

論文

[2070] 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

岩井 潔^{*1}、中塚 佑^{*2}、鈴木計夫^{*3}、中川裕史^{*4}

1. はじめに

コンクリート曲げ部材において、圧縮主筋の座屈は曲げ圧縮部の合力の低下を生じさせるばかりでなく、その顕著な屈曲に起因する横補強筋の破断、さらには逆方向荷重時の引張力による軸筋それ自身の破断などを引き起こす。それ故、主筋座屈時はコンクリート曲げ部材の重要な終局限界点の一つと考えられる。

本研究はコンクリート曲げ部材における圧縮軸筋の座屈性状を明らかにするための第一段階のものである。すなわち、一軸圧縮力をうけるコンファインドコンクリート中に配筋された圧縮軸筋の座屈性状におよぼす横補強筋の形状、降伏強度およびコンクリート強度の影響を調べ、座屈性状がコンファインドコンクリートの力学特性に密接に関連することを示す。同時に、本実験データならびに既往の実験データとから、適用範囲の広い座屈時ひずみ(以下 ε_{BU} と略記)推定式の誘導を試みたものである。

2. 実験概要

実験はその概要を表1に示すように、実験I、IIおよびIIIで構成されている。実験Iは、圧縮軸筋の座屈時ひずみ(ε_{BU})に及ぼす横補強筋の形状の影響を調べるためのもので、形状を□形から■形まで変化させている。実験IIは、コンクリート強度の影響を調べるためのもので、強度が

表1 実験概要

実験名	試験体		軸筋		横補強筋			Ps	σ_{sy}	S/D		Fo
	試験体名	体数	ϕ	σ_{sy}	ϕ	σ_{sy}	形状			S	D	
実験 I	Sシリーズ Lシリーズ	II S-a	2	D19	3920	8.8	3220	□	50.2	0.19	3.9	300
		II S-b	2			D6	4285	田	49.1	0.19	3.7	
		II S-c	2			5.4	3500	田	51.7	0.16	3.1	
		II S-d	2*			5.6	3150	田	53.9	0.18	3.6	
		II L-a	2			12.5	3160	□	52.4	0.37	7.4	
		II L-b	2			D10	3690	田	60.4	0.36	7.2	
		II L-c	2			8.8	3470	田	54.1	0.39	7.8	
		II L-d	2			7.9	3120	田	54.6	0.35	7.0	
		Plain	II-P			2	--	--	--	----	--	
実験 II	Sシリーズ Lシリーズ	S40-e	2	D19	3920	8.8	3260	○	55.1	0.18	3.6	380
		S60-e	2*									580
		S80-e	2									850
		S40-c	1									380
		S60-c	1									580
		S80-c	1			850						
		L40-e	2			12.7	3340	○	54.9	0.39	7.7	380
		L60-e	2									580
		L80-e	2									850
実験 III	Sシリーズ	III Y4-3e	2	D19	3840	8.4	4270	○	59.1	0.2	4.0	380
		III Y8-3e	2			6.0	8290		58.6			
		III Y13-3e	2			4.6	12820		53.2			
		III Y4-6e	2			8.4	4270		59.1			
		III Y8-6e	2			6.0	8290		58.6			680
		III Y13-6e	2			4.6	12820		53.2			

Ps:横補強筋面積比 σ_{sy} :鉄筋降伏強度(kg/cm²) S:横補強筋t²φ(cm) D:横補強筋一辺寸法(cm) φ:鉄筋径(mm)
Fo:ブレンコンクリート強度(kg/cm²) *計画数は2体としたが、打設不良のため試験体数は1となった。

- *1 大阪大学大学院 工学研究科 建築工学専攻 (正会員)
 *2 大阪大学講師 工学部建築工学科 工博 (正会員)
 *3 大阪大学教授 工学部建築工学科 工博 (正会員)
 *4 東急建設(株) 建築構造設計部 工修 (正会員)

