

論文 横拘束コンクリートの応力度-ひずみ度関係定式化に関する基礎的実験研究

高森直樹*1、Benny Benni Assa*2、西山峰広*3、渡邊史夫*4

要旨：横拘束コンクリートの応力度-ひずみ度曲線を軸ひずみ度-横ひずみ度関係に基づいて、論理的に定式化するための基礎資料を得るために、詳細な横拘束された円柱の中心軸圧縮実験を行った。実験によって、圧縮強度が20MPaから90MPaの範囲のコンクリートに対して、軸ひずみ-横ひずみ関係を横補強筋が破断に至るまでの領域で明らかにした。また、軸ひずみに対する横ひずみの値は、高強度コンクリートほど大きく、高強度コンクリートは、普通コンクリートに比べて横ひずみが小さいため横拘束効果が小さいとは言えないことが解った。さらに、横拘束コンクリートが最大耐力に達するまでのプロセスにおいて、横拘束筋が降伏する場合としない場合があり、この違いが、最大耐力以降の下り勾配に影響することが併せて示された。

キーワード：コンクリート、横拘束、横ひずみ、軸ひずみ、中心軸圧

1. はじめに

過去の横拘束コンクリートに関する研究[1]では、受動的な横拘束効果に直接関わる横ひずみに関する分析が充分とは言えない。本研究は、横拘束コンクリートの軸ひずみと横ひずみの関係を明らかにし、それに基づいて横拘束コンクリートの応力ひずみモデルを定式化する為の基礎実験資料を得ることを目的としている。ここでは、コンクリートの強度および横拘束程度をパラメータとした鉄筋コンクリート円形断面柱の中心軸圧縮試験を行い、横補強筋が破断する終局状態に至る範囲までの応力-ひずみ関係と軸ひずみと横ひずみの関係を明らかにする。

2. 実験概要

2.1 材料

コンクリートの調合と $\phi 145 \times 300\text{mm}$ シリンダーによる拘束円柱供試体試験時プレーンコンクリート強度を表1に示す。粗骨材は最大粒径20mmの砕石を、細骨材には最大粒径5mmの川砂を用いた。また、目標圧縮強度50MPa以上の高強度コンクリートに対しては、高性能減水剤を用いた。測定されたプレーンコンクリートの応力-軸ひずみ関係を図1に示す。横補強筋としては、公称

表1 コンクリートの配合と力学特性

目標強度 (MPa)	セメント量 (kg/m ³)	W/C (%)	減水剤	試験時	
				Fc'[MPa]	ϵ_a (%)
C20	245.8	77.9	無	25.0	0.325
C30	310.6	61.6	無	34.1	0.242
C40	343.3	52.0	無	41.4	0.248
C50	318.3	45.1	有	49.5	0.218
C60	362.5	38.9	有	64.4	0.218
C70	400.5	33.6	有	70.1	0.200
C80	456.6	29.1	有	83.0	0.228
C90	522.9	25.1	有	75.0	0.202

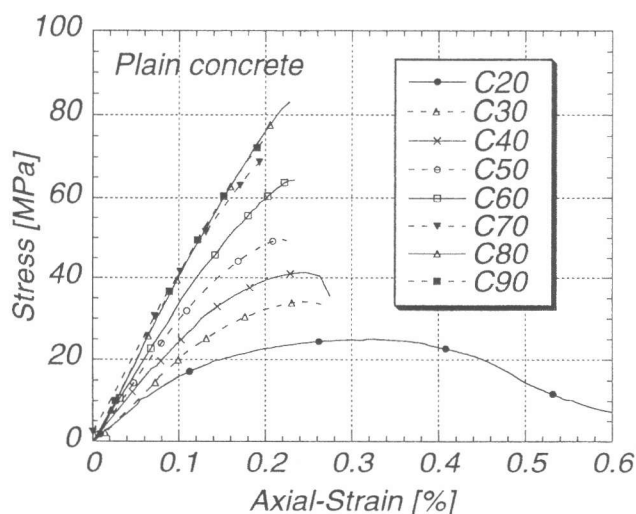


図1 プレーンコンクリートの応力-ひずみ曲線

*1 京都大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 Sam Ratulangi University

*3 京都大学工学部助手 工学部建築学第二学科、工博 (正会員)

