

論文 横方向プレストレスを導入した高強度コンクリート柱のせん断挙動に関する研究

渡部 洋^{*1} ・ 朴 世万^{*2} ・ 篠原 保二^{*3} ・ 林 静雄^{*4}

要旨：これまで横補強筋を用いて横方向にプレストレスを与えることにより，Fc45 級以下の柱部材でせん断ひび割れの抑制効果と終局耐力の向上を確認してきた。本研究では，軸力比を 0.15 と一定に設定した普通強度（Fc45）と高強度（Fc90）コンクリート柱の横方向にプレストレスを導入し，曲げせん断実験を行い，横方向プレストレスが高強度コンクリート柱のせん断ひび割れ性状および終局耐力に与える影響を明らかにすることを目的とする。

キーワード：横方向プレストレス，高強度コンクリート，ひび割れ，せん断挙動，軸力比

1. はじめに

フリープランのニーズによる柱間の長スパン化，高層化に伴う下層階柱の長期鉛直荷重増大及び地震時の高せん断応力負担などによって，鉄筋コンクリート造建物における高強度材料の使用は必要不可欠であり，今後も更なる高強度化が進むと考えられる。さらに鉄筋コンクリート構造の柱の靱性を高める目的で，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することにより，Fc45 級以下の柱の曲げせん断実験¹⁾および数値解析²⁾からプレストレスの導入によるせん断ひび割れ耐力の上昇およびひび割れ幅抑制のメカニズムが明らかにされてきた。

そこで，本研究では横方向プレストレスを導入した高強度コンクリート（Fc90）柱部材の曲げせん断破壊に着目することにした。主筋，横補強筋に複数枚のひずみゲージを貼付し，ひずみ分布の計測を行い，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，使用した材料特性を表-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，コンクリート強度（Fc45 と Fc90），横補強筋径（U6.4 と U9.0）を変動要因としてせん断破壊するよう RC 規準³⁾を参考に設計した。今回は軸力比が 0.15 の 4 体（0.15 シリーズ）の実験を行い，[文献 2] で報告した軸力比 0.3 の 2 体（0.3 シリーズ）を比較のために取り上げた。全試験体とも付着

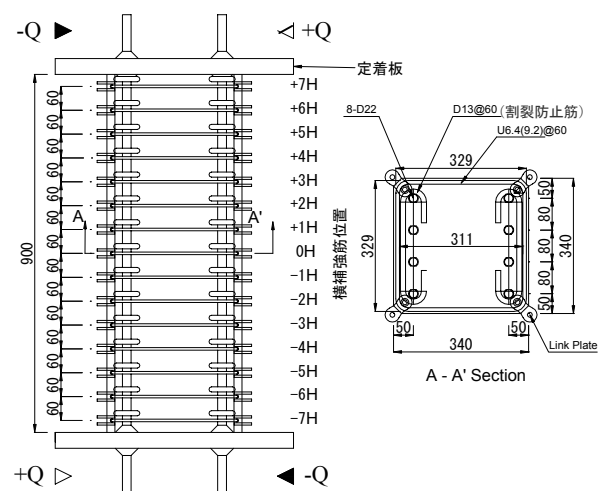


図-1 試験体詳細

*1 長崎総合科学大学講師 建築学科 工博 （正会員）

*2 (株) アイ・テック 工修

*3 東京工業大学助教授 建築物理研究センター 工博 （正会員）

*4 東京工業大学教授 建築物理研究センター 工博 （正会員）

表－1 試験体諸元

試験体名	$b=D$ (mm)	d_w (mm)	σ_B (N/mm ²)	σ_0/σ_B	S (mm)	p_w (%)	p_{wb} (%)	p_g (%)	主筋	σ_L (N/mm ²)	σ_L/σ_B
RC45-0.15	340	6.4 (D13*)	44.2	0.15	60	0.29	1.54	2.68	8-D22	0.0	0.0
LPRC45-0.15			46.2							1.5	0.032
RC90-0.15	340	9.0 (D13*)	91.9	0.15	60	0.63	1.90	2.68	8-D22	0.0	0.0
LPRC90-0.15			93.0							2.7	0.029
RC45-0.3	340	6.4 (D13*)	46.5	0.30	60	0.29	1.54	2.68	8-D22	0.0	0.0
LPRC45-0.3			50.8							1.6	0.031

b : 断面の幅 D : 断面せい d_w : 横補強筋の径 σ_0 : 柱の軸方向応力度 σ_B : シリンダーコンクリートの圧縮強度 S : 横補強筋間隔 p_w : 横補強筋比 p_{wb} : 付着割裂耐力計算用横補強筋比 p_g : 主筋比 σ_L : 横方向プレストレス ($=\sigma_{wp}\times p_w$) *割裂防止筋

