

## 論 文

## [2056] RC 柱・梁部材の圧縮筋の座屈開始時ひずみについて

正会員○吉田徳雄(三重大学大学院)

正会員 畑中重光(三重大学建築学科)

正会員 上田英明(三重大学大学院)

## 1. はじめに

RC 梁の曲げ終局域における変形能力の改善には、曲げ圧縮部の韌性を増大させることが特に有効であることが知られている。ところで通常 RC 梁は圧縮筋を有するため、曲げ圧縮部の韌性を論じるには、コンクリートの韌性とともに圧縮筋の座屈性状の影響をも把握しておく必要がある。筆者らは、既報[1, 2]において RC 梁の終局域の変形挙動に及ぼす圧縮筋の座屈挙動の影響を解析結果に基づいて検討した。また、圧縮筋の座屈挙動に及ぼす横補強筋並びにスラブの効果についても定量的に調べた。

本報では、これまで多くの研究者によって行われてきた柱・梁部材の圧縮筋の座屈に関する研究を取り上げ、その成果と問題点をまとめる。また、圧縮筋を有するコンクリート角柱体の一軸圧縮実験を行い、他の研究者による既往の研究結果、既報[1]および別報[3]による T 形 RC 梁の曲げせん断実験結果との比較を行う。さらに、これらの検討結果に基づき、RC 柱・梁部材の圧縮筋の座屈開始時ひずみの推定式を提案する。

## 2. 実験概要

表-1 に、本実験の概要を示す。実験要因としては、横補強筋間隔 (S) およびかぶりコンクリートの有無を取り上げた。かぶり厚さは、かぶり有り試験体では 14 [mm]、かぶり無し試験体では施工上ほぼ 4 [mm] となった。また、既報[2]および別報[3]の梁試験体の曲げ圧縮部と比較が可能となるように、コンクリートは横打ちとし、変位計固定用のねじ切り棒をセットした(図-1)。コンクリートの打ち込み方向、ねじ切り棒の影響を調べるために、縦打ち試験体 (S = 5 [cm], かぶり無し) 2 体と、ねじ切り棒無しの試験体(全要因) 8 体も同時に作成した。打ち込んだコンクリートは既報[1]の梁試験体と同強度の  $350 [\text{kgf}/\text{cm}^2]$  とした。使用した鉄筋は別報[3]の梁試験体のものと同じである。

載荷は、アクチュエータ方式の試験機を用いて、毎分  $2 \times 10^{-3}$  のひずみ速度で縦ひずみが  $30 \times 10^{-3}$  に至るまで連続載荷した。また、ひずみは供試体の上下端に取り付けた鋼製枠を介して取り付けた 2 個の変位計により測定した。なお、測定長は 17.8 [cm] である。

## 3. 既往の研究および本実験結果に基づく考察

表-1 実験概要

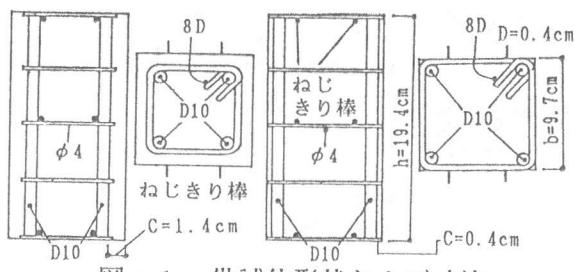


図-1 供試体形状および寸法

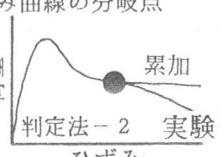
かぶり厚さ C [mm]	横補強筋			圧縮筋	
	間隔 S [cm]	断面積比 P_s [%]	力学性質	種類	力学性質
4	3	0.80	$f_s = 5000$ $f_u = 5500$ $e = 10.9$	D 10	$f_y = 4500$
	5	0.53			$f_u = 5800$
	10	0.27			$e = 29.9$
	$\infty$	0			

注)  $f_s$ ,  $f_y$ : 降伏強度 [ $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ]  
 $f_u$ : 最大強度 [ $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ],  $e$ : 伸び率 [%]

