

## 軸圧縮下で曲げを受ける RC 柱の力学特性に関する実験的ならびに解析的研究

An Experimental and Analytical study on Mechanical Properties of RC Columns  
Subjected to Flexural Deformation under Axial Compression

亀田好洋\*・伊藤 睦\*\*・梅原秀哲\*\*・水野英二\*\*\*

Yoshihiro KAMEDA, Atsushi ITOH, Hidetaka UMEHARA and Eiji MIZUNO

\* 学生会員 名古屋工業大学大学院博士前期課程 工学研究科都市循環システム工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

\*\* 正会員 博士 (工学) 中部大学准教授 工学部都市建設工学科 (〒487-8501 春日井市松本町 1200)

\*\*\* フェロー会員 Ph.D. 名古屋工業大学大学院教授 工学研究科社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

\*\*\* 正会員 Ph.D. 中部大学教授 工学部都市建設工学科 (〒487-8501 春日井市松本町 1200)

The present paper deals with the experimental and analytical study on the mechanical properties of reinforced concrete (RC) columns subjected to flexural deformation under axial compression. The pushover loading test has been performed on 8 types of RC column specimens with the different lateral hoop ratios under constant axial compression force. The experimental results have been compared with the analytical results from the finite element program FEAP, then and the mechanical properties, such as the toughness and the plastic hinge moment in the post-peak region of RC columns, have been examined for 8 types of RC column specimens. Furthermore, the effect of axial loading and the lateral hoop ratio on the material property (i.e., softening behavior) of the core concrete has been discussed. It turns out that the lateral hoop ratio almost has no influence on the post-peak behavior of RC columns at structural level and the softening behavior of the core concrete at material level.

**Key Words:** RC column, Lateral hoop, Axial compression force, Mechanical properties, Stress-strain, Pushover loading test, FEM analysis

キーワード: 鉄筋コンクリート柱, 横補強筋, 軸力, 力学特性, 応力-ひずみ, 一方向載荷実験, 有限要素解析

## 1. はじめに

平成 7 年 (1995) 年に発生した兵庫県南部地震における鉄筋コンクリート (RC) 構造物 (とくに, RC 橋脚) の倒壊を契機として, 耐荷性能のみならず靱性能に代表されるポストピーク領域での RC 構造物の力学特性をも考慮に入れた性能照査型設計法が徐々に採用されてきている。震災以降, RC 構造物の耐震性能の向上ならびにポストピーク挙動の解明を目的とした実験的ならびに解析的研究は精力的に行われてきており<sup>1)</sup>, なかでも過大地震力を受ける RC 橋脚ならびに RC 柱のポストピーク変形挙動に関する解析的研究は, 三次元有限要素解析などにより精度良く予測できる段階にまで至っている。しかし, RC 橋脚のような実構造物を対象とした三次元有限要素解析は解析モデルならびに構成モデルの設定, さらに膨大な解析時間を要するなどの課題により, 三次元有限要素などによる解析的研究はそれ程多くなされていないのが現状である<sup>例えば, 2), 3)</sup>。それゆえ, ポストピーク領域

をも含めた RC 構造物の力学挙動を精度良く再現可能でかつ簡易的な解析手法の開発が望まれる。

一般に, 中心軸圧縮を受けるコンファインドコンクリート部材の靱性能を向上させるには, 最適量の横補強筋を配置して, それに取り囲まれる内部コンクリート (以下, コアコンクリート) へのコンファインド効果を高める方法が有効かつ効果的であることは知られている。一方, 既往の研究<sup>4), 5)</sup>によれば, 軸圧縮力 (以下, 軸力) を受ける RC 柱においても, 横補強筋量の増加に伴うコンファインド効果および靱性能の向上が実験的に確認されており, これらの検討結果を基にして, RC 柱の水平保有耐力照査を行う際のコンクリートの応力-ひずみ関係式が提案されている。また, 秋山ら<sup>6)</sup>は, コンクリートの一軸圧縮強度, 横拘束筋の降伏強度, 横拘束筋量, 横拘束筋の配筋形状をパラメータにした RC 柱の一軸圧縮実験を行い, 横拘束を受ける RC 柱の変形特性に与える影響を実験的に考察している。

しかし, 曲げ変形を受ける RC 柱の場合には中心軸圧

縮力のみを受ける場合とは載荷形態が異なるため、これらコンクリートの応力-ひずみ関係式を適用する妥当性を十分に検証した上で、有限要素解析などに採り入れる必要がある。すなわち、軸力のみが作用する場合と同様のコンファインド効果が曲げ変形を受ける RC 柱の場合においても期待できるのかについて、横補強筋量および軸力などを要因として、実験的ならびに解析的に検討する必要がある。

それゆえ、本研究では、一定軸力下で曲げ変形を受ける RC 柱の力学特性を把握するため実験的ならびに解析的な検証を行った。ここでは、「載荷軸力」ならびに「横補強筋間隔」を要因とした RC 柱供試体に対して、一定軸力下での一方向載荷実験ならびに有限要素解析プログラム (FEAP)<sup>7)</sup> を用いたファイバーモデルによる二次元有限要素解析を実施した。本実験結果と解析結果との比較・検討を通じて、RC 柱の力学特性、とくにポストピーク領域における力学特性に及ぼす材料特性の考察を行った。ここでは、RC 柱のポストピーク領域での力学特性に与える「載荷軸力」ならびに「横補強筋間隔」の影響、また、これら要因による RC 柱のコアコンクリートの材料特性 (応力-ひずみ関係) に与える影響について実験的かつ解析的に検証した。

## 2. 実験の概要

### 2.1 供試体概要

本研究では、図-1 に示すような断面 200 mm×200 mm、高さ 1000 mm、せん断スパン比 5 の供試体 (曲げ破壊先行型の供試体) を用いた。供試体には軸方向筋として D10 (SD295A) を 8 本、かぶり 18 mm で配置した。また、横補強筋には D6 (SD295A) を用い、間隔  $s=16, 25, 35, 50, 65, 90, 105$  および 120 mm のいずれかで配置した。なお、打設には、普通コンクリートを用い、打設後 14 日間は水中、それ以降は気間養生を実施した。本研究において作成した供試体ならびにそれら供試体が有する面積横補強筋比の一覧を表-1 に示す。

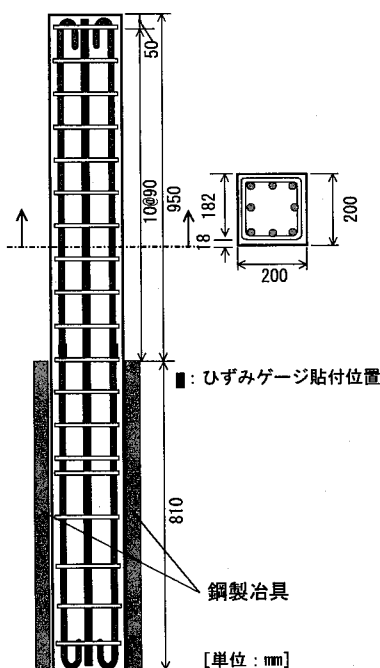


図-1 供試体概要 (一例)  
(横補強筋間隔  $s = 90$  mm)

