

論文 角鋼管で横補強されたコンクリート柱の断面内の直圧縮応力分布性状と応力-ひずみ関係

末吉 伸丈^{*1}・塩屋 晋一^{*2}・福永 淳二^{*3}

要旨:本研究では、コンクリート内部の直圧縮応力分布を測定する手法を用いて角形鋼管で横拘束されたコンクリート柱の加力実験を行い、柱断面内の直圧縮応力分布と応力-ひずみ関係の特徴およびそのモデル化について検討を行っている。加力は柱が一軸圧縮だけを受ける場合と軸力・曲げを受ける場合について行われている。圧縮強度以降の圧縮軟化域での応力分布性状が明らかにされ、その応力分布性状は平均的な分布性状とかなり異なり鋼管の厚さにより変化する状況が示されている。また鋼管の横拘束力により柱断面内で異なる各位置の直圧縮応力-直ひずみ関係の特徴と、その最大直圧縮応力を表現する等応力線モデルも示されている。

キーワード:柱, 拘束コンクリート, 鉄筋コンクリート, 応力-ひずみ関係, 応力分布, CFT

1. はじめに

研究代表者らはコンクリート内部の直圧縮応力分布を詳細に測定する方法を提案している。¹⁾

そこでは、柱断面内の応力分布性状は、一軸圧縮を受けるRC造柱の平均の圧縮応力-ひずみ関係では説明できないことが確認されている。

本研究は、横拘束されたRC造柱の応力分布性状の特徴の把握と、曲げ解析用の応力-ひずみ関係のモデル化を目的としている。鉄筋コンクリート柱では横補強筋により拘束されてその拘束力は材軸方向に変化するが、今回は材軸方向に横拘束力が変化しない比較的単純な鋼管の場合について実験を行った。

本論文では、一軸圧縮または軸力と曲げを受ける場合の柱断面内の応力分布性状と、直圧縮応力-ひずみ関係の特徴および、その最大直圧縮応力を表現するモデル化について述べる。

2. 測定原理

本測定方法では、力学的対称性を利用している。図-1に示すように軸力と曲げを受ける柱では中央高さの対称面の直圧縮応力分布を面分布ロードセルで測定している。この原理は一軸圧縮を受ける場合も同じである。詳細は文献1)を参照されたい。

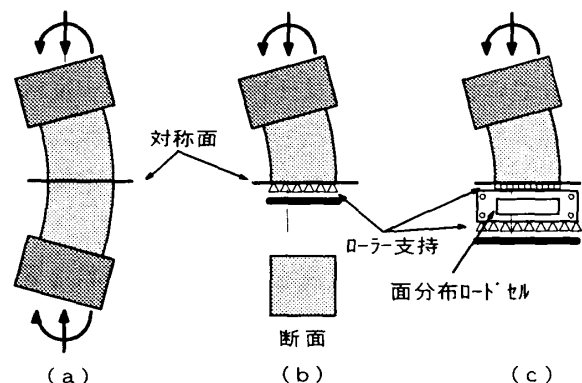


図-1 対称面の直圧縮応力分布の測定原理

3. 実験計画

3.1 面分布ロードセル

図-2にロードセルの概略を示す。図-2(a)に示す荷重検出素子(以後、素子)を鋼材で製作し、受感部に2枚のひずみゲージを貼付している。素子は弾性範囲で使用され、対称面を支える素子のバネ係数は単位面積あたり、 $1.54 \times 10^3 \text{ N/mm/mm}^2$ である。この平均のひずみから荷重を検出している。そして素子を磨き鋼板の上に11行11列のます目状に並べている。対称面のローラー支持は、対称面と素子の上面の間に磨き角鋼とグリー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)を挿入して実現している。詳細は文献1)を参照されたい。

3.2 試験体

図-3に試験体の形状と寸法を示す。試験体

*1 鹿児島大学理工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 鹿児島大学工学部建築学科助教授・工博 (正会員)

