単軸圧縮応力を受けるコンファインドコンクリート内に配筋された 圧縮軸筋の座屈におよぼす諸要因の影響

コンファインドコンクリート内に配筋された圧縮軸筋の座屈に関する研究 (その1)

EFFECTS OF FACTORS ON BUCKLING OF LONGITUDINAL REINFORCEMENT ARRANGED IN CONFINED CONCRETE UNDER UNIAXIAL COMPRESSION

Buckling of longitudinal reinforcement arranged in confined concrete (Part 1)

中塚 侑*, 中川 裕史**, 阪井 由尚**

Tadashi NAKATSUKA, Hiroshi NAKAGAWA and Yoshitaka SAKAI

This paper describes effects of factors on strains at buckling of longitudinal reinforcement within confined concrete subjected to uniaxial compression. Experimental variables employed in this study were ratios of lateral reinforcement pitches to specimen diameters (S/D), an index of confining stress (P_s/σ_{sy}), yield strength of the lateral reinforcement (σ_{sy}), compressive strength of plain concrete (F_o), and shapes of the lateral reinforcement. Test specimens were cylindrical specimens with 200mm diameter and prismatic specimens with sections of 200×200 mm, both of which were 600mm in height and without cover. The following conclusions can be obtained mainly.

- 1) Clear definition on strains at buckling of longitudinal reinforcement are proposed on the basis of axial force decrease of longitudinal reinforcement calculated from data of lateral deformation of the reinforcement.
- 2) Because buckling of longitudinal reinforcement is considered to depend on behavior of confined concrete, variables which make mechanical performance of confined concrete higher, such as smaller pitch and larger amount of lateral reinforcement, lower concrete strength, etc., increase the buckling strains.

Keywords: compressive longitudinal reinforcement, buckling, confined concrete,
definition of the buckling, strain at buckling

圧縮軸筋, 座屈, コンファインドコンクリート, 座屈の定義, 座屈時ひずみ

1. 序論

構造部材のエネルギー吸収能力に基盤をおく耐震設計法では、部材の終局変形能力の明確な評価方法とその改善方法の確立が不可欠である。

コンクリート構造における曲げ部材の終局変形能力は、曲げ圧縮域にコンファインドコンクリートを適用することによって、顕著に改善されることが、実験的および解析的に明らかにされ、同方法を用いた設計法の提案も行われている^{1)~4)}。

一方、同曲げ部材の終局変形能力を評価するには終局限界点の設定が必要であるが、その曲げ終局限界点として、1)~4)などが提案されている⁵⁾。

- 1) 部材断面内での曲げ圧縮合力が、コンクリートのひずみ軟化性質のため、曲率の増大に対して増加、あるいは一定値を保つ引張側鋼材合力を支持できなくなる限界点
- 2) 引張主筋が破断する限界点
- 3) 圧縮主筋が座屈する限界点
- 4) 曲げ圧縮域におけるコンファインドコンクリートの横補強筋が破断する限界点

特に、3)の「圧縮主筋の座屈」は、これまでに行われてきた数多くの水平加力を受ける鉄筋コンクリート柱部材の実験結果、およ

び地震による鉄筋コンクリート柱部材の破壊状況などからも明らかのように、鉄筋コンクリート部材の曲げ終局破壊に対する一つの重要な要因である。言い換えれば、軸筋の座屈は、a)曲げ圧縮合力の低下を生じさせるだけでなく、b)その顕著な屈曲変形による横補強筋の破断、さらには、c)逆方向荷重時に作用する引張力によって主筋自身の破断を引き起こすなど、兵庫県南部地震における夥しい震害例を示すまでもなく、鉄筋コンクリート部材の曲げ終局破壊に対する1つの重要な要因である。

圧縮軸筋の座屈について次のような研究が行われている。

小柳ら⁶⁾、井上ら⁷⁾、丸山ら⁸⁾および畑中ら⁹⁾は、最も基本的な単調圧縮荷重下の鉄筋コンクリート柱部材において、横補強筋の間隔と径および軸筋の直径などを変数とした実験研究から、また、加藤ら¹⁰⁾は、軸筋および横補強筋の降伏強度、配置位置などを個々に変数とした実験研究より、圧縮軸筋の座屈におよぼす諸要因の影響を調べている。しかし、いずれの研究においても、各種要因の水準範囲が限られており、また、2.1 項で述べる軸筋の座屈時の定義の不明確さと相まって、圧縮軸筋の座屈挙動が十分に明らかになっているとは言い難い。

一方、和田ら¹¹⁾および丸山ら⁸⁾は、圧縮軸筋の座屈におよぼす諸要因の影響を解析的に検討している。しかし、それらの研究で

* 大阪大学工学部建築工学科 講師・工博
** 東急建設設計本部構造設計部

Assist. Prof., Dept. of Architectural Eng. Fac. of Eng., Univ. of Osaka, Dr. Eng.
Dept. of Structure Design, Tokyu Construction Co., Ltd.