表-1 本研究で用いた供試体ケース一覧

| 横補強筋間隔 | 載荷軸力    |          | 面積横補強筋比 |
|--------|---------|----------|---------|
|        | 5 %     | 10 %     |         |
| 16 mm  | 86.8 kN | 173.6 kN | 2.48 %  |
| 25 mm  | 81.9 kN | 164.5 kN | 1.59 %  |
| 35 mm  | 91.0 kN | 182.0 kN | 1.13 %  |
| 50 mm  | 90.3 kN | 180.6 kN | 0.79 %  |
| 65 mm  | 86.8 kN | 173.6 kN | 0.61 %  |
| 90 mm  | 81.9 kN | 164.5 kN | 0.44 %  |
| 105 mm | 91.0 kN | 178.5 kN | 0.38 %  |
| 120 mm | 77.0 kN | 154.0 kN | 0.33 %  |

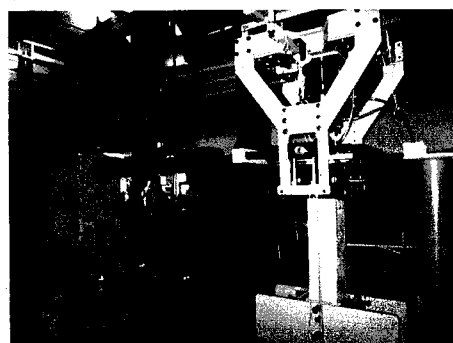


写真-1 載荷装置全景

## 2.2 載荷ならびに計測方法

### (1) 載荷方法

本研究では、供試体 (図-1 参照) を鋼製治具に挿入し、高力ボルトにより完全固定の条件となるように、供試体を固定した。なお、締め付け長さとして基部下 810 mm を確保している。供試体固定後、写真-1 に示すような載荷装置を用い、RC 柱に対して鉛直ジャッキにより一定軸力を作用させると同時に、水平ジャッキにより水平変位を柱頂部に与え、一方向載荷実験を実施した。一定軸力の大きさは、累加軸耐力の 5 % または 10 % とし、軸力載荷後、柱頂部の水平変位が 150 mm に至るまで変位制御により水平荷重を作用させた。供試体に対して載荷軸力値の一覧を表-1 に示す。

### (2) 計測方法

本研究では載荷過程において、水平荷重、水平変位および柱基部の軸方向鉄筋ひずみを計測した。水平荷重ならびに水平変位は水平ジャッキから出力された値を計測した。なお、水平変位については、レーザー変位計を載荷方向側に設置し、水平ジャッキから得られる値の精度について確認した。軸方向鉄筋ひずみについては、軸方向鉄筋 8 本のうち供試体隅角部に位置する 4 本に対して、打設前に鋼材用ひずみゲージを貼付し、載荷時に電気抵抗値を計測した。

## 2.3 材料試験

載荷実験ならびに数値解析を実施するにあたり必要となる材料定数を材料試験により求めた。コンクリートには「コンクリートの圧縮強度試験方法 (JIS A 1108)」<sup>8)</sup>

表-2 軸方向筋ならびにコンクリートの材料定数

| 横補強筋間隔 (mm) |             | 16    | 25    | 35    | 50    | 65    | 90    | 105   | 120   |
|-------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| コンクリート      | 圧縮強度 (MPa)  | 38.9  | 36.6  | 39.2  | 41.3  | 38.9  | 36.6  | 37.7  | 37.7  |
|             | ピークひずみ (%)  | 0.228 | 0.229 | 0.222 | 0.209 | 0.228 | 0.229 | 0.267 | 0.267 |
|             | ヤング係数 (GPa) | 32.3  | 31.4  | 33.0  | 33.1  | 32.3  | 31.4  | 30.5  | 30.5  |
| 軸方向筋        | 降伏強度 (MPa)  | 350.0 |       |       |       |       |       |       |       |
|             | 引張強度 (MPa)  | 497.4 |       |       |       |       |       |       |       |
|             | ヤング係数 (GPa) | 183.4 |       |       |       |       |       |       |       |

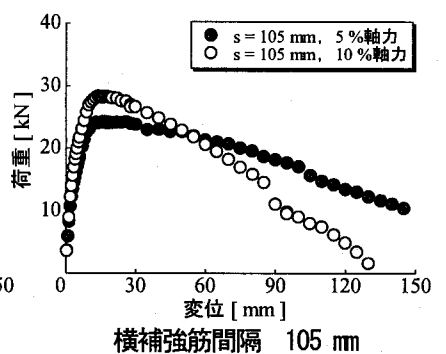
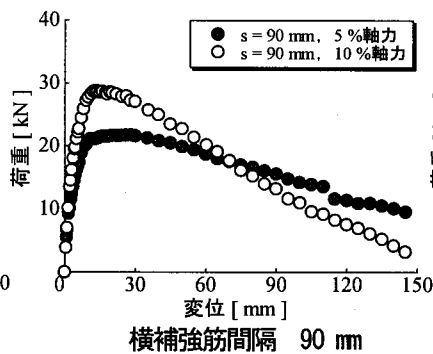
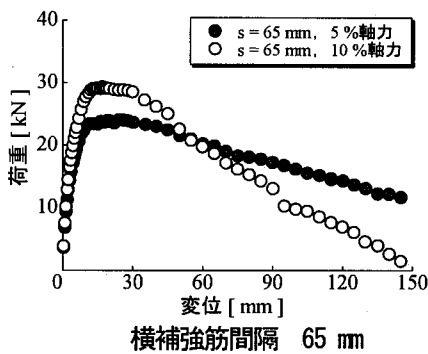
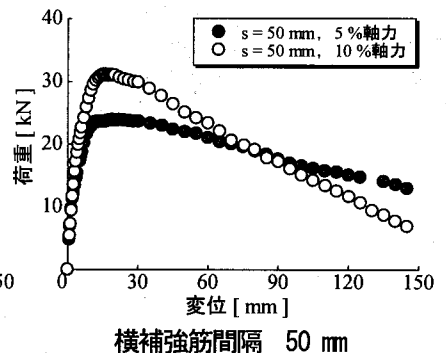
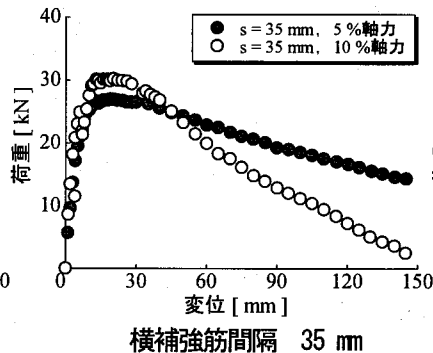
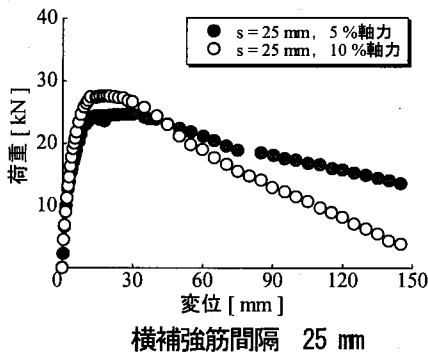
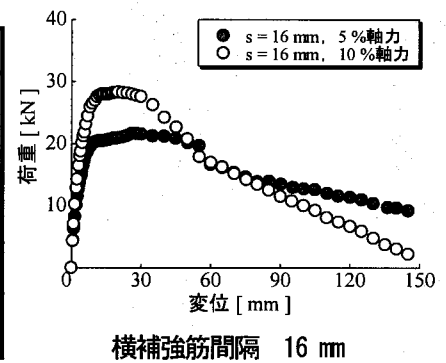


