

論文

[2075] 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

正会員 鈴木 計夫 (大阪大学工学部)

正会員 ○中塚 侑 (大阪大学工学部)

菅田 昌宏 (竹中工務店)

1. まえがき

スパイラルやフープなどの補強筋で横拘束されたコンクリート、すなわちコンファインドコンクリートは非常に優れた粘り強さを示し、同コンクリートの曲げ圧縮部への適用はコンクリート曲げ部材の靱性を飛躍的に改善することが実験的・解析的に明らかにされている[1]。それ故、コンファインドコンクリートの強度・変形特性の明確化は、コンクリート系部材の靱性設計の確立が急がれる現状での重要な研究課題と考えられる。しかし、円形から各種の角形までの種々の形状を有する横補強筋を用いた、コンファインドコンクリートの強度・変形特性を統一的に表示でき、算定できる推定式は未だ得られていない。

本研究では、角形横補強筋の拘束機構を、同補強筋の局所の軸力-曲げモーメント状態を調べる方法によって考察する。さらに、それら各種横補強筋の圧縮強度時の有効軸力係数と分布拘束力の等価係数、ならびに筆者等が既に提案した円形補強筋を用いたコンファインドコンクリートに対する強度・変形特性の推定式[2]とから、横補強筋の形状が角形から円形までの同コンクリートの強度・変形特性を一貫して算定できる推定式を誘導し、その妥当性について検討する。

2. 実験概要

実験はその概要を表1に示すように、各種の横補強筋の拘束機構を調べるための実験Iと、強度・変形特性の推定式を誘導するための実験IIからなっている。取り上げた実験要因は、いずれの実験においても

横補強筋の形状ならびにコンファインドコンクリートの本質的な影響要因、すなわち平均拘束応力($ps\sigma_{sy}$)拘束応力分布指標(S/D)およびコンクリートの力学性質指標(F_0)である。

実験Iで用いた横補強筋は、各種の矩形断面($b\times b$)を有する鉄筋を仕口部で突合せ溶接

表1 試験体概要

実験	試験体名		ps・σ _{sy}		S/D		F ₀	形状	
	名称	D×D×H (φ×H)	体数	b×b(φ)	σ _{sy}	s			
I	IL-a	20×20×40	1	59	9×9	3500	.27	5.0	a
	IL-b		1	54	7×7	3200	.24	4.5	b
	IL-c		1	58	6.4×6.4	3500	.26	5.0	c
	IL-f		1	57	7×7	3200	.26	5.0	d
	IL-g		1	57	6.4×6.4	3500	.26	5.0	e
	plain		I-p	2	--	--	--	--	--
	II	II S-a	20×20×40	2	28	(5.6)	3200	.16	3.0
II S-b		2		31	(3.9)	4200	.13	2.4	
II S-c		2		29	(3.1)	3700	.10	2.0	
II S-d		2		29	(3.1)	3700	.13	2.5	
II S-e		(20×40)	2	28	(5.6)	3400	.16	3.0	h
II L-a		20×20×40	2	56	(8.2)	3200	.19	3.5	
II L-b			2	55	(5.6)	3200	.12	2.3	
II L-c			2	54	(5.6)	3200	.16	3.1	
II L-d			2	54	(5.6)	3200	.21	3.9	
II L-e		(20×40)	2	56	(8.2)	3100	.19	3.5	
II L-f		20×20×40	2	60	(5.6)	3100	.12	2.3	
II L-g		2	52	(5.6)	3100	.16	3.1		
plain		II-p	20×20×40	2	--	--	--	--	i
plain		II-pr	(20×40)	2	--	--	--	--	

ps: 補強筋面積比 σ_{sy}: 補強筋降伏強度(kg/cm²) s: 補強筋ピッチ(cm) D: 補強筋一辺寸法(cm) H: 試験体高さ(cm)
 F₀: プレーン強度(kg/cm²) b×b: 横補強筋断面寸法(mm) φ: 横補強筋径(mm), 丸形試験体断面寸法(cm)
 注) 試験体名で3番目の英字(a,b,...)は、両表中右側に示す横補強筋形状に対応する。

