

論文 横補強筋を用いてプレストレスを導入した鉄筋コンクリート柱の偏心圧縮性状に関する実験的研究

峯村守央*1・渡部洋*2・林静雄*3

要旨:横補強筋を用いて横方向に導入したプレストレスによる能動的な拘束効果が鉄筋コンクリート柱の曲げ圧縮性状に及ぼす影響を調べるために、中心圧縮、2水準の偏心距離による偏心圧縮実験を行った。その結果偏心圧縮荷重下で、プレストレスの有無による横補強筋ひずみ性状の相違、プレストレス導入による最大耐力の向上、軟化域の負勾配が緩やかになる等の影響を定性的に把握した。

キーワード: RC柱、横補強筋、横方向プレストレス、能動的拘束効果、偏心圧縮性状

1. はじめに

鉄筋コンクリート(以下、RCと略す)柱の横補強筋に高強度鉄筋を使用すると、部材の耐震性能は向上することが知られているが、横補強筋が降伏に至る以前にコンクリートの破壊が先行するために、高強度鉄筋としての性能が十分に発揮されているとは言い難い¹⁾。

著者らはこれまでに、横補強筋にあらかじめ緊張力を与え、コンクリートに材軸直交方向を拘束するプレストレスを導入したRC柱の1軸圧縮及びせん断性状に関する実験的研究を行っている²⁾。同部材は高強度鉄筋の性能の十分な発揮と、コンクリートに対する能動的な拘束(Active Confinement)を期待しており、横補強筋を用いて横方向にプレストレスを導入することで、1軸圧縮及びせん断性状の向上が期待できることを確認している。

また既往の研究から、RC柱が圧縮曲げ状態にあるとき、ひずみ勾配の影響等により1軸圧縮状態のコンクリートの圧縮応力度分布等は異なることが知られている³⁾。

よって、本研究では横補強筋を用いて横方向にプレストレスを導入したRC柱の偏心圧縮実験を行い、同部材の能動的な拘束効果が曲げ圧縮性状に及ぼす影響等の検証を行っている。

2. 実験概要

2.1 試験体

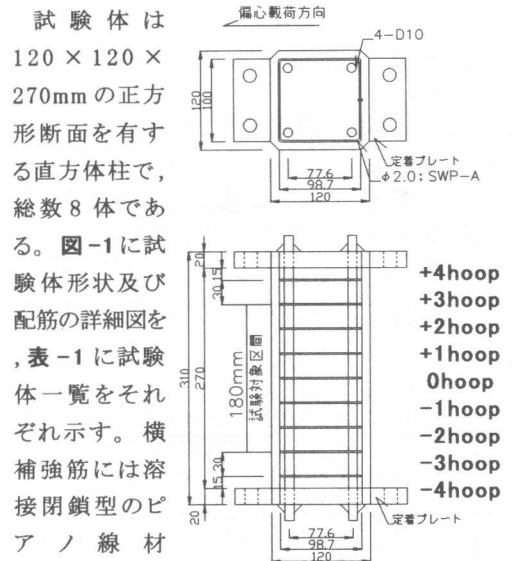


図-1. 試験体詳細図

, 98.7×98.7mm, φ2.0)を用いた。試験対象は図-1中に示す180mmの区間としている。

表-1. 試験体一覧

試験体名	B×D×L [Bc×Dc] (mm)	主筋 [Pg] (%)	横補強筋 [Pw] (%)	e (mm)	wσp/wσy (%)
No.1 P30-T00-E00	120×120× 270 [98.7×98.7]	4-D10 SD295 [1.98]	φ2.0-φ30 SWP-A [0.172]	0	0
No.2 P30-T60-E00					60
No.3 P30-T00-E15					0
No.4 P30-T60-E15				15	60
No.5 P30-T00-E35					0
No.6 P30-T60-E35					60
No.7 P30-T30-E35					30
No.8 P60-T60-E35			φ2.0-φ60 SWP-A [0.086]	35	60

