

論文 横補強筋で拘束された鉄筋コンクリート柱の曲げ圧縮性状

田 福勝*¹・崎野健治*²・孫 玉平*³

要旨：横補強筋の配筋形式等が鉄筋コンクリート柱の曲げ圧縮性状に及ぼす影響および断面のひずみ勾配が圧縮域のコンクリート応力-ひずみ関係に及ぼす影響を調べるために、250x250x750mmの柱試験体（12体）の一定軸力下における曲げ圧縮実験を行った。その結果、中心圧縮実験により得られたコンクリートの応力-ひずみ関係モデルは、曲げ圧縮を受ける断面の曲げ性状をより精度よく評価するためには、断面のひずみ勾配の影響を考慮に入れて修正する必要があることが分かった。

キーワード：鉄筋コンクリート柱、横補強筋、配筋形式、曲げ圧縮性状、軸力比

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の耐震性能を向上させるには、柱の靱性を改善することが非常に重要であることが知られている。1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震による阪神大震災では、（帯筋の配置が適当ではない）柱の靱性不足のため倒壊に至ったと考えられる被災例が数多く見られた。鉄筋コンクリート柱の変形性能を改善するためには様々な工夫がなされているが、帯筋を横補強筋（コンクリートの横方向の膨らみを拘束する鉄筋）として配筋する方法が実用的かつ有効であることがよく知られている。本論文においては、横補強筋で拘束された鉄筋コンクリート柱の耐震性能を正確に把握するために、次の2点について検討を行った。ひとつは横補強筋の配筋形式等が柱の曲げ圧縮性状に及ぼす影響であり、他のひとつは断面のひずみ勾配が圧縮域のコンクリート応力-ひずみ関係に及ぼす影響である。著者らは、横補強筋により拘束された鉄筋コンクリート柱の曲げせん断圧縮性状について、既に実験的および解析的研究を行っている[1]。しかしながら、曲げせん断を受ける柱の場合は材軸方向のモーメント勾配や部材端部の付加拘束などのため、上述した二つの問題点を明らかにすることが困難である。断面のひずみ勾配の影響に関しては、多くの研究がなされているが、必ずしも、意見が一致していない[2, 3, 4, 5]。したがって、本研究においては上述した二つの問題点を明らかにするために、一定軸力下における曲げ圧縮実験を行った。今回の実験では10体の試験体は単調載荷で、2体の試験体は繰り返し載荷で曲げ圧縮実験を行い、載荷パターンの柱の曲げ圧縮性状に及ぼす影響も調べた。

2. 実験概要

2. 1 試験体

試験体は 250x250x750mmの正方形断面柱である。横補強筋の配筋形式には単純型（Aタイプ）と複合型（Eタイプ）の二種類を採用した。単純配筋形式と複合配筋形式の試験体を各6体計画した。試験体寸法の詳細および横補強筋の配筋形式を図-1に示す。コンクリートの圧縮強度（設計基準強度が40MPa）、主筋量（D13異形鉄筋を12本配筋、主筋比にして2.44%）、横補強筋の