座屈に関する既往の研究を表-2に示す。本実験の座屈判定法は、表-2中に示すように、小柳・六郷らによる方法[8](判定法-1)、および鈴木・中塚らによる方法[6](判定法-2)とした。座屈開始時ひずみに関し、ねじ切り棒、およびコンクリート打ち込み方向による違いはほとんど認められなかったため、以下の考察では全ての本実験結果をデータとして取り上げた。なお、以下の考察において、図-3～6中には、便宜上、第5節で提案する座屈開始時ひずみの推定式による計算値(実線)も併示してある。

### 1) 座屈開始時ひずみに及ぼす圧縮筋径の影響

表-2 座屈に関する既往の研究

研究者	供試体	載荷方法	要因	かぶり厚さ	ひずみ測定長	座屈開始時ひずみ判定方法	表示式の項目
矢代ら[4]	異形鉄筋	中心軸圧縮単調載荷	・鉄筋径(D19, D22, D25) ・試験片長(4~20d)	なし	載荷板間	鉄筋供試体の曲率の増加開始点	
井上ら[5]	□10×40[cm]	中心軸圧縮単調載荷	・軸方向鉄筋径(D10, D13) ・横補強筋間隔(4, 6, 8cm)	なし	横補強筋間隔	破壊域と非破壊域の荷重-ひずみ曲線の分岐点のひずみを推奨	
鈴木・中塚ら[6, 7]	φ20×70[cm]	中心軸圧縮単調載荷	・軸方向鉄筋径(D13, D19, D25, D32) ・横補強筋(スパイラル筋)径(φ4, D6, D10) ・横補強筋(スパイラル筋)間隔(2~50cm)	なし	50cm	軸方向鉄筋とコンファインドコンクリートの累加荷重-ひずみ曲線と実験による荷重-ひずみ曲線の分岐点	・軸方向鉄筋の座屈長 ・座屈時の軸ひずみ
	□20×60[cm]		・横補強筋形状(タイ付) ・横補強筋間隔(3.1~7.8cm)		26.7, 40cm		
小柳・六郷ら[8]	□15×40[cm]	中心軸圧縮単調載荷	・軸方向鉄筋径(D10, D16, D22) ・横補強筋間隔(3, 6, 9, 18cm)	9mm	載荷板間	最大荷重点以降の荷重-ひずみ曲線の変曲点	
加藤ら[9, 10]	□15×53[cm]	中心軸圧縮単調載荷	・軸方向鉄筋径(φ4, D10, D13, D19) ・横補強筋間隔(2.3~9.3cm, ∞) ・横補強筋径(φ4, D6, D10)	5mm	30, 10cm	目視	・座屈発生区間の軸方向鉄筋の応力ひずみ関係
			・軸方向正負交番繰り返し載荷		32.4, 35.0cm		
島ら[11]	□30×100[cm]	水平方向正負交番繰り返し載荷(軸方向力一定)	・横補強筋間隔(3, 9cm) ・横補強筋形状	1cm	ひずみゲージ(長さ不明)	・軸筋に貼付したひずみゲージのデータ ・かぶりコンクリートの浮き出し量 ・軸筋に取り付けたワイヤーの引抜け量	・軸方向鉄筋に対する横補強筋の抵抗力(座屈防止効果)
丸山ら[12]	□18×70[cm]またはφ20×80[cm]	中心軸圧縮単調載荷	・横補強筋間隔(3, 4.5, 8cm) ・横補強筋径(φ3, φ4, D6) ・横補強筋形状 ・軸方向鉄筋比(3.1~5.1%)	約5mm	載荷板間, 35, 17.5, 14, 7, 5.8cm	・軸筋に貼付したひずみゲージによるデータ ・軸筋の横方向相対変位の急増点	

