

論 文

[2054] RC角柱供試体の主筋座屈に関する実験的検討

正会員 ○井上 晋（京都大学土木工学科）

塚田耕司（京都大学土木工学科）

正会員 宮川豊章（京都大学土木工学科）

正会員 藤井 学（京都大学土木工学科）

1. はじめに

コンクリートの圧縮じん性を改善する方策の一つとして、フープ筋やスパイラル筋等の横拘束筋を用いることが挙げられ、横拘束コンクリートによる部材の変形性能改善効果等についても、これまでに数多くの研究がなされてきている。しかし、一方では、十分な量の横拘束筋を配置しても、終局時には軸方向主鉄筋（以下主筋と略称する）の座屈が生じ得ることが指摘されており、主筋の座屈は鉄筋コンクリート（RC）部材の終局時を決定する重要な要因の1つと考えられているにもかかわらず、横拘束コンクリート中の主筋の座屈に関しては、近年においてその研究がようやく行われるようになったというのが現状である。これは主として、主筋座屈時の判定基準が明確でないことに起因するものと考えられ、今後は座屈判定法の確立を含め、種々要因が主筋の座屈時ひずみに及ぼす影響について明らかにしていく必要があると思われる。

本研究では、横拘束筋配置間隔 s および主筋径 d を変化させたRC角柱供試体に対して一軸圧縮試験を実施し、主筋座屈開始時を種々の方法により判定することを試み、その妥当性を検討するとともに、決定された座屈開始時ひずみに及ぼす上記要因の影響を検討することとした。

2. 試験概要

2. 1 供試体

図1に示すように、供試体は、縦×横×高さ = 10cm × 10cm × 40cm の正方形断面を有し、主筋を4隅に配置したRC角柱供試体とした。また、選定した試験要因は以下の通りである。

(1) 横拘束筋配置間隔 (s)

鈴木らの研究[1]では、横拘束筋配置間隔が主筋座屈に及ぼす影響は、 $s/D = 0.7$ 程度（D：外側で測った横拘束筋の最小寸法、図1参照）を境にして異なることが報告されている。また、丸山らの研究[2]においても、横拘束筋配置間隔の影響が大きいことが報告されている。そこで、本研究では、上述の影響の遷移領域を含むものとして $s = 4\text{cm}, 6\text{cm}, 8\text{cm}$ の3種類の横拘束筋配置間隔を選定した。これらは、 s/D の値としてはそれぞれ0.4, 0.6, 0.8に対応する。なお、本研究では、 s による影響がより顕著に現われるように、間隔 s で横拘束筋を配置する区間（試験区間）を供試体中央部に1区間だけ設け、それ以外の領域では座屈が生じないよ

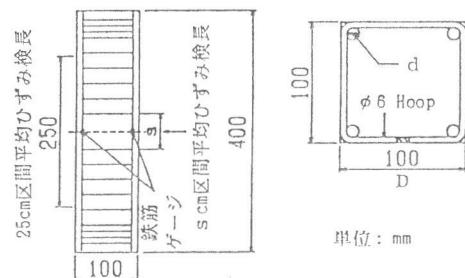


図1 供試体の形状・寸法および変位・ひずみの測定位置

表1 使用材料の諸特性

コンクリート			
円柱	角柱	円柱供試体	
442	338	3.44×10^5	
鉄筋			
種類	降伏強度 f_{sv} (kgf/cm ²)	引張強度 f_{su} (kgf/cm ²)	伸び (%)
φ 6	3060	4040	33
D 10	3300	4610	29
D 13	3560	4910	32

うに、すべて2.5cm間隔で横拘束筋を配置した。また、横拘束筋には $\phi 6\text{mm}$ 溶接型フープ筋を用い、横拘束筋に対するかぶりはすべてなしとした。

(2) 主筋径 (d)

主筋径 d の値として、本研究では、10mm (D10異形鉄筋を使用) および13mm (D13異形鉄筋を使用) の2種類を選定した。また、主筋の座屈は、それを取り囲む横拘束コンクリートの応力-ひずみ特性と密接な関係があると考えられる。ここでは、上述の主筋径を変化させた供試体に加え、主筋を有しない横拘束コンクリートのみで構成される供試体も作製し、主筋を有する供試体の試験結果と比較することにより、主筋のみの挙動を検討することとした。

