

# 論文 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

増田 祐一郎<sup>\*1</sup>・塩屋 晋一<sup>\*2</sup>・末吉 伸丈<sup>\*3</sup>・谷村 真理<sup>\*4</sup>

要旨：軸力・曲げ・せん断力を受ける 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に RC 柱の内部の圧縮応力分布を測定する実験を行った。これまで提案してきている測定手法は軸力・曲げ・せん断力を同時に受ける RC 柱にも適用でき、その曲げ圧縮応力は、軸力・曲げだけを受ける柱の曲げ圧縮応力に比べ、極めて大きくなり、曲げ終局時以前の曲げ圧縮分布も急勾配になることが明らかになった。

キ - ワード：RC 柱，せん断力，直圧縮応力分布，曲げ解析，横拘束コンクリート

## 1. はじめに

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が、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、曲げ圧縮域のコンクリートは曲げ圧縮力とせん断力を組み合わされる状態になり曲げ解析で用いられる一軸圧縮特性の状態と異なるがその圧縮特性の評価メカニズムも解明されていない。

本研究では、これらの課題を検討する目的で、軸力・曲げ・せん断力が組み合わされて加力される RC 柱の断面内の直圧縮応力分布性状を明らかにする実験を行った。応力分布の測定には研究代表者らが開発している測定技術を用いてせん断力を受ける場合にもそれを適用できるように改良している。本報告では実験の概要と結果について述べる。

## 2. 測定原理と応力の測定装置

### 2.1 測定原理と面分布ロードセル

本測定方法では力学的対称性が利用されている。

図-1に示すように軸力と曲げを受ける試験体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力を受ける柱や軸力・曲げ・せん断力を受ける柱にも同様に適用できる。詳細は文献1)を参照されたい。

図-2に面分布ロードセルの概略<sup>1)</sup>を示す。図-2(a)に示す荷重検出素子(以後、素子)が鋼材で製作され、受感部に2枚のひずみゲージが貼付されている。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、 $1.54 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ である。この平均のひずみから荷重が検出される。そして素子が磨き鋼板の上に図-2(c)のように11行11列のます目状に並べられている。鉄筋が貫通できるように8カ所に図-2(b)に示す貫通素子がセットされている。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)が挿入されて実現されている。

### 2.2 せん断応力が生じる対称面の支持方法

図-2(d)の対称面の支持方法では、せん断力を受

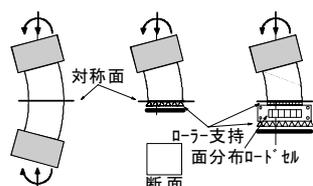


図-1 対称面の応力の測定原理

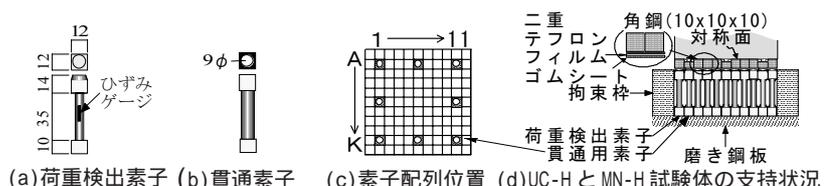


図-2 面分布ロードセルの概略

\*1 鹿児島大学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 鹿児島大学工学研究科建築学専攻  
 \*4 (有)片平設計(元鹿児島大学工学部建築学科)

ける場合,対称面と測定面がずれるため応力分布は測定できない。そこで,図-3(a)に示すように支持角鋼の上面を波形にしてせん断応力をコンクリートから角鋼へ伝達させる。そして,曲げ圧縮縁の角鋼の側面を鋼製の滑り止めで水平支持する。滑り止めは櫛歯の形状のもので,両面にひずみゲージが貼付されて各素子列ごとの水平反力分布も測定できる。

