RC 部材中の軸方向鉄筋の座屈に関する実験的検討[†]

井 上 晋* 宮 川 豊 章* 藤 井 学*

An Experimental Study on Buckling of Longitudinal Reinforcement
in Reinforced Concrete Members

by

Susumu INOUE*, Toyooki MIYAGAWA* and Manabu FUJII*

In order to improve the ductility of reinforced concrete (RC) members, it is very effective to confine the concrete laterally in the compression zone of section by spirals or hoops. As for the mechanical properties of confined concrete, many researchers have conducted experimental and theoretical studies, and proposed different stress-strain relationships for confined concrete. In the large deformation zone after the maximum load, however, buckling of longitudinal reinforcement may occur in RC members even if they have an adequate amount of lateral confinement, and this leads to a significant reduction in the load carrying capacity. Therefore, it is important to investigate the effects of various factors on the buckling of longitudinal reinforcement in order to make clear the load carrying behaviors of RC members after the maximum load.

In this study, the effects of (i) spacing of lateral confinement (s), (ii) diameter of longitudinal bar (d), (iii) cover for lateral confinement (c) and (iv) the number of intervals having the length of s (n) on the longitudinal strain at buckling of reinforcing bars were investigated by carrying out the uni-axial loading test on RC square column specimens.

Test results showed that the strain at buckling of longitudinal reinforcement became larger with a decrease in s , c or n and with an increase in d . The effect of s became more significant when the d -value became larger within the s -values selected in this study. On the other hand, the effect of d was more remarkable when the s -value became smaller.

Key words : Buckling, Longitudinal reinforcement, Strain at buckling, Buckling made, Spacing of lateral confinement, Diameter of reinforcing bar

1 ま え が き

地震荷重作用時にコンクリート構造物に十分な変形性能を与えるための方策の一つとして、断面圧縮域のコンクリートをスパイラル筋やフープ筋を用いて横方向に拘束することが挙げられる。これにより、軸方向応力の作用下においてコンクリートを3軸応力状態とし、圧縮強度・変形能力を著しく増加させることが可能となるばかりでなく、部材中の軸方向圧縮鉄筋の早期座屈を防止・抑制できることは周知の事実である。これらのうち、コンクリートそのものの圧縮じん性改善効果については今まで数多くの研究がなされてきており、横拘束コンクリートの応力-ひずみモデルも数多く提案されている。しかしながら、軸方向鉄筋の座屈防止・抑制効果については、実験方法や座屈時の判定法などの問題点から不明確な点が多く、また、横拘束筋を配置していても、大変形領域では圧縮側鉄筋の座屈が生じ、これにともなって耐荷力が急激に低下するため、部材の終局時が主筋の座屈によって決定され

る場合が多い。したがって、大変形領域での RC 部材の挙動を正確に把握するためには、軸方向鉄筋の座屈に及ぼす種々要因の影響を明らかにしておくことが必要であると考えられる。

本研究では、RC 角柱供試体に対して一軸圧縮試験を実施し、RC 部材中の軸方向鉄筋の座屈時の判定法について検討するとともに、座屈時の供試体の平均ひずみに及ぼす各種要因の影響を検討した。

2 実 験 概 要

2・1 実験要因

RC 部材中の軸方向鉄筋の座屈に影響を及ぼすと考えられる要因は多数あるが、本研究では、(1) 横拘束筋配置間隔 s 、(2) 軸方向鉄筋径 d 、(3) 横拘束筋に対するかぶり c および (4) 間隔 s で横拘束筋を配置した区間数 n の4つの要因の影響を検討することとした。これらのうち、(1)、(2)は従来よりその影響が大きいと考えられているものであり、(1)については4 cm および8 cm の2種類、(2)については10 mm (D10を

† 原稿受理 平成2年11月29日 Received Oct. 29, 1990

* 正 会 員 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町, Faculty of Engineering, Kyoto University, Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto

Fig. 3. Loading and measuring apparatus.

