

論文 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

福永 淳二^{*1}・塩屋 晋一^{*2}・青山 元浩^{*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た RC 造柱の実験を行い，その測定手法の RC 造部材への適用性の検証と柱断面内の応力分布性状と応力 - ひずみ関係の特徴とモデル化について検討を行っている。その結果，一軸圧縮または軸力と曲げを受ける RC 造柱へ測定手法は概ね適用できる。帯筋の拘束効果により柱断面の中心部の剛性が増加し，弾性範囲からコア内の圧縮応力が大きい曲げ圧縮応力分布になる。柱コア内に等応力の等高線を仮定することにより，面内の応力 - ひずみ関係を簡便にモデル化できる可能性があることなどが明らかになった。

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

1. はじめに

研究代表者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¹⁾，これを軸力と曲げを受ける RC 造柱に適用することを試みている²⁾。

そこでは，柱断面内の応力分布性状は，一軸圧縮を受けるコンクリートシリンダーや 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。しかし，この測定手法の適用性については，これまで一軸圧縮を受けるコンクリートシリンダーで検証が行われており，RC 造部材に適用する場合の検証も必要であった。

今回，一軸圧縮を受ける場合と，軸力と曲げを受ける場合の RC 造柱の柱断面内の応力分布を明らかにするとともに，測定手法の RC 造柱への適用性を検証することを目的に追加実験を行った。

本論文では実験結果に基づいて，測定手法の RC 造部材への適用性と，柱断面内の応力分布性状・コンクリートの応力 - ひずみ関係，およびそれらのモデル化について，検討した結果を述べる。

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 (a) のように軸力と曲げを受ける柱では中央高さ面が対称面となり，図 - 1 (b) のようにそ

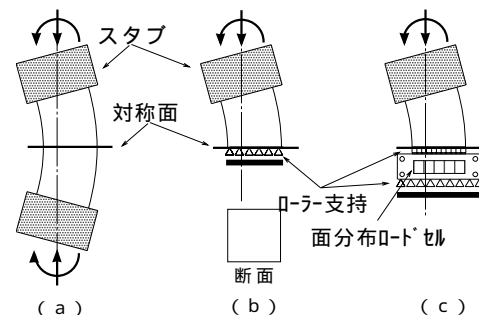


図 - 1 対称面の直圧縮応力分布の測定原理

の面を水平ローラー支持することにより上半分の柱部分だけを部分的に取り扱える。対称面の鉛直反力分布を測定することは，図 - 1 (a) の柱中央高さの柱断面内の直圧縮応力分布を測定することになる。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。この原理は一軸圧縮を受ける場合も同じである。

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。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。柱主筋位置の素子 (B2, B6, B10 など) に

*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 博士(工学) (正会員)

*3 (株) エスパス建築事務所 (当時 鹿児島大学大学院生) 工修

は、図 - 2 (b) の、主筋に溶接された磨き鋼棒が貫通できる貫通素子を配置している。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(0.05 mm)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 2) を参照されたい。

3.2 試験体

図 - 3 に試験体の一覧を示す。UCシリーズは一軸圧縮力だけを受けるもので、NMシリーズは軸力と曲げを受けるものである。標準試験体では試験区間を柱せいの 2 倍とし、対称面試験体ではその半分の柱せいとしている。これらの形状を表す記号を、それぞれ S, H としている。応力分布が測定される対称面試験体は、一軸圧縮力を受けるシリーズでは UC-H-M の 1 体で、軸力と曲げを受けるシリーズでは軸力比が 0.45 の NM-H-45 と軸力比が 0.6 の NM-H-60 の 2 体である。○で囲む数字は試験体数である。UC-H-M と NM シリーズの試験体では加力板に取り付けるためにスタブ部分を角形鋼管で補強している。NM-H-45, 60 では、柱主筋(D6)は対称面近傍で磨き鋼棒($\phi 8$)と突合わせ溶接されている。柱断面は全て共通で、主筋比 P_g は 1.6 %、帯筋比 P_w は 0.63 %、帯筋の体積比 ρ_h は 1.5 % である。

