

論文 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

宮野 覚也^{*1}・篠原 保二^{*2}・渡部 洋^{*3}・林 静雄^{*4}

要旨：鉄筋コンクリート柱におけるせん断ひび割れの発生を防止，あるいはひび割れ幅を制御するため，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，せん断ひび割れと横補強筋のひずみ分布に着目した実験を行った。最大耐力時の合計ひび割れ幅の最大値には大きな差は生じなかったが，横方向プレストレスを導入することで最大せん断ひび割れ幅を小さく抑えられること。また，ひび割れが水平方向に分散することにより，せん断剛性の低下が抑制され，柱の一体性が保持されることが分かった。

キーワード：横方向プレストレス，ひび割れ性状，ひずみ分布，ひび割れ制御

1. はじめに

鉄筋コンクリート柱の耐久性向上を目的として，せん断ひび割れの発生を防止，あるいはひび割れ幅を制御するため，柱に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，実験¹⁾・解析²⁾的研究を行ってきた。これらの研究により横方向プレストレスを導入することによるせん断ひび割れ耐力，せん断終局耐力の向上や，ひび割れ発生後のせん断抵抗力の上昇に寄与する内部応力状態を明らかにしてきた。

本研究では，せん断ひび割れ幅とこれに密接に関わってくる横補強筋のひずみに着目し，横補強筋上のひび割れ幅をデジタルマイクロスケープ（最小目盛：0.01 mm）で全て計測し，さらに横補強筋に複数枚のひずみゲージを貼付した実験を行った。この実験に基づき横方向プレストレスを導入することによるせん断ひび割れ性状を検討することを目的としている。

2. 実験概要

2.1 試験体

今回行った試験体詳細を図 - 1 に，試験体諸

元を表 - 1 に示す。横方向プレストレス量が異なる試験体 2 体である。

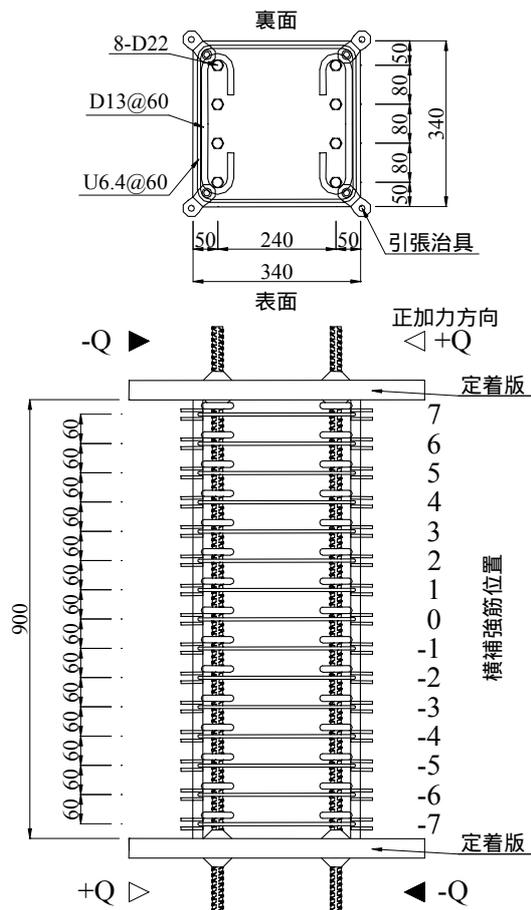


図 - 1 試験体詳細 (RC, LPRC)

*1 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 (修士) (正会員)
 *2 東京工業大学 建築物理研究センター 助教授 博士(工学) (正会員)
 *3 長崎総合科学大学 工学部 建築学科 講師 博士(工学) (正会員)
 *4 東京工業大学 建築物理研究センター 教授 博士(工学) (正会員)

表 - 1 試験体諸元

試験体名	$b=D$ (mm)	M/QD	S (mm)	p_w (%)	p_{wb} (%)	σ_θ/σ_B	σ_{wp} (N/mm ²)	σ_{wp}/σ_{wy}	σ_L (N/mm ²)
RC	340	1.3	60	0.29	1.54	0.30	0	0.00	0.0
LPRC							536	0.37	1.6

b : 柱幅, D : 柱せい, M/QD : せん断スパン比, p_w : プレストレス導入に用いる横補強筋比, p_{wb} : 付着割裂耐力の向上に有効な横補強筋比, σ_θ : 軸応力, σ_{wp} : 横補強筋一本辺りに与える緊張応力, σ_{wy} : 横補強筋降伏強度, σ_L : 横方向プレストレス