380、580および850(kg/cm²)であるコンクリートを用いている。また実験Ⅰ、Ⅱのそれぞれの実験では、S/Dの影響の概略を把握するため、S/Dが約0.2および約0.4のSおよびLの2シリーズを行っている。実験Ⅲは、横補強筋の降伏強度を4000、8000、13000(kg/cm²)級と変化させてその影響を調べたものである。なお、いずれの実験でもコンファインドコンクリートについての基本変量である平均拘束応力 $p_s \sigma_{sy}$ は55kg/cm²(計画値)とした。また、実験ⅡおよびⅢでは、円形を横補強筋の主たる形状としているが、これは4項で示す円形横補強筋の場合を基本とする ε_{BU} 推定式の誘導に必要なデータを得るためである。

試験体は図1に示すような、20×20cmの正方形および外径が20cmの円形断面を持つ高さが60cmの角および円柱体で、いずれもかぶりコンクリートはない。試験区間は試験体中央40cmで、その両端には長さ10cmの端部ゾーンが付加されている。なお、角柱および円柱試験体の端部ゾーンは、それぞれ密な横補強筋の配置やスパイラル筋の2重配筋等によって補強されている。また、それら横補強筋は軸筋と点溶接されている。角形横補強筋の外周筋は、両端部が一辺の中央にくるように曲げ加工された鉄筋の両端部を突き合せ溶接して閉鎖形としたもので、サブタイは外周筋と重なり合う部分で突き合せ溶接されている。試験体の製作には、表2に示す調合および力学特性を持つコンクリートを使用した。

図2に、載荷および測定装置を示す。載荷は、500tの圧縮試験機でJIS規格に準拠する載荷速度となるように手動調節して行った。試験体の軸ひずみの測定は同図に示すように、試験区間40cmを検長として、ダイヤルゲージ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同図に示すように、試験区間の3カ所で露出させた軸筋部分に点溶接した金具に緊結したインバー線、試験体の直交する2側面に平行な2方向に張り、その先端にダイヤルゲージ式変位変換器を取り付けて行った。

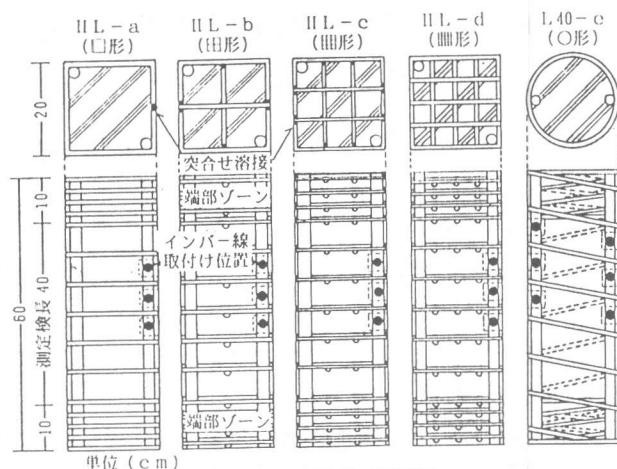


図1 試験体配筋図

表2 コンクリートの調合および力学特性

実験名	W/C (%)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	AE減水剤 (l/m ³)	高性能減水剤 (l/m ³)	F ₀ (kg/m ²)	ε ₀ (%)
実験Ⅰ	57	332	788	957	0.830	-----	300	0.208
	57	316	770	1021	0.158	1.5 ^{*1}	380	0.230
実験Ⅱ	40	438	645	1039	0.438	3.3 ^{*2}	580	0.240
	27	648	617	944	-----	12.1 ^{*2}	850	0.330
実験Ⅲ	55	336	794	1013	-----	3.71 ^{*3}	380	0.255
	35	500	693	1005	-----	8.57 ^{*3}	680	0.280

W/C:水セメント比 C:セメント S:細骨材 G:粗骨材 AE減水剤:チューボールEX-1
 F₀:圧縮強度 ε₀:圧縮強度時ひずみ *1:レオビルドSP-9HS *2:ハイブルード
 *3:レオビルドSP-8HS *4:20×20×40(cm)のブレン試験体の試験結果

