

論文

[2094] 高強度材料を用いた RC 柱の曲げ性能の評価に関する実験的研究

正会員 加藤大介 (新潟大学建設学科)

正会員 ○ 菊池政智 (新潟大学大学院)

1. まえがき

筆者らは高強度材料を用いたシアスパン比2.0の高軸力を受ける柱の実験を行い、主に中子筋により拘束されない中間の主筋を持つ柱部材(帯筋が外周のみのもので以下中子筋なし)の主筋の付着滑りの靱性に及ぼす

影響を検討した [1]。この結果、高軸力により圧縮筋が降伏し、付着長さが学会指針 [2] による評価式より短くなっていることがわかり、このために指針によるすべりの評価とは相反して主筋がすべりを起こしていることが明らかになった。本研究では引き続き、中子筋により拘束された主筋を持つ柱部材(以下中子筋あり)において主筋の滑りが靱性に及ぼす影響を検討することを主な目的に4体(文献 [1] と連続性を持たせ試験体名をNO. 5~NO. 8とした)のRC造柱試験体の静加力実験を行った。

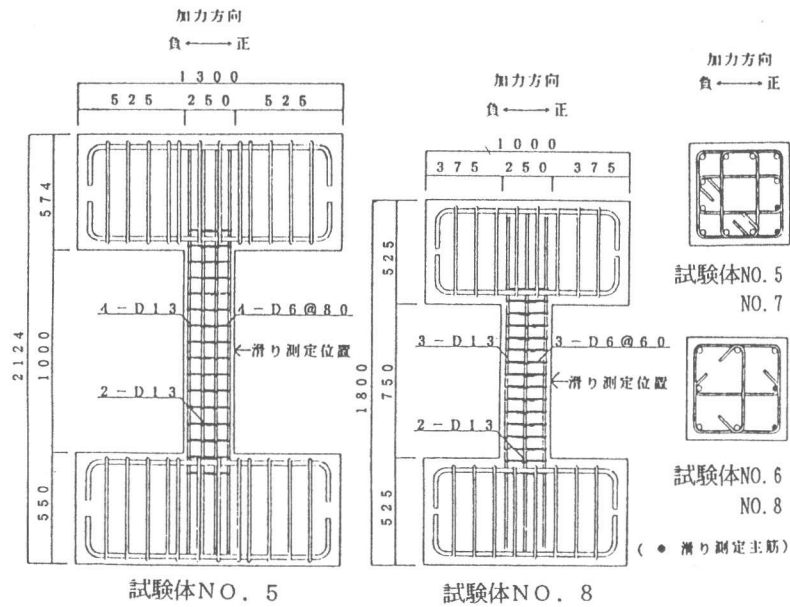


図-1 試験体配筋図

表-2 試験体寸法と配筋の詳細

| | |
|---------------|-----------------------|
| 断面 | D × B = 250mm × 250mm |
| 有効せい | d = 220mm |
| 帯筋の外端長さ(コア長さ) | Dc = 215mm |
| かぶり厚(主筋芯まで) | dc = 30mm |
| 横補強筋の種類(外周) | 閉鎖型溶接帯筋 |
| 副帯筋(NO. 5、7) | 135度フック付き(余長48mm) |
| 中子筋(NO. 6、8) | 135度フック付き(余長48mm) |

表-1 試験体の諸元

| 試験体名 | 柱全高さ(mm) | シアスパン比 | 主筋 | 主筋強度(kg/cm ²) | 帯筋 | 帯筋強度(kg/cm ²) | p _w (%) | 軸力(ton) | 軸力比*2(全断面) |
|------|----------|--------|--------|---------------------------|----------|---------------------------|--------------------|---------|------------|
| 5 | 1000 | 2.0 | 12-D13 | 9813 *1 | 4-D6-@80 | 7753 *1 | 0.64 | 137 | 0.28 |
| 6 | 1000 | 2.0 | 8-D13 | 10180 *1 | 3-D6-@60 | 7753 *1 | 0.64 | 137 | 0.27 |
| 7 | 750 | 1.5 | 12-D16 | 3561 | 4-D6-@80 | 7753 *1 | 0.64 | 88 | 0.20 |
| 8 | 750 | 1.5 | 8-D13 | 6969 *1 | 3-D6-@60 | 7753 *1 | 0.64 | 88 | 0.21 |

