

# 論文 鉄筋コンクリート柱の付着性状に及ぼす横方向プレストレスの影響

篠原 保二\*1 ・ 殿原 啓伸\*2 ・ 渡部 洋\*3 ・ 林 静雄\*4

**要旨:** 本研究では高強度横補強筋を使用して横方向プレストレスを導入した試験体について、主筋のひずみ分布および付着割裂ひび割れ性状の計測を行い、プレストレスが主筋の付着挙動に及ぼす影響を明らかにすることを目標として実験を行った。主筋のふしによってコンクリートが押し広げられ生じるひび割れ幅は、横方向プレストレスの導入により抑制され、最大付着応力度を引き上げることににより部材の一体性を保持することがわかった。

**キーワード:** 横方向プレストレス, ひび割れ性状, 付着応力

## 1 はじめに

鉄筋コンクリート構造の柱の靱性能を高める目的で、横補強筋量を増やす代わりに高強度横補強筋を用いてプレストレスを導入する方法が考えられている。これまで横方向プレストレスを導入した柱の曲げせん断実験<sup>1)</sup>および数値解析<sup>2)</sup>によりプレストレスの導入によるせん断ひび割れ耐力の上昇やひび割れ幅抑制のメカニズムが明らかにされてきた。本研究では横方向プレストレスを導入した部材の付着割裂破壊に着目した。主筋、横補強筋に複数枚のひずみゲージを貼付しひずみの計測を行い、さらにひび割れ発生時にはデジタルマイクロスコープ(分解能 0.01mm)を用いてひび割れ幅の計測を行った。

## 2 実験概要

### 2.1 試験体概要

試験体概要を図-1に、試験体諸元を表-1に、鉄筋の材料特性を表-2に示す。試験体は主筋量を一定とし、横補強筋に導入する緊張力のみを変動要因として付着割裂破壊するよう靱性指針<sup>3)</sup>を参考に設計した2体(Bシリーズ)と比較のため取り上げた[文献 4]で報告した2体(Sシリーズ)の計4体である。Sシリーズは付着割

裂を起こさないように割裂防止筋(D13)を横補強筋と同じ間隔で配している。便宜上プレストレスを導入した試験体を LPRC プレストレスを導入しない試験体を RC とする。プレストレスは横補強筋降伏強度の 40%の緊張力を加えプレ

表-1 試験体諸元

試験体名称	M/QD	P <sub>w</sub> (%)	P <sub>wb</sub> (%)	σ <sub>B</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	σ <sub>wp</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	σ <sub>L</sub> (N/mm <sup>2</sup> )
B-LPRC	1.3	0.29	0.29	47.1	587	1.7
B-RC				47.7	0	0
S-LPRC			1.54	46.5	536	1.6
S-RC				50.8	0	0

M/QD=せん断スパン比, p<sub>w</sub>=横補強筋比, p<sub>wb</sub>=付着割裂耐力に有効な横補強筋比, σ<sub>B</sub>=コンクリート圧縮強度, σ<sub>wp</sub>=横補強筋の緊張力, σ<sub>L</sub>=横方向プレストレス(=p<sub>w</sub>σ<sub>wp</sub>)

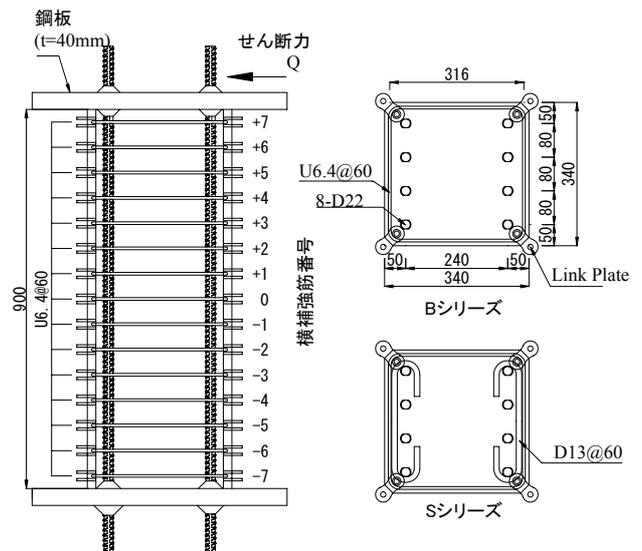


図-1 試験体詳細図

\*1 東京工業大学大学院助教授 建築物理研究センター 博士 (工学) (正会員)