供試体に用いた材料の諸特性を表1に示す。上記の要因の組合せにより主筋を有する供試体を6種類、主筋を有さない供試体を3種類、計9種類の供試体をそれぞれ3体ずつ作製した。各供試体における要因の詳細を表2に示す。

2. 2 載荷方法および測定項目

偏心が起こらないように注意しながら、供試体の耐力がかなり消失するまで単調一軸圧縮載荷を行った。この際、供試体下に配置したロードセル (容量100tonf) により載荷荷重を測定するとともに、供試体の s cm 区間における軸方向変位を、治具を介して各側面に1個づつセットした変位計 (ストローク10mm) で測定し、対面する変位計の読みより s cm 区間の軸方向ひずみを求めた。また、供試体の中央25cm区間における軸方向変位を同様に各側面に1個づつセットした変位計 (ストローク50mm) で測定し、この区間での軸方向ひずみを求めた。さらに、同一の試験要因を有する供試体3体のうちの1体においては、各鉄筋の s cm 区間の中央の部分に電気抵抗線ひずみゲージ (検長2mm) を鉄筋表面の内外に對面するように貼付し、鉄筋ひずみを測定した。変位および鉄筋ひずみの測定位置を図1に、

載荷・測定方法を図2に示す。

表2 各供試体の要因の詳細および試験結果

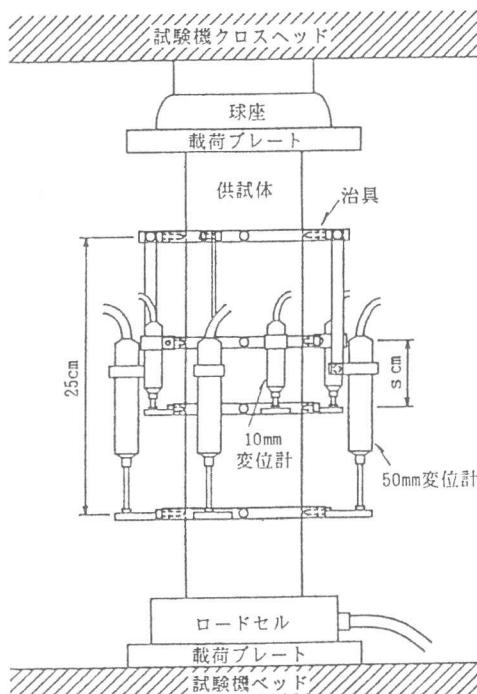


図2 載荷・測定方法

供試体 名稱	d mm	s cm	最大応力 σ_{max} kgf/cm ²	最大応力 時ひずみ $\times 10^{-6}$	座屈開始時ひずみ $\epsilon_b \times 10^{-6}$			
					I	II	III	IV
10-4-1-A -B -C	10	4	516	4588	7588	5963	8630	23150
			495	3288	7275	6075	10400	-
			514	3619	-	-	-	-
10-6-1-A -B -C	10	6	507	3700	6233	5042	18800	6233
			485	3900	8908	11617	9800	-
			470	2421	8033	8033	9590	-
10-8-1-A -B -C	10	8	495	3238	4525	3238	5770	4038
			485	4044	4044	4044	12780	-
			531	3094	5044	3094	5180	-
13-4-1-A -B -C	13	4	631	3988	-	-	-	-
			661	3806	9588	14206	15080	-
			646	3513	9150	10950	10940	-
13-6-1-A -B -C	13	6	597	2588	11096	11096	5230	4575
			478	1479	-	-	-	-
			503	2292	-	-	-	-
13-8-1-A -B -C	13	8	516	4244	4244	4244	12760	4244
			543	2575	3756	2575	10430	-
			505	1788	-	-	-	-
00-4-1-A -B -C	-	4	421	2650				
			415	4138				
			441	2994				
00-6-1-A -B -C	-	6	416	3508				
			434	4383				
			408	3138				
00-8-1-A -B -C	-	8	402	2818				
			392	3119				
			407	3188				

