

論文 柱断面内の応力分布性状を考慮したRC柱の曲げ解析

佐々木 泉^{*1}・塩屋 晋一^{*2}

要旨: RC柱における横補強筋の、曲げ圧縮域に対する横拘束効果と部材のせん断強度に対する補強効果への寄与メカニズムや、曲げ圧縮力とせん断力を受ける曲げ圧縮域の圧縮応力分布性状を明らかにするための研究である。これまでRC柱の内部の圧縮応力分布を測定する実験を行っている。本論では、その測定データに基づき曲げ解析用の応力-ひずみ関係のモデル化を試みて繰り返しの曲げ解析を行っている。従来の曲げ解析では、曲げ耐力後のモーメント-曲率関係を過小評価して実験の柱断面の応力分布を説明できる状況ではなかったが、本論で試みた柱断面の応力分布性状を反映した曲げ解析では、それらを説明できる状態が明らかになった。

キーワード: 鉄筋コンクリート、応力-ひずみ関係、曲げ解析、応力分布、柱

1. はじめに

鉄筋コンクリート造(以後,RC)柱に配筋される横補強筋には、圧縮域のコンクリートを横拘束する効果と部材のせん断強度を増加させる効果がある。しかし、それぞれの効果を評価できる評価メカニズムはまだ解明されていない。また曲げ圧縮域の応力状態は曲げ圧縮力とせん断力を組み合わせられる状態になり、一軸圧縮実験の平均の応力-ひずみ関係を用いた曲げ解析で表現される応力状態と異なる。その圧縮特性の評価メカニズムも解明されていない。塩屋¹⁾は、これらの課題を解明する目的で、軸力・曲げ・せん断力が組み合わせられて加力されるRC柱の断面内の直圧縮応力分布性状を明らかにする応力分布の測定実験を行っている。

本研究では、その測定された応力分布を基に、柱の内部の応力性状を反映できる直圧縮応力-ひずみ関係(以後、応力-ひずみ関係)のモデル化を試み、それを用いて繰り返し加力の曲げ解析を行い、柱の内部の応力分布性状とモーメント-曲率関係について実験結果との比較を行っている。本論文の目的は柱内部の応力分布性状を実情に合わせた曲げ解析により、部材の挙動をどの程度、説明できるようになるかを検証するものである。本論で示した応力-ひずみ関係は定式化したものとして提案するものではない。

文献1)の実験では、一軸圧縮だけを受ける柱や軸力と曲げを受ける柱の実験も行っており、それらの実験結果に基づく応力-ひずみ関係も用いて検討する必要があるが、現時点では未整理であり、本論では軸力・せん断力・曲げを同時に受ける柱の実験結果を基にモデル化した応力-ひずみ関係を用いた曲げ解析だけを行った。

2. 断面内のコンクリートの応力-ひずみ関係

前述したように軸力・せん断力・曲げを同時に受ける柱の実験結果を基にモデル化する。

2.1 包絡線のモデル化

図-1にコンクリートが圧縮力を受ける場合の応力-ひずみ関係の基本モデルを示す。OABC区間は折れ線で表し、C以降は図中に示す双曲線で表している。OA区間

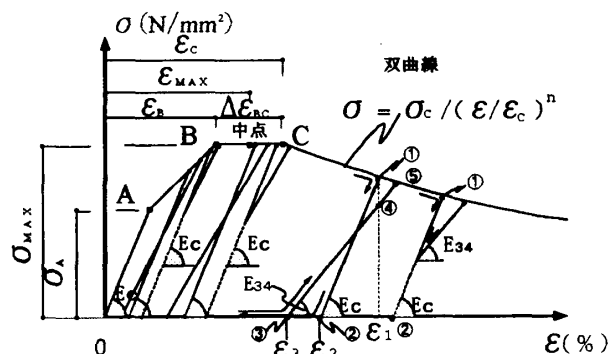
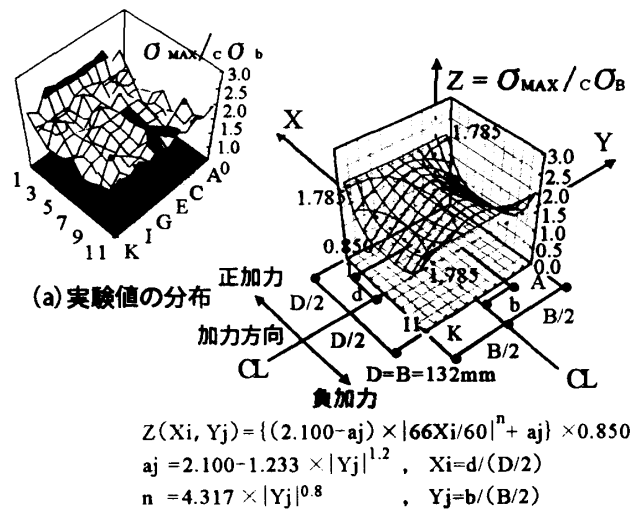