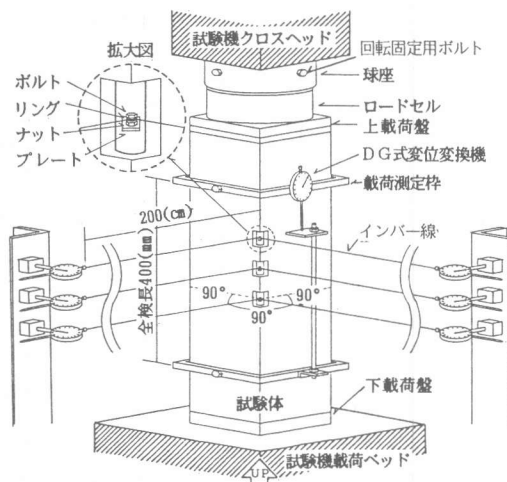


図2 載荷および測定装置

3. 実験結果

図3～5に、前報[1]で述べた方法によって判定した座屈点を書き込んだ本実験での各試験体の荷重－ひずみ($P-\epsilon$)関係を示す。ここで横軸のひずみは検長400mmの平均ひずみである。図3は、実験ⅠのSシリーズおよびLシリーズの各試験体の $P-\epsilon$ 関係を示したものであるが、いずれの形状の横補強筋の場合でもピッチが小さいSシリーズの ϵ_{BU} の方が、ピッチの大きいLシリーズのそれより大きい。また、S、Lのいずれのシリーズにおいても、横補強筋が□形の場合の ϵ_{BU} が最も小さく、田、田および田形ではほぼ同じ値となっている。このことは、軸筋および横補強筋のピッチと $p_s \sigma_{sy}$ が同じであっても、 ϵ_{BU} が横補強筋の形状の影響を受けることを示している。

図4は、コンクリート強度を実験変量とした実験Ⅱの円形横補強筋をもつ試験体の $P-\epsilon$ 関係を示したものである。S、Lのいずれのシリーズにおいても、コンクリート強度が高い場合ほど ϵ_{BU} は小さくなっており、この傾向は実験Ⅱでの形状が田形の場合においても同様であった。これは既往の研究[2]でも示されているように、コンクリート強度が高い場合ほど横補強筋のひずみは試験体の最大耐力以降急激に増大して、同じ軸ひずみに対する同ひずみは大となるため、軸筋の水平方向変位も大きくなって座屈時ひずみが小さくなったと考えられる。また、このことは ϵ_{BU} がコンクリートの素材性質にも影響を受けることを示している。

図5は、横補強筋の降伏強度(σ_{sy})が異なる実験Ⅲでの試験体の結果を示したものである。

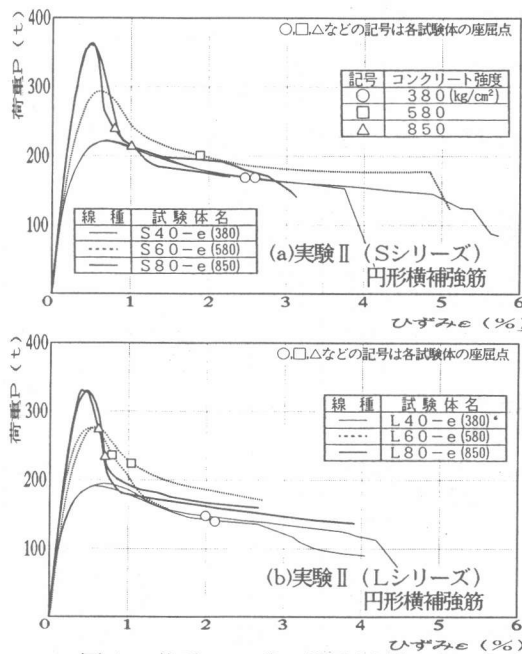


図4 荷重－ひずみ関係(実験Ⅱ)

