

[2107] SD50材の円形スパイラル筋を用いた RC 円形柱のせん断耐力・変形特性

正会員 鈴木計夫 (大阪大学工学部)
 正会員 中塚 信 (大阪大学工学部)
 正会員 ○中田浩之 (奥村組建築設計部)
 白沢吉衛 (日 建 設 計)

1 はじめに

円形スパイラル筋によるコンファインドコンクリートを用いた曲げ破壊する円形柱部材の曲げ耐力ならびに高靱性性質は著者等のこれまでの研究によって明確にされてきた[1]が、同柱の設計法を確立するためにはそのせん断耐力・変形状を明らかにする必要がある。一方、鉄筋コンクリート構造の高層化に伴い高強度コンクリート、高強度鉄筋の使用機会が増大している。しかし、それら材料の高強度化が円形スパイラル筋を用いた同柱部材のせん断性状に及ぼす影響を調べた研究は数少ない。

本研究は、高層RC建物の下層部基準階柱を想定した、高強度コンクリートならびにSD50材による高強度円形スパイラル筋を用いたシアスパン比が 1.1のRC円形柱試験体に対し、単調ならびに多数回繰返し載荷実験を行い、同柱部材のせん断耐力・変形特性に及ぼす円形スパイラル筋の量と降伏強度、軸力比及び載荷履歴の影響等を考察し、同柱部材のせん断設計のための一資料を示したものである。

2 実験概要

2.1 試験体及び使用材料

図-1に試験体の寸法及び配筋を示す。試験体は直径が25cm、シアスパン比 a/D (a :せん断スパン, D :直径)が1.1の円柱で、その上下端に梁型スタブを有するI型試験体である。

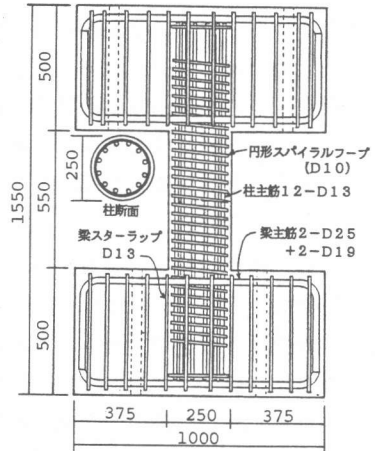


図-1 試験体形状・配筋

表-1 試験体一覧

試験体	載荷履歴	軸力比	P_w [%]	$P_w \sigma_{wy}$ [kg/cm ²]	F_c [kg/cm ²]	せん断補強筋の品種	Q_{max} (t)		
No. 1	単調	0	0	0	498	SD50	13.0		
No. 2			1.2	62			35.3		
No. 3			1.8	93			36.7		
No. 4		0.3	0.3	0	0		415	27.0	
No. 5				0.6	31			30.1	
No. 6				1.2	62			36.0	
No. 8				1.8	93			47.9	
No. 9				0	0			26.0	
No. 10				0.6	1.2			62	506
No. 11		1.8	93	45.0					
No. 12		0.3	0.3	1.2	39		560	SD30	36.9
No. 13				1.8	59				44.2
No. 14		繰返	繰返	0.3	1.2		535	SD50	35.5
No. 15	0.6			1.2	62	34.5			
No. 16	0.3			1.8	93	43.3			
No. 17	0.6			1.8	93	43.5			

表-1に試験体一覧を示す。本実験における主な要因は、横補強筋量(p_w)とその降伏強度(σ_{wy})、軸力比($\eta=N/AcF_c$)および載荷履歴である。円形スパイラル筋はSD50級およびSD30級のD10鉄筋を用いて製作し、その補強筋比としては、 $p_w=0, 0.6\%, 1.2\%$ および 1.8% の4種を採り上げた。軸力比としては0, 0.3, 0.6の3種を、また載荷履歴としては単調載荷及び繰返し載荷の2種を採用した。繰返し載荷は原則として、変位角 $R=1/200$ および $1/100$ で各5回、 $1/50$ および $1/25$ で各10回の

P_w : せん断補強筋比 ($=A_w/S'D'$; D' は置換正方形の一辺の長さ)
 σ_{wy} : せん断補強筋の降伏強度
 F_c : コンクリートの圧縮強度
 Q_{max} : 最大耐力実験値