図-1 基本モデルの応力-ひずみ関係

図-2 $\sigma_{MAX} / c \sigma_B$ 分布と近似曲面

は弾性範囲で、そのヤング係数 E_c はコンクリートシリンダーのものとしている。 σ_{MAX} 、 ϵ_{MAX} 、 σ_A 、 $\Delta \epsilon_C$ 点以降の双曲線の指数 n を、断面内の位置で変化させた。具体的な与え方は以下のとおりである。

図-2(a)に断面内の最大強度 σ_{MAX} をコンクリートシリンダーの圧縮強度 $c \sigma_B$ で除した値 $\sigma_{MAX} / c \sigma_B$ の分布を示す。また図-2(b)にそれを近似した関数とそれによる曲面を示す。両曲げ圧縮縁と柱幅中央が1.79で最大で、柱せいの面の中央の位置が0.85で最小である。

*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 工学部建築学科准教授 博士(工学) (正会員)

図-3には弾性限界時A点の応力 σ_A を σ_{MAX} で除した値 σ_A/σ_{MAX} の分布を示す。その値は0.6から0.7の範囲になっており、 σ_A は σ_{MAX} の65%としている。

図-4(a)に最大強度時のひずみ ϵ_{MAX} をコンクリートシリンダーの圧縮強度時のひずみ $c\epsilon_B$ で除した値 $\epsilon_{MAX}/c\epsilon_B$ の実験値の分布を示す。図-4(b)にそれを近似した関数と曲面を示す。断面の中心が3.9で最大で、柱せい面が1.4で最小である。

図-1の点Bと点Cのひずみは ϵ_{MAX} がBC間の中間であるため、 $\Delta\epsilon_{BC}$ と ϵ_{MAX} により定義できる。図-5(a)に $\Delta\epsilon_{BC}$ の実験値の分布を示し、図-5(b)にそれを近似した関数と曲面を示す。断面中心が0.83%で最大で、柱せい面(A列とK列)が0.17%で最小である。

図-1の点C以降の軟化域は図中に示す双曲線の式で近似するが、そこでは指数 n が定義されればよい。図-6(a)に実験結果によく適合する n の分布を示す。図-6(b)にそれを近似した関数と曲面を示す。断面の中心が0.25で最小であり、柱断面の4箇所の隅が1.92で最大である。これら断面中心の軟化域の強度低下は緩やかで、断面の隅

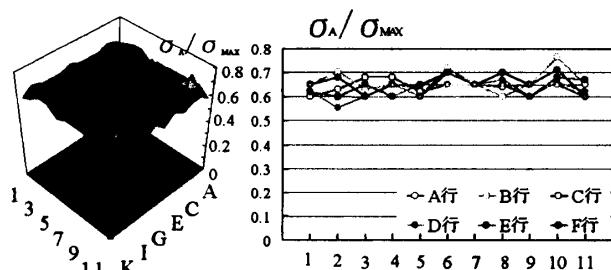
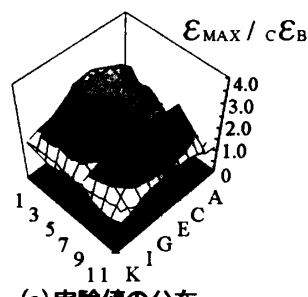
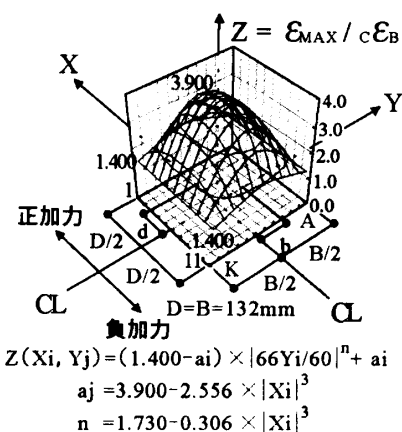


