

(28) PC部材の履歴復元力特性の解析およびモデル曲線

オリエンタル建設 プレキャスト・プロジェクト 正会員 ○小山内 裕  
 同 上 森山 毅子彦  
 同 上 白井 奈津子

1. はじめに

プレキャストコンクリート (以下PCa) 梁の履歴ループは、コンクリート、PC鋼材および鉄筋の非線形性だけでなく、鋼材とコンクリートの付着特性、鋼材の抜けだしの影響を受けて変化する。本報告では、PCa梁を構成する材料を非線形バネに置換して解析し、コンクリートと鋼材の付着特性、PC鋼材の抜け出しを考慮して、それらが履歴ループに与える影響を検討する。そして履歴曲線は骨格曲線と繰り返し荷重における载荷曲線と除荷曲線よりなる定常ループよりなるものとし、ここでは定常ループを提案する。

2. 解析的検討

2.1 解析方法

(1) 解析モデル

解析モデルを図-1に示す。解析は、PC梁の曲げ特性のみを考慮するため、せん断変形を無視して行った。モデルは、図-2のようにコンクリート、鋼材をそれぞれ独立したバネで表し、コンクリート断面は平面保持する

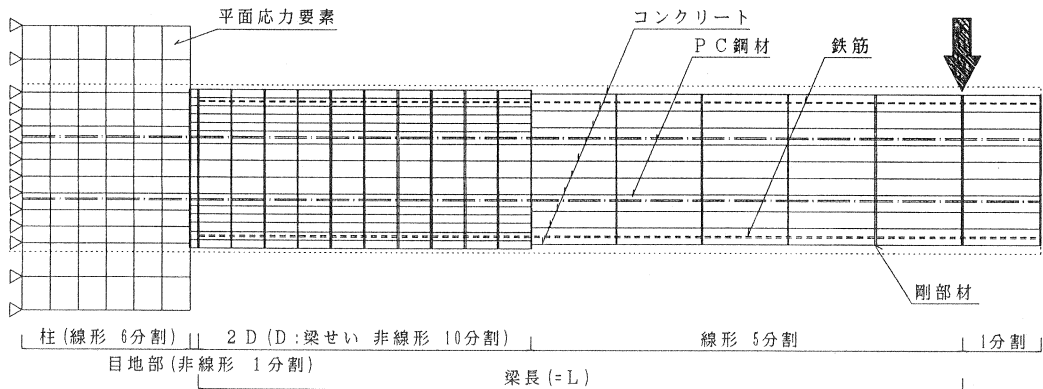


図-1 解析モデル概略

ものと仮定し、ボンドリンク要素により鋼材とコンクリートの付着を考慮した。要素は、材軸方向に2D間(D:梁せい)を10要素、材端までを6要素とした。コンクリートバネは、目地部と2D間は、断面を16分割した非線形要素とし、鋼材および付着バネは全長を非線形とした。柱部では、コンクリートは弾性の平面応力要素を用い、鋼材および付着バネについては梁部と同様とした。なお、梁両端部の鋼材についてはコンクリートと平面保持するものとした。

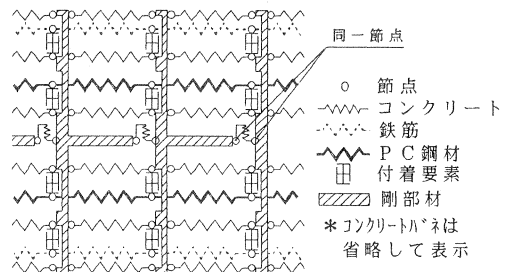


図-2 モデル詳細

(2) 材料特性

解析に使用したコンクリートの非線形要素のモデルを図-3に示す。最大圧縮強度時ひずみは、 $\epsilon_m=0.2\%$ とし、最大圧縮強度 ( $F_c$ ) 後は、 $0.8 F_c$  の耐力を保持するものとして計算した。また、横拘束筋内の内部コンクリートについては PARK らの提案式により、圧縮強度、ひずみを割り増した。

鋼材の  $\sigma - \epsilon$  関係は、図-4に示す Ramberg-Osgood モデルを用い、規準ひずみは  $0.2\%$ 、耐力は規格値とした。付着用のボンドリンク要素については、軸方向バネは剛とし、せん断バネの  $\sigma - \epsilon$  関係は、バイリニアモデルを用いた。実験結果との比較に用いた P C 鋼材に対する付着強度は、文献 [1] [4] の実験結果を参考に図-5のように仮定した。

