

論文 プレストレストコンクリートはりの曲げモーメント・曲率に関する実験

高 湜^{*1}・塩原等^{*2}・小谷俊介^{*3}

要旨：正負繰返し曲げを受けるプレストレストコンクリート（PC）部材の復元力の履歴特性は、鉄筋コンクリート（RC）部材と比較して除荷カーブが原点を指向するS字型となり、しかも、履歴エネルギー吸収が少ない点に特徴がある。しかしこれらの履歴特性の特徴は、多くの因子が輻輳して影響しているものと考えられる。現状では多くの因子の影響を分離する方法が確立されるにはいたっていない。そこで、本研究では、純曲げを受けるPRC梁部材6体の正負繰返し曲げ試験を行ない、緊張材の抜け出しが無い条件で曲げモーメントー曲率関係の履歴特性とその影響を検討した。

キーワード：プレストレストコンクリート、履歴特性、緊張材、付着、抜け出し

1 はじめに

プレストレストコンクリート（PC）部材を含む鉄筋コンクリート骨組の耐震性を検討するために、非線形骨組地震応答解析が行われる。その際、プレストレストコンクリート部材の復元力特性のモデル化が重要である。プレストレストコンクリート部材の復元力特性は、鉄筋コンクリート（RC）部材と異なり、（1）除荷カーブが原点を指向するS字型の履歴ループを持ち、（2）履歴エネルギー吸収が少ない特徴を有する。これらの特徴は、緊張力の配置のほかにも、材料の非線形特性、せん断力、緊張材の付着特性の影響、緊張材の定着の影響など、多くの因子が輻輳して影響して表れているものと考えられるが、それらの影響については分離されていない。そのため、任意に与えられた部材について緊張材、部材の寸法および材料特性だけから、履歴ループのS字化の程度や、履歴吸収エネルギーの低下などの履歴特性を推定する方法はない。そのため多数の部材実験を行って履歴特性を推定せざるを得ない現状にある。

本研究の目的の1つは、プレストレストコンクリート部材の履歴特性がS字型になる原因を実験で特定することである。純曲げを受ける場合には緊張材に付着力が生じないので履歴特性に抜け出しの影響は表れないと仮定し、4体のプレストレストコンクリート部材と1体の比較用の鉄筋コンクリート部材の純曲げ実験を行ない、履歴特性に及ぼす抜け出しの影響の有無を間接的に検討した。また、併せて、緊張材を偏心して配置した場合の1体の実験も行ない、実験で得られたモーメントー曲率関係が、ファイバーモデルによる曲げ解析で推定可能か検証するための実験資料を得た。ここでは、これらの実験結果について簡単に報告する。

2 実験計画

2.1 試験体

PC部材の履歴形状が、RC部材と異なりS字型となる原因は必ずしも明確になっていないが、緊張材の付着が悪く抜け出しが生じ断面の平面保持が成立しないことが主要な原因と考えられる。純曲げの場合には鉄筋に付着力が生じないので、履歴特性に抜け出しの影響は現れず履歴特性はS字型

*1 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 修士課程 （正会員）

*2 東京大学大学院工学系研究科 助教授 工博 （正会員）

*3 東京大学大学院工学系研究科 教授 Ph. D.・工博 （正会員）

にならないという仮定を検証するため、単純支持２点載荷法により、PC部材の静的漸増振幅正負繰り返し曲げ実験を行なった。試験区間は中央の純曲げ区間としてモーメントー曲率関係の履歴性状を検討した。

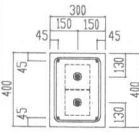
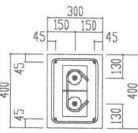
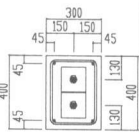
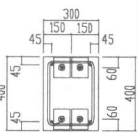
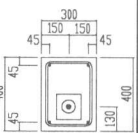
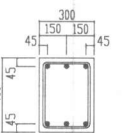
試験体は、すべて幅が300mm、せいが400mm、全長が2600mmの長方形断面のはり５体で、曲げ強度に占めるPC緊張材による強度の割合がおよそ80％、鋼材比は0.2、コンクリートの設計圧縮強度は、300MPaと共通にした。曲げ耐力をほぼ同じにした比較用のRCはり１体を加えた。

実験の変数は、（１）中央の純曲げ区間に隣接する曲げせん断区間からの緊張材の抜け出しの有無、（２）緊張材の断面中心からの距離、および（３）緊張材の偏心の有無とした。