*1 九州大学大学院 工学研究科建築学専攻、工修（正会員）

*2 九州大学教授 工学部建築学科、工博（正会員）

*3 九州大学助手 工学部建築学科、工博（正会員）

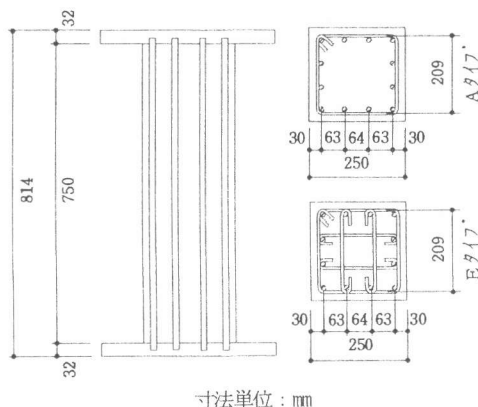


図-1 試験体寸法詳細

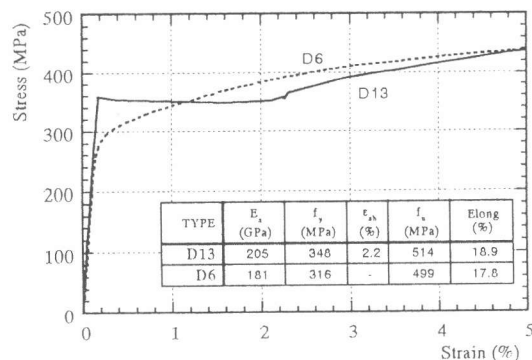


図-2 鋼材の引張実験結果

直径 (D6異形鉄筋)、鉄筋の降伏強度は実験定数とした。用いた鉄筋の引張応力-ひずみ関係を図-2に示す。載荷パターンは単調載荷と繰返し載荷の二種類である。軸力比は、3%、30%、60%の3レベルを採用した。横補強筋の体積比は、3.06%、2.27%、1.63%、0.81%の4種類を採用した。試験体概要と実験結果の一覧を表-1に示す。

表-1 試験体概要および実験結果の一覧

試験体名	コンクリート 強度 (MPa)	軸力比 (%)	横補強筋 体積比 (%)	主筋比 (%)	実験結果		解析結果		比較
					$M_{max, e}$ (kN-m)	ϵ_{cu} (%)	$M_{max, c}$ (kN-m)	ϵ_{cu} (%)	
A27M00	40.6	3	2.27	2.44	70.2	0.488	54.7	0.138	1.28
A27M30		30	2.27		103.6	0.429	105.2	0.292	0.98
A27M60		60	2.27		104.3	0.366	103.2	0.331	1.01
A38M30		30	1.63		100.8	0.372	105.1	0.291	0.96
A38M60		60	1.63		106.1	0.421	102.7	0.331	1.03
A75M30		30	0.81		106.3	0.335	105.0	0.291	1.01
E40M60		60	3.06		107.0	0.324	105.2	0.331	1.02
E54M30		30	2.27		105.6	0.329	105.4	0.310	1.00
E54M60		60	2.27		107.4	0.358	104.7	0.331	1.03
E75M30		30	1.63		104.7	0.348	105.4	0.328	0.99
E40C60		60	3.06		111.4	0.323			
E54C30		30	2.27		109.7	0.393			

試験体名凡例

A 38 M 60
① ② ③ ④

- ① 配筋形式 (A: 単純配筋形式; E: 複合配筋形式)
- ② 横補強筋の材軸方向間隔 (mm)
- ③ 載荷形式 (M: 単調載荷; C: 繰返し載荷)
- ④ 軸力比 (%)

コンクリートに使用したセメントは普通ポルトランドセメントで、粗骨材は碎石 (最大粒径が13mm) である。試験体材質の軸方向に沿う不均一性を避けるために、コンクリートを横打した。実験時材令でのコンクリートのシリンダー強度を表-1に示す。

軸力と曲げモーメントは試験体の両端部に取り付けたエンドプレート (厚さが32mm) を通じて試験体に載荷した。主筋の両端はエンドプレートに溶接により取り付けられた。

2. 2 加力および測定方法

加力および測定装置を図-3に示す。実験では、まず軸力を設定値 (一定軸力) まで載荷し、それから加力プログラムに従って曲げモーメントを載荷した。一定軸力

表-2 コンクリートの応力-ひずみ関係

$$Y = \frac{AX + (D-1)X^2}{1 + (A-2)X + DX^2}$$

where

$$Y = f_c / f'_{cc}, \quad X = \epsilon_c / \epsilon_{co}$$

$$K = f'_{cc} / f'_c = 1 + 11.5 \frac{\rho_h f_{yh}}{f'_c} \left(\frac{d''}{C} \right) \left(1 - \frac{s}{2D_c} \right)$$