注) 座屈開始時ひずみの欄で - 印を付した供試体は試験区間以外でコンクリートが早期に劣化し、耐力を消失したため、座屈開始時ひずみを求めている。

3. 主筋座屈時の判定法

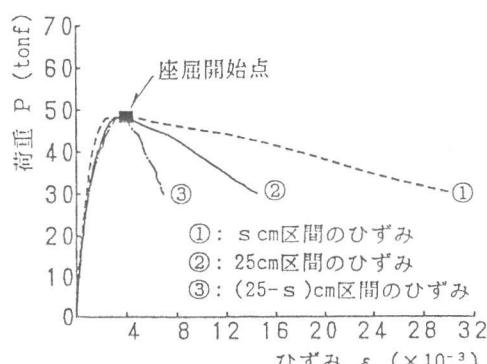
一部の供試体では、試験区間外でコンクリートが早期に劣化し、耐力を失うケースが認められたが、それ以外の供試体においてはすべて $s\text{ cm}$ の試験区間内で座屈が生じた。本研究においては、後者の供試体について、以下に示す 4 種類の方法を用いて主筋の座屈開始時ひずみを求め、それぞれの判定法の有効性を検討することとした。

I. 供試体の $s\text{ cm}$ 区間における荷重 - ひずみ曲線と 25 cm 区間に含まれる $s\text{ cm}$ 区間以外の部分（以下 $(25-s)\text{ cm}$ 区間と記述する）の荷重 - ひずみ曲線の形状から判定する方法。

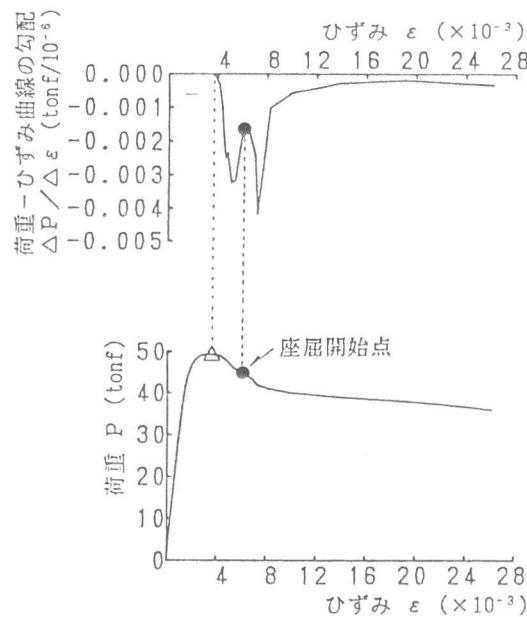
図 3-(a) に示すように、荷重を載荷し始めてから最大荷重直後までは、 $s\text{ cm}$ 区間も $(25-s)\text{ cm}$ 区間もひずみはほぼ同じように増加する。しかし、最大荷重を超えると、中央の $s\text{ cm}$ 区間で座屈が始まると、破壊領域が形成されると、 $s\text{ cm}$ 区間でのひずみが急増し、 $(25-s)\text{ cm}$ 区間のひずみの進行は微増・停止するかもしくは減少する傾向を示す。図において①は $s\text{ cm}$ 区間のひずみ、②は 25 cm 区間のひずみ、③は $(25-s)\text{ cm}$ 区間のひずみを示している。この図の ■印で示した点を境にして①は明らかに急増し、③は①に較べひずみの増加率がかなり小さくなることから、■点を座屈開始点とする。

II. 荷重 - ひずみ曲線の勾配より座屈開始時を判定する方法

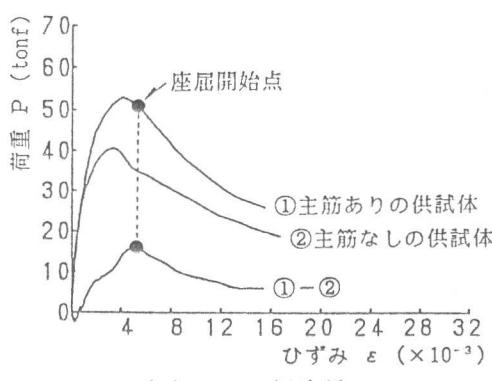
この方法は、主筋の座屈が部材に最も影響を及ぼすのは耐力低下であるという考え方による。