図-2 載荷実験から得られた荷重-変位関係

に基づき、直径  $D=100$  mm、高さ  $H=200$  mm (形状比  $H/D=2$ ) の試験体に対して圧縮力を載荷した。軸ひずみの測定にはコンプレッソメータ (測定間隔: 100 mm) を使用し、端面部分の影響を取り除いた平均応力-ひずみ関係から必要な材料定数を求めた。また、鉄筋については「金属材料引張試験方法 (JIS Z 2241)」<sup>8)</sup>に基づき、試験片に対して引張力を載荷した。軸ひずみの測定には鋼材用ひずみゲージを使用し、コンクリートの場合と同様、平均応力-ひずみ関係から必要な材料定数を求めた。上述した材料試験から得られた材料定数を表-2 に示す。

### 3. 実験結果および考察

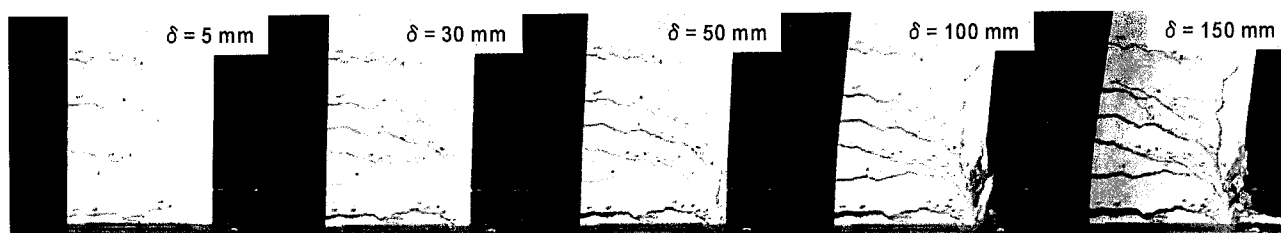
ここでは、各供試体の実験結果に対する考察を行う。なお、実験治具の不備により、横補強筋間隔  $s=120$  mm、載荷軸力 5 % ならびに 10 % の供試体に対するポストピーク領域における実験データを計測することができなかつ

たため、ここでは割愛したことを付記する。

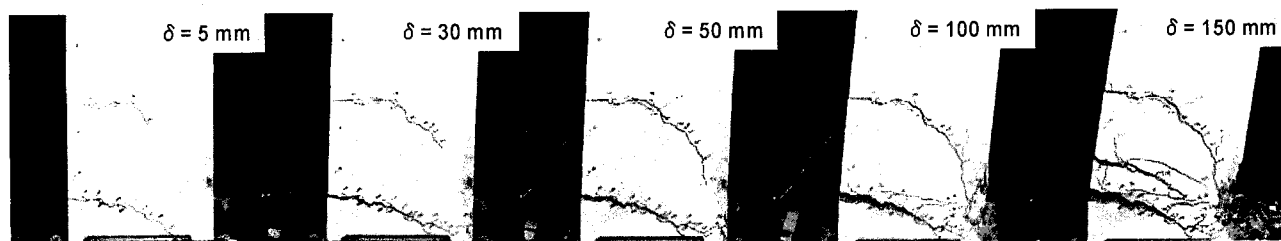
#### 3.1 荷重-変位関係

各供試体に対する載荷実験から得られた「荷重-変位関係」を図-2 に示す。本実験では、横補強筋間隔の大きい供試体 (とくに、 $s=105, 120$  mm) を除き、いずれの供試体も、軸方向筋が降伏し、最大耐力に達した後、圧縮側基部においてコンクリートが圧壊し、曲げ破壊を呈した。なお、横補強筋間隔の大きい供試体 (とくに、 $s=105, 120$  mm) では、曲げせん断ひび割れが確認された。

まず、載荷軸力の違いによる影響に関しては、載荷軸力 5 % (5 % 軸力) の場合、荷重が約 21~26 kN、変位が約 25 mm で最大耐力を迎えるのに対し、載荷軸力 10 % (10 % 軸力) の場合、荷重が約 28~31 kN、変位が約 15 mm で最大耐力を迎える。最大耐力は 10 % 軸力の方が高いが、最大耐力時の変位は 5 % 軸力の方が大きくなる傾向にある。また、最大耐力以降のポストピーク領域における部

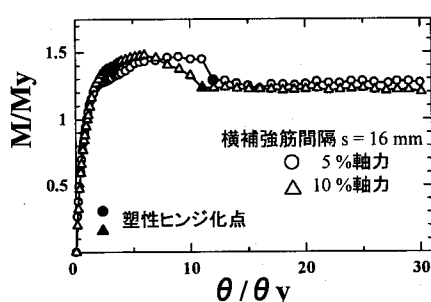


(a) 横補強筋間隔 16 mm 5 %軸力 (16A)

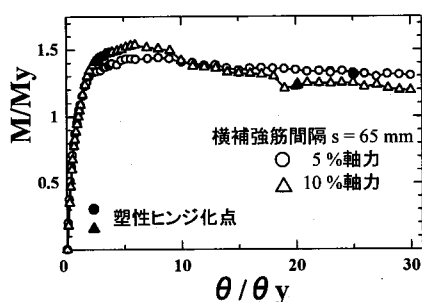


(b) 横補強筋間隔 90 mm 5 %軸力 (90B)

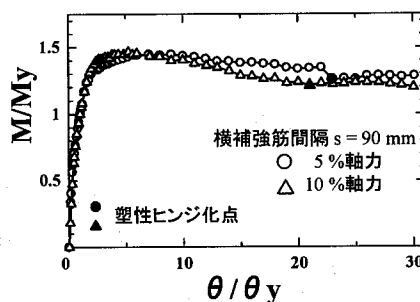
写真-2 柱基部 1.5D (300 mm) 区間の損傷状況の進展



(a) 横補強筋間隔  $s = 16$  mm



(b) 横補強筋間隔  $s = 65$  mm



(c) 横補強筋間隔  $s = 90$  mm

図-3 無次元化曲げモーメント-部材回転角関係 (一例)

材の軟化勾配は、5 %軸力よりも10 %軸力の方が大きくなり、脆性的な破壊挙動を呈していることが確認された。

次に、横補強筋間隔の違いによる影響に関しては、全ての供試体間で最大耐力ならびにポストピーク領域における力学挙動に差異はほとんど確認できない。それゆえ、一方向荷重の場合、横補強筋間隔の要因が RC 柱のポストピーク領域までの力学特性に与える影響は、荷重軸力の要因ほどはないと推察される。

### 3.2 部材の損傷状況

一例として、荷重軸力5 %、横補強筋間隔  $s = 16$  mm および 90 mm の柱基部 1.5 D (300 mm) 区間の損傷状況を写真-2 に示す。いずれの供試体においても、水平変位が約 5 mm で引張側の軸方向筋の降伏が生じた後、水平変位が約 30 mm で曲げひび割れが圧縮鉄筋位置まで進展し、部材の耐荷力が低下し始める傾向を示している (図-2 に示す荷重-変位関係を参照)。引張鉄筋位置より圧縮側にひび割れが進展した場合、横補強筋間隔の大きい供試体の方が基部にひび割れが集中する傾向が確認でき、損傷状況に差異が見られるが、荷重-変位関係などの力学