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ていない試験体をRCとし, さらにコンクリート強度と軸力比を加えて試験体名とした。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。導入した横拘束量は, コンクリート強度 σ_B に対する横方向プレストレス σ_L をほぼ一定 ($\sigma_L/\sigma_B=0.03$) とするため, Fc45 は横補強筋 (U6.4) の降伏強度の 34%, Fc90 は横補強筋 (U9.0) の降伏強度の 30% の緊張力を加えプレストレスを与えている。両シリーズともコンクリートは縦打ちで行い, Fc45 は早強ポルトランドセメント, Fc90 はシリカフェームセメントを使用した。

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 0.15 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た。載荷は, 部材角 $R=\pm 1/400, \pm 1/200, \pm 1/100, \pm 1/67, \pm 1/50, \pm 1/33$ 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交方向距離 w をひび割れ幅として計測し, 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 θ (ひび割れ角度) を用いて角度補正した w' を用いて評価する。

表－2 材料特性

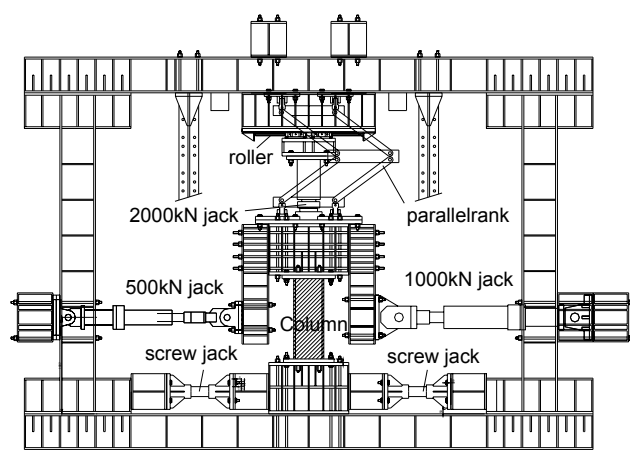
鉄筋

種類	σ_y (N/mm ²)	σ_{max} (N/mm ²)	E_s (N/mm ²)
D22	1187	1298	1.96×10^5
U6.4	1471	1506	2.05×10^5
U9.0	1405	1466	2.05×10^5

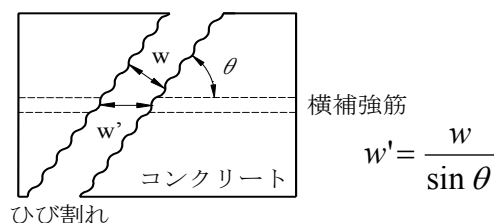
コンクリート

試験体名	σ_B (N/mm ²)	σ_t (N/mm ²)	E_c (N/mm ²)
RC45-0.15	44.2	2.62	3.34×10^4
LPRC45-0.15	46.2	2.75	3.41×10^4
RC90-0.15	91.9	5.29	4.21×10^4
LPRC90-0.15	93.0	5.29	4.30×10^4

