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及ぼす能動的拘束効果

EFFECT OF ACTIVE CONFINEMENT ON SHEAR BEHAVIOR FOR HIGH-STRENGTH CONCRETE COLUMNS PRESTRESSED Laterally

篠原保二*, 朴世万**, 大家史***, 渡部洋****

Yasuji SHINOHARA, Seiman BOKU, Fumito OHYA
and Hiroshi WATANABE

Experiments and 3-D FEM analyses were performed on high-strength concrete columns laterally prestressed by the shear reinforcements to study the influence of the active confinement upon shear strength and crack behaviors. The lateral prestress has been introduced in proportion to the strength of concrete, and the width of every crack over transverse reinforcements has been measured by a microscope. By increasing the lateral pressure as mentioned above, shear crack strength and ultimate shear strength have increased proportionally, however, the effectiveness of active confinement has been weakened with decreasing axial force ratio. The FEM analyses can evaluate the shear crack strength and ultimate shear strength, and explain the effect of the active confinement on shear behaviors by evaluating the intensity of confinement in tri-axial state of stress with minor principal stress and equivalent confining pressure.

Keywords: High-strength concrete, Lateral prestress, Active confinement, Shear behavior, 3-D finite element analysis, Shear damage evaluation

高強度コンクリート, 横方向プレストレス, 能動的拘束, せん断挙動, 三次元有限要素解析, せん断損傷評価

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下 RC と略記）柱の耐震性, 耐久性, 修復性を向上させるために, せん断補強筋に高強度鉄筋を使用し, その補強筋に緊張力を加えて横方向のプレストレスを導入した RC 柱試験体の曲げせん断実験を行ってきた^{1)~4)}。さらに三次元有限要素解析を行い, せん断ひび割れ耐力の上昇, せん断終局耐力の上昇, せん断ひび割れ幅の低減（特に残留ひび割れ幅）, 付着割裂耐力の上昇など横方向プレストレスによる能動的拘束が RC 柱のせん断挙動に与える効果をコアコンクリートの三軸応力状態に基づいて明らかにしてきた。

近年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。そこで本報では, 横方向プレストレスを導入した高強度コンクリート RC 柱の曲げせん断実験を行い, 能動的拘束が高強度コンクリート柱のせん断挙動に与える効果について考察する。使用するコンクリート強度は前報⁴⁾ (45N/mm²) までの2倍の90N/mm²とし, 導入する横方向プレストレス量もコンクリート強度に比例して2倍とする。ただ

し試験装置の関係で軸力比を前報(0.30)の半分の0.15とするため, 軸力比が能動的拘束効果に与える影響についても考察する。曲げせん断実験では, 主にせん断ひび割れ性状に及ぼす横方向プレストレスの影響を明らかにすることを目的として, 横補強筋に複数枚のひずみゲージを貼付し, 横補強筋上の全てのせん断ひび割れ幅をデジタルマイクロスコプで計測している。また, 三次元有限要素解析では, 横方向プレストレスの導入による能動的拘束効果に及ぼすコンクリート強度および軸力比の影響を内部応力状態に基づいて検討することを目的としている。なお, 本報は文献 5), 6) を統合し, 修正・加筆したものである。

2. 実験および解析概要

2.1 対象試験体と要素分割

Fig. 1 に試験体詳細およびその解析要素分割を, Table 1 に試験体諸元を示す。今回採用した試験体は, 目標とするコンクリート強度を45と90N/mm²（以下 Fc45とFc90と略記）の2種類とし, 横方向プレストレスを導入しない RC 試験体と導入した LPRC 試験体の計4体である。前報³⁾の軸力比0.3の試験体2体についても比較検討の対象とする。試験体形状は前報³⁾と同じであり, 断面が340×340

* 東京工業大学建築物理研究センター 助教授・工博

** (株)アイ・テック 工修

*** 東京工業大学建築物理研究センター 研究員・工博

**** 長崎総合科学大学建築学科 講師・工博

Assoc. Prof., Struct. Eng. Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng. ITEC Corporation, M. Eng.

