

論文 高軸力を受ける鉄筋コンクリート造柱の曲げ応力分布の測定実験

青山 元浩*1・塩屋 晋一*2・黒木 康博*3 福永 淳二*4

要旨:高軸力と繰り返しのモーメントを受ける鉄筋コンクリート造柱の曲げ応力分布を詳細に測定する実験を行い、大変形域までの曲げ応力分布の特徴を明らかにした。その結果、コアコンクリートに対する横補強筋の拘束効果は曲げ圧縮破壊により低減される・柱断面内の最大圧縮応力は断面内で異なり、断面中心部では無筋コンクリート柱の場合と同様にコンクリートシリンダーの圧縮強度の約3.1倍に達する・曲げ圧縮応力-ひずみ関係の形状は、柱断面内で異なり、断面中心部に近い位置のものほど緩やかな強度低下を生じる、などが明らかになった。

キーワード:鉄筋コンクリート, 曲げ応力分布, 柱, 曲げ解析, 横拘束コンクリート

1. はじめに

コンクリート系部材の曲げ特性の評価方法については概ね整備されている。しかし、高軸力を受けるRC造柱の曲げ特性については、それらの曲げ解析によると、曲げ特性を過小評価することが報告されている¹⁾。高軸力を受ける場合、曲げ圧縮域の圧縮特性が部材の曲げ特性に大きく影響を与えるため、コンクリートの圧縮特性の取り扱いが曲げ解析の精度に影響を与える。

筆者らは、力学的対称性を利用してコンクリート内部の対称面の直圧縮応力分布を詳細に測定する方法を提案し、一定軸力・一方向曲げを受ける無筋コンクリート造柱の曲げ圧縮応力分布を測定する実験を行った²⁾。そこで測定された応力分布は、中心圧縮されるコンクリートの平均の圧縮特性を用いる曲げ解析では説明できないことが明らかになった。

今回、柱を鉄筋コンクリート造として一定の高軸力で、繰り返しのモーメントを大変形域まで受ける場合の柱の実験を行った。

本論文では実験方法と繰り返しのモーメントを受けることにより変化する柱内部の曲げ圧縮応力分布について検討した結果を述べる。

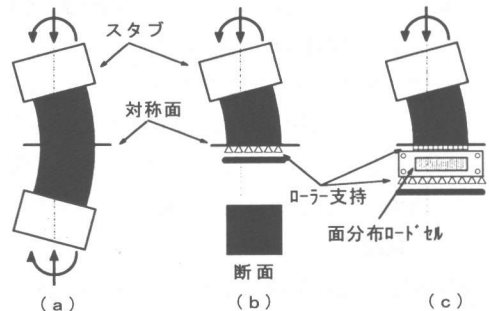


図-1 対称面の直圧縮応力分布の測定原理

2. 測定原理

図-1 (a) ように軸力とモーメントを受ける柱では、力学的対称性を利用して図-1 (b) のように対称面をローラー支持することで上半分高さの柱部分だけを取り扱うことができる。対称面の直圧縮反力分布を測定することは、内力と反力の釣り合いより図-1 (a) の対称面の直圧縮応力分布を測定していることになる。

実験では面分布ロードセルを図-1 (c) のようにセットして鉛直反力分布を測定している。

3. 実験計画

3.1 面分布ロードセル

図-2 に面分布ロードセルの概略を示す。図

*1 鹿児島大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (正会員)
 *2 鹿児島大学助教授 工学部建築学科 工博 (正会員)
 *3 鹿児島大学助手 工学部建築学科 工修 (正会員)
 *4 鹿児島大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (会員外)

図-2(a)に示すような荷重検出素子(以後、素子と称す)を鋼材で製作し、受感部に2枚のひずみゲージを貼付し、曲げ成分を除去できるようにしている。そして素子を磨き鋼板の上に図-2(c)のように11行11列のます目状に並べている。各素子が受ける荷重は、個別に行ったキャリブレーションによる換算係数と受感部の平均ひずみの積として検出している。柱主筋位置の素子(B2, B6, B10など)には、図-2(b)のように主筋に溶接された磨き鋼棒が貫通できる素子(以後、貫通素子と称す)を使用している。そして、その鋼棒の表面にはグリスを塗り貫通素子に力が伝達しないようにしている。対称面のローラー支持については、図-2(d)中に示すように対称面と素子の上面の間に焼き入れ角鋼(研磨仕上げ)とグリス塗りの二重テフロンフィルム(0.05mm)およびゴムシート(0.5mm)をセットし、これらの中で対称面の横変形を拘束しないようにしている。