帯筋($\phi 4$)は溶接された閉鎖型のものである。

表 - 1 に材料の力学的特性を示す。

3.3 加力方法と変位の測定方法

UCシリーズでは一方向圧縮漸増载荷とし、NMシリーズでは一定軸力で回転角を漸増させる繰り返し曲げ载荷としている。図 - 4 に応力が測定される試験体に用いる加力装置を示す。これを 2000kN 耐圧試験機の試験区間に設置している。柱頭側を球座でピン支持し、柱脚側を水平ローラー支持している。標準試験体の NM-S-45, 60 では柱脚側も柱頭側と同じ状況でピン支持されている。

図 - 5 に変位の測定状況を示す。UCシリーズの加圧鉄板 A は試験体と一体的にコンクリート打設されている。UC-H では対称面と磨き鋼板の間に 3.1 節で述べた角鋼・テフロンフィルム・ゴムシートのローラー支持層が挿入されている。対称試験体で測定される変位量にはそのローラー支持層

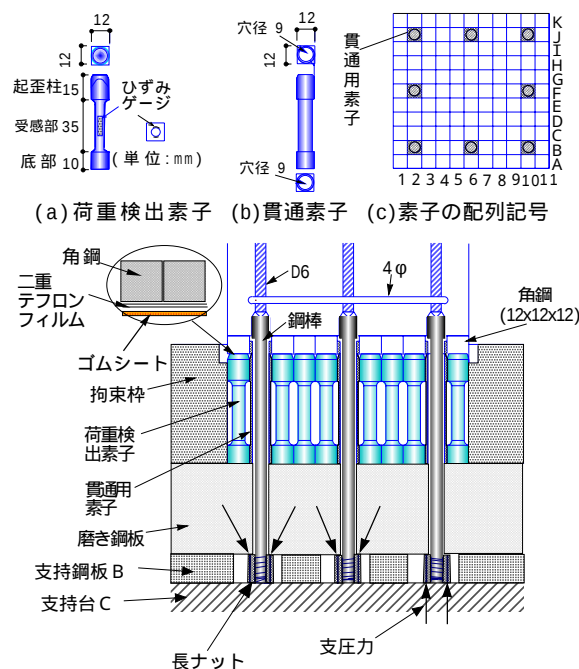


図 - 2 面分布ロードセル

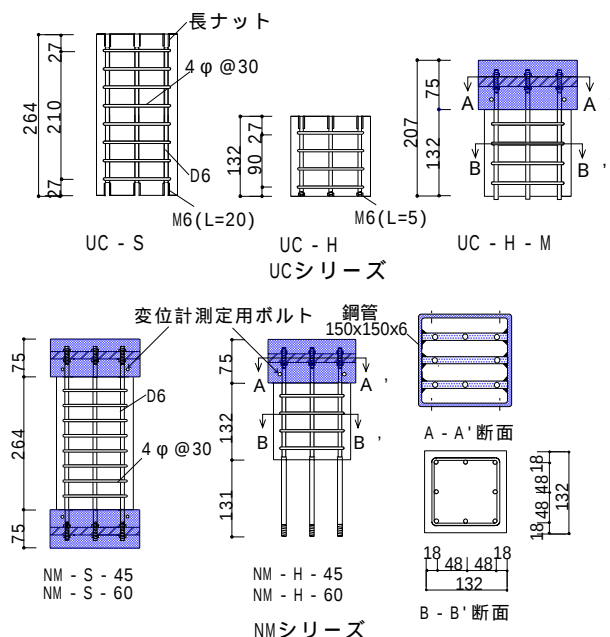


図 - 3 試験体の形状と寸法

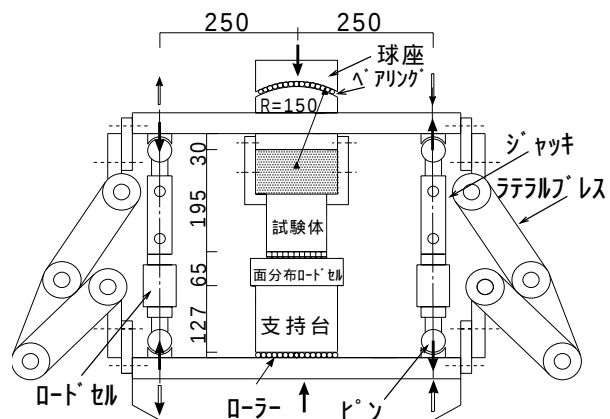


図 - 4 加力装置

表 - 1 コンクリートと鉄筋の力学的特性

Ec:コンクリートのヤング係数
 σ_B : 圧縮強度 ϵ_B : 圧縮強度時のひずみ
 E_s : 鉄筋のヤング係数 E_{s2} : ひずみ硬化域勾配
 σ_y : 降伏応力度 σ_B : 引張強度