この部分の先端は角鋼の側面の倒れに対応できるように一方の回転角を許容できる。波形角鋼間の側面にはグリースが塗られてその摩擦力が軽減されている。

### 3. 実験概要

#### 3.1 加力形式と試験体

図-4 に対象にした加力形式と試験体の種類を示す。加力形式は一方の軸圧縮加力が行われ

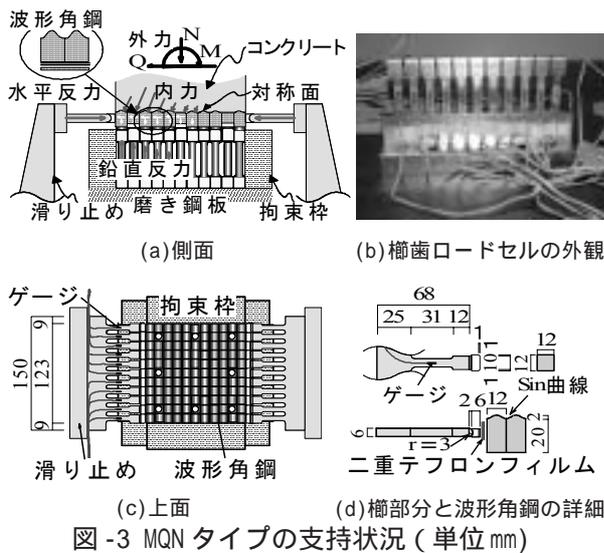


図-3 MQN タイプの支持状況 (単位 mm)

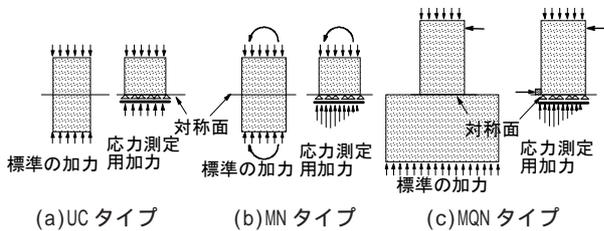


図-4 加力形式と試験体の種類

表-1 使用材料の力学的特性 (応力単位: N/mm<sup>2</sup>)

コンクリート		$E_c (\times 10^4)$	$c \sigma_B$	$c \epsilon_B (\%)$
種類		2.32	24.9	0.25
鉄筋		$E_{S1} (\times 10^5)$	$s \sigma_y$	$E_{S2} (\times 10^5)$
異形鉄筋 (D6)		1.67	330.2	0.04
丸鋼 ( $\phi 2.5$ )		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

る UC タイプ, 一定軸力で繰り返しの曲げ加力が行われる MN タイプ, および一定軸力で繰り返しの曲げ・せん断加力が行われる MQN タイプの3種類である。UC タイプと MN タイプでは対称面の応力分布を測定するための対称面試験体と, 試験区間が2倍の比較用の標準試験体が製作されている。MQN タイプでは対称面試験体と, 試験区間が同じでスタブが設けられた標準試験体が製作されている。試験体数には各種類1体の計6体である。試験体名称については各タイプ名の後に対称面試験体にはH, 標準試験体にはSをつけている。図-5に各試験体の配筋図を示す。柱断面は一種類で縮尺は実大寸法の約1/5である。帯筋比  $p_w$  は0.37%で主筋比  $p_g$  は1.47%である。帯筋は突き合わせ溶接された閉鎖型タイプである。

一軸圧縮加力される対称面試験体 UC-H では, 主筋の座屈が生じない状態の応力分布を測定するため, 主筋に磨き鋼棒が接合されていない。

表-1に使用材料の力学的特性を示す。粗骨材には最大寸法13mm以下の砕石が用いられている。MQN タイプの試験体は曲げ破壊形式になるように設計されている。図-6に柱主筋の定着状況<sup>1)</sup>を示す。