*4 京都大学工学部教授 工学部建築学第二学科、工博 (正会員)

降伏点 1300MPa ($\phi = 6.25\text{mm}$) の連続スパイラル及び公称降伏点 800MPa ($\phi = 6.28\text{mm}$) の溶接閉鎖型リングの 2 種類を用いた。その力学的性質を表 2 に示す。横補強筋の応力-ひずみ関係を図 2 に示すが、これは鋼材の引張試験結果よりモデル化した 5cm の検長に対する破断に至るまでの工学的応力 (公称断面積に対するもの) - ひずみ関係である。最大強度以降の応力-ひずみ曲線は、文献 [2] を参考にして求めた破断点と、最大強度点とを二次曲線で結ぶことにより近似した。この曲線は、後ほど横拘束筋応力が最大強度点を過ぎて破断に至るまでのコンクリートの横ひずみ算定に用いる。

2.2 供試体

供試体は、 $\phi 145 \times 300\text{mm}$ の鉄筋かぶりをゼロとした円柱である (表 3)。なお、試験体の端部は横補強筋を密に配置し、端部破壊を防止している。

2.3 実験方法ならびに計測方法

アムスラー型圧縮試験機により単調中心軸圧

表 2 横補強筋の力学特性

鉄筋種別	降伏点		最大応力		破断伸び
	σ_y	ϵ_y	σ_u	ϵ_u	GL=5cm
	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[%]
S800	889	0.509	1024	6.53	16.0
S1300	1286	0.682	1417	3.70	9.0

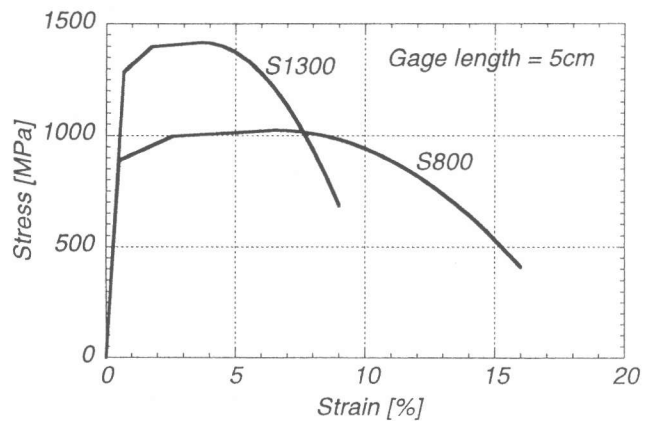


図 2 横拘束筋の全応力-ひずみ曲線

表 3 供試体一覧

コンクリート 種別	テストシリーズ S1300			テストシリーズ S800	
	$\sigma_y = 1286\text{MPa}$			$\sigma_y = 889\text{MPa}$	
	横補強筋間隔 s [mm]			横補強筋間隔 s [mm]	
	19	27.8	45	50	75
C20		20-M-28	20-M-45		
C30	30-M-19	30-M-28	30-M-45	30-M-50	30-M-75
C40		40-M-28	40-M-45		
C50		50-M-28	50-M-45		
C60		60-M-28	60-M-45		
C70		70-M-28	70-M-45		
C80	80-M-19	80-M-28	80-M-45	80-M-50	80-M-75
C90		90-M-28	90-M-45		

縮荷重を加えた。図 3 に示すように、軸ひずみ計測のために、変位計を取り付ける鉄製のリングをあらかじめ供試体に埋め込んだボルトにピン接合した。こうすることによって、供試体を拘束せず (鉄筋リングの締め付け力は、供試体に打ち込まれたボルトの軸方向反力によって支持される)、かつ、検長を一定に保ったひずみ計測が可能となる。軸ひずみ測定領域は、図 3 に示すように、A、B、C、T の 4 領域で、各領域とも 3 本の変位計を用いて軸変形を測定し平均軸ひずみの値を求めた。また、横補強筋のひずみは中心領域内 (領域 B) で 3 断面の高さにおいて計 9 枚のワイヤストレインゲージを用いて計測を行った (図 4)。以下、軸ひずみは中央の B 領域の平均軸ひずみを意味する。また、横ひずみとは中心領域内 (領域 B) の横補強筋の平均ひずみを意味する。