B:断面幅, D:断面せい, L:試験体長さ, Bc:コアコンクリート部幅, Dc:コアコンクリート部せい, Pg:全主筋比, Pw:横補強筋比, e:偏心距離, wσp/wσy:初期導入緊張応力度, wσy:横補強筋降伏強度

*1 東海旅客鉄道株式会社 (JR 東海) 工修 (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 工修 (正会員)

*3 東京工業大学教授 建築物理センター 工博 (正会員)

変動要因は、横補強筋1本あたりに導入する初期緊張力； $w\sigma_p$ を横補強筋降伏強度の60,30,0%の3水準、載荷偏心距離； e を0（中心圧縮）、15,35mmの3水準、補強筋間隔； $@$ を30、60mmの2水準としている。固定要因は主筋量及び配筋（4-D10；SD295A材、主筋比は1.98%）、コンクリート圧縮強度及び調合（目標基準強度は30MPa、早強ポルトランドセメント、骨材には標準砂のみを用いたモルタル）である。使用した鋼材の力学的特性を表-2に、各試験体の実験実施時におけるコンクリートの力学的特性を表-3に、コンクリートの調合を表-4にそれぞれ示す。また、載荷は試験体の上下端部に取り付けた定着プレート（厚さ20mm）を通じて行った。主筋の両端は定着プレートにアーク溶接を施すことで取り付けた。

表-2. 鋼材の力学的特性

鉄筋種類	$s\sigma_y$ [$w\sigma_y$] (MPa)	$s\epsilon_y$ [$w\epsilon_y$] (μ)	sE [wE] (GPa)	$s\sigma_t$ [$w\sigma_t$] (MPa)	$s\epsilon_t$ [$w\epsilon_t$] (%)
D10 SD295-A	361.7	1830	197.7	516.3	19.6
$\phi 2.0$ SWP-A	1390.0	8660	206.9	1640.0	-

$s\sigma_y$ ；降伏強度， $s\sigma_t$ ；降伏時ひずみ， sE ；ヤング係数， $s\sigma_t$ ；引張強度， $s\epsilon_t$ ；引張ひずみ（表中の $w\sigma_y$ ）のように、横補強筋の諸元については、前に w という添え字をつけて表記する。）

表-3. コンクリートの力学的特性

試験体名	実験実施時強度等				
	$c\sigma_b$ (MPa)	$c\epsilon_b$ (μ)	cE (GPa)	$c\sigma_y$ (MPa)	ν
No.1 P30-T00-E00					
No.2 P30-T60-E00	30.43	3524	14.34	2.30	0.15
No.3 P30-T00-E15					
No.4 P30-T60-E15	39.16	3156	20.02	2.50	0.17
No.5 P30-T00-E35					
No.6 P30-T60-E35	38.33	4147	16.83	2.21	0.19
No.7 P30-T30-E35	33.86	3191	17.68	2.36	0.23
No.8 P60-T60-E35	40.50	3418	20.14	1.80	0.25

$c\sigma_b$ ；圧縮強度， $c\epsilon_b$ ；圧縮強度時ひずみ， cE ；ヤング係数， $c\sigma_y$ ；引張強度， ν ；ポアソン比

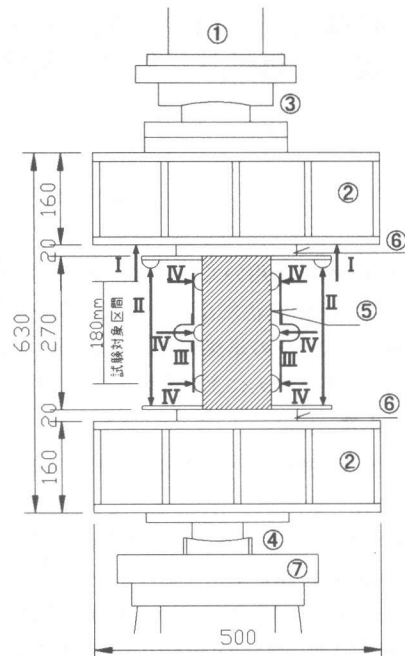
表-4. コンクリートの調合表

設計強度 (MPa)	細骨材			C (kg/m^3)	W (kg/m^3)	AE (l/m^3)	W/C (%)
	S (kg/m^3)	ρ (g/cm^3)	a (%)				
30	1438	2.44	3.91	575	281	7	55