表１に試験体の変数と諸元を示す。P１は、緊張材に丸棒のPC鋼棒を用い、通常と同じ方法でグラウトしたものである。P２は、緊張材に付着のよい異形PC鋼棒（ネジボン）を用い、さらに抜け出しを防ぐために、加力点とせん断区間の中央に定着用ナットを設けてグラウトしたものである。そのためP２では、純曲げの試験区間では緊張材の抜け出しの影響は無いものと想定する。P３は、緊張材に異形棒鋼を用いるが、定着用ナットはなく曲げせん断区間をビニールで巻いてアンボンドとしている。P４は、２本の緊張材の中心間距離を280mmと大きくしたものである。緊張材にはP１と同様に丸棒のPC鋼棒を用いている。P５は、緊張材を１本とし、断面の図心から70mm偏心させたものであり、緊張材には異形PC鋼棒を用いている。R１は、比較用のRCはりである。

すべての試験体の緊張材と普通鉄筋は、共通に試験体両端部の定着板で定着し、曲げせん断区間は、十分にせん断補強した。中央の純曲げ区間の拘束筋は、共通に1.41%とした。緊張材の初期緊張力は、公称降伏点強度の80%とした。

表 1 試験体詳細

試験体	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	R 1
断面						
緊張力 (kN)	840	769	803	681	404	0
普通鉄筋	SD345 4-D13	SD345 4-D13	SD345 4-D13	SD345 4-D13	SD345 4-D13	SD345 6-D25
PC鋼材	2-26φ 丸鋼 (B種1号)	2-D25 異形棒ナット有 (ネジボン)	2-D25 異形棒 (ネジボン)	4-17φ 丸鋼 (B種1号)	1-D25 異形棒 (ネジボン)	—
せん断補強筋 (mm)	D13@60 SD345	D13@60 +D13@60 SD345	D13@60 SD345	D13@60 SD345	D13@60 SD345	D13@60 SD345

2.2 材料特性

材齢31日のコンクリート圧縮および割裂引張強度は24.7MPaおよび2.6MPaとなった。また1/3最大圧縮強度時の剛性は27.3GPaとなった。普通鉄筋の力学特性を表２に、PC鋼棒の力学特性を表３にそれぞれ示す。

表 2 普通鉄筋引張実験結果

	降伏点強度 MPa	降伏歪 μmm/mm	引張強度 MPa	ヤング率 GPa
D13	328	1870	473	177
D25	370	2150	575	175

2.3 加力方法

図1に加力方法を示す。加力はそれぞれの試験体において、普通引張鉄筋が降伏する時点を部材降伏とし、この時の曲げモーメントを M_y 、曲率を ϕ_y として図2に示す加力スケジュールで行った。部材降伏前は荷重で制御し、降伏後は降伏時の曲率を基準に曲率で制御した。

部材の両方の側面で純曲げ区間の曲率を3区間に分けて測定し、両面を平均して曲率とした。以下においては中央の区間の曲率を示す。普通鉄筋とPC鋼棒は、歪ゲージにより歪度を測定した。曲率の測定方法を図3に示す。

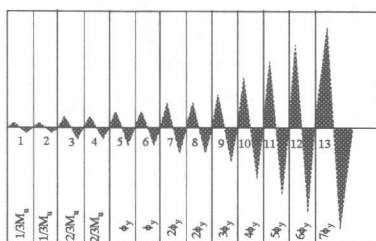


図2 加力スケジュール

表3 PC鋼棒の材料特性

呼び名	種類	公称断面積 (mm ²)	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)
17	B種1号	227.0	1079	1127
26	B種1号	530.9	1005	1101
25	ネジボン	506.7	1004	1134