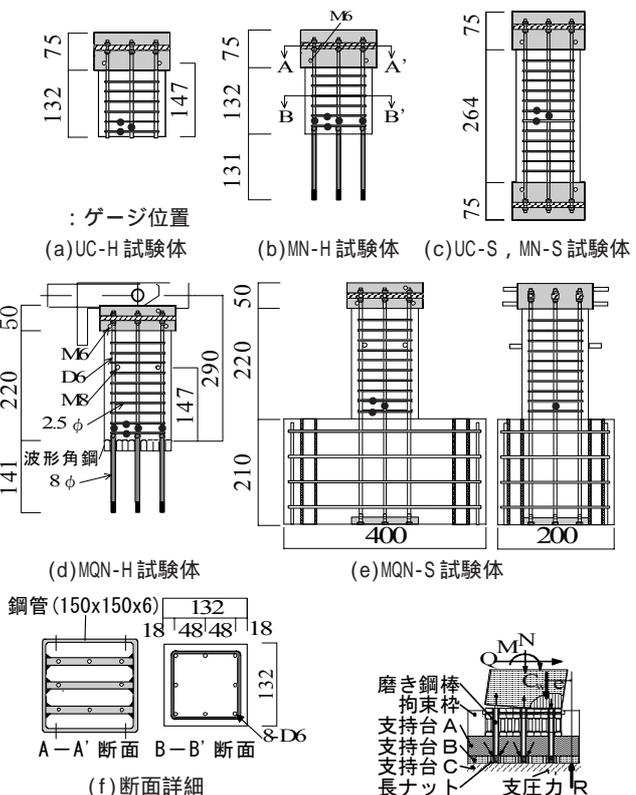


図-5 試験体 (単位 mm)

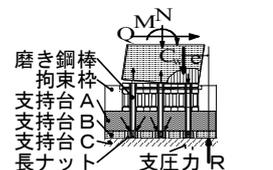


図-6 柱主筋の定着状況

### 3.2 加力方法と変位の測定方法

UCタイプでは対称面試験体と標準試験体とも2000kN 耐圧試験機に設置され、一方向の漸増圧縮加力が行われている。図-7にMNタイプの加力装置を示す。耐圧試験機内に加力装置が設置されている。図-8にMQNタイプの加力装置を示す。これも耐圧試験機内に設置され、所定の一定軸力を導入した後に水平変形が漸増される形式でジャッキにより繰り返しの水平力が加力されている。図-8(b)に示すように、対称面試験体MQN-Hでは角鋼の滑り止めが左右に設置される。この左右の滑り止めにより対称面の横方向の広がり変形が拘束されないように、図-3(d)に示すように左右の滑り止めの先端と角鋼側面の間にそれぞれ1mm程度の隙間が設けられている。水平力が零から増加する瞬間は面分布ロードセルの下部の支持台が直下の水平ローラーにより水平移動してその隙間が閉じる。その移動の際、角鋼の下端面と面分布ロードセルの間では僅かな水平力の伝達が必要である。それは柱主筋により支持台に伝達される。柱の軸力はMN, MQNタイプとも219.6kNで一定とされ、これは軸力比で0.5に相当する。

図-9にMQNタイプの変形の測定状況を示す。試験区間のコンクリート表面にコンクリートゲージが貼付されてひずみが測定され、また図-5中に示すように柱主筋と帯筋にそれぞれ、ひずみゲージが二枚づつ貼付されてひずみが測定されている。

### 3.3 ロードセルの精度

#### (a) 面分布ロードセルの精度

図-12にUC-HとMQN-H試験体で面分布ロードセルにより測定された鉛直反力の合力C(以後、合力)と測定ステップの関係を鉛直荷重 $P_v$ のものと比較して示す。UC-H試験体では柱主筋が面分布ロードセル側に定着されていないため、面分布ロードセルの合力と鉛直荷重は一致している。MQN-H試験体では柱主筋が圧縮抵抗するため、面分布ロードセルの合力と鉛直荷重には差が生じる。そこで、柱主筋の応力-ひずみ関係を図-10のように仮定して測定されるひずみから柱主筋の軸抵抗力を算出した。剛性と降伏強度には表-1の値を用いている。図-12(b)にその柱主筋の軸抵抗

