

[128] 円形スパイラル筋を有する PRC 柱の高靱性・高復元性特性

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)
 蔡 健 (大阪大学大学院)
 正会員 ○中田 浩之 (奥村組)

1. はじめに

コンクリート構造物の耐震化に必要な靱性を確保するための構造技術ならびに設計方法の確立は、同構造物の高層化の傾向と相まって一層重要な研究課題となってきている。部材の靱性は種々の方法によって改善されうるが、中でも、画期的な粘り強さを示すコンファインドコンクリートを利用する方法が、設計面、施工面からも優れていると考えられる^{1) 2) 3)}。

本研究は、(i)円形スパイラル筋を用いたコンファインドコンクリートの利用によって高靱性と強度増加を与え、また、(ii)プレストレスの導入によって中地震時に対してはほぼ原形に戻り、大地震時に対しては修復再使用を可能とするような復元性を付与する、ことを目的としたプレレストレスト鉄筋コンクリート(以下PRCと略記)柱に関するもので、実大により近い同部材の大変形塑性域での多数回正負交番繰返し荷重下での高靱性および高復元性について検討したものである。

2. 実験概要

試験体は、試験対象の円柱部(直径35cm)に梁部を付加したT型試験体で、その配筋及び柱断面を図1に、また試験体の種類を表1に示す。実験因子は、横補強筋量、主筋径、断面の全鋼材についてのプレストレス係数 λ^2 、軸力の大きさ及び各載荷階での繰返し回数である。使用した主筋及び横補強スパイラル筋の種類はSD30で、用いたコンクリートは、実験時の圧縮強度が267~384kg/cm²のレデーミクストコンクリートである。載荷及び測定装置を図2に示す。載荷は反力壁に横向きに固定

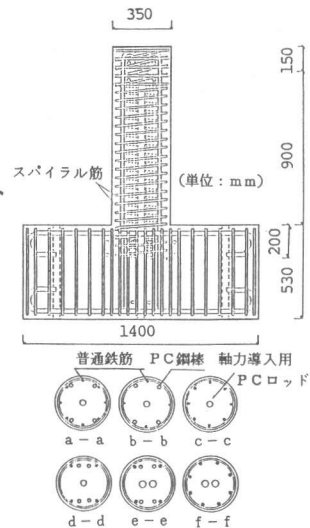


図1 試験体配筋図

表1 試験体の断面諸量一覧

Specimen	D (cm)	d (cm)	Ordinary Rein.	Pr (%)	Confinement Spiral Rein.	Ps (%)	PC tendon	λ^2	σ_g/f_c	η_{des}	Fc (kg/cm ²)	Column Section	
NO. 1	35	31	8-D13	1.06	D10@100	0.46	4-φ15	0.69	0.10	0.25	321	a-a	
NO. 2	35	31	8-D13	1.06	D10@ 50	0.92	4-φ15	0.69	0.10	0.25	321		
NO. 3	35	31	8-D13	1.06	D13@ 50	1.64	4-φ15	0.69	0.10	0.25	321		
NO. 4	35	31	8-D13	1.06	D10@ 50	0.92	4-φ15	0.69	0.18	0.25	314	c-c	
NO. 5	35	31	8-D19	2.39	D10@ 50	0.92		0.00	0.00	0.25	275		
NO. 6	35	31	8-D19	2.39	D13@ 50	1.64		0.00	0.00	0.25	275		
NO. 7	35	31	8-D16	1.85	D10@ 50	0.92	4-φ11	0.43	0.10	0.25	275	a-a	
NO. 8	35	31	4-D13	1.06	D10@ 50	0.92	4-φ17	0.85	0.10	0.25	275	b-b	
NO. 9	35	31	4-D13	1.06	D13@ 50	1.64	4-φ17	0.85	0.10	0.25	275		
NO. 10	35	31	4-D19	1.19	D10@100	0.46	4-φ15	0.69	0.18	0.25	267	d-d	
NO. 11	35	31	4-D19	1.19	D10@ 50	0.92	4-φ15	0.69	0.18	0.25	267		
NO. 12	35	31	4-D19	1.19	D13@ 50	1.64	4-φ15	0.69	0.18	0.25	267		
NO. 13	35	31	4-D19	1.19	D10@ 50	0.92	4-φ15	0.69	0.13	0.00	384	e-e	
NO. 14	35	31	4-D19	1.19	D10@ 50	0.92	4-φ15	0.69	0.13	0.35	384		
NO. 15	35	31	4-D19	1.19	D10@ 50	0.92	4-φ15	0.69	0.13	0.20	384		
NO. 16	35	31	4-D19	1.19	D10@ 50	0.92	4-φ15	0.69	0.13	0.35	384		
NO. 17	35	31	4-D19	1.19	D13@ 50	1.64	4-φ15	0.69	0.13	0.35	384		
NO. 18	35	31	8-D19	2.39	D10@ 50	0.92		0.00	0.00	0.35	277		f-f
NO. 19	35	31	8-D19	2.39	D10@ 50	0.92		0.00	0.00	0.00	277		
NO. 20	35	31	8-D19	2.39	D10@ 50	0.92		0.00	0.00	0.50	277		