表-3 荷重実験から得た諸数

| 横補強筋間隔                    | 16 mm   |         | 65 mm   |         | 90 mm   |         |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 荷重軸力                      | 5 %     | 10 %    | 5 %     | 10 %    | 5 %     | 10 %    |
| 降伏回転角 $\theta_y$ (rad)    | 0.005   | 0.005   | 0.005   | 0.005   | 0.005   | 0.005   |
| 降伏荷重 $P_y$ (kN)           | 16.8    | 21.7    | 18.3    | 21.4    | 16.6    | 21.6    |
| 降伏時モーメント $M_y$ (kN·mm)    | 17197.3 | 22562.2 | 18692.9 | 22312.4 | 16983.2 | 22395.0 |
| ヒンジ開始回転角 $\theta_p$ (rad) | 0.060   | 0.055   | 0.125   | 0.105   | 0.115   | 0.105   |

特性に大きな影響は認められなかった。さらに、ポストピーク領域においては、変位約 50 mm 近傍でかぶりコンクリートの圧壊が生じ、それ以降は、変位が増大するにつれ、既存のひび割れのひび割れ幅拡大とともに、圧壊ならびに剥離領域の拡大が確認された。

### 3.3 曲げモーメント-部材回転角関係

本実験から得られた各供試体に対する無次元化曲げモーメント-部材回転角関係を図-3 に示す。ここで用いる曲げモーメントとは、水平荷重ならびに軸力により基部に生じるモーメントである。なお、曲げモーメントならびに部材回転角は、引張側の軸方向鉄筋が降伏した時点

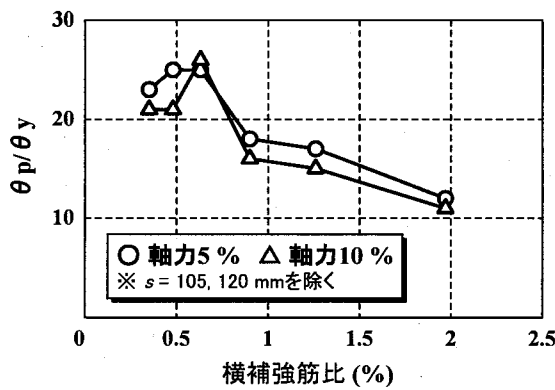


図-4 横補強筋比－塑性ヒンジ開始回転角関係

での表-3 に示す部材降伏時の曲げモーメント  $M_y$  ならびに部材回転角  $\theta_y$  により無次元化している。

図-3 より、いずれの試験体においても、プレピークならびにポストピーク領域における挙動ともに、10 %軸力の方が、若干、曲げモーメントが高い値を示す傾向にあるが、その挙動に大きな差異は認められない。また、ポストピーク領域において曲げ剛性がほぼゼロになる域が存在し、塑性ヒンジが形成されていることが確認できる。ここで、図-3 中に部材が塑性ヒンジ化した点をシンボル●および▲で示す。本研究から得た実験結果を考察する限りにおいては、载荷軸力の違いに関わらず塑性ヒンジがほぼ同変位において形成されており、载荷軸力の違いによる影響は見られない。しかし、横補強筋間隔の小さいものほど、部材の塑性ヒンジ化が低変位で形成される傾向にあり、横補強筋の違いによる影響が確認できる。いずれの供試体も、終局時の残存曲げ耐力は降伏曲げモーメント  $M_y$  の約 1.25 倍の残存曲げ耐力を保有していることから、軸圧縮力ならびに横補強筋間隔の違いが RC 柱の曲げモーメント－部材回転角関係に与える影響はそれほど大きくないものと推察される。

### 3.4 横補強筋比－塑性ヒンジ開始回転角関係

横補強筋比－塑性ヒンジ開始回転角関係を図-4 に示す。ここでいう塑性ヒンジ開始回転角とは、図-3 の曲げモーメント－部材回転角関係において、曲げ剛性がゼロとなる回転角である。これらを図-3 中にシンボル●および▲として示してある。図-4 より、横補強筋量が増加するに伴い、断面の塑性ヒンジ化が早期に開始していることが分かる。また、軸力の増加に伴い、塑性ヒンジ開始回転角  $\theta_p$  は小さくなっていることが確認できる。

### 3.5 供試体耐力－横補強筋間隔関係

载荷実験から得られた供試体耐力－横補強筋間隔関係を図-5 に示す。ここでいう供試体耐力とは、供試体の最大耐力のことである。供試体により若干の差異は見られるが、上述の通り、5 %軸力の供試体耐力と比較して、10 %

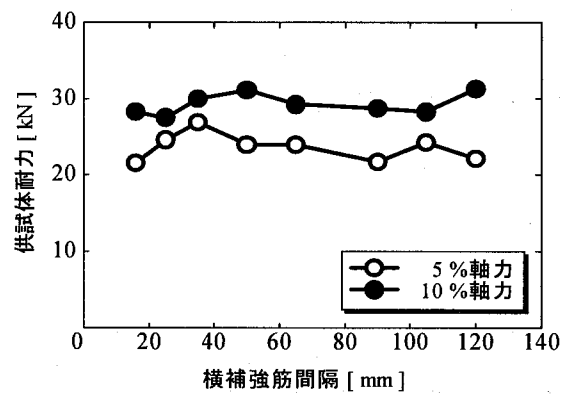


図-5 供試体耐力－横補強筋間隔関係

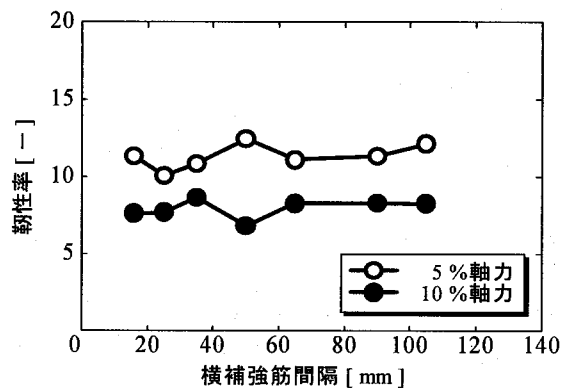


図-6 靱性率－横補強筋間隔関係

軸力の供試体耐力の方が2～3割程度高くなる傾向を呈している。既往の研究<sup>4)</sup>によれば、中心軸圧縮力を受ける RC 柱の場合、横補強筋の存在によりそれに囲まれるコンクリート（コアコンクリート）に対するコンファインド効果が生じ、最大耐力が向上し、また横補強筋間隔が小さいほど、その効果は顕著に現れるとの報告がある。しかし、本実験のような軸圧縮力下で曲げを受ける RC 柱の場合、横補強筋間隔の違いが RC 柱の最大耐力に与える影響はあまり見られなかった。

### 3.6 靱性率－横補強筋間隔関係

図-6 に荷重－変位曲線から得た部材の靱性率と横補強筋間隔との関係を示す。ここでいう靱性率とは、プレピーク領域における最大耐力の 8 割レベルでの変位 (mm) に対するポストピーク領域における同レベルでの変位 (mm) の比で定義する。図-6 に示すように、5 %軸力の場合、靱性率が約10～12を推移しているのに対し、10 %軸力の場合、靱性率は約7～8を推移している。一般にコンファインドコンクリートの靱性率は、横補強筋間隔が小さくなるほど靱性率も大きくなることが知られているが、本実験のような軸圧縮力下で曲げを受ける RC 柱の場合には、载荷軸力が靱性率に与える影響は見られるものの、横補強筋間隔の違いが靱性率に与える影響はあまり見られなかった。