\*2 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 環境理工学創造専攻

\*3 長崎総合科学技術大学 建築学科 講師 博士 (工学) (正会員)

\*4 東京工業大学大学院教授 建築物理研究センター 博士 (工学) (正会員)

トレスを与えている。プレストレスの指標として横補強筋比と軸力を加える直前の横補強筋応力度との積を横方向プレストレス  $\sigma_L (=p_w \sigma_{wp})$  と定義する。両シリーズともコンクリートは縦打ちで、早強ポルトランドセメントを使用し、水セメント比 50%、最大骨材寸法 25cm、スランプ 18cm である。(表-3)

## 2.2 実験方法および計測方法

加力装置を図-2 に示す。加力形式は逆対称正負交番載荷とし、軸力比 0.3 に相当する軸力を導入後、変位制御により水平方向のせん断力を加えている。部材角  $R = \pm 1/400, \pm 1/200, \pm 1/133, \pm 1/100, \pm 1/67, \pm 1/50, \pm 1/33$  で終了とした。

ひび割れ測定は柱せい面にひび割れが発生してから各サイクルピークにおいて横補強筋上に発生したひび割れ幅全てを測定した。図-3 に示すようにひび割れ界面に対し直行方向距離  $w$  をひび割れ幅、水平方向  $s$  をひび割れによる滑りとして計測し、横補強筋上の合計ひび割れ幅を求める際にはひび割れ幅と横補強筋がなす角度  $\theta$  を用いて角度補正した  $w'$  を用いて評価する。

## 3 実験結果

図-4 に B シリーズと S シリーズの荷重変形曲線を示し、表-4 に実験結果一覧を示す。また、図-5 には最大耐力時のひび割れ図を示す。

### 3.1 せん断力-部材角関係および破壊過程

B-LPRC, B-RC とも、最大耐力時試験体幅面にひび割れがなく、試験体せい面の主筋沿いに多数のひび割れが生じていたことから両試験体ともサイドスプリット型付着破壊であった。

B-LPRC は  $Q=561(\text{kN})$ ,  $R=+1/133(\text{rad.})$  でせん断ひび割れが柱脚部に生じた後、多数の付着ひび割れが主筋沿いに生じ最大耐力を向かえた。B-RC は  $Q=426(\text{kN})$ ,  $R=+1/133(\text{rad.})$  で付着ひび割れが引張鉄筋上に生じた後せん断力  $Q=430(\text{kN})$  でほぼ一定となり、変形の増大に伴い中央部に向けひび割れが連なり最大耐力を向かえた。

S シリーズはせん断圧縮破壊により最大耐力に至った。[文献 4]

表-2 鉄筋の材料特性

種別	$\sigma_y$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	$\sigma_{\max}$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	$E_s$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )
D22	1196	1281	$1.92 \times 10^5$
U6.4	1459	1499	$2.04 \times 10^5$
D13	344	488	$1.92 \times 10^5$

$\sigma_y$ : 降伏応力度  
 $\sigma_{\max}$ : 引張強度  
 $E_s$ : 弾性係数

表-3 コンクリート調査表

スランプ (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )				
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和材 A
18	50	45	184	373	762	945	0.93