して所定の形状にしたものである。ここで整形矩形断面の鉄筋を用いたのは、横補強筋の局部ひずみ度の測定から同鉄筋断面に作用する軸力、曲げモーメントを正確に算定するためである。実験Ⅱの横補強筋の製作には番線や普通鉄筋の呼び径 $\phi 3.2$, $\phi 4$, $\phi 6$, $\phi 9$ のものを用いた。外周筋は、両端部が一辺の中央にくるように口形に曲げ加工された鉄筋の両端部分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。なお口形外周筋と、内接正方形筋および内接八角形筋は相互に溶接されていない。

試験体の製作には早強セメント、最大粒径が20mmおよび5mmである粗骨材と細骨材を用いた、表2に示す調合および強度特性をもつコンクリートを使用した。

試験体は、断面が20×20cm、高さが40cmの角柱体、および直径が20cmで高さが40cmの円柱体で、いずれもかぶりコンクリートはない。

載荷は図1に示す方法で行った。単調単軸圧縮荷重は200ton(もしくは500ton)の圧縮試験機(装置)で、載荷速度を手動調節して加えた。なお、球座は載荷重の偏心を取り除いた後にボルトで固定した。

試験体の軸ひずみは図1に示すように、測定検長が380mm区間で、ストローク50mmのダイヤルゲージ式変位変換器を用いて測定した。実験Ⅰの試験体では、後述の図2,4,5中に示す横補強筋の各断面位置における外側と内側のひずみ度の測定を検長2mmの箔ゲージによって行った。

3. 実験結果および考察

3.1 角形横補強筋の拘束機構

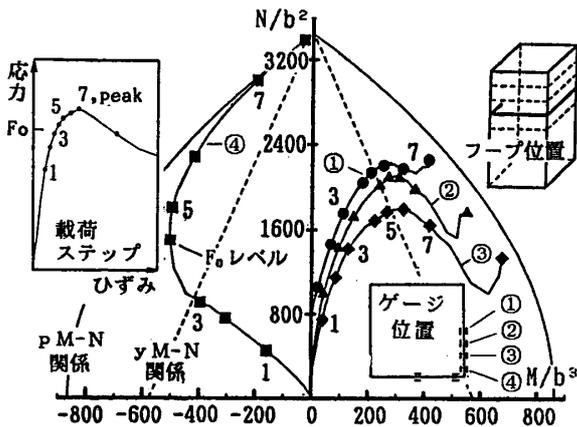


図2 口形横補強筋 M-N 相関関係図

表2 コンクリートの調合および強度特性

実験	w/c (%)	調合			F ₀	ε ₀ (%)	E ₀ × 10 ³
		C	S	G			
I	58	310	766	996	310	0.21	40
II	50	390	672	988	320	0.20	52

F₀: 圧縮強度 (kg/cm²) ε₀: 圧縮強度時ひずみ

E₀: 下降勾配 (kg/cm²)