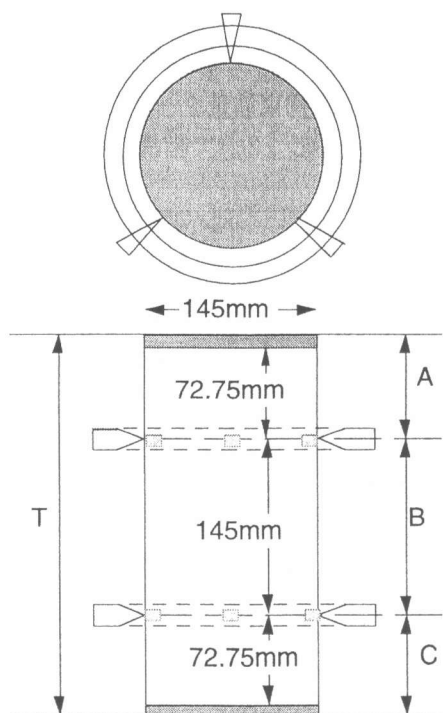


図3 供試体および軸ひずみ計測方法

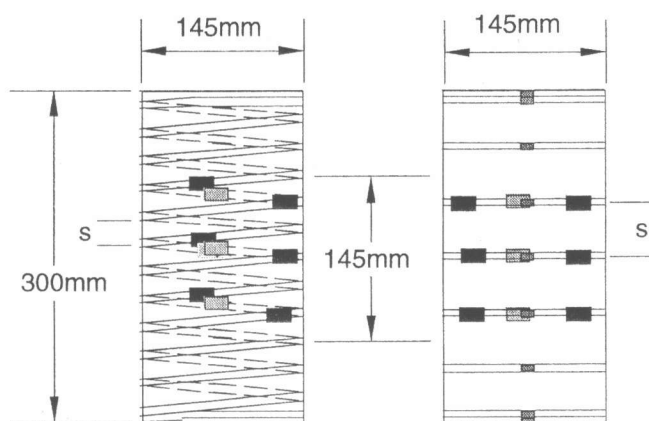


図4 供試体寸法と配筋

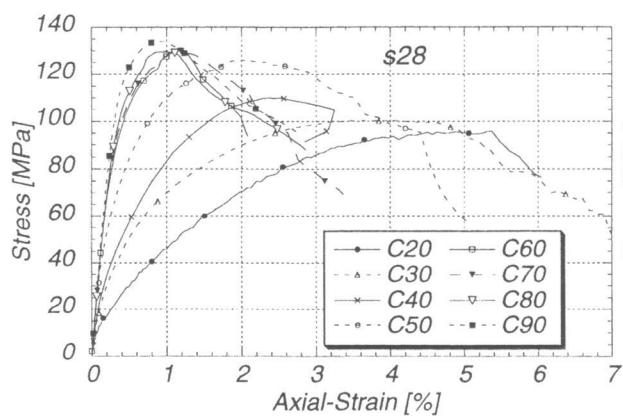


図5 軸応力-軸ひずみ関係
(コンクリート強度の影響)

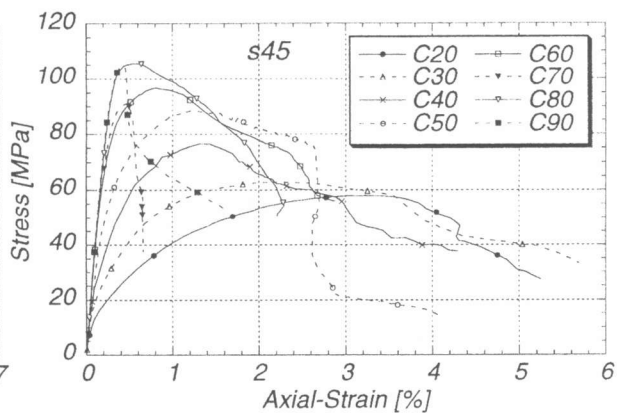


図6 軸応力-軸ひずみ関係
(コンクリート強度の影響)