また, 使用した鉄筋の材料特性を表 - 2 に, コンクリートの材料特性を表 - 3 に示す。プレストレス導入の無い RC 試験体をせん断破壊先行型の破壊モードとなるよう靱性指針³⁾を参考に計画した。両試験体とも, 付着割裂を伴わない破壊モードとなるよう普通強度の副補強筋 (D13) を有している。プレストレス導入に用いる外周を取り巻く高強度の溶接閉鎖角型補強筋 (U6.4) を以降, 横補強筋と呼称する。横方向プレストレス導入方法は文献 1 を参照されたい。LPRC 試験体では, プレストレス導入による耐力の向上率を知るため, 文献 1 の中間的な, 横補強筋降伏強度の約 40 % の緊張力を与えた。プレストレス導入に用いた横補強筋比と, 軸力を付加する直前の横補強筋応力度の積 ($p_w \sigma_{wp}$) を横方向プレストレス σ_L と定義する。

2.2 加力および測定方法

加力装置を図 - 2 に示す。鉛直方向の加力は軸力比 0.3 で荷重一定制御とした。水平方向の加力は変位制御による逆対称正負交番载荷とし, 各 1 回づつ柱の部材角, $R = \pm 1/400, \pm 1/200, \pm 1/100, \pm 1/67, \text{および} \pm 1/50$ で終了とした。

せん断ひび割れ幅の測定は, 横補強筋を横切るひび割れが発生した時点から, 最大耐力まで試験体のせい面 (2 面) を測定した。なお, ひび割れ幅とはひび割れ長さ方向に対して直交方向の距離 w とし, 横補強筋上の合計ひび割れ幅を求める際のひび割れ角度は横補強筋とひび割れのなす角度 θ とした。ひずみゲージは一本の横補強筋に 3 枚 \times 2 (表裏のせい面) の計 6 枚貼付しており, 試験体表側から見て左が ϵ^- , 中央が ϵ^0 , 右が ϵ^+ となる。ひび割れ幅の定義とひずみゲージの位置を図 - 3 に示す。

表 - 2 鉄筋の材料特性

種類	降伏強度 σ_y (N/mm ²)	引張強度 σ_{max} (N/mm ²)	弾性係数 E_s (N/mm ²)
D22	1196	1281	1.92×10^5
U6.4	1459	1499	2.04×10^5
D13	344	488	1.92×10^5

D22 の降伏強度は 0.2% offset 値

表 - 3 コンクリートの材料特性

試験体名	圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	引張強度 σ_t (N/mm ²)	弾性係数 E_c (N/mm ²)
RC	50.8	2.9	3.51×10^4
LPRC	46.5	2.9	3.45×10^4

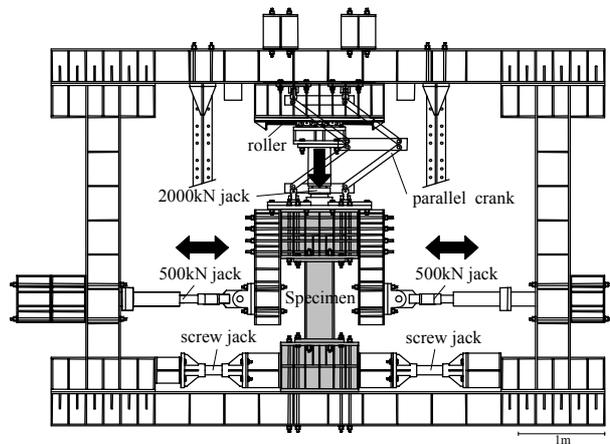
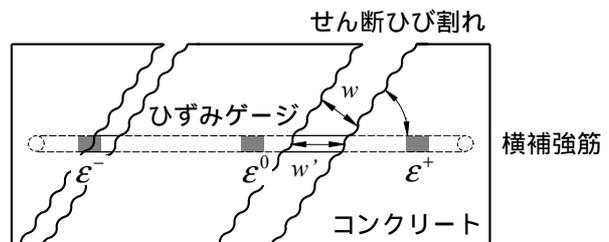