(*1) 主筋(D13)と帯筋の強度は残留歪が0.2%の点の応力度とした

(*2) 軸力比 : 軸力を全断面積とコンクリート強度の積で除したもの

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は、主筋の径と強度、主筋と中子筋の配置、シアスパン比、および、軸力比をパラメータとした。表-1に試験体諸元を、表-2に試験体の寸法と配筋詳細を示す。試験体NO.5は文献 [1] の試験体NO.2（無拘束の中間主筋が2本で付着滑りで靱性が決定したもの）を原型とし、中子筋を用いて帯筋比を同一にしたものである。市之瀬らの実験 [3] では中子筋ありの主筋の付着強度は学会指針の式の約1.4倍であると報告されているので、この結果を取り入れた付着指標を1前後とした。試験体NO.6は試験体NO.5において、帯筋比を同一とし、曲げ強度をほぼ同程度にして主筋の強度と配置を変化させたものである。一方、付着性状はシアスパン比に大きく影響されるので、試験体NO.7とNO.8はシアスパン比を1.5とした。帯筋比はNO.5,6と同一とし主筋の強度と配置を変化させた。すなわち、試験体NO.7は低強度のD16主筋を12本用い、試験体NO.8は曲げ強度がほぼ同程度になるように高強度のD13主筋を8本用いた。

図-1に試験体NO.5,8の配筋図と各試験体の断面の配筋を示す。表-3,4に鉄筋とコンクリートの性質を示す。なお、D16以外の鉄筋は明確な降伏点が見られなかったので0.2%残留歪の点の応力度を降伏応力度とした。また、曲げ解析などをする際に降伏点以後の勾配が重要となるので、降伏点と歪

表-3 鉄筋の強度と降伏後の剛性

| 鉄筋種類 (試験体) | 降伏応力度 (kg/cm ²) | 降伏歪度 (micro) | 降伏後の ヤング係数 (t/cm ²) |
|---------------|--------------------------------|-----------------|---------------------------------------|
| D6 (全) | 7753 | 3692 | 100 |
| D13(NO.5) | 9813 | 4673 | 245 |
| D13(NO.6) | 10180 | 4848 | 54 |
| D16(NO.7) | 3561 | 1696 | 0 |
| D13(NO.8) | 6969 | 3319 | 78 |

表-4 コンクリートの強度と剛性

| 試験体 | 最大応力度 (kg/cm ²) | 最大応力 度時歪度 (micro) | ヤング係数 (1/3σ _s) (t/cm ²) |
|------|--------------------------------|-------------------------|---|
| NO.5 | 798 | 2772 | 378 |
| NO.6 | 806 | 2965 | 371 |
| NO.7 | 700 | 2548 | 414 |
| NO.8 | 668 | 2852 | 345 |
| 基礎部分 | 316 | - | - |

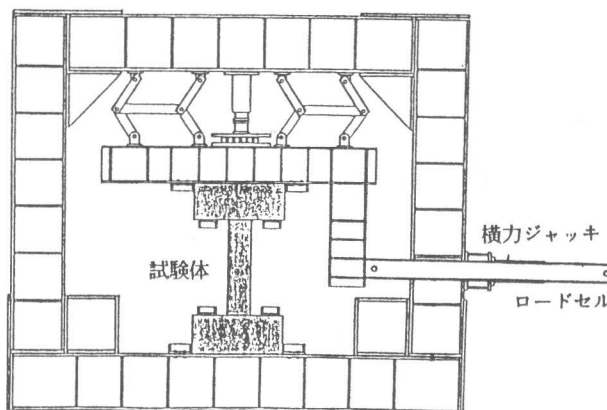


図-2 加力装置図 (NO.7,8)