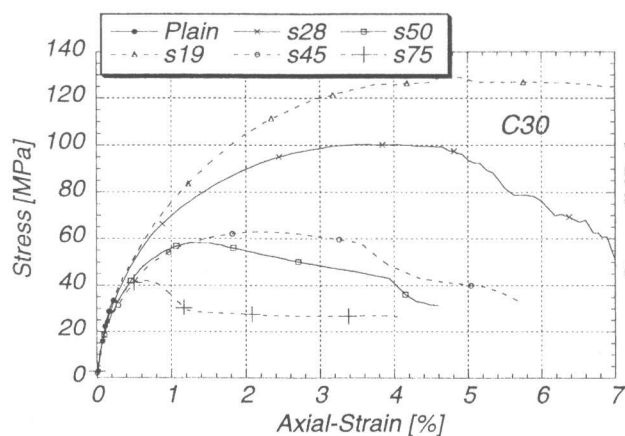


図7 軸応力-軸ひずみ関係
(横拘束筋量の影響)

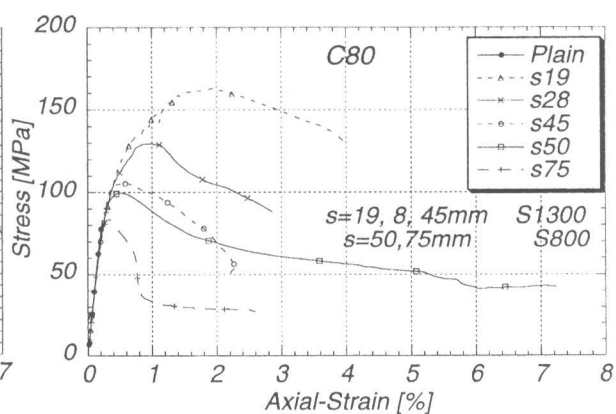


図8 軸応力-軸ひずみ関係
(横拘束筋量の影響)

3. 実験結果

3.1 応力-ひずみ関係

図5～図8に得られた軸応力ひずみ関係を示す。図5および図6は、横拘束筋量を一定とした時の、コンクリート強度が軸応力-軸ひずみ曲線に及ぼす影響を示し、過去の研究[2]で指摘されているように、同じ補強筋間隔ではコンクリート強度の低いほど拘束効果(耐力増加・靱性増加)が高く、同じコンクリート強度では補強筋間隔の小さいものほど拘束効果が高いことが確認された。図7および8は、コンクリート強度を一定とした時の、横拘束筋量が軸応力-軸ひずみ曲線に及ぼす影響を示す。

3.2 最大耐力の検討

図9で実験で得られた圧縮強度増分と平均横拘束応力の関係を、Richartら[3]の静水圧実験の式(1)と比較しているが、コンクリート強度が低いほど、補強筋間隔が小さいほどRichartらの式に近づく、つまり拘束効果が高い。すなわち、既に過去[4]に指摘されているように、式(1)における係数 α がコンクリート強度が大きくなる程小さくなることを意味する。

$$f'_{cc} = f'_c + \alpha \cdot f_l \quad (\alpha = 4.2) \quad (1)$$

ここで、

f'_{cc} = 横拘束コンクリートの圧縮強度
 f'_c = プレインコンクリートの圧縮強度
 f_l = 横拘束応力

3.3 軸ひずみと横ひずみの関係

図10～13に軸ひずみに対する横ひずみの大きさを示す。図より、高強度コンクリートほど軸ひずみに対する横ひずみが大きく、横拘束筋間隔が広くなる程横ひずみが大きくなる。これらの図より、軸ひずみと横ひずみの関係を、コンクリート強度および横拘束筋量で定式化することが可能と考えられる。また、最大耐力に至るプロセスとして、a)横補強筋が降伏する以前、すなわち一定の弾性横