2. 2 解析対象

解析は、①解析値と実験結果の比較、②付着特性による履歴ループの比較を目的として行った。表-1に解析を行った試験体の抜粋、表2に付着特性のパラメータを示す。②に使用した試験体は S15.2-O (表-1) とした。

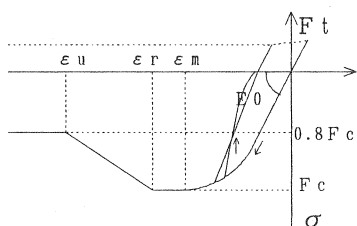


図-3 コンクリートモデル

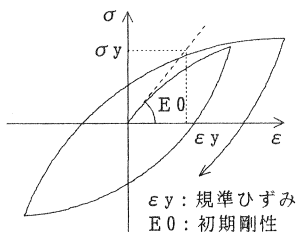


図-4 Ramberg-Osgood モデル

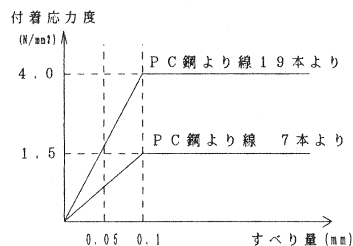


図-5 付着特性

表-1 解析対象試験体

試験体名称	梁断面幅×高さ (mm)	部材長 (mm)	コンクリート強度 (N/mm <sup>2</sup> )	PC鋼材			プレストレス量 (KN)	グラウト有：○ 無：×	鉄筋本数-径	備考		実施団体
				PC鋼材種類	本数	断面中心からの距離 (mm)						
S15.2-I	200 × 300	1650	39.7	φ 15.2mm 7本より	2	± 50	353.8	○	4-D10	Pca 圧着	+型	京都大学
S15.2-O	200 × 300	1650	39.7	φ 15.2mm 7本より	2	± 120	352.8	○	4-D10	Pca 圧着	+型	
S17.8-I	200 × 300	1650	47.7	φ 17.8mm 19本より	2	± 50	504.7	○	4-D10	Pca 圧着	+型	
S17.8-O	200 × 300	1650	47.7	φ 17.8mm 19本より	2	± 120	484.9	○	4-D10	Pca 圧着	+型	
BH3	180 × 280	1200	40.0	φ 12.7mm 7本より	2	± 80	227.8	○	4-D10	Pca 圧着	キャンチ	竹中工務店
UH3	180 × 280	1200	40.0	φ 12.7mm 7本より	2	± 80	236.0	×	4-D10	Pca 圧着	キャンチ	

2. 3 解析結果

(1) 実験値との比較

実験値と計算値の包絡線の比較を図-6に示す。S15.2-I、S15.2-O、S17.8-I、UH3では、最大耐力、履歴性状ともに計算値と実験値はよく一致している。S17.8-Oでは最大耐力が実験値に比べて大きい結果となったが、計算結果は Quac (ACI 規準による計算値) とはほぼ一致している。BH3の除荷曲線において、計算値は実験値に比べて膨らみが大きい。この違いは付着強度の設定に一因があると考えられる。解析による初期勾配は実験値よりやや大きくなっており、また、解析では最大耐力以後の荷重低下は評価できていない。

(2) 付着特性による履歴ループの比較

解析結果を図-7に、包絡線の比較を図-8に示す。付着強度の

表-2 付着特性パラメーター

名称	付着強度 (N/mm <sup>2</sup> )	滑り量 (mm)
S15O-U	0	0.1
S15O15-01	1.5	
S15O30-01	3.0	
S15O45-01	4.5	
S15O15-001	1.5	0.01
S15O15-1		1.0