表-5 試験体の性能計算値一覧

| 試験体名 | (#1) | (#1) | (#2) | (#3) | (#4) | (#5) | 内側主筋 | | 外側主筋 | |
|------|----------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------------|--|---|--|---|
| | 最大強度 (tonf) | 最大強度 時部材角 (rad) | R _p (rad) | R _f (rad) | R _s (rad) | τ _f /τ _{bu} | (#6) τ _{bu} ' (kg/cm ²) | (#7) τ _f ' (kg/cm ²) (τ _f '/τ _{bu} ') | (#6) τ _{bu} ' (kg/cm ²) | (#7) τ _f ' (kg/cm ²) (τ _f '/τ _{bu} ') |
| 5 | 47.4 | 0.021 | 0.022 | 0.043 | 0.016 | 1.04 | 117 | 106 (0.91) | 104 | 106 (1.02) |
| 6 | 40.3 | 0.022 | 0.024 | 0.033 | 0.055 | 0.82 | 155 | 111 (0.72) | 139 | 111 (0.80) |
| 7 | 44.7 | 0.022 | 0.016 | 0.046 | 0.038 | 0.89 | 89 | 72 (0.81) | 80 | 72 (0.90) |
| 8 | 38.9 | 0.023 | 0.020 | 0.034 | 0.034 | 0.91 | 141 | 116 (0.82) | 126 | 116 (0.92) |

(#1) : 文献 [4] の平面保持解析による

(#2) R_p : 学会指針 [2] のせん断強度式より逆算した降伏ヒンジ領域の回転角

(#3) R_f : 文献 [4] の方法を用いた曲げ限界部材角

(#4) R_s : 付着指標より推定した付着割裂すべりを生じる部材角 (文献 [1])

(#5) τ_f/τ_{bu} : 学会指針 [2] による設計用付着指標 (τ_{bu}は解説の精算式の全主筋の平均値)

(#6) τ_{bu}' : 学会指針 [2] の精算式(解説)による付着強度で該当する引張主筋のものに中子筋の効果を考慮して1.4倍したもの

(#7) τ_f' : τ_fの有効付着長さを軸力レベルにより変化した付着応力度 (文献 [1])

度が15000 μ の点を結ぶ直線の傾きを降伏後のヤング係数として表-3に示した。表-5に試験体の性能計算値一覧表を示す。欄2~4には学会指針による保証回転角に弾性変形分を加えたRp、配筋詳細を考慮したコンクリートモデルに基づいた曲げ限界部材角Rf [4]、付着滑りで靱性が決まる場合の部材角Rs [1]を示した。ただし、Rs算出の際の付着強度は中子筋のあるものは学会指針式の1.4倍とした。欄5~7には付着指標算出のもとになる付着強度と付着応力度も示した。

2.2 荷重方法と計測方法

試験体NO.5,6の加力装置は文献 [1] と同一である。本加力装置は軸力用の加力ヘッドと加力上梁との間のテフロン支承 (1000t用、受圧面積1000cm²) により滑りが生じ、その摩擦が無視できないので、文献 [1] と同様の手法で修正した。なお、最大摩擦力は2.7tonとし、その時の滑りは1.5mmとした。図-2は試験体NO.7,8の加力装置図である。測定された横力はP- Δ 効果を考慮して修正した。すなわち、本報告では以降危険断面でのモーメントを軸力の効果も考慮して算出し、そのモーメントを2倍して高さで除したものを横力と呼ぶ。

荷重履歴は部材角で $\pm 0.005, \pm 0.01, \pm 0.015, \pm 0.02, \pm 0.03, \pm 0.04$ radを2回づつとした。測定は、水平変形、軸方向変形の絶対変形その他、曲げ変形成分を計算するための柱軸方向に6領域に分割された領域での曲率、および、せん断変形を測定した。なお、せん断変形は柱の上下のヒンジゾーン(25cm)において縦、横、斜め方向をそれぞれ2方向づつ測定して求めた。さらに、主筋が滑ることが予想されるため、図-1に示すように内側と外側の主筋(加力方向に対して直交方向の主筋)の高さ方向の中央でのコンクリートと主筋の相対変形(主筋の滑り量と考える)を測定した。この他に、主筋と帯筋の歪を測定した。