コンクリート	種類	Es1	Es2	σ_y	σ_B
		(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(%)
鉄筋					
	D6	1.73×10^5	0.05×10^5	360	506
	m4	1.74×10^5	—	544	620

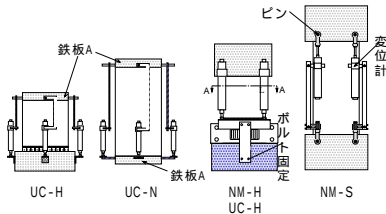


図 - 5 変位の測定状況

の変位が含まれる。これについては別途、行ったローラー支持層の圧縮実験に基づき、その変位成分を算出し、測定される変位から除去することにした。

4. 実験結果

4.1 力学的対称性を利用する測定手法の検証

(1) 一軸圧縮を受ける柱試験体

図 - 6 (a)に一軸圧縮を受ける標準試験体UC-Sと対称面試験体UC-Hの平均の圧縮応力 - ひずみ関係を比較して示す。応力は圧縮荷重を柱の全断面積で除した値で、ひずみは3.3節で述べた上下の加圧鉄板間の変位を試験区間で除した値である。

圧縮強度について、UC-Sに対してUC-Hの値が約92%と小さくなった。これはUC-Hシリーズでは対称面側の柱主筋端に全長 5mm の M6 がセットされており、柱主筋に圧縮力が生じにくくなっていたことによる。この圧縮強度の違いを除くと、両者の応力 - ひずみ関係はほぼ一致しており、対称面試験体を用いる実験手法の影響は観られない。

図 - 6 (b)に応力分布が測定されるUC-H-Mの平均の圧縮応力 - ひずみ関係を、標準試験体UC-S-2とコンクリートシリンダーのものを比較して示す。UC-H-Mでは対称面側の柱主筋下端に圧縮応力が伝達しないようにローラー支持層が処理してある。このため、比較のUC-S-2の応力 - ひずみ関係では圧縮荷重から柱主筋の負担荷重を差し引いた応力を算出している。柱主筋の負担荷重は、最大