正負交番繰り返し載荷を行うものである。

試験体の製作には、表-2に示す力学的性質をもつ、粗骨材最大粒径が10mmのレードミクストコンクリートを使用した。また鉄筋の機械的性質を表-3に示すが、柱の主筋には、試験体をせん断破壊先行型とするため、普通鉄筋を焼き入れして降伏強度を8000 kg/cm²程度に高めたものを用いた。

2.2 載荷方法及び測定項目

載荷は図-2に示すような建研式加力装置を用いて行った。すなわち、反力壁に平行移動装置を介して水平に固定した試験体に、一定の軸力を加えた状態で、L型フレームを通して100 ton 押し引き複動ジャッキにより単調または繰り返し水平力を作用させた。なお載荷中の軸力は、常に一定となるように軸力用ジャッキの油圧を手動制御した。測定項目は、柱部の相対水平変位および材軸方向伸縮量、主筋歪、スパイラル筋歪等である。

3 実験結果及び結果の検討

3.1 破壊経過

試験体の破壊過程は、軸力比0および0.3の場合と0.6の場合とで若干異なった。図-3は各場合におけるひび割れ進展状況を示したものである。

a) 軸力比0および0.3の場合：材端部に曲げひび割れ、曲げせん断ひび割れが発生した後、せん断ひび割れ、材軸方向の主筋の付着ひび割れ、ならびにかぶりコンクリートの圧壊などが相前後して生じた。その後、対角線方向のひび割れの発生、せん断ひび割れの本数の増加などが生じて、最大耐力に至った。(pw=0の試験体No.1, No.4ではかぶりコンクリートの圧壊が生じる前に対角線方向に斜張力ひび割れが発生し、ひび割れ幅の増大と共に急激な耐力低下を生じ破壊に至った。) 最大耐力以後は、ひび割れ本数の増加はほとんどなく、ひび割れ幅の増大とかぶりコンクリートの剥落と共に耐力が低下した。なお、軸力が0の試験体No.2, No.3の最大耐力時では降伏強度が8000kg/cm²程度であるにもかかわらず2段目の主筋まで引張降伏し、かつ最大耐力がほぼ曲げ耐力計算値(後述)に達していたことから、これら試験体は曲げ破壊していたと推定される。

b) 軸力比0.6の場合：材端部において曲げひび割れが

表-2 コンクリートの力学的性質

	F _c [kg/cm ²]	E _c [x10 ⁶ kg/cm ²]	cσ _t [kg/cm ²]
No. 1~No. 3	498	2.80	39.7
No. 4~No. 8	415	2.60	38.0
No. 9~No. 11	506	2.73	38.0
No. 12~No. 13	560	2.97	38.8
No. 14~No. 17	535	3.02	41.6

表-3 鉄筋の機械的性質

	径	σ _y [kg/cm ²]	E _s [x10 ⁶ kg/cm ²]	ε _y [μ]	使用試験体
柱主筋	D13	8189	1.854	4417	No.1~No.17
せん断補強筋	D10	5189	1.692	3067	No.1~No.11, No.14~No.17
		3310	1.795	1844	No.12, No.13

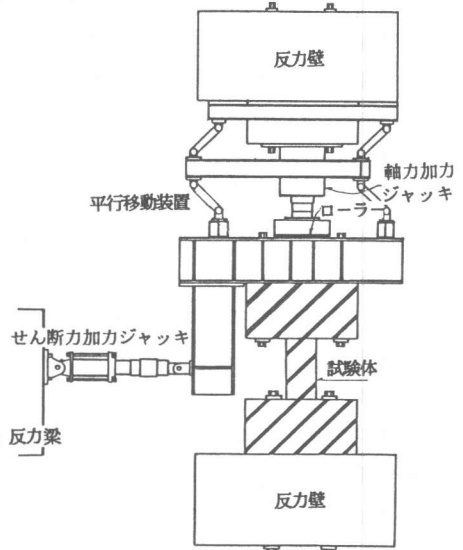
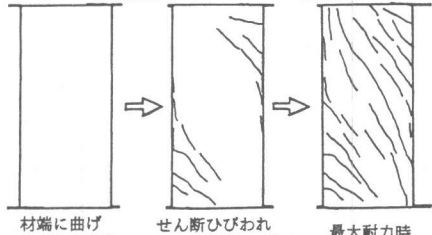