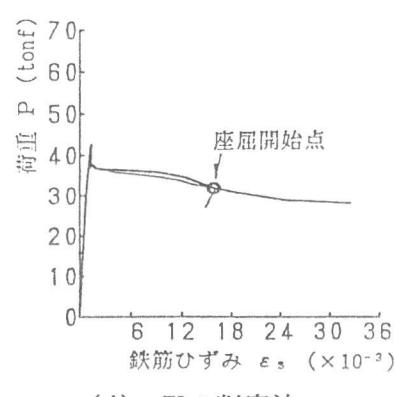
(a) I の判定法



(b) II の判定法



(c) III の判定法



(d) IV の判定法

図 3 座屈開始時判定法

基づくものであり、鈴木らの提案する判定法[1]と同様のものである。すなわち、横軸に供試体の s cm 区間のひずみ、縦軸に荷重 - ひずみ曲線の勾配 ($\Delta P / \Delta \varepsilon$) をとり、図 3-(b) のようなグラフを描く。このグラフにおいて、最大荷重（図中△印）直後急激に応力 - ひずみ曲線の勾配が負に転じ、その絶対値が増加（値としては減少）し始める。勾配は負の極大値（極小値）を経験した後再びゆっくりと増加し始めるが、これはかぶりコンクリートの圧潰、剥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る再び減少し始めるが、この極大点時（図中●印）を座屈開始時とする。これは、横拘束コンクリートそのものの応力下降勾配を一定とした場合、この極大点は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。なお、横拘束筋配置間隔 s が大きく、最大荷重直後に座屈が生じるような場合には、このような極大点は存在しないことが指摘されているが[1]、そのような場合には最大荷重時のひずみを座屈開始点とする。

III. 主筋を有する供試体の応力 - ひずみ曲線から主筋を有さない供試体の応力 - ひずみ曲線を差し引いた荷重 - ひずみ曲線から座屈開始時を判定する方法

本研究では、主筋を有する供試体と全く同じ条件を有する主筋なしの供試体を作製したが、その供試体の荷重 - ひずみ曲線を主筋を有する供試体の荷重 - ひずみ曲線から差し引くことにより、主筋の存在効果による荷重 - ひずみ曲線が求められるはずである。ここでは図 3-(c) に示すようにその最大点（図中●印）を座屈開始時とする。なお、本研究の場合、主筋を有しない供試体は同一要因につき 3 体あるため、それに対応する主筋を有する 1 つの供試体の荷重 - ひずみ曲線から、これら 3 つの供試体の荷重 - ひずみ曲線をそれぞれ差し引いたものを求め、これらより決定される座屈開始時ひずみのうち、最も小さいものをその供試体の座屈開始時ひずみとした。

IV. 主筋に貼付したひずみゲージの読みより判定する方法

丸山ら[2]は鉄筋表面の内外に對面するように貼付した電気抵抗線ひずみゲージの測定値の急激な変化点より、座屈開始時と判定することができるとしている。すなわち、図 3-(d) に示すように、主筋の座屈が始まると、内側のゲージの読みは著しく増加し始め、外側のゲージの読みが減少し始める点（図中○印）が存在し、この点を座屈開始点と考えることができる。ここでは、4 本の鉄筋について上記のような点を求め、それぞれに対応する s cm 区間ひずみのうち最も小さいものをその供試体の座屈開始時ひずみとした。

上記 4 つの判定方法を用いて求めた s cm 区間の座屈開始時ひずみ ε_b を表 2 に示す。なお、本研究では s cm 区間と 25cm 区間の両者でひずみを測定したが、破壊領域は s cm 区間を含む供試体中央部分に集中しており、また、25cm 区間に含まれる s cm 区間以外の領域の長さが異なることから、以下の考察においては s cm 区間のひずみを用いることとした。