図 - 2 加力装置



角度補正したひび割れ幅 w' の求め方

$$w' = \frac{w}{\sin \theta}$$

図 - 3 ひび割れ幅の定義とひずみゲージ名

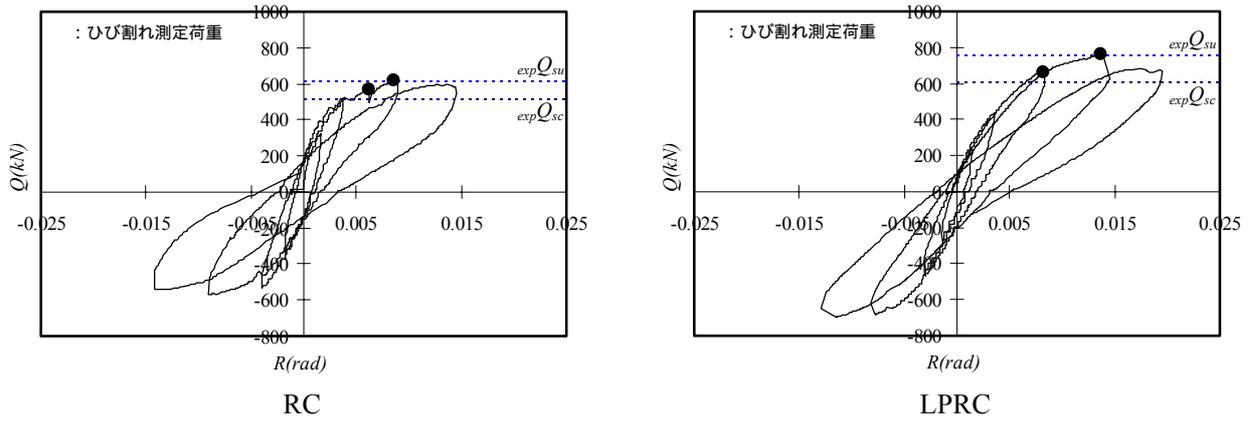


図 - 4 せん断力 Q - 部材角 R 関係

表 - 4 実験結果・計算値一覧

試験体名	$exp Q_{sc}$ (kN)	$exp Q_{su}$ (kN)	$cal Q_{sc}$ (kN)	$cal Q_{scII}$ (kN)	$cal Q_{su}$ (kN)	$cal Q_{suII}$ (kN)
RC	515	617	496	496	648	648
LPRC	611	762	465	606	628	725

$exp Q_{sc}$: 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³⁾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
 $cal Q_{su}$: 靱性指針³⁾より求めたせん断耐力
 $cal Q_{suII}$: 文献1より求めたせん断耐力

3. 実験結果

3.1 破壊過程， Q - R 関係

実験結果および諸耐力計算値一覧を表 - 4 に示す。破壊過程としては両試験体とも，せん断力の増大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，圧縮側端部のかぶりコンクリートが剥落し，RC は 1/100 で LPRC は 1/67 で最大耐力に達した。 Q - R 関係を図 - 4 に示す。

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 の関係および，最大耐力の実験値を断面で除した平均最大せん断応力 $exp \tau_{su}$ と横方向プレストレス σ_L の関係を図 - 5 に示す。なお， $exp \tau_{sc}$ はコンクリート引張強度の f_{ct} で除し，せん断圧縮で破壊が決まっていることから $exp \tau_{su}$ はコンクリート圧縮強度 f_{cd} で除して基準化した。文献 1 で行われた試験体のうち本論文での試験体と同様のせん断補強筋量，軸力比で，プレストレスの導入量が $\sigma_L=0$ と $\sigma_L=2.6$ の試験体の結果も合わせて図に白抜きでプロットしている。これより，横方向プレストレスの導入量に比例して，

$exp \tau_{sc}$ および， $exp \tau_{su}$ が向上していることが分かる。続いて，せん断ひび割れ耐力について，靱性指針に採用されている主応力度式を基に，モール円を用いて横方向プレストレスの影響を考慮した提案式¹⁾の計算値を図 - 6 に示す。実験値を計算値で除した平均値は 1.03，変動係数 0.02 と非常に良い予測精度を示した。また，横方向プレストレスを導入することによる圧縮束のひび