3. 2 試験体

試験体は、図-1(b)に示すように対称面より上半分の形状となる。図-3に試験体の形状と寸法を示す。薄く塗った部分が試験部分で、濃く塗った部分は加力板に固定するためのスタブ部分で角形鋼管で補強している。柱主筋(D6)は対称面近傍で磨き鋼棒($\phi 8$)が突き合わせ溶接されている。また帯筋($\phi 4$)も溶接された閉鎖型のものである。主筋比 P_g は1.6%で帯筋比 P_w は0.63%で帯筋の体積比 ρ_h は1.5%である。表-1と表-2に材料の力学的特性を示す。

3. 3 実験変数と加力

実験を行った試験体は1体である。軸力は一定軸力の $N=190\text{kN}$ とし、軸力比 η を約0.3とした。加力は、軸力導入後、回転角を漸増させる形式で繰り返しのモーメントを加力してる。

3. 4 加力装置

図-4に加力装置を示す。200ton耐圧試験機の試験区間内に加力装置を設置している。図-1(b)の支持条件になるように、柱頭側を球座でピン支持し、面分布ロードセルの下部の支持台

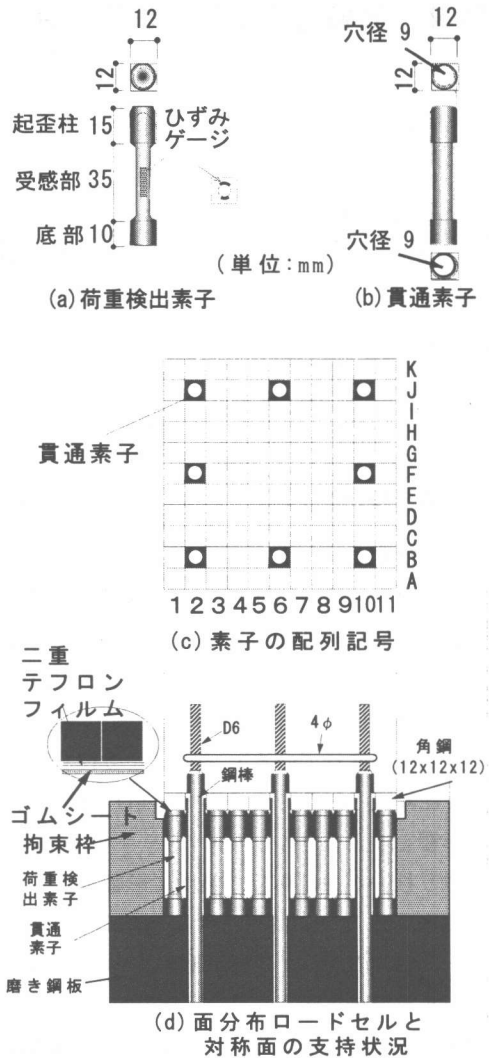


図-2 面分布ロードセルと荷重検出素子配列状況

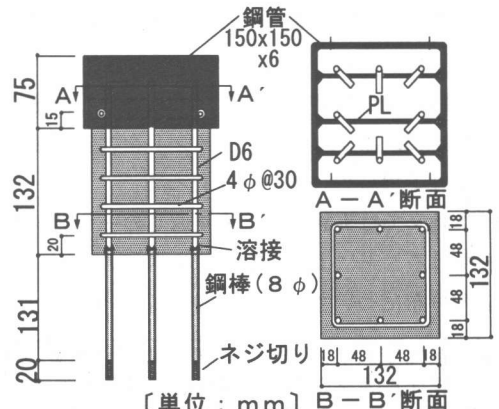


図-3 試験体の形状と寸法

表-1 コンクリートの力学的特性

E_c : ヤング係数, σ_c : 圧縮強度
 ϵ_c : 圧縮強度時のひずみ

E_c (GPa)	σ_c (MPa)	ϵ_c (%)
31	36.1	0.215

表-2 鉄筋の力学的特性

E_{s1} : ヤング係数, E_{s2} : ひずみ硬化域勾配
 σ_s : 降伏強度, σ_B : 引張強度

	E_{s1} (GPa)	E_{s2} (GPa)	σ_s (MPa)	σ_B (MPa)
D6	172	5	360	506
$\phi 4$	170	—	531	618