図-2 載荷装置(平面図)

(軸力比0および0.3の場合)



(軸力比0.6の場合)

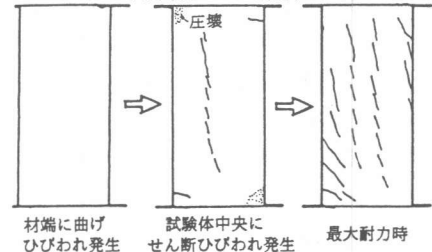


図-3 ひび割れ進展状況

まず発生したが、曲げせん断ひび割れが生ずる以前にかぶりコンクリートの圧壊、さらには腹部コンクリートに短いせん断ひび割れが多数発生した。その後、材端部コンクリートの圧壊の進展とともに同せん断ひび割れ本数が増加し最大耐力に至った。

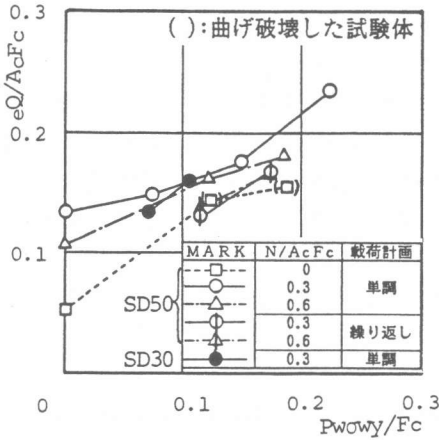


図-4 eQ/AcFc-Pwσwy/Fc関係

3.2 せん断耐力 (1) 諸要因の影響

図-4は、各試験体のせん断耐力(eQ)を柱断面積(Ac)とコンクリート強度(Fc)を用いて無次元化した実験値(eQ/AcFc)と円形スパイラル補強筋量(pwσwy/Fc)との関係を示したものである。同図によれば、(a)η=0.3及び0.6のいずれの場合でも無次元化せん断耐力(eQ/AcFc)は高補強域(Pw=1.8%程度)までpwσwy/Fcの増加に対しほぼ比例的に上昇している、(b)eQ/AcFc-pwσwy/Fc関係に及ぼす円形スパイラル筋品種(SD30とSD50)の影響は認められない、(c)せん断補強筋を持つ試験体では、eQ/AcFc-pwσwy/Fc関係における軸力比の影響は顕著に見られない、(d)せん断耐力に達するまでに5回または10回の繰り返し荷重を受けた試験体の無次元化せん断耐力は、単調載荷を受けた試験体のそれに比べ5~15%程度低い、ことなどがわかる。

表-4 円形柱のせん断耐力各算定法

式番号	計算式	円形断面の取扱	円形スパイラル筋の効果の低減
(1)式	B法	円形断面	π/4をawσwyに乘ずる
(2)式	A法	角形断面置換	低減しない
(3)式	B法	角形断面置換	低減しない
(4)式	修正荒川mean式	角形断面置換	低減しない
(5)式	A法	角形断面置換	√π/2をpwσwyに乘ずる
(6)式	B法	角形断面置換	√π/2をpwσwyに乘ずる

注) (2)式, (3)式, (4)式については文献[2]参照

(2) 円形断面柱のせん断耐力算定法

日本建築学会RC耐震設計小委員会せん断WGから理論式によるせん断設計法(A法及びB法)が最近提示された[2]が、同式は角形断面柱を対象としたものである。それ故、ここでは円形断面柱を対象としたせん断耐力算定式(1)式を、トラス機構におけるφが一定で修正が比較的容易に行えるB法に基づいて誘導した。

$$Q_u = (\pi/4) a_w \sigma_{wy} (j_t / S) + (\tan \theta / 2) (1 - 2a_w \sigma_{wy} / (SD \nu F_c)) (\pi/4) D^2 \nu F_c \dots (1)$$