図-3 σ_A/σ_{MAX} の分布

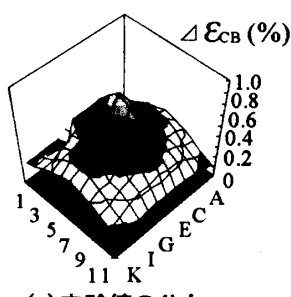


(a) 実験値の分布

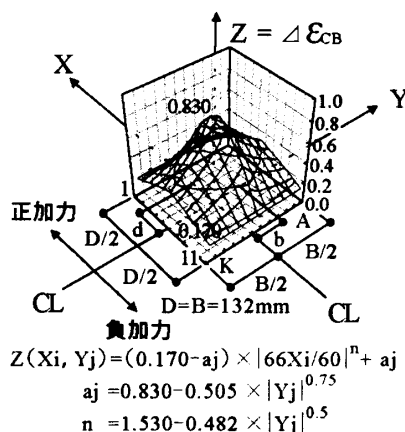


(b) 近似曲面と関数

図-4 $\epsilon_{MAX}/c\epsilon_B$ 分布と近似曲面



(a) 実験値の分布

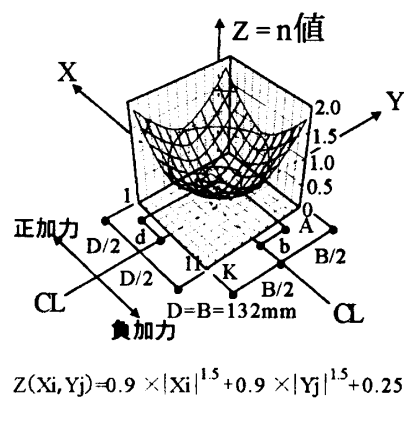


(b) 近似曲面と関数

図-5 $\Delta\epsilon_{CB}$ 分布と近似曲面



(a) 実験値の分布



(b) 近似曲面と関数

図-6 指数 n 値分布と近似曲面

は急であることを意味する。

以上の関数および定数により、応力-ひずみ関係の包絡線は表現される。

2.2 除荷再載荷のループのモデル化

図-1に示すように除荷・再載荷時の代表的な点を点1～点5としている。図中では点番号を○で囲んでいる。点1は除荷開始時、点2は応力が零になる時点、点3は再載荷により剛性が復活する時点、点4は再載荷時の剛性 E_{34} を決める時点、点5は包絡線に移る時点である。ここでは各点 i の応力を σ_i ひずみを ϵ_i と記号で表す。除荷時の剛性は初期のヤング係数 E_c と同じとし、再載荷時の剛性 E_{34} はCommon Point²⁾の考えに基いた。点3のひずみ ϵ_3 は点2のひずみ ϵ_2 の90%とした。点4の応力は応力 σ_1 の90%とし、ひずみは ϵ_1 と同じとした。

3. 曲げ解析

3.1 解析目的と方針

前章のコンクリートの応力-ひずみ関係を用いて高軸力のRC柱の曲げ特性を説明できるかを調べる。比較のため従来の応力-ひずみ関係を用いる曲げ解析も行った。

3.2 解析対象の試験体と応力分布の測定原理

(1) 試験体と実験概要

図-7に対象にした試験体を示し、図-8にそれらの柱断面を示す。文献1)では一軸圧縮加力(UC)、一定軸力で繰り返しの曲げ加力(MN)、一定軸力で繰り返しの曲げ・せん断加力(MQN)の実験を行っている。それぞれ応力分布を測定する試験

表-1 材料の力学的特性 (応力単位: N/mm²)

コンクリート	種類	$E_c (\times 10^4)$	$c \sigma_B$	$c \epsilon_B (\%)$	
		2.32	24.9	0.25	
鉄筋	異形鉄筋 (D6)	$E_{s1} (\times 10^5)$	$s \sigma_y$	$E_{s2} (\times 10^5)$	$s \sigma_B$
	丸鋼 ($\phi 25$)	1.67	330.2	0.04	419.3
		1.66	502.7	0.16	588.1