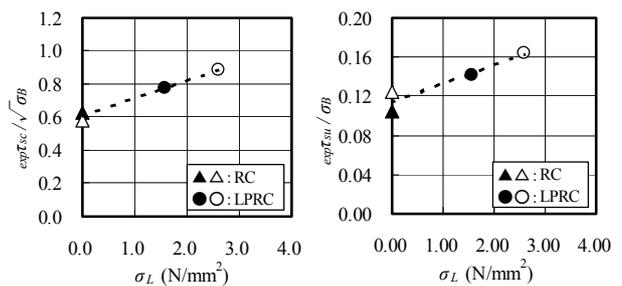


図 - 5 横方向プレストレスと耐力の関係

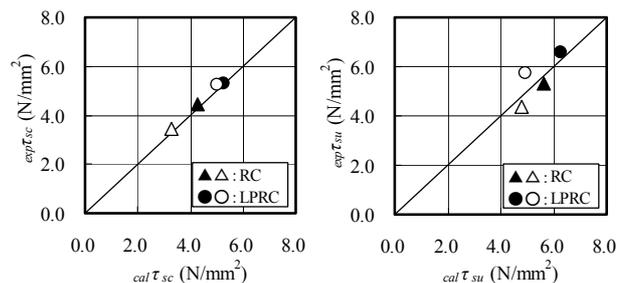


図 - 6 実験値と計算値の比較

割れの角度を考慮した提案式¹⁾の計算値を示す。平均値 1.02, 変動係数 0.01 となり横方向プレストレスを導入した試験体においても耐力の評価を行うことが出来ている。

3.3 横補強筋ひずみ分布

図 - 7 に横補強筋に貼付した最大耐力時のひずみ分布を示す。横補強筋位置は図 - 1 を参照。点線は横補強筋の降伏ひずみを示す。なお, LPRC においてはプレストレス導入時のひずみも載せている。RC では, 後述のせん断ひび割れ性状同様の傾向で, 表裏面ともに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 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。

RC では一本の横補強筋上における 3 点のひずみに最大で 2700 μ の差が生じているのに対し, LPRC では最大でも 800 μ であり, 3 点のひずみに殆ど差が生じていない。これは本論文で対象とした補強筋量の RC 試験体では急激なせん断ひび割れの進展によりひび割れが局所化し, その近辺の横補強筋のひずみが卓越したためと思われる。一方, LPRC ではせん断ひび割れの急激な進展は無く, また水平方向に分散してひび割れが進展したことで 3 点のひずみに殆ど差が生じなかったものと考えられる。このひずみ分布の差はひび割れ状況とよく対応しており, 最大耐力時主ひび割れ箇所も合わせて図 - 8 に示す。