Research Fellow, Struct. Eng. Research Center, Tokyo Institute of Tech., Dr. Eng. Assist. Prof., Dept. of Architecture, Nagasaki Institute of Applied Science, Dr. Eng.

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 を用いて角度補正した w' によって評価している。

Fig. 5 Definition of crack width and designation of strain gauges

2.3 解析におけるモデル化

解析におけるモデル化、境界条件、使用した要素種別および加力方法に関しては前報³⁾と同様である。コンクリートの圧縮応力上昇部分には土木学会のコンクリート標準示方書⁸⁾の2次式を採用し、最大耐力後の挙動は線形軟化すると仮定した (Fig. 2 参照)。コンクリートの圧縮破壊規準には Drucker-Prager 基準を採用し、塑性ポテンシャルにも同じ関数を用いる関連流れ則を適用した⁹⁾。横補強筋による横拘束を受けるコンクリートの Drucker-Prager 破壊基準の内部摩擦角は、渡邊ら¹⁰⁾による横補強筋間隔とコンクリート強度をパラメータとした横拘束円柱コンクリートの圧縮実験より推定できる³⁾。渡邊らは Fig. 6 に示すように、横補強筋間隔またはコンクリート強度が大きくなると、横拘束に対する比例係数 (拘束効果) は小さくなることを明らかにした。前報では、横補強筋間隔 60mm、コンクリート強度 $\sigma_B = 50 \text{ N/mm}^2$ に対して、Richart の一様拘束圧に対する比例係数 4.1 を渡邊ら¹⁰⁾の実験結果に基づいて 2.0 に低減し、内部摩擦角を 20° と推定した。したがって本報の Fc45 に対しては前報と同様に内部摩擦角として 20° を採用し、Fc90 に対しては横方向の拘束効果がさらに低減することを考慮して、内部摩擦角を 15° とした (比例係数 1.7 相当)。この内部摩擦角を用いると Fc45 と Fc90 に対する Drucker-Prager 破壊基準は、3 主応力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ によって (1) 式と (2) 式のようになる³⁾。一方、引張領域に対しては、Rankine の最大引張応力基準⁹⁾による tension-cutoff を採用し、引張軟化特性にはバイリニアモデルを用いた (Fig. 3 参照)。ひび割れに関しては分散ひび割れモデルを使用し、ひび割れ後のせん断剛性の低下は (3) 式によるひび割れひずみの関数としている。

Fig. 6 Relations between lateral pressure and additional strength¹⁰⁾

$$f(I_1, J_2) = 0.15 I_1 + \sqrt{J_2} - 19.3 = 0 \quad \text{for Fc45} \quad (1)$$

$$f(I_1, J_2) = 0.11 I_1 + \sqrt{J_2} - 42.1 = 0 \quad \text{for Fc90} \quad (2)$$

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

$$J_2 = \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right] / 6$$

$$\beta = \frac{1}{1 + 4447 \varepsilon_n} \quad (3)$$

3. せん断耐力と横拘束効果の関係

3.1 せん断力-部材角関係

Fig. 7 に実験結果と解析結果のせん断力 Q -部材角 R 関係を比較して示す。LPRC90-0.15 試験体は 1/33 サイクルの加力中に主筋の溶接部が破断したため、他の試験体の Q - R 関係からほぼ最大耐力に近いと判断し、直前の 1/50 サイクルの荷重を最大耐力とした。実験の破壊過程としては全試験体とも、はじめに曲げ引張領域に曲げひび割れが現れ、斜め方向に伸展して曲げせん断ひび割れに成長し、その後、部材対角方向にせん断ひび割れが発生した。最大耐力時には、