E_c : コンクリートのヤング係数, $c \sigma_B$: 圧縮強度

$c \epsilon_B$: 圧縮強度時ひずみ度, E_{s1} : 鉄筋のヤング係数, $s \sigma_y$: 降伏強度

$s \sigma_B$: 引張強度, E_{s2} : ひずみ硬化域の接線剛性

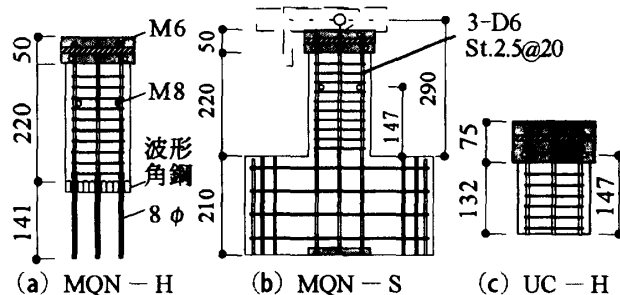


図-7 試験体の寸法と配筋

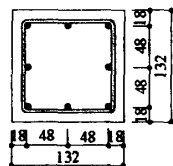


図-8 試験体断面図

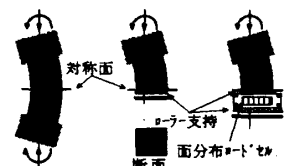


図-9 対称面の測定原理

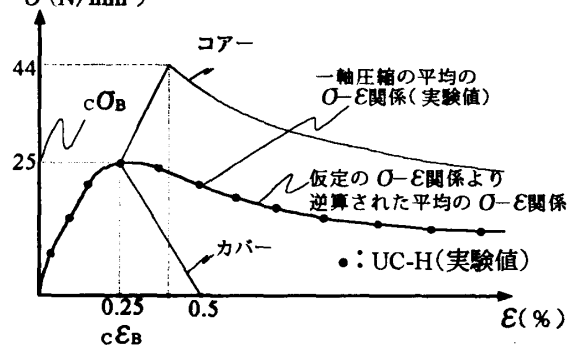


図-10 従来のモデルIIの応力-ひずみ関係

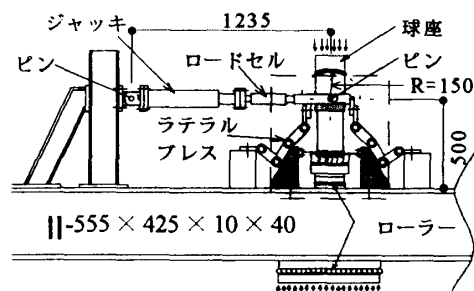
体(Hタイプ)と、応力分布を測定しない標準試験体(Sタイプ)の実験を行っている。今回、解析の対象にした試験体は応力分布を測定した試験体MQN-Hである。柱断面寸法は132mm×132mmである。材料強度は普通強度で、表-1に材料特性を示す。軸力は一定軸力の20kNで軸力比で0.5である。詳細は文献1)を参照されたい。

(2) 応力分布の測定原理

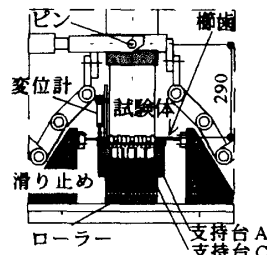
文献3)は力学的対称性を利用して柱断面内の直圧縮応力分布を測定する方法を提案している。図-9に曲げ圧縮力とせん断力を受ける場合の測定原理の適用方法と測定方法を示す。力学的対称面をローラ支持し、その直反力を面分布ロードセルで測定する。文献1)を参照されたい。

3.3 解析方法

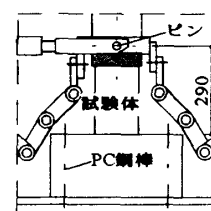
変形の適合条件は平面保持を仮定した。柱断面内を二次元分割して各断面位置に前章のコンクリートの応力-ひずみ関係を仮定した。分割数は22行×22列とした。加力は実験の曲率の履歴に合わせて、曲率を制御変位として漸増繰り返し加力とした。



(a) 加力装置



(b) MQN-Hの詳細



(c) MQN-Sの詳細

図-11 MQNタイプの加力装置

3.4 材料特性

(a) コンクリート

応力-ひずみ関係を以下の3種類とした。

モデルI: 応力分布性状を考慮したモデル

前章で示した応力-ひずみ関係はコンクリートのヤング係数 E_c 、圧縮強度 $c \sigma_B$ とその時のひずみ $c \epsilon_B$ が与えられると決まる。これは表-1の材料試験の値を用いた。

モデルII: 従来の曲げ解析に用いるモデル

柱断面をカバークンクリートとコアコンクリートに分け、それぞれに1種類の応力-ひずみ関係を仮定する。まず、カバークンクリートの応力-ひずみ関係を仮定して、一軸圧縮加力の荷重-変形関係の実験結果(UC-H)に適合するようにコアコンクリートの応力-ひずみ関係を試行計算により特定した。図-10に仮定した応力-ひずみ関係をそれぞれ示す。カバークンクリートは圧縮強度時まではコンクリートシリンダーの応力-ひずみ関係とし、それ以降は $c \epsilon_B$ の2倍のひずみで応力が零になる直線関係とした。

(b) 鉄筋

鉄筋の応力-ひずみ関係はひずみ効果を考慮しない完全弾塑性とした。これに関しては今後、ひずみ硬化、バウシニング効果、座屈を考慮できるモデルへの改良が必要である。降伏強度とヤング係数は表-1の材料試験の値を用いた。

3.5 解析結果と実験結果の比較

(a) モーメント-曲率関係

図-12にモーメント-曲率関係を示す。MQN-H試験体の実験結果と計算結果を比較して示している。実験では図-11(a)に観られるように柱頭上部の球座の摩擦のため、柱に生じるモーメントは実験で加力したモーメントより小さくなる。文献1)ではその摩擦力を検出している。ここでは、最大モーメント時に加力したモーメントに対する柱で生じるモーメント