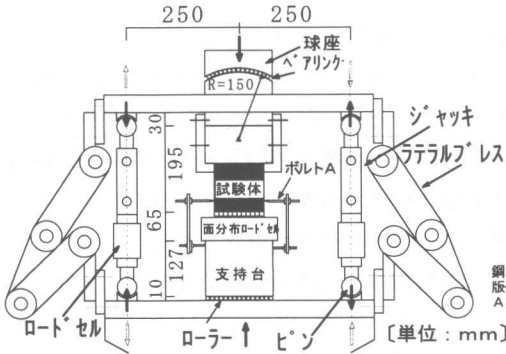


図-4 加力装置

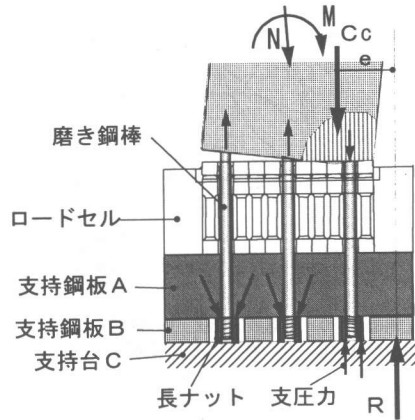


図-5 定着機構

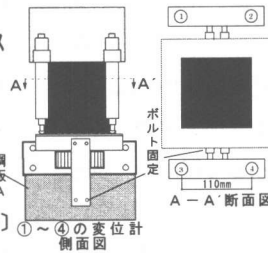
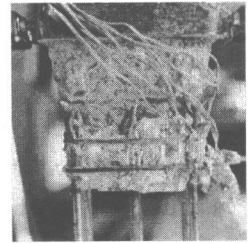


図-6 変形の測定方法 写真-1 最終破壊状況



の下端面を水平ローラー支持し、その間に試験体をセットしている。しかし、対称面と面分布ロードセルの間には、3.1節で述べたようにテフロンフィルムとゴムシートを挿入しているため、その層でも水平変位が生じる可能性がある。試験体の対称面と面分布ロードセルに水平ズレが生じると応力分布が正確に測定できなくなる。これを防止するため、対称面の水平移動に連動して面分布ロードセルも水平移動するように、面分布ロードセルと固定された支持台からアームを伸ばしてボルト先端(図-4のボルトA)を試験体の両曲げ縁に接触させている。

加力中、面分布ロードセルより検出される全圧縮荷重と導入軸力の誤差は最大で約3%以内で、文献2)で示したものと同程度であった。

3.5 柱主筋の支持台への定着

図-5に柱主筋のロードセル側への定着機構を示す。主筋に溶接された磨き棒は加力前に主筋貫通素子と主筋位置に穴($\phi=9\text{mm}$)が設けられた支持鋼板Aを貫通して、その先端のねじ切り

部分に長ナットがセットされている。引張主筋では、その長ナットの上端と支持鋼板Aの間で支圧力が生じて主筋が引張抵抗でき、圧縮鉄筋では長ナットの下端と支持台Cに支圧力が生じて主筋が圧縮抵抗できる。支持鋼板Aは引張主筋により浮き上がり力を受けるが、コンクリートの曲げ圧縮合力 Cc と支持台Cの鉛直反力 R によりその浮き上がりおよび回転が拘束される。支持鋼板Aの曲げ剛性は十分確保されている。支持鋼板Bは長ナットの長さと同じ寸法の厚さ($t=20\text{mm}$)で、試験体から面分布ロードセルが受ける圧縮力を支持台Cに伝達させるためのものである。そこでは、各主筋の先端の長ナット位置に長ナット(外径14mm)が納まるように穴($\phi=16\text{mm}$)が設けられ、圧縮鉄筋の圧縮力は支持台Cに直接伝達されるようになっている。

4. 実験結果

4.1 破壊状況とモーメント-回転角関係

写真-1に最終破壊状況を示す。試験区間で

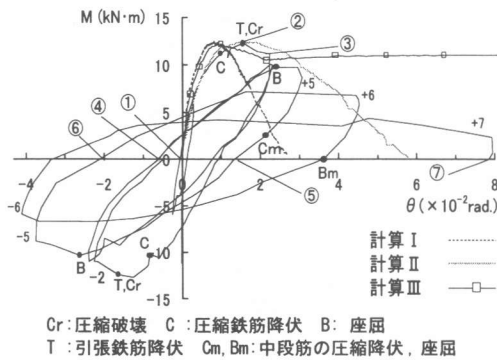


図-7 M-θ関係

カバーコンクリートがほとんど剥落し、コア内部のコンクリートも圧縮破壊していた。主筋もすべて座屈していた。

図-7にモーメント-回転角関係を実線で示す。モーメントは図-4の曲げ加力用のジャッキの圧縮力と引張力の偶力として算出し、回転角 θ は図-6の変形の値を基に算出している。