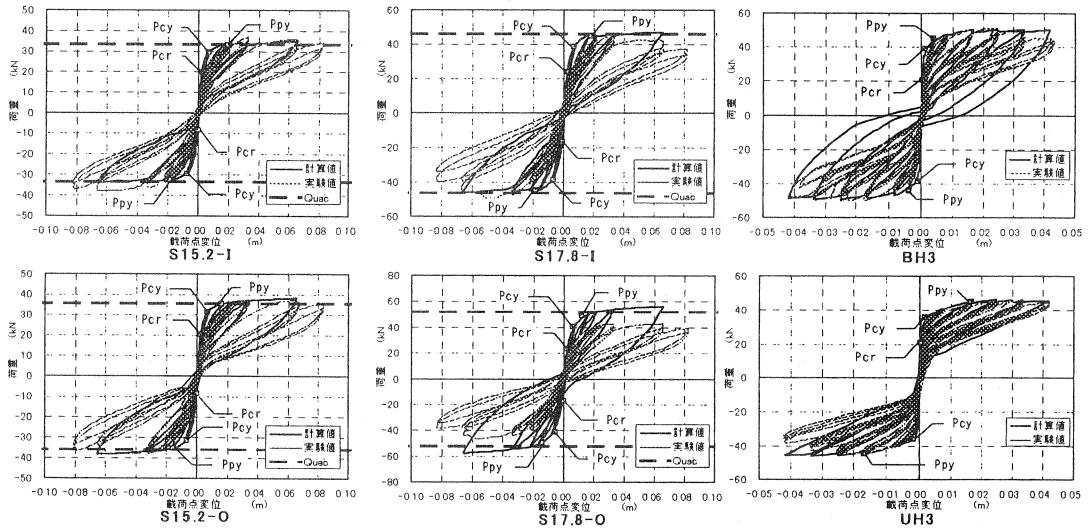


図-6 実験結果との比較

Pcr: ひび割れ荷重 Ppy: PC鋼材降伏時荷重  
Pcy: 最外縁コンクリート最大圧縮強度時荷重

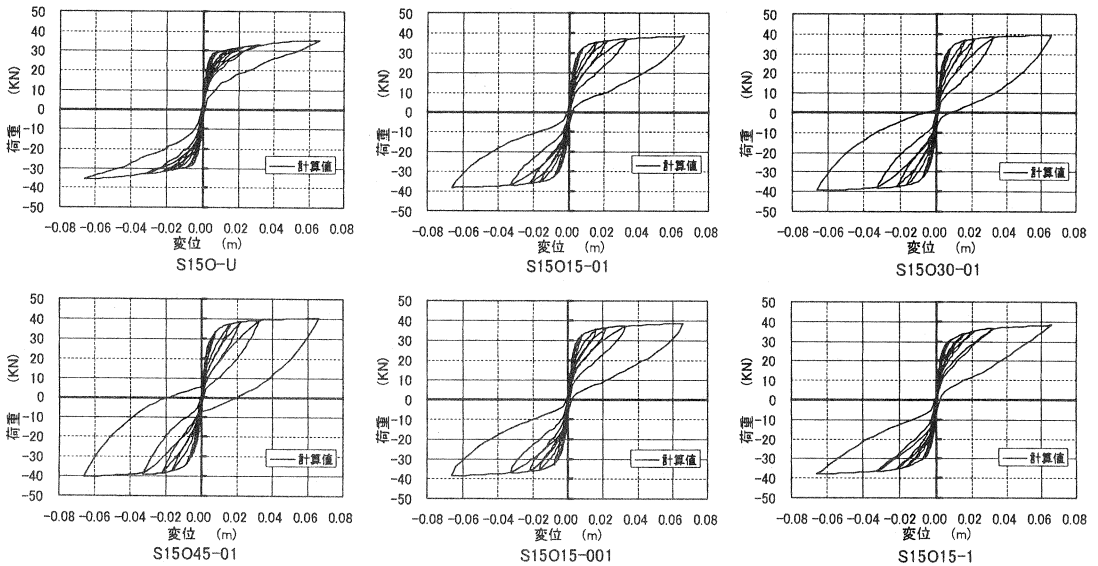


図-7 付着特性を変数とした履歴ループの比較

高いモデルほど、除荷曲線の膨らみが大きく、残留変位も大きいことがわかる。これは付着強度が高いほど、PC鋼材とコンクリートの付着が切れた範囲が狭くなり、変形が集中する目地部のPC鋼材が降伏し、除荷時の残留ひずみ量が大きくなることによる。包絡線の比較では、付着強度が高いほど最大耐力が大きくなり、付着バネの剛性の違いは、ひび割れ後の勾配と除荷曲線に影響するが、最大耐力にはほとんど影響しなかった。

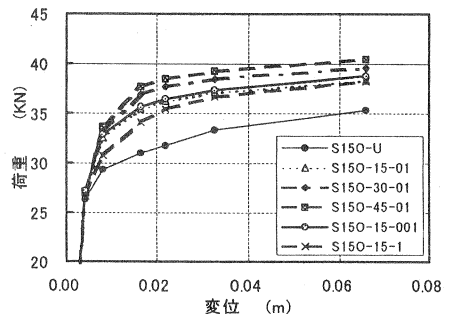


図-8 付着強度による包絡線の比較

### 3. 定常ループの提案

定常ループは実験で得られた様々なパラメータのPC部材の荷重変位曲線をもとに、荷重曲線を2次曲線で、除荷曲線を3次曲線で近似させたものをベースとした実験曲線である。骨格曲線と定常ループの関係を図-9に示す。