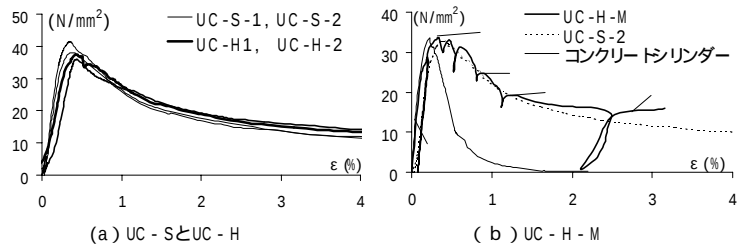


図 - 6 平均の圧縮応力 - ひずみ関係

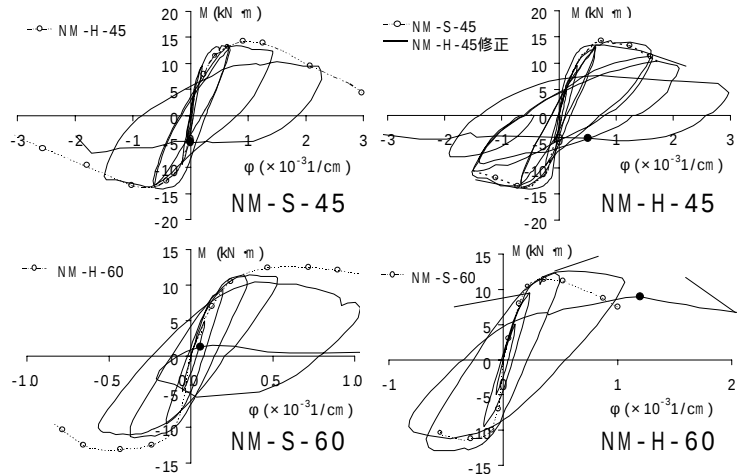


図 - 7 モーメント - 曲率関係

荷重に対する全柱主筋の圧縮降伏合力の割合と、測定ステップの圧縮荷重の積として算出している。UC-H-Mの応力 - ひずみ関係は、UC-S-2と比較すると、ほぼ一致している。しかし、圧縮ひずみで約 2%以降、差が若干生じているが、これについては、それ以降、UC-H-Mの柱主筋のひずみが急増し始めたことから、前述の柱主筋下端の処理が機能しなくなったことによると考えられる。コンクリートシリンダーのものと比較すると、最大応力まではほぼ一致しているが、それ以降、UC-H-M、UC-Sの方がひずみの増加に伴う応力低下が小さく横補強筋により靱性が増大している。

(2) 軸力と曲げを受ける柱試験体

図 - 7 に軸力と曲げを受ける各試験体のモーメント - 曲率関係(以後、M - ϕ 関係)をそれぞれ示す。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。図中には同じ軸力比の標準試験体と対称面試験体の互いの包絡線を○の点線で示している。図中の●は軸力の限界時点て、それ以降の関係では軸力が低下している。

標準試験体と対称面試験体では、最大モーメントには差はほとんど生じていないが、それ以降で

対称面試験体の曲率が大きくなっている。特にNM-H-45で顕著である。これは、対称面試験体では、図 - 5 に示されたように柱主筋がロードセル内から抜け出すことが影響していると考えられる。そこで、NM-H-45についてその抜け出しによる曲率成分を除去したM - ϕ 関係の包絡線を太実線で示す。抜け出しによる回転角は、曲げ引張鉄筋のひずみを基にその引き抜き力を算出して主筋の抜け出し量を求め、これが中立軸位置に対してなす角度としている。示した範囲は繰り返し曲げにより主筋が座屈するまでである。NM-H-60では柱主筋のひずみ測定が不調であったため示していない。

主筋の抜け出し量を考慮すると、対称面試験体のM - ϕ 関係は標準試験体のものに近づいている。最大モーメント以前で対称面試験体の剛性が小さいのは、対称面試験体ではコンクリートが曲げ引張抵抗できないことによる。NM-H-60の柱主筋の抜け出しによる曲率成分については今後、検討が必要であるが、軸力と曲げを受ける場合においても半分高さの対称面試験体を用いる実験手法で、柱断面内の応力を測定できると判断できる。

4.2 柱断面内の応力分布性状

(1)一軸圧縮を受ける柱試験体

図 - 8 にUC-H-Mの柱断面内のコンクリートの直圧縮応力分布を示す。示した分布は図 - 6(b)中に示す番号の時点のものである。応力は各素子の受ける荷重を負担面積で除した値である。

の分布は最大荷重の約 30%の時点のもので、弾性分布に近いものである。断面中心部に応力が集中している。柱断面内には帯筋により横拘束される領域が発生するが、その拘束の状態や程度はその領域内において異なり、断面中心に近い位置ほど二軸の横拘束を受けて拘束の程度も最も大きいと考えられる。これにより柱断面中心部の材軸方向の剛性が増加し、柱断面内の中心部に応力が集中していると考えられる。

の分布は最大荷重時のもので、で観られる断面中心部の応力集中がコンクリートの剛性低下により緩和されている。この傾向は最大荷重の約 50%の時点から観られた。コンクリートの圧縮強