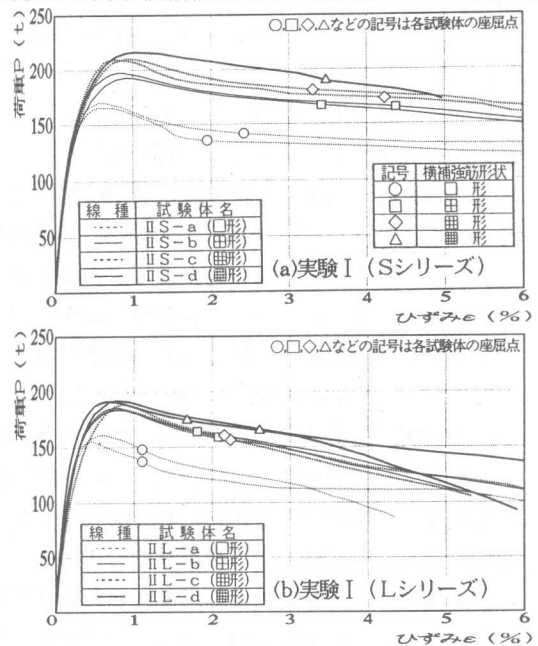


図3 荷重－ひずみ関係(実験Ⅰ)

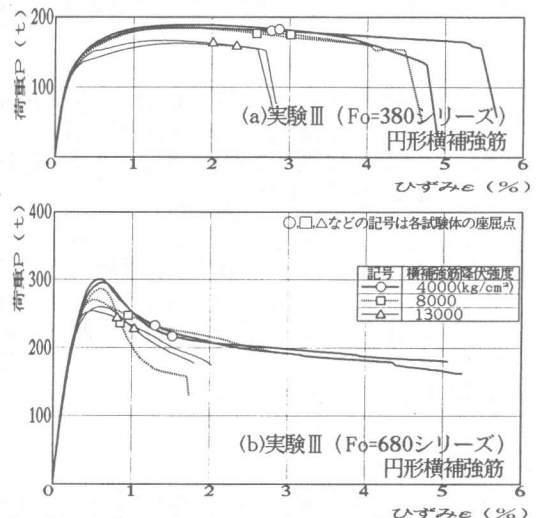


図5 荷重－ひずみ関係(実験Ⅲ)

σ_{sy} が13000級の場合の ε_{BU} の方が4000級の場合のそれよりも小さい値を示す傾向は見られるものの、 σ_{sy} 変化に対する ε_{BU} 変化の明確な傾向は見られない。しかし、 σ_{sy} が大なる場合でも図4と同様、高強度コンクリートのときの方が ε_{BU} は小さくなっている。

以上の結果は、現行の諸コードで考えられているように、 ε_{BU} が横補強筋と軸筋の関係のみで単純に決まるものではなく、横補強筋の形状、コンクリート強度等などが関係するコンファインドコンクリートの力学特性と関連して決まるものであることを示している。

4. 座屈時ひずみ (ε_{BU}) の推定式

前項において、圧縮軸筋の座屈はコンファインドコンクリートの力学特性に依存して生ずることが示された。一方、同じ横補強量($p_s \sigma_{sy}$, S/D が同一)であれば、円形横補強筋を用いたコンファインドコンクリートが最も良い力学性能を示すことが明らかにされ、円形横補強筋の場合を基本とした強度・変形特性推定式が提案されている[3]。それ故、 ε_{BU} の推定も同様の手法、すなわち、円形横補強筋の場合の ε_{BU} を基本とし、それに形状およびコンクリート強度等の影響による低減係数を乗ずる形式の ε_{BU} 算定式の誘導を試みる。

4.1 円形横補強筋の場合の ε_{BU} 推定式

横補強筋が円形である場合の ε_{BU} に関する筆者等が行った既往の実験結果[4]によれば、 ε_{BU} は横拘束力の増大によって増加する。また、ピッチ(S/D)の増大によって減少し、 $S/D > 0.7$ では無横補強の場合の ε_{BU} 、言い換えればプレーン試験体の圧縮強度時ひずみにほぼ等しくなる、ことなどが明らかにされている。図6は、その既往の ε_{BU} についての実験データを、横軸にコンファインドコンクリートについての基本変数である平