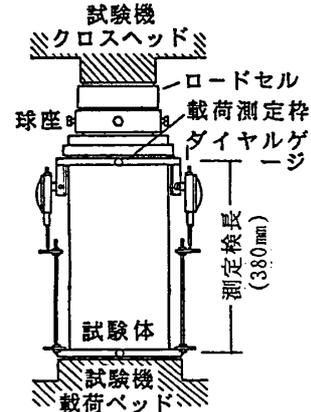


図1 載荷および測定方法

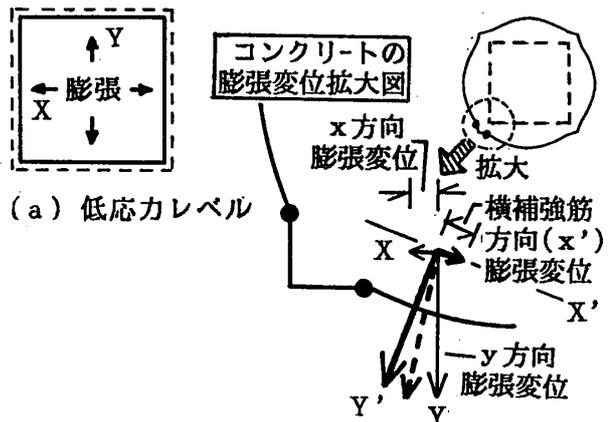


図3 口形横補強筋でのコンクリートの膨張変位

円形横補強筋を用いたコンファインドコンクリートの場合、コンクリートの横方向変位(膨み)によって補強筋にはフープテンションによる軸力のみが生じ、その大きさが降伏耐力に達して、試験体の破壊領域内におけるコンクリートの横方向膨張変形に対する抵抗剛性がほぼなくなる時

点で最大耐力点に達するといわれている [2]。これに対し、角形横補強筋を用いたコンファインドコンクリートが最大耐力に達するまでの横補強筋の拘束機構を以下に考察する。 図2,4,5は、同図中の挿絵に示す各種の形状をもつ横補強筋の、同図中の①～④で示す位置の断面に作用する各載荷段階での曲げモーメントおよび軸力(M, N)を、M-N平面にプロットしたものである。同図中には各補強筋断面の降伏M-N相関関係(以下、yM-N関係)、および全塑性M-N相関関係(以下、pM-N関係)もそれぞれ破線と実線で併記している。

□形の横補強筋を用いたコンファインドコンクリートが強度破壊するまでの拘束機構を、図2に示す実験結果から、次のように推測する。コンクリートは圧縮応力をうけると図3(a)に模式的に示すように、試験体断面の横(x, y)方向に膨張すると考えられるため、横補強筋には図2に示される様に、直交するy方向の膨張によって両端固定梁の場合のような、端部と中央部とで方向が逆になる曲げモーメントと、平行なx方向の膨張によって中央部の方がより大となる引張軸力が生ずる。次に、応力レベルがさらに上昇してプレーンコンクリートの圧縮強度(F_0)付近のレベル(3~4ステップ)になると、コンクリートの横膨張変形は急激に顕著となり、他の位置に比べ曲げモーメントが大きい端部(④位置)で、横補強筋はまず yM-N関係に達する。それによって同位置での曲げ剛性が低下して曲げ角度が増加し、y方向の膨張が非常に生じ易くなると、図3

(b)に示すように、x, y方向変位を合成した太い破線で示すコンクリートの膨張変位の横補強筋方向(x'方向)成分は横補強筋の端部から中央に向かうものとなる。その結果、端部(④)位置では降伏による伸び剛性の低下も生じているため伸び変形の集中とNの急増が起る(反対に、中央部分(①~③)でのNはその増加率を減じてついには減少しはじめる)。Nの急増によって端部での(M, N)状態が pM-N関係にほぼ到達すると、図2に示されるように圧縮強度点7に達しており、このことから最大耐力点はコンクリートの横方向膨張変形に対する横補強筋の抵抗剛性がなくなる時点で起ると推測される。

