

論文

[2060] 繰り返し加力を受けるRC造柱の主筋の座屈性状の評価に関する実験的研究

正会員 加藤大介（新潟大学建設学科）

正会員 ○金谷淳二（東京電力）

1. はじめに

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。しかしながら、現在のところ、どの程度の帯筋で拘束すればどの程度の軸歪度まで座屈が防止されるかについての定量的な研究は少ない。筆者らは、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向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単純なモデルを作成し、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 [1, 2]。

一方、主筋の座屈性状を解明する際には、繰り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、本研究では、同一の配筋（主筋・帯筋）を持つ角柱試験体の単調と繰り返しの載荷実験を行い、繰り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、繰り返し・単調のいずれにおいても主筋無し試験体について実験を行った。

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。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主筋を4本）と主筋の無い試験体（施工上最

表-1 試験体の諸元

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 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	シリンダー 強度 σ_B kg/cm ²
A	1	A 4 M	4-D13	2-D10	93	1.02	2.18	3.63	5.22	3.59	268
	2	A 0 M	4-R4	2-D10	93	1.02	2.18	6.35	6.74	3.59	268
	3	A 0 C	4-R4	2-D10	93	1.02	2.18	6.35	6.74	3.59	268
	4	A P	—	—	—	—	—	—	—	—	268
	9	A 4 C	4-D13	2-D10	93	1.02	2.18	3.63	5.22	3.59	268
B	5	B 4 M	4-D13	2-D6	35	1.22	2.61	3.63	5.22	3.55	254
	6	B 0 M	4-R4	2-D6	35	1.22	2.61	6.35	6.74	3.55	254
	7	B 0 C	4-R4	2-D6	35	1.22	2.61	6.35	6.74	3.55	254
	8	B P	—	—	—	—	—	—	—	—	254
	10	B 4 C	4-D13	2-D6	35	1.22	2.61	3.63	5.22	3.55	254

小限の主筋が必要なためφ4鉄筋を4本配筋)を2体ずつ製作し、それぞれ単調と繰り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は繰り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。

試験体は、単調载荷用及び主筋無しの繰り返し载荷用の計8体(試験体番号1~8)は15cm×15cm×53cmの直方体試験体とした。繰り返し载荷用試験体2体(試験体番号9、10)は直方体試験体と同一の15cm×15cmの柱の上下に引張力载荷用の基礎を設置したI型試験体としている。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の主筋を有する試験体の配筋図を示す。なお、かぶりは無いものとして計画したが、施工

上最小限のかぶりが必要なため、帯筋の幅(帯筋の外端間の長さ)を14cmとして、かぶりを5mmとした。

図-2(a)(b)に単調および繰り返しの加力装置図を示す。単調载荷は両端固定支持の载荷形式とし、繰り返し载荷は、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。繰り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、主筋の無い試験体の繰り返し载荷は圧縮力の加力と除荷のみの繰り返し(片押し)とした。軸歪度の測定区間は図-1の破

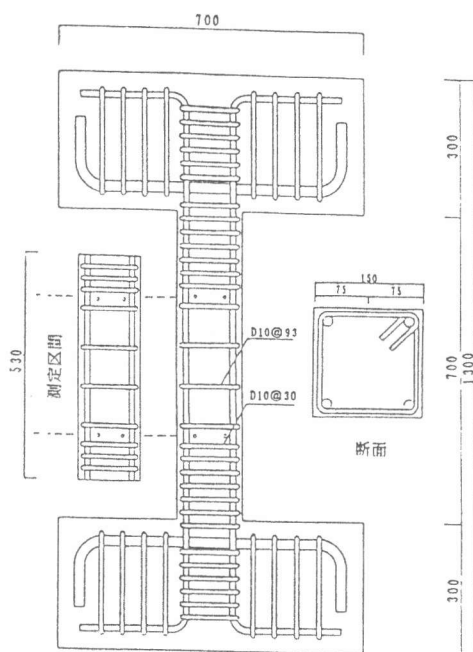
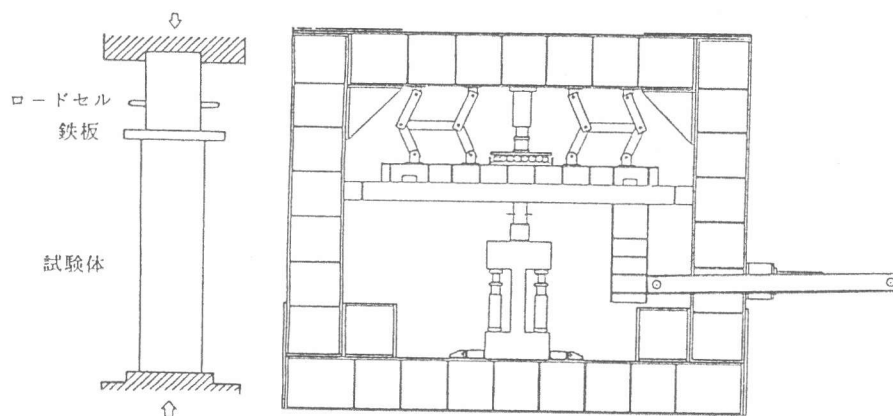