*3 三井建設(元鹿児島大学理工学研究科建築学専攻)・工修

0.6%, 2.4%, 4.8%となる。応力は圧縮荷重をコンクリート断面積で除したものであり、ひずみは図-5の平均の圧縮変形を測定間距離(147mm)で除したものである。

これらの試験体の初期剛性はほぼ同じであるが、最大応力値は、鋼管が厚いほど大きい値を示している。最大強度後の軟化域では鋼管厚0.4mmのUC-0.4の応力が急激に低下しているのに対して鋼管厚3.2mmのUC-3.2は、ひずみが増加してもほとんど強度が低下していない。鋼管厚1.6mmのUC-1.6はこれら2体の中間の性状を示している。また、図中に鋼管の降伏時を▽の記号で示している。全試験体とも圧縮強度時に降伏が確認さ

れている。

図-7に測定された直圧縮応力分布をそれぞれ示す。分布は図-6中に示す番号の時点のものである。図-7には直接測定される応力分布と、分布が柱断面中心を対称点に点対称分布に

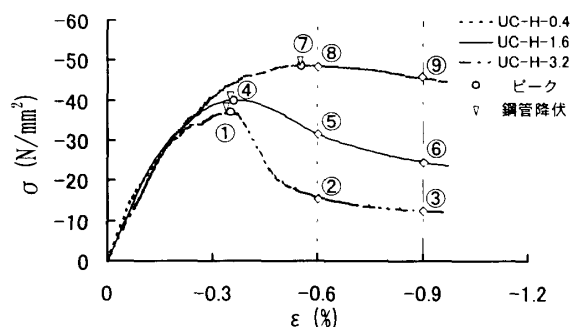


図-6 UCシリーズの平均的応力-ひずみ関係

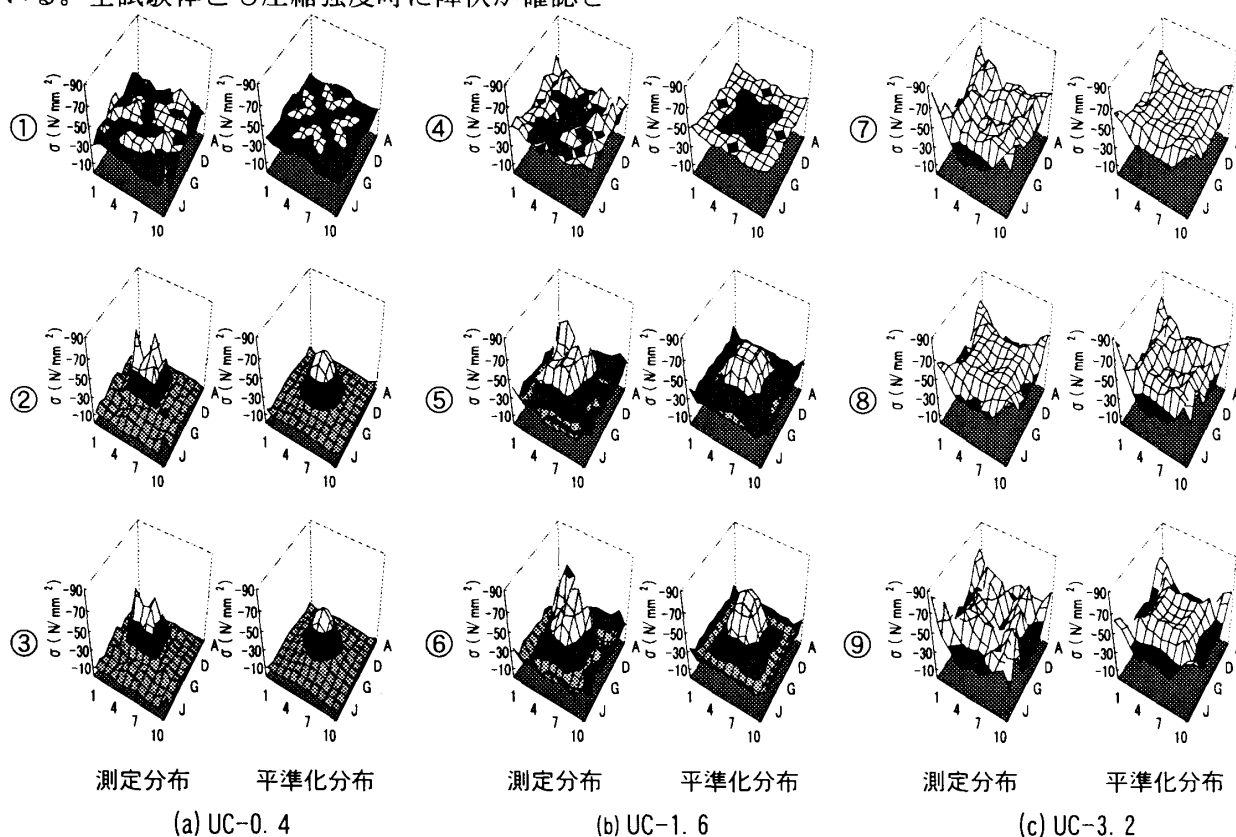


図-7 一軸圧縮を受ける柱断面内の直圧縮応力分布

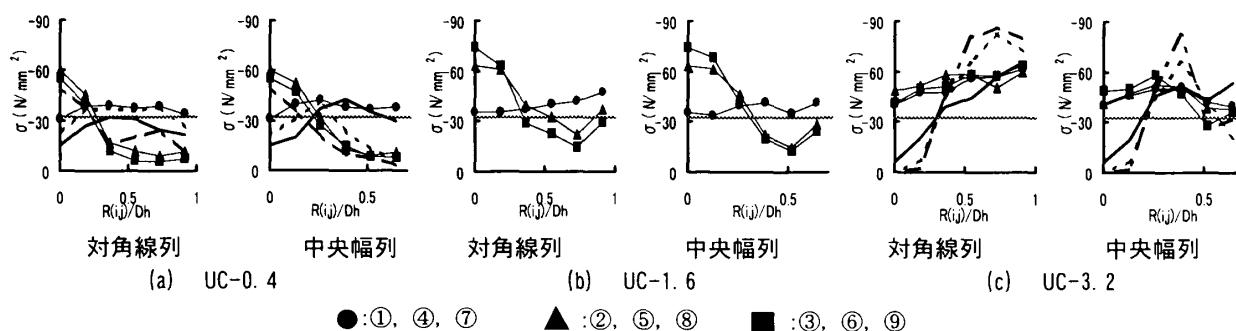


図-8 一軸圧縮を受ける平準化分布の対角線列と中央幅列の分布

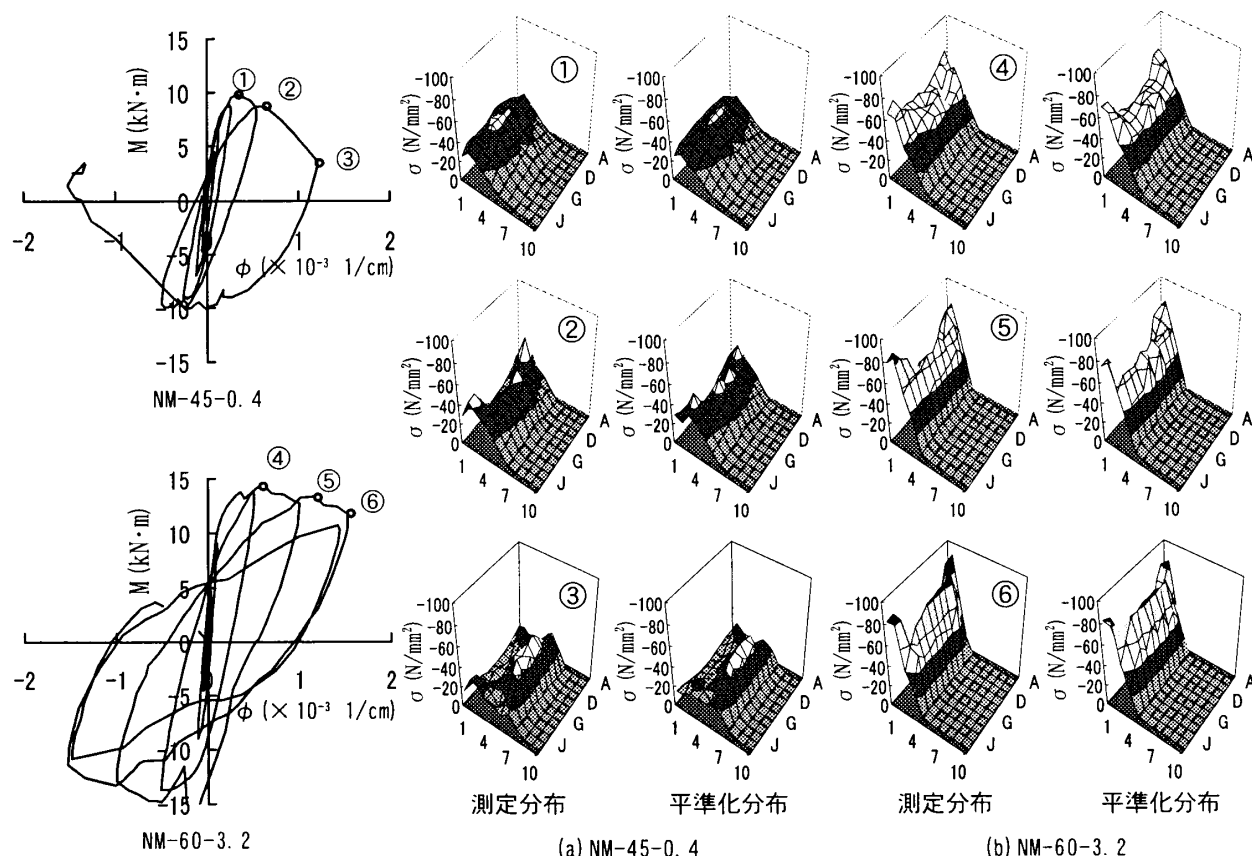


図-9 モーメントー曲率関係 図-10 軸力・曲げを受ける柱断面内の直圧縮応力分布

なるものとして柱断面中心から距離が等しい各素子位置の応力を平均して平準化したもの(以後、平準化分布)を示している。また図-8には平準化分布の対角線列と中央幅列の分布を示す。横軸の値は断面中心から各素子位置までの距離である。

圧縮強度時の①, ④, ⑦では、鋼管が最も薄い UC-0.4 で応力が $40 \sim 50$ (N/mm²) 程度でほぼ一様の分布となっているが、鋼管が厚い試験体ほどコーナーの応力が大きくなっている。ひずみが 0.6% の時の②, ⑤, ⑧では、UC-0.4 は周囲が低下し中心部分が突出した分布になっているのに対して、UC-3.2 では、圧縮強度時の分布とほとんど変化していない。

ひずみが 0.9% の時の③, ⑥, ⑨では、UC-0.4 は、分布がほとんど変化していない。UC-3.2 では鋼管が降伏した以降、コーナーと中央部が突出する形状になり、周囲の幅中央またそれに近い範囲で応力が低下することになる。UC-1.6 は周囲の低下と中心部分の突出がさらに進み、UC-0.4 の③の分布に近いものになっている。