用いた。軸方向鉄筋には SD30 の異形鉄筋 D10 および D13 を、また、横拘束筋には $\phi 6$ mm の丸鋼を突合せ溶接したものをを用いた。これらの機械的性質を Table I に示す。なお、コンクリートの設計圧縮強度は要因に関係なくいずれも 300 kgf/cm^2 ($W/C = 60\%$, $s/a = 49\%$) とした。

供試体は、前述の要因の組合せにより 24 種類のものについて各 2 体ずつ、計 48 体作製した。これらの詳細を Table II に示す。

2・3 載荷方法および測定項目

載荷は 200 tonf のアムスラー型耐圧試験機を用いて行い、供試体の軸方向平均ひずみを、Fig. 3 に示すように、容量 10 mm の変位計を 4 個用いて相対する 2 面の対称位置で測定した。供試体の座屈時ひずみは、その座屈領域の大きさやひずみ測定の検長により左右されることが指摘されており³⁾、結果を比較するためには検長を一定にしておく必要があると思われる。そこで、本研究では、考えられる最大の破壊（座屈）領域を包含することを目的とし、検長をすべての供試体で 250 mm とした。また、供試体によっては、座屈が生じると予想される区間内の軸方向鉄筋の外側に抵抗線ひずみゲージ（検長 2 mm）を貼付し、ひずみを測定することにより座屈時の判定の参考資料とした。

3 試験結果および考察

3・1 座屈時の決定法

RC 部材中の軸方向鉄筋の座屈に関する研究を行う上で最も問題となる点は、座屈時をいかに定義するか

ということである。これは、主として、実部材中ではかぶりコンクリートの存在により軸方向鉄筋の屈曲を目視できないこと、軸方向鉄筋の横方向へのはらみ出しの程度と耐力低下の関係が明確でないこと、一定間隔で横拘束筋を配置した供試体においては座屈が生じる区間を予測しにくいこと、等に起因するものである。これらの理由により、座屈時の定義法は研究者によって異なっており、統一的な考え方は確立されていないが、現時点では、丸山ら³⁾が行っているように、軸方向鉄筋の内側と外側に貼付したひずみゲージの読みに基づいて座屈時を定義する方法、鈴木ら⁴⁾、小柳ら⁵⁾が行っているように、供試体の荷重-軸方向ひずみ関係を求め、これらの耐力下降勾配や変曲点から座屈時を定義する方法が挙げられる。これらのうち、前者の方法は座屈開始という現象を局部的な現象としてとらえる場合は有効であると考えられるが、座屈が生じる区間を予測してゲージを貼付する必要があるが、本研究のように、ゲージを貼付した区間以外で座屈した供試体がある場合には不適当と考えられる。したがって、本研究では、座屈の開始・進行を部材レベルの全体的挙動としてとらえることを考え、後者の方法を参考にして以下のように座屈時を決定した。

一般に、軸方向鉄筋の座屈はかぶりコンクリートの圧潰・はく落後に生じると考えるのが妥当である。したがって、座屈開始時のひずみの値は横拘束コンクリートそのものの最大応力時、すなわち供試体の最大耐力時のひずみより大きな値となると考えられる。一方、

Fig. 4. Definition of strain at buckling.

