

論文

[2072] RC造角柱の主筋の座屈性状の評価に関する研究

正会員 加藤大介 (新潟大学工学部)

正会員 ○金谷淳二 (新潟大学大学院)

1. 序

RC造部材の曲げ挙動を解明する際には、主筋の特にその圧縮を受ける場合の座屈挙動を適切に評価することが重要となる。一方、従来のRC造関係の研究では主筋の座屈を点として捉える傾向があり、座屈後の挙動も含めた主筋の応力度-歪度関係の研究はあまり多くない。本研究の目的は、帯筋により拘束された主筋の軸方向応力度-歪度関係を単純なモデルで表現することであり、特に、主筋の性質以外に拘束帯筋の量と間隔を重要な因子と考えた。

2. 実験概要

表1に試験体の諸元および使用した鉄筋とコンクリートの性質を示す。試験体は15cmx15cmx53cmの直方体で、主筋径、帯筋径、帯筋間隔、および中間主筋の有無をパラメータとした3シリーズの計16体である。シリーズ1は帯筋間隔(93mm)と2区間以上での座屈を防止するのに充分な帯筋(D10)を一定にして、主筋が帯筋間隔の一区内のみで座屈する場合(以下一区間座屈と呼ぶ)の挙動を把握するものであり、主筋径をパラメータとした。シリーズ2は主筋径(D13)と帯筋径(ϕ 4)を一定にして、帯筋間隔をパラメータにして帯筋間隔の複数区間で座屈する場合(以下多区間座屈と呼ぶ)の挙動を把握するものである。シリーズ3はシリーズ2と同様の多区間座屈シリーズであるが、帯筋径をD6とした。また、比較のため、シリーズ毎に主筋のない試験体を1体計画した(施工上最小限の主筋が必要なため主筋 ϕ

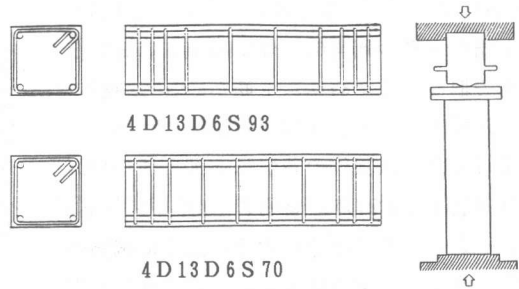


図1 配筋図

図2 加力図

表1 試験体の諸元と実験結果

シリーズ	番号	試験体名	主筋径と形状	帯筋径と形状	ピッチ(mm)	全断面帯筋比Pw(%)	コア内体積比 ρ (%)	主筋降伏応力度 σ_y (t/cm ²)	主筋破断応力度 σ_m (t/cm ²)	帯筋降伏応力度 σ_{wy} (t/cm ²)	σ_B (kg/cm ²)	最大耐力(ton)	最大軸応力度(kg/cm ²)	最大軸歪(micro)
1	1	4D19D10S93	4-D19	2-D10	93	1.02	2.18	3.62	5.44	3.58	231	89.9	399	3412
	2	4D13D10S93	4-D13	2-D10	93	1.02	2.18	3.85	5.56	3.58	231	67.2	299	3112
	3	4D10D10S93	4-D10	2-D10	93	1.02	2.18	3.58	4.96	3.58	231	62.1	276	2704
	4	4R4 D10S93	4-R4	2-D10	93	1.02	2.18	4.23	4.52	3.58	231	50.7	226	2397
2	5	4D13R4S47	4-D13	2-R4	47	0.37	0.79	3.85	5.56	4.23	233	-	-	-
	6	4D13R4S35	4-D13	2-R4	35	0.50	1.06	3.85	5.56	4.23	233	64.1	285	4205
	7	4D13R4S23	4-D13	2-R4	23	0.75	1.62	3.85	5.56	4.23	233	70.9	315	4709
	8	4R4 R4S47	4-R4	2-R4	47	0.37	0.79	4.23	4.52	4.23	233	51.1	227	2501
3	9	4D13D6S93	4-D13	2-D6	93	0.46	0.98	3.85	5.56	3.54	225	63.7	283	3206
	10	4D13D6S70	4-D13	2-D6	70	0.61	1.31	3.85	5.56	3.54	225	64.5	287	2902
	11	4D13D6S47	4-D13	2-D6	47	0.91	1.95	3.85	5.56	3.54	225	74.0	329	6614
	12	4D13D6S35	4-D13	2-D6	35	1.22	2.61	3.85	5.56	3.54	225	74.6	332	7209
	13	4D13D6S23	4-D13	2-D6	23	1.86	3.98	3.85	5.56	3.54	185	88.1	391	35003
	14	8D13D6S47	8-D13	2-D6	47	0.91	1.95	3.85	5.56	3.54	185	93.7	417	4608
	15	4R4 D6S47	4-R4	2-D6	47	0.91	1.95	4.23	4.52	3.54	185	54.6	243	3221
	16	PC	-	-	-	-	-	-	-	-	185	40.2	179	1806