S；細骨材， ρ ；比重，a；吸水率，C；セメント，W；水，AE；混和材，水セメント比

2.2 加力及び測定方法

加力及び測定装置を図-2に示す。加力形式は、軸力の作用点の偏心距離； e を一定とした偏心曲げ圧縮載荷及び中心圧縮載荷（ $e=0$ ）とした。載荷は1000kNサーボジャッキにより球座、加力ビーム及び定着プレートを介して行った。な



- ① 1000kN サーボジャッキ
- ② 加力ビーム I 制御用変位計
- ③ 球座 II 鉛直変位計（全区間）
- ④ 薄鋸型球座 III PI ゲージ
- ⑤ 試験体 （試験対象区間）
- ⑥ 定着プレート IV 水平変位計
- ⑦ 台座 （試験対象区間）

図-2. 試験及び測定装置図

お、中心圧縮載荷では試験体下部の加力ビーム（図中-②）を台座（同-⑦）に直に置いている。載荷履歴は一方単調載荷とし、柱の平均軸方向変形が一定の速さで進行するように、高感度変位計（同-I）を用いた変位制御を行った。

試験体全区間の軸方向変形と平均曲率を2台の変位計（同-II）で、試験対象区間については4本のPIゲージ（同-III）で、これに対応する位置での水平変位を6台の変位計（同-IV）を用いてそれぞれ測定した。以後の検討において、部材の平均軸ひずみ（部材断面の材軸中心における軸ひずみ）； ϵ_v 及び平均曲率； ϕ は、加力初期時に試験体上下端に生じる局部変形等を排除するために、主筋の圧縮降伏時まではPIゲージを、それ以降は鉛直変位計の値を同時点のPIゲージの値に修正したものをを用いてそれぞれ算出している。また、主筋と横補強筋のひずみは、貼付したひずみゲージにより測定した。

2.3 プレストレス導入概要

横補強筋を用いて横方向にプレストレスを導入する過程の模式図を図2-3に示す。

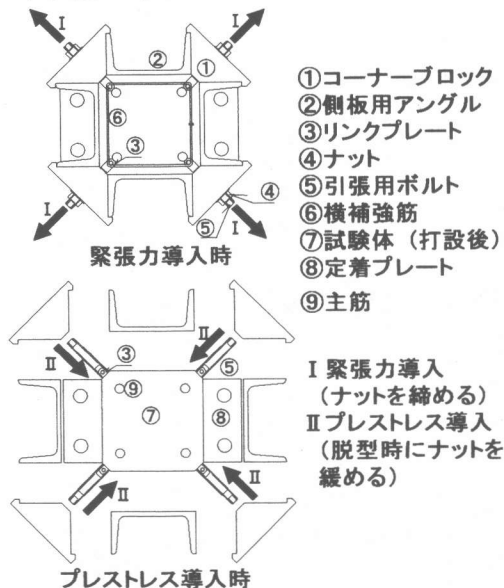


図2-3. プレストレス導入過程の模式図

コンクリート打設前に緊張力を与えるプレテンション方式である。横補強筋の四隅にかけたリンクプレートにボルトを取り付け、鋼製型枠で反力を取りナットで締め付けることで緊張力を与え（図中-I）、脱型時にこのナットをゆるめることで、コンクリートにプレストレスが与えられる（図中-II）。全横補強筋に貼付したひずみゲージにより応力を算出し、初期緊張力の大きさを管理した。