ひずみゲージによる鉄筋の外側ひずみと載荷荷重との関係においては、供試体軸方向ひずみが増加しているにもかかわらず、鉄筋ひずみが減少し始める点、すなわち鉄筋ひずみの値が最大となる点が存在し、この時点においては座屈が既に生じているものと推察される。したがって、実際の座屈開始点は、最大荷重時の供試体軸方向ひずみと鉄筋の外側ひずみが最大となる点に対応する供試体軸方向ひずみの中間領域に存在すると考えられる。そこで、本研究では、その範囲内で実験結果より横軸に供試体軸方向ひずみ、縦軸に荷重-ひずみ曲線の勾配 ($\Delta P / \Delta \epsilon$) をとり、Fig. 4 のようなグラフを描いた。このグラフにおいて、最大荷重到達直後荷重-ひずみ曲線の勾配が負に転じ、急激に減少（絶対値は増加）し始めるが、これはかぶりコンクリートが圧潰、はく落したところによるところが大きいと考えられる。その後、勾配は極小値を経験した後再び徐々に増加または横這いする傾向を示す。これは、かぶりコンクリートの圧潰、はく落が一段落したためと考えられる。しかし、その増加も極大点を迎え、再び勾配が急激に減少し始める。本研究においては、この極大点時のひずみを座屈開始時ひずみと定義した。これは横拘束コンクリートそのものの応力低下勾配を一定と仮定した場合、この急激な勾配の変化は軸方向鉄筋の座屈のために起こった耐力低下に起因して生じたものだと考えられるからである。

3・2 座屈形式

供試体で観察された座屈形式を模式図的に Fig. 5 に示す。また、各供試体の座屈形式およびそれより計算される有効座屈長を Table II に示す。なお、有効座屈長は、Fig. 5 の ①、④ のように両端が固定されていたと考えられる場合は座屈が生じた区間長の 1/2 に、また、②、③、⑤ のように端部に横方向の変位が生じている場合には座屈が生じた区間長に等しいものとして計算した。

軸方向鉄筋に D10 を用いた供試体 ($d=10$ mm) では、横拘束筋配置間隔 $s=8$ cm の場合は例外なく図中の ① の座屈形式を示した。これに対し $s=4$ cm のものは ② の座屈形式を示すものが多く、座屈形式より計算されるこれらの供試体の座屈長は、 s に関係なくほぼ 4 cm となる。なお、 $s=4$ cm の場合は端部に

Fig. 5. Schema of buckling mode observed in the specimens.

横方向の変位が生じており、両端が固定されている場合の座屈発生区間長を有効座屈長の 2 倍とした場合には座屈発生区間長は 8 cm となる。このことは、鈴木らも指摘しているように、 s が小さい範囲（本研究の場合 $s/D \leq 0.8$ 、 D : 供試体断面最小寸法 = 10 cm）では、軸方向鉄筋の座屈は s に関係なくほぼ D に等しい区間で生じる（有効座屈長は $D/2$ となる）ことを示している。

一方、軸方向鉄筋に D13 を用いた供試体 ($d=13$ mm) では、径の増加により座屈が生じにくくなるため、軸方向ひずみ測定区間外で横拘束コンクリートそのものが早期に劣化するものが多く認められた。したがって、これらの供試体 (Table II 中一印で示したもの) は考察の対象外とした。それ以外の供試体の座屈形式は、 $s=8$ cm のものでは ① と ② の座屈形式が混在し、D10 を用いたものと若干異なった傾向を示している。また、 $s=4$ cm とした供試体では D10 を用いたものと同様に ② の座屈形式を示すものが多かったが、座屈が 2 補強区間以上で生じているもの (Fig. 5 の ③、④、⑤) が D10 に較べて若干多くみられ、これらより、有効座屈長は D10 の場合と較べ大きくなるものと推察される。

また、 $n=3$ の供試体においても座屈が 2 補強区間以上にわたって生じているものは少なく、3 区間の内のどこかで ① あるいは ② の座屈形式を示すものが多くみられ、 $s=8$ cm の場合には複数の区間で ① の座屈形式を示しているものもあった。一方、 $n=1$ の供試体において、座屈区間が 2 補強区間以上にわたっているものがあるが、これらは $s=4$ cm の場合に限られており、中央区間以外の領域の横拘束筋配置間隔が 3 cm であることから、供試体作製時の不確実さによるところが大きいと考えられる。

3・3 座屈時の供試体軸方向ひずみに及ぼす各要因の影響

Fig. 6 に荷重-供試体軸方向ひずみ関係の一例を示す。これらの図より 3・1 節で述べた方法で定義した

Fig. 6. Examples of load-longitudinal strain relationship.