は、軸筋の座屈に極めて大きな影響を与えると思われる、圧縮応力下のコンクリートが示す横方向膨張特性、ならびに座屈長さに影響を与えるコンクリートの破壊領域の大きさなどが考慮されていないという問題点を持っている。

本研究は、横補強筋が軸筋の座屈を直接拘束するという前述した諸研究での立場とは異なる観点に立つものである。すなわち、コンファインドコンクリート内に配筋された軸筋の挙動は、同コンクリートの性能に密接に関係するというスタンスから、軸筋の座屈挙動を調べようとするものである。その理由は、コンクリート内に配筋された普通強度の軸筋は、圧縮強度時ひずみが 0.2% 程度のプレーンコンクリートの場合でも、終局変形能力時には全塑性化すると考えられるため、座屈と密接に関係する軸筋の横方向変形は、軸筋周囲のコンクリートの横方向変形特性に大きく依存すると推測されることによる。

それ故、本研究では、コンファインドコンクリートについての基本的な影響要因を変数とする広範囲な実験研究を行い、軸筋の支持耐力低下時という明確な定義による座屈時ひずみに対する諸要因の影響を明らかにすることを試みた。

2. 軸筋の座屈時の定義

2.1 既往の研究における定義

軸筋座屈におよぼす諸要因の影響を明らかにして、その定量化を図るためには、座屈の明確な定義が不可欠である。しかし、既往の研究では以下に示すような各種の定義が用いられており、確立したものはない。

小柳ら⁶⁾は、試験体の荷重－変形曲線における勾配の変化点と、軸筋座屈の目視による確認点との対応から同変化点を座屈時としているが、判定の恣意性に問題があると思われる。また井上ら⁷⁾は、荷重－変形曲線の接線勾配の極大点時を座屈時と定義する、後述する筆者らと同様の方法を用いている。これに対し、丸山ら⁸⁾は、コアコンクリートの反対側で軸筋に貼付したひずみゲージの測定値が、軸筋の屈曲によって戻り始める時点を座屈点として与えている。この方法は座屈開始を捉える有効な方法と考えられるが、試験体の中で座屈が開始し始める位置を予め知することは極めて困難である。加藤ら¹⁰⁾は、軸筋の負担軸力がひずみ硬化後に再び降伏応力度まで低下した時点を座屈時と定義しているが、明確な物理的根拠および理由は不明である。村山ら¹²⁾は、局部焼き入れ部分において直接測定した軸筋の圧縮応力が、試験柱の曲率の単調変化時において増加から減少に転じる時点を座屈時と明快に定義している。しかし、丸山らの場合と同様、局部焼き入れ部分と座屈開始位置との対応づけに困難さがあると思われる。

筆者らは、座屈は軸筋の支持耐力を低下させるという観点から、試験体の荷重－変形曲線における接線勾配の変化点を座屈時と定義する方法を最初に提示し¹³⁾、その後、軸筋自身の屈曲変形の急激な増分変化性状を加味する、より推定精度の高い方法を提案¹⁴⁾してきた。しかし、この方法においても、コンクリートが超高強度などで、試験体の全圧縮荷重に占める軸筋の支持耐力の割合が相対的に小さい場合には、軸筋の支持耐力低下点、す

なわち軸筋の座屈時の判定が難しくなる傾向が見られた¹⁵⁾。

2.2 本研究における定義

軸筋の支持耐力の低下、あるいは軸ひずみの戻りから直接的に軸筋の座屈時を定義および判定することが最も明快であると思われる。しかし、前述したように軸筋の座屈開始位置を予め知るとは極めて困難である。

したがって、本研究では、軸筋の局部ひずみを追跡する方法ではなく、軸筋の全体的な屈曲状況から座屈時を推定する方法を採用した。すなわち、軸筋の横方向変位測定値から屈曲曲線を推定し、同曲線における最大横変位位置を座屈開始位置、およびその位置における断面縁ひずみの戻り開始推定時点を、軸筋の座屈時と判定する方法を採用した。

図1は、後述する本実験における試験体の軸筋の横方向変位の測定結果例である。すなわち、同図中に添え図として示した試験体の荷重(P)－ひずみ(ϵ)関係での各载荷ステップにおける軸筋の横方向変位 δ ($=\sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2}$; δ_x, δ_y : 直交2方向での測定値)の材軸方向についての測定結果の一例である。同図によれば軸筋の屈曲の状況は、いずれの载荷ステップにおいても、座屈長さ測定値(l)を半波長とするsin曲線で良好に近似できると判断される。それ故、軸筋の横方向変位(δ)の材軸方向の