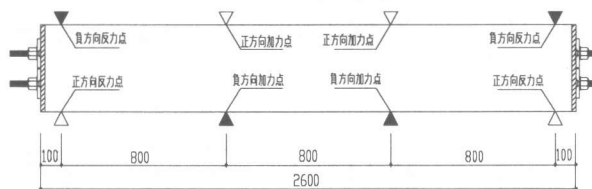


図1 加力方法

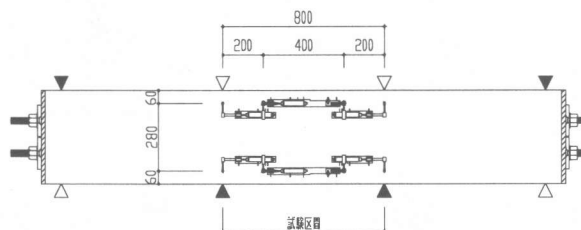


図3 曲率の測定方法

3 実験結果

3.1 ひび割れ状況

試験体は、すべての純曲げ区間で曲げ降伏し、曲げせん断区間でのせん断破壊はなかった。各試験体の、塑性率7の時のひび割れ状況を図4に比較する。

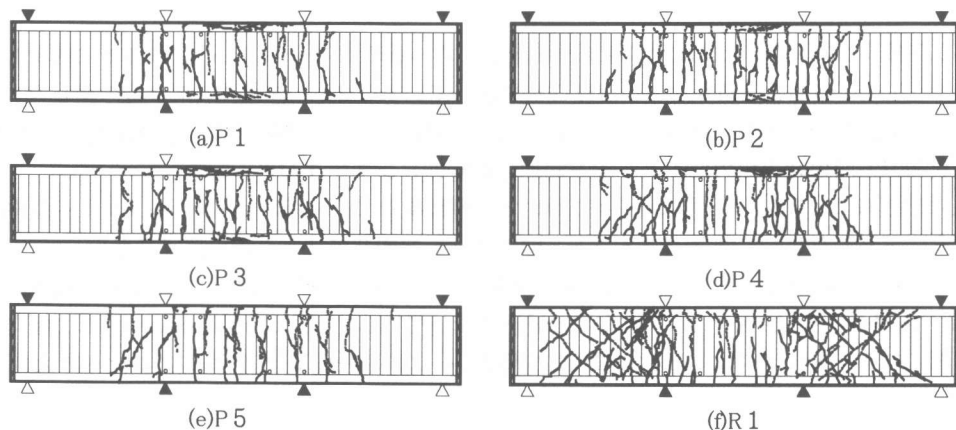


図4 ひび割れ状況

P1 と比べP2 およびP3 は純曲げ区間に生じた曲げひび割れが分散し本数が多く、せん断区間内では加力点に向かうひび割れが多かった。P2 とP3 のひび割れ性状は大きな違いがなかった。P4 の曲げ区間内の曲げひび割れ本数はP1 より多くなり、またせん断区間内の加力点に向かう斜めひび割れの本数はP2 およびP3 より多かった。P5 の曲げひび割れ性状はP2 およびP3 と似ている。また、PC試験体のひび割れ性状は曲げせん断区間についてRC試験体と大きな違いが見られた。

RC試験体にはせん断区間に加力点へ向かうせん断ひび割れが多数発生した。いずれのPC試験体でもせん断区間内のひび割れはRC部材より少ない。PC試験体ではひび割れの発生はRC試験体R1 より明らかに遅かった。

3.2 モーメントー曲率関係

実験から得られた各試験体のモーメントと純曲げの区間中央の400mmの平均の曲率関係を図5に示す。

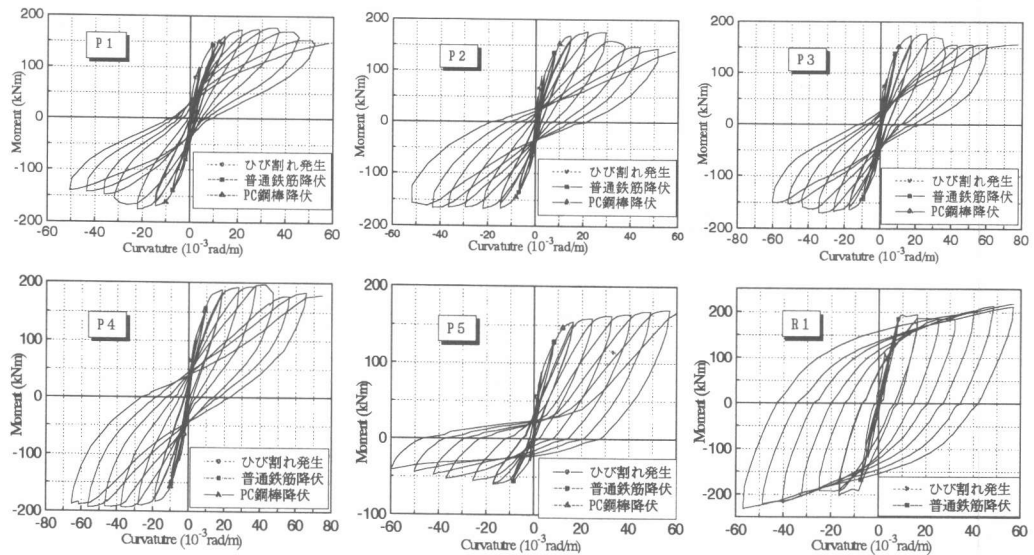


図5 モーメントー曲率関係

RCの試験体R1は典型的な紡錘型の履歴性状を示しているのに対して、PCの試験体では残留変形が小さく、ループの囲む面積が小さい履歴性状を示している。また、普通鉄筋降伏後の繰り返しの履歴ループは前ループのピーク値より小さいところを通過する。PC鋼棒を偏心配置した試験体P5は、負加力方向の時の耐力低下と、正方向加力の時のピンチングが見られる。

