鉄筋コンクリート部材の主筋の座屈性状に関する研究
BUCKLING BEHAVIORS OF STEEL BARS IN R/C COLUMNS加藤 大介*
Daisuke KATO

This paper reports on the evaluation method of the axial buckling strains of longitudinal steel bars in reinforced concrete columns, subjected to axial load. Two series of experiments were conducted. In series 1, buckling behaviors of bars subjected to compressive axial load only and those subjected to cyclic load reversals, were compared. In series 2, twenty six 15 cm square column specimens, confined by various reinforcement, were subjected to compressive axial load only, in order to evaluate buckling strains. The analytical model was developed, taking into account the effects of the diameter of hoops and longitudinal bars and spacing of hoops.

Keywords : reinforced concrete, buckling of steel bar, hoop confinement

主筋の座屈, 座屈防止筋, 帯筋の拘束効果

1. 序

鉄筋コンクリート (RC) 造部材内の主筋が早期の座屈をすることなく十分に圧縮力を負担するためには, 帯筋による拘束が不可欠である。現在までに, 帯筋により拘束された主筋の座屈性状を実験的に評価する研究^{1)~3)}や主筋の座屈を部材の靱性の決定要因として検討する研究^{4)~8)}が行われている。RC 部材内の主筋の座屈挙動を評価する際の問題点としては, i) 実験における座屈点の定義, ii) 実験で得られた主筋の軸歪度が部材長に沿って不均一であるための影響の処理, iii) 一般に主筋の座屈は帯筋数区間にまたがって生じるためにモデルでの座屈長さの決め方, iv) 繰返し載荷の影響の評価, 等があり問題が非常に複雑になっている。

筆者は, 鉄筋コンクリート部材において主筋の必要限界圧縮軸歪度が与えられた場合に, それを確保するための帯筋の配筋方法, すなわち, 帯筋の径, 間隔, 形状等を求める方法を開発することを目的に, 正方形帯筋により拘束された角柱試験体の一方単軸圧縮実験を行い, 主筋の軸方向応力度-歪度関係を大略的に評価するモデルを作成し, 実験とモデルを比較してその妥当性を検討し, 報告してきた^{9), 10)}。特に, 前述した i) ~ iii) の問題点を解決することにも重点をおいている。

本報告では, まず, 問題点 iv) に挙げた主筋の座屈に対する繰返しの影響を把握するために行った単調載荷と繰返し載荷の比較実験について報告する。次に, 文献 9), 10) で提案した座屈モデルを実験データを参考にし

て簡略化した座屈時軸歪度推定式について報告する。なお, 文献 9), 10) における単調軸圧縮実験は一端ピン他端固定支持の加力方法を用いていたので, 改めて両端固定支持の加力方法で実験を行った。なお, 繰返し実験の結果の詳細は文献 11) で既に報告してある。

2. 主筋の座屈の繰返しによる影響

2.1 実験概要

主筋の座屈性状を解明する際には, 繰返し荷重を受けることにより単調荷重のみ受ける場合に比べ主筋の座屈が早期に生じることを評価する必要がある。そこで, 同一の配筋 (主筋・帯筋) を持つ角柱試験体の単調と繰返しの載荷実験を行い, 繰返し載荷を受ける主筋の軸方向応力度-軸方向歪度関係の評価を行った。なお, 主筋のみの挙動を抽出するために, 繰返し・単調のいずれにおいても主筋なしの試験体についても実験を行った。

表一1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。実験は2シリーズからなる。シリーズAは帯筋間隔の一区間が主筋の座屈長さになる (以下, 一区間座屈と呼ぶ) ように設計したシリーズで, 2区間以上での座屈を防止するのに十分な帯筋としてD10鉄筋を間隔93mmで配筋したシリーズである。シリーズBは主筋の座屈長さが複数の帯筋間隔にわたる (以下, 多区間座屈と呼ぶ) ように設計したシリーズで, 帯筋としてD6鉄筋を間隔35mmで配筋したシリーズである。各シリーズにおいて, 主筋を有する試験体 (D13主筋

* 新潟大学工学部建設学科 助教授・工博

Assoc. Prof., Dept of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Niigata Univ., Dr. Eng.