図1 軸筋横方向変位の材軸方向の分布
[試験体:F3Y4C3D19P2C]

図2 軸筋断面のひずみ分布

図3 軸筋耐力低下点の判定の一例
[試験体:F3Y4C3D19P2C]

分布を $x = l/2$ で $\delta_{\max}$ となる(1)式で近似し、同式に、ある測定位置とそこにおける横方向変位測定値 ($x, \delta(x)$); ここでは測定横方向変位の最大位置を採用) を代入すれば、各載荷レベルにおける屈曲曲線、具体的には $\delta_{\max}$ とその位置が推定できることになる。また、たわみと曲率の関係から、屈曲曲線が(1)式で近似される場合、軸筋の断面曲率は $\delta_{\max}$ 位置で最大値 $\kappa_{\max}$ を示し、両者の関係は(2)式で与えられる。

$$\delta(x) = \frac{1}{2} \delta_{\max} \sin\left(\frac{2\pi x}{l} - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{1}{2} \delta_{\max} \quad (0 < x < l) \quad (1)$$

$$\kappa_{\max} = \kappa\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{2\pi^2}{l^2} \delta_{\max} \quad (2)$$

次に、座屈時の判定条件について述べる。図2は圧縮力を受けて屈曲した軸筋(直径が ϕ) の断面ひずみ分布を模式的に示したものである。同図によれば、圧縮軸ひずみ増分 $\Delta \varepsilon_c$ と曲げ変形による曲率変化 $\Delta \kappa$ が生じた状態下での小さい方の断面縁ひずみ増分 $\Delta \varepsilon$ は(3)式で与えられる。

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_c - \frac{\phi}{2} \Delta \kappa \quad (3)$$

ここで、 $\Delta \varepsilon$ が負になると、すなわち、コンクリートの横拘束の程度によって変化するコンクリートの横膨張変形、および屈曲による軸力の偏心などによって軸筋の曲げモーメントが増大し、 $\Delta \varepsilon$ が負となり断面縁ひずみの戻りが生じると、軸筋負担力の減少が生じ、座屈時と判定される。したがって、座屈時の判定条件式は、(3)式の右辺に推定屈曲曲線の $\delta_{\max}$ 位置における曲率増分 $\Delta \kappa_{\max}$ を代入して、 $\Delta \varepsilon < 0$ とすることから(4.1)式のように得られる。さらに同式は(2)式の関係を用いると(4.2)式となる。なお、(4)式において座屈長さ l は、測定値のバラツキによる影響を避けるため、測定結果を整理して得られた座屈長さと軸筋の関係¹³⁾による推定値(D13, D19, D25に対し $l = 160\text{mm}, 200\text{mm}$, および 250mm)を用いた。

$$\frac{\Delta \kappa_{\max}}{\Delta \varepsilon_c} > \frac{2}{\phi} \quad (4.1) \quad \text{または} \quad \frac{\Delta \delta_{\max}}{\Delta \varepsilon_c} > \frac{l^2}{\pi^2 \phi} \quad (4.2)$$

図3に、(4.2)式による軸筋耐力低下点の判定の一例を示す。同図は、同一試験体に配筋された2本の軸筋の $\delta_{\max} - \varepsilon_c$ 関係、および $\Delta \delta_{\max} / \Delta \varepsilon_c - \varepsilon_c$ 関係を示したものである。同図中に(4.2)式の不等号を等号とした直線を併記しているが、座屈時は同直線と $\Delta \delta_{\max} / \Delta \varepsilon_c - \varepsilon_c$ 関係との交点(○印)で明かに判定できることが分かる。なお、 $\Delta \delta_{\max} / \Delta \varepsilon_c - \varepsilon_c$ 関係にはバラツキがあるため、座屈時としては最も大きい ε_c となる交点を採用している。また、本方法による軸筋の座屈時は文献¹³⁾に示

す筆者らの既往の判定法で用いていた、 $\Delta \delta_{\max} / \Delta \varepsilon_c - \varepsilon_c$ 関係における勾配の変化点(同図中↓印)ともほぼ一致している。

3. 実験概要

実験は、表1に示すように3つのシリーズで構成され、コンファインドコンクリートについての基本的影響要因である、横補強筋の間隔、形状、拘束応力指標 ($P_s \sigma_{sy}$)¹⁶⁾、降伏強度およびコンクリート強度ならびに軸筋の直径を実験変数として取り上げた。