4. 結果および考察

4. 1 座屈判定法について

図 4 は横軸に I の方法で求めた各供試体の座屈時ひずみを、縦軸に同じ供試体に対して II ~ IV の方法で求めた座屈時ひずみをプロットしたものである。

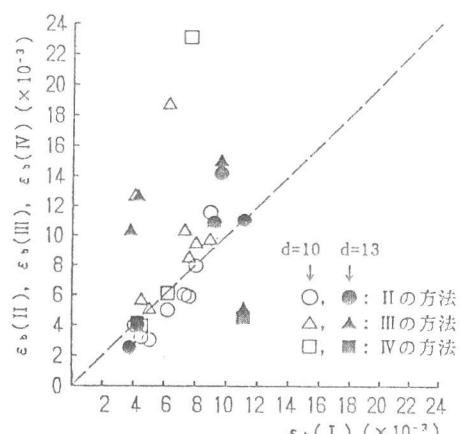


図 4 各方法で求めた座屈開始時ひずみの比較

IIの方法によって求めた座屈開始時ひずみは、Iの方法で求めたものと較べ、8000 μ 程度までの ε_0 値の範囲内では若干小さめの値を、また、8000 μ 程度以上の範囲では若干大きめの値を与える傾向があるものの、ばらつきは小さい。この傾向は、 $d = 10\text{mm}$ と 13mm で同様である。この方法は、鈴木らがこれと同様の方法で座屈時を判定し、妥当なデータが得られていることから、適切な判定方法の一つであるといえる。しかし、 $\Delta p / \Delta \varepsilon$ - 軸方向ひずみ曲線のグラフにおいて、最大荷重後の極大点を持たないもの、すなわち荷重 - ひずみ曲線において明確な耐力低下点を有しないものがあり、そのような供試体については、判定された座屈開始時ひずみが非常に不確実となる場合がある。この傾向は s が小さい供試体に多くみられる。

IIIの方法によって求めた座屈時ひずみは、 $d = 10\text{mm}$ の場合、Iの方法に較べ若干大きめの値を示し、ばらつきはIIの方法よりも大きい。 $d = 13\text{mm}$ の場合はこのばらつきはさらに大きくなる傾向がある。この場合、主筋を有しない供試体の荷重 - ひずみ曲線には、主筋の拘束による荷重増加分や横拘束と軸拘束の相互作用による荷重増加分が考慮されていないため、主筋を有する供試体の荷重 - ひずみ曲線から主筋を有しない供試体のそれを差し引いた荷重 - ひずみ曲線は、これらの影響を含んだものになる。その影響を主筋が同じであれば等しいと仮定すると、この方法により判定することは可能であると考えられるが、主筋を有しない供試体についても実験によるばらつきがあるため現象を正確に表わしているとはい難い。そのため、この判定方法は独自で用いるよりは補足的なものとして用いる方がよいといえる。

IVの方法で求めた座屈時ひずみは、Iの方法によるものとほぼ等しいものもみられるが、一方では、著しく異なる値を示すものもあり、確実性に欠けるようである。この方法は、ゲージを貼付した位置で座屈が生じる場合は有効な判定法だと思われるが、座屈する区間が多区間にわたる場合はゲージを貼付した位置で必ずしも座屈が生じるとは限らず、さらに、ひずみゲージそのものが非常に繊細なものであるため、コンクリートによる圧迫などによっても測定値が変化したり、座屈が生じる前に破損してしまうおそれがある。これらのことより、鉄筋に貼付したひずみゲージによってのみ座屈開始時を判定することは困難であり、他の方法と併用して、座屈開始時を判定することが望ましいといえる。

なお、Iの方法は、本研究で用いた供試体のように、座屈箇所や破壊領域がある程度予測される場合は非常に有効な判定方法であると考えられるが、通常の部材のように、間隔 $s\text{ cm}$ で横拘束筋を配置した区間が多数あるような場合には、

座屈・破壊領域が特定できないため、ひずみを測定する区間の選定が困難となる。

以上のように、各方法とも長所短所を有し、統一的な判断を下すことは困難である。したがって、本研究では4つの方法のうちIの方法で求めた座屈開始時ひずみを用いて各種要因の影響を考察することにした。