$$\tan \theta = \sqrt{(2N/QD)^2 + 1} - (2N/QD)$$

$$\nu = (2N/QD + 1) / 4 \quad (0.5 \leq \nu \leq 1.0)$$

D: 円形断面の直径 j_t: 対面する主筋間距離

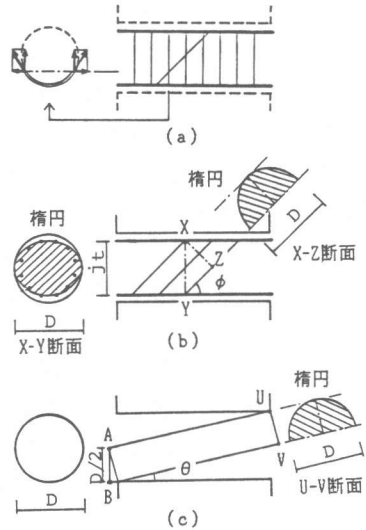


図-5 (1)式誘導過程での考え方

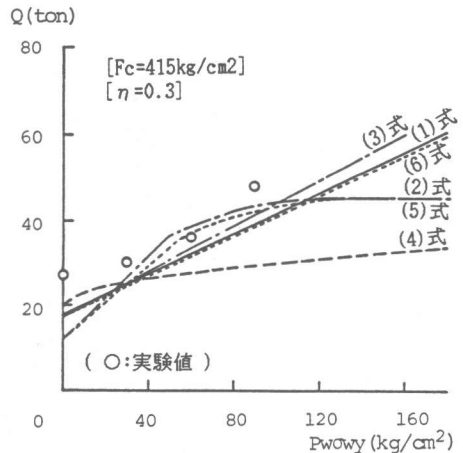


図-6 各算定式の比較

aw : 一組のせん断補強筋の断面積

(その他の記号は文献[2]参照)

なお、(1)式の誘導に際しては次の事項を考慮した。

a) トラス機構における円形スパイラル筋の効果を低減している[3] (図-5(a)参照)。

b) トラス機構におけるコンクリート圧縮束の断面を同図(b)に示すような楕円で与えている。

c) アーチ機構におけるアーチ角度 θ は、式の簡略化のため、同図(c)に示すように $AB=D/2$ (D:直径)のときの値とした。ただし、 $AB=D/2$ の場合のアーチ機構が支持するせん断力は、その最大値より若干小さい値である。

d) コンクリート強度低減係数 ψ の算定時における項、 $2M/QD$ の計算では、Dとして円柱の直径を用いる。

(3) 各種算定値と実験値の比較

誘導した円形断面柱のせん断耐力算定式(1)式、ならびに円形断面を角形断面に置換して耐力算定を行う表-4に示す各算定式の適合性を、既往の円形柱の実験値[4][5][6][7]ならびに本実験値(表-1参照)を用いて比較、検討する。図-6は、コンクリート強度 415kg/cm^2 、軸力比 0.3