±2サイクルの約 1.0×10^{-2} rad. で曲げ圧縮鉄筋が圧縮降伏し、約 $\pm 1.6 \times 10^{-2}$ rad. で曲げ圧縮破壊と引張鉄筋の降伏が生じて最大モーメントに達している。それ以降は回転角の増加に伴いモーメントが低下して+7サイクルの最終変形では、抵抗モーメントは最大モーメントの約20%になっている。±5サイクルの約 2.5×10^{-2} rad. で曲げ圧縮鉄筋が座屈している。+6サイクルの約 3.6×10^{-2} rad. で中段筋が座屈した。横補強筋は実験終了時まで降伏しなかった。

図-8に柱の軸ひずみ-回転角関係を示す。軸ひずみは図-6の変形の値を基に算出している。軸ひずみは+5サイクルから-5サイクルに移行する段階で急増しているが、柱は実験終了時まで導入軸力を保持していた。

4.2 曲げ圧縮応力分布

図-10に対称面のコンクリートの曲げ圧縮応力分布を示す。示した分布は図-7または図-8中に示す各時点のものである。1列(A1~K1)と11列(A11~K11)が曲げ圧縮縁または曲げ引張縁となる。各応力分布は図-9に示す3種類の方向から観たものである。主筋位置

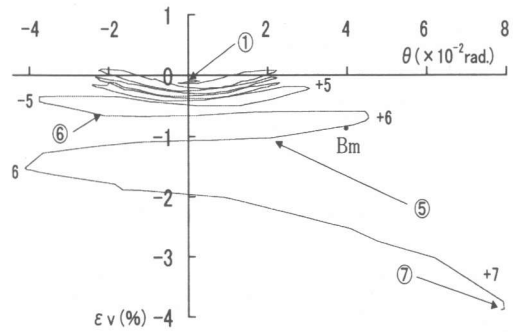


図-8 柱軸ひずみ $\epsilon_v - \theta$ 関係

(B2, F2, J2など)の応力は零としている。

①の分布は、モーメント加力直前の軸力導入時のものである。断面中心部分の応力が大きくなっている。横補強筋のコーナーを結ぶ対角線の領域の応力が大きい分布になっており、角形横補強筋の拘束効果が確認される。

②の分布は、正加力側の最大モーメント時のものである。曲げ圧縮縁ではA1で局所的な圧縮応力が生じているが、それ以外の領域の応力はシリンダーの圧縮強度 $\sigma_B (=36\text{MPa})$ と同じ程度となっている。

③の分布は、最大モーメント直後で曲げ圧縮破壊が生じた時点のものである。最外列の第1列はカバーコンクリートの領域でそれらの応力は零に近く、その領域のコンクリートの応力は最大応力以降、急激に応力低下が生じていることになる。コアコンクリート内部の第3列の応力は σ_B より大きくなっている。

④の分布は、負加力側で最大モーメントに達した-2サイクルの終了時で一定軸力だけが作用している状態のものである。この分布は①の分布で観られた横補強筋の拘束を受けた分布になっていない。これは、繰り返しのモーメントにより両側の曲げ縁が曲げ圧縮破壊して横補強筋のコーナー近傍のコアコンクリート部分の剛性が低下することにより、横補強筋の拘束機構が変化したものと考えられる。

⑤と⑥の分布は図-8で観られるように軸ひずみが急増する±5サイクルの終了時で一定軸力だけが作用している状態のものである。繰り返

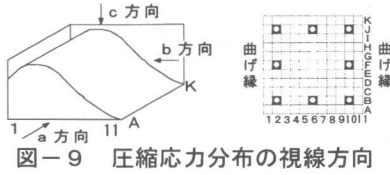


図-9 圧縮応力分布の視線方向

返し加力を受けることにより中央部の応力がより増大している。

⑦の分布は最終の+7サイクルの終了時で一定軸力だけが作用している状態のものである。⑤と⑥の分布と異なり中心部だけの応力が増大してそのほかの領域の応力は減少している。中心部の応力は σ_B に対して約3.1倍となり文献2)で報告している無筋コンクリート造柱の場合と、同程度の値となっている。