#### 3.1 荷重曲線

図-10に荷重曲線を示す。荷重曲線の始点ではなく次の2つの場合に分けられる。

(1) 負荷重から正荷重に移行するときの変位0の点。

(2) 除荷の途中で再載荷する場合の折り返し点。

最初の荷重では、B点をひび割れ点とする。2回目以降の荷重では、荷重曲線の終点は骨格曲線上で、X座標を過去の最大変位点と始点間の距離の1.1倍した点とする。荷重曲線はバイリニアとする。曲線の折れ点は始点と終点間の変位の1/2点である。第1直線の勾配、第2直線の勾配は次のように決め、荷重曲線が包絡線に達した後は骨格曲線上を通るものとする。

第1勾配  $K_1 = 1.2$ 、第2勾配  $K_2 = 0.8$

#### 3.2 除荷曲線

図-11に除荷曲線を示す。除荷曲線は3本の直線(C-D-E-F)よりなる。C点は骨格曲線上の除荷開始点、D点は  $X = 0.8$  上の点、E点は  $U(0.8, 1.0)$  と  $W(0, -0.2)$  を結ぶ直線上の点である。直線EFは勾配1.25の直線である。

除荷開始点は骨格曲線上にあるとは限らず、次のような場合がある。

(1) 荷重曲線が骨格曲線に達した後、骨格曲線上を移動中に除荷を開始する場合。

(2) 荷重曲線が骨格曲線に達する前に除荷開始する場合。

各点の座標は次の通りである。

$$X_0 = 0.8$$

$$Y_0 = (0.8 - 0.4(\lambda \cdot \omega + 1) + (0.025\lambda \cdot \omega + 0.05)\mu / Kc)K_1 + \lambda \cdot \omega - (0.025\lambda \cdot \omega + 0.05)\mu$$

$$X_1 = \{0.2 + \lambda \cdot \omega - 0.4(\lambda \cdot \omega + 1)K_1 - \mu(0.025\lambda \cdot \omega + 0.05)(1 + K_1/Kc)\} / (1.5 - K_1)$$