Pr:普通鉄筋比 (= 4 a_{rg} / π D²)
 Ps:スパイラル筋の面積比 (= 2 a_s / S d)
 λ^2 :断面の全鋼材量についてのプレストレス係数
 (a_{rg} o_{py} / (a_{rg} o_{ry} + a_{pg} o_{py}))
 Fc:コンクリート強度 Fc':設計コンクリート強度
 注) No. 16 の各1回の繰返し載荷 (他は各10回)

σ_g/f_c :プレストレスレベル (= 4 P_o / π D² F_c)
 a_{rg}:普通鉄筋の全断面積
 a_{pg}:PC鋼材の全断面積
 a_s:スパイラル筋の断面積
 η_{des} :設計軸力比

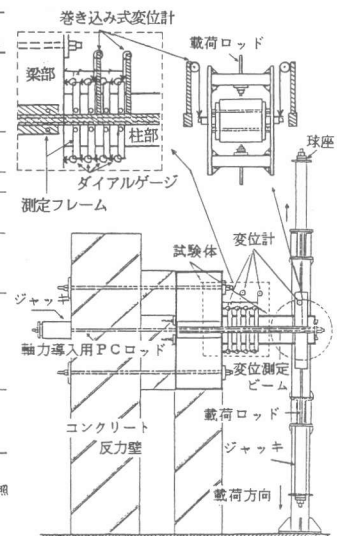


図2 載荷及び測定装置

した試験体の柱頭部載荷点位置を、載荷治具及びP.C鋼棒を介して50tfジャッキで上下交互に引張ることにより加力した。軸力の載荷は付着のないP.C鋼棒を用いて行い、載荷中の軸力は常に一定となるよう油圧ポンプで手動制御した。載荷は原則として部材角 1/100, 1/50, 1/30, 1/20, 1/14及び1/10における繰返し回数が各10回（試験体No.16のみ各1回）の、定軸力下での正負交番漸増定変位繰返し載荷である。柱部分の変位測定は巻式大変位計を用いて行い、また塑性ヒンジ領域内外における曲率分布は図2に示すように、梁面からそれぞれの測定検長を10cmとした4測定区間においてダイヤルゲージ式変位変換器を用いて測定した。