■形の横補強筋の場合、図4に示すように応力レベルが低い段階から、サブタイ(中央あ

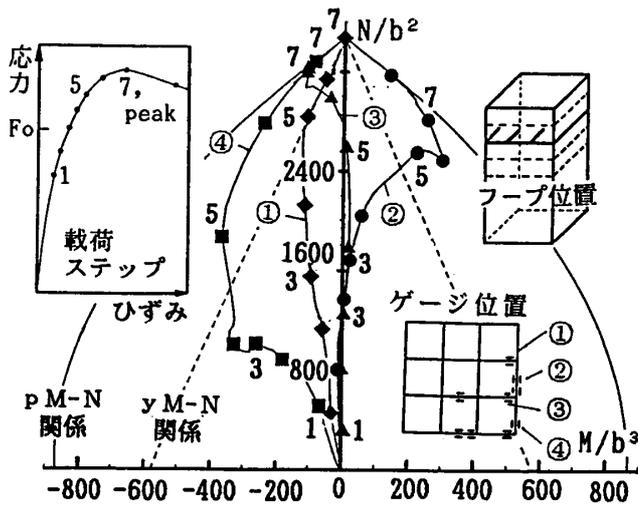


図4 円形横補強筋 M-N相関関係図

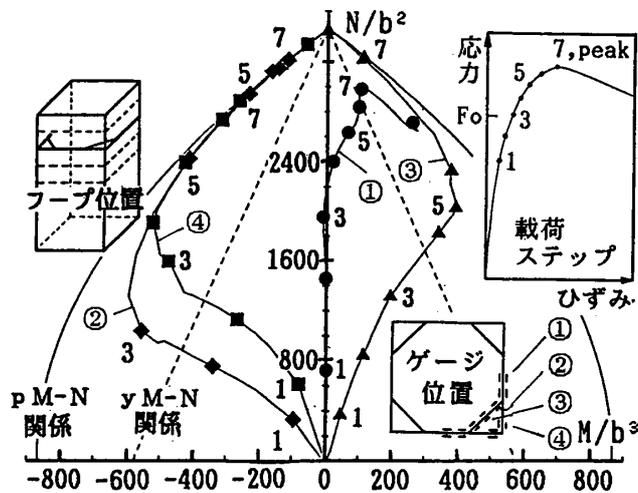


図5 □形横補強筋 M-N相関関係図

るいは端部)には一軸状態に近い卓越した引張軸力の生ずることが特徴で、応力レベルの上昇によってサブタイの断面がまず pM-N関係に達する。サブタイが全塑性状態に達してその伸び剛性が零になると、外周筋で囲まれた部分のコンクリートの横方向膨張変形に対する抵抗機構は、□形の場合と類似のものになる。したがって、本横補強

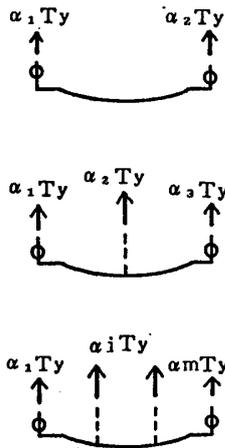


図6 有効軸力係数 α 算定位置

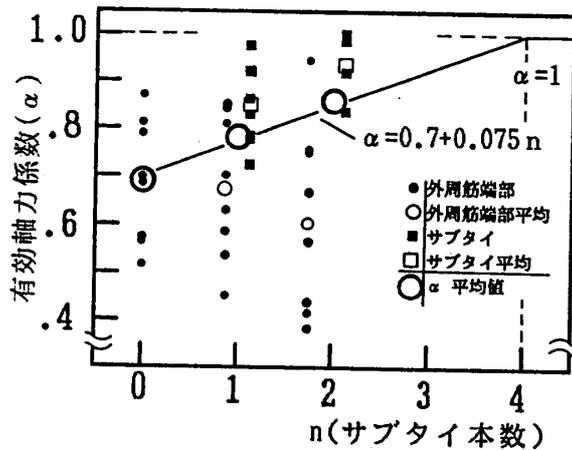


図7 有効軸力係数(α) - サブタイ本数(n)関係

筋を用いたコンファインドコンクリートでは、図4に示されるように、外周筋の端部(④位置)が全塑性状態に達することによって最大耐力に達したと推定される。

また図5によれば、八角形筋を用いたコンファインドコンクリートの場合も同様に、外周筋の隅角に対する八角形筋の一辺部分(①あるいは②位置)および外周筋の端部(④位置)が全塑性化してコンクリートの横膨張変形に対する抵抗剛性がなくなった段階で最大耐力に達していると推定される。

3.2 有効軸力係数

角形横補強筋の場合、3.1で述べたように、円形横補強筋のときと異なって曲げモーメントの作用があるため、圧縮強度時での横補強筋の軸力(T)は、フープテンションをうける円形の場合の一軸降伏耐力(Ty)より小となる。このTとTyの比(T/Ty)を有効軸力係数(α_i)と仮称し、□形から円形までのサブタイ型の横補強筋の、先に述べた破壊強度に関する図6に示す各位置でのα_iを、サブタイの本数(n)を横軸にとってそれぞれ示したのが図7である。