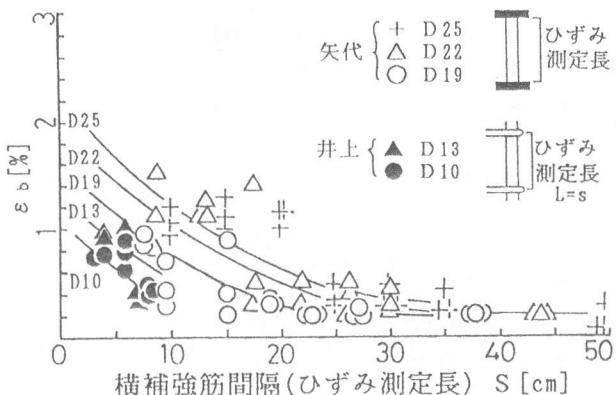


図-2 圧縮筋の座屈開始時ひずみに及ぼす  
圧縮筋径の影響

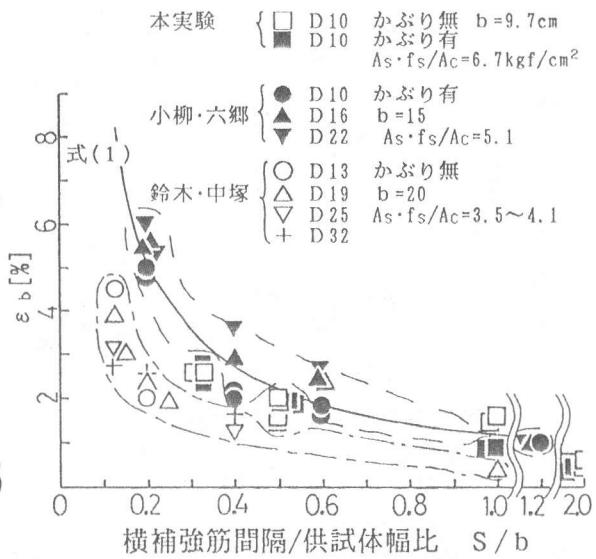


図-3 座屈開始時ひずみに及ぼす S / b の影響

図-2 に、圧縮筋の座屈開始時ひずみ( $\varepsilon_y$ )に及ぼす圧縮筋径の影響を示す。同図は、矢代ら[4]、および井上ら[5]による実験データに基づいて作成したものであり、図中にはデータの傾向を見やすくするために、鉄筋径ごとの近似曲線を描いてある。また、図中に示したように、ひずみ測定区間は、矢代らは鉄筋供試体そのものの長さ、井上らは横補強筋間隔としている。図によれば、矢代らの報告にあるように、圧縮筋径の増加にともない座屈開始時ひずみは増大する傾向があり、また、材長が 8~10 d (d:鉄筋径)以上になると座屈開始時ひずみは圧縮筋径に拘らず、0.2~0.4 [%]のほぼ一定値となるといえる。但し、圧縮筋がコンファインドコンクリート中に埋め込まれた場合には、必ずしも座屈開始時ひずみが圧縮筋径に依存するとは限らないとの指摘[6]もある。

### 2) 座屈開始時ひずみに及ぼす横補強筋間隔の影響

図-3 は、座屈開始時ひずみ( $\varepsilon_y$ )に及ぼす横補強筋間隔(S) - 供試体幅または直径(b)比の影響を示したものである。ここで取り上げたデータは、ひずみ測定長 - 供試体幅比、および供試体断面積に対する横補強筋 1 本当りの拘束応力の大きさ  $A_s \cdot f_s / A_c$  ( $A_s$ :横補強筋断面積,  $A_c$ :供試体断面積,  $f_s$ :横補強筋降伏強度、以下、単位拘束応力と呼ぶ)が比較的類似している本実験データ、鈴木・中塚ら[6]、および小柳・六郷ら[8]による実験データである。なお、本実験による  $\varepsilon_y$  の値は判定法-1 により求めた。図によれば、既に多くの研究者によって報告されているように、横補強筋間隔の減少にともない座屈開始時ひずみは双曲線的に増加する傾向がある。

### 3) 座屈開始時ひずみに及ぼす座屈判定法の影響

座屈開始時ひずみは、その判定法に大きく影響を受ける。図-3 によれば、鈴木・中塚らが得た  $\varepsilon_y$  の実験結果は他のデータの 4 割程度と小さい値となっている。その主な原因是、座屈判定法の違いであると考えられる。以下、その理由について説明する。