図-1 試験体配筋図(Aシリーズ)



(a)単調载荷・片押し载荷

(b)繰り返し载荷

図-2 加力装置図

表-2 実験結果

シリーズ	番号	試験体名	最大耐力 ton	最大耐力時断面平均応力度 kg/cm ²	最大耐力時測定域平均軸歪 micro	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	73.9	328	2754	93(1)	155
	2	A 0 M	56.3	250	3609	—	147
	3	A 0 C	59.7	265	3506	—	128
	4	A P	46.7	208	1957	—	—
	9	A 4 C	82.5	367	3036	93(1)	140
B	5	B 4 M	81.9	364	4394	140(4)	225
	6	B 0 M	65.1	289	5788	—	135
	7	B 0 C	69.6	309	5801	—	216
	8	B P	55.9	248	2505	—	—
	10	B 4 C	85.2	379	8412	140(4)	169

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324mm(Aシリーズ)、350mm(Bシリーズ)で測定した。

3. 実験結果の概要

表-2に各試験体の最大耐力、その時の断面平均軸方向応力度、測定区間平均軸歪度の実験値を示す。ここで、測定区間平均軸歪度は測定した4箇所の軸歪度の平均とした。また、表-2の後半に各試験体の最終座屈長さ、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も示した。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。シリーズAの主筋のある試験体の座屈長さは帯筋間隔1区間の93mmであった。また、シリーズBの主筋のある

試験体は先ず帯筋間隔1区間の座屈モードが確認された後に順次多モード座屈に移行し最終的には帯筋間隔4区間の座屈モードとなった。すなわち、文献[1]で報告したように座屈長さは帯筋間隔の倍数でかつコア長さ(140mm)を上限にして決まっていることが分かる。

図-3は多区間座屈シリーズの単調載荷を受ける試験体B 4 Mの帯筋の歪度の分布である。縦軸は帯筋位置(8箇所の間隔が35mm、122.5mmの位置が試験体中央)を表しており、横軸は帯筋の中央位置

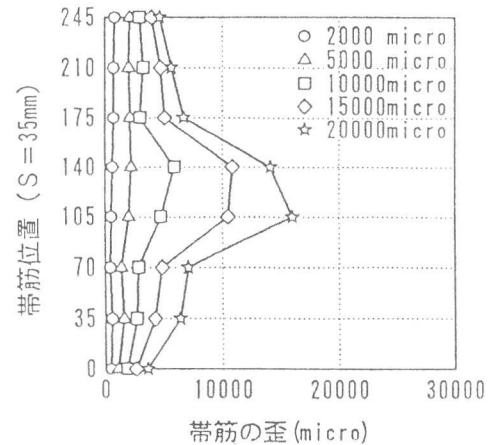
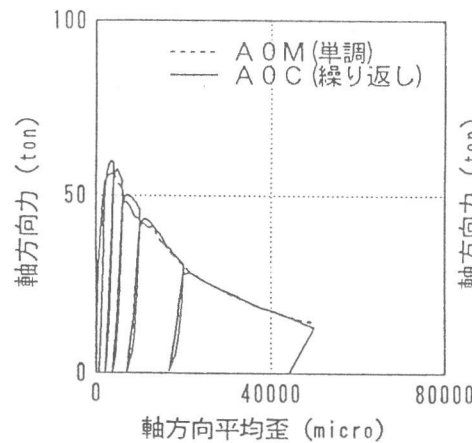
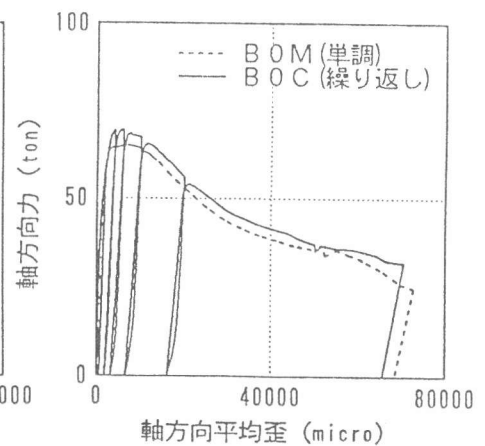