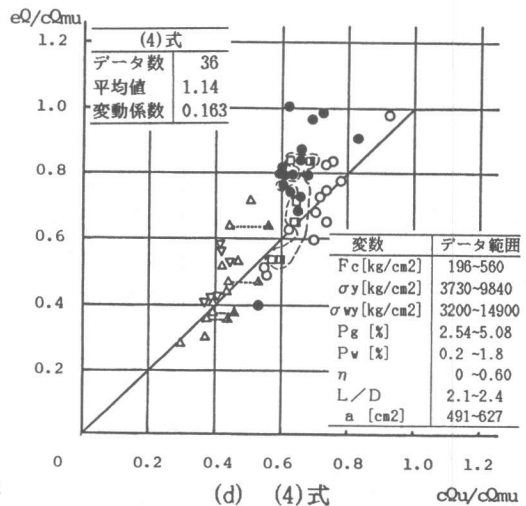
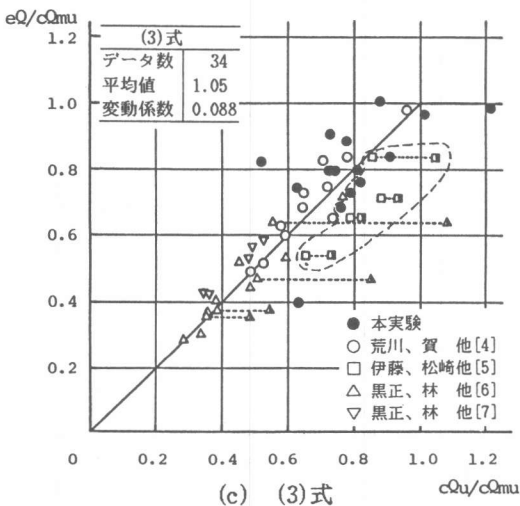
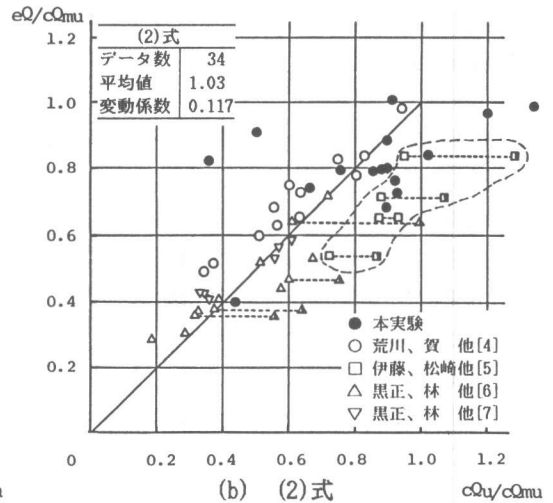
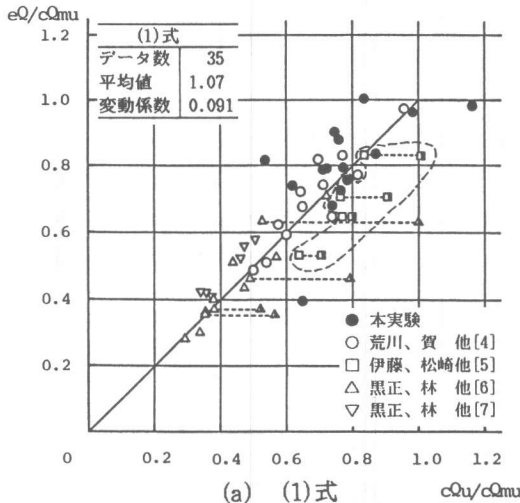


図-7 各算定式と実験値との比較

の場合を例にとって各算定式の関係を示したもので、同図には本実験における同条件下の実験値も示している。図7(a)-(d)は、表-4における(1)~(4)式による算定値と実験値をそれぞれ比較したもので、縦軸及び横軸はそれぞれせん断耐力実験値 eQ 、各せん断耐力計算値 cQ_u を曲げ耐力計算値 cQ_{mu} で除した値を示している。なお曲げ耐力計算値 cQ_{mu} には、コンファインドコンクリートの応力-歪関係[8]ならびにかぶりコンクリートを無視した断面を用いて断面分割法によって計算した値を採用している。実験データの総数は50体である。円形スパイラル筋の降伏強度 σ_{wy} が $25F_c$ を超えるものについては $\sigma_{wy}=25F_c$ 及び σ_{wy} =実降伏強度とした両方の値を示し両者を点線で結んでいる(後述の統計特性値の算出の際には $\sigma_{wy}=25F_c$ とした値を採用している)。同図には、 $cQ_u/cQ_{mu}>1.0$ (曲げ破壊領域)である試験体、せん断耐力時までの各載荷階における繰返し回数が各3回以上の試験体、及び $p_w=0$ である試験体の実験値を除いた eQ/cQ_u の平均値ならびに変動係数を示している。また、表-4の(5)式ならびに(6)式を用いた場合における eQ/cQ_u の平均値、変動係数はそれぞれ1.11, 0.103ならびに1.09, 0.091であった。これらの結果によれば、修正荒川mean式を除くと、B法に基づく(1)式,(3)式,(6)式の適合性が他の式のそれに比べ若干優れていると思われるが、いずれの式においても大差ない。また、円形断面柱の算定式としては円形補強筋の効果を低減している点で(1),(5),(6)式の方が望ましいと思われるので、円形柱のせん断耐力を円形断面のまま算定する場合には(1)式が、従来の角形断面置換法を用いる場合には(5)式または(6)式を用いばよいと考えられる。なお同図中の○囲いで示されるように、せん断耐力時までの載荷階における繰返し載荷回数が各3回以上の場合、せん断耐力の低下を考慮する必要がある。

