81.0 (80.0)
圧壊強度 Q <sub>cc</sub> (tonf)	柱頭 70.9 (87.1)	73.7 (96.3)	—	74.0 (79.0)	86.2 (76.3)
	柱脚 — (87.1)	— (96.3)	—	99.6 (79.0)	— (76.3)
最大耐力 Q <sub>v</sub> (tonf)	97.4 (103)	112.6 (126)	-49.8 (-27)	107.8 (98.6)	-49.2 (-27)

( )は計算値

$$Q_c = (1.8 \sqrt{c \sigma_B} Z_0 + ND/6) / (h_0/2) \quad h_0: \text{内法高さ}$$

$$Q_{sc} = (1 + \sigma_0/150) (0.085 k_c (500 + c \sigma_B) / (M / (Q_d) + 1.7)) b_j$$

Q<sub>yc</sub>, Q<sub>cc</sub>: 材料試験結果を用いた断面分割法による

$$Q_v = M_u / (h_0/2)$$

$$N_{MAX} \geq N > N_b \quad M_u = (0.5 a_{gs} \sigma_{yg} D + 0.024 (1 + g_1) (3.6 - g_1) b D^2 c \sigma_B) (N_{MAX} - N) / (N_{MAX} - N_b)$$

$$N_b \geq N > 0 \quad M_u = 0.5 a_{gs} \sigma_{yg} D + 0.5 ND (1 - N / (b D c \sigma_B))$$

$$0 \geq N > N_{MIN} \quad M_u = 0.5 a_{gs} \sigma_{yg} D + 0.5 N g_1 D$$

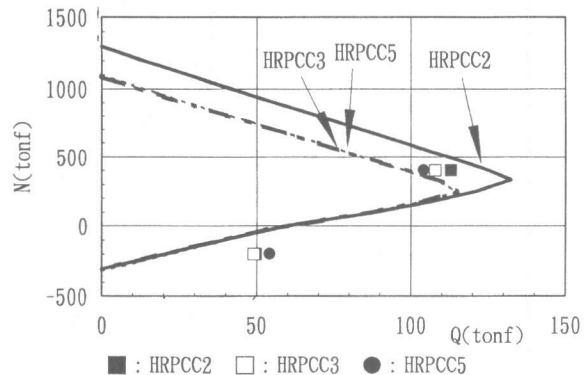


図-6 曲げ耐力と軸力の相関関係

### 7. 曲率分布と主筋の歪度

HRPCC2について、部材角1/100 と1/50における柱の曲率分布を図-8に示す。圧縮軸力時および引張軸力時とも端部に曲率が集中している。圧縮軸力時にはスリーブの無い柱頭の方がスリーブの有る柱脚に比べて曲率が大きい。引張軸力時には逆に柱脚の曲率の方が若干大きくなっており、スリーブ継手は圧縮軸力時には曲げ剛性を増大させるが引張軸力時には逆に低下させた。

HRPCC2について柱脚および柱頭部の部材角1/100における主筋の歪度分布を図-9に示す。圧縮軸力作用時にはスリーブ継手の有る柱脚部に比べてスリーブ継手の無い柱頭部で圧縮歪度が大きくなった。一方、引張軸力作用時には、柱頭部に比べてスリーブ継手の有る柱脚部で引張歪度がかなり大きくなった。