力が面分布ロードセルの合力に加算された合力を - - で示している。この合力と鉛直荷重は正加力時の最大水平荷重時までにはほぼ一致している。それ以降、両者には差が生じているが、これは柱主筋の局部的な曲げや座屈により柱主筋のひずみに誤差が生じたことによる。

図-13にMQN-H試験体の面分布ロードセルの反力分布と柱主筋の軸抵抗力および柱軸力の釣り合いから算出される曲げモーメントと測定ステップの関係を示す。 - - は柱主筋の軸抵抗力を考慮したもので、 - - は無視したもので、実線は水平加力用のジャッキのモーメントである。図-12(b)で観られ

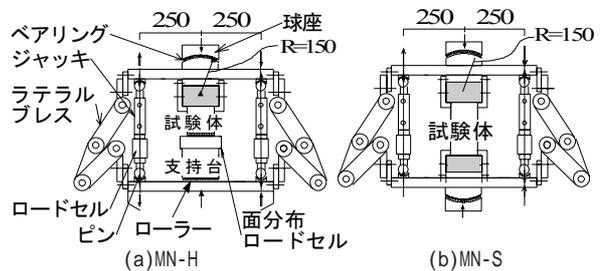


図-7 MNタイプの加力装置

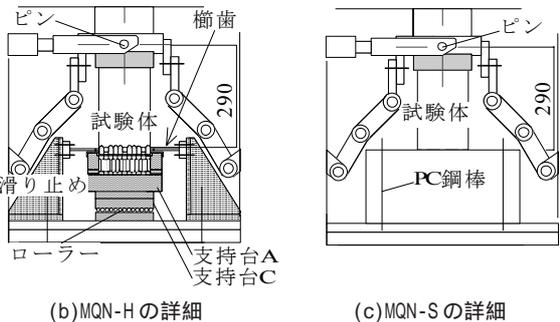
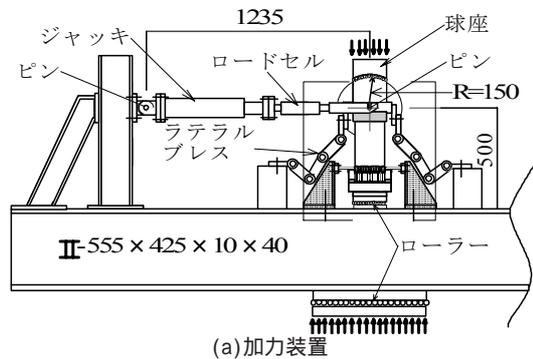


図-8 MQNタイプの加力装置

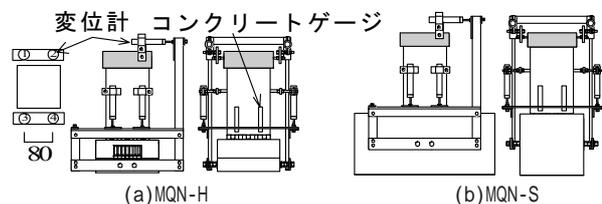


図-9 変形の測定状況

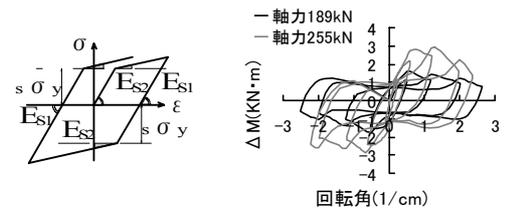
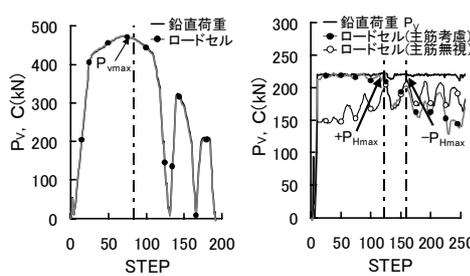