3.3 変形特性

図-8に各試験体の水平荷重と変形の関係を、図-9に最大耐力時変形と円形スパイラル筋量との関係を示し、円形柱の変形特性に及ぼす諸要因の影響を考察する。

a) p_w の影響 : いずれの軸力比の場合でも p_w の増大と共に最大耐力時変形は大きくなり、その増大率は耐力におけるそれよりも大きい。また、最大耐力以後の耐力低下は p_w が大程小となる。

b) σ_{wy} の影響 : 同一の p_w の場合、 σ_{wy} が大きい方が最大耐力時変形は大きくなる。しかし、 p_w や σ_{wy} が同一ならば同変形は σ_{wy} にかかわらずほぼ同程度となる。

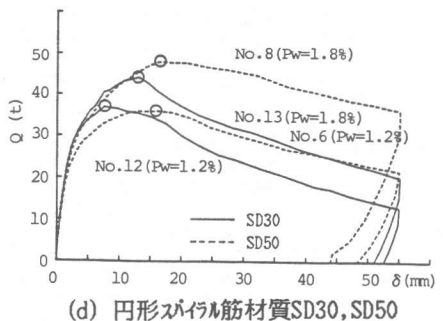
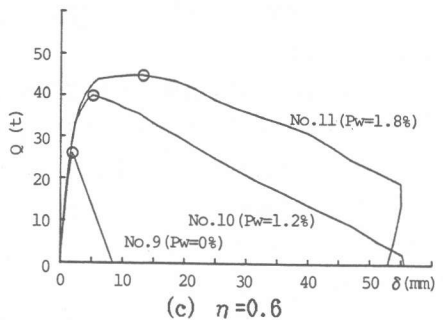
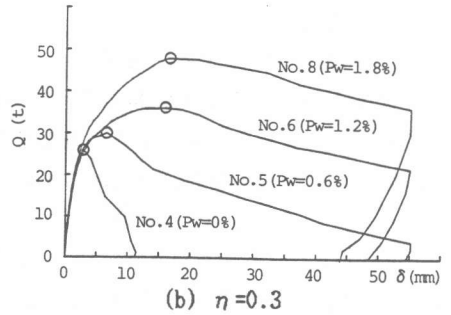
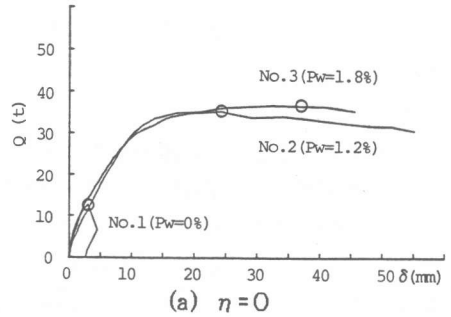


図-8 水平荷重-変形関係

c) η の影響 : 軸力が高いほど曲げ及びせん断ひび割れの発生は遅れ、その後の剛性低下も小さい。また、最大耐力時変形は小さく、最大耐力後の耐力低下は大きい。

d) 繰り返し載荷の影響 : 円形スパイラル筋の降伏以後に繰り返し載荷を受けると耐力が急激に低下し、単調載荷時に比べ変形性能は著しく低下する。

4 まとめ

本研究より得られた結果を以下にまとめる。

(1) 円形柱のせん断耐力を、角形への断面置換を行わずに精度よく推定する算定式(1)式を誘導し、同算定式が実用的に有用であることを既往の他の実験データを用いて検証した。

(図-7参照)

(2) SD50級の円形スパイラル筋を有する円形柱のせん断耐力は、 $p_w=1.8\%$ 程度まで p_w の増大に従ってほぼ直線的かそれ以上に増大する。また最大耐力以後の耐力低下も p_w の増大に従って小さくなる。(図-4参照)