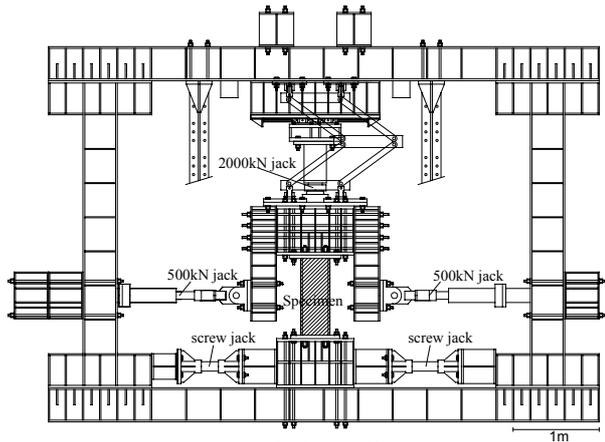


図-2 実験加力装置

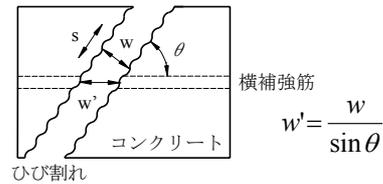
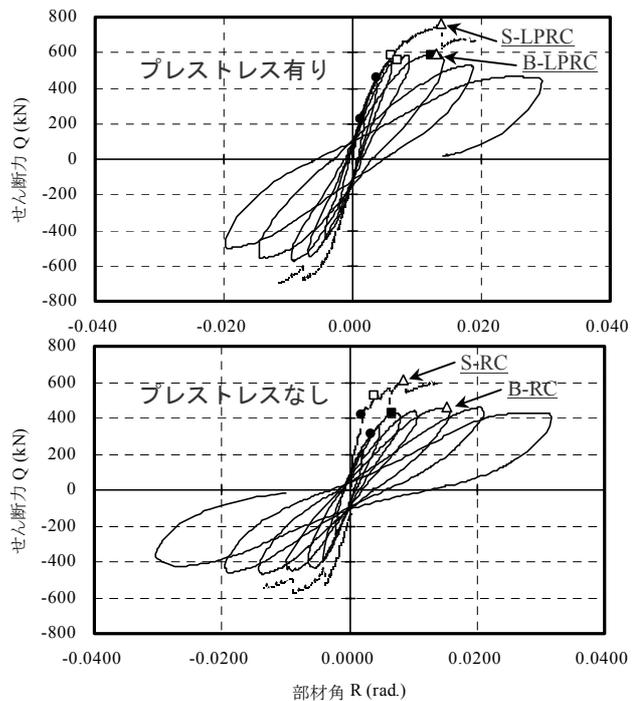


図-3 ひび割れ幅の定義

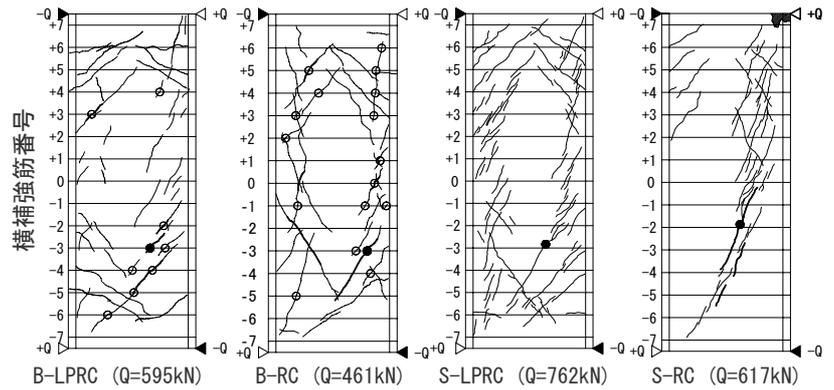


●: 曲げひび割れ発生, □: せん断ひび割れ発生  
■: 付着ひび割れ発生, △: 最大耐力時

図-4 せん断力  $Q$  - 部材角  $R$  関係

### 3.2 耐力検討

表-4 の各実験結果・計算結果をみると B シリーズではプレストレスを導入することで部材最大耐力が 1.3 倍向上し、S シリーズでは 1.2 倍向上している。[文献 1]で提案されている計算方法を使用することで各シリーズにおける最大耐力を精度よく評価することができている。[文献 1]での  $calQ_{su}$  の評価方法では、靱性指針<sup>3)</sup>を参考に横方向プレストレスの影響を考慮して有効圧縮強度係数を修正したものであり、 $calQ_{bu}'$  ではそれに加え、プレストレスが付着抵抗に有効であると仮定した上で、 $\sigma_L$  を付着強度式に単純累加し算出したものである。その詳細については[文献 1]を参照されたい。