図-3において、座屈開始時ひずみが各研究者間で異なる理由として、①単位拘束応力  $A_s \cdot f_s / A_c$  の違い、②かぶりコンクリートの有無、③ひずみ測定長 - 供試体幅比の違い、④供試体断面形状の違い、および⑤座屈判定法の違いが考えられる。①については、拘束指標  $A_s \cdot f_s / A_c$  が 8.3~8.9 [kgf/cm<sup>2</sup>] と高い実験データも他の実験結果に比べて若干低めであった。②については、同図中の本実験データによれば、かぶりコンクリートの影響はほとんど認められない。③については、ひずみ測定長 - 供試体幅比 ( $L / b$ ) についての三者の関係が、本実験 ( $L / b = 1.8$ ) < 鈴木・中塚らの実験 ( $L / b = 2.5$ ) < 小柳・六郷らの実験 ( $L / b = 2.7$ ) である。④については、鈴木・中塚らの報告[7]によれば、 $\varepsilon_y$  の値はコンファインドコンクリートの韌性が高いほど大きくなるとされている。

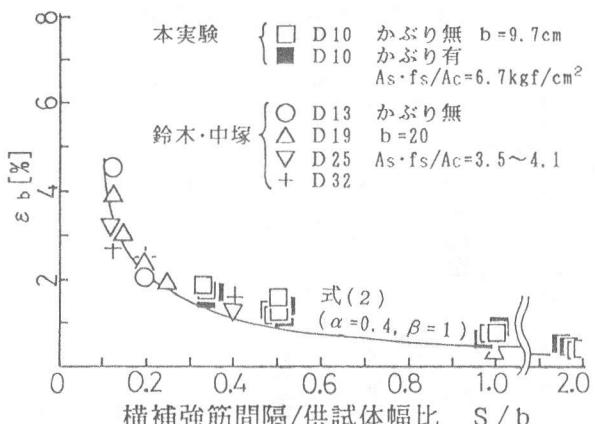


図-4 本実験データと鈴木・中塚らによる実験データとの比較

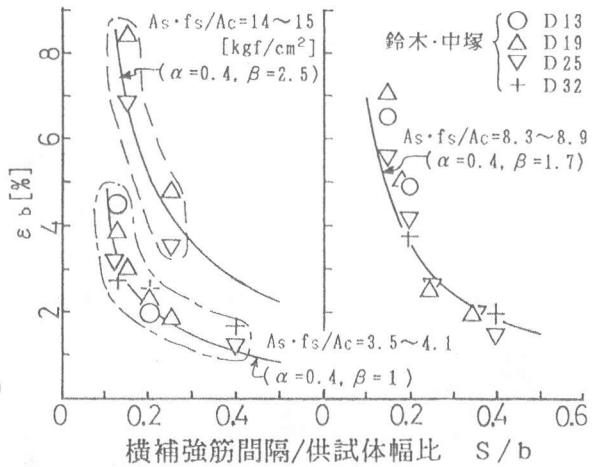


図-5 座屈開始時ひずみに及ぼすS/bの影響

一般に、円形断面供試体(鈴木・中塚ら)の方が角形断面供試体(小柳・六郷らおよび本実験)より靭性が高いため、 $\varepsilon_b$ の値は前者の鈴木・中塚らの供試体の方が大きくなると考えられる。したがって、①～④の条件の相違が、各研究者間のデータの相違の原因であると仮定すると矛盾が生じる。

図-4は、判定法-2による本実験データと、鈴木・中塚らによる実験データとの比較を示したものである。図によれば、両実験データはほぼ等しい値をとっており、このことから各研究者間のデータの相違の主な原因是、⑤座屈判定法の違いであると思われる。すなわち、座屈判定法-2による $\varepsilon_b$ の値は、判定法-1によるそれの4割程度であると推定される。ここで、実験中の目視によれば、判定法-1は圧縮筋の座屈がかなり進行した時点、判定法-2は圧縮筋が座屈を始める時点とほぼ一致する。