図-3 試験体 B 4 M の帯筋の歪分布

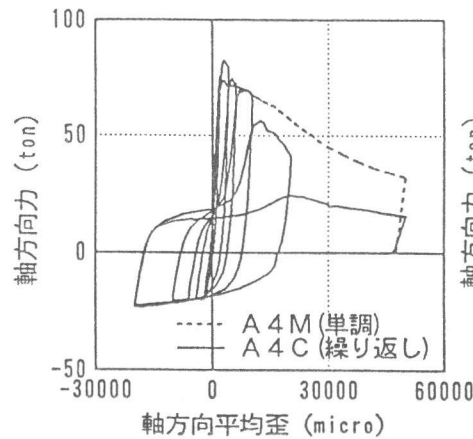


(a) A シリーズ

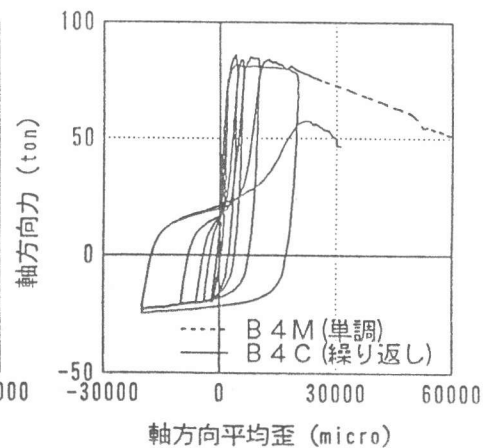


(b) B シリーズ

図-4 主筋の無い試験体の単調載荷と繰返し載荷の比較



(a) A シリーズ



(b) B シリーズ

図-5 主筋を有する試験体の単調載荷と繰返し載荷の比較

の歪度で、軸方向歪度が2000～20000microの分布を示してある。軸歪度が5000～10000micro前後から中央付近の帯筋の歪度が大きくなり、最終的に多区間にわたり座屈していることが分かる。

図-4(a)(b)に主筋の無いもので単調載荷と繰返し載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。

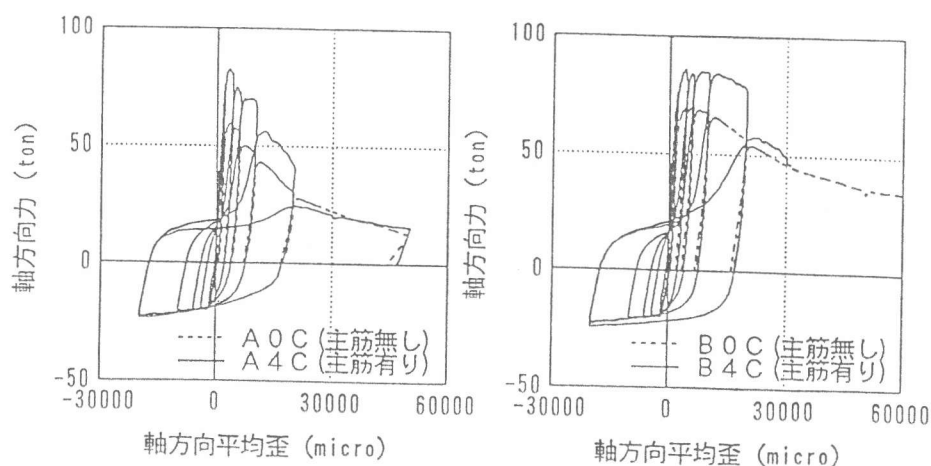
図-5(a)(b)は主筋を有する試験体の単調載荷と繰返し載荷を受ける試験体の軸方向力－測定区間平均軸歪度関係をシリーズ別に示したものである。いずれのシリーズでも低歪領域では繰返し載荷による影響は少ないが、高歪領域で繰返し載荷を受ける試験体の軸方向耐力が単調載荷を受ける試験体に比べ低下していくことが分かる。また、シリーズ別にみると単調載荷で試験体としての耐力・靱性が良好なシリーズBの方が繰返しによる耐力低下開始の軸歪度が大きいことが分かる。ここで、主筋の無い試験体の実験結果より、繰返しによるコンクリート部分の耐力への影響はほとんど無いと考えることができるため、主筋の挙動が繰返し載荷試験体の耐力の低下の要因となっていることが推測される。