$$A = E_c \epsilon_{co} / f'_{cc}, \quad E_c = (0.69 + 0.332 \sqrt{f'_c}) \times 10^4$$

$$\frac{\epsilon_{co}}{\epsilon_o} = \begin{cases} 1 + 4.7(K-1), & K \leq 1.5 \\ 3.35 + 20(K-1.5), & K > 1.5 \end{cases}$$

$$\epsilon_o = 0.94(f'_c)^{1/4} \times 10^{-3}$$

$$D = 1.5 - 0.017f'_c + 1.6 \sqrt{(K-1)f'_c / 23}$$

Notation:

- f'_{cc} : Strength of confined concrete (in MPa)
- f'_c : Strength of concrete cylinder (in MPa)
- ρ_h : Volumetric ratio of hoops
- f_{yh} : Yield strength of hoop (in MPa)
- C: Unsupported length of perimeter hoop
- d'' : Nominal diameter of perimeter hoop
- s: Spacing of hoop
- D_c : Core dimension

は5000kN油圧試験機により蒲鉾形球座を介して載荷した。曲げモーメントは試験体両端のエンドプレートに取り付けた加力ビームを二台の200kN 油圧ジャッキで押し引きすることにより載荷した。また、曲げモーメントを加える時、付加軸力を伴うが、5000kN試験機の載荷軸力を調整することによって軸力が一定になるようにした。

各試験体は200kN 油圧ジャッキのラムのストローク容量一杯まで実験を行った。

試験体中央部（検長500mm）の平均曲率と軸縮みを試験体に埋め込んだボルトに固定した測定用フレームに取り付けた二台の変位計により測定した。P△効果による曲げモーメントを求めるため、上下の蒲鉾形球座の回転中心を結んだ線から検長両端の断面中心を結んだ線までの水平変位を測定した。ひずみゲージにより、主筋と横補強筋のひずみを測定した。また、一部の試験体についてはコンクリート表面のひずみも測定した。

