

論文 プレストレストコンクリート造部材の非線形性状および履歴特性

林 三雄^{*1}・傳 金華^{*2}・小谷 俊介^{*3}・岡本 伸^{*4}

要旨: π^0 プレストレストコンクリート造(PC)部材は、純PC部材から力学的性状が鉄筋コンクリート造(RC)に極めて近い π^0 プレストレスト鉄筋コンクリート造(PPC)部材まで幅広く存在する。この研究は、1989年に実施したPC供試体(PPC部材を含む)の曲げせん断試験の結果を纏めたうちのPC部材に関する非線形性状および履歴特性について報告するものである。また、これらの纏めについては、RC部材との連続性をはかるためにRC部材の非線形性状および履歴特性としてよく用いられている菅野の式および武田履歴モデルならびにPC構造物の履歴を表す岡本履歴モデルを参考にした。PPC部材を含む一連のPC部材に関する非線形性状および履歴特性について、実施した実験結果との比較を含め、その概要を報告する。

キーワード: プレストレス、PC部材、復元力特性、PC履歴モデル

1. はじめに

プレストレストコンクリート造(PC)部材の荷重一変形関係における一般的な履歴性状としては、鉄筋コンクリート造(RC)部材に較べ履歴エネルギーの吸収が小さいことおよび弾塑性的な挙動を示しやすいことが知られている。また、PC部材の履歴特性を表すモデルは幾つか提案されているが、実際のPC部材は純 π^0 プレストレストコンクリート造(純PC; PC鋼材のみ配置)部材からRC部材に極めて近い性状を示す π^0 プレストレスト鉄筋コンクリート造(PPC)部材まで幅広く存在する。そのため、これらPPC造を含む一連のPC部材に関する履歴モデルは、未だ十分に確立されていない。ここに報告するPC部材に関する履歴特性は、著者らが1989年~'91年にかけて実施したPC供試体の曲げせん断試験の結果を、RC部材の各特性を参考に纏めたものである。実験に用いた各PC供試体は、PC鋼材による部材の曲げ終局強度比(λ)を変数とし、PC鋼材量を一定として普通鉄筋量のみ変化させ、純PCからPPC部材まで表現した。また、この履歴特性の纏めに際しは、RC部材との連続性をはかるために、RC部材の非線形性状および履歴特性モデルとして一般に広く用いられている菅野の式¹⁾および武田履歴モデル²⁾ならびにPC構造物の履歴を表す岡本履歴モデル³⁾を参考とした。以下、PC部材の非線形性状および履歴特性について、実験結果との比較を含め報告する。

2. PC部材の非線形性状

曲げ降伏するRC部材の初期剛性に対する降伏時の剛性低下率(α_y)を表す菅野の式は、一般によく用いられている。一般的なPC部材とRC部材の特性の違いを比較すると、1)PC部材は π^0 プレストレスによる軸力を受けており、2)普通鉄筋に対するPC鋼材の降伏強度比が極めて高い(3~4倍)、および3)PC鋼材は π^0 プレストレス時に大きい引張歪(0.4~0.5%)を受けている、等の違いがある。また、PC鋼材が普通鉄筋と異なる力学的性状は、明確な降伏点および降伏棚を持たない点である。このため、PC鋼材の降伏強度は、永久引張歪が0.2%に達するところの応力をもって降伏強度と定められている。しかしながら、ここでは、PC鋼材の規格降伏強度を折れ点とする完全弾塑性として扱うこととした。これらPC鋼材の降伏性状が部材に与える影響としては、部材の曲げ降伏時に鋭角的な剛性変化を示せないことである。一方、PC鋼材の規格降伏強度に対する実強度の比は比較的小さく、その値は一般に約5%程度と考えられている。従って、PC部材の非線形性状については、RC部材によく適用される降伏剛性低下率の式、例えば、菅野の式をそのまま適用しても部材の降伏剛性を精度よく推定することは難しい。しかしながら、これらPC部材とRC部材

*1 (株) π^0 - π^3 建築技術部, (正会員)

*2 (株) π^0 - π^3 建築技術部, 工博 (正会員)

*3 東京大学教授 工学部建築学科, 工博 (正会員)

*4 建設省 建築研究所長, 工博 (正会員)