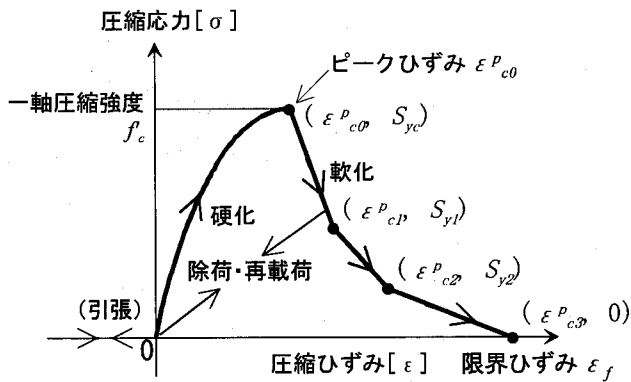


図-7 ひずみ軟化型モデル (Trilinear 型)<sup>10)</sup>

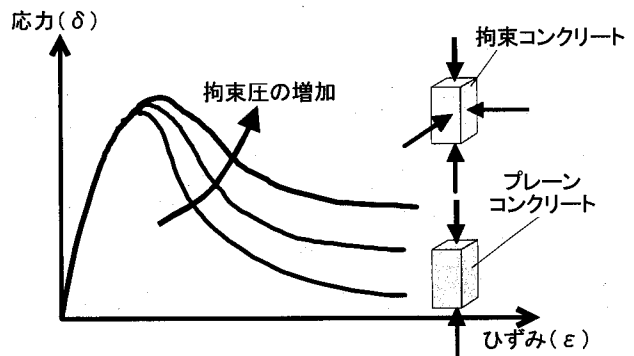


図-8 拘束を受けるコンクリートの材料特性

$$\sigma = f'_c \left\{ 2 \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon^p_{c0}} \right) - \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon^p_{c0}} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

## 4. 解析の概要

### 4.1 解析手法の概要

本研究においては、解析手法として有限要素解析プログラム FEAP<sup>7)</sup> を採用した。本解析手法は、以下に述べる 1) ～5) の仮定を採り入れたファイバーモデルに基づいており、当該プログラムのエレメントサブルーチンに材料構成モデルとともに組み込まれている。

- 1) Bernoulli-Euler のはりの理論が成り立つ。
- 2) 応力は軸応力のみが断面に作用する。
- 3) 局部座屈は考慮しない。
- 4) 有限要素解析にて、はりの変形は Hermitian 三次形状関数を用いて表現した。
- 5) Green のひずみを導入した近似更新ラグランジアン法を用いて仮想仕事の原理により定式化した。

### 4.2 材料定数

軸方向筋ならびにコンクリートの材料定数については、前述のように、材料試験から求めた平均応力-ひずみ関係を基に決定した (表-2 参照)。

### 4.3 材料構成モデル

#### (1) 軸方向筋の構成モデル

本解析では材料構成モデルとして、軸方向筋 (鋼材) 部分には、降伏棚および硬化領域までの応力-ひずみ関係を表現できる修正二曲面モデル<sup>9)</sup> を採用した。

#### (2) コンクリートの構成モデル

本解析では、コンクリートの構成モデルとして、図-7 に示すようなひずみ軟化型構成モデル<sup>10)</sup> を採用した。すなわち、コアコンクリートの応力-ひずみ関係は、圧縮領域では一軸圧縮強度まで上昇した後、軟化挙動を示すものと仮定した。一方、引張領域では、コンクリートの強度はゼロであると仮定した。以下にその詳細を示す。

**硬化域：**硬化域の応力  $\sigma$  - ひずみ  $\varepsilon$  関係式を次式のように定義した。

ここで、 $f'_c$ ：一軸圧縮強度、 $\varepsilon^p_{c0}$ ：最大応力時のひずみ (以降、ピークひずみと呼称する) である。

**除荷・再載荷域：**除荷・再載荷曲線は割線 (線形) 型のものを採用し、その勾配がひずみの進行とともに劣化するものとした。

**軟化域：**一般的に、横拘束を受けるコンクリートの軟化域における応力-ひずみ関係は、図-8 に示すように、ピーク以降、応力の低下が急であるが、ひずみが大きくなるに従い、徐々にその軟化勾配が緩やかになる傾向がある。それゆえ、本解析では、コンクリートのひずみ軟化領域に対して図-7 に示すような多直線型 (例えば、トリニア型) の応力-ひずみ関係を採用した。

#### (3) ひずみ軟化型構成モデルに関する留意点

中心軸圧縮下での横拘束を受けるコンファインドコンクリートの場合、コアコンクリートに対して、図-8 に示すような圧縮強度の増加ならびに軟化領域での靱性向上が期待できる。これまで、このようなコンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係は数多く提案<sup>5)</sup> されており、代表的な例として、修正 Kent-Park 式<sup>11)</sup> および Mander 式<sup>12)</sup> などが挙げられる。しかし、一定軸力下で横方向力により曲げ変形を受けるような RC 柱では断面内にひずみ勾配が生じるため、横拘束筋で囲まれたコンクリート内部の応力-ひずみ関係として、中心軸圧縮下での RC 柱内部に生ずるようなコンファインド効果を考慮した応力-ひずみ関係が適用可能かについては検討する余地がある。

特に、ひずみ軟化型構成モデル<sup>10)</sup> を採用する場合には、有限要素長さ依存性が数値解析結果 (とくに、荷重-変位関係結果) に生じないように構成モデルを採用することに留意する必要がある。「要素長さ」に応じて、ひずみ軟化領域におけるコンクリートの圧縮吸収エネルギー、すなわち、図-7 に示す軟化曲線を変化させる必要がある。

筆者らは、これまで既往の研究<sup>10)</sup> において軟化曲線の勾配を変化させることにより、要素長さが解析結果に与

える影響を排除する工夫を施している。その詳細は文献10)を参照されたい。

本解析では、一要素長を50 mmと設定することにより、それに応じた軟化域での応力-ひずみ関係を適用した。解析に用いる要素長さが異なれば(例えば、50 mmではなく70 mmと異なれば)、当然、解析に適用する軟化域での応力-ひずみ関係は異なったものを採用することになることに留意されたい。

#### 4.4 解析モデル

本解析では2.1節で述べた供試体を対象として、ファイバーモデルによる二次元有限要素解析を実施した。供試体仕様に基づき、図-9で示すような1要素長:50 mm、高さ方向に20分割したモデルを採用した。また、断面分割は、軸方向鉄筋の間隔ならびにかぶりを考慮し、図-10に示すようなモデルを採用した。

### 5. RC柱の力学特性に関する解析的検討

本節では、一例として、横補強筋間隔65 mm、荷重軸力5%の供試体に対する解析結果を用いて、材料の応力-ひずみ関係がRC柱の力学特性に与える影響について考察する。

#### 5.1 鉄筋の応力-ひずみ関係による影響

鉄筋の応力-ひずみ関係を変化させた場合の解析結果と実験結果との比較を図-11(a)に示す。

ここでは、コンクリートの応力-ひずみ関係を弾完全塑性型と固定し、鉄筋の応力-ひずみ関係を1) ひずみ硬化型または2) 弾完全塑性型として、2種類の解析を実施した。鉄筋の応力-ひずみ関係がいずれの状態においても、部材の初期勾配ならびに最大耐力に差は殆ど見られない。