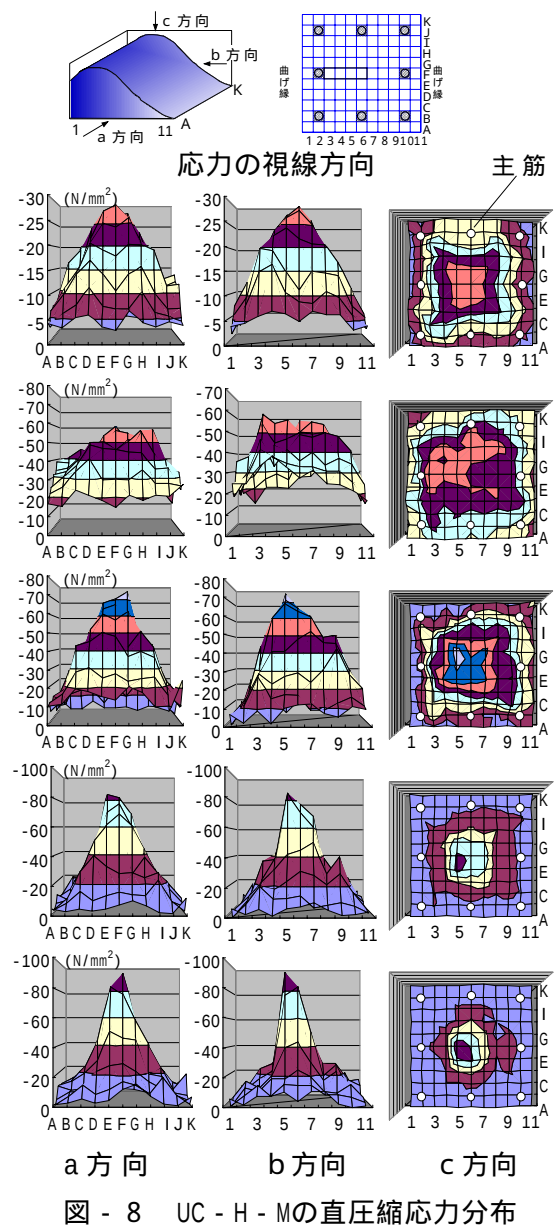


図 - 8 UC - H - Mの直圧縮応力分布

度(=32.8N/mm²)に対して、コアの応力は 40 ~ 60N/mm² で大きく、カバーの応力は 15 ~ 35N/mm² で小さくなっている。

の分布は最大荷重以後の約 75%の時点のものである。中心の応力は約 70N/mm² でカバーの応力は 5 ~ 15N/mm² となり、再び中心部に応力が集中する状態になっている。

の分布は図 - 6 (b)の応力 - ひずみ関係上で応力が安定し始める時点のもので、の分布はその応力がほぼ保持された最終加力時のものである。この間は、コア内の周辺部の応力が減少し、中心部の応力の増加して、その応力の増減が相殺されて、平均の応力が安定する形になった。

(2)軸力と曲げを受ける柱試験体

図 - 9 にNM-H-60の柱断面内のコンクリートの直圧縮応力分布を示す。示した分布は、図 - 7 (b) 中に示す番号の時点のものである。

の分布は+2 サイクルのピーク時で最大モーメントの約 70%の時点のものである。曲げ終局状態以前であるにもかかわらず、曲げ圧縮応力の最大はコア内に位置している。これは、前節の分布で述べたように横補強筋の拘束によりコア内の剛性が増加したことによる。

の分布は最大モーメント時のものである。カバの応力はコンクリートシリンダーの圧縮強度に近づいているが、コア内の応力は約 40N/mm^2 と大きくなっている。この傾向は軸力比が大きい試験体ほど顕著に生じた。

の分布は最終加力時のものである。一軸圧縮の柱の分布と同様に断面の中心部が断面の応力が集中している。

4.3 柱断面内の直圧縮応力 - ひずみ関係

図 - 10 にカバー位置の直圧縮応力 - ひずみ関係 (以後、応力 - ひずみ関係)の例を示す。示した試験体はNM-H-60である。応力は前節と同じで、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。図中にシリンダーの応力 - ひずみ関係を太実線で示す。カバの応力 - ひずみ関係はバラツキは観られるが最大強度をシリンダー圧縮強度の約 70 ~ 80 %に低減させたものに近くなった。

図 - 11 にコア内の直圧縮応力 - ひずみ関係を示す。示した試験体は一軸圧縮を受けるUN-H-Mと軸力と曲げを受けるNM-H-60のコア内の中央幅列と対角線列のものである。柱断面中心に近いもののほど最大応力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と曲げを受ける場合を比較すると、軸力と曲げを受ける方が、最大応力以降の応力低下が大きくなる傾向がある。図中に一軸圧縮を受けるUC-N-2のコアの平均の応力 - ひずみ関係を - ○ - で示す。コアの応力はカバーと柱主筋の負担分を差し引いて求め