を4本)と主筋のない試験体(施工上最小限の主筋が必要なため $\phi 4$ 鉄筋を4本配筋)を2体ずつ製作し、それぞれ単調と繰返しの载荷を行った。また、比較のため各シリーズで無拘束の試験体を作製した。試験体名のA・Bは実験のシリーズ名を4・0はD13主筋の本数を、C・Mは繰返し载荷あるいは単調载荷を意味する。Pは無拘束試験体である。

単調载荷用および主筋なしの繰返し载荷用の計8体(試験体番号1~8)は15 cm $\times$ 15 cm $\times$ 53 cmの直方体試験体とした。繰返し载荷用試験体2体(試験体番号9, 10)は直方体試験体と同一の15 cm $\times$ 15 cmの柱の上下に引張力载荷用の基礎を設置したI型試験体とした。なお、I型試験体の柱部分の測定区間の配筋は、同シリーズの直方体試験体と同一である。図-1にシリーズA

図-1 試験体配筋図
(繰返し実験シリーズのAシリーズ)

の主筋を有する試験体の配筋図を示す。なお、かぶりはないものとして計画したが、施工上かぶりが必要なため、帯筋の幅(帯筋の外端間の長さ)を14 cmとして、かぶりを5 mmとした。

図-2(a)(b)に単調および繰返しの加力装置図を示す。単調载荷は両端固定支持とし、繰返し载荷は、圧縮力は両端固定支持で、引張力は両端ピンの左右のジャッキにより与えた。繰返しを受ける試験体の载荷履歴は引張力、圧縮力の順に軸歪度で0.2, 0.4, 0.6, 1.0%を1回ずつ、さらに、2.0%を2回繰り返した後に、圧縮方向に加力した。また、主筋のない試験体の繰返し载荷は圧縮力の加力と除荷のみの繰返し(片押し)とした。軸歪度の測定区間は図-1の破線に示すように角柱・I型試験体とも共通とし、前面と後面で2箇所ずつの計4箇所に設置した電気式変位計を用いて、柱部分中央位置の間隔324 mm(Aシリーズ), 350 mm(Bシリーズ)で測定した。また、主筋の歪ゲージは帯筋間隔が70 mm以上のものでは各帯筋間隔の中間点に表裏で2枚添付し、47 mm以下のものでは帯筋間隔1つおきに表裏1組のゲージを添付した。

(a) 単調载荷・片押し载荷

(b) 繰返し载荷

図-2 加力装置図

表-1 繰返し実験シリーズ試験体の諸元の実験結果

シリーズ	番号	試験体名	主筋径と形状	帯筋径と形状	帯筋間隔 mm	全断面帯筋比 P_v %	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	引張強度 σ_s kg/cm ²	最大耐力 tonf	最終座屈長さ mm (帯筋間隔倍数)	破壊領域長さ mm
A	1	A 4 M	4-D13	2-D10	93	1.02	2.18	3.63	5.22	3.59	268	73.9	93(1)	155
	2	A 0 M	4- $\phi 4$	2-D10	93	1.02	2.18	6.35	6.74	3.59	268	56.3	—	147
	3	A 0 C	4- $\phi 4$	2-D10	93	1.02	2.18	6.35	6.74	3.59	268	59.7	—	128
	4	A P	—	—	—	—	—	—	—	—	268	46.7	—	—
	9	A 4 C	4-D13	2-D10	93	1.02	2.18	3.63	5.22	3.59	268	82.5	93(1)	140
B	5	B 4 M	4-D13	2-D6	35	1.22	2.61	3.63	5.22	3.55	254	81.9	140(4)	225
	6	B 0 M	4- $\phi 4$	2-D6	35	1.22	2.61	6.35	6.74	3.55	254	65.1	—	135
	7	B 0 C	4- $\phi 4$	2-D6	35	1.22	2.61	6.35	6.74	3.55	254	69.6	—	216
	8	B P	—	—	—	—	—	—	—	—	254	55.9	—	—
	10	B 4 C	4-D13	2-D6	35	1.22	2.61	3.63	5.22	3.55	254	85.2	140(4)	169

2.2 実験結果の概要

表—1の後半に各試験体の最大耐力、最終座屈長さ、座屈長さの帯筋間隔に対する倍数、および、破壊領域の長さの実験値を示した。なお、座屈長さは実験中目視により測定し、また、破壊領域は実験終了後コア部分が圧壊している領域と定義して測定した。