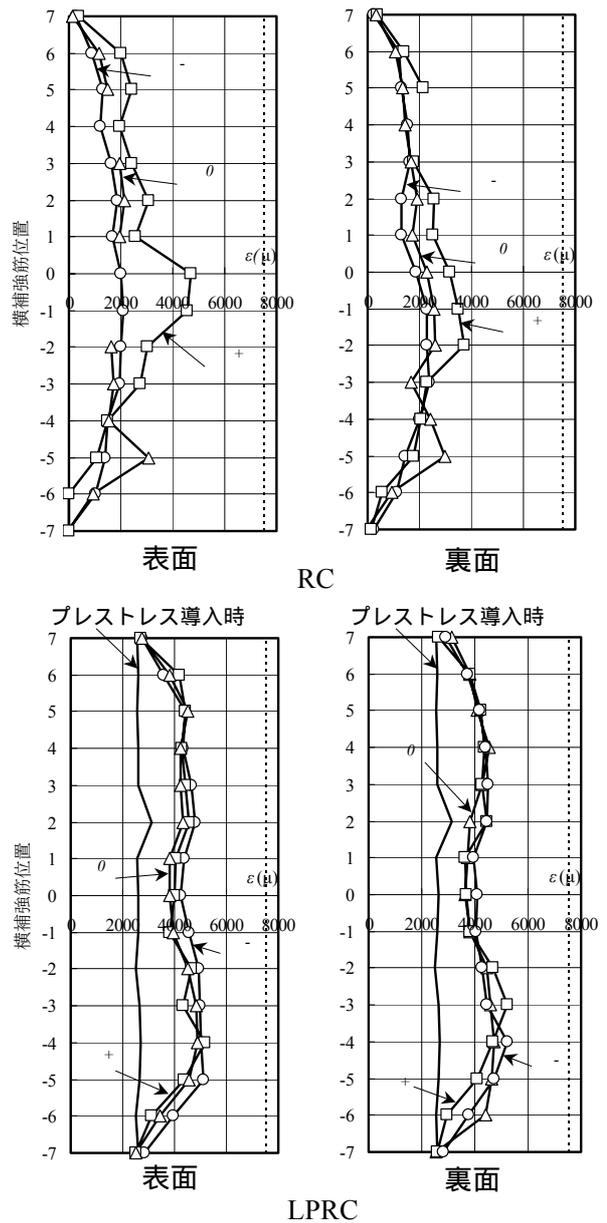


図 - 7 横補強筋ひずみ分布

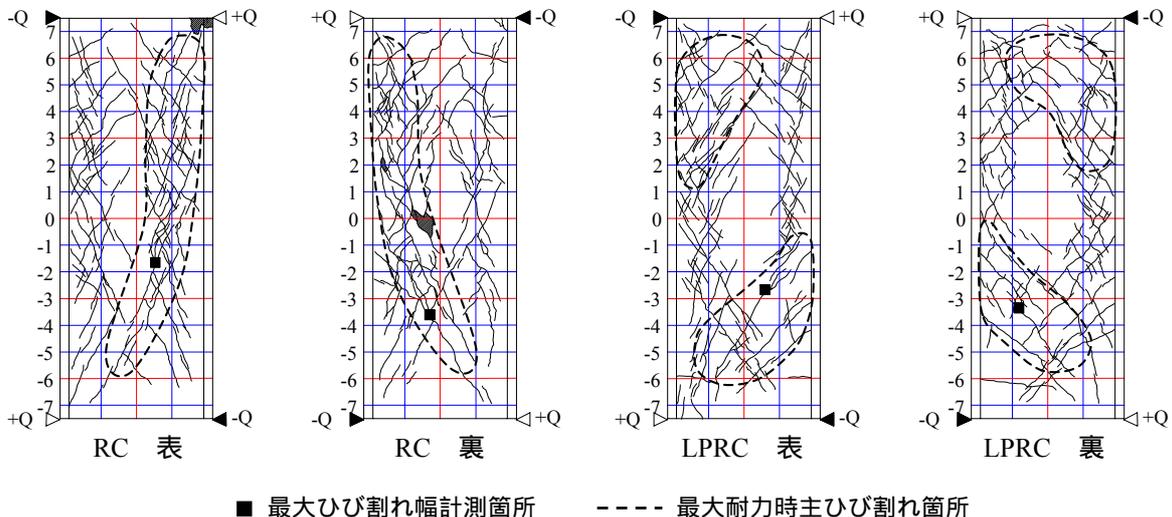


図 - 8 ひび割れ状況 最終破壊状況

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

図 - 4 の で示した荷重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、ひび割れ幅 w' を用いた。これより、RC は 515 kN でせん断ひび割れが発生してから最大耐力時（617 kN 時）には 1.1 mm まで開いている。また、LPRC は 611 kN でせん断ひび割れが発生した後、最大耐力時（751 kN 時）においては最大で約 1 mm となっており、RC とほぼ同様の合計ひび割れ幅となっている。しかし、縦軸にひび割れ幅 w を、横軸にせい面の水平方向の位置 D_d を示した、表面における合計ひび割れ幅が最大となっている位置のひび割れの分布を見ると、LPRC ではひび割れが水平方向に分散しており、RC ではひび割れが集中しているのが分かる。ひび割れによるせん断剛性はひび割れ幅の拡大に伴って指数関数的⁴⁾に減少することから、横補強筋上の合計ひび割れ幅が同じであるならば、ひび割れは水平方向に分散したほうがせん断剛性の低下は少ない。このことから、横方向プレストレスを導入することでせん断剛性低下を抑制させる効果がある。