しかし、鉄筋およびコンクリートともに弾完全塑性型の応力-ひずみ関係を採用した解析(破線)では、ポストピークを含む最大耐力近辺の挙動が実験結果と比較し

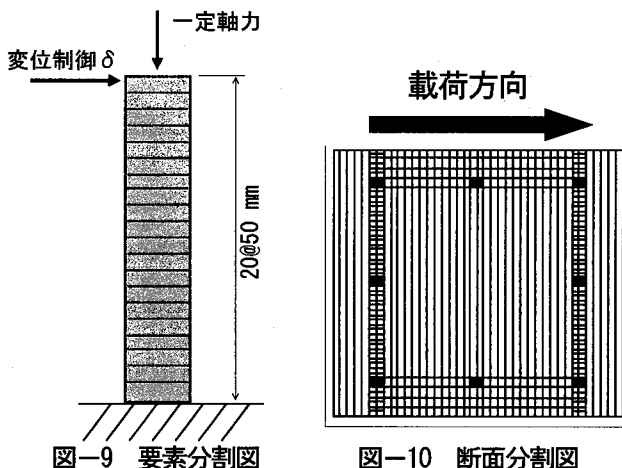


図-9 要素分割図

図-10 断面分割図

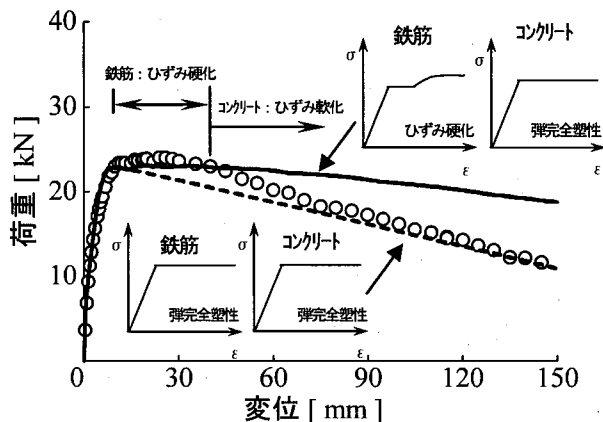
て、再現されていないことが分かる。ただし、大きな変位にまで至るポストピーク領域では、P-Δ効果により荷重-変位曲線の軟化勾配は、実験結果と概ね一致している。

一方、鉄筋にひずみ硬化型の応力-ひずみ関係を用いた場合(実線)には、最大耐力近辺の実験結果を概ね再現できており、鉄筋のひずみ硬化が影響していることが分かる。このことは、鉄筋のひずみ硬化をRC部材の解析に採り入れる必要があることを示唆している<sup>13)</sup>。しかし、大きな変形が生ずるポストピーク領域では、耐力を高く見積もることになり、荷重-変位関係を精度良く再現できない。

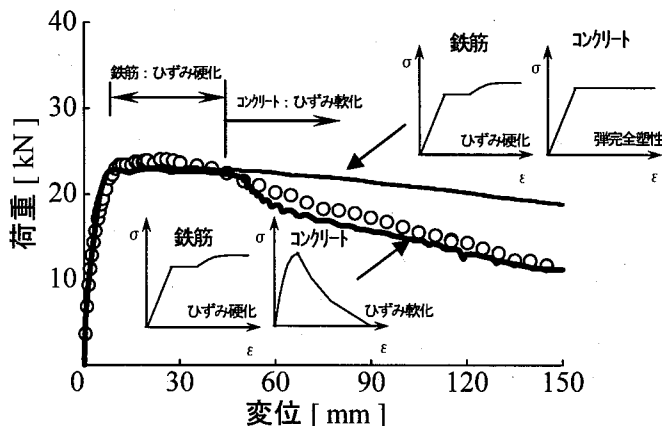
#### 5.2 コンクリートの応力-ひずみ関係による影響

上述の解析より、鉄筋にはひずみ硬化型、コンクリートには弾完全塑性型の応力-ひずみ関係の組み合わせによる解析では、大きな変位にまで至るポストピーク領域の挙動を再現できないことが分かった。よって、ここでは、鉄筋の応力-ひずみ関係をひずみ硬化型とし、コンクリートには図-12の破線で示すようなひずみ軟化型(軟化域では多直線型)の応力-ひずみ関係を採用した解析を実施した。

解析結果と実験結果との比較を図-11(b)に示す。図



(a) 鉄筋の材料特性の違いが与える影響



(b) コンクリートの材料特性の違いが与える影響

図-11 材料特性の違いがRC部材の力学特性(荷重-変位関係)に与える影響<横補強筋間隔s=65 mm, 5%軸力>

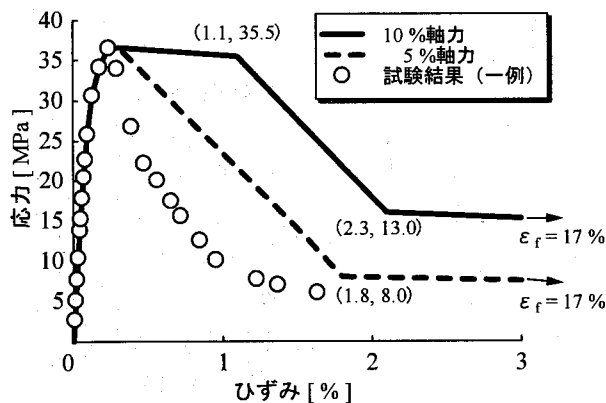


図-12 解析に用いたコンクリートの応力-ひずみ関係

から分かるように、ポストピーク領域の荷重-変位関係は、鉄筋にひずみ硬化型の応力-ひずみ関係、コンクリートに弾完全塑性型の応力-ひずみ関係を取り入れた解析曲線（細線）と比べて、変位が50mm以降、徐々に脆性的な軟化挙動を呈し、実験挙動に近づいていくことが理解できる（太線）。この解析的な挙動は、図-12に示すコンクリートのひずみ軟化関係の最終部分（図中に示す勾配の緩やかな直線部分）が大きく影響しているとともに、この時点から、RC柱基部周辺の破壊域の塑性ヒンジ化が開始することが推察される。

以上の5.1および5.2を通した材料の応力-ひずみ関係に対する解析的な検討から、RC柱の荷重-変位関係においては、1) 最大耐力前後では、鉄筋のひずみ硬化挙動が大きく影響する、さらに2) 大きな変位におけるポストピーク領域ではコンクリートのひずみ軟化挙動が影響して

いることが推察される。なお、各材料の力学特性（鉄筋：ひずみ硬化、コンクリート：ひずみ軟化）がRC柱の力学的挙動に主に影響を与えている領域を図-11中に示す。

## 6. コンクリートの材料特性に関する解析的検討

本章では、RC柱のポストピーク領域における力学的挙動に影響を与える、コアコンクリートの材料特性（特に、軟化域における応力-ひずみ関係）および部材の損傷状況などに関する考察を行う。なお、以下には、一例として、5%軸力ならびに10%軸力下での横補強筋間隔 $s=16\text{ mm}$ 、 $65\text{ mm}$ および $90\text{ mm}$ を有する供試体に対する解析結果と実験結果とを比較・考察する。