図—3(a)(b)に主筋のないもので単調载荷と繰返し载荷を受ける試験体の軸方向力-測定区間平均軸歪度関係を示す。繰返し力は片押しであるが、両加力方法による軸方向力-軸歪度関係の包絡線の違いはほとんど観察されなかった。

図—4(a)(b)は主筋を有する試験体の単調载荷と繰返し载荷を受ける試験体の軸方向力-測定区間平均軸歪度関係をシリーズ別に示したものである。いずれのシ

図—3 主筋のない試験体の単調载荷と繰返し载荷の比較

図—4 主筋を有する試験体の単調载荷と繰返し载荷の比較

リーズでも低歪領域では繰返し载荷による影響は少ないが、高歪領域で繰返し载荷を受ける試験体の軸方向耐力が単調载荷を受ける試験体に比べ低下していくことが分かる。主筋のない試験体の実験結果より、繰返しによるコンクリート部分の耐力への影響はほとんどないと考えることができるため、主筋の挙動が繰返し载荷試験体の耐力の低下の要因となっていることが推測される。

2.3 主筋の応力度-歪度関係の繰返しによる影響

2.3.1 主筋の負担軸力の抽出方法

本節では、主筋の負担軸力を以下の仮定 i), ii) の下に推定する。すなわち、i) 主筋を有する試験体とない試験体のコンクリートの挙動は同一とする。ii) 主筋を有する試験体のコンクリートが引張力と圧縮力の繰返し载荷を受ける場合の圧縮側の包絡線は片押しの繰返し载荷を受けるコンクリートの包絡線と同一とする。なお、上記の仮定の i) については、多区間座屈のものでは帯筋による拘束力が座屈した主筋を介して他の点から加わるため、厳密には成立しない。しかし、全拘束力はほぼ同程度であることを考慮しこの仮定を許容した。

以上の仮定により、単調载荷を受ける主筋の負担分は同シリーズ内の主筋なしの単調荷重試験体の耐力を差し引いて得られる。次に、図—5に繰返し载荷試験体の主筋の負担分の抽出の概念図を示す。まず、実験結果を各サイクルごとに圧縮と引張の加力領域に分け(図—5(a)), 圧縮加力方向は主筋を有する試験体とない試験体の差を主筋の負担分、引張加力方向の耐力はそのまま主筋の負担分とし(図—5(b)), 抽出した結果を合わせたものを各サイクルの主筋の負担軸力とする(図—5(c))。ただし、圧縮加力方向の包絡線部分までの領域は、主筋のない試験体では実験を行っていないため、コンクリートの負担分は不明である。そこで、図—5(d)に示すように圧縮再加力点から包絡線までは直線的に増加させた。

一方、得られた主筋の測定区間平均軸歪度-軸方向応力度関係は、文献9)と同様の方法で座屈した区間の軸歪度-軸方向応力度関係に修正した。すなわち、測定区間全長のうち座屈長さ以外の部分の軸歪度は座屈長さ

図—5 主筋の負担軸力の抽出概念図

図-6 主筋歪ゲージ位置と歪度の分布 (4D13D6S47)

図-7 主筋の負担分の繰返し載荷と単調載荷の比較 (圧縮方向包絡線)

外の部分に添付した歪ゲージによる主筋の歪度の平均と仮定して、この部分を差し引くことにより求めた。図-6は3.で示す試験体4D13D6S47の主筋歪ゲージ位置と測定された歪度の分布の例であり、全測定区間の平均歪度が2000~30000マイクロのいくつかの点について示してある。この例では最終的に帯筋区間F~Hの3区間での座屈と判定されている。したがって、F~Hの3区間の軸歪度を修正された主筋の軸歪度とした。なお、F~Hの3区間以外の主筋の歪度は区間B、DおよびJのゲージより得られた歪度の平均とした。なお、引張歪を受ける領域では全測定長さで均一な軸歪度になることからこの修正は行わない。

2.3.2 主筋の負担軸力の繰返しの影響

本節では主筋の負担軸力の繰返し載荷による影響を評価する。図-7(a)(b)は2.3.1で示した方法より抽出した各サイクルの主筋の負担軸力を主筋の全断面積で除して求めた主筋の応力度の内、正加力領域の包絡部分のみを取り出して、繰返し載荷を受けるものと単調載荷を受けるものとをシリーズ別に比較したものである。図を見ると繰返しを受けるものは単調載荷のものに比べてかなり早期の段階で座屈により負担軸力が低減することがわかる。