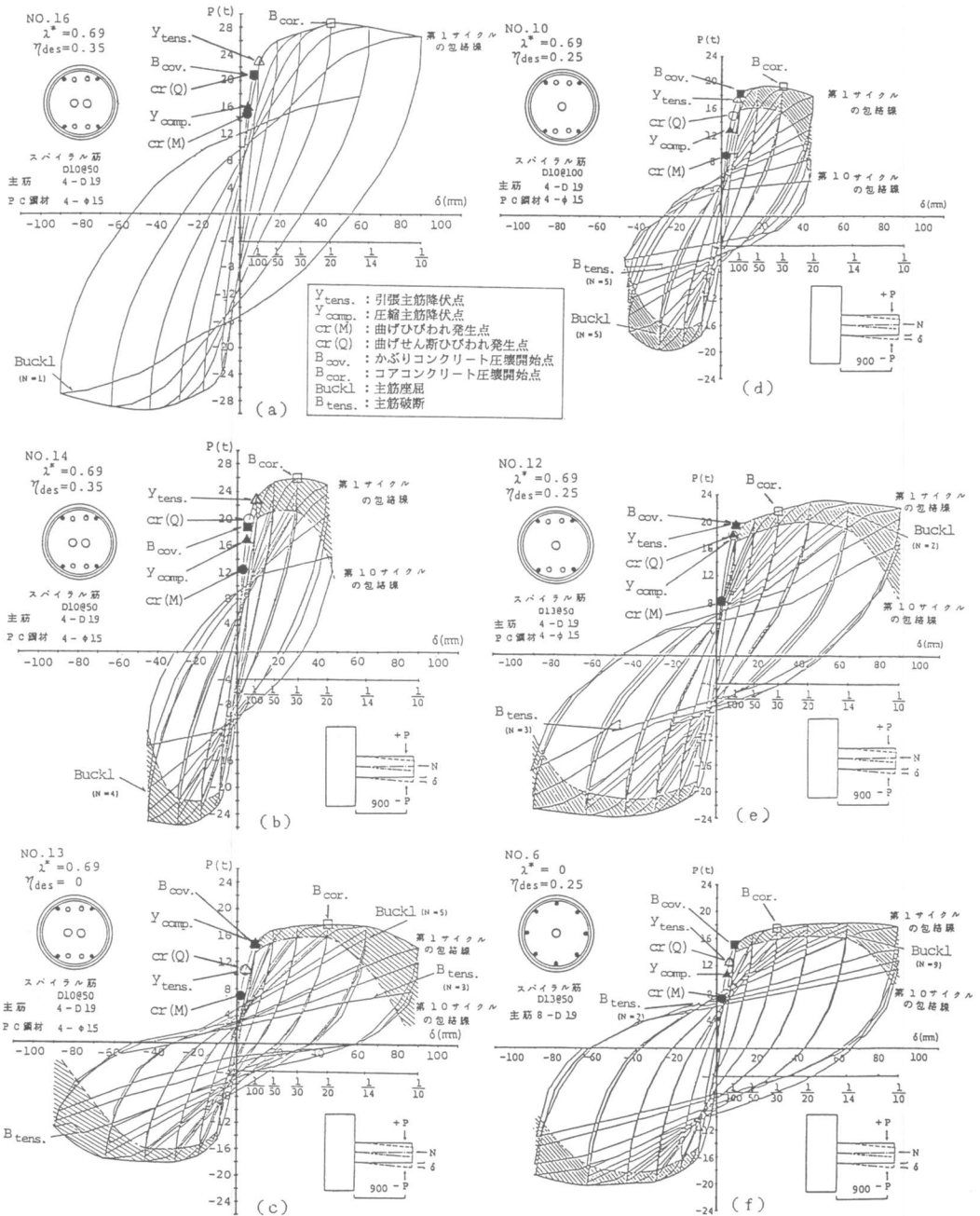


図3 荷重-変形関係

3. 実験結果及び考察

3.1 荷重-変形関係の概要

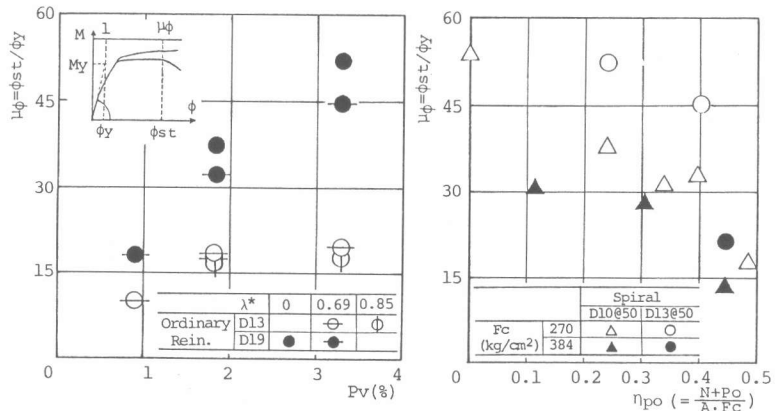
図3(a)-(f)に、荷重と柱頭部載荷点位置での変位との関係(P- δ 関係)の例を示すが、これらの結果から、本研究で取り上げた諸要因がP- δ 関係に及ぼす影響について概述する。まず繰返し回数が異なる同図(a),(b)の実験結果を比較すると、多数回繰返しによる靱性の劣化が明確に認められる。即ち、各載荷階における繰返し回数が1回の場合と10回の場合とでは靱性に大きな差が見られ、1回程度の繰返し載荷で得られた靱性結果からコンクリート系部材の耐震性を判断することには大きな危険性を含み、繰返し載荷による靱性の劣化を考慮する必要があることを示している。次に横補強筋量のみが異なる、試験体No.10(横補強筋としてD10@100使用)と試験体No.12(同D13@50)の結果(同図(d),(e))を比較すると、部材角が1/100程度までの小変形領域では、横補強筋の差の影響が現れるほどの大きな圧縮コンクリート歪が生じていないためP- δ 関係には殆ど差はない。しかし、大変形領域のP- δ 関係には明確な差が見られ、密な円形スパイラル筋を持つP R C柱では靱性ならびに繰返し荷重に対する安定性が著しく改善されている。次にプレストレス係数 λ^* の影響を同図(e),(f)の比較によって示す。R C試験体No.6($\lambda^*=0$)では、その履歴ループ形状はほぼ紡錘形に近く安定した履歴性状を示しているのに対し、 $\lambda^*=0.69$ のP R C試験体No.12の履歴ループは残留変形が小さいためNo.6に比べ瘦せた形状を呈し、復元性には優れているがエネルギー吸収性能に劣ることを示している。次に軸力のみが異なる同図(b),(c)で示す、軸力比0.35(プレストレスによる付加軸力分も加えると0.48)の試験体No.14と、軸力比0(同0.13)の試験体No.13の結果を比較する。軸力が大きい場合耐力は大きくなるが、同一載荷階での繰返し載荷による耐力低下率、繰返し荷重下での安定性ならびに靱性は低下している。