3 試験体の復元力特性と破壊性状

図-3(a)~(d)に各試験体の水平変形を横軸にとり、縦軸に水平荷重、軸方向変形、および、主

表-6 実験結果一覧1 (ひび割れと主筋の降伏)

| 試験体 | 曲げひびわれ発生部材角 (rad) | 曲げせん断ひびわれ発生部材角 (rad) | せん断ひびわれ発生部材角 (rad) | 付着割裂ひびわれ発生部材角 (rad) | コンクリート圧壊発生部材角 (rad) | 主筋引張降伏部材角 (rad) | 主筋圧縮降伏部材角 (rad) |
|-----|-------------------|----------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-----------------|-----------------|
| 5 | 0.002 | 0.007 | 0.010 | 0.020 | -0.010 | - | -0.020 |
| 6 | 0.005 | -0.005 | 0.010 | 0.020 | 0.015 | 0.020 | -0.020 |
| 7 | 0.002 | 0.004 | 0.004 | - | -0.010 | 0.006 | -0.004 |
| 8 | 0.004 | 0.005 | 0.005 | 0.020 | 0.013 | 0.009 | -0.015 |

表-7 実験結果一覧2 (強度と靱性)

| 試験体 | 最大耐力 (ton) | | 最大耐力時部材角 (rad) | | 限界部材角1 (rad) *1 | 限界部材角2 (rad) *2 | | すべり開始部材角 (rad) *3 | 主筋最大付着応力度(kg/cm ²) *4 | |
|-----|------------|-------|----------------|--------|-----------------|-----------------|--------|-------------------|-----------------------------------|------|
| | 正加力 | 負加力 | 正加力 | 負加力 | | 正加力 | 負加力 | | 内側 | 外側 |
| 5 | 39.3 | -39.2 | 0.020 | -0.020 | 0.020 | 0.030 | -0.030 | 0.024 | 74.1 | 52.9 |
| 6 | 36.5 | -36.1 | 0.020 | -0.020 | 0.020 | 0.030 | -0.030 | 0.030 | 88.0 | 67.9 |
| 7 | 43.9 | -44.1 | 0.015 | -0.015 | 0.020 | 0.030 | - | - | - | - |
| 8 | 38.7 | -39.6 | 0.015 | -0.015 | 0.020 | 0.030 | -0.030 | 0.020 | 130.6 | 97.1 |

(*1)限界部材角1 : 正負の繰り返しにより耐力があまり低下しないサイクルの部材角 (1回目に最大耐力の80%以上の耐力があり、2回目の繰り返しで1回目の80%以上の耐力を維持していることを目安にした)

(*2)限界部材角2 : 包絡線において最大耐力の80%の低下点

(*3)すべり開始部材角 : 繰り返しにより大きくすべりだした時のサイクルの部材角

(*4)主筋最大付着応力度 : 柱主筋 (内側・外側) の上下のヒンジ領域 (各25cm) を除いた区間での付着応力度の最大値 (主筋の歪度のデータより算出)

筋の滑り量をとって示す。主筋のすべりは内側と外側の両方を示した。また、図-4に各試験体の最大耐力時と終局時でのひび割れ図を示す。さらに、表-6の実験結果の一覧表1に曲げひび割れなどのひび割れ状況および鉄筋の降伏状況を示す。なお、主筋は試験体NO.5の引張主筋以外はすべて降伏している。

試験体NO.5,6,8は、部材角0.030radの繰り返しで主筋に沿う付着ひび割れが顕著となり、以降耐力は最大耐力の約半分程度に低下したが、軸力は負担し、典型的な付着破壊の性状を示した。一方、試験体NO.7は部材角0.040radへの载荷途中に急激に耐力が低下し、加力終了となった。しかし、図-3をみて分かるように、軸変形は進んでおらず、曲げ降伏後のせん断破壊と判断できる。

4. 主筋の滑り

図-3の水平変形-主筋の滑り関係において滑り量が明らかに塑性変形を生じ始めた点を滑り開始点として○をつけた。試験体に滑りが生じるまでは荷重-変形関係は健全であるが、滑り開始とは