### 6.1 荷重-変位関係

#### (1) 5%軸力の場合

ここでは、5.1および5.2節にて得られた検証結果を踏まえ、材料の応力-ひずみ関係として、鉄筋には「ひずみ硬化型」の応力-ひずみ関係を、またコンクリートの軟化域には5.2節で同定した「ひずみ軟化型」の応力-ひずみ関係（図-12に示す破線）を解析に採用した。その解析結果と実験結果との比較を図-13に示す。いずれの供試体の解析結果（実線）とも実験結果（シンボル：○）と概ね一致する挙動を示した。このことは、横補強筋間隔の違いに関係なくコンクリートの軟化域における材料特性は同じ傾向を有することを示唆している。

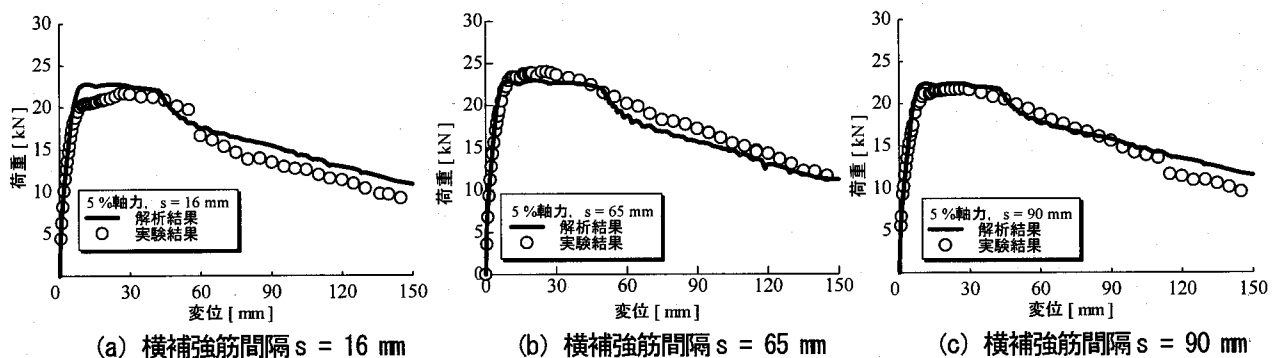


図-13 解析から得られた荷重-変位関係（5%軸力を載荷した場合）

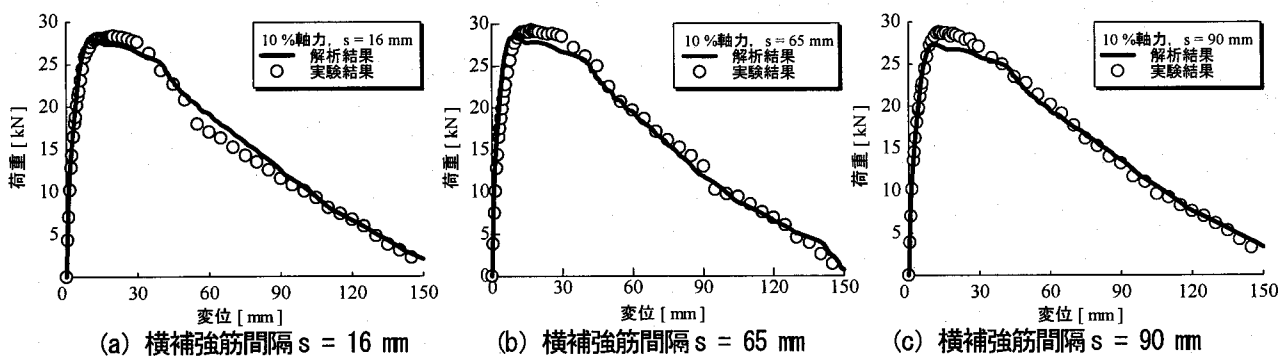


図-14 解析から得られた荷重-変位関係（10%軸力を載荷した場合）



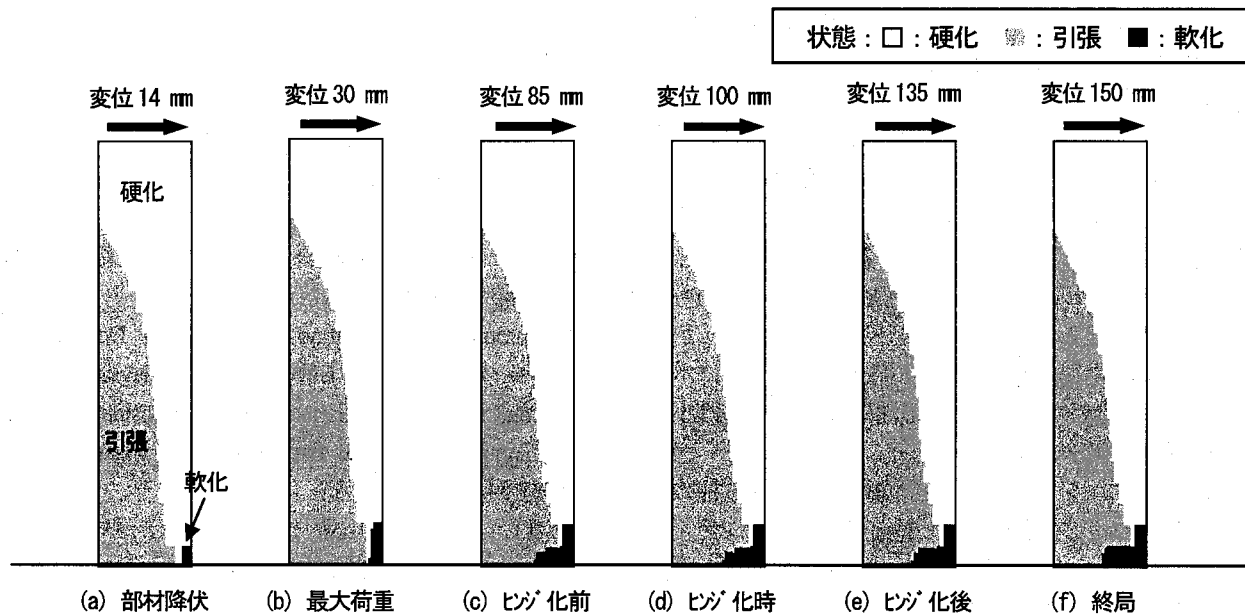


図-15 コンクリートの破壊進展状況 ( $s = 65 \text{ mm}$ , 10 %軸力)

## (2) 10 %軸力の場合

5%軸力の場合と同様、材料の応力-ひずみ関係として、鉄筋には「ひずみ硬化型」の応力-ひずみ関係を採用することにより、図-14に示す実験結果（シンボル：○）と概ね一致する解析結果（実線）を与えるような、コンクリートの軟化域での材料特性（応力-ひずみ関係）を同定した。なお、同定した応力-ひずみ関係を図-12に実線で示す。図-14に示す解析結果（実線）は、いずれの供試体の実験結果（シンボル：○）とも概ね一致する挙動を示した。

以上の本実験結果と解析結果とを考察することにより、各一定軸力比の下では、横補強筋間隔に関係なく、RC柱のコアコンクリートの材料特性（軟化域での応力-ひずみ関係）は、概ね同じ傾向を呈することが推察される。

## 6.2 コアコンクリートの材料特性に関する考察

本解析に使用したコンクリートの応力-ひずみ関係（実線および破線）と併せて、材料試験から得たコンクリートの平均応力-ひずみ関係（端面摩擦の影響を取り除いた応力-ひずみ関係）も図-12に○印で示す。