4.3 素子位置の応力-ひずみ関係

図-11と図-12に対称面内の各素子の直圧縮応力-ひずみ関係を示す。ひずみは各素子位置の直圧縮ひずみで、図-6の曲げ変形測定用の変位計の値を基に曲げ圧縮縁と曲げ引張縁のそれぞれのひずみを算出し、各素子位置に対して直線補間したものである。

図-11で観られるようにカバーコンクリート部分では圧縮強度以降、急激な強度低下が生じている。圧縮強度時のひずみはコンクリートシリンダーの圧縮破壊ひずみ ϵ_B の約2倍程度となっている。図-12で観られるようにコアコンクリート部分では、断面中央部に近い位置ほど圧縮強度、その時のひずみも大きくなり、圧縮強度以降の強度低下は緩やかになっている。特に中心部のF6ではひずみが約0.7%の時点で応力が極値を示すが、約1.0%以降で再びひずみ硬化の現象が生じている。

図-13に各素子位置の最大直圧縮応力 $\sigma_{max}(i, j)$ の分布を σ_B で除して示す。 σ_B より大きくなる範囲は柱断面の約56%を占めていた。

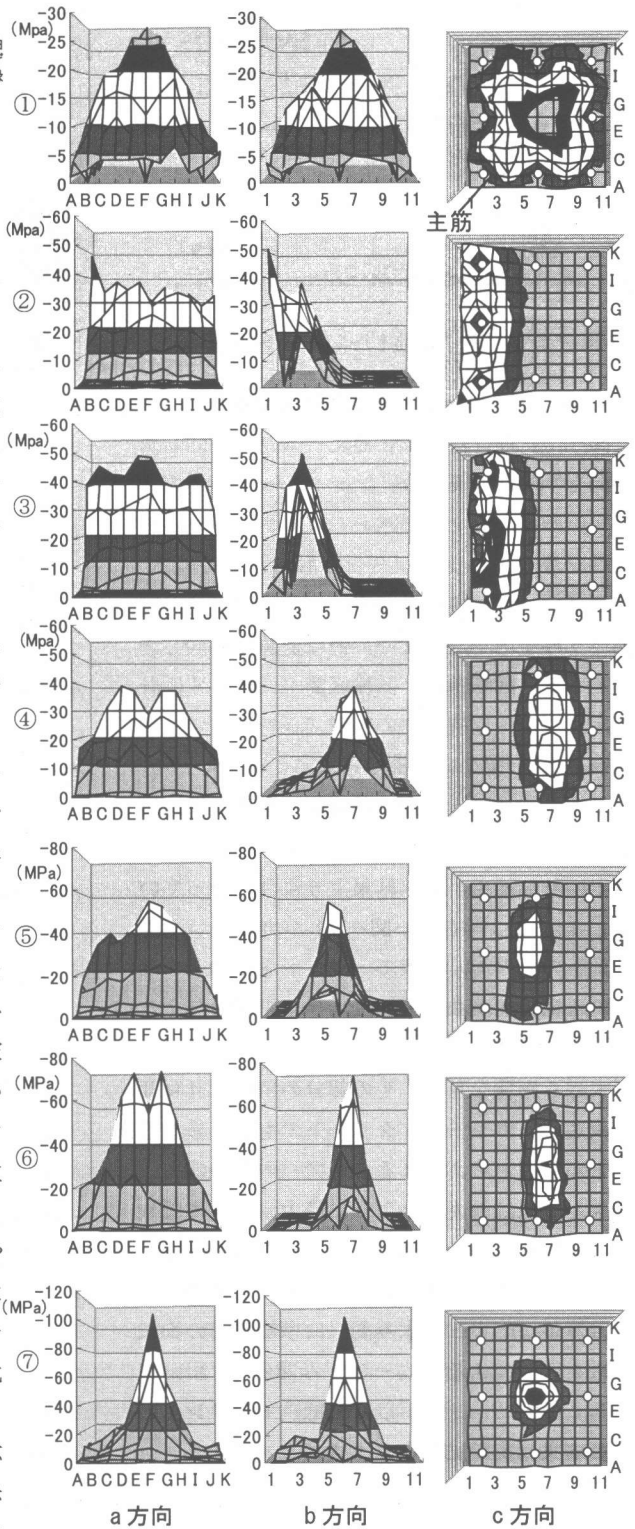


図-10 対称面の曲げ圧縮応力分布

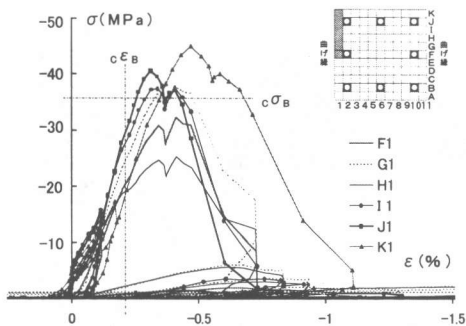


図-1 1 素子位置F1-K1の σ - ϵ 関係

4. 4 モーメント-回転角関係の計算

図-7に曲げ解析によるモーメント-回転角関係を示す。計算Iは、コンクリートの応力-ひずみ関係をPopovics式としてコンクリートの特性を表-1のシリンダーのものとしている。計算IIは、図-11の結果を基に圧縮強度時の圧縮ひずみを0.4%とし、その他は計算Iと同じとしている。回転角は、試験区間132mmに変位計固定用ボルト位置までの距離15mmを加えた区間147mmに、計算による曲率を乗じて求めている。