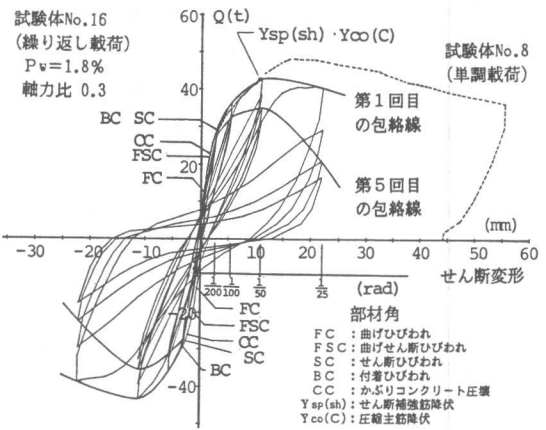
(3) 最大耐力以前に5回または10回の繰り返し載荷を受けた本試験体の場合、単調載荷の場合に比べせん断耐力は5~15%程度低下した。

(図-4参照)

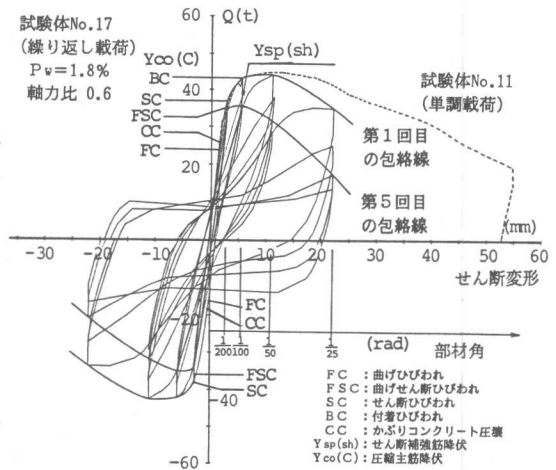
謝辞 SD50材を御提供頂いた住友金属工業(株)ならびに焼き入れ高強度鉄筋を御提供頂いた高周波熱練(株)に深謝致します。また、日本建築総合試験所益尾潔博士には平行移動装置の製作に当たり貴重な御教示を頂きました。ここに記して謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 鈴木, 中塚他: 高靱性・高復元性PRC円形部材に関する基礎的研究 その1~その5, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1985-1986
- 2) 南, 渡辺: RC耐震部材のせん断設計式の開発 - 日本建築学会RC耐震設計小委員会せん断WGの考え方, RC耐震壁のモデルとFEMsモデルに関するパネルディスカッション論文集, 1988.1
- 3) 渡辺, 六車, 西山: 曲げとせん断を受けるPCパイルの耐力評価に関する研究, コクリト工学年次論文報告集9-2, 1987
- 4) 荒川, 賀他: らせん鉄筋補強コンクリート柱の終局せん断強度について, コクリト工学年次論文報告集9-2, 1987
- 5) 伊藤, 松崎他: 鉄筋コンクリート円形断面柱の復元力特性に関する実験研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1986.8
- 6) 黒正, 林他: 鉄筋コンクリート円形断面部材のせん断強度と変形性状に関する実験研究, 日本建築学会関東支部研究報告集, 1979
- 7) 黒正, 林他: 曲げ及びせん断を受ける鉄筋コンクリート円形断面柱のせん断強度と変形性状に関する実験研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1982
- 8) 鈴木, 中塚, 吉田: 円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及び変形特性, 材料, 1985.1



(e) No.16



(f) No.17

図-8 (つづき)水平荷重-変形関係

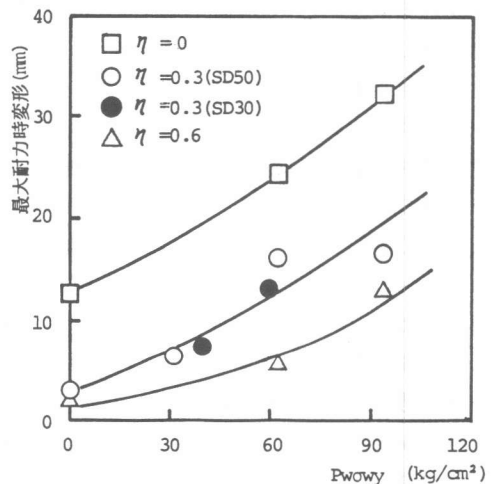


図-9 最大耐力時変形と $P_w\sigma_{wy}$ との関係