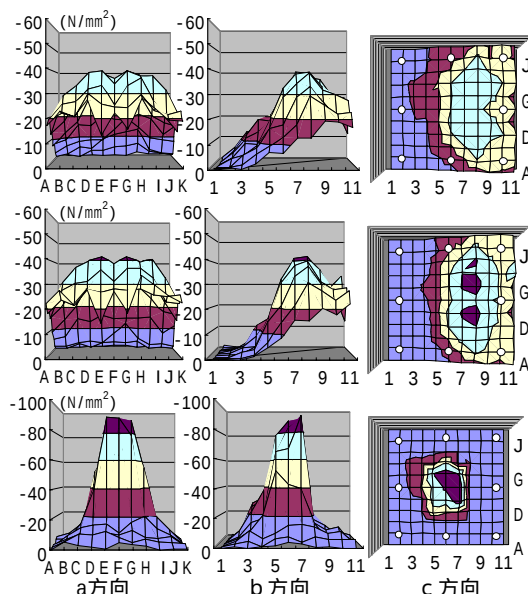


図 - 9 NM-H-60の直圧縮応力分布

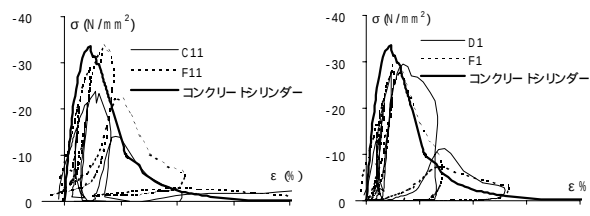


図 - 10 カバの直圧縮応力 - ひずみ関係

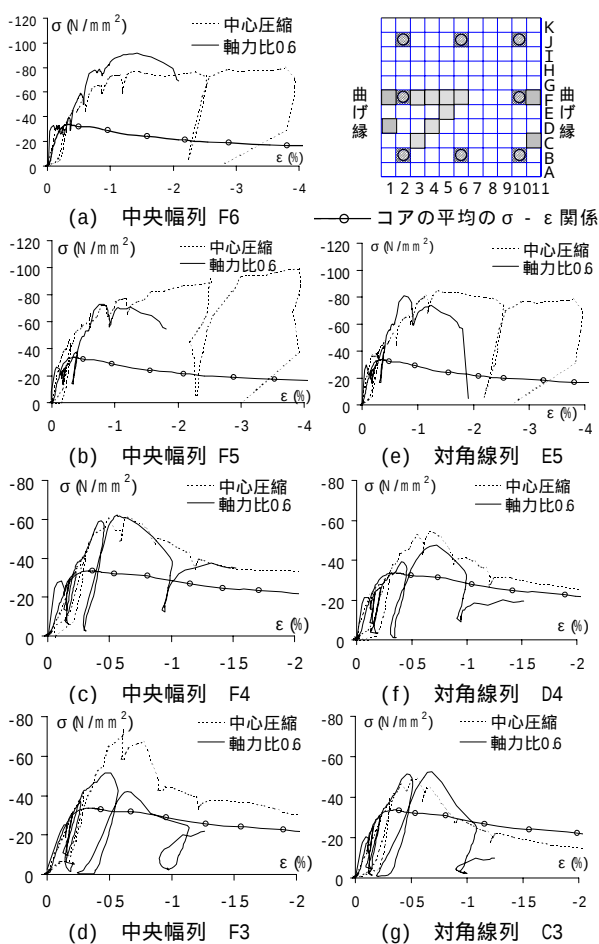


図 - 11 コア - 内の直圧縮応力 - ひずみ関係

ている。カバーの応力 - ひずみ関係はコンクリートシリンダーのもとしている。一軸圧縮を受ける柱の平均の応力 - ひずみ関係では、柱断面内の応力 - ひずみ関係を説明できないことが確認される。

4.4 柱断面内の最大応力分布のモデル化

図 - 12(a)にNM-H-60の柱断面内の各素子の最大応力の分布を示す。応力は $\sigma_{\max}(x,y)$ をシリンダー圧縮強度 $c \cdot \sigma_B$ で除している。断面中心に近いものほど最大応力が大きくなっているが、バラツキがみられる。この分布が柱断面の中心を対称点に点対称分布に近くなるものとして修正した分布を図 - 12(b), (c)に示す。修正は、断面中心から等距離にある全て素子の値を平均している。図 - 13に中央列と対角線列の最大応力の分布を示す。