実験1は、横補強筋位置で様な拘束力が与えられる、基本となる円形横補強筋の場合において、軸筋の座屈時ひずみにおよぼす、横補強筋間隔比 ($S/D = 0.1, 0.2, 0.35, 0.7, 1.0$)、拘束応力指標 ($P_s \sigma_{sy} = 3.0, 5.5, 8.0\text{MPa}$) および軸筋の直径(D13, D19, D25)の影響を調べるものである。ここでは、コンクリート強度および横補強筋降伏強度はそれぞれ一定とし、30MPa級および400MPa級のものをを用いた。実験2では、軸筋の座屈時ひずみにおよぼす材料強度の影響、すなわちコンクリート強度 ($F_o = 30, 60, 90\text{MPa}$ 級) および横補強筋降伏強度 ($\sigma_{sy} = 400, 800, 1300\text{MPa}$ 級)の影響を、円形横補強筋の場合において調べている。実験3では、角形横補強筋の形状(口型、囲型)と降伏強度、およびコンクリート強度が軸筋の座屈時ひずみにおよぼす影響を調べている。

なお、実験2および実験3では、拘束応力指標 ($P_s \sigma_{sy}$) の計画値および横補強筋間隔比 (S/D) をそれぞれ5.5MPaおよび0.2の一定とした。これは、標準的な大きさの柱部材において、普通強度から高強度な鉄筋を用いるとしたときに、靱性確保に必要な $P_s \sigma_{sy}$ の平均的な値、ならびに S/D の上限的な値にそれぞれ対応している。

試験体は図4に示すように、外径が200mmの円形断面(実験1および実験2)ならびに200×200mmの角形断面(実験3)をもつ、高さが600mmのかぶりコンクリートをもたない柱試験体である。試験区間は試験体中央部の400mm区間で、その両端にある100mmの端部領域には約20mmのピッチで横補強筋を配筋し、またコンクリート打設側の上端面にはセメントペーストによるキャッピングを施した。なお、本試験体はかぶりコンクリートを有しないが、これは以下のような理由による。すなわち、プレーンコンクリートであるかぶり部は軸筋座屈時に比べ、早期なひずみ段階で圧壊するため、座屈におよぼす影響は小さいと考えたこと、また、かぶりのない基本的な状態での軸筋の座屈挙動に注目したことによる。

使用した軸筋は、図5に示すように、いずれも表1に示される降伏強度をもつ、明確な降伏棚を有するものである。また、横補強筋は、PC鋼棒用ラインで製造した各種直径を有するほぼ真円断面の線材に、熱処理を施して所定の降伏点強度としたもので製作した、円形スパイラル筋および閉鎖型角形横補強筋である。コンクリートは、セメント、細骨材および粗骨材としてそれぞれポルトランドセメント、最大粒径20mmの碎石および最大粒径5mmの砕砂を用いた、表2に示す調査をもつものである。使用した材料の力学特性は表1中に併記している。

図6に載荷および測定方法を示す。載荷は5MN圧縮試験機を用いて行い、載荷速度は手動調節した。また、球座は載荷荷重

の偏心を取り除いた後に固定した。試験体の軸ひずみは、図4に示すように、試験体中央の400mm区間を測定検長として、ダイヤルゲージ式変位変換器を用いて測定した。軸筋の横方向変位の測定は、試験区間の数カ所で露出させた軸筋部分に点溶接した金具に互いに90度をなす2本のインバー線を緊結し、その他端でダイヤルゲージ式変位変換器を用いて行った。また、横補強筋の局部に作用する曲げモーメントと軸力を測定するため、コアコンクリート側(内側)と外側の対称位置に検長2mmの箔ゲージをそれぞれ貼付した。

4. 軸筋の座屈におよぼす諸要因の影響

図7～12に、取り上げた諸要因をそれぞれ変数とする試験体のグループ毎に、試験体の荷重－軸ひずみ－軸筋横方向変位関係、および横補強筋の局部に作用する曲げモーメント(M)と軸力(N)の無次元化関係($M/\pi r^3 \sigma_{sy}$ と $N/\pi r^2 \sigma_{sy}$ の関係)をそれぞれまとめて示す。ここで、軸ひずみは検長400mm区間での平均ひずみ、軸筋の横方向変位は2.2項で述べた、各載荷ステップにおける軸筋の屈曲変形の近似化から得られる最大横方向変位量(δ_{max})である。また、横補強筋の無次元化M-N関係は、 δ_{max}