図-10 柱主筋のモデル化

図-11 球座の摩擦モーメントと回転角関係



(a)UC-H (b)MQN-H

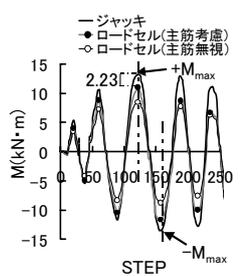


図-13 面分布ロードセルとジャッキによるモーメントの比較

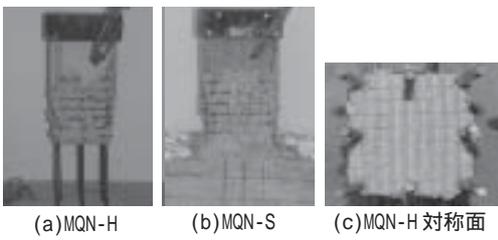


図-14 MQNタイプの破壊状況

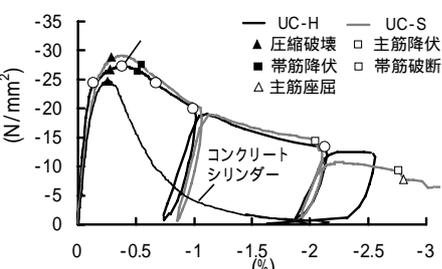


図-15 UCタイプの応力-ひずみ関係

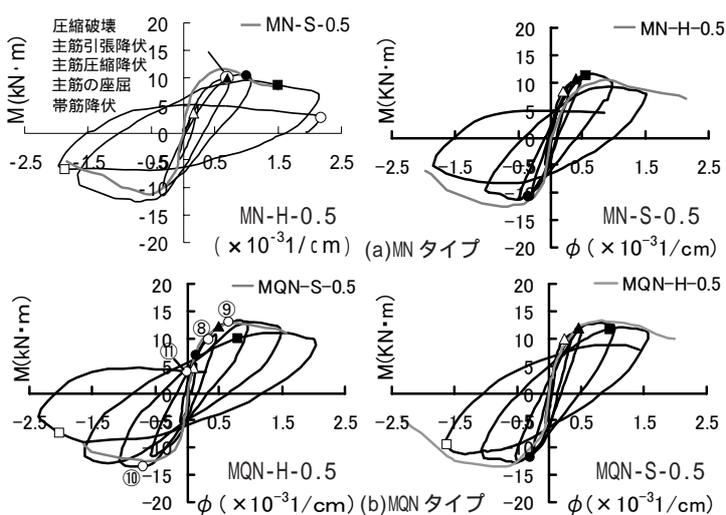


図-16 柱のモーメント-曲率関係

たように正加力時の最大水平荷重時までは、主筋の軸抵抗力は信頼できるものであるが、それまでの範囲においても差が生じている。これはつぎの理由により柱頭側の球座の摩擦と判断される。図-11に別の実験で行われた同球座の摩擦モーメント  $M(\text{KN} \cdot \text{m})$  と回転角の関係を示す。摩擦モーメントは鉛直荷重により変化するが、同図の鉛直荷重は189kNと255kNで本実験の鉛直荷重はこれらのほぼ中間である。これらのデータを基に本実験の鉛直荷重時の摩擦モーメントを直線補間で推定するとその最大値は2.16 ~ 2.27kN・mになる。これは図-13の最大荷重時のモーメントの差(2.23kN・m)に近い。