の違いを一定の手法で補正すれば、PC部材の降伏剛性を比較的精度よく推定することができる。PC部材の非線形性状の計算に用いた初期剛性(K_E)、降伏剛性低下率(α_y)、曲げひび割れ強度(M_c)、および曲げ降伏強度(M_y)の各式を2.1~2.4に示し、実験に用いたPC供試体の概要を表1、2、3および図1に示す。また、おもな計算(材端剛塑性バネ法による非線形漸増載荷解析)結果と実験による結果の比較例としてNo.1および6の各供試体の結果を図2に示す。計算した各供試体の非線形性状は、実験結果と概ね一致する。

$$K_E = L / \{ (L^2 / 3E_c I_c) + k / (G \cdot A_c) \} \quad (2.1)$$

$$\alpha_y = (0.043 + 1.64n \cdot p_t + 0.043a/D + 0.33\eta) \cdot (d/D)^2 \quad (2.2)$$

$$M_c = (1.8\sqrt{F_c + P_c/A_c}) \cdot Z_c \quad (2.3)$$

$$M_y = 0.9 \sigma_y \cdot a_c \cdot d + f_{py} \cdot a_{pc} (1 - 0.5q) \cdot d_p \quad (2.4)$$

ここに、 $\eta = (P_c + N) / F_c$, $q = (a_p \cdot f_{py}) / (F_c \cdot b \cdot d)$, L :部材フランジから反曲点までの距離, E_c および G :コンクリートの弾性係数およびせん断弾性係数, I_c および Z_c :部材の有効断面2次モーメントおよび断面係数, A_c :コンクリートの断面積, a_c :引張鉄筋の断面積, a_{pc} :PC鋼材の引張有効断面積, F_c :コンクリートの圧縮強度, σ_y :鉄筋の規格降伏強度の1.1倍, f_{py} :PC鋼材の規格降伏強度, p_t :PC鋼材の断面積を鉄筋との降伏強度比で割り増した値を含めた引張鉄筋比, k :形状係数, n :コンクリートに対する鋼材の弹性係数比, a :シアースペンシング, d :部材の有効成, d_p :PC鋼材に関する有効成, D :部材成, N :軸力, および P_c :有効プレストレス力を表す。ただし、 p_t の計算に用いるPC鋼材の断面積は部材の曲げ降伏強度に有効な鋼材とし、最外端の引張鉄筋或いはPC鋼材から有効梁成の2/3以内に位置する鋼材、その断面積に部材の有効成に対する各鋼材からの有効成の比を乗じた値($f_{py}/\sigma_y \cdot (d_p/d)$)とする。ただし、PC鋼材のみ配置される場合、PC鋼材の断面積を3倍した値を用いる。

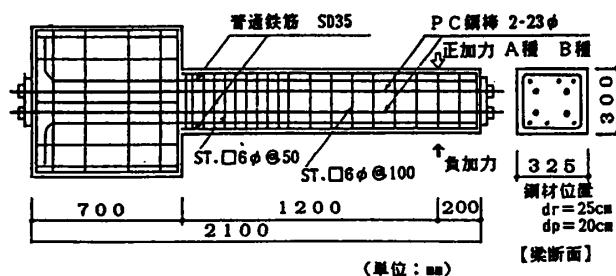


図1. 供試体の形状・配筋

3. PC部材の履歴特性

PC造建物に関する履歴特性モデルは、1991年に岡本³⁾らにより発表され、PPC造を含むPC造フレーム全体の履歴を表す

表1 供試体一覧

供試体名	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
断面 b×D (cm) 32.5×30	● ○ ● ○	● ○ ● ○	● ○ ● ○	● ○ ● ○	● ○ ● ○	● ○ ● ○
PC鋼棒	2-φ23 A種 2-φ23 B種	同左	同左	同左	同左	同左
普通鉄筋 (SD35)	3-Φ25 1-Φ16	2-Φ25 1-Φ16	2-Φ22 1-Φ16	2-Φ13 1-Φ16	2-Φ13 1-Φ16	-
λ	0.50	0.61	0.70	0.86	0.89	1.00

ここで、 $\lambda = M_{py} / (M_{py} + M_{ry})$: 静荷耐力比

表2 PC鋼棒・鉄筋の材料定数

種類	降伏点 (kgf/cm ²)	降伏歪 (%)	引張強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)
23φ A種	8000	0.3809	9500	2.10×10 ⁶
23φ B種	9500	0.4523	11000	2.10×10 ⁶
D25(SD35)	3478	0.1949	5745	1.92×10 ⁶
D22(SD35)	3912	0.1992	5807	1.97×10 ⁶
D19(SD35)	3783	0.1947	5711	1.94×10 ⁶
D16(SD35)	3829	0.1974	5611	1.94×10 ⁶
D13(SD35)	3438	0.1737	5445	1.91×10 ⁶