次に、図-8(a)(b)は累積軸歪度の概念を導入して

図-8 主筋の負担分の繰返し載荷と単調載荷の比較 (累積歪度)

図-9 座屈を考慮した主筋のモデル

繰返し載荷と単調載荷の実験結果をシリーズ別に比較したものである。同図の実線は2.3.1で示した方法を用いて得られた各サイクルの主筋の負担分の圧縮加力領域の部分(図-5(b)の上半分)を各サイクル順に加算していった累積軸歪度(図-9参照)を横軸にとって主筋の負担分を示したものであり、その包絡領域を点影で示してある。同図中の破線は単調載荷のものであるが、単調載荷曲線における主筋の座屈点を耐力が歪硬化域に入った後に再び降伏軸力を下まわった点(図中の○)とし、また、繰返し載荷曲線における座屈点を包絡線の耐力が急激に低下する点と考えると、単調載荷曲線の座屈点と累積軸歪度を用いた繰返し載荷曲線の座屈点はおおむね一致していると評価できる。なお、繰返し載荷曲線における急激な耐力低下点とは前サイクルではほぼ降伏応力度を維持していたのに、次のサイクルでは応力度がほぼ0となる点と定義し、図中に黒丸で示した。

以上より、繰返し載荷試験体の主筋の応力度-歪度関係は、概念図-9に示すように正加力時の軸方向歪度をサイクル順に加算した累積歪度が単調載荷を受ける主筋の座屈歪度(ϵ_{BUC})と等しくなった点で座屈するモデルで表現できることがわかる。またこれらは、鉄骨構造物の挙動¹²⁾にほぼ一致している。

3. 主筋の座屈の単調載荷実験

3.1 実験概要

主筋の座屈モデルを考える際に、主筋の径のほかに拘束帯筋の径と間隔が重要な因子となる。そこで、この観点から主筋と帯筋の配筋法をパラメータにした実験を計画した。表-2に計画した試験体名を主筋と帯筋の配筋法別に示す。すなわち、主筋の配筋法を4通り(内1つは主筋のないものと考えている4-φ4)、帯筋の配筋法

表—2 一方向実験シリーズの試験体名と材料強度

		主 筋 の 配 筋 法				帯筋降伏 応力度 (kg/cm ²)	コンクリート σ _c (kg/cm ²)	軸歪度 測定間隔 (mm)
		4-D16	4-D13	4-D10	4-φ4			
帯 筋 の 配 筋 法	2-D10-S93	4D16D10S93	(A4M)	4D10D10S93	4φ4D10S93	3590	285	324
	2-D6-S70	4D16D6S70	4D13D6S70	4D10D6S70	4φ4D6S70	3550	254	300
	2-D6-S47	4D16D6S47	4D13D6S47	4D10D6S47	4φ4D6S47		251	360
	2-D6-S35	4D16D6S35	(B4M)	4D10D6S35	4φ4D6S35		244	350
	2-φ4-S47	4D16φ4S47	4D13φ4S47	4D10φ4S47	4φ4φ4S47	5940	260	360
	2-φ4-S35	4D16φ4S35	4D13φ4S35	4D10φ4S35	4φ4φ4S35		256	350
	2-φ4-S23	4D16φ4S23	4D13φ4S23	4D10φ4S23	4φ4φ4S23		224	320
	主筋降伏応力度 (kg/cm ²)	3490	3500	3860	5940			
	主筋破断応力度 (kg/cm ²)	5070	5050	5330	6260

図—10 帯筋がD6S47シリーズの荷重-軸歪度曲線

(a) 試験体 4D16D10S93

(b) 試験体 4D16D6S47

図—11 主筋の応力度の抽出と座屈点の定義

を7通り想定し、計28体計画した。なお、そのうち2体は2.節で示した試験体A4MとB4Mに相当するので実験は省略し、実際には26体作製した。試験体の名前は、例えば4D16D10S93は主筋にD16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。なお、同図には使用した鉄筋とコンクリートの性質、および軸歪度の測定区間の間隔も示した。試験体の形状、加力方法および測定方法は2.節で示した単調加力シリーズと全く同じである。