Fig. 7 Comparisons between analytical and experimental Q-R

部材端部の圧縮側（正面および側面）コンクリートに微細な鉛直ひび割れが現れ、最終的にはこの圧縮側コンクリートの一部剥落を伴う圧縮破壊となった。Fc45 シリーズの軸力比が 0.30 から 0.15 に減少すると、せん断ひび割れ耐力が RC 試験体で 33%, LPRC 試験体で 22%低下し、最大耐力は RC 試験体で 4%, LPRC 試験体で 14%低下するが、最大耐力時の部材角は両試験体とも倍増している。実験結果と解析結果を比較すると、前報²⁾で示したように、分散ひび割れモデルを用いた解析では、ストレスロッキングや負側載荷時のひび割れの影響により変形を過小評価している。特に軸力比が 0.15 の試験体はせん断ひび割れ発生後両者の相違は大きくなるが、耐力はほぼ評価できている。なお実験・解析とも、全ての試験体の主筋および横補強筋は加力終了まで降伏に至っていない。

3.2 各種耐力と横拘束効果の関係

Table 3 にせん断ひび割れ耐力と終局耐力に対して、実験値 ($expQ$) と解析値 ($FEMQ$) を比較して示す。なお、解析におけるせん断ひび割れ耐力は、横補強筋のひずみが急増する時点、せん断終局耐力は、6 章で述べるように収斂計算が不安定となる最終段階では、部材端部の圧縮コンクリートが最大耐力後の軟化領域に入り、実験における破壊性状とも一致したことから、荷重が減少し始める直前のステップとした。さらにせん断ひび割れ耐力として靱性保証式に横方向プレストレスを考慮した文献¹⁾による計算値 ($calQ_{sc}$) を示しているが、耐力をほぼ評価できている。また終局耐力として軸力を考慮した修正荒川 mean 式による計算値 ($calQ_{su}$) も参考に示しているが、特に軸力の低い RC 試験体の耐力を安全側に評価している。

Table 3 Shear crack strength and ultimate shear strength

Test Designation	$expQ_{sc}$ (kN)	$expQ_{su}$ (kN)	$FEMQ_{sc}$ (kN)	$FEMQ_{su}$ (kN)	$calQ_{sc}$ (kN)	$calQ_{su}$ (kN)
RC45-0.15	343	595	316	646	339	484
LPRC45-0.15	475	658	498	699	450	—
RC90-0.15	562	973	551	983	564	820
LPRC90-0.15	780	1048	669	1027	774	—
RC45-0.30	515	617	495	655	496	591
LPRC45-0.30	611	762	577	747	606	—

$expQ_{sc}$ = shear crack strength by experiment, $expQ_{su}$ = ultimate shear strength by experiment
 $FEMQ_{sc}$ = shear crack strength by FEM, $FEMQ_{su}$ = ultimate shear strength by FEM
 $calQ_{sc}$ = shear crack strength by ref. (1), $calQ_{su}$ = ultimate shear strength by modified Arakawa

実験より得られたせん断ひび割れ耐力 $expQ_{sc}$ を全断面積で除した平均せん断ひび割れ応力 $exp\tau_{sc}(=expQ_{sc}/bD)$ と横方向プレストレス σ_L の関係、およびせん断終局耐力の実験値を全断面積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 Fig. 8 に示す。なお、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 の比 ($=\sigma_L/\sigma_B$) によって検討するため、横軸は σ_L/σ_B としている。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することによって、せん断ひび割れ耐力、終局耐力ともほぼ同じ割合で増加している。せん断ひび割れ耐力に関しては、軸力比の大きな RC 試験体はひび割れ強度が高く、横方向プレストレスを導入してもその効果は小さい。一方、せん断終局耐力に関しては、軸力比が小さくなると横方向プレストレスの効果も小さくなる。これは内部コンクリートの拘束状態などに起因すると考えられ、6 章の解析で考察する。続