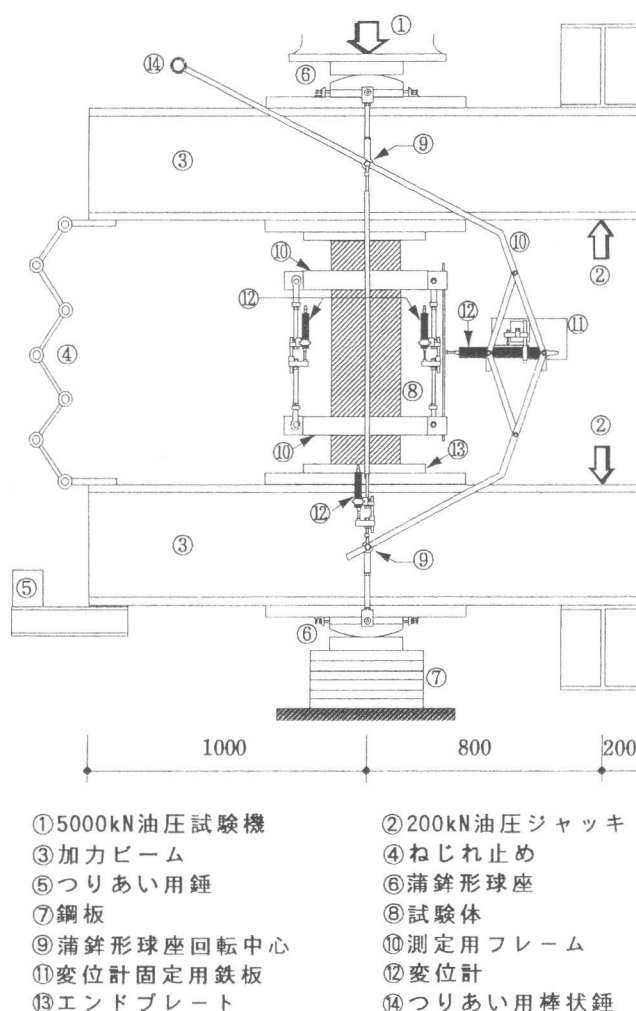


図-3 加力および測定装置

3. 実験結果および考察

図-4に曲げモーメントー曲率関係を示す。図-4のうち(1)、(2)、(3)は配筋形式、横補強筋の体積比が異なる場合の比較である。図より分かるように、軸力比の違いによって曲げ終局強度が異なるのは当然であるが、曲げモーメントー曲率関係の下り勾配も顕著に変化した。即ち、軸力比の増大にしたがって曲げ終局強度後の耐力低下が大きくなる。その原因としては、軸力比が大きくなるほど中立軸比が大きくなり、応力ーひずみ関係の下り勾配領域に入るコンクリート部分の断面に占める割合が増大することが考えられる。

図-4のうち(4)、(5)、(6)、(7)は配筋形式、軸力比が同じで、横補強筋の体積比が異なる場合の比較である。横補強筋の体積比が大きくなるにしたがって、曲げモーメントー曲率関係の下り勾配が緩やかになる。即ち、曲げ終局強度後の靱性が改善される。しかし、曲げ終局強度はほとんど上昇しない。その理由は、試験体の断面積に対するかぶりコンクリート部分の面積が30%以上であるため、曲げ終局強度がかぶりコンクリートの剥離により決まっているためである。横補強筋の体積比の柱の曲げ性状に及ぼす影響は、かぶりコンクリート剥離後に現れるようになる。

図-4のうち(8)、(9)、(10)は横補強筋の体積比、軸力比が同じで、横補強筋の配筋形式が異なる場合の比較である。軸力比が高くなるにつれて、靱性改善効果はEタイプの方がAタイプの方より顕著になることが分かる。