表1 試験体概要

	試験体		軸筋	横補強筋		形状	$P_s \sigma_{sy}$	S/D	Fo
	試験体名	体数	呼名	σ_{sy}	ϕs				
実験1	F3Y4	D19P2C	2	D19	395	6.2 391	3.0	0.2	40
		C5	2		8.4 412	5.7			
		C8	2		10.1 390	7.8			
	F3Y4C5	D13	2	D13	316	8.4 412	5.7	0.2	4.0
		D19	2	D19	395	8.4 412	5.7	0.2	4.0
		D25	2	D25	404	8.4 412	5.7	0.2	4.0
	F3Y4C5D19	P1	2		5.9 394	5.4 0.1	20		
		P2	2		8.4 412	5.7 0.2	40		
		P3	2	D19	395	11.1 386	5.3 0.35	70	
		P7	2		15.7 403	5.6 0.7	140		
		P10	1		18.7 382	5.2 1.0	200		
実験2	F3	Y4	2		8.4 405	6.0 820	5.5	0.2	40
		Y8	2		4.6 1310	4.6 1310	5.5	0.2	40
		Y13	2		8.4 405	6.0 820	5.5	0.2	40
	F6	Y4	2	D19	392	4.6 1310	5.5	0.2	40
		Y8	2		8.4 405	6.0 820	5.5	0.2	40
		Y13	2		4.6 1310	4.6 1310	5.5	0.2	40
	F9	Y4	2		8.4 405	6.0 820	5.5	0.2	40
		Y8	2		4.6 1310	4.6 1310	5.5	0.2	40
		Y13	2		6.0 820	4.6 1310	5.5	0.2	40
実験3	F3Y8C5D19P2A	1	D19	392	6.0 820	4.2 802	5.5	0.2	40
	F3Y8C5D19P2B	1			4.2 802	4.2 802	5.5	0.2	40

試験体名: F3 Y8 C5 D19 P2 A

横補強筋形状... A:□型 B:圓型 C:○型
 S/D..... P1:0.1 P2:0.2 P3:0.35 P7:0.7 P10:1.0
 軸筋径..... D13:D13 D19:D19 D25:D25
 平均拘束応力度($P_s \sigma_{sy}$ [MPa])... C3:3.0 C5:5.5 C8:8.0
 横補強筋降伏応力度(σ_{sy} [MPa])... Y4:400 Y8:800 Y13:1300
 プレーンコンクリート強度(F_o [MPa])..... F3:30 F6:60 F9:90
 σ_{sy} :軸筋降伏応力度(MPa), ϕs :横補強筋径(mm), P_s :横補強筋面積比 $= (n+2)a_s/S \cdot D$
 a_s :横補強筋断面積(cm^2), S:横補強筋間隔(mm), D:試験体の直径および一辺長さ(=200mm)

表2 コンクリートの調合 (単位:kg/cm³)

コンクリート計画強度	W/C	C	CF	S	G	SP
30MPa	55	336	—	794	1013	4.3
60MPa	35	500	—	693	1005	8.5
90MPa	25	595	105	566	925	24.5

W/C:水セメント比(%), C:セメント, CF:シリカヒューム

S:細骨材, G:粗骨材, SP:高性能減水剤(レオビルドSP-8HS)

位置に最も近い位置で得られたものである。なお、図7～12中における白抜きの記号(○, □, △, ◇, ▽)は、2.2項の方法により推定された軸筋の座屈時点を示す。黒印の記号(●, ■, ▲, ◆, ▼)は、試験体の最大強度時点を示す。無次元化M-N関係には、横補強筋断面の降伏および全塑性M-N($yM-N$ および $pM-N$)相関関係も併記している。なお、同一種の試験体では、ほぼ同様の荷重－軸ひずみ－軸筋横方向変位関係、横補強筋の軸力－曲げモーメント関係などが得られたので、図7～図12には、平均的な結果を代表として示している。

図4 試験体配筋図

図5 軸筋の引張応力度－ひずみ度関係

図6 載荷および測定方法

4.1 S/Dの影響

図7は、基本となる円形横補強筋を対象とした実験1で、同量の $P_s \sigma_{sy}$ および同径の軸筋を有する試験体を用いて、軸筋座屈におよぼす横補強筋間隔の影響を調べた結果である。

$P_s \sigma_{sy}$ が同じために、太い横補強筋を粗いピッチで配筋したS/Dが1.0の試験体の場合、最大強度(ピーク点)後、脆性的に破壊して軸筋の横方向変形が急激に増加し、軸筋の座屈時は最大強度時で与えられた。また、横補強筋断面の応力状態を無次元化による(M,N)関係で示した同図(b)によれば、本試験体(▽印)では横補強筋断面の(M,N)応力状態は最終段階まで弾性域に留まっており、横補強筋は軸筋およびコンクリートに対し十分な拘束効果を発揮していない。