表3 コンクリート強度

供試体名	材令 (日)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)
No.3, 4, 5	48-54	642	36	3.39×10 ⁶
No.1, 2, 6	110-116	610	33	3.32×10 ⁶

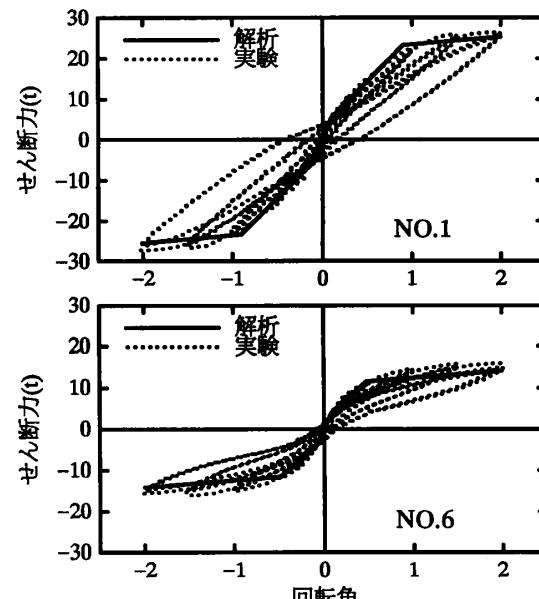


図2. 各供試体の非線形性状

モデルとして用いられている。このモデルの特徴は、フレームを構成する各部材のプレストレスの度合いが構造物の履歴に与える影響を係数 α' (0~1.0に設定)を用い、RCから純PC造フレームまで一貫して表現できるよう構成されている点である。また、PC構造物のための履歴モデルとしているが、個別のPC部材についても、PC鋼材による曲げ終局強度比(λ)が中間に位置する、例えば; $\lambda=0.5\sim0.7$ のPPC部材は、係数(α')を適切に選べば各部材の履歴を比較的精度よく表現することができる。一方、純PCに近い部材の降伏後の履歴については、表現しにくい傾向を示す。ここに報告する履歴モデルは、個々のPC部材を対象としたもので、プレストレスの度合いによる影響については、PC鋼材が占める部材の曲げ終局強度比($\lambda=M_{py}/M_y$)を基本とする係数(λ')、および武田履歴モデルに倣ったところの部材の曲げ降伏後における復元剛性の低下を表す係数(γ)の2つを用い、RCから純PC部材まで、その履歴性状の表現を試みたものである。

仮定したPC部材に関する履歴概要を図3に示し、部材の曲げひび割れ後および降伏後における履歴性状ならびに各PC供試体の実験結果⁴⁾との比較について、その概要を報告する。なお、仮定した履歴線上における荷重(Q)および変形(D)の関係は、応答点(D, Q)で表すものとし、復元力特性(Backbone Curve)については、前項の仮定に基づきコンクリートのひび割れ点(D_c , Q_c)および引張鋼材の降伏点(D_y , Q_y)を折れ点とするトライリニアーモデルとして扱う。