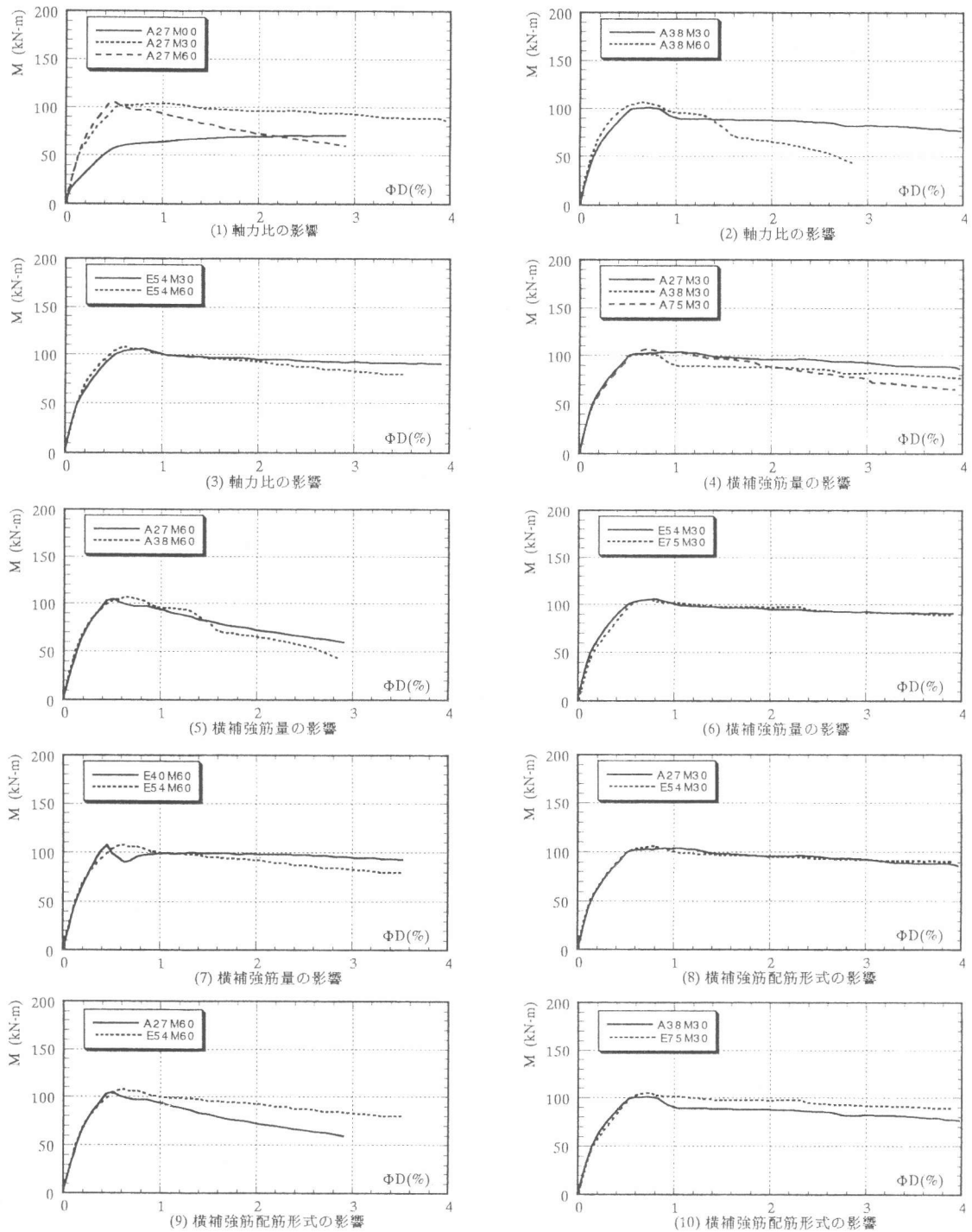


図-4 曲げモーメント-曲率関係 (単調載荷)

曲げ終局強度時のコア圧縮縁ひずみ ε_{cu} の実測値を表-1 に示す。横補強筋の配筋形式、体積比および軸力比と ε_{cu} の間に明確な相関関係が見られなかった。その理由としては今回の実験の曲げ終局強度がかぶりコンクリートの剥離により決められたためと考えられる。

繰り返し載荷した試験体の曲げモーメント-曲率関係を図-5 に示す。繰り返し載荷した試験体の曲げモーメント-曲率関係の包絡線と (載荷パターンを除く) 実験条件が全く同じである単調載荷した試験体のそれとの比較により次の2点が分かる。①軸力比が 30% の場合は曲げ終局強度および下り勾配はほぼ同じである。②軸力比 60% の場合は曲げ終局強度はほとんど同じである