同図によれば、サブタイ型の各α_iは、コンクリートの局所の状態が大きく影響する最大耐力点に関する量であるためばらつきは大きいのが概ね、外周筋端部ではnの増加によってむしろ減少する小さい値を、サブタイではnの増加によって増大する大きな値を示す。しかし、図6の位置についてのα_iの平均値α(図7中大きい○印)は、n=0において0.7程度で、nの増加に従って増大する。またnが大きくなると、すなわちサブタイを密に配筋した場合、サブタイのα_iは増大してほぼ1となるので、αは1に近づき、拘束状態は円形とほぼ同様のものになると考えられる。それ故、ここではα-n関係を直線で近似し、(1)式で与えることとした。

次に、内接正方形型および内接八角形型の平均値α、0.82、0.83を同様に代入してnを求めると、それら両型の横補強はそれぞれn=1.7、1.8の仮想的なサブタイ型の横補強と同等であることになる。

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.7 + 0.075n, & n &\leq 4.0 \\ \alpha &= 1 & n &\geq 4.0 \end{aligned} \quad (1)$$

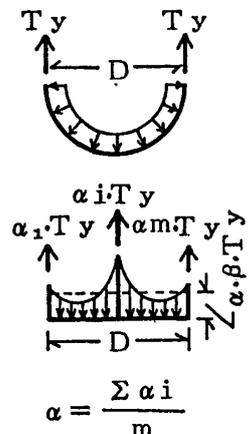


図8 各横補強筋形状での拘束力分布性状

3.3 強度・変形特性の算定式の誘導

本項では、筆者等が既に提示した円形の場合の推定式[2]、ならびに3.1で述べた α - n 関係および実験IIの結果とから、角形横補強筋を用いたコンファインドコンクリートの強度・変形特性の推定式を誘導する。すなわち、角形横補強筋の場合、試験体の補強筋位置断面で補強筋はコンクリートに図8に模式的に示すような分布のある拘束線荷重を与える。したがって一様な線荷重となる円形の場合と異なって、この拘束線荷重の分布の影響を推定式に考慮する必要がある。それ故、ここでは分布のある拘束力をそれと同じ働きをする一様拘束力にみなすための等価係数(β)を導入する。

β および3.2で述べた有効軸力係数 α はともに拘束線荷重に関する係数であるので、拘束線荷重が一様な円形の場合の推定式における平均拘束応力の項($ps\sigma_{sy}$)に α, β を乗ずることによってそれらの影響を考慮することになると、横補強筋の形状が円形から角形まで変化するときの算定式を一貫して表示できる(2)~(4)

—各特性値算定式—

$$\frac{F_{cf}}{F_0} = 1 + 4.41 \alpha \cdot \beta_1 \frac{ps \cdot \sigma_{sy}}{F_0} (1 - 1.24 \frac{S}{D}) \quad (2)$$

$$\frac{\epsilon_{0, cf}}{\epsilon_0} = 1 + (\frac{100}{F_0})^2 \alpha \cdot \beta_2 ps \cdot \sigma_{sy} (1 - 1.1 \frac{S}{D}) \quad (3)$$

$$\frac{\bar{E}_{cf}}{\bar{E}_0} = 1 - \left\{ 1 - \frac{1}{(\frac{163}{F_0})^2 \alpha \cdot \beta_3 ps \cdot \sigma_{sy} + 1} \right\} \left\{ 1 - (\frac{S}{2D})^2 \right\} \quad (4)$$

式を得る。それらの式中の係数 $\beta_1 \sim \beta_3$ は次のように定めた。すなわち、各試験体についての実験IIで得られた特性値と(1)式による α 値を、(2)~(4)のそれぞれの算定式に代入すると各試験体の係数 $\beta_1 \sim \beta_3$ が求まるが、それらの β をサブタ