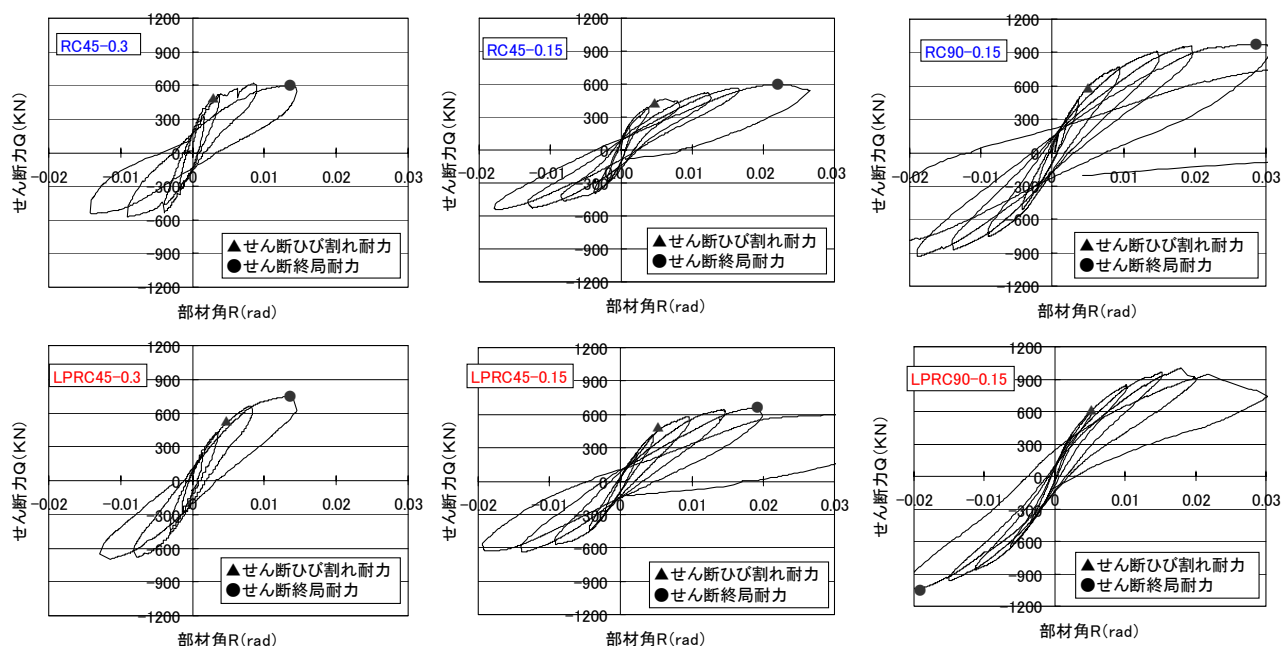
σ_y : 降伏応力度 σ_{max} : 最大応力度 E_s : 鉄筋弾性係数
 σ_B : コンクリート圧縮強度 σ_t : コンクリート引張強度
 E_c : コンクリート弾性係数



図－2 試験体加力装置



図－3 ひび割れ幅の定義



図－4 せん断力 Q-部材角 R 関係

表－4 実験結果・計算値一覧

試験体名	σ_B (N/mm ²)	$exp Q_{sc}$ (kN)	$exp Q_{su}$ (kN)	$cal Q_{sc}$ (kN)	$cal Q_{scII}$ (kN)	$cal Q_{su}$ (kN)
RC45-0.15	44.2	343	595	339	339	547
LPRC45-0.15	46.2	475	658	350	450	557
RC90-0.15	91.9	562	973	564	564	916
LPRC90-0.15	93.0	780	1048	569	774	921
RC45-0.3	50.8	515	617	496	496	567
LPRC45-0.3	46.5	611	762	465	595	592

$exp Q_{sc}$:せん断ひび割れ耐力実験値

$exp Q_{su}$:終局耐力実験値

$cal Q_{sc}$:靱性指針⁴⁾より求めたせん断ひび割れ耐力

$cal Q_{scII}$:文献 1 より求めたせん断ひび割れ耐力

$cal Q_{su}$:RC規準³⁾より求めたせん断耐力

σ_B :コンクリート強度

3. 実験結果

図－4 に 0.15 シリーズと 0.3 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

破壊過程としては全試験体とも、せん断力の増加に伴い曲げひび割れ、曲げせん断ひび割れが生じた後、せん断ひび割れが発生し、圧縮側端部のコンクリートが圧壊し、最大耐力に達した。0.3 シリーズの RC45-0.3 は 1/100 で、LPRC45-0.3 は 1/67 で、0.15 シリーズの RC45-0.15 は 1/33 で、LPRC45-0.15 は 1/50 で、RC90-0.15 は 1/33 で、LPRC90-0.15 は 1/50 で、最大耐力に達した。以上より軸力比の低下により変形性能が大きくなったことが分かった。