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 $exp W_{max}$ の関係で示す。また、ここでの最大せん断ひび割れ幅とは、横補強筋上だけでなく、試験体のせい面（2 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。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 $exp W_{max}$ は残留せん断ひび割れ幅を示す。同図中の点線は、残留ひび割れ幅の制御目標値として 0.2 mm を示した。最大せん断ひび割れ幅を測定した位置を図 - 8 に示す。これから、RC はせん断ひび割れ発生後のせん断力の増加は少なく、最大耐力時の最大せん断ひび割れ幅は 1 mm を超えている。一方、LPRC ではせん断ひび割れ発

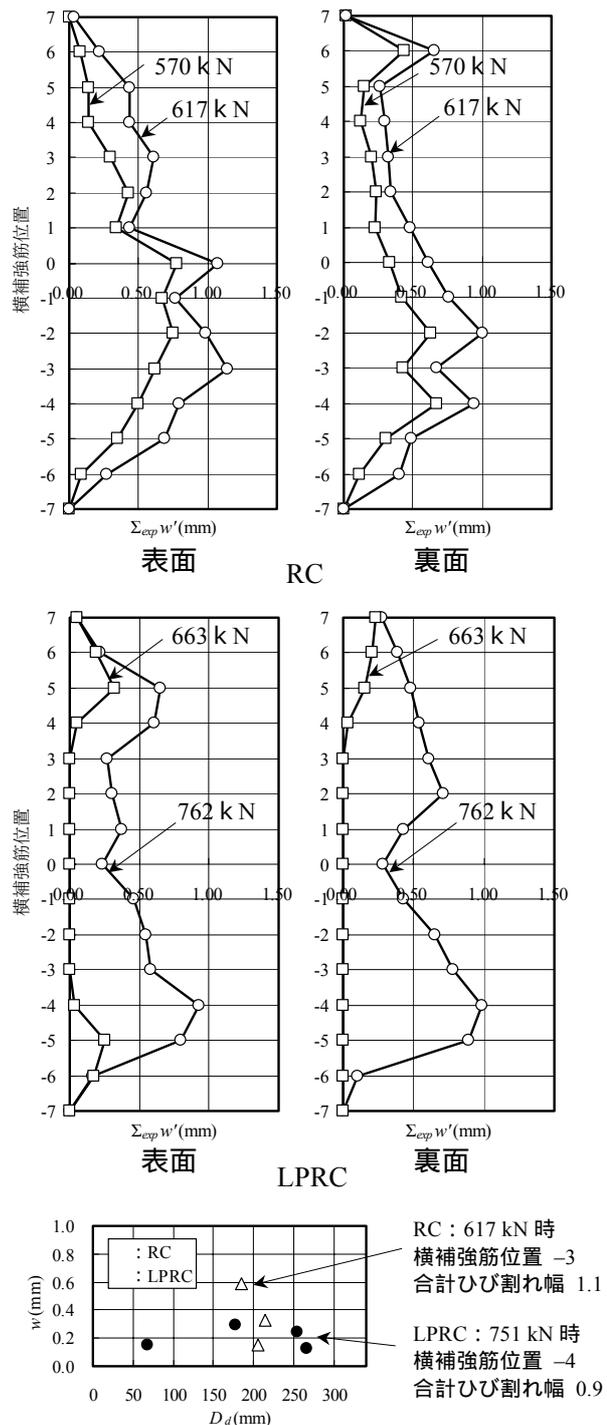


図 - 9 ひび割れ分布

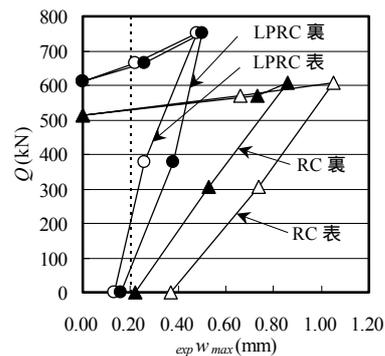
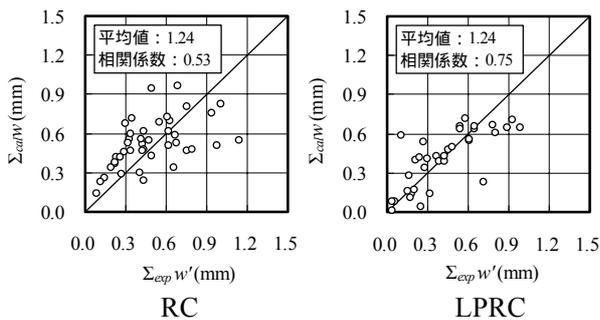