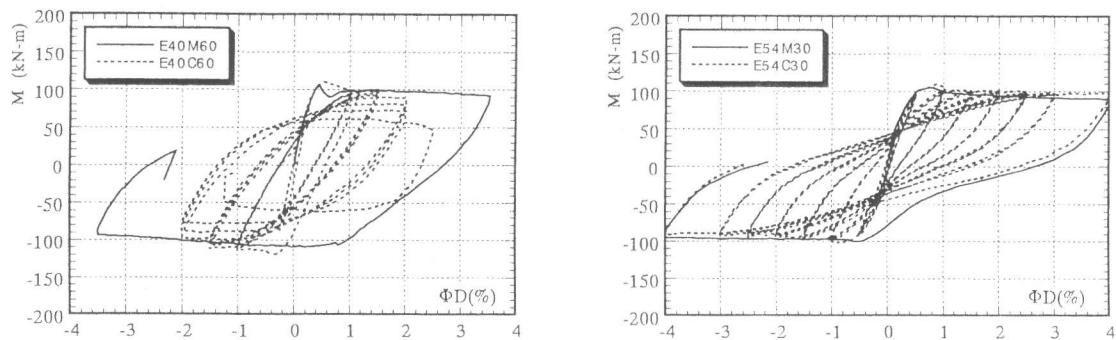


図-5 曲げモーメント-曲率関係（繰返し載荷）

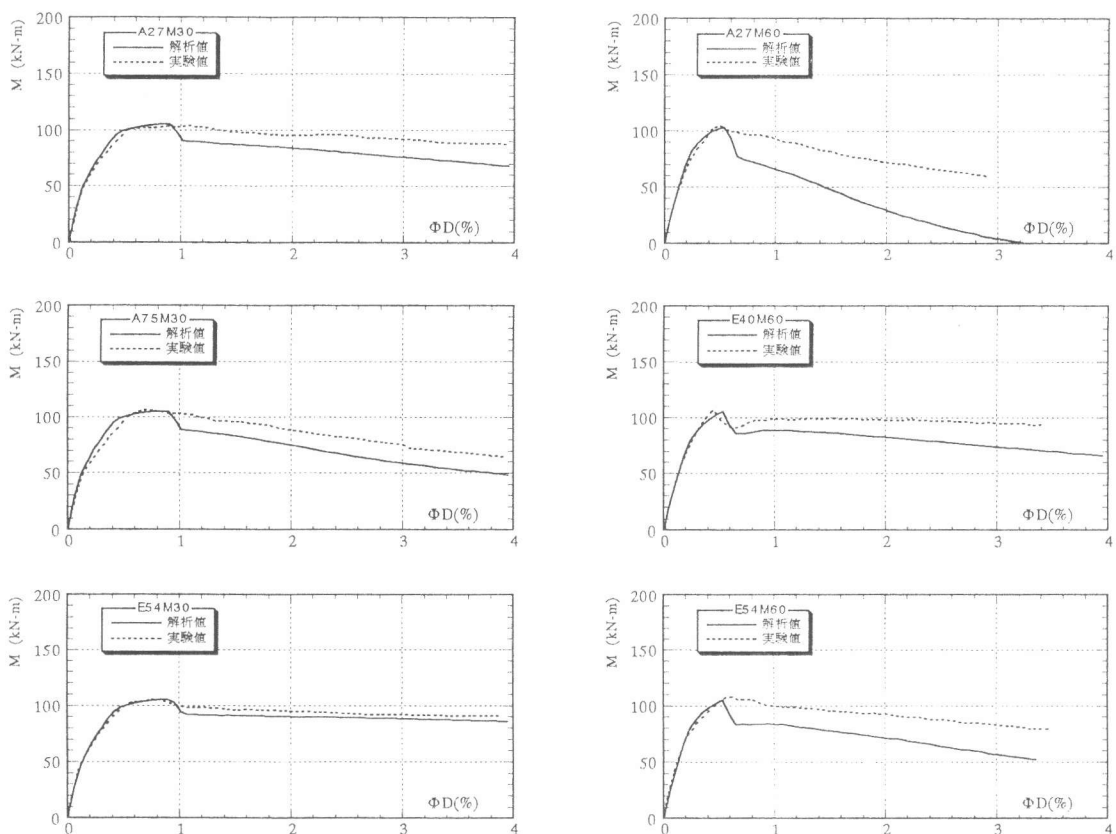


図-6 曲げモーメント-曲率関係（実験結果と解析結果の比較）

が、曲げ終局強度後の性状には顕著な違いが見られる。即ち、軸力比が高い場合は、繰返し振幅（曲率）が大きくなるにしたがって、曲げ終局強度後の耐力低下が顕著になる。また、同一振幅でも繰返しの回数の増加に伴って、耐力低下が著しくなる。その原因としては、柱が有すると思われる“安定限界軸力”を超えた軸力を載荷したためと思われる。横補強筋で拘束された鉄筋コンクリート柱の安定限界軸力比については、今後の研究課題としたい。