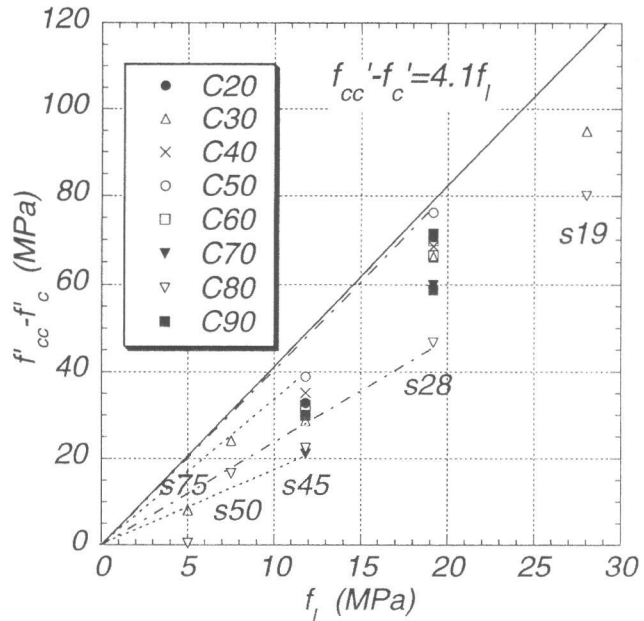


図9 圧縮強度の増大と最大耐力時拘束応力

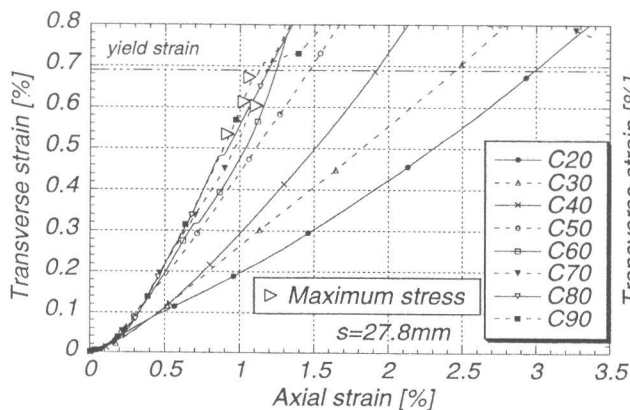


図10 軸ひずみ-横ひずみ関係
(コンクリート強度の影響)

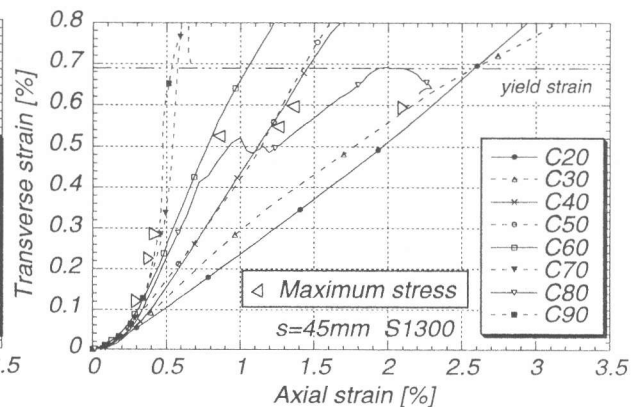


図11 軸ひずみ-横ひずみ関係
(コンクリート強度の影響)

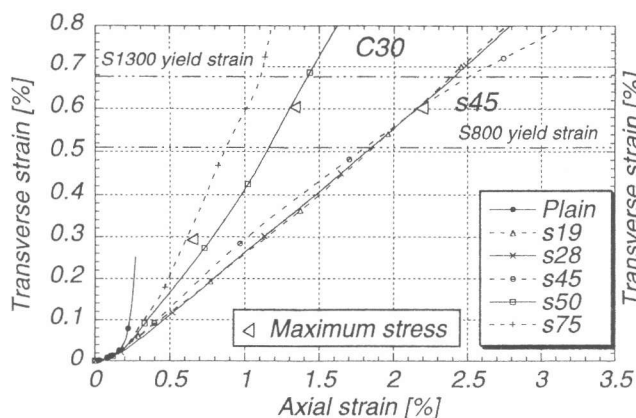


図 1.2 軸ひずみ-横ひずみ関係
(横拘束筋量の影響)

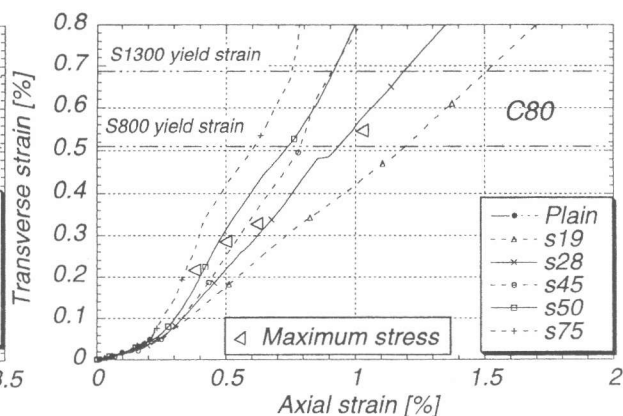


図 1.3 軸ひずみ-横ひずみ関係
(横拘束筋量の影響)