与えた緊張力は鋼材のリラクセーションなどの影響を受けて、実験日までに徐々に低下していく。その経過をプレストレスを導入した全試験体について測定したデータを図-4に示す。測定により得られた残存する緊張力を有効プレストレスとし、以後の実験結果にも反映させている。

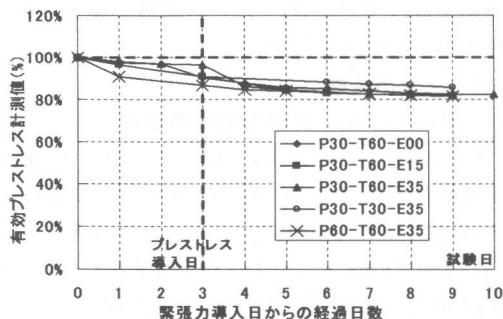


図-4. リラクセーションの測定結果

3. 実験結果

3-1. 破壊性状

図-5に各偏心レベル試験体の最終破壊状況を例示する。

中心圧縮試験体（以下、E00シリーズ）は、プレストレスを導入した試験体（以下、PC試験体）と導入しない試験体（以下、RC試験体）ともに主筋の圧縮降伏後最大耐力を迎え、ほぼ同時に横方向に亀裂を生じた。その後、カバーコンクリートの剥離が進むとともに、材軸方向のひび割れを生じた。

偏心距離15mm試験体（以下、E15シリーズ）は、PC試験体、RC試験体ともに圧縮側主筋が降伏後最大耐力を迎え、これとほぼ同時に圧縮側表面に亀裂を生じた。その後、カバーコンクリートの剥離が進むとともに、引張側表面に曲げひび割れを、続いて材軸方向のひび割れを生じた。特筆すべきは、RC試験体では2本の横補強筋（+2,3hoop）がほぼ同時に破断し、直後に脆性的な破壊に至った。横補強筋の破断が確認されたのはこのP30-T00-E15試験体のみである。なお、PC試験体・RC試験体ともに引張側主筋は降伏しなかった。

偏心距離35mm試験体（E35シリーズ）のうち、RC試験体と横補強筋間隔30mm、降伏強度の60%の初期緊張力を導入した試験体（以下、「P30-T60」のように試験体名をもって諸元を表す）は、ともに圧縮側主筋が降伏後最大耐力を迎えたが、その後RC試験体は圧縮側にひび割れ発生後引張側に曲げひび割れを生じたのに対して、P30-T60は逆に曲げひび割れが先行した。これ以後は両者とも引張側主筋の降伏に続いて材軸方向のひび割れを生じて終局に至った。また、P30-T30とP60-T60はともに曲げひび割れ発生、圧縮側主筋の降伏と経て最大耐力に至る。その後、引張側主筋の降伏に続いて材軸方向のひび割れを生じて終局に至った。なお、全試験体について偏心載荷（圧縮側）の主筋で座屈が確認された。