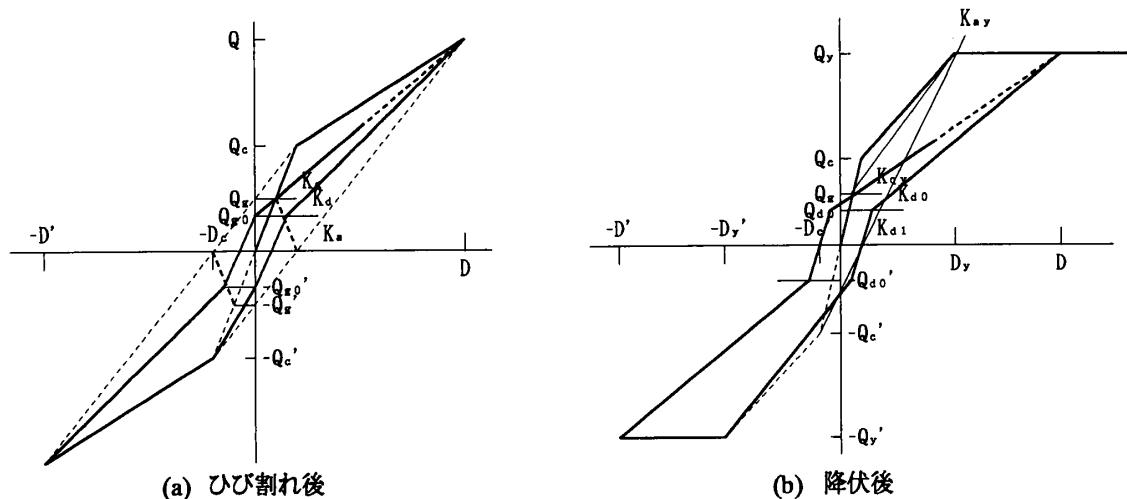


図3. PC部材の履歴

3.1 曲げひび割れ後の履歴

PC部材の曲げひび割れ後における履歴は、一般に有効プレストレス($\sigma_g=P/A_c$)の量と部材の曲げ強度に対するPC鋼材による曲げ降伏強度比の2要素により影響を受ける。有効プレストレスの量は、部材の曲げひび割れ強度に影響を与え、また、PC鋼材による曲げ降伏強度比は復元時の剛性低下に影響を与えると仮定した。これら2要素の履歴に与える影響を実施した実験結果と比較し、仮定したPC部材の曲げひび割れ後の挙動を以下に示す。

- 1). ひび割れ前; 応答点は、荷重時および除荷時とも初期剛性(K_1)の線上に位置する。
- 2.1)ひび割れ後; 応答点が、ひび割れ荷重を超えて一向方向載荷が続く場合、第2勾配(K_2)線上を降伏点に向かって進む。
- 2.2)応答点が、第2勾配線上を除荷により離れる時、荷重が Q_{g0} に減少するまで下式による復元剛性(K_0)で戻る。(図4)

$$K_0 = K_g + (1 - \lambda') (K_a - K_g) \quad (3.1)$$

$$K_g = (Q - Q_g) / (D - K_g / K_1) \quad (3.2)$$

$$K_a = (Q + Q_c') / (D + D_c') \quad (3.3)$$

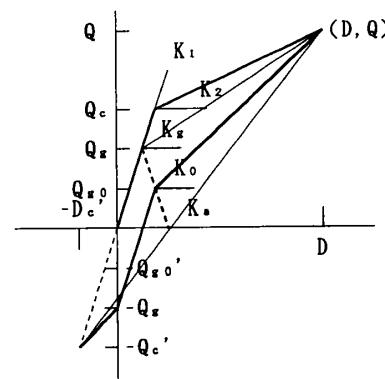


図4 ひび割れ後の履歴

ここに, Q :最大応答荷重, Q_c および Q'_c :正および負荷重側のコンクリートのひび割れ荷重, Q_g :decompression momentに相当する荷重 $\{(P_e/A_c) \cdot Z_c\}/L$, $Q_{g0} = \{Q_g \cdot (Q/k_0 - Q/K_a)\}/(D - Q/K_a - Q_g/K_0)$, λ' :PC鋼材による曲げ終局強度比より決まる係数(0~1.0), D :最大応答変形, D_c :負荷重側のコンクリートのひび割れ荷重時の変形, K_1 :初期剛性, K_a :武田モデルによるRC部材の復元剛性, および K_0 :PC部材の復元剛性を表す。

2.3)応答点が荷重 Q_{g0} に達した後, 負荷重側において先に記録した最大応答が弾性域であった場合, 初期剛性(K_1)で復元力が負荷重側の荷重 $-Q_g'$ に達するまで進む。応答点が $-Q_g'$ の荷重に達した後, ひび割れ荷重 $-Q_c'$ に向かって進み, ひび割れ荷重 $-Q_c'$ に達した後は第2勾配線上(K_2)を降伏点に向かって進む。

2.3.1)応答点が負荷重側の荷重 $-Q_g'$ に達した後, ひび割れ点 $(-D_c, -Q_c')$ に向かう線上から除荷により離れる時, 剛性(K_1)で正荷重側の荷重 Q_{g0} に向かって進む。荷重が Q_{g0} に達した後, 正荷重側において先に記録した第2勾配線上の最大応答点に向かって進む。最大応答点に達した後は第2勾配線上を降伏点に向かって進む。