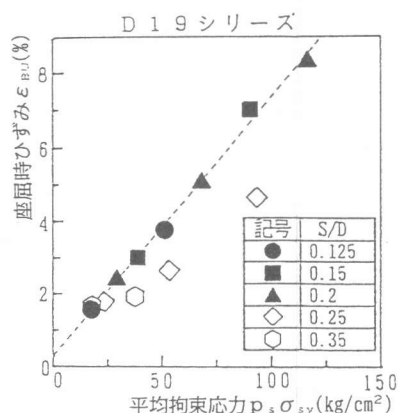


図6 ε_{BU} に及ぼす $p_s \sigma_{sy}$ と S/D の影響

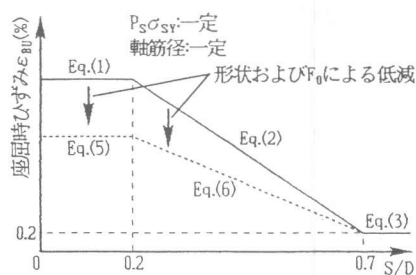


図7 ε_{BU} 推定式の定式化

《円形横補強筋および $F_0=300(\text{kg}/\text{cm}^2)$ の場合の推定式》

$$\varepsilon_{BU} = a_1(\phi) p_s \sigma_{sy} + 0.2 \quad (S/D \leq 0.2) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{BU} = -2a_1(\phi)(S/D-0.7)p_s \sigma_{sy} + 0.2 \quad (0.2 < S/D \leq 0.7) \quad (2)$$

$$\varepsilon_{BU} = 0.2 \quad (S/D > 0.7) \quad (3)$$

$$a_1(\phi) = 4.8 \times 10^{-2} + \frac{3.0 \times 10^{-2}}{\phi} \quad (4)$$

《形状およびコンクリート強度の影響を考慮した推定式》

$$\varepsilon_{BU} = a_1(\phi) a_2(n) a_3(F_0) p_s \sigma_{sy} + 0.2 \quad (S/D \leq 0.2) \quad (5)$$

$$\varepsilon_{BU} = -2a_1(\phi)(S/D-0.7)a_2(n)a_3(F_0)p_s \sigma_{sy} + 0.2 \quad (0.2 < S/D \leq 0.7) \quad (6)$$

$$a_2(n) = \frac{-0.12}{n + 0.41} \quad (7)$$

$$a_3(F_0) = \frac{380}{F_0} - 0.28 \quad (8)$$

ただし $\phi(\text{cm})$, $F_0(\text{kg}/\text{cm}^2)$, $p_s \sigma_{sy}(\text{kg}/\text{cm}^2)$ とする

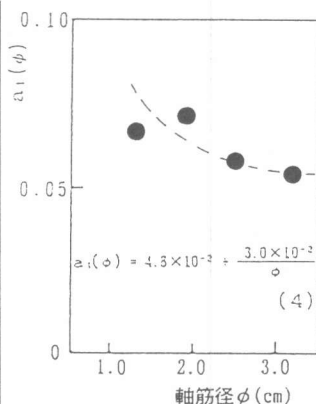


図8 ε_{BU} に及ぼす軸筋径の影響

均拘束応力($p_s \sigma_{sy}$)をとり、ピッチ(S/D)をパラメータにとって示した一例である。同図によれば、 S/D が0.2以下の場合、 $p_s \sigma_{sy} - \epsilon_{BU}$ 関係は、 S/D の値にかかわらずほぼ単一の直線によって表現できると思われる。言いかえれば、 S/D が0.2以下で $p_s \sigma_{sy}$ が同じならば、 ϵ_{BU} は同程度のものになると推測される。したがって以上の結果から、基本とする円形横補強筋の場合の ϵ_{BU} を図7に示すような、 $S/D=0.2$ および0.7で折れ曲がる3種の直線(式(1),(2),(3))で表すことにした。ここで係数 a_1 には、筆者等の既往の円形横補強筋の場合の実験データ[4]から、図8に示すような軸筋径の影響が認められるので、その影響を同図中の $a_1(\phi)$ で近似することにした。なお、この近似式はそのベースとなった実験から、 $F_0=300\text{kg/cm}^2$ のときのものとする。