4. 主筋の応力度－歪度関係の繰返しによる影響

4. 1 主筋の負担軸力の抽出方法

図-6(a)(b)に繰返し載荷試験体の主筋の有無による実験結果の比較をシリーズ別に示す。同図より各歪領域での主筋の負担軸力が推定でき、また、いずれのシリーズでも高歪領域では主筋の有無による復元

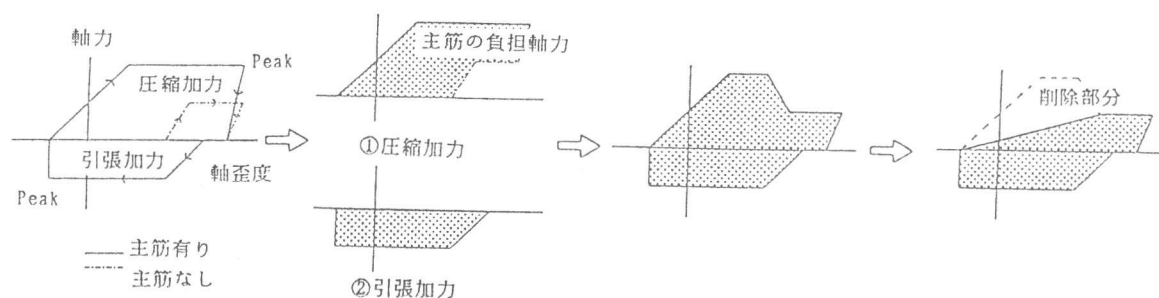
力の差がなくなっており、この領域では主筋の負担分がほぼ0であることも推定できる。本節では、この主筋の負担軸力を以下の仮定i)、ii)の下に推定する。すなわち、i)主筋を有する試験体と無い試験体のコンク



(a) A シリーズ

(b) B シリーズ

図-6 繰返し載荷試験体の主筋の有無による比較



(a)各サイクルの結果 (b)各方向の主筋の負担分 (c)主筋の負担分 (d)主筋の負担分の修正
図-7 主筋の負担軸力の抽出概念図

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り返し载荷を受ける場合の圧縮側の包絡線は片押しの繰り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無し単調荷重試験体の耐力を差し引くことにより得られる。次に、図-7に繰り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毎に圧縮加力領域と引張加力領域に分け(図-7(a))、圧縮加力方向は主筋を有する試験体と無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-7(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-7(c))。ただし、圧縮加力方向の包絡線部分までの領域は、主筋の無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、この部分は削除した(図-7(d))。

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[1]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以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。なお、引張歪を受ける領域では全測定長さで均一な軸歪になることからこの修正は行わない。

4.2 主筋の負担軸力の繰り返しの影響

本節では主筋の負担軸力の繰り返し载荷による影響を評価する。図-8(a)(b)は抽出した各サイ

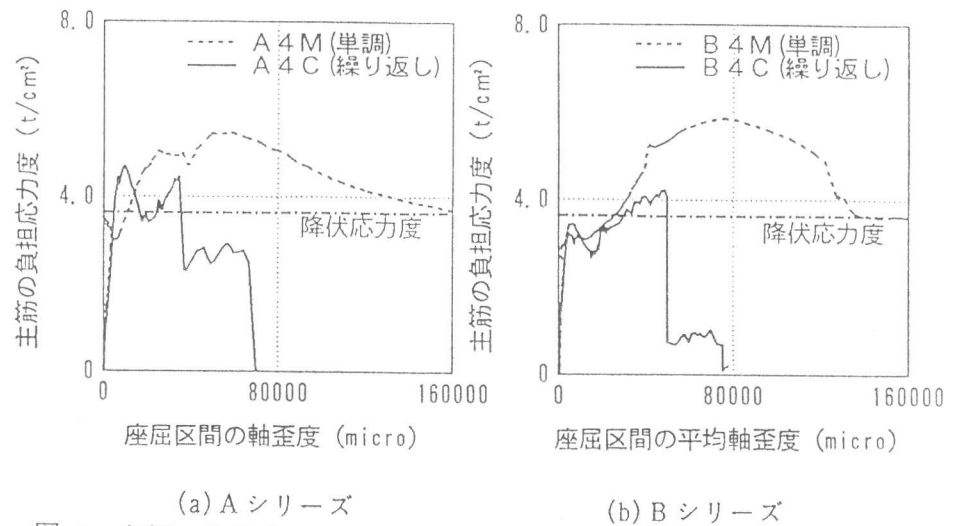


図-8 主筋の負担分の繰り返し载荷と単調载荷の比較(圧縮方向包絡線)