軸方向鉄筋座屈時ひずみの値 (ϵ_b) をそれぞれの供試体について求め、以下の要因の影響について検討した。この場合、座屈時ひずみは供試体中央 250 mm を検長とした平均ひずみに基づいて決定しているため、例えば、 $n=1$, $n=3$ で異なってくる隣接領域 (3 cm 間隔で横拘束筋を配置した領域) の長さの影響を分離して考察するのは困難である。したがって、ここでは 4 つの要因の内の 3 つが同じ供試体間では、隣接領域が及ぼす影響を一定とみなして、残り 1 つの要因による影響を検討することとした。ただし、考察に際して同じ供試体が 2 体ある場合は、座屈時ひずみの値としてその平均値を用い、軸方向ひずみ測定区間外で破壊した供試体については考察の対象外とした。

3・3・1 横拘束筋配置間隔 s Fig. 7 に横拘束筋配置間隔の影響について調べたものを示す。グラフは全体的に右下がりの傾向を示し、横拘束筋配置間隔が小さいほど座屈時ひずみが大きくなるのが明白にうかがえる。さらに、軸方向鉄筋に D10 を用いた供試体 ($d=10$ mm) においては、 $c=0$, $n=3$ の場合を除き、その減少率は他の要因に関係なくほとんど一定であるといえる。一方、D13 を用いた供試体 ($d=13$ mm) においては、 $n=1$ と 3 の場合で値は異なるものの、同一の n ではかぶり c に関係なくその減少率がほぼ等しい。また、この減少率の値は d により異なり、 $d=10$ mm の場合は n , c に関係なくおよそ $730 \mu/\text{cm}$ となっているのに対し、 $d=13$ mm の場合は $n=1$ の場合で約 $2000 \mu/\text{cm}$, $n=3$ の場合で約 $1500 \mu/\text{cm}$ となっている。これらのことから、軸方向鉄筋径が大きいほど座屈時ひずみは大きくなるものの、逆に、本研究で選定した $s=4\sim 8$ cm という横拘束筋配置間隔内では、軸方向鉄筋径が大きいほど横拘束筋配置間隔によって受ける影響が大きくなると考え

Fig. 7. The effect of spacing of lateral confinement (s).

Fig. 8. The effect of diameter of longitudinal bar (d).

ることができる。また、横拘束筋配置間隔がある値以上に大きくなった場合 ($s/D \geq 0.7$), 供試体の軸方向鉄筋の座屈時ひずみはコンクリートの最大応力時ひずみ (約 2000μ) とほぼ等しく、 s によってほとんど変化しないということが従来の研究で報告されているが、本研究で選定したように横拘束筋間隔が比較的小さい場合には、軸方向鉄筋座屈時ひずみは横拘束筋配置間隔の影響を大きく受けると考えられる。

3・3・2 軸方向鉄筋径 d 軸方向鉄筋の影響について調べたものを Fig. 8 に示す。 $s=4$ cm の場合、傾きに若干違いはあるものの、全般的に右上がり、すなわち軸方向鉄筋径が大きいほど座屈時ひずみが大きくなる傾向を示す。一方、 $s=8$ cm の場合は、同様の傾向を示すものの、その傾きが $s=4$ cm の場合と較べてかなり小さく、また、D10 と D13 でほとんど差がないもののみられる。これらのことから、 $s=8$ cm の場合のように、 s がある程度以上大きくなると軸方向鉄筋座屈時ひずみがその軸方向鉄筋の径によって受ける影響は小さくなり、逆に、 $s=4$ cm という小さな横拘束筋配置間隔ではその影響が大きくなるということができる。

3・3・3 かぶり c Fig. 9 は横拘束筋に対するかぶりの影響について示したものである。ばらつきが多く、また、試験区間内で座屈しなかった供試体もあるため、的確な判断を下すことは困難であるが、 $d=10$ mm, $s=4$ cm, $n=3$ および $d=13$ mm, $s=4$ cm, $n=3$ の場合を除き、 $c=0$ と 5 mm では、両者で座屈時ひずみに大差はない。一方、 $c=5$ mm と 10 mm で比較した場合、後者の座屈時ひずみが小さくなる傾向がうかがえる。本研究に用いた供試体においては、軸方向鉄筋の座屈はかぶりコンクリートが圧潰、はく落した後に生じており、このことから考えると、かぶり

Fig. 9. The effect of cover for lateral confinement (c).