以上の特徴から、圧縮強度以降では軟化の程度が大きくなるほど断面内の応力分布の一様性は大きく崩れることになる。

(2) 軸力と曲げを受ける柱試験体

図-9 に軸力と曲げを受ける試験体のモーメントー曲率関係をそれぞれ示す。示した試験体は鋼管厚さが 0.4mm と 3.2mm の 2 種類である。NM-45-0.4 は軸力比が 0.45 で鋼管厚さが 0.4mm の試験体で、NM-60-3.2 は軸力比が 0.60 で鋼管厚さが 3.2mm の試験体である。曲率については図-5 の変位計で測定される回転角を測定区間で除している。

図-10 に測定された応力分布と平準化分布をそれぞれ示す。平準化分布は柱幅中央列を対称線に線対称分布になるものとして図-7 と同様に表現している。各分布は図-9 に示す番号の時点のものである。

測定される応力は圧縮応力だけであるため、曲げ引張域の応力は零となっている。最大モーメント時の①と④の曲げ圧縮域分布では、図-7 の一軸圧縮加力のものと同様に、鋼管が厚い

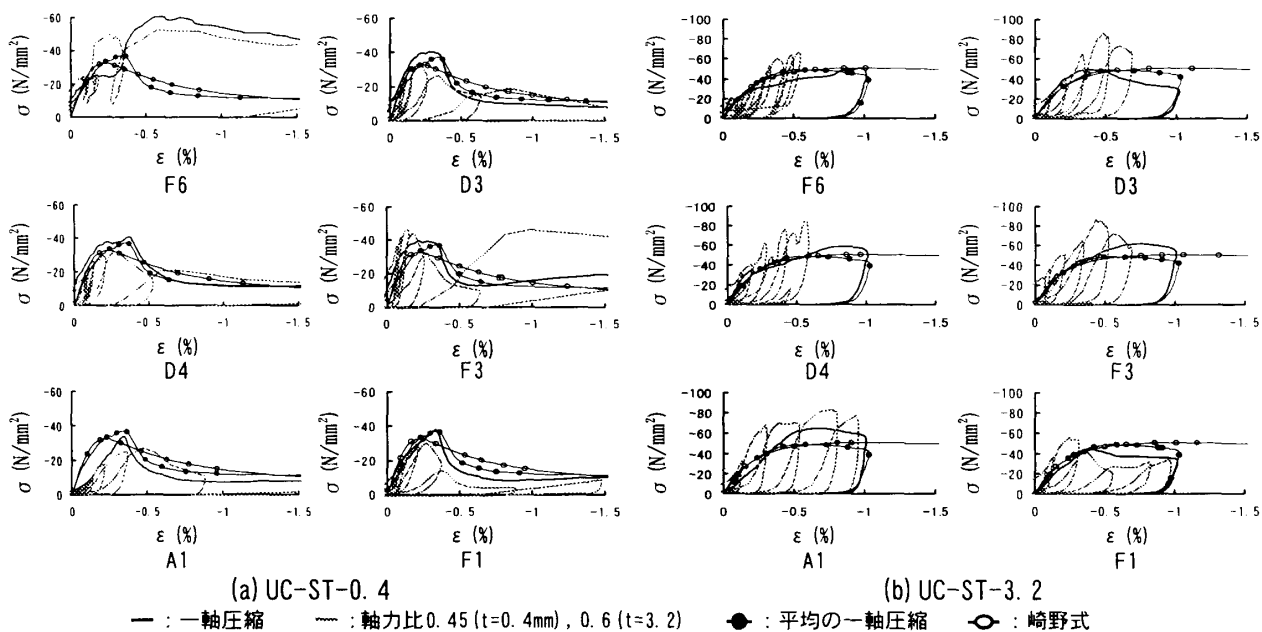


図-11 柱断面内の直圧縮応力-ひずみ関係

試験体ほどコーナーの応力が大きくなっている。②と⑤の分布は曲げ圧縮縁で圧縮破壊がわずかに確認された時のものである。幅中央列近傍の応力が低下している。③の分布はモーメント-曲率関係で抵抗モーメントが急激に低下した時点のもので、柱軸ひずみが図-7の②と同じ0.6%の時のものである。両者を比較すると、繰り返し曲げを受ける柱では柱幅の範囲で応力が生じているのに対して、一軸圧縮を受ける柱では断面中心だけに主に応力が生じている状況になっている。また図-8に図-10の平準化分布の対角線列と中央幅列の分布をそれぞれ挿入して示す。①と④の分布は実線で、②と⑤の分布は破線で、③と⑥の分布は一点鎖線でそれぞれ示している。鋼管が厚い3.2mmの場合には一軸圧縮加力の最大応力より、曲げ圧縮域のものが大きくなる範囲がある。