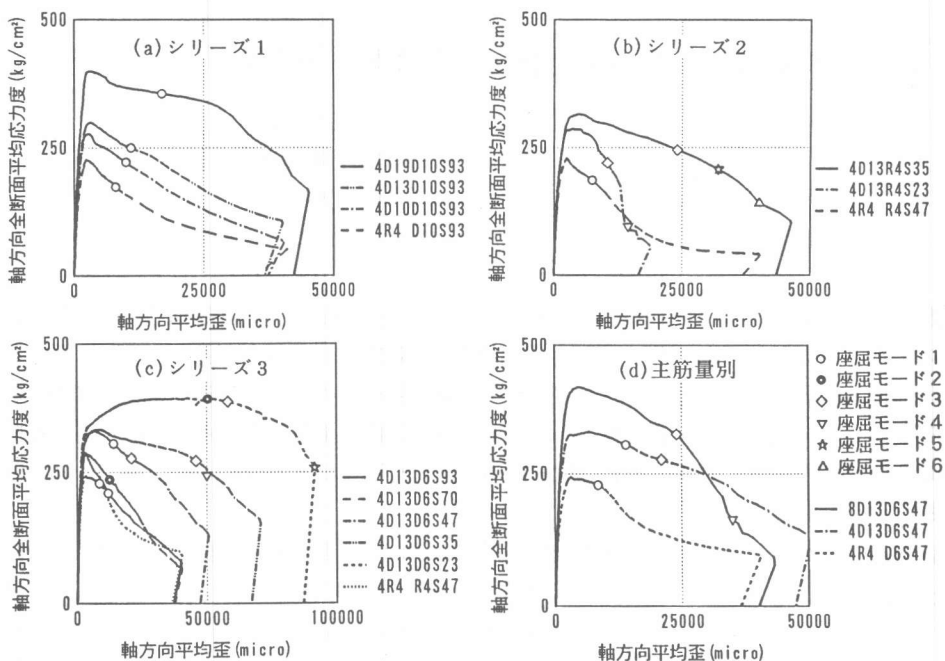


図3 軸方向応力度-軸歪度関係

4を配筋している)。さらに、シリーズ3において、主筋が帯筋の隅角部以外で拘束される場合の挙動を把握するために、主筋が8本の試験体（帯筋は外周のみ）と、無拘束試験体についても実験を行った。試験体の名前は、例えば4D19D10S93は主筋にD19を4本、帯筋にD10を用い帯筋間隔を93mmとしたものを意味する。図1に試験体の配筋例を示す。加力は図2に示すように一端固定他端ピンの一方向中心軸圧縮加力を行った。軸方向の変形は、測定区間（約35cm）を試験体側面に取り付けた4本の変位計で測定し、さらに測定区間内の主筋、帯筋、および試験体表面に歪みゲージを添付し測定した。