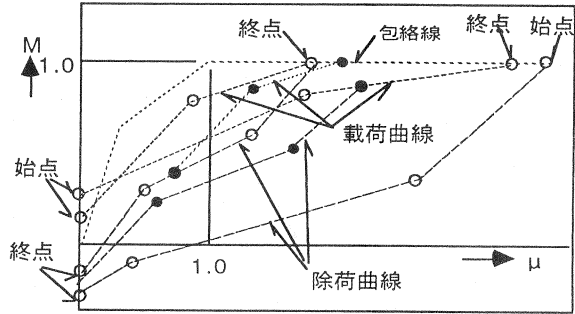


図-9 骨格曲線と定常ループ

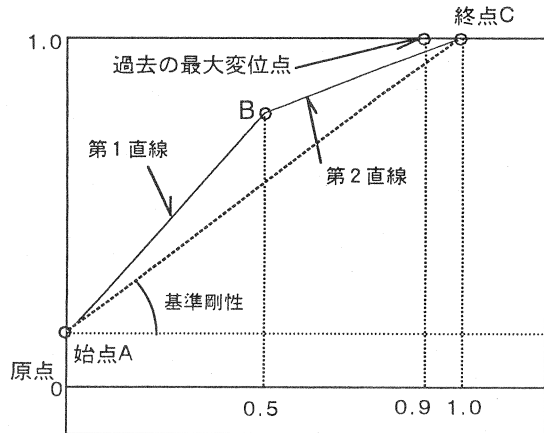


図-10 荷重曲線

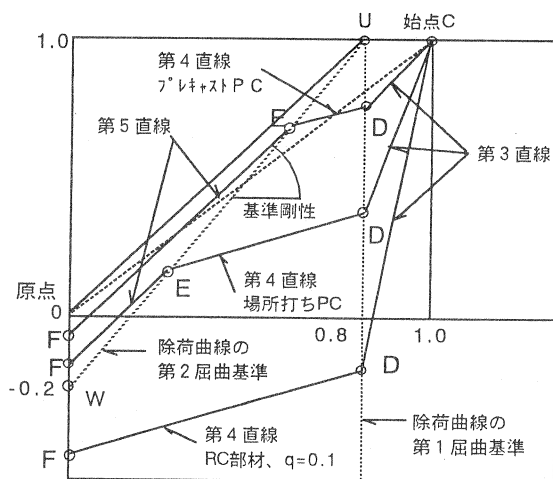


図-11 除荷曲線

$$Y_f = 1.5X_f - 0.2$$

$$X_f = 0$$

$$X_f > 0 \text{ ならば } Y_f = Y_f - 1.25X_f$$

$$X_f < 0 \text{ ならば } Y_f = Y_f - K_f X_f$$

ここで  $\mu$  : 塑性率、 $\sigma_g$  : プレストレス ( $N/mm^2$ )、 $\lambda$  : PC鋼材の曲げ耐力寄与率  $= pMu / (pMu + rMu)$ 、 $pMu$  : PC鋼材による曲げ耐力、 $rMu$  : 鉄筋による曲げ耐力、 $\omega$  : 付着係数、PC鋼棒  $\omega = 0.7$ 、より線  $\omega = 0.6$ 、異形PC鋼棒  $\omega = 0.4$ 、 $\lambda = 0$  の場合 : 引張鉄筋係数  $q = 0$  のとき  $\lambda \omega = -0.5$ 、引張鉄筋係数  $q \geq 0.3$  のとき  $\lambda \omega = 0$ 、中間は直線補間。  $K_c = 0.22 + 0.14 \sigma_g$ 、 $K_3 = (1 - Y_0) / 0.2$ 、 $K_4 = 0.6 - 0.05 \mu$ 、 $K_5 = 1.25$

### 3.3 実験結果による検証

プレキャスト部材と場所打ち部材の別、PC鋼材の種類、RC部材の鉄筋係数の違いが、標準モデルに及ぼす影響を検討し、実験値と比較しての適合性を調べた。

図-12～図-15に実験結果と提案した定常ループを示す。図-12はアンボンドPCストランドを使用したプレキャストPC部材、図-13は付着のあるPC鋼棒を使用したプレキャストPC部材、図-14は付着のあるPCストランドを使用したプレキャストPC部材、図-15は付着のある異形PC鋼棒を使用した場所打ちPC部材である。

曲線の細かい部分では履歴ループ形状が類似していないところもあるが、プレキャストPC部材からRC部材まで、概ね適合している。

### 3.4 等価粘性減衰常数

等価粘性減衰常数を図-16に示す。RC部材は  $\mu = 1.0 \sim 2.0$  で最大値に達し、以後は一定値を維持している。鉄筋係数  $q$  が小さい方が減衰常数は大きい。PC部材では減衰常数の値はアンボンドや、丸鋼が異形鋼より小さく、一体式より、プレキャストの方が減衰常数は小さい。

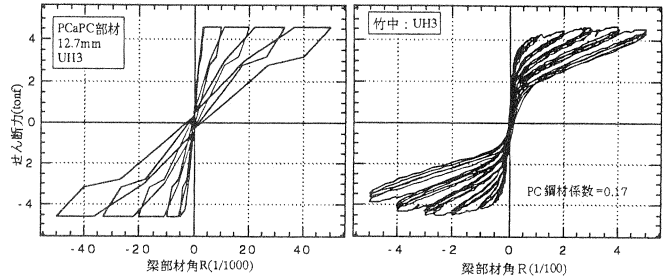


図-12 プレキャストPC部材の試験結果との比較 (PCストランド付着無し)

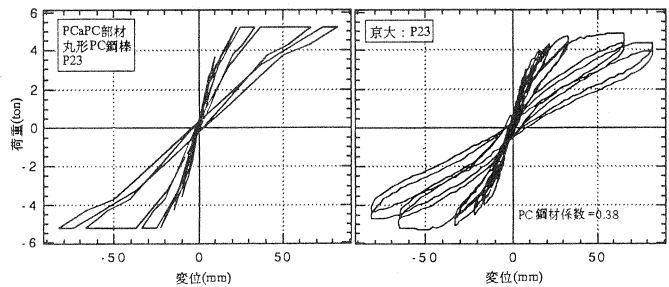


図-13 プレキャストPC部材の試験結果との比較 (丸形PC鋼棒付着有り)