3.2 実験結果およびその整理

図—10に帯筋がD6で間隔47mmのシリーズの軸方向力-測定区間の平均軸歪度の関係を示す。これらの関係を用いて2.節で示した方法により各試験体の主筋の負担軸力を推定した。試験体4D16D10S93および試験体4D16D6S47の修正例を図—11(a)(b)に示す。図中の点線は図—10の軸力の差を主筋の負担分としたもの、実線はさらに座屈区間の軸歪度に修正したものである。

図—11の修正結果をみると、抽出された主筋の応力度-歪度関係には降伏点がみられるが、この降伏応力度は必ずしも引張試験から得られた降伏応力度(図中1点鎖線参照)に達していない。これは主筋のある試験体と主筋のない試験体の差をとるときの誤差であると考えられる。しかし、明確な降伏点がみられるので、この降伏

表—3 一方向実験シリーズの座屈歪度のまとめ

		主 筋 の 配 筋 法		
		4-D16	4-D13	4-D10
帯 筋 の 配 筋 法	2-D10-S93	170000 (1)	164000 (1)	65000 (1)
	2-D6-S70	45000 (3)	110000 (2)	42500 (1)
	2-D6-S47	65000 (4)	65000 (3)	60000 (3)
	2-D6-S35	50000 (5)	143000 (4)	125000 (2)
	2-φ4-S47	42500 (5)	20000 (4)	27500 (3)
	2-φ4-S35	45000 (6)	55000 (5)	118000 (3)
	2-φ4-S23	60000 (7)	60000 (5)	100000 (3)

単位: micro、() 内は座屈区間数N。

応力度を基本にして座屈点を定義した。すなわち、降伏後に歪硬化域に入り、再び降伏点に達した点を座屈点とした。図中の○が評価された座屈点となり、このときの

軸歪度を座屈歪度 ϵ_{BUC} とした。座屈歪度 ϵ_{BUC} の実験値を表—3にまとめた。同表には加力終了後に確認した座屈区間 N_B も () で示してある。これは、座屈長さが帯筋間隔 S の何倍であるかを示したものである。

4. 主筋の座屈時の歪度 ϵ_{BUC} の評価

4.1 主筋の軸方向応力度-歪度関係のモデル化の概要

文献9), 10) で提案した帯筋により拘束された主筋の軸方向応力度-歪度関係モデルの概念図を図—12(a)(b)に示す。まず、座屈は主筋が歪硬化域開始点(図—12(a) B点)までは生じないとした。次に、ある座屈区間 (N_B とおく) を仮定する。図—12(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瞬間剛性を用いて求めたオイラー座屈応力度がそのときの主筋の応力度より小さくなった点を図—12(a) のC点とする。この点から座屈区間 N_B の座屈が始まるわけであるが、中間の帯筋が存在するのでその挙動は図—12(a) の曲線 D—E—F のようになり、実際の区間 N_B の座屈の応力度-歪度関係の経路は C—E—F をたどることになる。なお、C点を潜在座屈開始点と呼ぶ。以上の経路を想定可能な座屈区間 N_B についてそれぞれ求めることができ、実際の挙動はそれらの最小値の包絡線をとることになる。ここで、文

(a) 解析概念図

(b) 3区間座屈のモデル

図—12 主筋の座屈モデル

献9), 10) では古典的 Double Modulus Theory を用いてC点を決定し、座屈後の曲線 D—E—F は後述の式(5)を提案している。また、座屈がな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た。なお、符号は圧縮を正とする。

$$\sigma = E_s \cdot \epsilon \quad (0 \leq \epsilon < \epsilon_{st})$$

$$= \left\{ 1 - \left(1 - \frac{\epsilon - \epsilon_{st}}{\epsilon_m - \epsilon_{st}} \right)^n \right\} \cdot (\sigma_m - \sigma_y) + \sigma_y \quad (\epsilon_{st} \leq \epsilon \leq \epsilon_m)$$

$$(n = E_t \cdot (\epsilon_m - \epsilon_{st}) / (\sigma_m - \sigma_y))$$

.....(1)

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 ($= 10 \cdot \epsilon_y$)、 σ_m は主筋最大応力度、 ϵ_m は主筋最大応力度時歪度 ($= 10 \cdot \epsilon_{st}$)、 E_t は歪硬化開始時鉄筋ヤング係数 ($= E_s / 30$)、である。