3. 実験結果

表1の後半に最大耐力、その時の断面全体の軸方向応力度、測定全区間の平均軸歪度の実験値を示す。図3(a)~(c)に試験体の軸方向全断面平均応

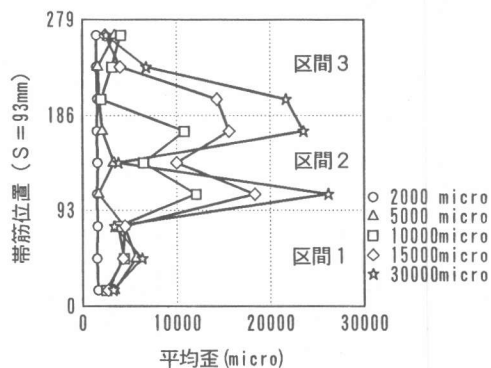
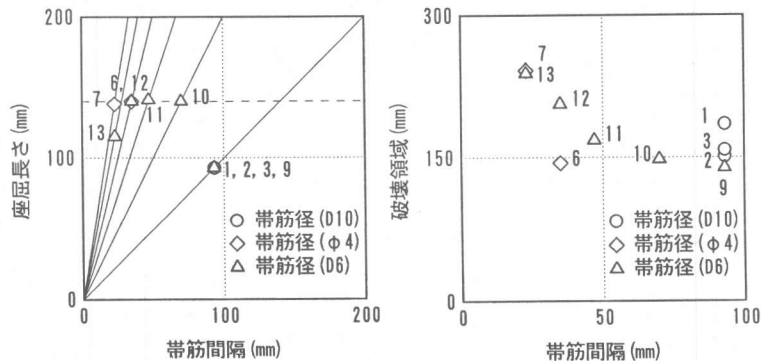


図4 主筋の平均歪の軸方向分布 (試験体4D19D10S93)



(a)座屈長さ-帯筋間隔の関係 (b)破壊領域-帯筋間隔の関係
図3 破壊領域と座屈長さ

力度－測定区間の平均軸歪度の関係をシリーズ別に示す。また、図3(d)に主筋が4本のもの
と8本のものとの比較を示す。同図中に隅角部の4本の主筋において座屈が初めて観察された点に座
屈モード別に記号を分けて示した。ここで、座屈モードとは帯筋間隔Sを1区間として座屈した
長さを区間数で表したものであり、実験中目視によって判断した。なお、試験体No. 5の4D13R4S
47は配筋・打設に失敗したため以後の結果は省略する。試験体No. 6の4D13R4S35については、最大
耐力後一旦除荷し再加力を行っているがこの部分は除去して示した。

シリーズ1の1区間座屈シリーズはすべてモード1で座屈している。シリーズ2, 3では先ず
モード1の座屈が確認された後、順次多モードへ変化している。また、シリーズ3では帯筋間隔
が短くなるにつれて最終座屈モードが大きくなる傾向が明瞭に認められる。モード1で座屈した
試験体4D19D10S93の主筋の各点に2枚づつ添付した歪ゲージの平均歪の軸方向分布を図4に示す。
図では区間2の主筋の平均歪度が軸歪10000microで増加しており、それ以降は区間2の中央の平均
歪度が上下に比べ減少していることが分かる。これは区間2の中央の主筋に添付した歪ゲージの
片側が引張側に反転したためと考えられ、区間2でのモード1の座屈を裏付けている。また、目
視による座屈点とはほぼ対応しているが、目視の方がやや遅れている。図5(a)(b)は最終的な座屈
長さ(座屈モード×帯筋間隔)と各面3箇所測定した試験体軸方向の剝落長さの試験体での平均
を、それぞれ横軸に帯筋間隔をとって示したものである。同図(a)には断面コア長さ14cmを破線
で、また、座屈長さを帯筋長さのn倍とした場合の関係を実線(実線の下からn=1, 2, …)で示
しているが、本実験パラメータの範囲では座屈長さは帯筋間隔の倍数でかつコア長さを上限にし
て決まっていることがわかる。座屈長さは帯筋径が大きくなればコア長さに関係なくコア長さ以下
で決まることが想像されるので、さらに検討が必要である。一方、破壊長さは帯筋間隔が短くな
ると長くなる傾向が認められた。また破壊長さの平均は17.9cmであった。

図3(d)では中間主筋の影響が評価できるが、試験体8D13D6S47は終局時に主筋のはらみによる
帯筋のフックのはずれが生じ、結果として耐力が試験体4D13D6S47より低くなった。これは、主
筋量が増加したためのはらみ出す力も増加した結果であると考えられる。