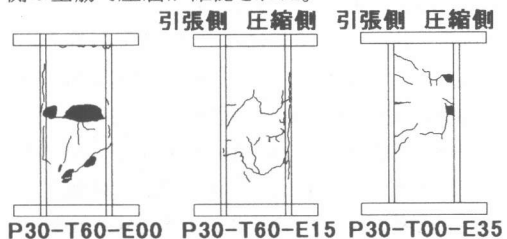
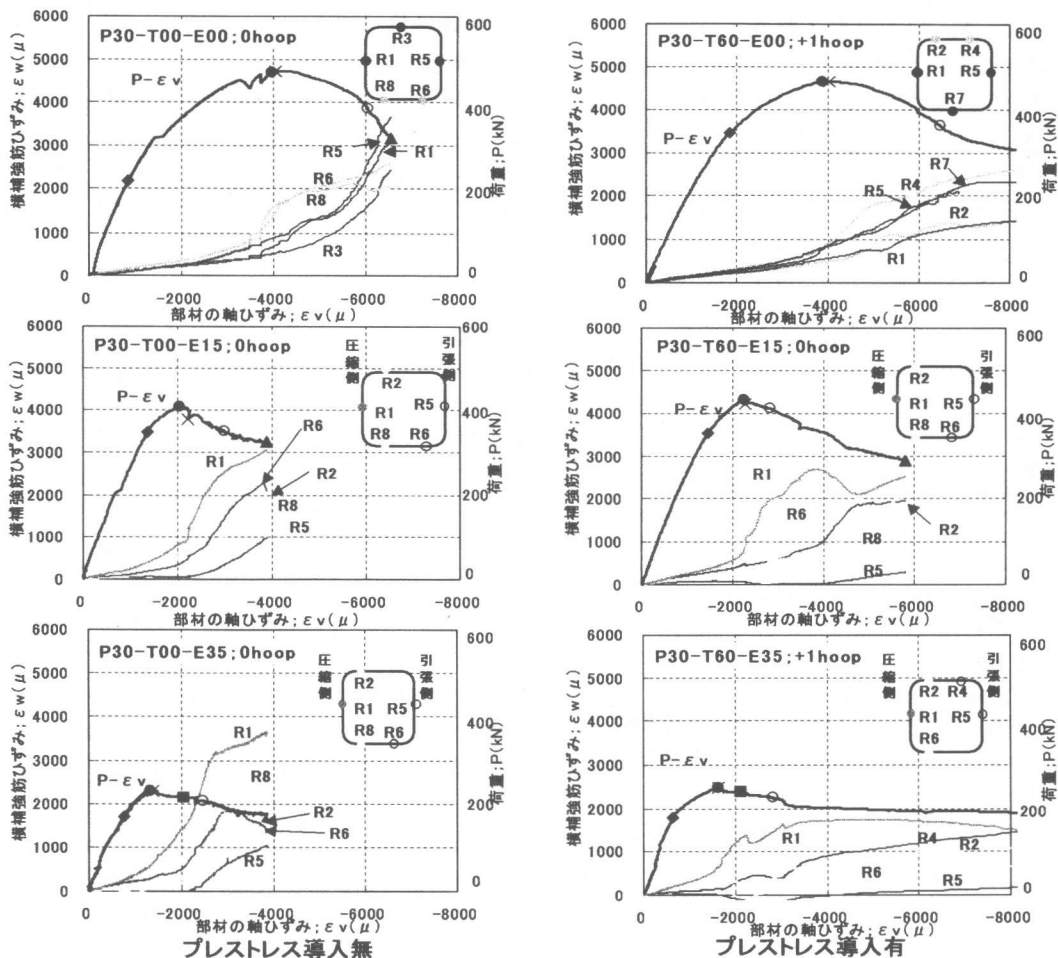


図-5. 最終破壊状況



◆; 主筋の圧縮降伏時, ●; 最大耐力時, ×; 初亀裂発生時,
■主筋の引張降伏時, ○; 軸方向ひび割れ発生時,

図-6. 荷重-軸ひずみ・横補強筋ひずみ関係

3.2 荷重-軸ひずみ・横補強筋ひずみ関係

図-6に荷重 P と載荷開始時からの横補強筋のひずみ ϵ_w を縦軸に、部材の平均軸ひずみ ϵ_v を横軸とした関係図を例示する。なおここでは、PC試験体の横補強筋ひずみの値には有効プレストレス分は加算していない。また、破壊過程におけるひび割れ発生位置や損傷の集中、材軸方向のひずみ分布等を考慮して、最も代表的な挙動をみせた横補強筋のデータを示している。

荷重-軸ひずみ関係について、全ての偏心レベルにおいて最大耐力付近まではPC試験体・RC試験体ともほぼ同一の履歴を示すが、最大耐力でPC試験体がRC試験体を上回る傾向にある。また、最大耐力後の負勾配はRC試験体と比較して緩やかであり、特に中心圧縮のPC試験体では明確に下に凸の曲線に移行する現象がみら