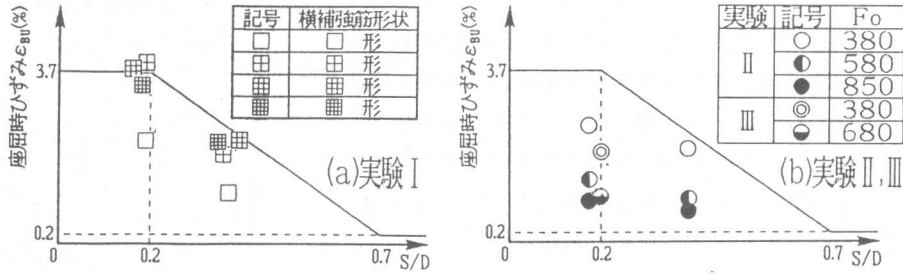


図9 座屈時ひずみ(ϵ_{BU})- S/D 関係

4.2 ϵ_{BU} 推定式の誘導

図9は各試験体の ϵ_{BU} を S/D を横軸にとって示したものである。同図(a)は横補強筋の形状の影響を調べた実験Iでの結果を、同図(b)はコンクリート強度 F_0 の影響を調べている実験IIとIIIでの結果をそれぞれ示している。なお、実験IIIのデータとして降伏強度が実験I、IIと同様である $\sigma_{sy}=4000$ 級の試験体の結果のみを示しているが、これは今回、 ϵ_{BU} におよぼす降伏強度の影響を十分明確に出来なかったためである。図9によれば、 ϵ_{BU} はサブタイ本数(n)が少なくなると、またコンクリート強度が大きくなると、同図中に実線で示される、形状が円形で $F_0=300$ の場合の基準 ϵ_{BU} 推定線よりも小さくなるのが分かる。したがって、形状および F_0 が変化する場合の ϵ_{BU} が、基準とする(1)および(2)式(円形横補強筋, $F_0=300$)の第一項に n および F_0 に関する低減係数 $a_2(n)$, $a_3(F_0)$ を乗じた(5)および(6)式で与えられるとした。それらの係数 a_2 , a_3 は次のように定めた。すなわち、実験I, IIおよびIIIの各試験体について、各要因の水準値と ϵ_{BU} 実験値を(5),(6)のそれぞれの推定式に代入すると各試験体の係数 a_2 , a_3 が求まるが、それらをサブタイ本数 n およびコンクリート強度 F_0 を横軸にとって整理