4. 実験結果の整理

各試験体の内下記の方法により主筋の負担軸力が推定できるものについては負担軸力を抽出し、
後述する主筋の応力度－歪度のモデルと比較する。また、それ以外の主筋の負担を抽出できない
ものについては試験体としての破壊領域内での平均軸歪度を推定し、同モデルを用いて算出した
試験体の荷重－歪度の計算値と比較する。

主筋の負担分の抽出は、同シリーズ内の主筋無し試験体のうち、各試験体と帯筋径、帯筋間
隔が同一の場合、その耐力を差し引くことによりその差を試験体耐力の主筋負担分とした。シリ
ーズ1ではNa1～Na3よりNa4を差し引き、シリーズ3ではNa11よりNa15を差し引いた。座屈した
区間での軸歪の抽出は、測定全長のうち座屈した区間以外の軸歪度は座屈した区間以外の主筋に
添付した歪ゲージの値の平均であると仮定して求めた。例えば、試験体No. 1の場合には図4の区
間1, 3の計6点の軸歪の平均が座屈領域以外の軸歪の推定値となる。なお、この方法は主筋の種類
に係わらずコンクリート部分の挙動は不変であるとの仮定をしていることになる。シリーズ1は
帯筋が充分強く主筋の種類に係わらず同程度の拘束をコンクリートに与えるため、この仮定は正
しいと考えられる。一方、試験体No. 11の場合には多区間座屈のために帯筋による拘束力が一旦
主筋を介して他所から加わるためこの仮定は正しくないが、全拘束力が同程度であることも考え
あわせ比較のため抽出を行った。図6に試験体4D19D10S93の修正例を示す。

次に、主筋の挙動を抽出できないものについては文献1)と同様の手法により破壊領域内での平均軸歪度を推定した。すなわち、軸方向歪の試験体軸に沿う分布は最大耐力までは均一とし、最大耐力後は破壊領域を想定し破壊領域外では除荷されるとして、破壊領域の軸歪を推定した。なお、除荷剛性は主筋とコンクリートを含め試験体の最大耐力の1/3点の割線剛性とした。また、破壊領域の長さは全試験体の破壊領域の平均値とした。

5. 主筋の軸方向応力度-歪度関係のモデル化

本論文では、帯筋により拘束された主筋の軸方向応力度-歪度関係を単純なモデルで表現することを試みた。モデルの概念図を図7(a)~(c)に示す。まず、図7(c)の実線のように座屈は主筋が歪硬化域までは生じないとした。次に、ある座屈モード(N_B とおく)を仮定する。図7(a)(b)は $N_B=3$ の例であり、座屈長さは帯筋間隔 S を用いて $N_B \cdot S$ であるが、このとき中間の帯筋を無視してその時の除荷剛性を考慮した瞬間剛性 E_r を用いて求めたオイラー座屈応力度がそのときの座屈を無視した主筋の応力度より小さい場合、その点をその座屈モードの潜在座屈開始点とする。図7(c)では◎点と○点がモード1, 2の潜在座屈開始点である。なお、瞬間剛性 E_r は古典的