れた。横補強筋のひずみ性状について、全試験体において最大耐力付近までは材軸方向のいずれの位置のひずみもほぼ一致し、緩やかに増加していくが、最大耐力後ひび割れが生じたり損傷が集中したりすることで、材軸方向のひずみ分布に差が生じる。最大耐力後から急激にひずみが増加するが、その度合いはPC試験体よりもRC試験体のほうがより著しい傾向が見られた。

4. 実験結果の考察

4.1 曲げモーメント-曲率関係の比較

図-7に偏心圧縮試験体の曲げモーメント-曲率関係を示す。両シリーズともに曲げ終局強度はPC試験体がRC試験体を上回り、その増加率はE15シリーズが6%, E35シリーズが9%程度である。特に、曲げ終局強度後の性状に明確な違いが見られた。曲げ終局強度以前において、E15シー

ズでは圧縮主筋が降伏後RC試験体の曲げ剛性が低下しているため、曲げ終局強度時の曲率は両者ともほぼ同じであるのに対して、E35シリーズではRC試験体の曲げ終局強度時までほぼ同じ性状を示しているため、曲げ終局強度時の曲率はPC試験体のほうが上回っているという相違が見られた。

4. 2 N-M 相関曲線の比較

図-8に各偏心シリーズのPC (P30-T60) と RC (P30-T00) のN-M相関曲線を示す。荷重;Pを試験体に作用する軸力;N,Nに載荷偏心距離;eを乗じた値を作用モーメント;M ($N \cdot e$) と定義し、縦軸はNを実験時のシリンダー強度; $c \sigma_b$ に試験体全断面積を乗じた値; F_c で除し、横軸は $N \cdot e$ を F_c で除してそれぞれ無次元化している。また、中心圧縮試験体 (E00シリーズ) については、曲げ終局強度時の曲率から求めた試験体上端のたわみと回転角から真の偏心距離を算出し、 $N \cdot e / F_c$ に反映させている。偏心圧縮試験体において、RC試験体と比較してPC試験体では最大耐力が増加している様子がわかる。なお、本実験の中心圧縮試験体ではプレストレス導入の有無による最大耐力の差は確認されなかったが、既往の研究²⁾では横補強筋間隔が30mmで導入初期緊張力が降伏強度の60%レベルのプレストレスを与えると、コアコンクリートの応力-ひずみ関係の改善により、部材の最大耐力は増加することが確認されている。

4. 3 軟化域の比較

図-9に部材の平均軸ひずみ; ϵ_v について、最大耐力時 (P_{max} 時) の値に対する最大耐力から80%低下した時点 ($0.8P_{max}$ 時) の比を示す。各偏心シリーズにおいてP30-T60はRC試験体を上回っており、その増加率は11%~17%の範囲である。またE35シリーズにおいて、P30-T30はRCとほぼ同じ値であり、P60-T60はRC試験体を大きく下回った。以上のことから、補強筋間隔が30mm、初期導入緊張力が降伏強度の60%の試験体では、RC試験体と比較して軟化域での負勾配が緩やかになる傾向が見られた。