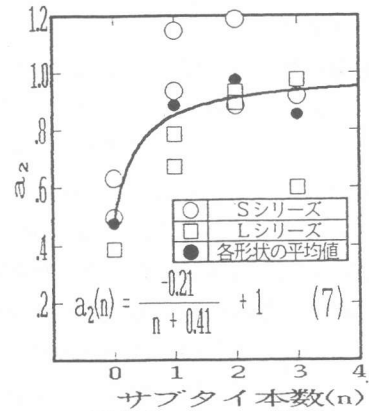


図10 $a_2 - n$ 関係

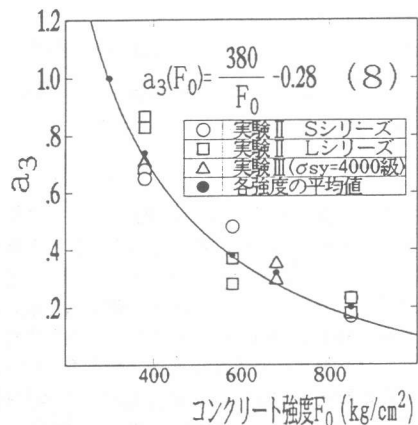


図11 $a_3 - F_0$ 関係

したものが図10および11である。図10によれば、 a_2 は n の増加に従って分数関数的に増大する傾向がみられる。また、 a_2 は1に収束すると考えられるので、 $a_2(n)$ を同図中に示す(7)式で近似表示した。また、図11によれば、係数 a_3 は F_0 の増加に従って双曲線的に減少する傾向がみられたので、 $a_3(F_0)$ を同図中に示す(8)式で近似表示した。

図12は、提案推定式による計算値と実験値を比較したものである。同図によれば、本推定式はほぼ±30%の精度で実験値を推定していると考えられる。図13は、サブタイ本数およびコンクリート強度が変化するとき、本推定式により ε_{BU} がどの程度の値になるかを示した算定例である。同図によれば、横補強筋の形状を□形からサブタイを1本付加して田形にすると、 ε_{BU} は飛躍的に大きくなるが、サブタイ本数をそれ以上増加しても ε_{BU} はあまり増大しない。また、 ε_{BU} はコンクリート強度によって極めて大きな影響を受けることが分かる。

5. まとめ

1) 圧縮軸筋の座屈時ひずみ(ε_{BU})は、平均拘束応力($p_s \sigma_{sy}$)とピッチ比(S/D)が同じでも横補強筋の形状が□から田、畛、畹になると大となる。また、コンクリート強度の小さい場合ほど大きくなる。このことは、軸筋座屈が現行の諸設計コードで考えられているような、横補強筋と軸筋の関係のみで決まるものではなく、コンファインドコンクリートの力学特性と関連するものであることを示している(図3、図4参照)。

2) 既往の円形横補強筋の場合の座屈実験データ[4]、ならびに実験I、IIおよびIIIの結果とから、通常の横補強筋($\sigma_{sy}=4000\text{kg/cm}^2$ 級)および300~850 kg/cm^2 程度のコンクリートを用いる場合の座屈時ひずみ推定式(5)、(6)を誘導した。

なお、今回十分に明らかにできなかった横補強筋の降伏強度の影響については継続して調べて行く予定である。

【謝辞】 本研究の遂行にあたっては、大阪大学大学院修了生・山口善史君(現大林組)の多大なる助力を得た。また、横補強筋の一部は高周波熱錬(株)からご提供いただいた。記して謝意を表する。

【参考文献】

- 1) 鈴木計夫、中塚 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靱性と配筋方法に関するシンポジウム、pp.61-68、1991
- 2) 中塚 信、鈴木計夫、中川裕史、溝口 茂：高強度材料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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14,NO.2, pp.961-966、1992
- 3) 鈴木計夫、中塚 信、菅田昌宏：角形横補強筋によるコンファインドコンクリートの拘束機構と強度・変形特性、コンクリート工学年次論文報告集、II-2, pp.449-454、1989
- 4) 鈴木計夫、中塚 信、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靱性とその評価方法に関するコロキウム論文集、pp.II-21~II-32、1988

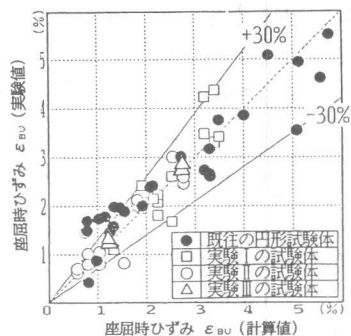


図12 計算値と実験値の比較

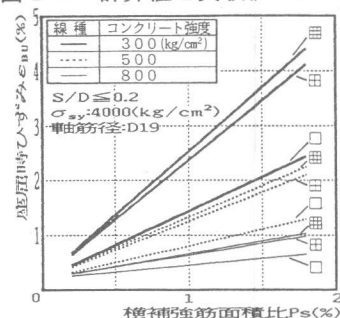


図13 本推定式の算定例