4.2 柱断面内の直圧縮応力-ひずみ関係

図-11に断面内の直圧縮応力-ひずみ関係(以後、応力-ひずみ関係)の例を示す。示した素子位置を図-2(b)中に黒塗りで示す。応力は前節と同じ平準化されたもので、各素子位置のひずみは図-5の4カ所の変位計の変位量を各素子位置に対して直線補完して求めている。太実線は鋼管厚さが0.4mmと3.2mmの一軸圧縮を受ける試験体のもので、薄い太実線は軸力・曲げを受け

る図-9の試験体のものである。UC-ST-0.4では最大応力直後に急激な強度低下が生じて、ひずみが0.35~0.45%の区間で不連続な応力-ひずみ関係になっている。

柱断面中心に近いものほど圧縮強度とその時のひずみも増大し、応力-ひずみ関係の形状も靱性が増大するものになっている。

一軸圧縮を受ける場合と軸力・曲げを受ける場合を比較すると、鋼管が厚くなるほど軸力と曲げを受ける場合の圧縮強度が大きくなる傾向がある。また同図には図-6で示した一軸圧縮を受ける試験体の平均的応力-ひずみ関係と、崎野らの提案式²⁾によるものを、それぞれ●と○で示す。平均的応力-ひずみ関係については、崎野式の計算結果は実験結果をほぼ推定しているが、断面内の応力-ひずみ関係については、鋼管が厚いものほど、また断面中心に近いものほど、差が生じている。

4.3 柱断面内の最大応力分布のモデル化

図-12と図-13に一軸圧縮加力されたUC-0.4とUC-3.2の柱断面内の各素子の最大直圧縮応力 $\sigma_{\max}(i,j)$ (以後、最大応力)の分布と、その時の同位置の圧縮ひずみ $\varepsilon_{\max}(i,j)$ の分布を示す。応力とひずみは、それぞれ各試験体の平均の圧縮強度 σ_{BO} とその時のひずみ ε_{BO} で除している。