#### 4) 座屈開始時ひずみに及ぼす単位拘束力の影響

図-5に、座屈開始時ひずみに及ぼす横補強筋間隔-供試体幅比(S/b)の影響を、 $A_s \cdot f_s / A_c$ のレベルごとに示す。ここで取り上げたデータは、鈴木・中塚らの実験結果をそのままプロットしたものである。図によれば、 $A_s \cdot f_s / A_c$ の増加にともなう座屈開始時ひずみの増大量はかなり大きく、推定式には横補強筋の単位拘束力の影響を考慮する必要がある。

#### 4. RC梁の圧縮筋の座屈

筆者らは、既報[1]において一軸圧縮と曲げによる圧縮筋の座屈挙動の違いについて示唆した。しかし、それらの違いを裏付ける実験データはまだ少なく、RC曲げ材内の圧縮筋の座屈挙動を精度よく推定するには至っていない。ここでは、本実験データ(一軸圧縮)と、既報[2]および別報[3]のRC試験体(曲げ)から得られた実験データの比較を行う。2節で既に述べたように、一軸圧縮供試体はRC試験体の曲げ圧縮部を模擬したもので、ひずみ測定法も同じである。ここで、本報では、梁試験体から推定した $\varepsilon_b$ の値が、文献[1]で報告したものとは若干異なる。これは、既報[1]では、 $\varepsilon_b$ をモーメント低下開始時の圧縮筋のひずみとしたのに対し、本報では、圧縮筋のひずみ-曲率関係において、ひずみが急増する点としたためである。ただし、いずれの場合もひずみの平均区間は最大モーメント断面近傍の1h区間(h:梁成、図-7参照)としている。

図-6に、本実験および梁試験体から得た $\varepsilon_b$ の値の比較を示す。図によれば、モーメント勾配があり大きくない場合( $L_s = 6 h, 4.5 h$ )、両実験データの間にはさほど差はないといえる。また、梁試験体のデータに注目すれば、せん断スパン長 $L_s = 4.5 h$ および $6 h$ の試験体から得られる $\varepsilon_b$ の値はほぼ等しいのに対し、 $L_s = 3 h$ の試験体の $\varepsilon_b$ の値は、それらのおよそ $1/5$ の値となっている。これは、 $L_s$ の減少に伴ってモーメント勾配がより急になり、破壊が最大モーメン

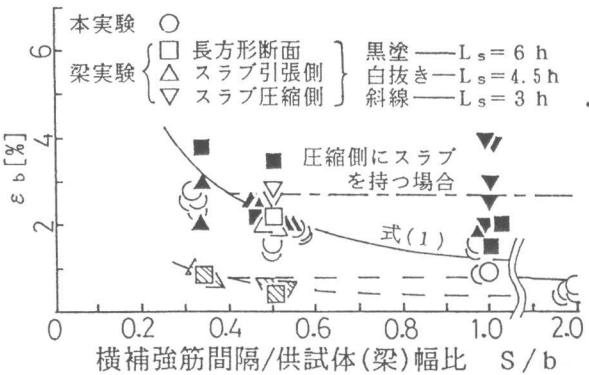


図-6 本実験データと梁による  
実験データとの比較

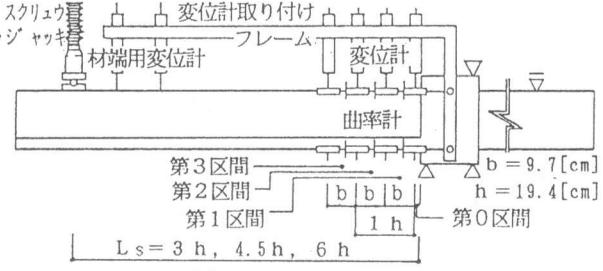


図-7 梁試験体

表-3 座屈開始時ひずみ  $\varepsilon_b$  の推定式

式(1)	$\varepsilon_b = b/S + 0.2\% [ ]$
式(2)	$\varepsilon_b = (b/S + 0.2) \cdot \alpha \cdot \beta [\%]$ $\alpha = \begin{cases} 1.0 & (\text{判定法-1}) \\ 0.4 & (\text{判定法-2}) \end{cases}$ $\beta = 1.0$ (安全側) $\beta = (A_s \cdot f_s / A_c + 5) / 8$
式(3)	$\varepsilon_b = (b/S + 0.2) \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \gamma [\%]$ $\gamma = 1.0 (L_s \geq 4.5 h), 0.3 (L_s = 3 h)$ 参考: 圧縮スラブ付きの場合、 $S/b \geq 0.4$ では $\varepsilon_b$ 一定