拘束を保持した状態で最大耐力に達するもの、b)横補強筋が降伏して後、すなわち横補強筋の拘束接線剛性が極めて小さくなった後最大耐力に達するものの、の2種類が観察される(図中の▷印が拘束コンクリートの最大耐力時)。前者は高強度のコンクリートの場合又は横補強筋間隔の広い試験体にみられた。このような、プロセスの違いは横拘束コンクリートの応力歪関係を定式化する上でのキーになるものと考えられる。

4. 横補強筋破断に至るまでの挙動と応力ひずみ曲線

4.1 考え方

実験に於いて、ある点を境に軸ひずみが増大していくのに対して、計測横ひずみが減少する現象が見られた。これは、円形の横補強筋の一部が最大強度点を超えて破断(載荷)過程に入っているのに対応して、その他の部分が減力(除荷)過程に入っていることを意味する。そこで、先に示した横補強筋の破断に至るまでの応力ひずみ曲線を用いて、横補強筋がその最大強度点を超えて破断に至るまでの、横拘束応力及び横ひずみを推定した。すなわち、破断点に最も近い点で、減力(除荷)過程に入っている横補強筋のひずみ減少分 $\Delta\varepsilon$ より、応力減少分を $\Delta\sigma = E_s \Delta\varepsilon$ (E_s は横補強筋弾性係数)によって求め、破断(載荷)過程に入っている部分のひずみを推定した。次に、破断(載荷)過程に入っている部分の伸び(検長5mm)と減力(除荷)過程に入っている部分の縮みより一巻きの横補強筋平均ひずみを求め、中央試験域の横ひずみとした。

4.2 軸ひずみ-横ひずみ、軸応力-軸ひずみ、拘束応力-軸応力関係

先の方法で分析した、横補強筋が破断する終局状態に至るまでの軸ひずみ-横ひずみ関係をまとめて図14に示す。同図より、終局状態に至るまでの全領域において、コンクリート強度が大きい程、軸ひずみに対して、横ひずみが大きくなっていることがわかる。従来の研究[5]のように、圧縮強度点に至るまでは、高強度コンクリートの横ひずみの増加が小さいことは確認されたが、応力-ひずみ曲線のひずみ軟化域まで考える場合、圧縮強度点以降の横ひずみの挙動を考慮に入れる必要がある。また、図10~13で見られた弾性拘束範囲では、軸ひずみ-横ひずみがほぼ線形関係にあったのに対して、横補強

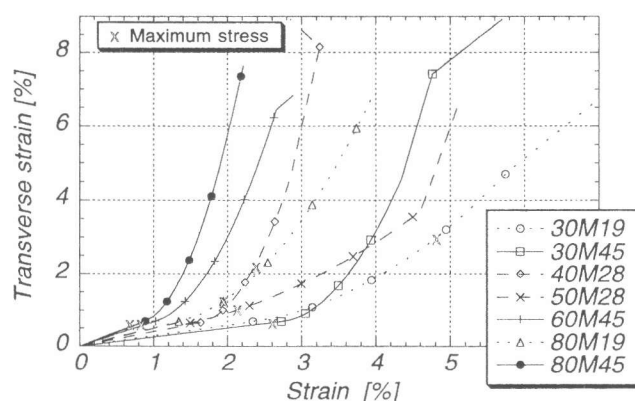


図 1.4 横補強筋破断に至るまでの
軸ひずみ-横ひずみ関係関係

筋が降伏し、破断に至る過程に入ると、横ひずみのみが急激に増大する。コンクリートがC30及びC80の場合に対する横拘束筋の挙動を軸応力-軸ひずみ関係と併せて図15及び図16に示す。図より明らかなように、C30及びC80の両コンクリート共に、拘束コンクリートが最大耐力点に至るまでに、横拘束筋が降伏する場合にはなだらかな下り勾配を示すのに対して、逆の場合には急激な耐力低下を示すことがわかる。これは、先に述べた拘束プロセスの違いにより、拘束コンクリートの応力度-ひずみ度曲線の定式化が異なることを示唆している。