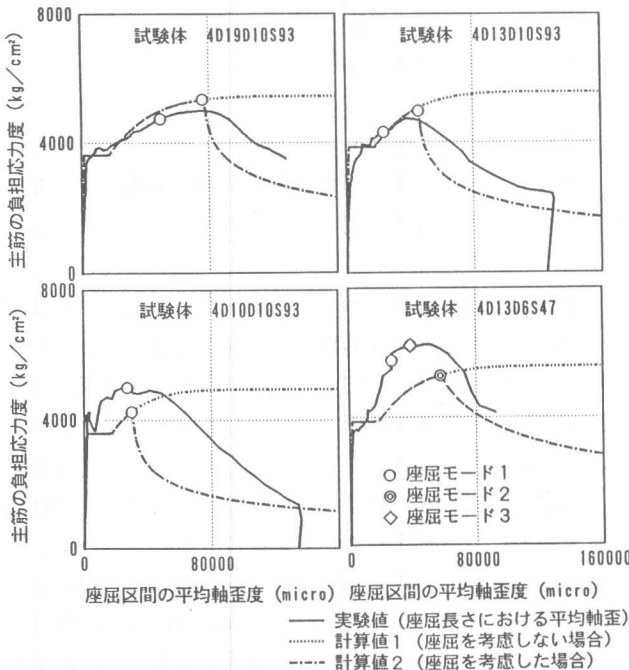


図9 主筋応力度-歪関係の実験値と計算値の比較

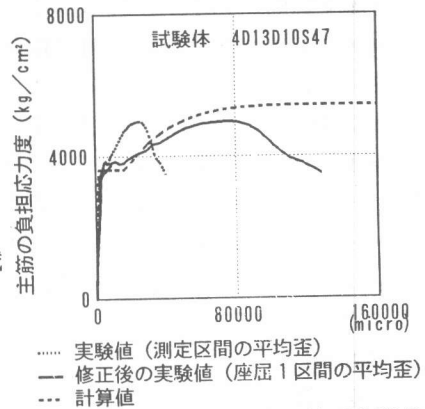
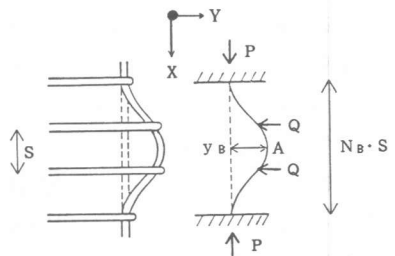
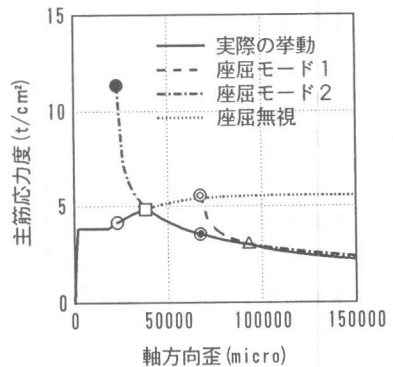


図6 主筋の負担応力度-軸歪度関係の修正例



(a) 3区間座屈例 (b) 主筋座屈モデル



(c) 解析例
図7 解析概念図と解析例

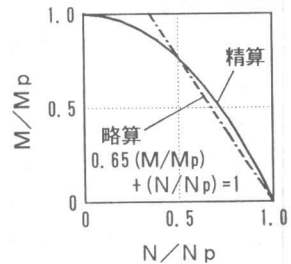


図8 主筋のM-N関係のモデル化

Double Modulus Theory を用いた文献2)に従い、また、実際の挙動に係わらず E_r 算定用の接線剛性は後述の式(1)により求める。次に、後述する中間筋を考慮した軸応力度-はらみによる軸歪度関係を描いたものが図7(c)の破線と一点鎖線である。結果として、座屈を無視した応力度-歪度関係と可能な座屈モードによる応力度-歪度関係の最小値が実際の挙動となる。なお、可能な最大座屈モード N_B は座屈長さがコア長さ未満となる N_B とした。図7(c)では□点でモード2の座屈が始まり、△点でモード1の座屈に移行したことになり、実際の挙動は実線で示したものととなる。

座屈が無い場合の主筋の圧縮方向の軸方向応力度 σ - 歪度 ε 関係は以下の式で与える。なお、符号は圧縮を正とする。

$$\begin{aligned} \sigma &= E_s \cdot \varepsilon & (\leq \sigma_y) & & (0 \leq \varepsilon < \varepsilon_{st}) \\ &= [1 - \{1 - (\varepsilon - \varepsilon_{st}) / (\varepsilon_m - \varepsilon_{st})\}^n] \cdot (\sigma_m - \sigma_y) + \sigma_y & & & (\varepsilon_{st} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_m) \end{aligned} \quad (1)$$

$$(n = E_t \cdot (\varepsilon_m - \varepsilon_{st}) / (\sigma_m - \sigma_y))$$

ここで、 E_s は鉄筋ヤング係数、 σ_y は主筋降伏応力度、 ε_y は主筋降伏歪度 ($= \sigma_y / E_s$)、 ε_{st} は歪硬化開始時主筋歪度 ($= 10 \cdot \varepsilon_y$)、 σ_m は主筋破断時応力度、 ε_m は主筋破断時歪度 ($= 10 \cdot \varepsilon_{st}$)、 E_t は歪硬化開始時鉄筋ヤング係数 ($= E_s / 30$)、である。