いて、Fig. 9 にせん断ひび割れ耐力とせん断終局耐力について実験値と解析値の比較を示した。実験と解析は全体的に良い対応を示しており、三次元有限要素解析によって、せん断ひび割れ耐力および終局耐力をほぼ評価することができている。

Fig. 8 Increase of strength with increasing lateral prestress σ_L

Fig. 9 Comparison of strength from experiment and FEM analysis

4. せん断ひび割れおよび横補強筋の挙動

4.1 せん断ひび割れ性状

Fig. 10 に各試験体の最大耐力時におけるひび割れ性状を示す。同図には最大ひび割れ幅を検出した箇所を■で示し、さらにそのひび割れを含む角度を記している。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。主筋に沿って付着ひび割れも発生しているが、文献⁴⁾の付着割裂防止筋を取り外した試験体と異なり、加力終了までそのひび割れ幅が拡大することはなかった。Fig. 11 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 $expw_{max}$ (Fig. 10 の■) の関係で示す。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 $expw_{max}$ すなわち残留せん断ひび割れ幅までを示している。Fc45 シリーズでは、軸力比の低下によりひび割れ幅は増大し、特に RC 試験体では最大耐力時で 1 mm を超えている。一方、LPRC 試験体では最大耐力時のせん断ひび割れ幅は RC 試験体の半以下であり、残留せん断ひび割れ幅は制御目標値として一般に用いられている 0.2 mm¹¹⁾を下回っている。Fc90 シリーズの横補強筋比は Fc45 シリーズの 2 倍強であるため、RC 試験体においても最大耐力時のひび割れ幅が小さく、Fc45 シリーズほど横方向プレストレスの効果が顕著ではない。また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 (Fig. 5 参照) の平均値を Table-4 に示す。Fig. 10 と Table-4 より支配的なひび割れ角度と平均

ひび割れ角度は、軸力比の低下または横方向プレストレスの導入によって小さくなる傾向を示している。またこれらのひび割れ角度は、コンクリートの引張破壊基準に Rankine の最大主応力説を用いると、軸力による垂直応力、プレストレスによる横方向垂直応力およびせん断ひび割れ強度に相当するせん断応力が作用する要素の Mohr の応力円より求めることができる¹⁾。この Mohr の応力円より求めたひび割れ角度も Table-4 に記載しているが、実験結果とほぼ対応しており、最大主応力説の妥当性を示している。せん断補強筋量の多い Fc90 試験体の場合、ひび割れ角度の実験値が小さいことから、ポアソン効果により初期導入プレストレス以上の横拘束がひび割れ強度時に作用していた可能性がある。

Fig. 10 Crack patterns at maximum shear loads

Fig. 11 Relations between shear force and maximum crack width

Table 4 Averaged angle of crack from experiment and Mohr's circle

Test Designation	RC45-0.30	LPRC45-0.30	RC45-0.15	LPRC45-0.15	RC90-0.15	LPRC90-0.15
Experiment	69°	62°	64°	61°	65°	55°
Mohr's circle	69°	64°	63°	57°	67°	59°

4.2 横補強筋ひずみとひび割れ幅の関係

文献3)では、コンクリートのひずみを無視し、横補強筋ひずみを積分することによって算出したひび割れ幅と、加力中マイクروسコープによって計測した補強筋上の合計ひび割れ幅との間に高い相関が存在することを示した。Fig. 12 は、横補強筋に貼付したひずみから算出したひび割れ幅 (△印) と、対応する横補強筋上で計測したマイクروسコープによるひび割れ幅の合計値 (□印) を各横補強筋レベル毎に比較して示している。ただし、比較した時点の部材角は、軸力比 0.30 シリーズでは最大耐力時の部材角であるが、軸力比 0.15 シリーズの RC 試験体では最大耐力時の部材角が 1/33 に達し、その時点ではかぶりコンクリートの浮きなどによりひび割れ幅の計測を行っていない。そこでその前サイクルの加力ではほぼ最大耐力に達しているとして (Fig. 7 参照)、部材角 1/50 の時点で比較している。同図にはまた、FEM 解析による横補強筋の伸び量から評価したひび割れ幅 (◇印) も合わせて示している。マイクروسコープで実測した