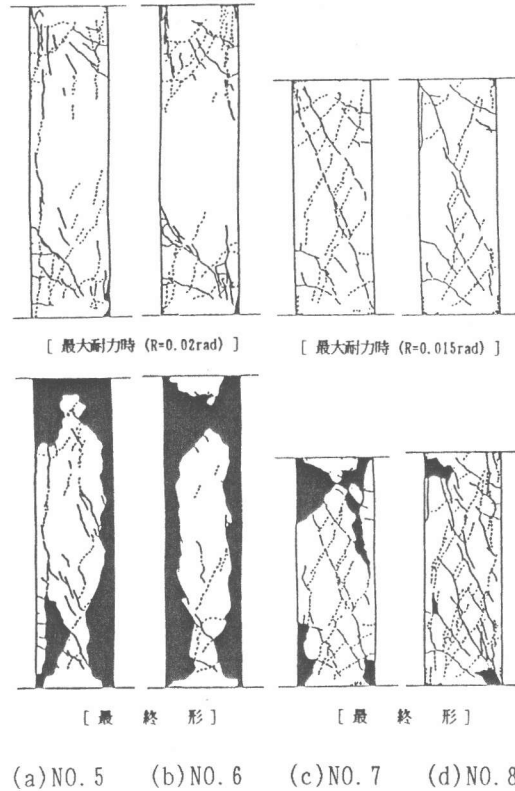


図-4 試験体のひび割れ図

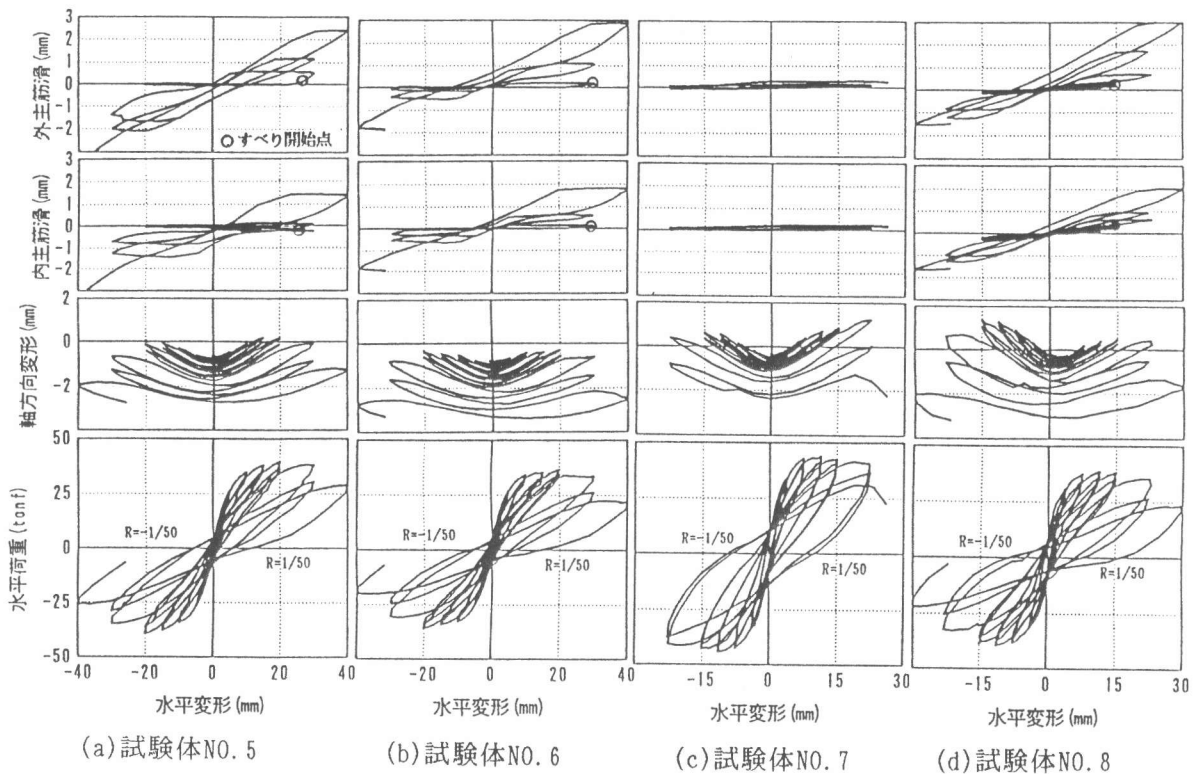


図-3 試験体の水平変形と水平荷重、軸方向変形、主筋の滑りの関係

ば同時に耐力が低下していくことが分かる。また、外側と内側の主筋の滑りがほぼ同時に開始されている。

図-5(a)~(h)に各試験体の主筋の滑り量と付着応力度との関係を示した。付着応力度は滑りを測定している主筋と同じ応力を受ける主筋に添付した歪ゲージの値から求めた。ただし、付着長さは上下の両端から柱せいDを減じた長さとした。試験体NO.7,8は付着応力度がほぼ主筋降伏時の応力(表-5の $\tau f'$)に達しているのに対し、試験体NO.5はかなり低レベルで滑りを生じている。また、試験体NO.7では付着応力度が付着強度に達しているにも関わらず、滑りが生じておらず、学会指針の付着強度式は高強度の主筋に対して高めに評価していることが推測される。さらに、内側主筋は外側主筋に比べ高い付着応力度を示しており、内側主筋は外側主筋に比べ付着強度は高いが、作用応力度も高いために結果としてほぼ同時に滑りが生じていることが分かる。

図-6は内側の主筋の応力度の分布である。主筋に添付した歪ゲージのデータによると、NO.5のみ降伏が認められなかったが、この主筋が圧縮降伏していない試験体NO.5以外では、圧縮降伏あるいは降伏レベルに達している部分で付着力が作用していない様子が分かり、文献[1]での付着応力度の評価法の妥当性が認められる。

5. 試験体の強度と靱性

表-7の実験結果の一覧2に試験体の最大耐力と限界部材角を示す。限界部材角は注(*1, 2)に示すように2通りの判断基準により評価した。すなわち、安定したサイクルの部材角(限界部材角1)と包絡線上で最大耐力の80%以下となる部材角(限界部材角2)である。最大耐力を表-5の計算値と比較すると試験体NO.5では計算値の方が大きく上回り、試験体NO.7,8では計算値と実験値が同程度となった。これは、主筋強度と付着指標が高い試験体NO.5では実