※ 太線はひび割れ幅 0.5mm 以上発生したものを示す。  
○：せん断ずれ発生位置 ●：最大ひび割れ幅発生位置

図-5 最大耐力時における各試験体せい面のひび割れ図

表-4 実験値・計算値一覧

試験体名	exp $Q_{max}$ (kN)	exp $Q_{sc}$ (kN)	cal $Q_{bu}$ (kN)	cal $Q_{bu}'$ (kN)	cal $Q_{su}$ (kN)	cal $Q_{sc}$ (kN)	exp $Q_{max}$ / cal $Q_{bu}'$	exp $Q_{max}$ / cal $Q_{su}$
B-LPRC	595	562	414	554	629	594	1.07	-
B-RC	461	-	416	416	632	474	1.11	-
S-LPRC	762	611	685	825	725	606	-	1.05
S-RC	617	515	700	700	648	496	-	0.95

exp  $Q_{max}$ : 終局耐力 (実験), exp  $Q_{sc}$ : せん断ひび割れ耐力 (実験)  
cal  $Q_{bu}$ : 付着割裂耐力 (文献 3), cal  $Q_{bu}'$ : 付着割裂耐力 (文献 1)  
cal  $Q_{su}$ : せん断終局耐力 (文献 1), cal  $Q_{sc}$ : せん断ひび割れ耐力 (文献 1)

### 4 横補強ひずみ分布

それぞれの試験体における横補強筋のひずみ分布の推移を図-6 に示す。B シリーズでは横補強筋 1 本あたり 3 箇所計測したひずみには顕著な差はなかった。そのため図-6 では 3 枚のひずみゲージの平均値を取っている。また LPRC シリーズではひずみ増分を表すため導入した緊張力のひずみを実験値より引いている。

せん断破壊した S-RC ではせん断ひび割れが生じた部材中央部においてひずみが大きくなるのに対し、S-LPRC ではプレストレスの効果によりせん断ひび割れが生じてもひずみ増分が小さく抑えられている。付着破壊した B-RC と B-LPRC も比べてもプレストレスを導入することで部材中央部においてひずみの増加を抑えられているのがわかる。

せん断破壊した場合、せん断ひび割れの幅の増加に伴って最大耐力後も横補強筋のひずみは増えつづけるのに対して、付着破壊した場合は最大耐力後のひずみ増加は比較的小さいことが特徴的である。