3.2 耐力検討

実験より得られたせん断ひび割れ耐力 $exp Q_{sc}$ を断面積で除した平均せん断ひび割れ応力 $exp \tau_{sc}$ ($=exp Q_{sc} / bD$) と横方向プレストレス σ_L の関係及び最大耐力の実験値を断面積で除した平均最大せん断応力 τ_{su} と横方向プレストレス σ_L の関係を図－6 に示す。なお、横拘束効果によるコンクリート強度への影響を確かめるために、横方向プレストレス σ_L はコンクリート強度 σ_B で除して基準化した。

これよりせん断ひび割れ応力 $exp \tau_{sc}$ は、RC シリーズ、LPRC シリーズともに、軸力比とコンクリート強度の増大によりその上昇を確認できた。せん断終局応力 $exp \tau_{su}$ についても、RC シリーズ、LPRC シリーズともに、コンクリート強度の増大による上昇を確認できた。さらに RC45 シリーズ

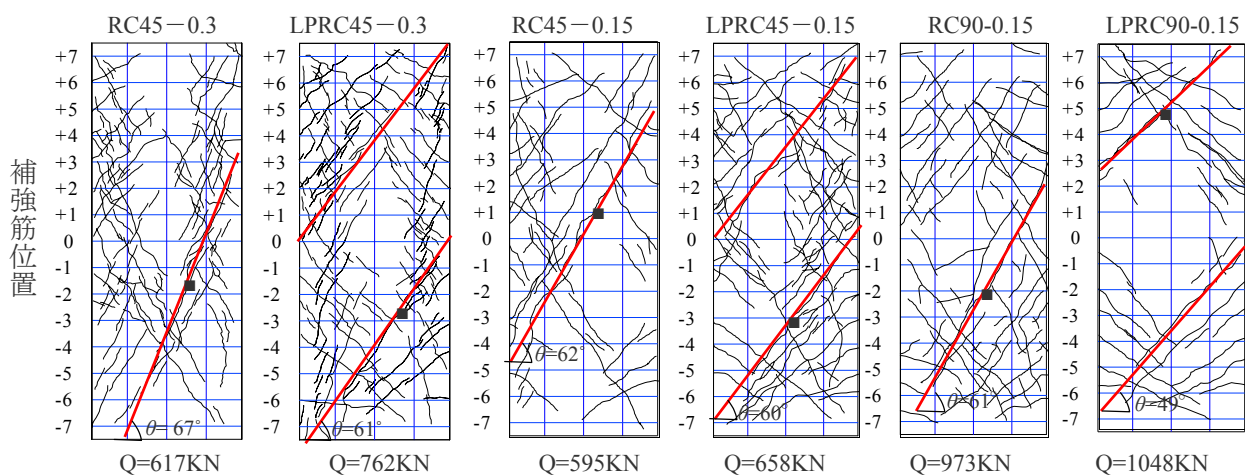


図-5 最大耐力時のひび割れ図

は軸力比の低下に影響されず τ_{su} はある程度一定を保つが、LPRC45 シリーズは軸力低下により横拘束効果が減少している。

続いて、せん断ひび割れ応力について、靱性指針に採用されているモール円を用いてプレストレスの影響を考慮した提案式¹⁾の計算値を図-7に示す。実験値を計算値で除した平均値は1.02, 変動係数 0.02 と非常に良い予測精度を示した。せん断終局応力については、提案式¹⁾は軸力が低下すると終局強度を過大評価するため、今後検討を要する。軸力の影響を考慮した荒川^{mean}式³⁾は、RCシリーズの実験値を計算値で除した平均値は0.99, 変動係数0.005 と非常に良い予測精度を示した。LPRCシリーズの実験値を計算値で除した平均値は1.18, 変動係数0.002となり、横方向プレストレスを導入したことによるせん断耐力上昇が確認できた。

3.3 横補強筋ひずみ分布

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²⁾、3 枚の横補強筋ひずみケージの平均値を取った。最大耐力時の平均ひずみ分布を図-8に示す(横補強筋位置は図-1を参照)。なお、LPRCシリーズにおいてはプレストレス導入時のひずみも加算している。分布を見るとRCシリーズでは試験体腹部においてひずみが最も大きくなっているのに対し、LPRCシリーズでは横補強筋位置±4 近辺において最もひずみが大きくなっている。RC45 シリーズは、軸力比の減少により補強筋ひずみが大き