Fig. 12 Total crack width obtained from microscope, strain of shear reinforcement and FEM analysis

ひび割れ幅は表面の値であり、横補強筋のひずみにより評価した横補強筋位置のひび割れ幅と直接比較することはできないが、本試験体ではかぶり厚さが 9mm と小さいため、全体的に両者のひび割れ幅は同様な挙動を示している。FEM 解析によるひび割れ幅に関しては、軸力比 0.30 シリーズでは実験値と整合性が良いが、軸力比 0.15 シリーズでは実験値を過小評価する傾向がある。これは横補強筋を完全付着としてモデル化しているため、Fig. 7 に示すように部材角が大きくなる軸力比 0.15 シリーズでは、せん断剛性を過大に評価したことに起因していると思われる。Fig.12 の下段に示す LPRC 試験体は上段の RC 試験体と比較すると、最大耐力時においても横方向プレストレスによりせん断ひび割れ幅を抑制しており、また部材中央より端部のひび割れが成長しているが、これらのせん断ひび割れ挙動の特徴に関しては、三者のひび割れ評価法はいずれも良く捉えている。Fc45 シリーズで比較すると、軸力比が小さくなるとせん断耐力は低下するがひび割れ幅は増大し、Fc90 シリーズでは横補強筋量を 2 倍強としているため、せん断耐力は増加しているがひび割れ幅は減少している。

5. 解析による横補強筋径の検討

2 章で述べたように、Fc90 試験体に対して横補強筋に U6.4 を使用すると、コンクリート強度に比例したプレテンションを導入する際、破断する恐れがあるため、U9.0 を使用した。しかしながら 3 章と 4 章で示したように、横補強筋量の相違は Q - R 関係やせん断ひび割れ性状に大きな影響を与えている。そこで本章では、Fc90 試験体に U6.4 を使用した場合の三次元有限要素解析を行い、せん断挙動に及ぼす横補強筋量の影響について検討する。

Fig.13 に RC90-0.15 試験体と LPRC90-0.15 試験体に横補強筋として U6.4 を使用した場合と U9.0 を使用した場合の Q - R を比較して示す。RC 試験体では横補強筋量が減少するとせん断ひび割れ後の剛性も低下し、最大耐力は 6% 程度低下している。横方向プレストレス導入量を同一とした LPRC 試験体では、横補強筋量に関わらずせん断ひび割れ後の剛性はほぼ同じである。ただし U6.4 の補強筋はせん断力 943 kN で補強筋の降伏が始まると同時に、収束計算が不安定となったため、解析を終了している。

Fig.14 はせん断ひび割れ幅を解析によって評価し、横補強筋量によるひび割れ幅の相違を比較している。RC 試験体は横補強筋量を U9.0 から U6.4 に減少すると、最大耐力が 63 kN 低下するにも関わらず、ひび割れ幅は約 5 割増加している。一方 LPRC 試験体は、同一のプレストレス量を導入したため、同一せん断荷重時で比較する

と、横補強筋量の減少によりせん断ひび割れ幅は増加するが、その差は僅かであり、せん断ひび割れ幅をよく制御しているといえる。この RC 試験体と LPRC 試験体のひび割れ性状の相違がせん断ひび割れ後の Fig.13 にみられる Q - R 関係に影響を及ぼしていると思われる。