次に座屈による軸歪度であるが、図7(b)のようにはらみ曲線を正弦波とするとその変形による軸方向の縮み量 δ_B と歪度 ε_B は以下の式で近似できる。

$$\begin{aligned} \delta_B &= \int_0^l d\delta = \int_0^l 1/2 \cdot (dy/dx)^2 dx \\ \varepsilon_B &= \delta_B / l = ((\pi \cdot y_0) / (4 \cdot l))^2 \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、

$$y = y_0 \cdot \sin(\pi \cdot l / 2 \cdot x)$$

y_0 : 1 端固定他端自由支持の横変位で図7(b)では $y_0 = y_B / 2$

l : 1 端固定他端自由支持の座屈長さで図7(b)では $l = N_B \cdot S / 4$

最後に、軸方向応力度であるが、まず、鉄筋の終局時の軸力-モーメント関係を、

$$\begin{aligned} a x \cdot (M / M_p) + (N / N_p) &= 1 & (a x = 0.65, \text{適用範囲: } N > 0.5 \cdot N_p) & \quad (3) \\ N_p &= a h \cdot \sigma_m = \pi \cdot \phi h^2 / 4 & (a h: \text{主筋断面積}) \\ M_p &= 1/6 \cdot \phi h^3 \cdot \sigma_m & (\phi h: \text{主筋径}) \end{aligned}$$

と近似する。これは $N-M$ 曲線の $N = 0.5 \cdot N_p$ の点と $N = N_p$ の点を結んだ直線である。図8は $N-M$ 曲線の精算値と略算値を比較したものであるが、 $N > 0.5 \cdot N_p$ の範囲では十分に適用可能である。また、鉄筋の応力度は破断時の σ_m を用いた。また、図7(b)のA点のモーメント M_A は、鉛直荷重 P と各帯筋位置における横力 Q が両端固定の柱に加わっているとして、

$$M_A = P \cdot y_B / 2 - 1/24 \cdot Q \cdot S \cdot f(N_B) \quad (4)$$

$$Q = a w_e \cdot \sigma_{wy}, \quad f(N_B) = \begin{cases} N_B^2 - 1 & N_B: \text{奇数} \\ N_B^2 + 2 & N_B: \text{偶数} \end{cases}$$

で求められる。ここで、 $a w_e$ は有効帯筋断面積で1本の帯筋断面積 $a w$ とし、 σ_{wy} は帯筋降伏応力度である。このモーメントと軸力が式(3)を満たしているとし、さらに式(2)を用いて、

$$\frac{P}{N_p} = \frac{2 \cdot (\phi h / S)}{3 \cdot N_B \cdot a x \cdot \sqrt{(\varepsilon_B) + 2 \cdot (\phi h / S)}} \cdot \left\{ 1 + \frac{\pi \cdot a x \cdot f(N_B)}{16 \cdot (\phi h / S)} \cdot \frac{a w_e}{a h} \cdot \frac{\sigma_{wy}}{\sigma_y} \right\} \quad (5)$$

を得る。図7(c)の破線と一点鎖線は、潜在座屈開始点の座屈による歪度 ε_B を0とし、座屈モード1で $f(1) = 0$ を、モード2で $f(2) = 6$ を用いて、式(5)を描いたものである。

6. 評価結果

図9はシリーズ1の実験結果から、座屈した一区間について抽出した主筋の応力度-歪度関係をモデルと比較したものである。モデルは座屈を無視した応力度-歪度関係と、図7に示した解析概念図の実線部分のみを示しているが、試験体4D13D6S47以外はモード1により応力度が決定されている。また、座屈点について、図3と同様に最初を目視判断により確認されたモード別の座屈点と、モデルの座屈点を同図中に記載する。モデルは試験体4D10D10S93で過小評価しているが、他の試験体ではほぼ推定している。また、多区間座屈試験体の4D13D6S47でも座屈モードは実験で1から3となっているのに対し、モデルでは2となり、概ね対応している。