4. 断面のひずみ勾配の影響について

断面のひずみ勾配の影響を調べるために、中心圧縮実験により得られたコンクリート応力-ひずみ関係モデルを用いて、断面分割法により曲げモーメント-曲率関係の解析を行い、そしてその解析結果と実験結果との比較を行った。解析仮定は次の通りである。①平面保持仮定、②鉄筋

を完全弾塑性材料とする、③コンクリートは引張応力を負担しない、④コンクリートの応力-ひずみ関係は崎野-孫が提案したモデルを用いる[6]（表-2 参照）。⑤かぶりコンクリートはその圧縮ひずみが0.4%に達した後、応力を負担しない。

曲げモーメント-曲率関係の実験結果と解析結果の比較を図-6に示す。図-6および表-1より分かるように、曲げ終局強度に対して、いずれの試験体も精度よく評価できる。しかしながら、下り勾配については軸力の高い試験体の場合は精度よく評価できない。即ち、軸力比が大きくなるにつれて、曲げモーメント-曲率関係の下降域の耐力を過小評価する傾向が見られた。その主な理由としては断面のひずみ勾配がコンクリートの応力-ひずみ関係に及ぼす影響を無視したことが考えられる。中心圧縮実験により得られたコンクリートの応力-ひずみ関係モデルを断面のひずみ勾配の影響を考慮に入れて修正する方法については現在検討中であり、別論文にて報告する予定である。

5. まとめ

横補強筋の配筋形式等が鉄筋コンクリート柱の曲げ圧縮性状に及ぼす影響および断面のひずみ勾配が圧縮域のコンクリート応力-ひずみ関係に及ぼす影響を調べるために、一定軸力下における曲げ圧縮実験を行い、次の結論を得た。

1) 曲げ圧縮を受ける断面の曲げモーメント-曲率関係を精度よく評価するには、コンクリートの応力-ひずみ関係に及ぼす断面のひずみ勾配の影響を考慮に入れる必要がある。

2) 横補強筋の直径、体積比および軸力比が同じ場合は、単純配筋形式より、複合配筋形式の方が靱性の上昇量が大きい。高軸力比の場合はその結果がより顕著に見られる。

3) かぶりコンクリートの断面積と柱の断面積との面積比が大きい場合は、高強度横補強筋を多量に配筋しなければ、鉄筋コンクリート柱の曲げ終局強度の上昇が期待できない。即ち、横補強筋の配筋形式を問わずに曲げ終局強度はかぶりコンクリートの剥離により決まる。

〔謝辞〕本実験の実施に当たっては九州大学文部技官川口晃氏、浜辰夫氏、久島昭久氏、津賀山健治氏、大学院生池田崇氏、大庭央久氏、AKLAN Amin氏および学部4年生石井聖治氏、大場一介氏の多大な協力を得た。ここに厚くお礼を申し上げます。

〔参考文献〕

- [1] Y.P. Sun, K.Sakino, F.S.Tian, Concrete Columns Confined by High-Strength Hoops, Proc. of EASEC-5, Australia, Vol. 1, p.519, June, 1995
- [2] M.Sargin, S.K.Ghosh and V.K.Handa: Effects of Lateral Reinforcement Upon the Strength and Deformation Properties of Concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.23, No.75-76, p.99, June-September 1971
- [3] S.A.Sheikh, and C.C.Yeh: Analytical Moment-Curvature Relations For Tied Concrete Columns, ASCE, Vol.118, No.2, p.529, Feb., 1992
- [4] 石渡康弘、平石久廣他：高強度鉄筋コンクリート造柱の高軸力下の変形性状－（その3）柱の中心圧縮・純曲げ・曲げせん断性状の相関－、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）、p.759, 1989.10
- [5] M.Saatcioglu, A.H.Salamat, and S.R. Razvi: Confined Columns under Eccentric Loading, ASCE, p.1547, Nov., 1995
- [6] 崎野健治、孫玉平：直線型横補強材により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係、日本建築学会構造系論文集、第461号、p.95, 1994.7