4. 4 横補強筋ひずみ性状の比較

図-10にE15シリーズの横補強筋のひずみ分布図を例示する。各偏心シリーズにおいて、同変形時で比較すると特に最大耐力以降でPC試験体より

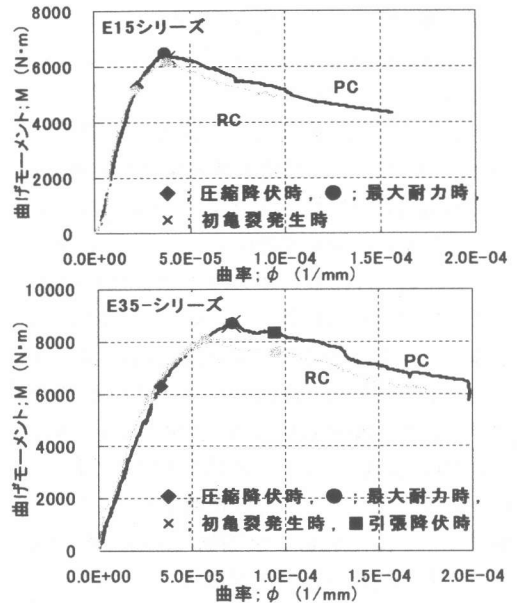


図-7. 曲げモーメント-曲率関係

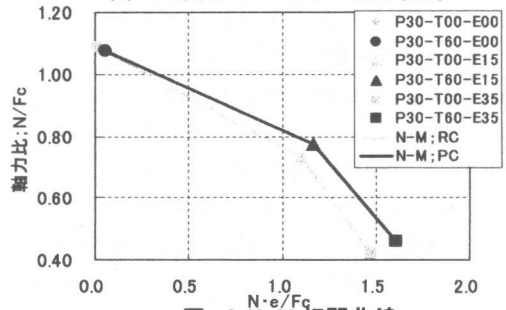


図-8. N-M 相関曲線

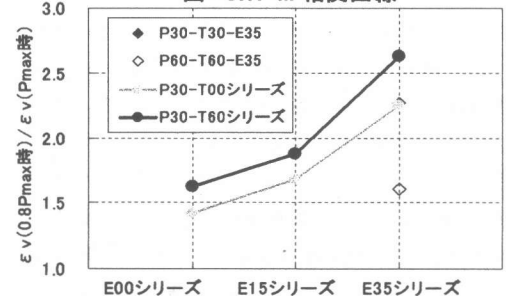


図-9. $\epsilon_v(0.8P_{max}) / \epsilon_v(P_{max})$

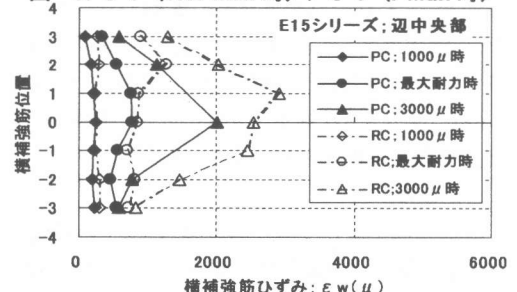


図-10. ひずみ分布図 (E15シリーズ)

もRC試験体のほうがひずみが大きい傾向にあった。図に見られるように、最大耐力付近までは全試験体において材軸方向にほぼ様なひずみ分布を示す。しかし、軟化域では損傷の集中等により局所的にひずみが増大する傾向にあるが、以後の検討には試験対象区間内の横補強筋について平面的に同位置のひずみを平均した値を用いる。図-11に最大耐力時の横補強筋ひずみについて、RC試験体； ϵ_w に対するPC試験体； ϵ_w/ϵ_w の比を示す。なお、本節における「辺中央部」「隅角部」とは図中に示した位置でのひずみの平均値を意味する。各偏心シリーズにおいてPC試験体はRC試験体を下回っており、その低下率は15%～35%の範囲である。ここで留意すべきは、これは実験開始時からの横補強筋ひずみの比較であり、PC試験体における有効プレストレス分を考慮に入れていないため、実際に生じているひずみの比較とは異なることである。