3.2 曲率靱性率 μ_ϕ

図4(a),(b)はそれぞれ、軸力比が0.25の試験体について示した曲率靱性率(μ_ϕ) - 横補強筋体積比(Pv)関係、及び主筋にD19を用いた試験体について示した曲率靱性率 - 総軸力比(η_{po} :プレストレスによる付加軸力分を加えた軸力比)関係である。 μ_ϕ の算定には、安定限界変形階⁵⁾(各載荷階における耐力低下率が繰返し回数の増加に従って収束する傾向を示し、かつ第10サイクルの耐力低下率が0.8以上となる最大の変位階)での曲率 ϕ_{st} 、及び部材の引張鋼材降伏時での耐力計算値と弾性剛性から求まる降伏曲率 ϕ_y を用いている。同図(a)によれば、曲率靱性率 μ_ϕ は、主筋径と横補強筋量(Pv)の影響を受ける。即ち主筋径がD19の場合、D13の場合に比べ μ_ϕ は大きく、Pvの増加に従って直線的に増大する。これに対し主筋がD13の場合、 μ_ϕ はPvの増大に対し上限値を持つ傾向を示す。これは、コンファインドコンクリートの粘り強さが十分に発揮される以前に、主筋が細径のために早期座屈し試験体の破壊を導いたことを示していると考えられる。また同図(b)によれば、同図(a)のR C部材とP R C部材の比較からも分かるように、 μ_ϕ は軸力の影響を受け、総軸力比が大きい程小さい μ_ϕ 値を示す。さらに、コンクリート強度が高い場合の方が μ_ϕ 値は小さくなる傾向が見られる。

3.3 曲率残留率

図5は、変形の復元性を示す1指標である曲率残留率(各載荷階における最大曲率 ϕ に対する除荷時の残留曲率 ϕ_o の比) - 載荷曲率関係を表したものである。同図(a)は、R CからP Cまで変化するP R Cの程度を表すプレストレス係数 λ^* の影響について、同図(b)は軸力の影響について示したものである。同図(a)によれば曲率残留率は、



(a) 断面靱性率-横補強筋体積比関係

(b) 断面靱性率-等価軸力比関係

図4 断面靱性率

小変形域(部材角1/100程度)では λ^* によらずほぼ同程度の値を示す。変形が増大すると曲率残留率は、いずれの λ^* の場合でも増加するがその増加率は、 λ^* が大きくなるほど小さくなっており、PC部材に近くなるほど高復元性性質を發揮することがわかる。また同図(b)より、RC部材でもPRC部材の場合でも、ある程度の軸力は曲率残留率を小さくし復元性を向上させることが分かる。しかしより高い軸力が作用すると、PRC部材の場合に見られるように曲率残留率は逆に若干大きくなる傾向を示す。