前節で行った、コンクリートに「ひずみ軟化型」の応力-ひずみ関係を用いた曲げ解析結果は、いずれの供試体ともに実験結果とも近似する傾向を示した（図-13および14参照）。よって、一定軸力（5%軸力または10%軸力）下において曲げを受けるRC柱の場合、横補強筋間隔の違いによらず、コンクリートはほぼ同様の軟化挙動を呈することが推察できる。

なお、1) 要素長さ 50 mm として、コンクリートの軟化挙動の考察を行ったが、要素長さを変化させても同様の定性的な傾向が分かること、2) 5%軸力を載荷したRC柱に対する解析に使用したコンクリートの応力-ひずみ

関係（破線）と比較して、10%軸力を載荷したRC供試体に対するコンクリートの応力-ひずみ関係（実線）の方が軟化領域における圧縮吸収エネルギーが本解析結果では多少高くなる傾向を示したことを、付記する。

## 6.3 部材の破壊進展状況

一例として、横補強筋間隔  $s = 65 \text{ mm}$ 、載荷軸力 10 % に対する解析から得られた、部材のコンクリートにおける破壊進展を図-15に示す。

図-15に示すように、載荷面のコンクリートは、部材降伏から終局に至るまで柱基部 4D (800 mm) の区間に亘って扇状に「引張」を生じており、供試体にひび割れが生じていることが分かる。一方、圧縮側では、部材降伏から塑性ヒンジ化に至るまで柱基部 0.5D (100 mm) の区間に亘ってコンクリートが「硬化」状態から「軟化」状態へと移行し、コンクリートの圧壊が生じていることが分かる（写真-2参照）。しかし、塑性ヒンジ化以降は、圧壊域の変化がほとんど見られない。

また、ここでは割愛してあるが、横補強筋間隔が変化した場合においても、引張域ならびに圧壊域の大きさに著しい差は見られなかった。

## 7. まとめ

本研究では、圧縮下で曲げ変形を受けるRC柱の力学特性、とくに、ポストピーク領域における力学特性に対して、横補強筋間隔、軸圧縮力、および鉄筋ならびにコンクリートの材料特性が及ぼす影響について実験的ならびに解析的に検証した。ここでは、まず「横補強筋間隔」が異なる8種類の曲げ破壊先行型のRC柱を作製し、異なる一定軸圧縮力の下で一方向載荷実験を実施した。続

いて、ファイバーモデルによる二次元有限要素解析を実施し、解析結果と実験結果とを比較・考察することにより、以下の知見を本研究から得た。

- 1) 荷重-変位関係から、最大耐力ならびに靱性率は、一定軸圧縮力の下では、「横補強筋間隔」が与える影響はほとんどないことが分かった(第3章第1,4~6節)。
- 2) 部材断面の塑性ヒンジ化は、横補強筋間隔が小さいもののほど、低変位レベルで生じることが分かった。しかし、横補強筋間隔の違いが部材の最大耐力ならびにポストピーク領域における力学特性に与える影響は小さい(第3章第2~4節)。
- 3) 鉄筋ならびにコンクリートなどの材料特性がRC柱の力学特性に与える影響に関する検証解析(センシティブティー解析)より、最大耐力後、ある程度の変形(例えば、50mm程度までの変形)までの力学的挙動には鉄筋の材料特性(とくに、ひずみ硬化)が、それ以降のポストピーク領域における力学的挙動にはコンクリートの材料特性(とくに、ひずみ軟化)がそれぞれ大きく関与することが推察される(第5章第1~2節)。
- 4) コアコンクリートの材料特性(軟化域での応力-ひずみ関係)を解析的に検証した(逆解析した)結果、軸圧縮下で曲げ変形を受けるRC柱の場合には、中心軸圧縮のみを受けるRC柱とは異なり、「横補強筋間隔」の違いがコアコンクリートの材料特性(応力-ひずみ関係)に与える効果(例えば、コンファインド効果)はさほどないと推察される。一方、図-12より、「軸圧縮力」の違いによるコアコンクリートの応力-ひずみ関係への影響は、本研究では確認することができた(第6章第2節)。
- 5) コンクリートの応力-ひずみモデルとして「ひずみ軟化型モデル<sup>10)</sup>」をファイバーモデルによる有限要素解析などに採用する場合、用いる有限要素長さにより異なる軟化曲線を設定することに留意する必要があるが、今後は、さらに横補強筋間隔および軸圧縮力による影響を検討することにより、解析に採り入れることが可能なコンクリートの軟化域での材料特性を破壊エネルギー的な観点から構築する必要がある(第6章第2節)。

#### 謝辞：

本研究を実施するにあたり、平成17-18年度文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(B)17360218 研究代表者：水野英二)の助成を得た。また、実験遂行にあたり、中部大学大学院建設工学専攻(当時)韓 慧星氏には、多大なるお力添えを頂いた。さらには、実験治具の作製および調整に際し、(株)三弘、MTS-JAPAN(株)ならびに(有)山誠鉄工所には、大変お世話になった。よって、ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献：

- 1) 日本コンクリート工学協会編：コンクリート構造物のポストピーク挙動評価と設計への応用，2003。
- 2) 土屋智史，津野和宏，前川宏一：常時偏心軸力と交番ねじり・曲げ/せん断力を複合載荷したRC柱の非線形三次元有限要素立体解析，土木学会論文集，No.683/V-52，pp.131-143，2001.8。
- 3) Matsumura,T. and Mizuno,E.: 3-D FEM Deformation Analysis for Confining Effect on the Behavior of CFT Column, 5th Japanese German Joint Symposium on Steel and Composite Bridges, September 9-12, Osaka, Japan, pp.337-344, 2003
- 4) 例えば，星隈順一，川島一彦，長屋和宏：鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査に用いるコンクリートの応力-ひずみ関係，土木学会論文集，No.520/V-28，pp.1-11，1995.8。
- 5) 例えば，土木学会編：コンクリート標準示方書 2002年度版[耐震性能照査編]，pp.21-25，2002。
- 6) 秋山充良・浜起男・鈴木将・佐々木敏幸・前田直己・鈴木基行：普通強度から高強度までの構成材料を用いたRC柱の一軸圧縮試験と圧縮破壊エネルギーを介したコンファインドコンクリートの平均化応力-ひずみ関係，土木学会論文集，No.768/V-67，pp.81-98，2005.5。
- 7) Zienkiewicz, O.C. : The Finite Element Method, Third Ed., (吉織雅夫，山田嘉昭監訳「マトリックス有限要素法」)，培風館，pp.672-796，1984。
- 8) 土木学会編：土木材料実験指導書[2005年度改訂版]，2005。
- 9) 水野英二，沈赤ら：鋼素材に関する修正二曲面モデルの一般定式化，構造工学論文集，Vol.40A，pp.235-248，1994.3。
- 10) 水野英二，松村寿男，畑中重光：繰り返し载荷を受ける鉄筋コンクリート柱のポストピーク挙動解析，コンクリート工学論文集，Vol.13，No.3，pp.47-60，2002.9。
- 11) Park, R., Kent, D. C. and Sampson, A. : A Reinforced Concrete Member with Cyclic Loading, J. of the Structural Division, Proc. of ASCE, Vol.98, No.ST7, 1341-1360, July, 1972.
- 12) Mander, J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R. : Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, J. of Structural Engineering, Proc. of ASCE, Vol.114, No.8, 1804-1826, Aug., 1988.
- 13) 岡村甫・前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，pp.44-49，1991.5。

(2007年4月12日 受付)