また、試験体P1、P2、P3およびP4について、塑性率1、3、5の時の曲げモーメントー曲率関係を図6に示す。ただし、曲げモーメントと曲率は、正方向荷重ピーク時の値で基準化している。塑性率1の時、各試験体ともS字型の履歴ループを示している。塑性率3ではP1以外の試験体にはS字型の履歴ループは見られず、逆S字型の履歴を示している。塑性率5のときには、この傾向はより顕著になる。試験体P2、P3およびP4の履歴ループが囲む面積は試験体P1に比べて大きくなっている。

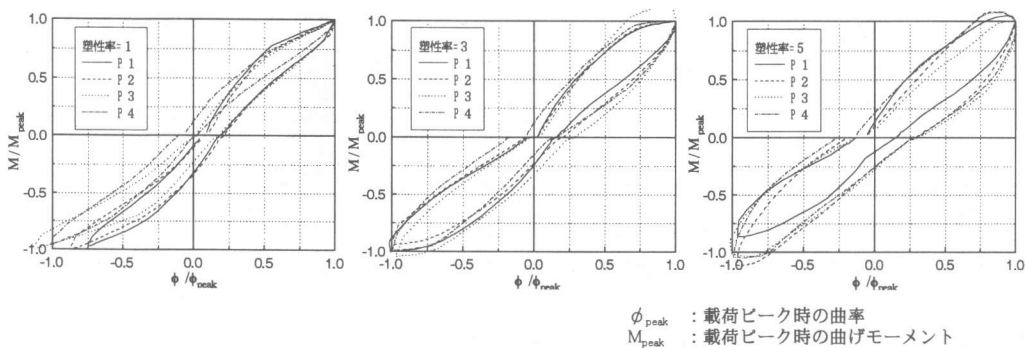


図6 試験体履歴ループの比較

4 実験結果の検討

4.1 曲げ耐力実験値と計算値の比較

『プレストレスト鉄筋コンクリート（Ⅲ種PC）構造設計・施工指針・同解説』（以下PC指針）の精算式（式（1））と、実測した使用材料の強度、弾性剛性を用い、PC試験体の曲げ終局強度を計算し実験結果を比較して表4に示す。なお、R1には、断面平面保持を仮定し、コンクリートにModified Kent-Park Modelを用いた断面解析により求めた値を示してある。

$$M_u = bd^2 \{k_1 k_3 F_c x_{n1}^2 (1 - k_2) + p_t \gamma \sigma_y (x_{n1} - d_{c1}) + p_p \sigma_{py} (d_{p1} - x_{n1}) + p_t \sigma_y (1 - x_{n1})\} \quad (1)$$

ここに、 $x_{n1} = \frac{1}{k_1 k_3 F_c} \{p_p \sigma_{py} + p_t (1 - \gamma) \sigma_y\}$ 、 $k_1 k_3 = 0.85$ 、 $k_2 = 0.42$ 、 $d_{c1} = d_c / d$ 、 $d_{p1} = d_p / d$ 、 M_u : 断面の終局曲げモーメント、 b : はり幅、 d : 引張側普通鉄筋に対する有効高さ、 d_c : 曲げ材の圧縮縁から圧縮鉄筋重心までの距離、 d_p : PC鋼材に対する有効高さ、 F_c : コンクリート圧縮強度、 p_t : 引張鉄筋比 (a_t / bd)、 p_p : PC鋼材鉄筋比 (a_p / bd)、 σ_y : 普通鉄筋の降伏点応力度、 σ_{py} : PC鋼材の降伏点応力度、 γ : 圧縮鉄筋比 (a_c / a_t)。

PC指針ではPC鋼棒と普通鉄筋が共に降伏した時の耐力を終局耐力としている。実験ではすべてPC鋼棒の降伏は普通鉄筋降伏後に生じたので、曲げ終局耐力は、PC鋼棒降伏時の曲げモーメントとする。

試験体P1、P2およびP3のPC鋼棒降伏時の曲げ終局強度は、P3が最も大きく、P1は最も小さいという結果が得られた。P2はP1の1.03倍、P3はP1の0.97倍となりよく一致している。

表4に示すように、PC指針の精算式を用いて算出した試験体の曲げ終局耐力値は試験体P1および完全付着である試験体P2のPC鋼棒降伏時の曲げモーメントとほぼ一致した。