5. 結論

横拘束筋の横ひずみ-軸ひずみ関係を実験により横補強筋の破断に至るまで求めた。実験より得られた結果をまとめると以下ようになる。

- 1) コンクリート強度の増大に応じて横拘束応力による圧縮強度増大の程度が減少する。
- 2) 横拘束の機構として、拘束コンクリートが最大強度点に達するまで横拘束筋が降伏しない場合と、最大強度点に到達する以前に降伏する場合の2種類があり、前者の場合には、拘束コンクリートの応力ひずみ曲線の減力部分（下り勾配部分）の勾配が大きくなる。
- 3) 横補強筋が破断するまでの全領域において、コンクリート強度が大きい程、軸ひずみに対して、横ひずみが大きくなる。

謝辞

横補強筋の製作にあたって、高周波熱錬株式会社、住友電工株式会社に協力を得ました。実験・解析に協力してくれた京都大学黒山哲也君に深く感謝します。また、本研究の一部は、日本建築学会近畿支部の平田奨学金により行いました。併せて御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 靱性設計小委員会報告、日本建築学会鉄筋コンクリート構造運営委員会。
- [2] Polakowski, N. H. and Ripling, E. J. : Strength and Structure of Engineering Materials, Prentice-Hall, p. 274, 1966.
- [3] Richart, F. E., et al. : A Study of the Failure of Concrete Under Combined Compressive Stresses, University of Illinois Engineering Experimental Station, Bulletin No. 185, 104pp, 1928.
- [4] ACI Committee 363: State of the Art Report on High Strength Concrete, Journal of ACI, pp.364-411, 1984.
- [5] 阪井、中塚、鈴木: 高強度コンクリートと円形横補強筋で構成されたコンファインドコンクリートの強度・変形特性（その1.各種要因の影響）、（その2.圧縮強度推定式の誘導）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.371-374、1994.

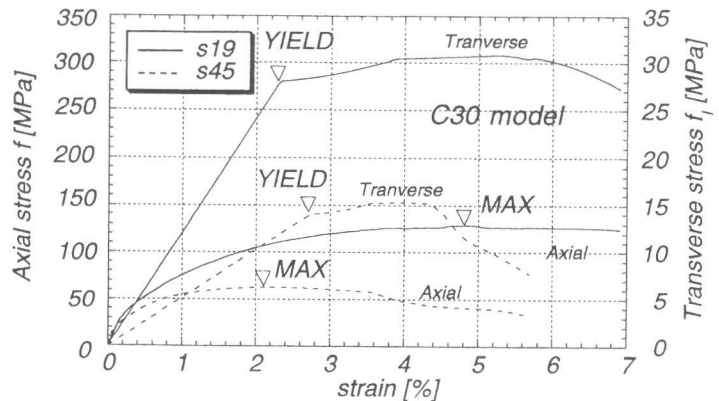


図15 軸ひずみ-軸応力-拘束応力関係 (C30)

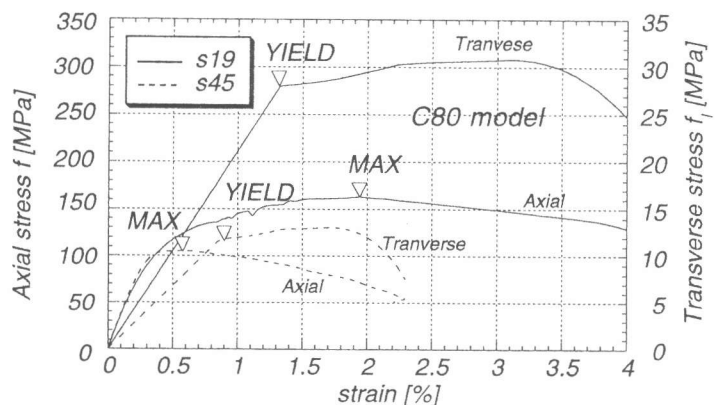


図16 軸ひずみ-軸応力-拘束応力関係 (C80)