[適用範囲]  $0.1 \leq S/b \leq 2.0, 3.5 \leq A_s \cdot f_s / A_c \leq 15, L_s / h \geq 3$

注)   
S : 横補強筋間隔  
b : 供試体(梁)幅  
 $\alpha$  : 座屈判定係数  
 $\beta$  : 単位拘束力係数  
 $\gamma$  : 曲げモーメント  
勾配係数  
 $A_s$  : 横補強筋断面積  
 $A_c$  : 供試体断面積  
 $f_s$  : 横補強筋降伏強度  
 $L_s$  : せん断スパン長  
h : 梁高

ト断面近傍に集中するためであると考えられる。また、圧縮側にスラブを持つ場合には、長方形断面および引張側にスラブを持つ場合に比べて  $\varepsilon_b$  の値がかなり大きいが、これは既に文献[1]で指摘したように、圧縮側スラブによる座屈止め効果によるものであると推定される。

## 5. 座屈開始時ひずみ ( $\varepsilon_b$ ) の推定式の提案

筆者らは既報[1]において、RC梁内の圧縮筋の座屈開始時ひずみの推定式を提案した。ここでは、3節1)～4)で述べた  $\varepsilon_b$  に及ぼす各種要因の影響を踏まえた上で、最低限のパラメータを選択し、図-3～6中に併示した実線上的値を与える簡易式を提案する。

### 1) 基本式

図-3中の実線上の値を与える簡易式を基本式(1)とし、表-3に示す。簡易式は  $\varepsilon_b$  を  $S/b$  のみの関数とし、最小値は  $0.2\%$  である。厳密には圧縮筋径  $d$  の影響を考慮すべきであろうが、図-3～5に示したコンファインドコンクリートの実験データにおいて明確な傾向がみられないため、ここでは無視している。

### 2) 基本式の拡張

表-3の式(2)に示すように、圧縮筋の座屈判定方法の違いおよび単位拘束応力  $A_s \cdot f_s / A_c$  の影響を考慮したものへ基本式(1)を拡張する。拡張には、それぞれ圧縮筋の座屈判定方法に関する係数  $\alpha$  と、横補強筋1本当りの拘束力に関する係数  $\beta$  を用いる。図-4中の実線は、 $\alpha = 0.4, \beta = 1$ とした場合の式(2)による計算値を示している。ここで、 $\alpha = 0.4$ の値は、3.3項の考察に基づいている。図-5中の実線は、 $\alpha = 0.4$ とし、 $\beta$ を  $A_s \cdot f_s / A_c$  の増加につれて  $1.7, 2.5$  と変化させた場合の式(2)による計算値を示している。図によれば、計算値は各レベルの単位拘束応力に対する実験値を比較的よく推定しているといえる。なお、図-5で取り上げたデータより、座屈判定法-2を用いた場合( $\alpha = 0.4$ )の  $\beta$  と単位拘束力の関係として、表-3中に示すような直線式が得られた。

### 3) 基本式の梁への適用

図-6中の実線は式(1)による値を示したものである。前述のように、RC梁の圧縮筋の $\varepsilon_b$ の値は、モーメント勾配およびスラブの存在の影響を受ける。まず、モーメント勾配の影響に関しては、 $\varepsilon_b$ の値を $S/b$ に関わらず一定の割合で低減することによって表示できそうである。本研究では、 $L_s \geq 4.5 h$ の梁に対し、 $\gamma = 1.0$ 、 $L_s = 3 h$ の梁に対し、 $\gamma = 0.3$ が得られた(図-6)。また、圧縮側スラブの座屈止め効果は、横補強筋間隔の粗い場合に顕著であり、圧縮側スラブが存在する場合には、 $S/b$ の値が大きくなってしまっても(ここでは $S/b \geq 0.4$ )、 $\varepsilon_b$ の値はあまり変化しないようである(図-6中的一点鎖線)。以上より、RC梁の圧縮筋の $\varepsilon_b$ の推定式として、表-3中の式(3)が得られた。但し、圧縮側スラブの影響については、データ数が少なく、ばらつきも大きいため、さらに検討を要する。