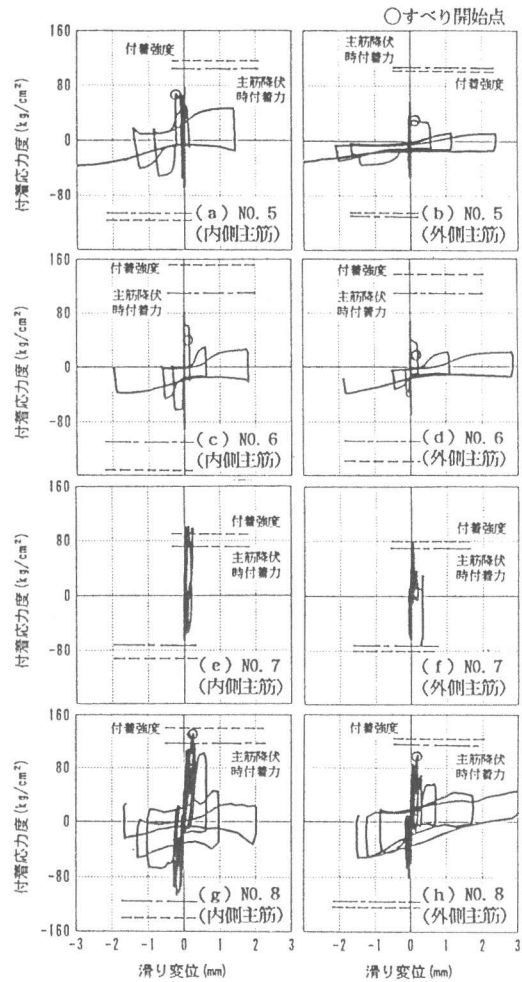


図-5 主筋の滑り変位-付着応力度関係

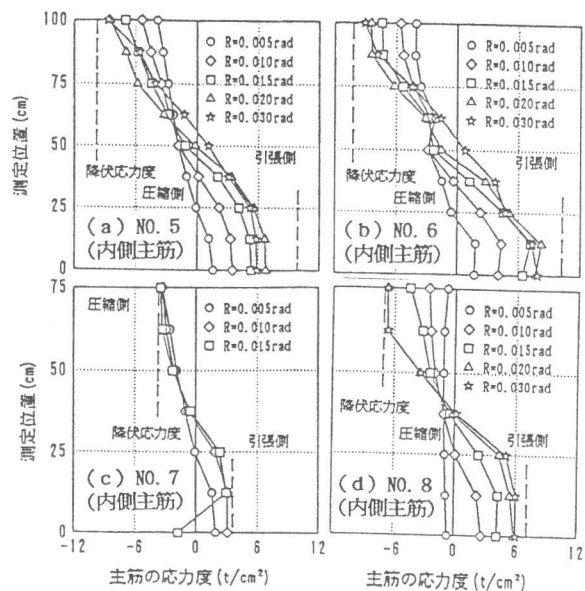


図-6 主筋の応力度分布(内側主筋)

験では引張降伏していないが、高強度主筋に対する付着強度式が高めの値を与えるために、計算上主筋が付着降伏してしまうことによる。

一方、限界部材角を表-5の計算値と比較すると、試験体N0.5,7では靱性決定要因が計算値で判断できたが、試験体N0.5の R_s は実験値よりかなり小さい評価となった。これは、4.章で述べたように主筋が降伏しないときにはこの評価法は付着応力度を高く、すなわち、安全側に評価してしまうからである。また、試験体N0.6,8では R_s が現実よりも大きく評価されており、中子筋のある場合の R_s の評価法は文献[1]の方法を修正する必要があることが分かる。

6. まとめ

高強度材料を用いたRC造柱試験体4体の加力実験を行い、中子筋に拘束された主筋の付着性状が靱性に及ぼす影響を評価した。その結果、主な結論として以下の点が挙げられた。

- (1)内側の主筋は外側の主筋に比べ付着強度および作用付着応力度ともに高いが、滑り開始点はほぼ同時である。
- (2)文献[1]で報告した付着応力度評価法は、主筋が降伏する場合には中子筋がある場合も有効であるが、主筋強度が高く降伏しない場合には大きく評価する可能性がある（設計式としては安全側）。
- (3)本報告で用いた付着強度設計式は主筋強度が高いときに付着強度を高く評価し、中子筋がある場合には低く評価している。
- (4)従って、付着破壊で靱性が決まる計算値 R_s は、中子筋がある場合や主筋強度が高い場合の付着強度の評価法に問題があり、さらに検討が必要である。また、主筋強度と付着指標が高い場合の曲げ強度を平面保持解析で求める場合には、計算値が実験値を大きく評価する危険がある（設計としては危険側）。

[謝辞]

本研究は、建設省総プロNew RC（委員長青山博之東大教授）の一環として行った。一部の試験体の加力は東京大学工学部総合試験所大型構造物実験室で行った。実験に当り東京大学工学部建築学科・青山博之教授、同・小谷俊介助教授、同・細川洋治助手にご指導・ご援助をいただき、また、日比純一氏をはじめ青山・小谷研究室諸兄には多大なるご協力をいただきました。実験の遂行およびデータ整理には新潟大学卒論生・新保孝之氏（現三井建設）および西口勝氏（現大成建設）の協力をいただいた。ここに関係各位に謝意を表します。

[参考文献]

- 1)加藤大介：高強度材料を用いたRC柱の曲げ性能の評価に関する実験的研究、第13回コンクリート工学年次論文報告集、1991年、pp.415-420
- 2)日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、1990年
- 3)市之瀬敏勝、横尾慎一、南宏一：付着割裂強度に及ぼす主筋本数と横補強筋の効果、第13回コンクリート工学年次論文報告集、1991年、pp.157-162
- 4)加藤大介：高強度材料を用いたRC柱の靱性能、第14回コンクリート工学年次論文報告集、1992年、投稿中