4. 実験結果

4.1 破壊状況

図-14にMQNタイプの最終破壊状況を示す。対称面試験体と標準試験体のコンクリートの圧縮破壊状況にはほとんど違いが観られなかった。

4.2 荷重-変形関係

(a) UCタイプの試験体

図-15に対称面試験体UC-Hと標準試験体UC-S

の平均の圧縮応力-ひずみ関係を比較して示す。圧縮応力は、圧縮荷重を全断面積で除して算出されている。またコンクリートシリンダーの圧縮応力-ひずみ関係も比較して示す。圧縮強度について、UC-Sに対してUC-Hの値が約5.7%と小さい。これは、UC-Hでは柱主筋が全く圧縮抵抗しないことによる。この柱主筋の影響を除くとUC-SとUC-Hの応力-ひずみ関係はほぼ一致する。

UC-Hとコンクリートシリンダーのものを比較すると最大強度が帯筋により9.5%増加し、それ以降の靱性が増大している。

(b) MNタイプとMQNタイプの試験体

図-16にMNタイプとMQNタイプの各試験体のモーメント-曲率関係(以後、M-関係)をそれぞれ示す。モーメントは、MNタイプでは左右の加力ジャッキの偶力としてMQNタイプでは水平荷重が曲げ危険断面位置になすモーメント(垂線距離290mm)としている。曲げ危険断面位置はMQN-Sでは柱とスタブの境界とし、MQN-Hでは波形角鋼の上曲面の谷としている。曲率について

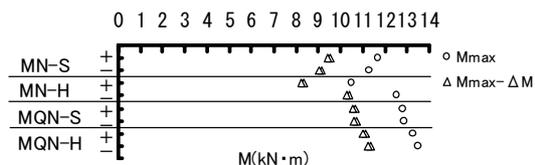


図-17 各試験体の最大モーメント

は, MNタイプでは, 変位計で測定される回転角をMQNタイプではヒンジ領域の変位計で測定される回転角をそれぞれ測定区間(147mm)で除している。図中には対称面試験体と標準試験体の互いの包絡線を一点鎖線で示している。

対称面試験体ではコンクリートが曲げ引張抵抗しないため, 両タイプとも対称面試験体の初期の剛性が標準試験体のものに比べて小さくなっている。図-17に全試験体の最大モーメントを で示している。これらのモーメントには, 球座の摩擦モーメント(2.16 ~ 2.27kN・m)が含まれている。それを差し引いたモーメントを で示す。MQNタイプの値がMNタイプの値より大きくなっている。これは曲げせん断力を受ける場合にはヒンジ領域内に曲げ危険断面が存在することによる。

MNタイプについては過去に検討されているが, MQNタイプでも初期剛性や柱主筋の圧縮降伏の発生レベルの違いを除くと, 標準試験体と対称面試験体のM - 関係はおおむね一致しており, 軸力・曲げ・せん断力を受ける場合でも本実験手法で柱断面内の応力を測定できることが確認される。

#### 4.3 柱断面内の直圧縮応力分布性状

##### (a) UCタイプの試験体

図-18に測定された直圧縮応力分布を示す。示した分布は図-15中に示す番号の時点のものである。各時点の, 左側の分布は直接測定されたものであり, 右側の分布は柱断面中心から等距離にある各素子位置の応力が平均されたもの(以後, 平準化分布)である。

最大圧縮強度の では, カバーコンクリート(以後, カバー)位置の応力が少し小さく, 帯筋コーナー部分の応力が少し大きくなる分布となっている。このカバー位置の応力が低下し, コーナー部分の応力が大きくなる分布性状は, 横ひずみが増加しはじめる の時点より確認されている。帯筋が降伏した直後の では, カバー位置の応力はほぼ完全に低下し