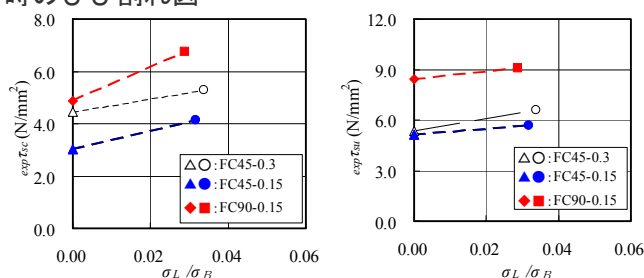


図-6 横方向プレストレスと耐力関係

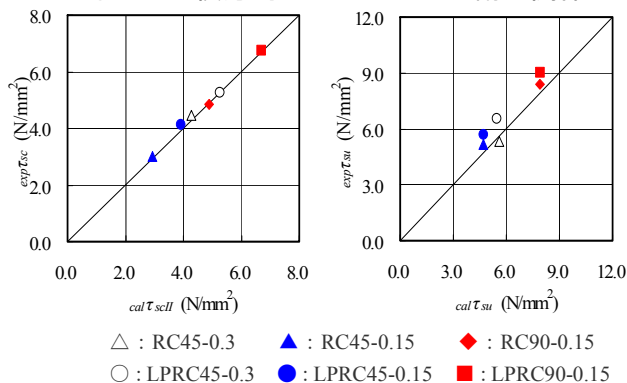


図-7 実験値と計算値の比較

くなるが、LPRC45 シリーズは大きな差がなかった。Fc90 シリーズの補強筋比は Fc45 シリーズの約 2 倍であるため、最大耐力時の最大補強筋ひずみが抑えられている。また LPRC90-0.15 試験体はコンクリート強度に伴う横方向プレストレスの増加により、最大横補強筋ひずみ増分を小さく抑えられることを確認できた。