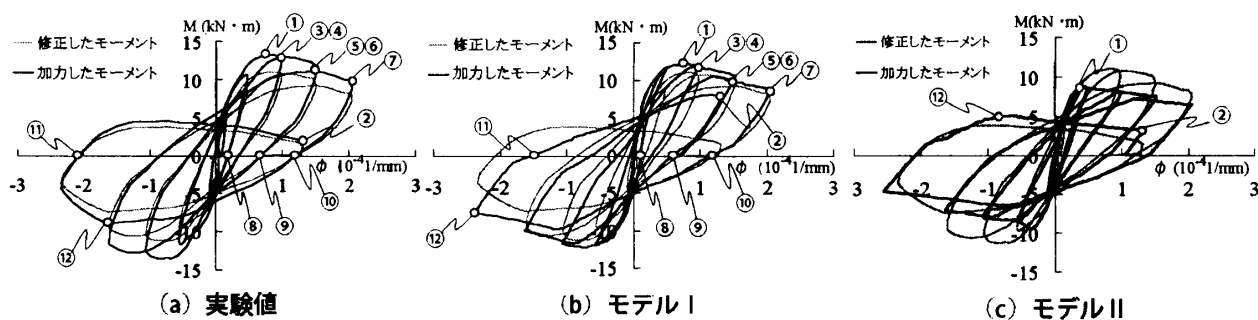


図-12 モーメント-曲率関係

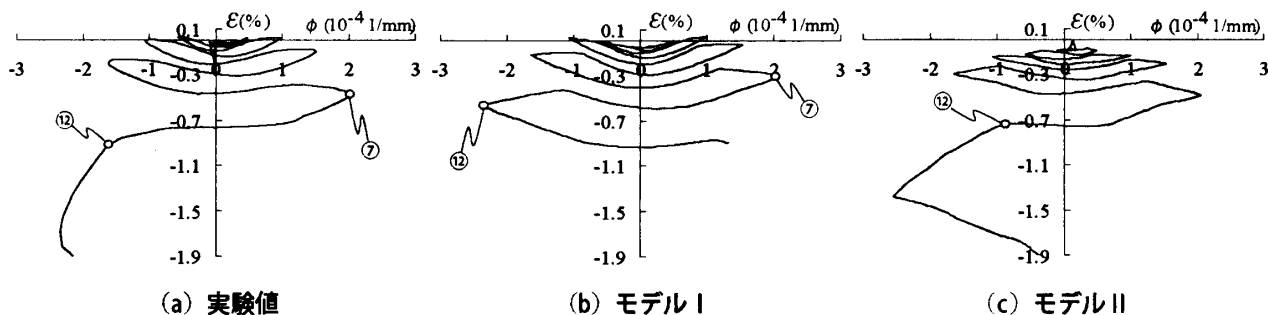


図-13 軸ひずみ-曲率関係

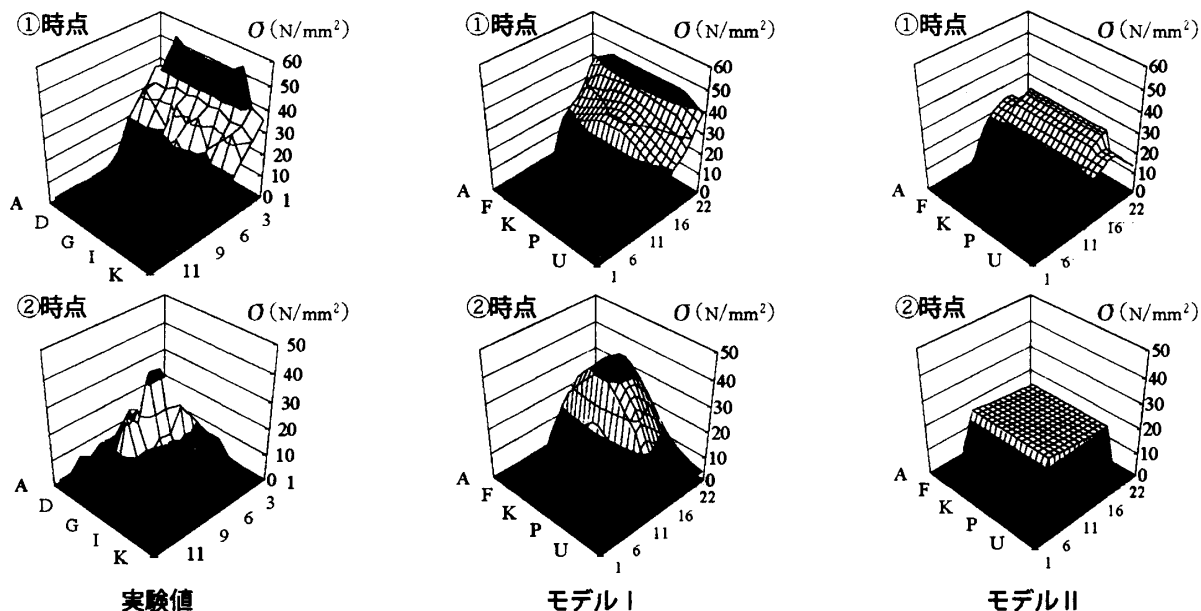


図-14 柱断面内のコンクリートの直圧縮応力分布の比較

の比率を、加力のモーメントに乗じたものを、実験での柱のモーメントとして解析結果を比較した。その比率は0.83であった。これによるモーメント-曲率関係を図-12の各図に薄い色の線で示す。曲率は曲げ危険断面から柱せいの区間で測定した。4箇所の曲げ縁の変形を基に算出した。