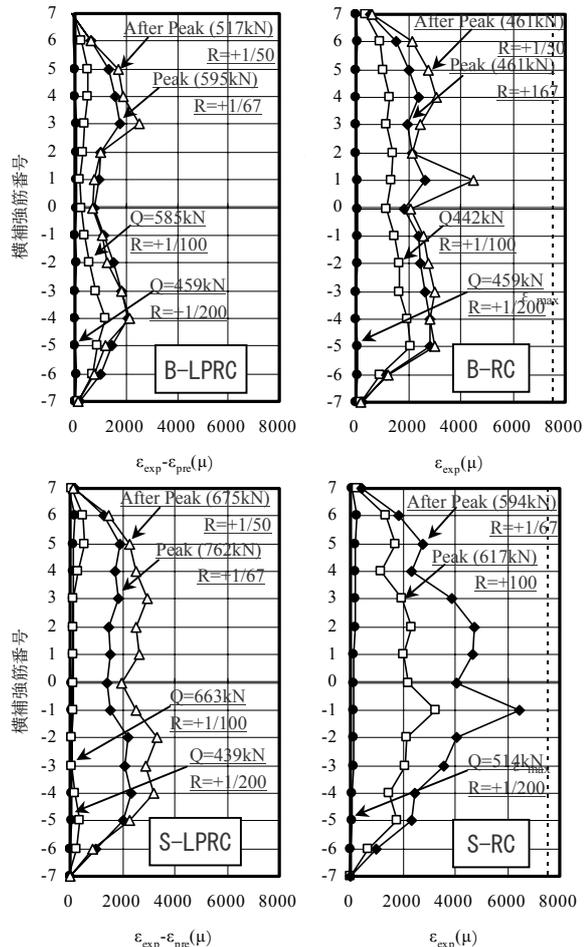


図-6 横補強筋ひずみ分布の推移

## 5 ひび割れ幅

### 5.1 ひび割れ分布およびひび割れ幅

図-7 に横補強筋上に生じたひび割れ幅を角度補正した合計ひび割れ幅  $\Sigma_{exp} w'$  を示し、さらに合計ひび割れ幅が最大となる横補強筋上のひび割れ幅を、横軸のせい面の水平方向に対しプロットしたものを示す。プレストレスを導入した試験体 (B-LPRC, S-LPRC) はプレストレスを導入していない試験体 (B-RC, S-RC) と比べひび割れ幅を抑制していることがわかる。

S シリーズではプレストレスを与えることによりせん断ひび割れは分散することができるが、B シリーズではプレストレスを導入しても、せん断ひび割れは局所化し、ひび割れの多くは主筋沿いに発生している。

### 5.2 最大ひび割れ幅の推移

図-5 の●で示した最大ひび割れ幅  $w$  とせん断力との関係を図-8 に示す。RC で比較するとせん断破壊した場合、ひび割れが局所化し最大ひび割れ幅が大きくなるのに対し、付着破壊では最大ひび割れ幅自体は小さい。プレストレスの効果により最大ひび割れ幅は大きく抑えられているものの、付着破壊した場合の方が大きなひび割れ幅が生じている。これは、S-LPRC ではせん断ひび割れが分散しひび割れ角度  $\theta$  が大きいのに対し B-LPRC ではせん断ひび割れ角度  $\theta$  が小さいためと考えられる。(図-5)。

図-5 の○で示した B シリーズのひび割れ幅とひび割れ滑りの関係を図-9 に示す。B-LPRC では点線で囲んでいる部分では、ひび割れ幅が大きく開いているように見えるが、これは柱脚部にせん断ひび割れが生じたためである。B-RC はせん断ひび割れが生じていないにも関わらず滑りが発生する箇所も B-LPRC と比べ多く、また滑り量も大きい。これよりプレストレス導入によって最大ひび割れ幅とひび割れによる滑りも抑制する効果があることがわかる。