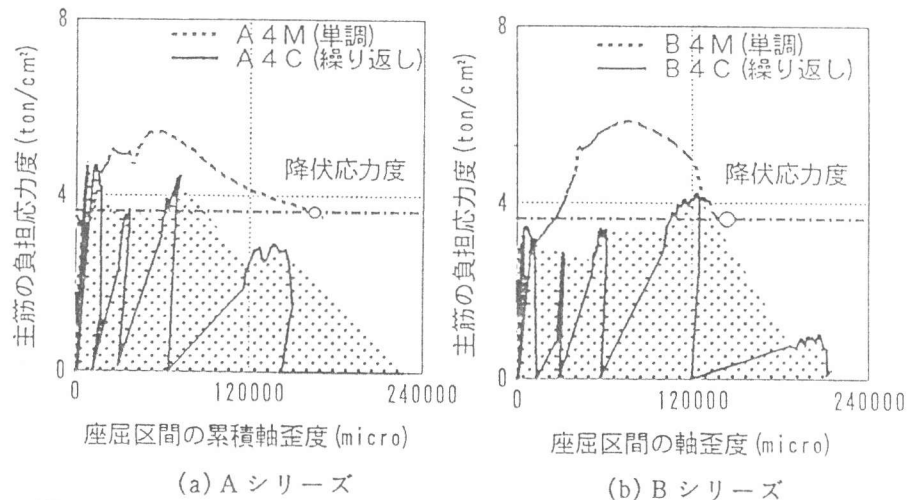


図-9 主筋の負担分の繰り返し载荷と単調载荷の比較(累積歪)

クルの主筋の負担軸力の内、正加力領域の包絡部分のみを取り出して、繰返し载荷を受けるものと単調载荷を受けるものとをシリーズ別に比較したものである。図をみると繰返しを受けるものは単

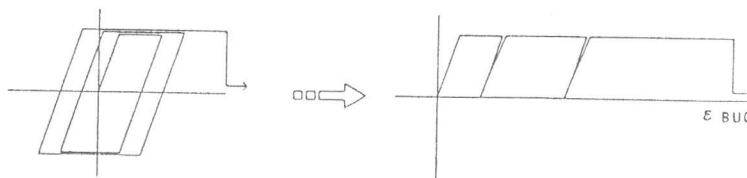


図-10 座屈を考慮した主筋のモデル

調载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-9(a)(b)は累積軸歪度の概念を導入して繰返し载荷と単調载荷の実験結果をシリーズ別に比較したものである。同図の実線は各サイクルの主筋の負担分の圧縮加力領域の部分（図-7(d)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-10参照）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载荷のものであるが、単調载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○）と考えると、単調载荷曲線の座屈点と累積軸歪度を用いた繰返し载荷曲線の包絡線の耐力が急激に低下する点は概ね一致していると評価できる。

以上より、繰返し载荷試験体の主筋の応力度－歪度関係は、概念図-10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载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。またこれは、鉄骨構造物の挙動 [3] にはほぼ一致している。なお、座屈歪度は例えば文献 [2] の方法などで評価しうるが、実験的な検討がさらに必要である。

5. まとめ

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（主筋・帯筋）を持つ角柱試験体の単調と繰返しの载荷実験を行い、以下の結論・今後の課題を得た。

- (1)主筋を有する試験体の単調と繰返し载荷による挙動には大きな差が生じた。主筋の負担軸力を抽出して、圧縮加力領域の包絡部分のみを取り出すと、繰返しを受けるものは単調载荷のものに比べてかなり早期の段階で座屈により負担耐力が低減した。
- (2)主筋の負担分の圧縮加力領域の部分各サイクル順に加算していった累積軸歪度を横軸にとり、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と考えると、単調载荷曲線と累積軸歪度を用いた繰返し载荷曲線の包絡線の座屈点は概ね一致した。
- (3)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る。なお、単調载荷における座屈歪度の評価が重要であり、実験的な検討がさらに必要である。

〔参考文献〕

- 1) 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、1990年、pp.433-438
- 2) 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会、1990年、pp.41-46
- 3) 中低層鉄骨建物の耐震設計法、社団法人鋼材倶楽部、中低層鋼構造骨組耐震性研究委員会編、技報堂出版