Fig. 10. The effect of the number of intervals having the length of $s(n)$.

c が座屈時ひずみに及ぼす影響は少ないと考えられ、上述のような傾向はむしろ s/D' (D' : 横拘束筋の一辺の長さ) の大小に起因して生じたものと思われる。

3.3.4 区間数 n Fig. 10 に区間数 n の影響を調べたものを示す。この図より、 $d=10, 13$ mm のいずれの場合も一つの例外を除き、 $n=3$ の供試体の方が $n=1$ の供試体よりも座屈時ひずみが小さくなる傾向を示している。 $n=1$ と $n=3$ では検長内に含まれる 3 cm 間隔で横拘束筋を配置した領域の長さが異なり、この影響が含まれていると考えられるが、 $n=3$ では、コンクリートの圧潰、はく落領域が $n=1$ に較べて大きく、横拘束コンクリートそのものの耐力低下が早期に起こり、これに起因して座屈時ひずみが小さくなっ

たものと思われる。

4 結 論

本研究においては、RC 角柱供試体の軸方向鉄筋座屈時ひずみに及ぼす種々要因の影響を一軸圧縮試験を実施することにより検討した。得られた結論は以下のようである。

(1) 軸方向鉄筋座屈時ひずみを求める方法の一つとして、供試体の最大耐力到達以降の荷重-ひずみ曲線の勾配 ($\Delta P/\Delta \epsilon$) と供試体軸方向ひずみ (ϵ) の関係から、その極大点のひずみにより座屈時ひずみを定義することが可能である。

(2) 軸方向鉄筋の座屈形式は、横拘束筋配置間隔 s が 4 cm と 8 cm の場合で異なることが多く、また、座屈形式より計算される有効座屈長は、軸方向鉄筋に D13 を用いたものの方が D10 を用いたものよりも若干大きくなる。

(3) 横拘束筋配置間隔 s が小さいほど供試体の軸方向鉄筋座屈時ひずみは大きくなり、本研究で選定した横拘束筋配置間隔内では、軸方向鉄筋径 d が大きいほど横拘束筋配置間隔によって受ける影響は大きくなる。

(4) 軸方向鉄筋径 d が大きくなるほど座屈時ひずみは大きくなり、横拘束筋配置間隔が小さい場合にその傾向は顕著となる。

(5) 横拘束筋に対するかぶり c が大きくなるほど、また、間隔 s で横拘束筋を配置した区間数 n が多くなるほど軸方向鉄筋座屈時ひずみは小さくなる傾向があるが、横拘束筋配置間隔 s や軸方向鉄筋径 d に較べてその影響は小さく、本研究のように検長内に間隔の異なる横拘束筋配置区間を有する場合は、それによる影響も含めて今後の検討が必要である。

(平成 2 年 6 月 5 日 土木学会関西支部年次学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 井上 晋, 服部篤史, 宮川豊章, 藤井 学, 小林和夫, セメント・コンクリート論文集, 43, 340 (1989).
- 2) C. F. Scribner, ACI Journal, 83, 966 (1986).
- 3) 丸山久一, 趙 唯堅, 清水敬二, コンクリート構造物のじん性と配筋方法に関するシンポジウム論文集, p. 47 (1990).
- 4) 鈴木計夫, 中塚 信, 長田省作, 井上和政, コンクリート工学年次論文報告集, 9-2, 151 (1987).
- 5) 小柳 治, 六郷恵哲, 山本智志, 近藤吉信, 土木学会第 44 回年次学術講演会概要集, 第 5 部, p. 502 (1989).