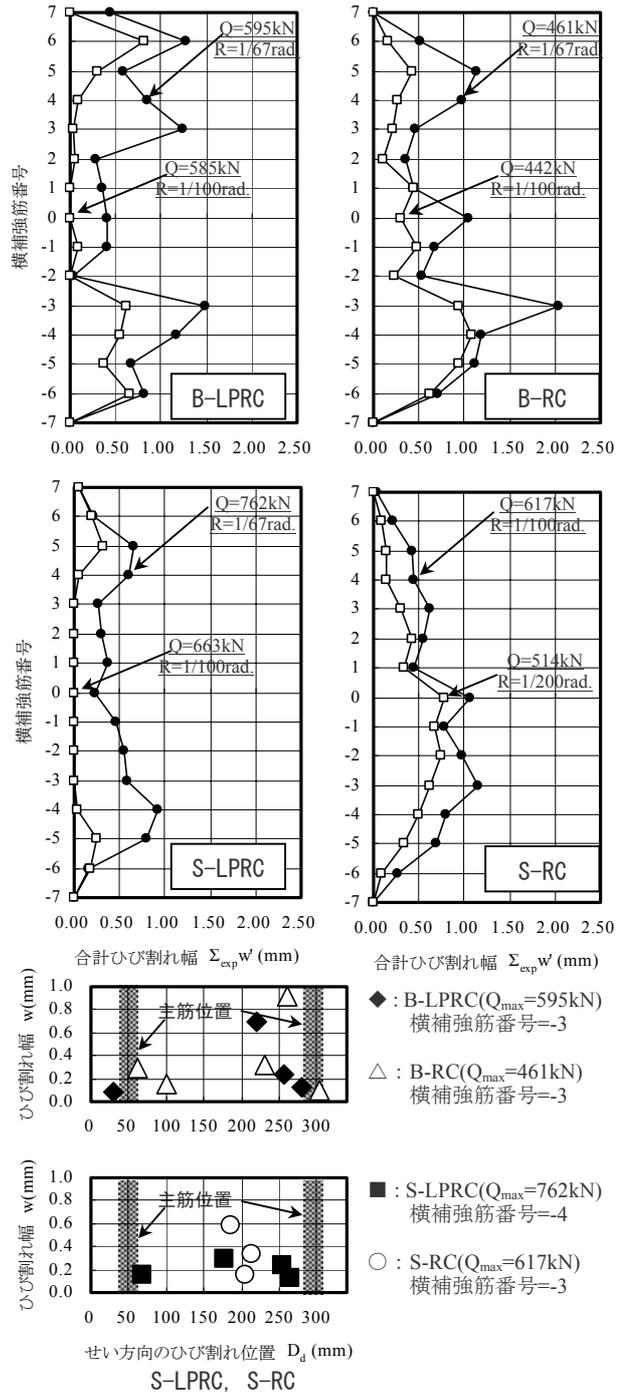


図-7 ひび割れ分布

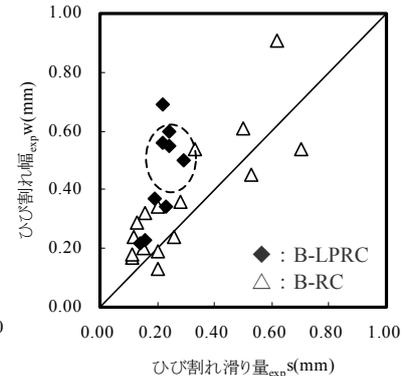
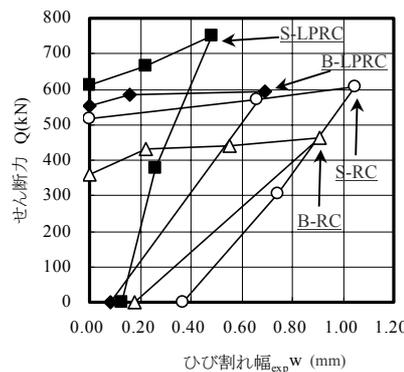