4. せん断ひび割れ性状

4.1 横補強筋上の合計ひび割れ幅分布

ひび割れ計測を行った最大耐力時の合計ひび割れ幅分布を図-9に示す。なお、ここでのひび割れ幅は合計するため全て角度補正されたひび

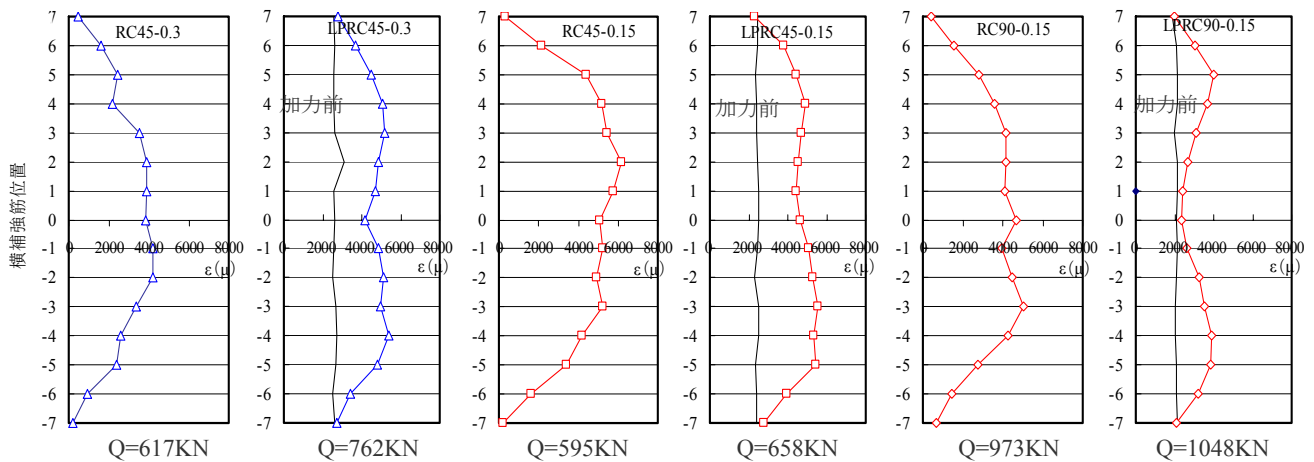


図-8 横補強筋ひずみ分布

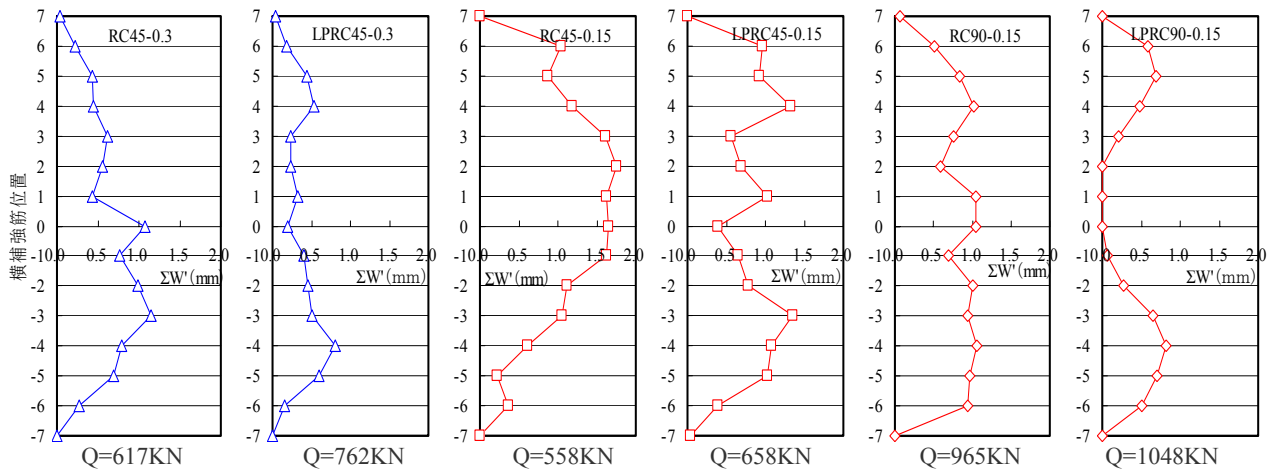


図-9 合計ひび割れ分布

割れ幅 w' を用いた。せん断ひび割れが発生してからひび割れ幅計測を行った結果、最大耐力時の合計ひび割れ幅はそれぞれ、RC45-0.3 は 1.1 mm, LPRC45-0.3 は 1mm, RC45-0.15 は 1.75mm, LPRC45-0.15 は 1.35mm, RC90-0.15 は 1.1mm, LPRC90-0.15 は 0.8mm となった。これらから RC45 シリーズ, LPRC45 シリーズとも軸力比の低下により合計ひび割れ幅が大きくなることが分かった。Fc90 シリーズは Fc45 シリーズより補強筋比が約 2 倍であるため、最大耐力時合計ひび割れ幅は抑制される結果となった。また、LPRC90-0.15 試験体はコンクリート強度に伴う横方向プレストレスの増加により、合計ひび割れ幅が抑えられており、その分布は最大耐力時の横補強筋ひずみ分布と同じ傾向を見せた。