Fig. 14 Total crack width with shear reinforcement U9.0 and U6.4

6. 解析による内部応力状態の検討

本章では、横方向プレストレスが RC 柱のせん断挙動に及ぼす効果を、内部コンクリートの三軸応力状態に基づいて考察する。Fig. 15 に試験体中央面における最大荷重時の最小主応力分布を示す。文献(3)では、ひび割れが分散し一体性を保持した LPRC 試験体は RC 試験体より圧縮ストラット幅が広くなり、せん断耐力の増加の要因となることを示した (Fig.15 の RC45-0.30 と LPRC45-0.30)。軸力比を 0.15 とした今回の試験体では、軸力比 0.30 の試験体ほど横方向プレストレスの影響が最小主応力分布に顕著に現れていない (Fig.15 の RC45-0.15 と LPRC45-0.15)。このことから軸力比が小さくなると、せん断耐力に及ぼす横方向プレストレスの効果が減少したと考えられる。また横補強筋量が多い RC90-0.15(U9.0)では、ひび割れが分散し、その幅を抑制したため (Fig.10 と Fig.12 参照)、比較的広い圧縮ストラット幅となり、横方向プレストレスを導入するとさらに広がるが、軸力比 0.30 の場合に比べるとその差は小さい。さらに横補強筋量が少ない LPRC90-0.15(U6.4)では、横補強筋の降伏により RC 試験体と同程度のせん断耐力となっており、最小主応力分布の形状は多少大きくなるがその絶対値は小さくなっている。

Fig. 16 に最大せん断荷重時における試験体表面の損傷度を示す。なお、ここで用いる損傷度とは、Fig. 17 に示す応力の不変量 σ_r 平面上における偏差応力成分 r によって、どの程度圧縮破壊曲面に近いかを示す圧縮破壊危険度であり、静水圧 σ_0 と軸上で 0、破壊曲面上で 1 と定義している。文献(3)で示したのと同様、同じせん断荷重で比較すると LPRC 試験体は RC 試験体より損傷が分散し、その程度も低く抑えられている。部材端部の圧縮領域における白点を有する赤色は、コンクリートの応力状態が最大耐力後の軟化領域に達している箇所であり、実験において観察された最大耐力近傍における端部圧壊と対応している。文献(3)では、RC 試験体は、軟化領域が局所化されるのに対し、LPRC 試験体の軟化領域はより広範囲に形成され、Fig.15 の最小主応力分布の広がりとも関連させて、横方向プレストレスによるせん断耐力上昇を説明した (Fig.16 の RC45-0.30 と LPRC45-0.30)。ところが同じ横方向プレストレス導入量であっても軸力比が小さくなると、最小主応力分布と同様に、この軟化領域の広がりも小さくなり (Fig.16 の RC45-0.15 と LPRC45-0.15)、横方向プレストレスの効果が低下している。また、Fc45 (上段) と Fc90 (下

Fig. 13 Q-R curves with different diameter of shear reinforcement

Fig. 15 Compression strut based on minor principal stress at Q_{max} Fig. 16 Comparison of damage in compression zone at Q_{max}

Fig. 17 The degree of damage and equivalent confining pressure for triaxial state of stress in meridian plane of Drucker-Prager criterion

段)の軟化領域を比較すると、Fc90のほうがこの領域が端部に限られて局所化しており、横補強筋量に関わらず横方向プレストレスの効果は小さくなっている。さらに両者を全体で比較すると、Fc90のほうにFc45より損傷度は小さくなっている。このことから高強度コンクリートは全体的には健全であっても、一部の局所的な破壊により耐力が決定する、いわゆる寸法効果に敏感な材料であることが推察できる。したがって高強度コンクリートを使用する場合、局所的な破壊を遅らせるために、鉄筋量を増やし、ひび割れを分散させることが必要である。