S/Dが0.7の場合、同じ軸ひずみ時における軸筋の横方向変位は、S/Dが1.0の場合に比べ抑制されており、軸筋の座屈時は試験体の最大強度(ピーク点)時を少し超えた段階となった。しかし、同図(b)によれば本ケースの場合でも、座屈時(◇印)における横補強筋断面の(M,N)応力状態は弾性状態にあり、横補強筋の拘束効率としてはまだ低い。なお、S/Dが0.7の本試験体の場合、横補強筋の間隔は14cmで、主筋径(D19)の約7倍程度と、指針等¹⁷⁾で座屈防止のための規定値とほぼ同程度の値であるが、横補強筋による主筋の座屈防止作用としては、上之園らも指摘する¹⁸⁾ように十分とは言えない結果となっている。

S/Dが0.35の場合、図7(a)に示されるように、最大強度(ピーク点)時以降においても軸ひずみ増分に対する横方向変位の増加は抑制され、軸筋の座屈時ひずみはS/Dが0.7の場合に比べ著しく増加している。横補強筋断面の(M,N)応力状態も同図(b)に示されるように、試験体の最大強度(ピーク点)時には全塑性状態に漸近し、また座屈時にはpM-N曲線に達しており、横補強筋の拘束効果は十分に発揮されていると判断される。なお、S/Dが0.35程度となると試験体の荷重-軸ひずみ関係は顕著に粘り強いものとなるが、これは、コンファインドコンクリートとして粘り強いものに变化してきたことを示すものと考えられる。

S/Dが0.2以下の場合、軸筋の横方向変形は一層抑制され、軸筋の座屈時ひずみは一層大きなものとなる。また、横補強筋断面の(M,N)応力状態も図7(b)に示すように、試験体の最大強度(ピーク点)時からほとんど全塑性化しているので、軸筋の横方向変位はコンファインドコンクリートの横方向変位とほぼ同様の挙動を示していると推測される。

4.2 $P_s \sigma_{sy}$ の影響

図8は、 $P_s \sigma_{sy}$ のみが異なる円形試験体の結果を比較したものである。同図(b)によれば、S/Dは0.2と横補強筋間隔が小さいため、いずれの試験体の場合でも、横補強筋断面の(M,N)状態は、試験体の最大強度(ピーク点)時には全塑性化し十分に横拘束効果を発揮している。したがって、拘束応力指標が大きい場合ほど、コンクリートの横膨張変形は十分に拘束される。その結果、同じ軸ひずみ度における軸筋の横方向変形も顕著に減少し、かつ $\Delta \delta_{\max} / \Delta \epsilon_c$ も減少するため、軸筋の座屈時ひずみは増大した。(試験体F3Y4C8D19P2Cでは、軸ひずみ6%においても軸筋の座屈は生じなかった。)

(a) 荷重-軸ひずみ-軸筋横方向変位関係

(b) 横補強筋の軸力-曲げモーメント関係

図7 S/Dの影響

4.3 軸筋径の影響

図9は、軸筋径を変数とした円形試験体の結果を比較したものである。同図(a)によれば、各試験体の最大強度(ピーク点)時以降の荷重-ひずみ関係は、軸筋の降伏荷重の差程度を相違とする、ほぼ同様な曲線となっている。また、 $\delta_{\max} - \epsilon_c$ 関係も類似なものとなっているが、これは、横補強筋が同一で、コンファインドコンクリートとしての特性が同じであることに起因すると考えられる。一方、軸筋の横方向変位および軸ひずみが同じ場合、軸筋径が大きな程、曲げ変形による最外縁ひずみも大となるため、最外縁ひずみが増加から減少に転ずる時点である座屈時は早期に現れると推測される。しかし、本実験では、軸筋の座屈時ひずみにおよぼす軸筋径の影響は明確ではなく、その値はほぼ同程度のものであった。

4.4 σ_{sy} の影響

図10に、横補強筋降伏強度を変数とした円形試験体の結果を比較する。同図(a)によれば、軸筋の座屈時ひずみは、横補強筋の降伏強度が高い場合の方が小となる傾向がみられた。この原

(a) 荷重-軸ひずみ-軸筋横方向変位関係

(a) 荷重-軸ひずみ-軸筋横方向変位関係

(b) 横補強筋の軸力-曲げモーメント関係

図8 $P_s \sigma_{sy}$ の影響

(b) 横補強筋の軸力-曲げモーメント関係

図9 軸筋径の影響

因として次のようなことが考えられる。 $P_s \sigma_{sy}$ が同量の場合、横補強筋の降伏強度が高くなると、横補強筋の径が小となるため、軸筋の横方向変形に対する抵抗性剛性が小さくなる。また、同図(b)に示されるように、降伏ひずみが大となるため、軸筋の座屈時においても σ_{sy} が 1300MPa 級では横補強筋断面は全塑性状態に達しておらず、全塑性に対する効率の低いことなどが考えられる。