横軸は、断面中心からの各素子までの距離 $R(x,y)$ を同中心から帯筋のコーナー内側までの距離 Dh で除した距離比である。UN-H-SとNM-H-45についても同様に修正している。中央列と対角線列では分布が一致しないで、距離比の影響を受けている。

図 - 14に最大応力が等しい等高線をモデル化したものを示す。この等高線に基づいて、対角線列以外の素子位置は、最大応力が等しい対角線上の位置と見なし、 $R(x,y)$ を $mR(x,y)$ と修正して表したものを図 - 15に示す。 $mR(x,y)$ による中央列と対角線列の最大応力分布は非常に近い。このように、柱断面内に最大応力が等しい等高線をモデル化することにより、柱断面内の応力 - ひずみ関係を比較的単純にモデル化できる可能性がある。

5. まとめ

- 1)一軸圧縮または軸力と曲げを受ける RC 造柱への測定手法は、概ね適用できることが確認できた。ただし、曲げを受ける場合、ロードセル内部からの引張鉄筋の抜け出しの影響を除去できる曲率の測定方法の検討が必要である。
- 2)一軸圧縮を受ける柱では弾性範囲において帯筋の横拘束効果により柱断面の中心部の剛性が増加し、その圧縮応力が大きい分布になる。この性状は軸力と曲げを受ける柱でも生じ、曲げ

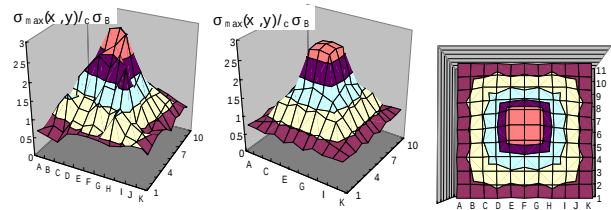


図 - 12 各素子最大応力分布 (NM - H-60)

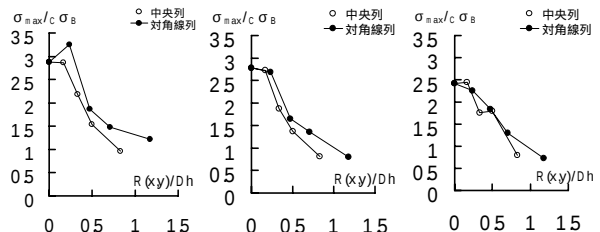


図 - 13 中央列と対角線列の最大応力分布

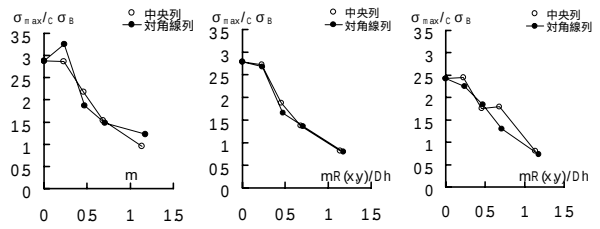


図 - 15 中央列と対角線列の最大応力分布

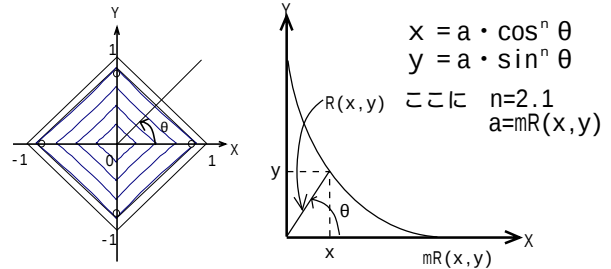


図 - 14 等応力線モデル

圧縮破壊以前でも曲げ圧縮縁に対してコア内の圧縮応力が大きい曲げ圧縮応力分布になる。

- 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の圧縮応力 - 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高線を仮定することで、簡便にモデル化できる。

参考文献

- 1)塩屋晋一：力学的対称面を利用するコンクリート内部の圧縮応力分布の測定，コンクリート工学年次論文集，Vol.21，pp. 583-588(1999)
- 2)青山元浩ほか：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.193-198(2001)