図-8 せん断力 - 最大ひび割れ幅関係

図-9 ひび割れ幅 - 滑り関係

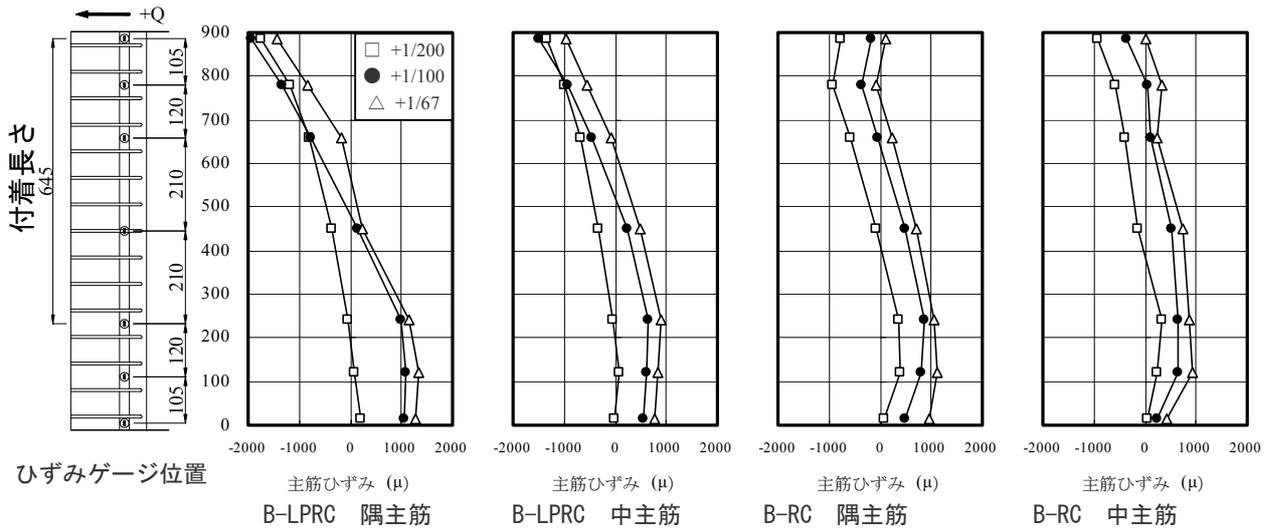


図-10 主筋ひずみ分布

## 6 付着割裂強度の検討

### 6.1 主筋応力度分布

図-10 に主筋ひずみゲージ位置と B-LPRC, B-RC のひずみゲージより得た各サイクルにおける隅主筋と中主筋のひずみ分布の推移を示す。各試験体とも軸力導入時のひずみは  $300\mu$  程度であった。いずれの主筋も降伏はしていない。B-RC 試験体も変形が進むにつれ圧縮端も引張に移行していき、また引張端のひずみも小さいことから、ひずみ勾配が小さくなっている。それに対し、B-LPRC では圧縮端も引張側に移行していくがその傾向は小さく、また引張端も引張側にひずみ移行してくことからひずみ勾配が大きくなり、良好な付着性状を示していることがわかる。

### 6.2 平均付着応力度—せん断力関係

部材内法長さからひずみ勾配がない領域を引いた区間 (645mm) を付着長さとし、付着長さ区間端部のひずみゲージより得られた応力度の勾配よりもとめた平均付着応力度とせん断力の関係を図-11 に示す。なお点線は藤井式による付着割裂強度である。また各試験体の最大付着応力度を表-5 に示す。

B-RC 試験体では付着ひび割れ発生時に最大付着応力度に達した後、せん断力はほぼ増加せず変形が進むにつれ急激に付着応力が低下していく。B-LPRC では、せん断ひび割れ発生後付着

応力度の頭打ちにあうが、最大耐力に至るまで高い付着応力度を示している。特に隅主筋ではプレストレスによる拘束が良好であるため中主筋と比べ高い付着応力度が発揮されている。この傾向は能動的な拘束の効果が隅主筋と中主筋で異なることを示している。

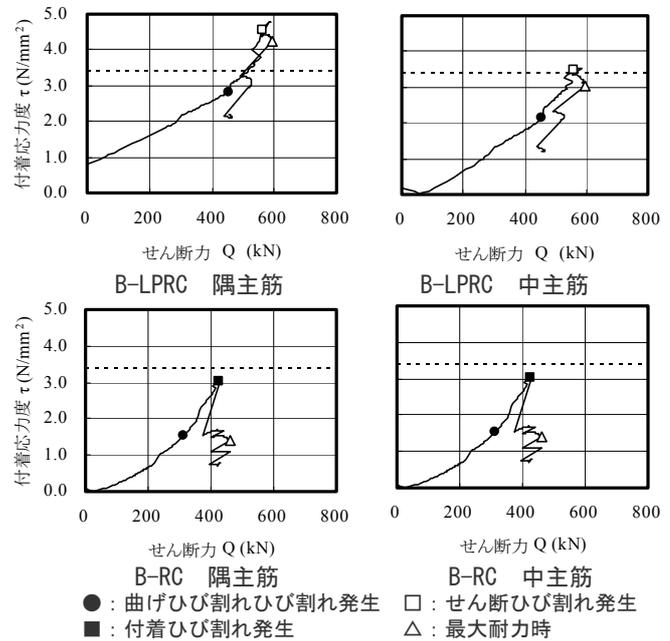


図-11 付着応力度—せん断力

表-5 各最大付着応力度

	LPRC		RC	
	隅主筋	中主筋	隅主筋	中主筋
cal $\tau_{bu}$	3.41		3.44	
exp $\tau_{max}$	4.80	3.52	3.07	3.07

※ cal  $\tau_{bu}$  は藤井式<sup>3)</sup>より算出

単位 (N/mm<sup>2</sup>)

### 6.3 付着応力度の維持

B-LPRC, B-RC の中主筋, 隅主筋での付着応力度  $\tau_{exp}$  を藤井式によって算出した  $\tau_{cal}$  で基準化した。  $\tau_{exp} / \tau_{cal}$  と部材角  $R$  の関係を包絡線によって付着応力の維持率として図-12 に示す。