4.2 座屈後の曲線の評価

座屈による軸歪度であるが、図—12(b) のようにはらみ曲線を正弦波形とするとその変形による幾何学的な軸方向の縮み量 δ_B と歪度 ϵ_B は以下の式で近似できる。

$$\delta_B = \int_0^{x_0} d\delta = \int_0^{x_0} 1/2 \cdot (dy/dx)^2 dx$$

$$\epsilon_B = \delta_B / x_0 = ((\pi \cdot y_0) / (4 \cdot x_0))^2$$

.....(2)

ただし、 $y = y_0 \cdot \sin(\pi \cdot x_0 / 2 \cdot x)$

y_0 : 1 端固定他端自由支持の横変位で図—12(b)

では $y_0 = y_B / 2$

x_0 : 1 端固定他端自由支持の座屈長さで図—12

(b) では $x_0 = N_B \cdot S / 4$

次に、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

$$a_x \cdot (M / M_p) + (N / N_p) = 1 \quad \text{.....(3)}$$

($a_x = 0.65$, 適用範囲: $N > 0.5 \cdot N_p$)

$$N_p = a_h \cdot \sigma_m = \pi \cdot \phi_h^2 / 4 \cdot \sigma_m \quad (a_h: \text{主筋断面積})$$

$$M_p = 1/6 \cdot \phi_h^3 \cdot \sigma_m \quad (\phi_h: \text{主筋径})$$

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—13 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、鉄筋の応力度は最大応力度 σ_m を用いた。また、図—12(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

図—13 主筋の $M-N$ 関係のモデル化。

横力 Q が両端固定の柱に加わっているとして、

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

$$Q = a_{we} \cdot \sigma_{wy}$$

$$f(N_B) = (N_B^2 - 1) / N_B \quad N_B: \text{奇数}$$

$$(N_B^2 + 2) / N_B \quad N_B: \text{偶数}$$

で求められる。ここで、 a_{we} 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)を用いると(5)式を得る。

$$\frac{P}{N_p} = \frac{2 \cdot (\phi_h / S)}{3 \cdot N_B \cdot a_x \cdot \sqrt{\epsilon_B} + 2 \cdot (\phi_h / S)} \cdot g(N_B) \cdots \cdots (5)$$

ただし、

$$g(N_B) = \left\{ 1 + \frac{\pi \cdot a_x \cdot N_B \cdot f(N_B)}{16 \cdot (\phi_h / S)} \cdot \frac{a_{we}}{a_h} \cdot \frac{\sigma_{wy}}{\sigma_y} \right\}$$

である。

4.3 座屈歪度 ϵ_{BUC} の評価法

文献9)、10)の方法はC点の決定が複雑であり、計算に時間がかかる。そこで、本報告では3.節で示した実験結果を用いてC点を実験的に定めることを試みる。まず、図-12(a)に示したように座屈歪度 ϵ_{BUC} を降伏棚までの歪度 ϵ_{ER} と歪硬化開始点から潜在座屈点C点までの歪度 ϵ_H およびD点から再び降伏応力度に達するまでのF点(座屈点)までの歪度 ϵ_B に分割して考える。ここで、 ϵ_{ER} は、

$$\epsilon_{ER} = 10 \cdot \epsilon_y \cdots \cdots (6)$$

とする。また、 ϵ_B は式(5)において $P = N_y (= \sigma_y \cdot a_h)$ を代入して求められるが、 N_B が未知数なので N_B の関数となり $\epsilon_B(N_B)$ と表記し、

$$\epsilon_B(N_B) = \left[\frac{2 \cdot (\phi_h / S)}{3 \cdot N_B \cdot a_x} \left\{ \frac{N_p}{N_y} \cdot g(N_B) - 1 \right\} \right]^2 \cdots \cdots (7)$$

となる。(記号は前述)