表4 実験結果と計算値の比較

試験体	実験値 M_{pyE}	計算値 M_{uC}	M_{uC} / M_{pyE}
P1	149	152	1.02
P2	153	147	0.96
P3	151	147	0.97
P4	151	178	1.17
P5	146	148	1.01
R1	185	176	0.96

ここに、 M_{uC} : 終局モーメントの実験値 (kN m)、
 M_{pyE} : PC鋼棒降伏時モーメントの実験値 (kN m)

4.2 PC鋼棒の歪度

試験体中央の測定位置に貼付した歪ゲージで測定したPC鋼棒の歪度とモーメントの関係の一例を図7に示す(PC鋼棒の歪度にプレストレス導入時に生じた初期歪度を含めていない)。

すべての試験体で、繰返しにより塑性化引張歪が蓄積しているのが見られるが、特に、P2とP3で残留歪が大きい。これは、明らかにP2とP3では主筋の抜け出しが少ないことを表している。

試験体P4は、P1と同様に緊張材として丸棒のPC鋼棒を用いているが、上下の緊張材の間隔が大きいので、大きな歪が生じ、残留塑性歪は大きかった。これが、試験体P4のモーメントー曲率履歴が大変形時にP1のようなS字形にならない原因であると思われる。また、試験体P3は、曲げせん断区間のみがアンボンドであり、純曲げ区間では異形鉄筋のPC鋼棒を用いているため、PC鋼棒に丸鋼を用いた試験体P1よりは、むしろ試験体P2に近い結果を得られた。

5 まとめ

PC部材5体と比較用のRC部材1体について単純支持2点荷重法により、静的繰返し曲げ実験を行ない、

(1) 緊張材の抜け出しの有無、(2) 緊張材の断面重心からの距離、(3) 緊張材の偏心を変数として異なるモーメントと曲率の履歴特性を得ることができた。また、PC部材特有のS字型の履歴ループは、完全に付着を良くし、抜け出しをなくした場合には見られなかったので、履歴ループがS字型となる理由は、緊張材の抜け出しであることが確かめられた。

謝辞：PC鋼棒の緊張力導入時にあたっては、(株)ピー・エスの林三雄氏、市澤勇彦氏に指導と協力を頂いた。ここに謝意を表する。

また、本研究は、平成8年度文部省科学研究費補助金基盤研究B(2)の補助により行われた。

参考文献：

[1]『プレストレスト鉄筋コンクリート(Ⅲ種PC)構造設計・施工指針・同解説』、日本建築学会

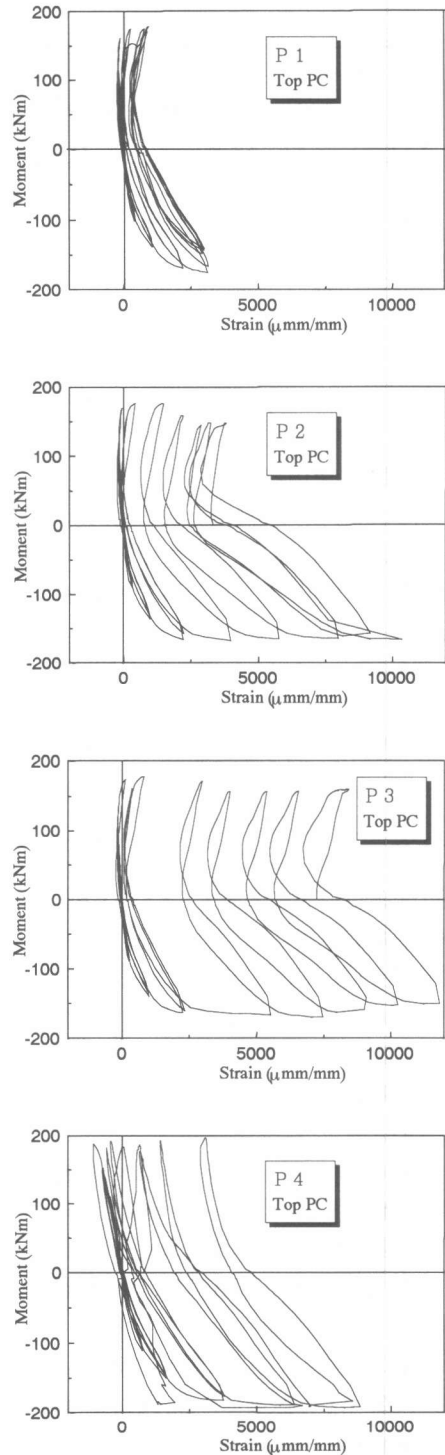


図7 曲げモーメントーPC鋼棒歪度関係