鋼管厚さが薄いUC-0.4では、応力またはひず

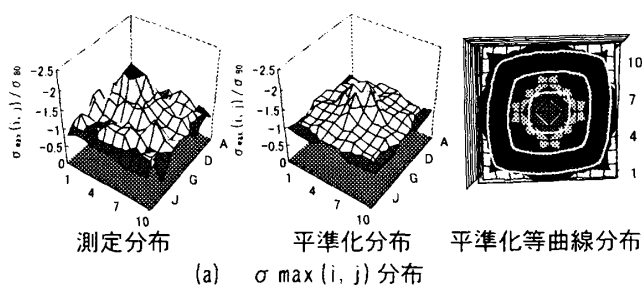


図-12 UC-0.4の $\sigma_{\max}(i,j)$, $\varepsilon_{\max}(i,j)$ 分布

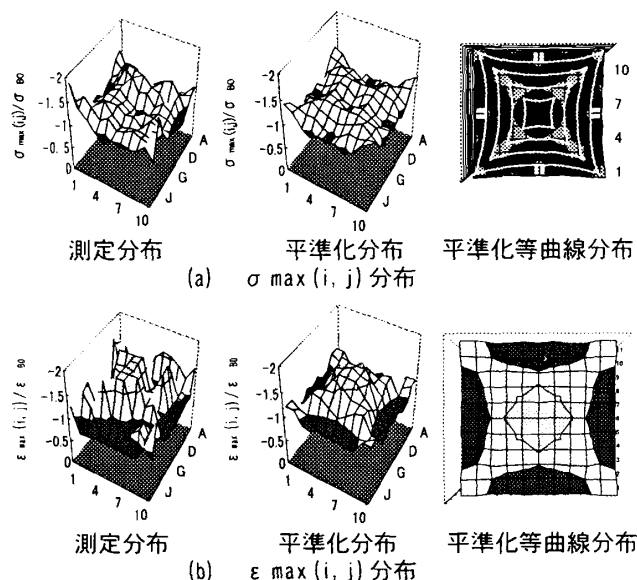


図-13 UC-3.2の $\sigma_{\max}(i,j)$, $\varepsilon_{\max}(i,j)$ 分布
 みの同じ値の等曲線が、柱断面の中心に同心円状になっているのに対して鋼管厚さが厚い UC-3.2 では、対角線上またはそれに近い範囲が同じ値の等曲線になっている。鋼管が厚い試験体ほど、その等曲線の形状が同心円の形状から UC-3.2 の形状に近づいていた。

図-14にその等曲線を近似するものとして検討した関数と曲線を示す。次数 n を1より大きい値に設定して描いた曲線を $\sigma_{\max}(i,j)$ の平準化曲線分布に白線で示す。次数 n を鋼管の横拘束力の関数で表すことにより、柱断面内の各素子の最大応力 $\sigma_{\max}(i,j)$ と、圧縮ひずみ $\varepsilon_{\max}(i,j)$ の分布を近似できる可能性がある。

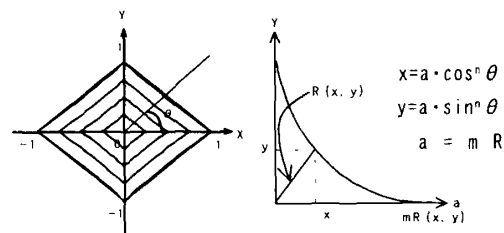


図-14 等応力線モデル

5. まとめ

角形鋼管により横拘束されるコンクリート柱の断面内の直圧縮応力分布性状と応力-ひずみ関係の特徴を測定実験により明らかにした。その結果をまとめるとつぎのようになる。

- 1) 柱が一軸圧縮を受ける場合、圧縮強度以降の軟化域で、強度低下が大きいものほど柱断面内の応力の一様性は大きく崩れる。
- 2) 鋼管が厚いものほど、圧縮強度以前ではコア断面のコーナーの応力が突出する分布になるが、鋼管が降伏した以降では断面の中心部が突出する傾向がある。
- 3) 柱断面内の直圧縮応力-ひずみ関係は、一軸圧縮を受ける柱の平均的圧縮応力-ひずみ関係と異なり、断面中心部に近いものほど最大応力とその時のひずみが増大するものになる。コア内の各位置の最大応力は断面内に等応力の等曲線を仮定することで、簡便にモデル化できる可能性がある。

謝辞：本研究は、平成14年度科学研究費補助金・基盤研究C(研究代表者：塩屋晋一、課題番号：14550574)を受けて行ないました。ご協力頂きましたことに深く感謝致します。

参考文献

- 1) 福永淳二、塩屋晋一ほか：RC造柱断面内のコンクリートの応力-ひずみ関係のモデル化、コンクリート工学年次論文集, Vol.24, pp.217 ~ 222, 2002
- 2) 崎野健治、孫王平：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、日本建築学会構造工学論文集, No.461, pp.95 ~ 104, 1994, 7