モデルⅠは実験に対して最大荷重までは剛性と最大荷重が大きくなり、最大荷重は約11%増加している。最大荷重時の曲率と最大荷重後の耐力低下の勾配は実験結果に近い。最終サイクルの負加力で、曲率が零となる時点までは、巨視的にはモーメント-曲率関係は実験値に近くなっている。図-13に軸ひずみ-曲率関係を示す。実験結果では曲率が $-1.6 \times 10^{-4} 1/mm$ で軸ひずみが増大して軸崩壊

している。図-12(a)と図-13(a)に示す⑫の時点は軸変形が増大する時点である。この時点の前あたりからモデルⅠによる解析結果と実験結果に大きな差が生じている。実験ではこの時点あたりから柱主筋の座屈が生じ始めてカバーコンクリートの剥落が生じており、解析では座屈による影響を考慮していないため、これが原因でその差が生じたものと考えられる。

一方、モデルⅡは解析値の最大荷重までは剛性は実験結果と一致しているが、最大荷重が実験値に対して21%減少している。またその時の曲率も実験値に対して小さくなっている。このほか、図-13(c)で観られるように初期のサイクルから軸ひずみが他のものに較べて大きくなる傾向が確認される。最終サイクルの負加力の⑫の前後の時点の急増して

軸ひずみは実験結果に近づいている。今回のモデルでは主筋の座屈は考慮しないで、主筋を抵抗させている。座屈を考慮して主筋の抵抗力を低減すると、その急増する軸ひずみの値は変化し、実験結果を説明できない状況になると考えられる。

(b) 柱断面内のコンクリートの直圧縮応力分布

図-14に代表的な時点のコンクリートの直圧縮応力分布を実験値と比較して示す。最大曲げ荷重時(①時点)と正加力の最終曲率の時点(②時点)である。

最大荷重①時点では、実験の最外圧縮縁では、柱幅の中央の応力が 53N/mm^2 で大きくなりコーナが 35N/mm^2 と小さくなっている。この傾向はモデルⅠでも生じているが、実験結果ほど顕著ではない。これに対してモデルⅡではカバーコンクリートに位置する最外縁の応力はコンクリートの圧縮強度 25N/mm^2 より小さくなり、圧縮破壊が生じている状態になっている。また、柱せい面(A列,U列)の応力分布は放物線状の分布になっている。応力の大きさや分布形状および圧縮域の幅について3種類の応力分布を比較するとモデルⅠの分布が実験結果にかなり近いと判断できる。

最終曲率の②時点では、実験の分布は中央が 43N/mm^2 で周囲の応力は小さくなっている。これは全ての柱主筋が座屈してそれらの周辺のコンクリートが剥落していることが理由である。モデルⅠでは中央の応力は 45N/mm^2 程度で、実験の分布の値とほぼ一致している。しかし、その座屈を考慮していないため周囲の応力が大きい。この影響で図-12で観られるようにモデルⅠの②時点のモーメントは実験の②の値より大きくなっている。これは図-13の軸ひずみの増大の違いにも影響を与えているものと考えられる。これに対してモデルⅡの分布ではカバーコンクリートの応力低下が観られるが、コアコンクリートは一様な分布になり、実験の分布を説明できる状況ではない。しかし、②時点のモーメントと軸ひずみの値はモデルⅡの方がモデルⅠより実験値に近い。このことは、解析による部材のモーメント-曲率関係や軸ひずみ-曲率関係が特定の実験結果に適合したとしても、内部の応力分布性状が適合していることを保証するものではなく、履歴特性がその特定の実験のものとなってくると、その解析の推定精度は異なったものになることを意味している。

(c) モデルⅠと実験の直圧縮応力分布の比較

図-15には正加力時の最大モーメント以降の各サイクルのピーク時(③, ⑤, ⑦)と、再載荷時にはほぼ同じモーメントと曲率になる時点(④, ⑥)の直圧縮応力分布を示す。モデルⅠと実験の分布を比較して示す。図中には各時点でモーメントを示している。実験のモーメントは前述した修正値である。③と④の比較、④と⑤の比較により繰り返し加力の影響を知ることができる。③と④の実験の比較ではあまり明確ではないが、解析では圧縮縁とコーナーの応力