## 7.まとめ

圧縮筋の座屈開始時ひずみについて以下の知見が得られた。

- (1) 座屈開始時ひずみは、横補強筋間隔-供試体幅比( $S/b$ )が小さいほど(図-3、4)、また、横補強筋の単位拘束応力 $A_s \cdot f_s/A_c$ が大きいほど(図-5)増大する。
- (2) 座屈開始時ひずみは、座屈開始点の判定方法によって大きく異なる(図-3)。本研究では、他の研究者の実験データと本実験データとを比較し、判定方法による差異を定量的に示した。
- (3) RC部材の圧縮筋の座屈開始時ひずみは、部材のせん断スパン比(すなわち曲げモーメント勾配)および圧縮側スラブの存在によって大きく異なる(図-6)。
- (4) 限られた実験データではあるが、上記の知見を考慮し、座屈開始時ひずみ推定式として以下の式(3)が得られた(表-3)。

$$\varepsilon_b = (b/S + 0.2) \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \gamma [\%] \quad \dots \quad (3)$$

ここに、 $\alpha$ :座屈判定係数、 $\beta$ :単位拘束力係数、 $\gamma$ :曲げモーメント勾配係数、

$b$ :供試体幅または梁幅、 $S$ :横補強筋間隔

RC部材内の圧縮筋の座屈挙動をより明確に捉えるには、ひずみ測定長に一定の基準を設けること(式(3))は、ひずみ測定長-供試体幅比( $L/b$ )が $1.8 \leq L/b \leq 2.7$ の範囲のデータに基づく)、および座屈判定方法を統一すること(式(3)中の $\alpha$ の値)についてさらに検討する必要があろう。

## [引用文献]

- [1]畠中重光・梁川幸盛・吉田徳雄: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、1991.6
- [2]畠中重光・梁川幸盛・吉田徳雄・小池狹千朗:スラブの効果を受けるRC梁の塑性変形挙動に関する研究、第13回コンクリート工学年次論文報告集、pp.293-298、1991.6
- [3]吉田徳雄・畠中重光・上田英明・小池狹千朗:スラブ付きRC梁の塑性変形挙動に及ぼす材長の影響、コンクリート工学年次論文報告集、投稿中
- [4]矢代秀雄・清水庸介:RCばかりの圧縮側に用いる異形棒鋼の圧縮実験、第12回コンクリート工学年次論文報告集、pp.269-274、1991.6
- [5]井上晋・塙田耕司・宮川豊章・藤井学:RC角柱供試体の座屈に関する実験的検討、第12回コンクリート工学年次論文報告集、pp.333-338、1991.6
- [6]鈴木計夫・中塙信・井上和正:円形横補強筋を用いたコンファインドコンクリートの応力・ひずみ特性および同コンクリート内に配筋された圧縮軸筋の座屈性状、コンクリート構造物の韌性とその評価法に関するコロキウム論文集、pp. II 21-II 32、1988.3
- [7]鈴木計夫・中塙信・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韌性とその評価法に関するシンポジウム論文集、pp. 61-68、1990.5
- [8]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座屈性状、土木学会第44回年次学術講演会講演概要集、第5部、pp.502-503、1989.10
- [9]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韌性と配筋方法に関するシンポジウム論文集、pp.41-46、1990.5
- [10]加藤大介・金谷淳二: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、第13回コンクリート工学年次論文報告集、pp.369-374、1991.6
- [11]島弘・伊藤圭一・北西隆司・水口裕之:RC橋脚における主筋座屈と韌性に及ぼす帯鉄筋配置の影響、コンクリート構造物の韌性と配筋方法に関するシンポジウム論文集、pp.33-40、1990.5
- [12]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韌性と配筋方法に関するシンポジウム論文集、pp.47-60、1990.5