3.4 等価粘性減衰定数

図6は、エネルギー吸収性能を示す1指標である等価粘性減衰定数(h_{eq})—載荷曲率関係を表したもので、同図(a)には λ^* の影響を、同図(b)には軸力の影響を示している。同図(a)によれば h_{eq} は曲率残留率の場合と同様、小変形域(部材角1/100程度)では λ^* によらずほぼ同程度の値を示す。載荷荷変形の増大と共に h_{eq} はいずれの λ^* の場合も増加するが、PC部材に近いPRC部材になるほど断面のエネルギー吸収性能を支配する普通鉄筋量が少なくなるため、その増加率は λ^* が大きくなるほど小さくなり、エネルギー吸収性能は小さくなる⁴⁾。また同図(b)によれば、RC部材でもPRC部材の場合でも、ある程度の大きさを持つ軸力の存在によって h_{eq} は小さくなる傾向が見られる。これは、軸力の増大がコンクリートの圧壊等を促進させるためエネルギー吸収性能を大きくすると予想されるにもかかわらず、曲げ耐力も同時に上昇させるため無次元量である h_{eq} 値としては結局小さくなったことを示すと考えられる。なお、同図(a)及び図5(a)より横補強筋量は、復元性及びエネルギー吸収性能には殆ど影響を及ぼさないことがわかる。

4. まとめ

- 1) コンクリート系部材の耐震性を判断する場合、繰返し回数が各載荷階で各1回程度の実験結果に基づく判断では大きな危険性を含む恐れがあるため、繰返しによる靱性の劣化を考慮する必要がある(図3参照)。
- 2) 円形スパイラル筋で密に横補強することにより、PRC柱の靱性は著しく改善される。またPRC柱断面の靱性率は、主筋径が大きいほど、プレストレスによる付加軸力分も加えた総軸力比が小さいほど、コンクリート強度が低いほど、大きくなる(図3、図4(a),(b)参照)。
- 3) PRC柱の復元性は、RC部材からPC部材に近くなるほど向上するが、エネルギー吸収性能は小さくなる。また、ある程度の大きさを持つ軸力の存在はRC部材、PRC部材に拘らず復元性を向上させるが、横補強筋量は、復元性、エネルギー吸収性能には殆ど影響を及ぼさない(図5、図6参照)。

<参考文献>

- 1) 日本建築学会：地震荷重と建築構造の耐震性；1976 pp.272-305 (鈴木計夫担当)
- 2) 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 昭和60年1月
- 3) 鈴木・中塚・平松・長田：コンファインドコンクリート(横拘束コンクリート)を曲げ圧縮部に適用したPRC梁の高靱性挙動；コンクリート工学年次講演会論文集 昭59
- 4) 鈴木・中塚・榎本：PRC梁断面の履歴性質に関する解析的研究；セメント技術年報 昭56
- 5) 鈴木・中塚・中川・蔡・中田：高靱性・高復元性PRC柱部材に関する基礎的研究；セメント技術年報 昭60

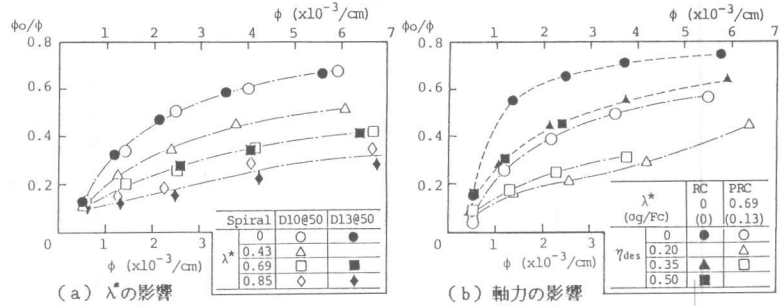


図5 曲率残留率—載荷曲率関係

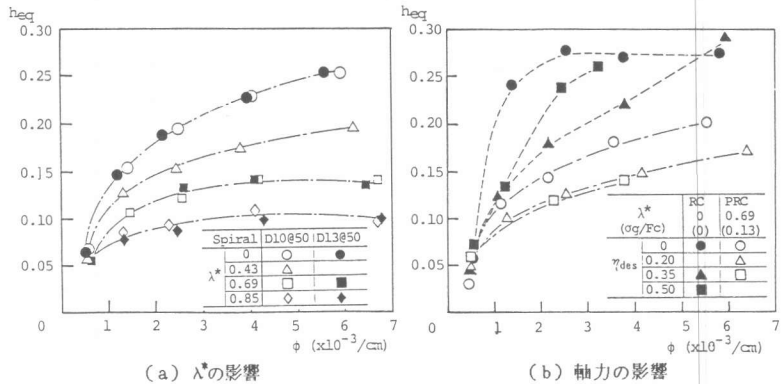


図6 等価粘性減衰定数—載荷曲率関係