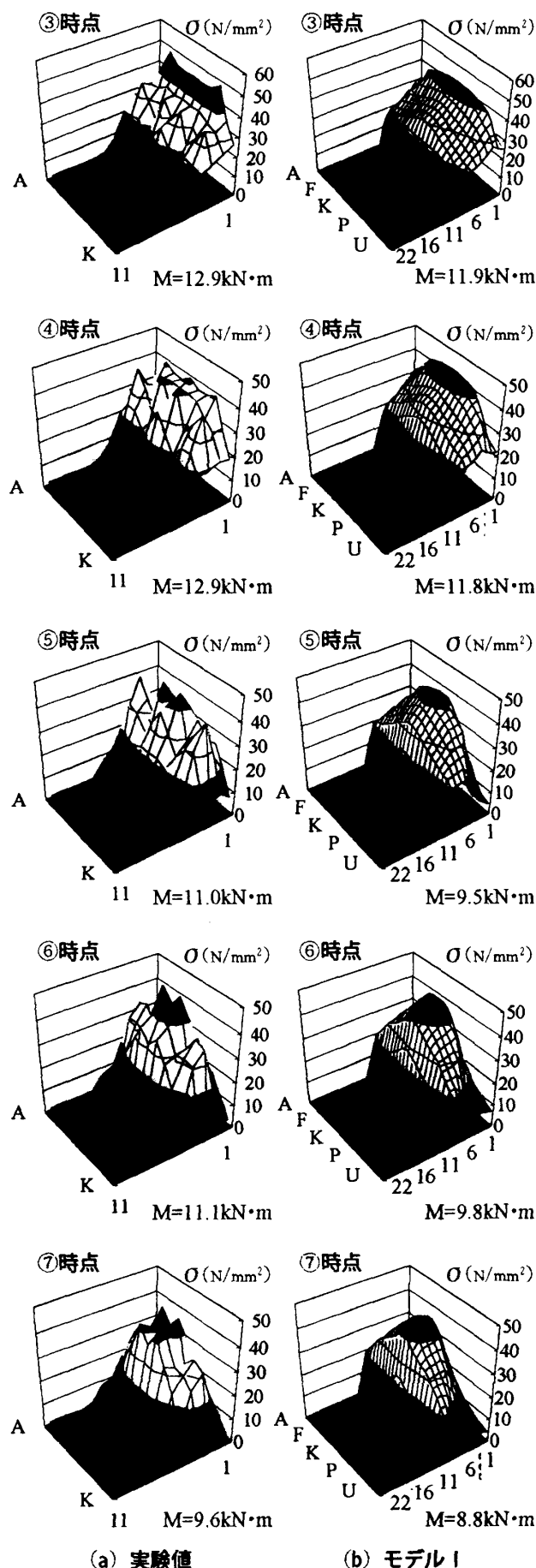


図-15 正加力サイクルのピーク時の直圧縮応力分布

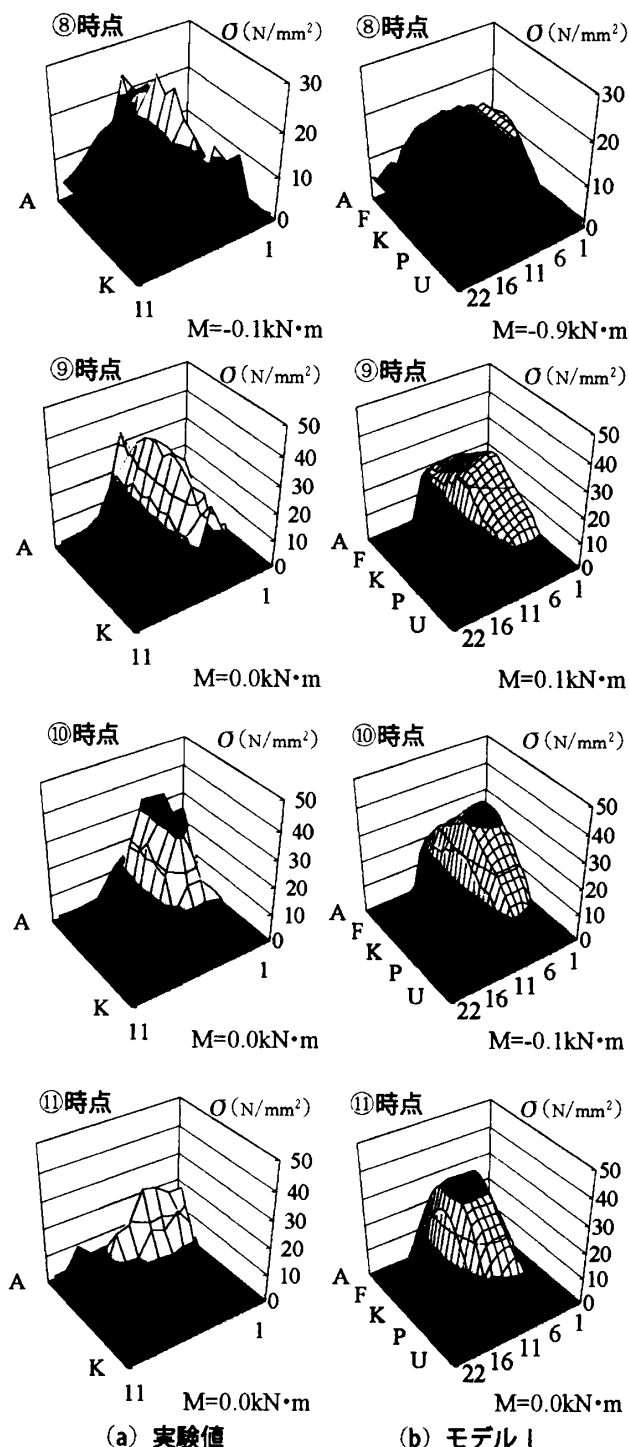


図-16 除荷時にモーメントが零になる時の直圧縮応力分布

が③より④の方が低下している。これは④と⑤では実験および解析でも明確になっており、幅中央の応力が突出する傾向が明確になっている。③と⑤および⑦を比較すると、曲率が増大して抵抗モーメントが減少すれば柱幅中央の応力が突出する傾向が明確になる。モデル I の分布は示した範囲においては実験の分布を概ね一致している。

図-16に各サイクルで除荷してモーメントが零の時点の直圧縮応力分布を示す。⑧、⑨時点まではモデル I と実験の分布はほぼ同様な分布になっている。しかし、⑩時点では A 列と K 列の柱せい面の応力で差が生じはじめ、

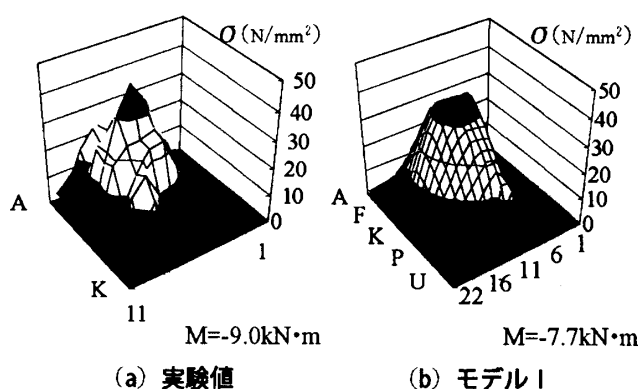


図-17 ⑫時点の直圧縮応力分布

⑪時点では主筋の座屈の影響で違いが生じている。

図-17に実験の⑫時点のモーメントと同じモーメントになるモデル I の⑫時点の分布を比較して示す。曲率は異なっているがモーメントが同じであればモデル I は実験の分布に近づいている。これは前述したモデル II と異なる点である。

4. まとめ

RC柱の断面内の応力分布性状を説明する曲げ解析と従来の曲げ解析を行い、実験結果と比較した。

- (1) カバーコンクリートとコアコンクリートに分けて、それぞれに1種類の応力-ひずみ関係を仮定する従来の曲げ解析では、最大曲げ荷重後のモーメント-曲率関係を過小評価し、断面内の応力分布は実験の分布と異なった。
- (2) 断面内の応力分布性状に基づく曲げ解析では、最大曲げ荷重が増大し、最大曲げ荷重後のモーメント-曲率関係の靱性も改善され、実験結果の傾向に近づいた。また断面内の応力分布も実験結果の分布に近づいた。これらのことから、高軸力を受ける RC 柱の最大曲げ荷重やその後の弾塑性性状は断面内の応力分布性状に基づく応力-ひずみ関係を用いて説明できる可能性がある。

今後は、一軸圧縮加力や、一定軸力と曲げ加力についても、既に測定されている実験結果に基づいて応力-ひずみ関係のモデル化を検討して、せん断加力も含めた種々の加力状態の部材の挙動の解析を行う予定である。

参考文献

- 1) 増田祐一郎, 塩屋晋一, 末吉伸丈, 谷村真理: 軸力・曲げ・せん断力を受ける RC 造柱の降伏ヒンジ領域の応力伝達機構に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp265-270, 2004.7
- 2) Karsan, P., and J.O.Jirsa: Behavior of Concrete under Compressive Loading, J. Struct. Div. ASCE, Vol.104, No.ST12, Proc. pap.6935, pp.2543-2563, Dec.1969
- 3) 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, No. 2, pp. 583-588, 1999. 7