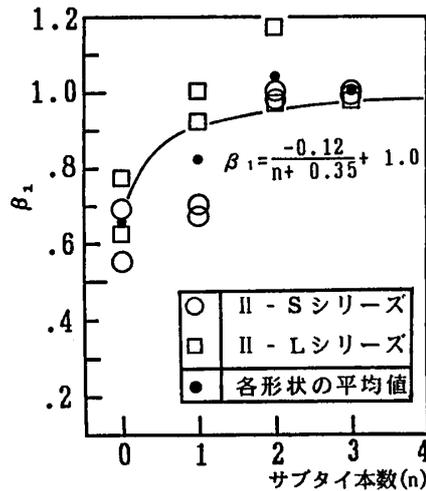


図9 $\beta_1 - n$ 関係

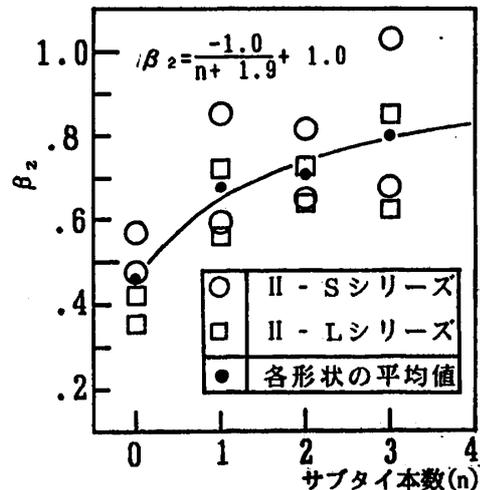


図10 $\beta_2 - n$ 関係

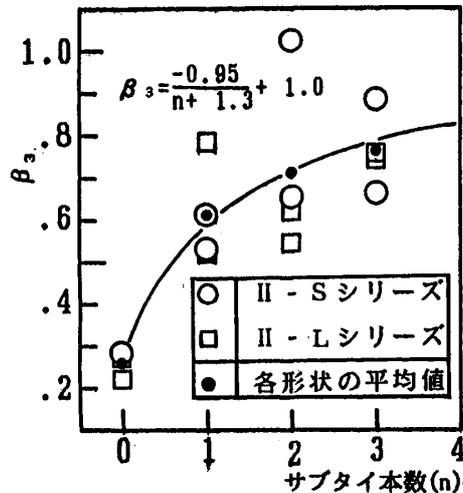


図11 $\beta_3 - n$ 関係

各 β 推定式

$$\beta_1 = \frac{-0.12}{n + 0.35} + 1.0 \quad (5)$$

$$\beta_2 = \frac{-1.0}{n + 1.9} + 1.0 \quad (6)$$

$$\beta_3 = \frac{-0.95}{n + 1.3} + 1.0 \quad (7)$$

イの本数 n を横軸にとって整理したのが図9~11である。同図によればいずれの β も n の増加にしたがって分数関数的に増大する傾向が見られ、また β は1に収束すると考えられるので、各 β - n 関係を(5)~(7)のように近似表示した。なお、内接正方形型および内接八角形型の各 β は、3.2で求めた両型の仮想 n を(5)~(7)式に代入することによって得られるとする。

3.3 強度・変形特性値の算定式の検討

図12は、各種の角形横補強筋を用いたかぶりコンクリートのない、およびその効果を取りのぞいたコンファインドコンクリートに関する他者の実験結果[3~8]を用いて、提案する諸算定式の妥当性を検討したものである。同図(a)によれば本算定式は強度比(F_{cf}/F_o)を実用上十分と思われる-10%~+20%の精度で推定できると考えられる。同図(b)は圧縮強度時のひずみ比($\epsilon_{ocf}/\epsilon_o$)に対する推定結果を示したものである。強度比特性に比べらつき範囲は大きくなるが、ほぼ±30%の精度で実験結果を推定していると考えられる。なお、応力下降勾配は、各研究者によってその定義方法が異なり直接比較できないためここでは取り扱っていない。