最大モーメントまでは計算IIの計算結果が実験結果に近い。しかし、それ以降は抵抗モーメントの計算結果が実験結果より小さくなっている。これについては、図-11がカバーコンクリートのもので、最大モーメントまではその部分の圧縮特性が曲げ特性に大きく影響を与えるが、それ以降はコアコンクリートの曲げ特性が大きく影響を与え、その部分の特性は計算IIで仮定したカバーコンクリートのもとは異なることが原因と考えられる。コア内部の応力-ひずみ関係は前述したように最大強度以降緩やかに強度低下が生じるため、それを考慮すると計算結果は実験結果に近づくと考えられる。

計算IIIは応力-ひずみ関係に横補強筋の拘束効果を考慮できる応力-ひずみ関係¹⁾を用いている。最大モーメント以降の抵抗モーメントの計算結果は実験結果より大きくなっている。

5. まとめ

力学的対称性を利用して高軸力と繰り返しの

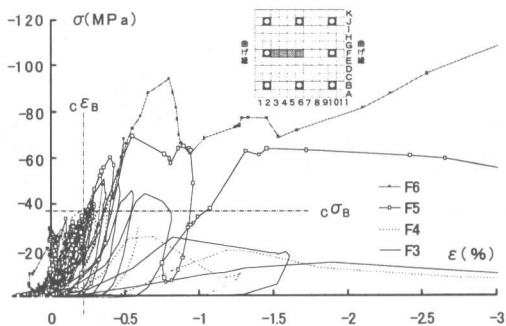


図-1 2 素子位置F3-F6の σ - ϵ 関係

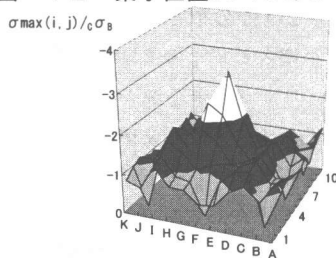


図-1 3 各素子の $\sigma_{\max}(i, j) / c\sigma_B$ 分布

モーメントを受ける鉄筋コンクリート造柱の曲げ応力分布を測定する実験を行い、大変形域までの曲げ圧縮応力分布の特徴を明らかにした。

- (1) コアコンクリートに対する横補強筋の拘束効果は曲げ圧縮破壊により低減される。
- (2) 柱断面内の各位置の最大圧縮応力は断面内で異なり、断面中心部の最大圧縮応力は無筋コンクリート造柱の場合と同様にコンクリートシリンダー圧縮強度の約3.1倍に達した。
- (3) カバーコンクリートの曲げ圧縮応力-ひずみ関係は、圧縮強度以降、急激に強度低下が生じ、コアコンクリートの曲げ圧縮応力-ひずみ関係は、断面中心部に近いものほど緩やかな強度低下を生じる。

参考文献

- 1) 例えば、渡辺史夫・西山峰広・六車 熙：超高強度コンクリートを用いたRC柱の曲げ強度と靱性，日本建築学会構造系論文報告集，No. 446，pp. 99-106(1993)
- 2) 塩屋晋一・大迫 亘：力学的対称性を利用するコンクリート柱の曲げ圧縮応力分布の測定実験，コンクリート工学年次論文集，Vol. 22, No. 3, pp. 765-774(2000)