図 - 10 せん断応力と最大ひび割れ幅の関係

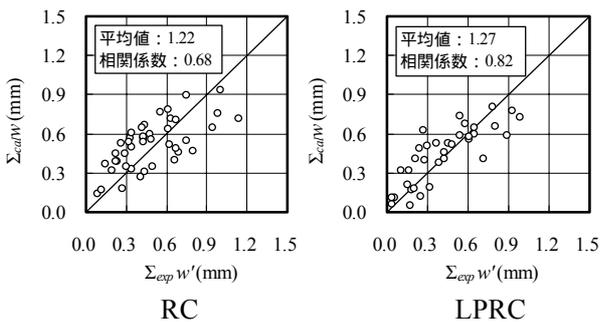
生後も耐力の上昇が見られ、最大耐力時の最大せん断ひび割れ幅は 0.5 mm となり、RC に比べ約 1/2 となった。また、残留ひび割れは LPRC では 0.2 mm 以下に抑えられている。

4.3 横補強筋ひずみとひび割れ幅の相関

横補強筋ひずみとせん断ひび割れ幅の相関を調べるため、合計ひび割れ幅 $\Sigma_{exp} w'$ の実験値と横補強筋のひずみから算出した計算値 $\Sigma_{cal} w'$ の比較を図 - 11 に示す。ここで、計算値は中央のひずみのみに横補強筋せい面方向の芯々間距離 j_e を乗算した場合と、3 点のひずみを線形補間し、 j_e で積分した場合の 2 種類行った。RC において中央のひずみのみでひび割れ幅を算定するとバラツキが大きいことが分かる。しかし、3 点のひずみを積分してひび割れ幅を算定するこ



中央のひずみから求めた計算値と実験値



積分したひずみから求めた計算値と実験値

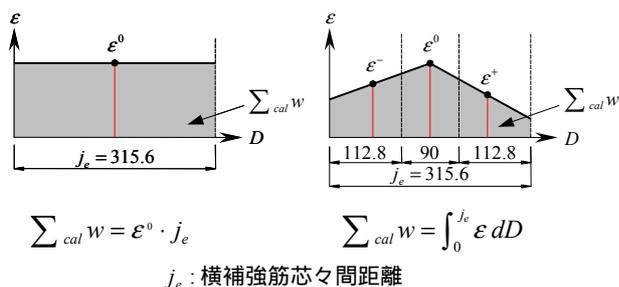


図 - 11 ひび割れ幅計算値と実験値の比較

とにより良い相関を得た。これは、前述のように RC では一本の横補強筋における 3 点のひずみが一様ではなく、ひび割れに依存して偏っているためであると考えられる。一方 LPRC では、ひび割れが分散したため、3 点のひずみにあまり差がないことから、中央のひずみにおけるひび割れ幅の計算値においても実験値と良い相関を得ている。

5. まとめ

本研究より以下の知見が得られた。

- 1) 本論文で対象とした横方向プレストレス導入量では、比例してせん断ひび割れ耐力、せん断終局耐力の向上を確認し、文献 1 の提案式で耐力を評価することが出来た。
- 2) 横方向プレストレスを導入することで、ひび割れが分散し横補強筋の 3 点のひずみに差が生じなかった。また、ひび割れを水平方向に分散させる効果があることから、ひび割れ発生後のせん断剛性低下を抑制することができる。
- 3) 本試験体において横補強筋に貼付した 3 点のひずみを積分することで求めた合計ひび割れ幅の計算値は実験値とよい相関を得た。

謝辞

高周波熱錬(株)には鉄筋をご提供頂きました。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, 河合繁, 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評価, 日本建築学会構造系論文集, 2004.3
- 2) 宮野覚也, 篠原保二, 渡部洋, 林静雄: 横方向プレストレス RC 柱の能動的拘束効果と破壊メカニズム, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.2, pp.247-252, 2002.6
- 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) 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