これらの現象は、圧縮域においては軸剛性の大きいスリーブ継手も圧縮力に抵抗するため軸歪度を抑制するが、引張域においてはスリ

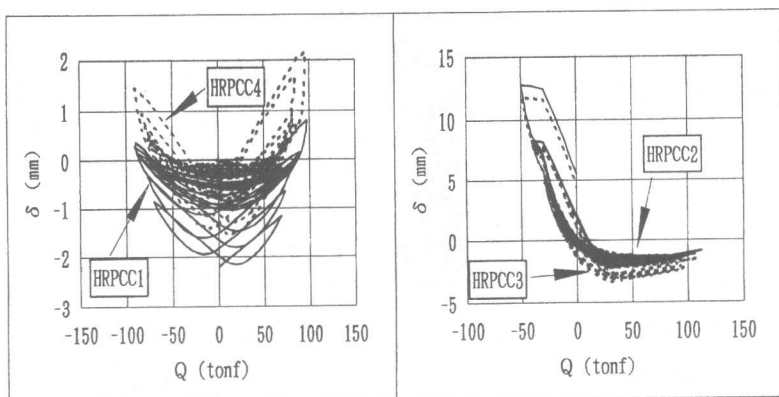


図-7 軸方向変形

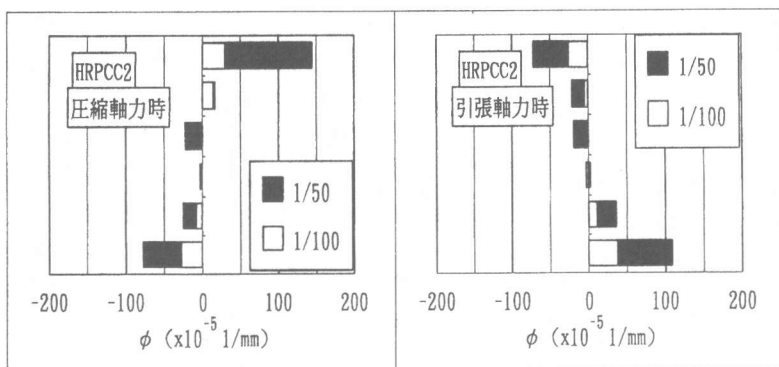


図-8 曲率分布

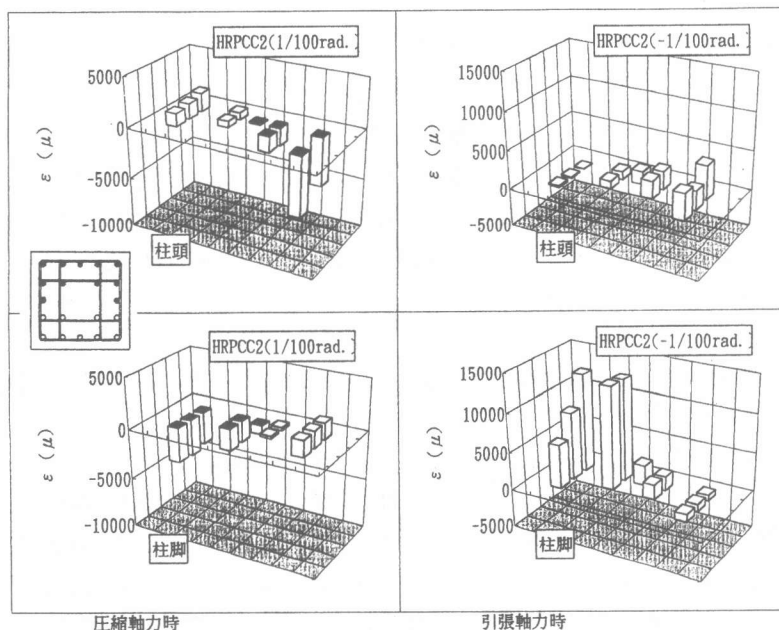


図-9 主筋のひずみ度分布

スリーブ継手が伸びない分スリーブ継手直下の鉄筋に引張歪度が集中したことによるものと考えられる。

### 8. せん断補強筋の歪度

HRPCC2について、圧縮軸力作用時におけるせん断補強筋の歪度分布を図-10に示す。柱の上下端から約1/2D離れた位置に比べて柱中央部の歪度が大きくなった。この傾向は各試験体とも同様であった。本試験体のような柱の場合には柱中央部の帯筋がせん断力に対して有効に抵抗するものと考えられる。外周の帯筋に比べて中子筋の歪度の方が若干大きくなっており、中子筋が有効に抵抗したのと考えられる。

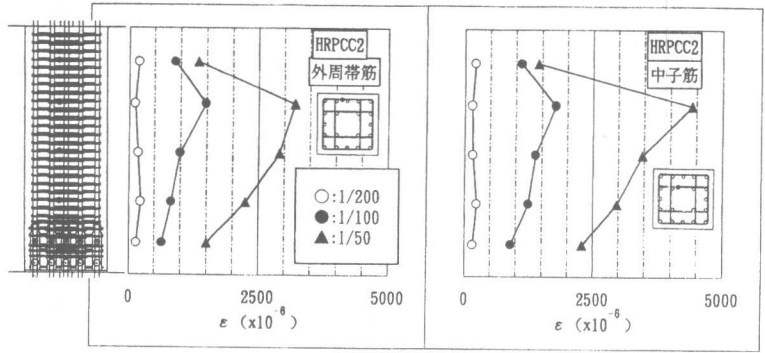


図-10 せん断補強筋のひずみ度分布

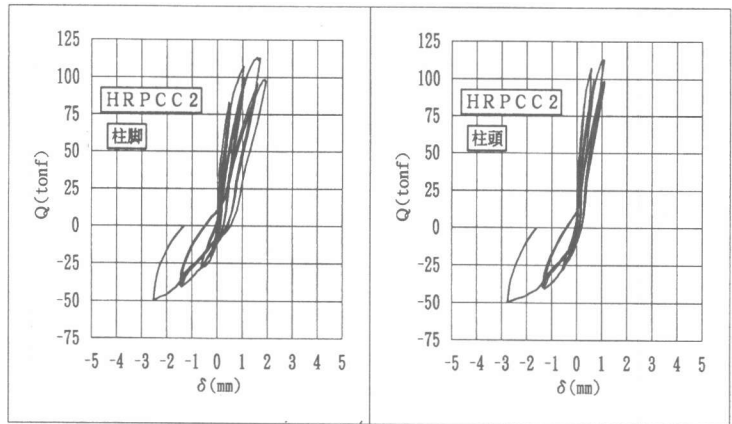


図-11 水平ずれ変形

### 9. 水平ずれ変形

HRPCC2について、スリーブ継手の無い柱頭とスリーブ継手の有る柱脚の水平ずれ変形とせん断力の関係を図-11に示す。引張軸力時(Qが負)には柱頭と柱脚の水平ずれ変形がほぼ同じであったが、圧縮軸力時(Qが正)には柱脚の水平ずれ変形が柱頭に比べて若干大きくなった。スリーブ継手の有無による水平ずれ変形への影響は圧縮軸力時に若干見られる程度であり、ほとんど影響しないと考えられる。

### 10. まとめ

- ①本柱試験体は圧縮軸力時には部材角1/50に至るまで耐力が上昇し、引張軸力時には部材角1/33においても耐力上昇過程にあった。
- ②各試験体とも実験の諸強度は既往の計算式で評価することができた。
- ③スリーブ継手を設けたことによる曲げ変形への影響は引張軸力時と圧縮軸力時で異なり、圧縮域においては既往の研究と同様に軸歪度を抑制し継手部の曲率を減少させる効果があったが、引張域においてはスリーブ継手の下部の鉄筋に引張歪度を集中させ継手部の曲率を増大させた。
- ④柱の上下端から約1/2D離れた位置に比べて柱中央部のせん断補強筋の方が有効に抵抗した。
- ⑤スリーブ継手の有無による柱端部の水平ずれ変形への影響はほとんど無かった。