次に ϵ_H であるが、C点はそのときの瞬間剛性を用いて計算するオイラー座屈応力度に依存し、また、瞬間剛性はそのときの軸歪度 ϵ_H に依存する。したがって、基本となる弾性時のオイラー座屈応力度 σ_{cr} が大きいほど、 ϵ_H が大きくなることが推測される。そこで、表-3に示されている ϵ_{BUC} の実験値から式(6)(7)で与えられる ϵ_{ER} と $\epsilon_B(N_B)$ を引いたものを実験値より得られた ϵ_H として横軸にとり、縦軸に弾性時のオイラー座屈応力度 σ_{cr} をとって図-14に示す(図の横軸は micro 表示)。ただし、式(7)に必要な座屈区間 N_B は表-3で示した実験値を用いた。結果は明らかな右上がりの傾向が認められた。また、参考のために tangent modulus theory と double modulus theory で求められた関係も同図中に示した。理論値が上回っているが、この関係がほぼ直線で表せることが分かる。そこで、実験値を直線で最小自乗法で推定したのが図中の直線であり、 ϵ_H の評価式(8)となる。

図-14 ϵ_H とオイラー座屈応力度 σ_{cr} の関係

表-4 一方向実験シリーズの座屈歪度の計算値

		主筋の配筋法		
		4-D16	4-D13	4-D10
帯筋の配筋法	2-D10-S93	222000 (1)	130000 (1)	57600 (1)
	2-D6-S70	28300 (3)	54900 (2)	61400 (2)
	2-D6-S47	42800 (4)	49400 (3)	53400 (3)
	2-D6-S35	55300 (5)	76000 (4)	72200 (3)
	2-φ4-S47	33200 (5)	41700 (3)	39800 (3)
	2-φ4-S35	43300 (6)	48800 (5)	57800 (3)
	2-φ4-S23	73100 (7)	85200 (6)	81200 (5)

単位: micro、() 内は座屈区間数 N_B

$$\epsilon_H = 0.00173 \cdot \sigma_{cr} - 0.0661 \quad (\geq 0) \cdots \cdots (8)$$

(σ_{cr} の単位は t/cm^2)

なお、 σ_{cr} は以下の式で与えられる。

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E_s \cdot \phi h^2}{16 \cdot (N_B \cdot S/2)^2}$$

以上より、座屈区間 N_B の座屈歪度 $\epsilon_{BUC}(N_B)$ は式(6)~(8)を用いて、

$$\epsilon_{BUC}(N_B) = \epsilon_{ER} + \epsilon_H + \epsilon_B(N_B) \cdots \cdots (9)$$

となり、可能な N_B を用いて計算した $\epsilon_{BUC}(N_B)$ の最小値が座屈歪度 ϵ_{BUC} の計算値となる。

表-4は表-3と同じスタイルで式(9)で与えられる各試験体の ϵ_{BUC} の計算値とそのときの N_B の値を示したものである。なお、可能な最大 N_B (自然数) は断面せいDを帯筋間隔Sで除した値と実験値の N_B の大きいほうとした。ここで、可能な最大 N_B とはカバーコンクリートが損傷を受け主筋を拘束する効果がない領域(いわゆる破壊領域)で生じる座屈の最大区間数であり、この領域の長さは一般的には断面せいD前後となる。しかし、この長さは帯筋の配筋方法によっても変化し、本実験でも座屈長さがDを超えたものもあった。そこで、これらの試験体については実験で確認された座屈区間数まで許容した。なお、破壊領域の長さが帯筋量を反映して定量的に評価された場合にはこの長さをを用いた最大座屈区間 N_B に統一すべきであろう。

図-15は ϵ_{BUC} の実験値と計算値を比較したものであ

図—15 座屈時歪度の実験と計算の比較

図—16 座屈区間の座屈軸歪度への影響と実例

るが、計算値は実験値を大略推定している。また、図—16(a)(b)は N_B によって ϵ_{BUC} がどう変化するかを図示したもので、帯筋に $\phi 4$ を用いて($S=23\text{ mm}$)主筋が太い4D16 ϕ 4S23(図(a))と主筋が細い4D10 ϕ 4S23(図(b))について示した。図は太い実線が ϵ_{BUC} を表し、さらに、 ϵ_{ER} 、 ϵ_H および ϵ_B の分類もしてある。両試験体とも可能な N_B は7であるが、参考のため $N_B=12$ まで破線で示してある。可能 N_B での最小値が計算値となるがこの点に○をつけ、実験値は●で示した。なお、 ϵ_B は N_B の関数である $f(N_B)$ が偶数と奇数で異なった式となるので、やや凹凸のある曲線となる。