横方向プレストレスによるコアコンクリートの拘束効果を比較するため、最大耐力時における等価拘束圧をFig. 18に示す。等価拘束圧はFig. 17に示す応力の不変量 ξ 平面上で、ランダムな応力経路上の一般応力状態を側圧一定の三軸圧縮実験経路上の応力状態に換算した場合の側圧と定義し、側圧を1軸圧縮強度で除して基準化している。等価拘束圧は3主応力がほぼ等しい静水圧状態を保持して大きくなると増加するが、静水圧成分 ξ が同じであっても3主応力の差が大きくなると、すなわち偏差応力成分 r が増加すると等価拘束圧は減少する。文献(3)のLPRC試験体では、軸力導入時から高い拘束効果が得られ、最大耐力時までRC試験体より広範囲に拘束効果が現れていることを示した(Fig. 18のRC45-0.30とLPRC45-0.30)。Fc45シリーズの軸力比の影響を見ると、RC45-0.15試験体は局所的に0.30の試験体より等価拘束圧が大きくなり、両者の耐力にも大きな相違は見られない。一方LPRC45-0.15試験体は、0.30の試験体より等価拘束圧が小さく、拘束効果が低下している。また補強筋量の多いFc90-U9.0試験体は、RC試験体においても比較的高い等価拘束圧を示しており、プレストレス導入による拘束効果の影響は小さくなっている。またRC90-0.15-U6.4試験体はU9.0の試験体に比べて等価拘束圧の高い領域は局所化するが、プレストレスを導入することによりその領域が拡大する傾向が見られる。

7. まとめ

横方向プレストレスによる能動的拘束に及ぼすコンクリート強度および軸力比の影響を検討するため、軸力比0.15でFc45とFc90のコンクリート柱の曲げせん断実験および三次元有限要素解析を行い、本研究範囲内で以下の知見が得られた。

- 1) 軸力比が小さくなると、横方向プレストレスによる能動的拘束効果は低下する。その要因を最小主応力分布、圧縮領域の損傷度、等価拘束圧を用いて明らかにした。

Fig. 18 Equivalent confining pressure at maximum shear load

- 2) コンクリート強度に比例した横方向プレストレス量を与えることにより、高強度コンクリートの場合もほぼ同等な拘束効果が得られる。
- 3) 横補強筋量が多い場合、ひび割れが分散するため、横方向プレストレスによる拘束効果は低下する。
- 4) 横補強筋量が少ない場合、横方向プレストレスを導入しなければせん断ひび割れ後の剛性が低下するが、横補強筋量の多い試験体と同量のプレストレスを導入すると、補強筋が降伏しない限りひび割れ後の剛性低下はかなり改善できる。
- 5) 高強度コンクリートは一部の局所的な破壊により耐力が決定する傾向があり、寸法効果に敏感な材料である。

謝辞

高周波熱練(株)には鉄筋をご提供いただきました。また、本研究の一部は、平成17・18年度日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究C(2)・課題番号:17560499・研究代表者:篠原保二)により行われました。付記して謝意を表します。

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, 宮野寛也, 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に関する解析的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.558, pp.115~121, 2004.4
- 3) 篠原保二, 宮野寛也, 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
- 4) 篠原保二, 殿原啓伸, 大家史, 渡部洋: 横方向プレストレスを導入したRC柱の付着性状に及ぼす能動的拘束の影響, 日本建築学会構造系論文集, No.608, pp.119~126, 2006.10
- 5) 篠原保二, 朴世万, 大家史, 渡部洋: 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(その1)(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集C, pp.351~354, 2006.9
- 6) 渡部洋, 朴世万, 篠原保二, 林静雄: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.139~144, 2006.7
- 7) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999.8
- 8) 土木学会: コンクリート標準示方書[構造性能照査編], 2002
- 9) Chen, W. F.: Plasticity in Reinforced Concrete, McGraw-Hill Book Company, 1982
- 10) 高森直樹, Benny Benni Assa, 西山峰広, 渡邊史夫: 横拘束コンクリートの応力度-ひずみ度関係定式化に関する基礎的実験研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.18, No.2, pp.395-400, 1996.7
- 11) 例えば, 日本建築学会: プレストレスト鉄筋コンクリート(Ⅲ種PC)構造設計・施工指針・同解説, 1986

(2006年9月5日原稿受理, 2006年11月24日採用決定)