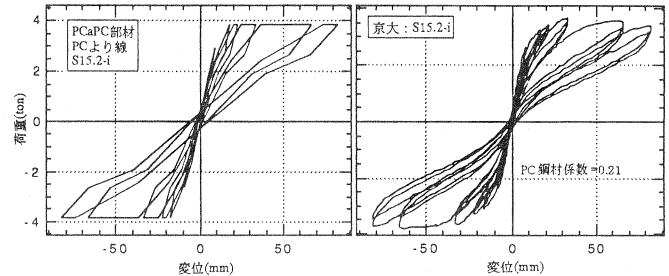


図-14 プレキャストPC部材の試験結果との比較 (PCストランド付着有り)

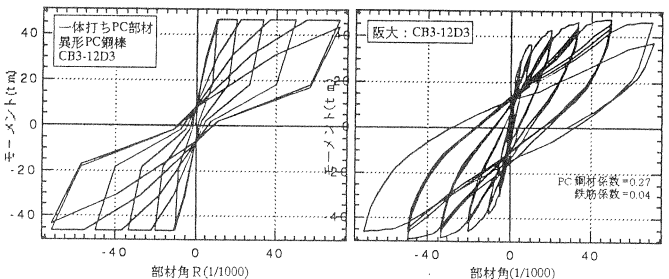


図-15 プレキャストPC部材の試験結果との比較 (異形PC鋼棒付着有り)

またPC部材では減衰定数の値は終始増加の傾向にある。

これらは付着強度を考慮した付着係数 $\omega$ とPC鋼材の曲げ耐力寄与率 $\lambda$ の積( $\lambda \cdot \omega$ )、および塑性率の影響を受ける除荷曲線の形状により変動したものである。

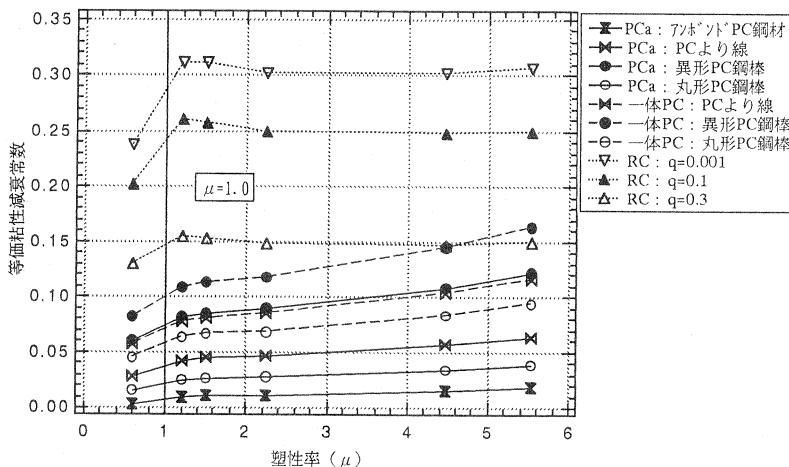


図 - 1 6 等価粘性減衰定数

#### 4. まとめ

1) PCa梁を構成する材料を非線形バネに置換してPCa部材の曲げ履歴特性について解析し、コンクリートと鋼材の付着特性、PC鋼材の抜け出しが履歴ループに与える影響を検討した。

その結果、材料特性および付着強度の仮定が適切であれば、耐力、履歴性状をよく表現でき、また、PC鋼材の付着強度は、部材の最大耐力、履歴性状に影響し、付着強度を高いほど最大耐力は高くなり、履歴ループは、付着強度が低いものほど、瘦せた曲線となり、残留変形も小さくなることがわかった。

2) PC部材 (RC部材を含む) の履歴復元力特性の定常ループを提案した。

ループは付着強度を考慮した付着係数 $\omega$ とPC鋼材の曲げ耐力寄与率 $\lambda$ 、塑性率、およびプレストレス量をパラメータとしたトリリニアの除荷曲線の特徴とし、実験による履歴曲線とよく一致した。

#### 謝 辞

本研究を行うにあたり、京都大学、千葉大学、豊橋技術科学大学、大阪大学、(株)竹中工務店に実験結果を提供して頂いた。ここに謝意を表す。また、本報告は96～98年に行われたPC共同研究の一環として行われたことを報告する。

#### 参考文献

- [1] プレキャストPC梁の曲げ性能に及ぼすPC鋼材の付着特性：是永、他、大成建設技術研究所報第28号
- [2] 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、他、コンクリート工学年次論文報告集1996年
- [3] 異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究；藤井、他、日本建築学会論文報告集1982vol.319
- [4] 共同研究,PC構造設計・施工指針の作成平成8～11年研究報告書；建設省建築研究所他
- [5] アンボンドPC不静定梁の力学的性質に関する研究；六車、他、プレストレストコンクリート vol.27No2,1985