主筋が細い図(b)の場合には計算値は $N_B=5$ が最小となりここが計算値になるが、主筋が太い図(a)の場合には計算値は可能 N_B の最大値7で座屈形態が決まっており健全な非破壊コンクリートにより拘束されて座屈長さが決まったとも考えられる。破壊領域がさらに長くなりうる試験体寸法・加力方法で行えば、 N_B はさらに大きくなることも考えられる。

5. まとめ

(1) 主筋の座屈性状に対する繰返し荷重の影響を検討

することを目的に、同一の配筋を持つ角柱試験体の単調と繰返しとの載荷実験を行った。その結果、主筋の応力度-歪度関係は、圧縮加力時の軸方向歪度をサイクル順に加算した累積歪度が単調載荷時の座屈歪度と等しくなった点で座屈するモデルで表現できた。

(2) 主筋と帯筋の配筋法を変えた単調軸圧縮実験を行い、座屈時の軸歪度を求めた。主筋の負担応力度は主筋の有無のみ異なる試験体の差より求めた。また、測定区間での平均軸歪度は座屈区間での軸歪度に修正している。

(3) 帯筋より拘束された主筋の座屈時軸歪度 ϵ_{BUC} の概念を簡単なモデルに立脚し提案した。また、実験結果を用いて座屈軸歪度推定式 $\epsilon_{BUC}(N_B)$ を求めた(本文(9)式)。式(9)は座屈区間 N_B の関数となるので、可能な N_B を用いて計算した $\epsilon_{BUC}(N_B)$ の最小値が ϵ_{BUC} の計算値となる。

謝 辞

本研究の実験およびデータ解析を行うに当たり、金谷淳二氏(東京電力、当時新潟大学大学院生)を中心に新潟大学卒研生に多大なる御協力をいただきました。ここに、関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 丸山久一、清水敬二ほか1名：RC柱の主筋座屈に関する基礎的研究、コンクリート構造物の靱性と配筋方法に関するシンポジウム論文集、日本コンクリート工学協会、pp.47～60、1990年
- 井上 晋、塚田耕司、宮川豊章、藤井 学：RC角柱供試体の主筋座屈に関する実験的検討、第13回コンクリート工学年次論文報告集、pp.333～338、1991年
- 神保善行、山口善史、中塚 佑、鈴木計夫ほか1名：コンファインドコンクリート内に配置された圧縮軸筋の座屈時ひずみ(その1. 実験概要および実験結果、その2. 座屈時ひずみ推定式の誘導)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.509～512、1991年
- 広沢雅也ほか2名：鉄筋コンクリート短柱の崩壊防止に関する総合研究(その21：主筋の座屈)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1329～1330、昭和49年
- 広沢雅也ほか1名：鉄筋コンクリート短柱の崩壊防止に関する総合研究(その30：主筋の座屈)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1127～1128、昭和50年
- 島 弘ほか3名：RC橋脚における主鉄筋座屈と靱性に及ぼす帯鉄筋配置の影響、コンクリート構造物の靱性と配筋方法に関するシンポジウム論文集、日本コンクリート工学協会、pp.33～40、1990年
- 矢代秀雄、清水庸介：RCばりの圧縮側に用いる異形棒鋼の圧縮実験、第13回コンクリート工学年次論文報告集、pp.269～274、1991年
- 畑中重光ほか2名：RC梁の終局域における圧縮筋の座屈に関する一考察、第13回コンクリート工学年次論文報告集、pp.275～280、1991年
- 加藤大介、金谷淳二：鉄筋コンクリート造角柱の主筋の

- 座屈性状の評価に関する研究，第12回コンクリート工学
年次論文報告集，pp.433～438，1990年
- 10) 加藤大介，金谷淳二：鉄筋コンクリート部材の主筋の座
屈防止筋の評価法に関する研究，コンクリート構造物の
靱性と配筋方法に関するシンポジウム論文集，日本コン
クリート工学協会，pp.41～46，1990年
- 11) 加藤大介，金谷淳二：繰返し加力を受けるRC造柱の主
筋の座屈性状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13-2，pp.369～374，1991年
- 12) 中低層鉄骨建物の耐震設計法，社団法人鋼材倶楽部，中
低層構造骨組耐震性研究委員会編，技報堂出版
- (1991年11月29日原稿受理，1992年4月1日採用決定)
-