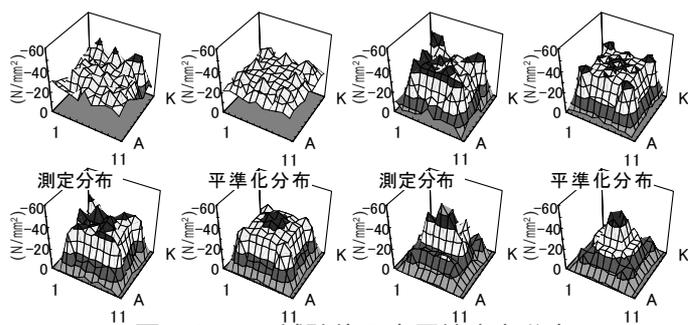


図-18 UC-H試験体の直圧縮応力分布

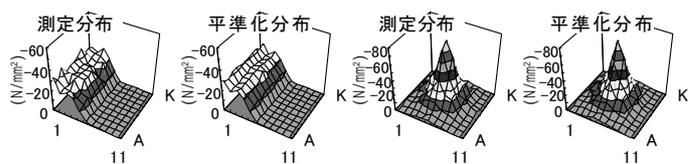


図-19 MN-H試験体の直圧縮応力分布

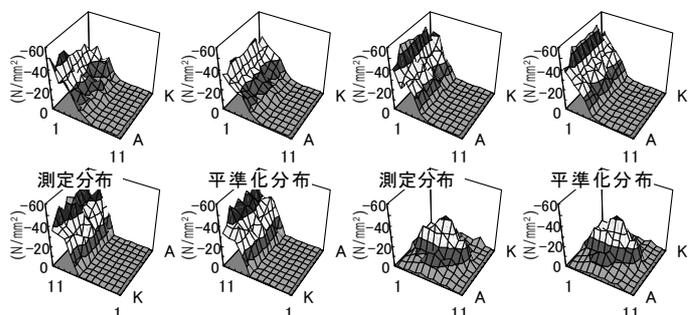


図-20 MQN-H試験体の直圧縮応力分布

ている。また, 中央部分の応力が僅かに大きくなり始めており, 帯筋コーナー部分の応力も大きくなっている。ひずみが増大し, 1.0%の では中央部分の応力がさらに大きくなり, コア内の周囲と帯筋コーナー部分の応力が低下して中央部分が僅かに突出している。圧縮強度が低下して最大圧縮強度の1/2の値となる時で, ひずみが2.0%の では, 周囲の応力が低下して中央部分の応力が突出した分布になっている。中央部分の応力の最大値は58.1N/mm<sup>2</sup>である。これはコンクリートの圧縮強度 $f_{cc}$ (=24.9N/mm<sup>2</sup>)の約2倍に相当する値である。

##### (b) MNタイプの試験体

図-19に測定された直圧縮応力分布を示す。示した分布は図-16(a)中に示す番号の時点のものである。図-18と同様に各時点で測定された分布と平準化分布を示している。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されている。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になっている。カバーが剥落する以前でモーメントが最大になる では, 圧縮域の圧縮応力がほぼ一様になっており, その応力値

は一軸圧縮を受ける試験体の最大圧縮強度時におけるコア内の応力値とほぼ同じであった。軸崩壊した時点( $M=2.92\text{kN}\cdot\text{m}$ ,  $N=223\text{kN}$ )の繰り返しの曲げにより、コア内周囲の応力がほぼ完全に低下し、中央部分が突出している。これは一軸圧縮の分布と同様の性状となっている。その最大応力値は $78.8\text{N}/\text{mm}^2$ で $c_B$ の3倍となり、一軸圧縮のものより極めて大きくなっている。

#### (c) MQN タイプの試験体

図-20に測定された直圧縮応力分布を示す。時点の分布は、軸力と曲げを受ける試験体の時点とモーメントがほぼ等しい時の分布である。

の分布と比較すると、カバー位置の応力が極めて大きくなって中立軸から圧縮縁へむけて急勾配な分布となっている。そのカバー位置の応力値は約 $50.0\text{N}/\text{mm}^2$ まで大きくなっている。さらに、正負で最大モーメントの時の分布でも、と同様に急勾配な分布になっており、カバー位置の応力値は約 $55.0\text{N}/\text{mm}^2$ まで大きくなっている。軸崩壊した時点( $M=3.89\text{kN}\cdot\text{m}$ ,  $N=219\text{kN}$ )の分布では一軸圧縮または、軸力・曲げを受ける試験体と同様に中央部分の応力が突出した分布となっている。この時の最大の応力値は $42.6\text{N}/\text{mm}^2$ となり、一軸圧縮のものに近くなっていた。