4.2 最大ひび割れ幅

図-10 に部材に生じたせん断ひび割れ幅の履歴をせん断力 Q と最大せん断ひび割れ幅 $expW_{max}$

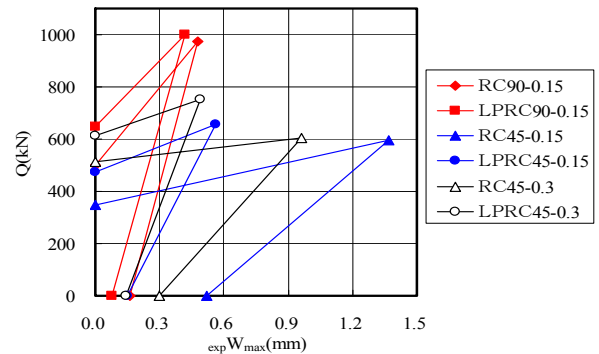


図-10 せん断応力と最大ひび割れ幅の関係

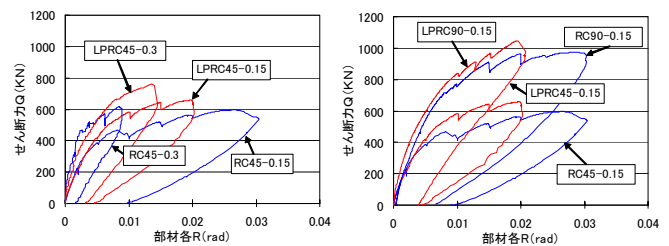


図-11 せん断力 Q - 部材角 R 包絡線

表-6 各試験体平均ひび割れ角度

試験体名	RC45-0.3	LPRC45-0.3	RC45-0.15	LPRC45-0.15	RC90-0.15	LPRC90-0.15
角度(度)	69	62	64	61	65	55

の関係で示す。なお、ここでの最大せん断ひび割れ幅とは、横補強筋上だけではなく、試験体のせい面で計測されたもののうち最も大きなせん断ひび割れ幅とした。グラフはせん断ひび割れ耐力（ひび割れ幅 0 mm）から始まり、せん断応力がほぼ 0 に戻った時点の $_{exp}W_{max}$ すなわち残留せん断ひび割れ幅までを示している。最大せん断ひび割れ幅を測定した位置を図-5 に■で示す。せん断剛性はひび割れ幅の拡大に伴って指数関数的に減少する⁵⁾。なお、せん断剛性の相違は図-11 のようにせん断力 Q —部材角 R の包絡線を作成して比較した。RC45 シリーズは、軸力比の低下による最大せん断ひび割れ幅の増加がLPRC45 シリーズより顕著に現れ、せん断剛性低下が大きくなった。Fc90 シリーズの補強筋比はFc45 シリーズの約 2 倍であるため、最大耐力時の最大ひび割れ幅抑制効果は大きくなり、せん断剛性低下は余り見られなかった。

4.3 試験体ひび割れ角度

試験体のせい面でひび割れ幅が最も大きいひび割れを近似し引いた直線を図-5 に示す。その直線と横補強筋がなすひび割れ角度 θ を図-3 に示す。さらにせん断ひび割れが卓越する横補強筋+4〜-4 の各ひび割れ角度 θ の平均値を表-6 に示す。これより RC45 シリーズは軸力比の低下によりひび割れ角度と平均ひび割れ角度が小さくなる傾向があるが、LPRC45 シリーズはほぼ同程度となった。さらに 0.15 シリーズの RC45 と RC90 のひび割れ角度は横補強筋量の影響を受けないが、LPRC シリーズはコンクリート強度に比例した横方向プレストレスを導入したことにより、ひび割れ角度が小さくなっている。

5. まとめ

本研究より以下の知見が得られた。

- 1) コンクリート強度に対して一定量の横方向プレストレスを導入することにより、せん断ひび割れ耐力、せん断終局耐力は上昇し、せん断ひび割れ幅を抑えられることを確認した。またこれらは、残留ひび割れ幅について

も抑えることができる。

- 2) 横方向プレストレスを導入した普通強度コンクリート試験体は、軸力比の低下によるひび割れ角度の明確の変化はないが、せん断終局耐力の上昇割合は小さくなることがわかった。横方向プレストレスを導入していない試験体は軸力比の低下によりひび割れ角度が小さくなるが、せん断終局耐力にはそれによる明確な影響は見られなかった。

今後は 3 次元有限要素解析によりコンクリート強度と軸力比に対する横方向プレストレスによる拘束効果の影響およびそのメカニズムを明らかにする予定である。

謝辞：

本研究は東京工業大学建築物理研究センター共同研究の一貫として行われたものであります。本研究を行うにあたり、貴重な御助言と多大な協力を賜った高周波熱錬（株）、（株）デイ・シイセメント、（株）フローリック、（株）ポゾリス物産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集，No.557，pp.109-116，2004.3
- 2) 篠原保二，宮野覚也，渡部洋：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せん断ひび割れ性状，日本建築学会構造系論文集，No.587，pp.147-153，2005.1
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，1999
- 4) 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
- 5) 篠原保二，金子葉：コンクリートの破壊進行領域における圧縮せん断挙動に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No.525，pp.1-6，1999.11