4.5 F_c の影響

プレーンコンクリートでは強度が大になると、荷重-軸ひずみ関係は弾性的なものとなり、圧縮破壊近傍での横方向ひずみも小となる。また、破壊は脆性的に起こり横方向ひずみは急増することが示されている¹⁹⁾。図11は、横補強筋が同一でコンクリート強度を変数とした円形試験体の結果を比較したものである。同図(a)によれば、コンクリート強度が大なとき程、座屈時ひずみは小となる傾向がみられる。コンクリート強度が30MPa級の場合、試験体の最大強度(ピーク点)時で横補強筋断面の(M,N)応力状態は全塑性に達して、軸筋の横方向変形を十分に拘束しており、このと

きの座屈時ひずみは3%にも達する。

これに対し、コンクリートが90MPa級の場合、試験体の最大強度時および軸筋の座屈時においても軸筋の横方向変形が小さいため、同図(b)に示されるように、横補強筋断面に作用する軸力、言い換えれば横補強筋による拘束力は小さい。さらに、試験体の破壊は脆性的に生じて、軸筋の横方向変形の軸ひずみに対する増加率が急増するため、軸筋の座屈時ひずみは、試験体の最大強度時ひずみと同程度のものとなっている。このことは、軸筋の座屈防止の規定には、横補強筋の特性だけでなくコンクリート強度の影響も考慮する必要のあることを示唆している。

4.6 横補強筋形状の影響

横補強筋の拘束効果は、横補強筋に曲げモーメントが作用する角形横補強筋に比べ、フープテンションとなる円形横補強筋の方が優れていることが示されている²⁰⁾。図12は、横補強筋量($P_s \sigma_{sy}$)が同一で、横補強筋形状を変数とした試験体の結果を比較したものである。なお同図で、円形試験体の荷重が角形試験体に比べ低いのは、試験体断面積が小さいためである。同図に

(a) 荷重－軸ひずみ－軸筋横方向変位関係

(a) 荷重－軸ひずみ－軸筋横方向変位関係

(b) 横補強筋の軸力－曲げモーメント関係

図 10 σ_{sy} の影響

(b) 横補強筋の軸力－曲げモーメント関係

図 11 F_c の影響

よれば、横補強筋形状が口型の場合、最大強度(ピーク点)直後に急激な耐力低下を生じ、また、軸ひずみに対し軸筋の横方向変形も急増するため、軸筋の座屈時ひずみは小さい。これに対し、囲型の場合、サブフープの存在によってコンファインドコンクリートの性能が向上して、軸筋の横方向変形が抑制されるため、軸筋の座屈時ひずみは増大し、円形補強筋のそれに近づく傾向がみられた。同一の横補強筋量($P_s \sigma_{sy}$)および横補強筋間隔比(S/D)であっても、横補強筋形状が口型、囲型、および○型と、コンファインドコンクリートとしての性能を一層改善させるものとなる程、座屈時ひずみは大となる傾向がみられた。このことは、軸筋の座屈防止のための配筋詳細は、コンファインドコンクリートの性能と関連づけて考える必要のあることを示している。

5. 結論

主筋の座屈は、コンクリート構造における曲げ部材の終局破壊に対する1つの重要な要因である。本研究では、主筋座屈に関

する基礎資料を得るため、コンファインドコンクリート内に配筋された圧縮軸筋の単調圧縮荷重下での座屈時ひずみにおよぼす諸要因、すなわち、横補強筋の間隔、量、降伏強度、形状、および軸筋径とコンクリート強度の影響を調べた。得られた結果を以下に示す。

- 1) 軸筋断面の最外縁ひずみが戻り始めて、負担軸力が減少するという明確な物理的意味を持つ時点を座屈時と定義し、各試験体において測定した試験体の軸ひずみ－軸筋の横方向変形関係から、同時点を判定する方法を示した。
- 2) 座屈時は、軸筋の横方向変形に大きく依存するので、同変形が急増する、試験体の最大荷重以降において生じた。
- 3) 座屈時ひずみは、取り上げた諸要因によって次のような影響を受けた。
 - a) 横補強筋の間隔比(S/D)が小さくなると、またその量($P_s \sigma_{sy}$)が大きくなると、横補強筋がコンクリートを有効に拘束して、軸筋の横方向変形(δ_{max})は小となるため、座屈時ひずみは増