図-12に横補強筋ひずみを縦軸に、部材の平均軸ひずみを各試験体の最大耐力時軸ひずみ； ϵ_{vu} で除した値； ϵ_v/ϵ_{vu} を横軸にした関係図を示す。ここで、PC試験体（P30-T60シリーズ）については有効プレストレス分も加算した横補強筋ひずみ； ϵ_{wp} の値も併せて示している。各偏心レベルによってひずみ勾配等の影響により、横補強筋ひずみの値に差があるのは当然であるが、特筆すべきは ϵ_w はPC試験体よりもRC試験体のほうが大きい値を示しており、最大耐力後にその差が著しくなるという様子が各偏心レベルに一樣に見られることである。そして、実際のPC試験体には図に示すレベルのひずみが生じている。ここで、 ϵ_w をコアコンクリートの軸方向の縮みに対する横方向の膨らみ（体積ひずみ）の、またRC試験体における ϵ_w とPC試験体における ϵ_{wp} をコアコンクリートに働く横拘束力の目安としてそれぞれを考えると、各偏心レベルのPC試験体のコアコンクリートには、RC試験体と比較してより小さな横方向の膨らみ（体積ひずみ）に対してより大きな拘束力が働く、という能動的な拘束効果を定性的に捉えることができた。

5. まとめ

横補強筋を用いて横方向に導入しプレストレスによる能動的な拘束効果が鉄筋コンクリート柱の曲げ圧縮性状に及ぼす影響を調べるために、偏

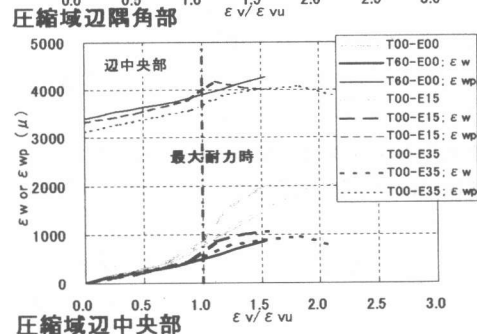
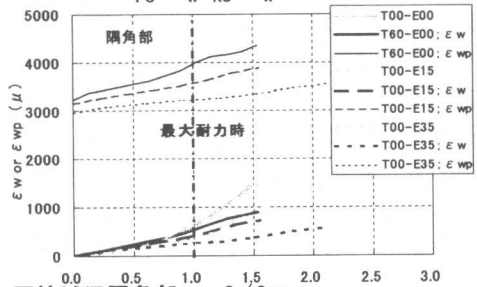
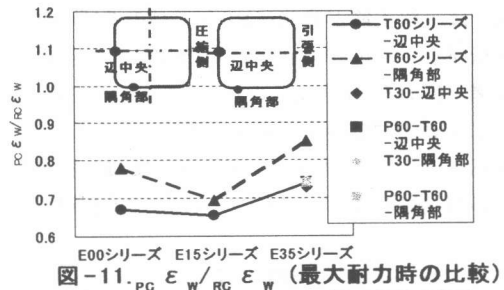


図-12. ϵ_w/ϵ_w 、 $\epsilon_{wp}/\epsilon_{wp}$ - ϵ_v/ϵ_{vu} 関係

心曲げ圧縮実験を行い、以下の結論を得た。

- 1) 偏心曲げ圧縮荷重下での軸力-軸ひずみ関係及び横補強筋のひずみ性状を把握した。
- 2) 偏心曲げ圧縮荷重下で、横方向にプレストレスを導入した試験体の最大耐力は向上した。
- 3) 軟化域での負勾配は、横方向にプレストレスを導入した試験体のほうがより緩やかになる。
- 4) 横補強筋のひずみ性状から、横方向にプレストレスを導入した試験体では能動的な拘束効果が働いていることが定性的ではあるが把握できた。本研究における能動的な拘束効果についての定量的把握については今後検討を要する。

【参考文献】

- 1) 建設省総合技術開発プロジェクト；高強度鉄筋分科会 コンファインドコンクリートWG 研究成果報告書，1993.3
- 2) 渡部洋，横谷榮次，林静雄，伊藤嘉則；横補強筋を用いてプレストレスを導入したRC柱の圧縮及びせん断性状に及ぼす緊張力の影響，第10回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp 392-402, 2000.10.
- 3) 張冠華，嶋津孝之他；RC柱の力学的性状に及ぼす歪勾配の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18, No.2, pp 881-886, 1996