図10に主筋の負担分を抽出できない試験体について、その軸方向力-破壊領域の軸歪度関係の実験値と軸方向力-最終座屈区間の軸歪度関係の計算モデルとの比較を示す。なお、コンクリートの軸方向応力度-歪度関係は文献1)のモデルを用いた。この結果、主筋が4本のモデルは実験値の傾向をほぼ模擬していることがわかる。一方、主筋が8本のモデルは4本モデルと同一の主筋が8本あると仮定して解析したが、座屈開始以降モデルは実験値を大きく過大評価している。

7. まとめと今後の課題

帯筋より拘束された主筋の軸方向応力度-歪度関係を座屈を考慮した簡単なモデルに立脚し提案した。また、主筋を有するRC造柱試験体の一方向軸加力実験を行い、本モデルの妥当性を検討した結果、軸方向応力度-歪度関係および座屈モードの推定に対し有効であることが分かった。今後は、モデル自身の再検討および実験の加力方法や繰り返しの影響を検討する予定である。

[参考文献] 1) 加藤大介、羽廣重夫：鉄筋コンクリート造角柱試験体の軸方向圧縮実験の評価に関する研究、第11回コンクリート工学年次論文報告集1989、pp.287-292、2) Maurizio Pavia, Gaetano Russo, and Gaetano Zingone, Instability of Longitudinal Bars in RC Columns, Journal of Structural Engineering, Vol.114, No.2, February, 1988, pp.445-461

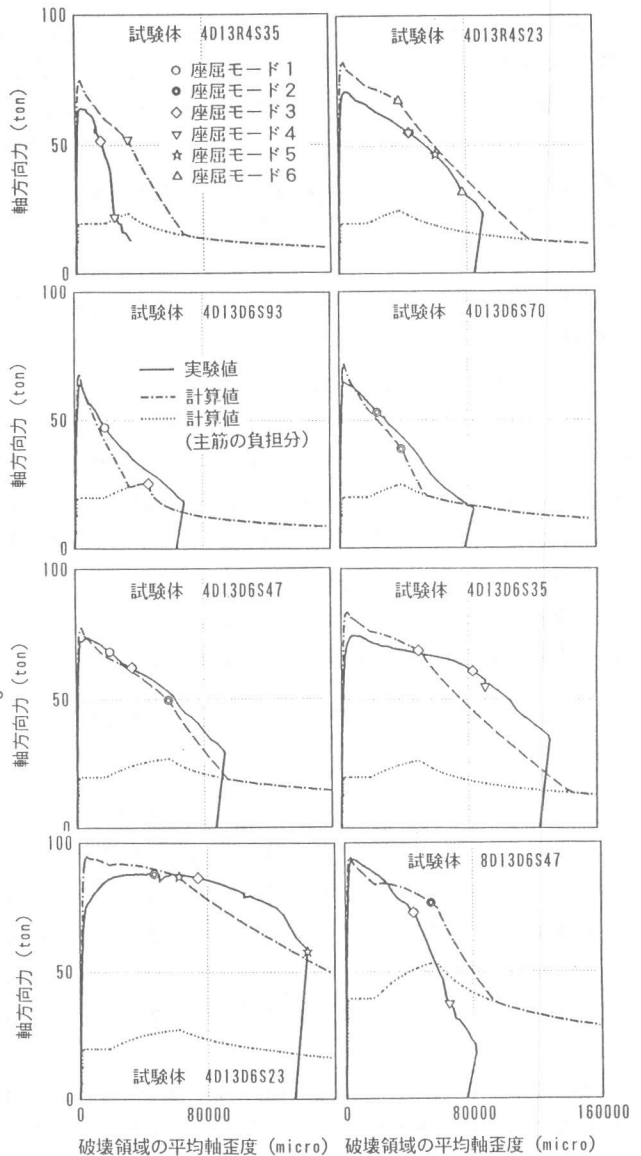


図10 試験体の軸方向力-破壊領域の軸歪度の
実験値と計算値の比較