図 12 横補強筋形状の影響

大した。

- b)座屈時ひずみにおよぼす軸筋径の影響は明確ではなかった。
- c)横補強筋のS/Dと $P_s \sigma_{sy}$ が同じでも、降伏強度が低くて太い横補強筋をもつ試験体の方が、高く細い横補強筋をもつ試験体の場合より若干大きい座屈時ひずみを示した。
- d)同一の横補強筋の場合でも、コンクリート強度が高い場合ほど、同じ軸ひずみに対する横方向変位は大となり、座屈時ひずみは小となった。
- e)横補強筋の間隔比(S/D)、および量($P_s \sigma_{sy}$)が同一で、横補強筋形状のみが異なるとき、円形横補強筋の場合の座屈時ひずみは、角形横補強筋の場合のそれに比べ大きい。角形横補強筋の場合、サブタイおよびサブフープなどがあって、コンファインドコンクリートとしての性能が向上する場合の方が座屈時ひずみは大となった。
- 4)座屈防止のための現行の諸規定では、横補強筋の間隔（例えば、主筋径の整数倍など）および量などを独立して与えるに過ぎないものが多い。しかし、軸筋の座屈時ひずみは、横補強筋の形状、降伏強度およびコンクリート強度によっても大きな影響を受ける。これらの要因は、軸筋の横方向変位と密接に関係するコンファインドコンクリートについての主影響要因であることから、座屈防止に関する配筋規定は、同コンクリートの性能と関連づけて与えるべきものと考えられる。

謝辞

本研究に際しご助力を得た、岩井 潔君（現 竹中工務店）、ならびに横補強筋製作について多大なご援助を頂いた高周波熱錬(株)に、謝意を表します。

参考文献

- 1) NZS3101: Code of Practice for the Design of Concrete Structures, 1982, 1995
- 2) 日本建築学会: プレストレス鉄筋コンクリート(Ⅲ種PC)構造設計・施工指針・同解説, pp.132-143, 1986
- 3) 日本建築学会: 建築耐震設計における保有耐力と変形性能, pp.507-525, 1990
- 4) 鈴木計夫、中塚佑、岸本一蔵: 鉄筋コンクリート柱部材の曲げ靱性と横拘束(コンファインド)補強筋量, 材料, 第40巻, 第456号, 1991年
- 5) 鈴木計夫、中塚佑、阿波野昌幸: コンクリートはり部材断面の曲げ終局限界点に関する研究、(その1)各種終局域指標点と提案する曲げ終局限界点の存在メカニズム、日本建築学会構造系論文集, 1988, 1
- 6) 小柳治、六郷恵哲、山本智志、近藤吉信: 圧縮を受けるコンクリート中の鉄筋の座屈性状、土木学会 第44回年次学術講演会講演梗概集, 1989, 10
- 7) 井上晋、宮川豊章、藤井学: RC部材中の軸方向鉄筋の座屈に関する実験的検討、材料, 第40巻, 第456号, 1991年
- 8) 丸山久一、趙唯堅、清水敬二: 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, 1990, 5
- 9) 吉田徳雄、畑中重光、上田英明: RC柱・梁部材の圧縮筋の座屈開始時ひずみについて、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, 1992年
- 10) 加藤大介: 鉄筋コンクリート部材の主筋の座屈性状に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集, 1992, 6
- 11) 黒正清治、和田章、久保田英之: 鉄筋コンクリート部材のかぶりコンクリート剥落後の主筋座屈性状の解析、日本建築学会 電子計算機利用委員会, 第7回電子計算機利用シンポジウム, 1985年
- 12) 須田久美子、村山八洲雄、一宮利通、新保弘: 交番繰返し荷重下における柱筋の座屈挙動、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2, 1994年
- 13) 鈴木計夫、中塚佑、長田省作、井上和政: 円形横補強筋を用いた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性状、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9-2, 1987年
- 14) 鈴木計夫、中塚佑、山口善史、正田隆啓: 各種の形状の横補強筋を用いたコンファインドコンクリート内における圧縮軸筋の座屈性状、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, 1990, 5
- 15) 岩井潔、中塚佑、鈴木計夫、中川裕史: 圧縮軸筋の座屈性状におよぼす横補強筋の仕様およびコンクリート強度の影響、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.2, 1993年
- 16) 鈴木計夫、中塚佑、吉田晴彦: 円形補強筋を用いたコンファインドコンクリートの強度および変形特性、材料, 第34巻, 第376号, 1985年
- 17) 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
- 18) 上之園隆志、平石久廣、山本孝一: 高強度RCによる新時代のRC構造: 高強度材料の特性—鉄筋—、建築技術, pp.64-71, 1994, 6
- 19) 中塚佑、阪井由尚、中川裕史、鈴木計夫: 高強度材料による円形コンファインドコンクリートの強度・変形特性、日本建築学会構造系論文集, pp.129-138, 1996, 5
- 20) 中塚佑、阪井由尚、菅田昌宏、斎藤駿三、鈴木計夫: コンファインドコンクリートにおける角形横補強筋の拘束機構、日本建築学会構造系論文集, pp.61-68, 1997, 2

(1996年9月10日原稿受理, 1997年2月25日採用決定)