4. 2 横拘束筋配置間隔および主筋径が座屈開始時ひずみに及ぼす影響

図5に s/D と各供試体の座屈開始時ひずみの関係を示す。

同一の要因を有する供試体間でもばらつきが

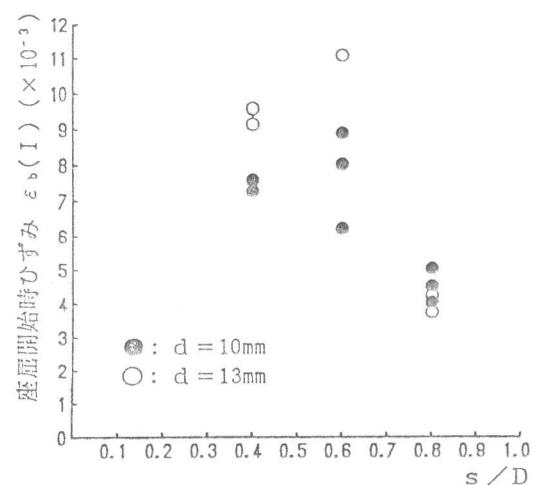


図5 s/D と座屈開始時ひずみの関係

あり、また、要因によっては、座屈開始時ひずみを算出できたものが1つしかないものもあり、明確な判断を下すことはできないが、図5のグラフより、 $s = 6\text{cm}$ と 8cm の間では座屈開始時ひずみが大きく異なり、 $s = 6\text{cm}$ とすることにより主筋の座屈時をかなり遅らせることができることがわかる。 s/D の値が0.7程度以上になると、座屈時ひずみはある一定の値をとったまま変化しないということが鈴木らの研究[1]により報告されているが、本研究の場合、この境界が $s = 6\text{cm}$ ($s/D = 0.6$) と $s = 8\text{cm}$ ($s/D = 0.8$) の間にあり、この間の差異が大きくなつたものと考えられる。一方、 $s = 6\text{cm}$ と 4cm の間では、本研究に関する限り、あまり有意な差は認められなかつた。このことは、 s を小さくすることにより座屈開始時ひずみを大きくすることが可能であるが、ある間隔よりも小さい間隔で配筋しても、その改善効果は少なくなつていくことを示唆するものであると考えられる。

また、図5より、 $s = 8\text{cm}$ の場合は $d = 10\text{mm}$ と $d = 13\text{mm}$ で同程度の座屈時ひずみを示していることがわかる。これは、 $s = 8\text{cm}$ の場合、主筋径に関係なく、座屈はいずれも最大荷重直後に生じており、横拘束筋配置間隔が大きいために主筋径の影響が現われなかつたことによるものと考えられる。一方、 $s = 6\text{cm}$ の場合は、 $d = 13\text{mm}$ のものが $d = 10\text{mm}$ の場合に較べ座屈時ひずみが 3000μ 程度以上大きくなっている。 $s = 6\text{cm}$ の場合は s/D が0.6となり s の影響が顕著となり始める領域にあり、このような領域においては、主筋径が影響が顕著となると考えられる。 $s = 4\text{cm}$ の場合は、 $d = 13\text{mm}$ のものが $d = 10\text{mm}$ のものよりもおよそ 2000μ 程度大きい座屈開始時ひずみを示している。

5. まとめ

本研究では、角柱供試体の一軸圧縮試験を実施し、主筋座屈開始時を種々の方法により判定することを試み、その妥当性を検討するとともに、その決定された座屈開始時ひずみに及ぼす横拘束筋配置間隔 s 、主筋径 d の影響を検討した。本研究で得られた主な結果を以下にまとめる。

(1) 本研究で用いた供試体については、本文中のIの方法のように、ある一定検長でひずみを測定すると同時にその検長内で局部的なひずみを測定し、これらの相対関係により判定する方法、およびIIの方法のように、荷重-ひずみ曲線の勾配($\Delta P/\Delta \varepsilon$)から、座屈開始時を判定する方法が有効であった。

(2) 主筋に貼付したひずみゲージにより座屈時を判定する方法および主筋を有する供試体の荷重-ひずみ曲線から主筋を有しない供試体の荷重-ひずみ曲線を差し引いたものにより判定する方法は、得られた座屈開始時ひずみが他の要因に影響される場合があり、補助的なものとして用いることが望ましい。

(3) 横拘束筋配置間隔 s の影響は $s = 8\text{cm}$ と 6cm の間で著しく、 $s = 8\text{cm}$ から 6cm とすることにより、座屈開始時ひずみは著しく増加する。一方、 $s = 4\text{cm}$ と 6cm の間で顕著な相違は認められない。また、主筋径 d の影響は、 $s = 6\text{cm}$ および 4cm で顕著に認められ、主筋径が大きいほど座屈開始時ひずみは大きくなる。

参考文献

- 1) 鈴木計夫ら：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鉄筋の座屈性状、コンクリート工学年次論文報告集、9-2, pp.151-156, 1987.7
- 2) 丸山久一ら：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じん性と配筋方法に関するシンポジウム論文集, pp.47-60, 1990.5