4. まとめ

1) 角形横補強筋の局部的軸力-曲げモーメント状態を調べる方法から、同補強筋を用いたコンファインドコンクリートの最大耐力点は、外周筋および、サブ

タイあるいは内接筋が全塑性化して、コンクリートの横方向膨張変形に対する抵抗剛性が無くなった段階で起ることを示した(図2,4,5参照)。

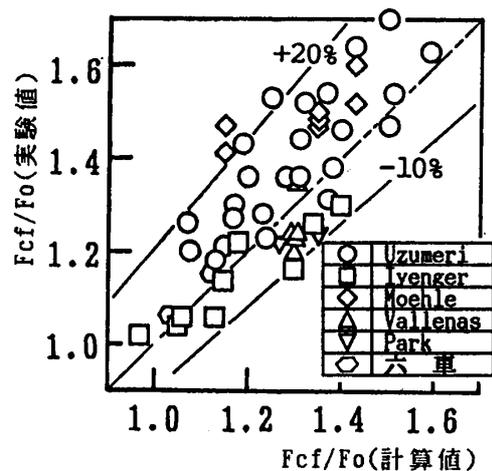
2) サブタイ型の横補強筋の圧縮強度時における有効軸力係数 α と分布拘束力の等価係数 β 、ならびに筆者等が既に提案した円形補強筋を用いたコンファインドコンクリートに対する強度・変形特性の推定式[2]とから、横補強筋の形状が角形から円形までの同コンクリートの強度・変形特性を一貫して算定できる推定式(2)~(4)を誘導した(図7,9~10参照)。

3) 他の研究者の実験結果に対する検討から、提案する諸算定式は、内接正方形型および内接八角形型も含む各種の横補強筋を有するコンファインドコンクリートの強度・変形特性を良好に推定することを示した(図12 参照)。

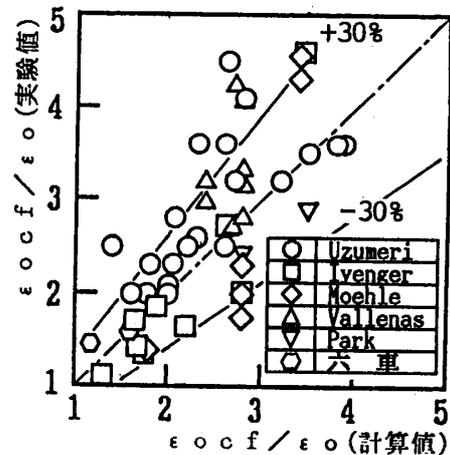
謝辞：本研究に当って多大なご助力を得た大阪大学大学院生の正田 隆啓君、山口善史君の両君に深く感謝の意を表します。

【参考文献】

[1] 鈴木 計夫、中塚 信、森 健：コンファインドコンクリートを利用する高塑性PRC曲げ部材の基礎力学的性状、プレストレストコンクリートVol.28, No.6, 1986.11, pp18-33
 [2] 鈴木 計夫、中塚 信、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, pp33-39, 1985.1
 [3] S.A.Shaikh and S.N.Uzumeri : Analytical Model For Concrete Confinement in Tied Columns, ASCE ST12, pp2703-2722.
 [4] S.R.Iyengar et al : Stress-strain characteristics of concrete confined in steel binders, Magazine of Concrete Research, Vol.22, No.72, Sept.1970
 [5] Valleses, J et al : CONCRETE CONFINED BY RECTANGULAR HOOPS AND SUBJECTED TO AXIAL LOADS, Report No.UCB/EERC-77/13, pp.105, August, 1977
 [6] 六車 照、渡辺 史夫、田中 仁史、藤田 庄二：横拘束筋によるプレストレストコンクリート梁の曲げ剛性改善に関する研究、第2回コンクリート工学会年次講演会論文集
 [7] B.D.Scott, N.Park, and N.J.M.Priestley : Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops and High Strain Rates, Jour. of ACI, pp12-27, 1982.1-2
 [8] J.P.Noehle and T.Cavanagh : Confinement Effectiveness of Crossties in RC, ASCE, Journal of structural Engineering, Vol.111, No.10, "8510" pp2105-2120



(a) 圧縮強度算定式の検討



(b) 圧縮強度時ひずみ算定式の検討

図12 本提案式の妥当性の検討