#### 4.4 曲げ圧縮域のストレスブロック

曲げ終局モーメントを算出する方法として曲げ圧縮域にストレスブロックを仮定する方法がある。図-21にストレスブロックの概略を示す。ストレスブロックの幅は測定された圧縮応力分布から求められる重心位置と曲げ圧縮縁位置aとの距離gを2倍した区間としている。瀧口ら<sup>2)</sup>は軸力・曲げ・せん断力を受ける場合のストレスブロックの応力 $\sigma_{\text{max}}$ の大きさはせん断力を受けない場合のものに較べて1.5倍程度になることを報告している。図-22に測定された圧縮応力分布に基づいて算出されるストレスブロックの応力の大きさを表す係数kと測定ステップの関係を示す。kはコンクリートの圧縮強度 $c_B$ に対する $\sigma_{\text{max}}$ の比である。は各サイクルの正負の最大モーメント時で、は試験体の最大抵抗モーメント時である。または繰り返し加力が反転する時である。

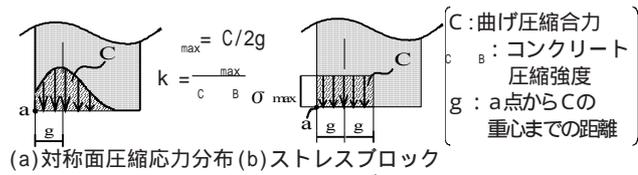


図-21 ストレスブロック概略

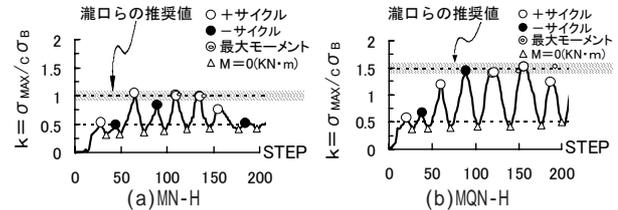


図-22 曲げ圧縮域のストレスブロックの係数k

軸力・曲げだけを受けるNM-Hでは最大モーメント時にkが0.99~1.00となっているのに対して、軸力・曲げ・せん断力を受けるMQN-Hではkが1.42~1.52となっている。これは、外力と柱主筋の内力の釣り合いから間接的に求められた瀧口らの結果を立証するものとなっている。

#### 5. まとめ

- 1)本測定手法は、軸力・曲げ・せん断力を受けるRC柱にも適用できることが確認された。
- 2)軸力と曲げを受ける柱の曲げ圧縮域の圧縮強度は、一軸圧縮だけを受ける柱の断面内の圧縮強度とほぼ同じであるが、軸力と曲げせん断力を受ける柱ではその曲げ圧縮域の圧縮応力が極めて大きくなり、曲げ圧縮縁の圧縮強度はコンクリート圧縮強度の約2倍になる。またその応力分布の勾配も急なものになる。
- 3)本実験により直接、測定された応力分布に基づく曲げ終局時のストレスブロックは瀧口らが間接的に求めたものと一致した。

謝辞：本研究は、平成15年度科学研究費補助金・基盤研究C(代表者：塩屋晋一)を受けて行ないました。

#### 参考文献

- 1)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)
- 2)瀧口克己ほか：偏心圧縮を受けるR/C部材におけるコンクリートの圧縮挙動,日本建築学会構造系論文集, NO.464, 109-118, Oct., 1994