B-RC では, 付着ひび割れ発生後急激に付着応力が低下し, 最大耐力時においては維持率が 5 割以下に低下している。それに対し, B-LPRC ではせん断ひび割れ発生後最大耐力まで良好な付着性状を保ち, 最大耐力経過後急激な付着応力低下を示している。プレストレスの影響により付着伝達能力が向上したことで, 最大耐力時においても良好な維持率を示している。

付着破壊した B-RC では部材全域において歪が大きく, 最大耐力後も増え続ける。かぶりコンクリートに割裂ひび割れが生じると共に横補強筋のひずみが増大する。つまり, 横補強筋は割裂の付着抵抗を保持し, 劣化の進展を妨げることに有効であることは周知のとおりである。それに対し横方向プレストレスを導入している B-LPRC では, 横補強筋のひずみ増分が少なく, 横補強筋上の合計ひび割れ幅  $\Sigma_{exp} w'$  が小さく抑えられている (図-7)。プレストレスがひび割れの開口を拘束するため, 主筋に側圧が作用し,

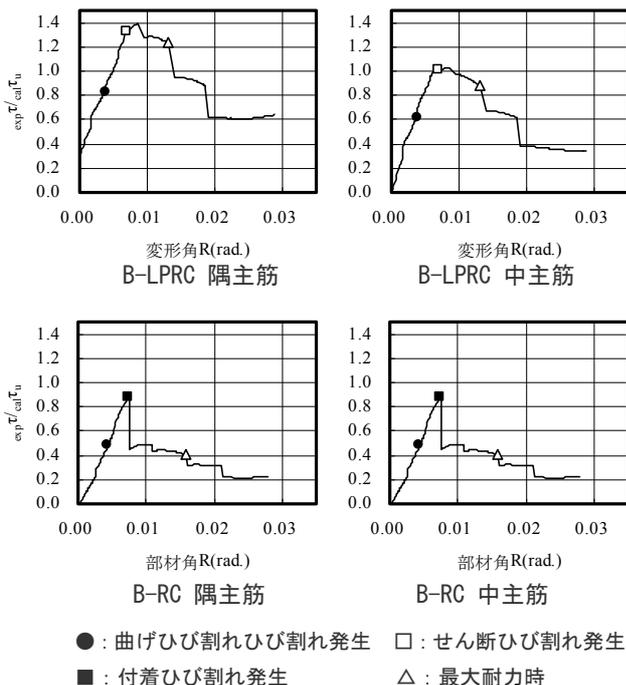


図-12 付着応力度の維持率

ふしのかみ合い効果が発揮され付着抵抗を保持し, 劣化の進展を妨げることに有効であることを示している。

### まとめ

本研究により以下の知見が得られた。

- 1) 横方向プレストレスの影響によりひび割れ幅およびひび割れによる滑りを抑制することができる。
- 2) プレストレスを導入し能動的拘束に横拘束すると, 主筋の最大付着応力度が上昇する。この上昇は中主筋に比べ, 隅主筋の方がより大きい。
- 3) 横方向プレストレスによって能動的に拘束することでひび割れ発生後割裂面を抑え, 付着抵抗を維持し劣化の進展を妨げる。

謝辞：高周波熱錬（株）には鉄筋をご提供いただきました。ここに関係者各位に深く感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 渡部洋, 香取慶一, 篠原保二, 林静雄: 横方向プレストレスによる鉄筋コンクリート柱のせん断ひび割れ制御と終局耐力の評価, 日本建築学会構造系論文報告集, NO.557, pp.109~116, 2004.3
- 2) 篠原保二, 宮野覚也, 渡部洋, 林静雄: 横方向プレストレスを導入した鉄筋コンクリート柱の能動的拘束効果と破壊メカニズムに関する解析的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No.578, pp.115~pp.122, 2004.4
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999
- 4) 宮野覚也, 篠原保二, 渡部洋, 林静雄: 横方向プレストレスによるRC柱のせん断ひび割れ抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.223~229, 2004.7
- 5) 藤井栄, 森田司郎: 異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究, 日本建築学会論文報告集, No.319, pp.47~54, 1982.9