2.3.2)応答点が負荷重側のひび割れ荷重 $-Q_c'$ に達した後, 降伏点 (D_y, Q_y) に向かって進む第2勾配線上から除荷により離れる時, 各式(3.1~3.2)により負荷重側において決まる剛性(K_0)で荷重が $-Q_{g0}'$ に達するまで戻り, 荷重が $-Q_{g0}'$ に達した後は正荷重側において先に記録した最大応答点に向かって進む。

2.4)応答点が荷重 Q_{d0} に達した後, 負荷重側において先に記録した応答がひび割れ荷重を超えていた場合, 初期剛性(K_1)で先に記録した最大応答から決まる荷重 $-Q_{g0}'$ に達するまで進む。応答点が荷重 $-Q_{g0}'$ に到達した後は先に記録した第2勾配線上の最大応答点に向かって進む。最大応答点に到達した後は第2勾配線上を降伏点に向かって進む。

2.4.1)応答点が荷重 $-Q_{d0}'$ に到達した後, 先に記録した第2勾配線上の最大応答点に向かって進む線上から除荷により離れる時, 先に記録した最大応答点から離れる時に各式(3.1~3.3)により決まった剛性(K_0)で荷重が $-Q_{g0}'$ に達するまで戻る。応答点の荷重が $-Q_{g0}'$ に達した後は, 初期剛性(K_1)で正荷重側の先に記録した荷重 Q_{d0} に達するまで進む。応答点が荷重 Q_{d0} に達した後は, 正荷重側において先に記録した最大応答点に向かって進む。

3.2 曲げ降伏後の履歴

PC部材の曲げ降伏後における挙動は, 一般にPC鋼材による曲げ降伏強度比(λ)が降伏後の剛性低下に影響を与えることが知られている。実験結果との比較により仮定した曲げ降伏後における履歴の挙動を以下に示す。

3.1)応答点が第2勾配(K_2)線上を進み降伏点 (D_y, Q_y) に到達した後, 第3勾配(K_3)線上を進む。

3.2)応答点が除荷により第3勾配線上から離れる場合, 下式(3.4~3.9)により決まる復元剛性(K_{d0})で図中の2点BCを結ぶ線上の荷重 Q_{d0} に達するまで進む。(図5)

$$K_{d0} = \{K_{ay} + (1 - \lambda') (K_{ay} - K_{gy})\} \cdot \mu^{-r}, \quad (3.4)$$

$$K_{d1} = \{K_1 - (1 - \lambda') (K_1 - K_{ay})\} \cdot \mu^{-r} \quad (3.5)$$

$$K_{gy} = (Q_y - Q_g)/(D_y - Q_g/K_1), \quad (3.6)$$

$$K_{ay} = (Q_y + Q_c)/(D_y + D_c) \quad (3.7)$$

$$K_{dg} = K_{gy} \cdot \mu^{-r}, \quad (3.8)$$

$$K_d = K_{ay} \cdot \mu^{-r}, \quad (3.9)$$

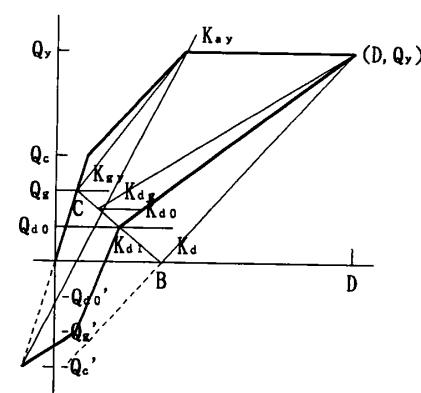


図.5 降伏後の履歴

ここに, μ : D/D_y (塑性率), および $Q_{d0} = Q_g \cdot (Q_y/K_{d0} - Q_y/K_d)/\{D - (Q_g/K_1 + Q_y/K_d - Q_g/K_{d0})\}$ を表す。

3.3)応答点が荷重 Q_{d0} に到達した後, 負荷重側において先に記録した最大応答が弾性域であった場合, 剛性(K_{d1})で荷重が $-Q_g'$ に達するまで進む。応答点が荷重 $-Q_g'$ に達した後は, 降伏点に向かって進む。

3.3.1)応答点が荷重 $-Q_g'$ に達した後, 降伏点に向かって進む線上から除荷により離れる時, 剛性(K_{ay})で荷重が

$-Q_g'$ に達するまで戻る。応答点が荷重 $-Q_g'$ に達した後は、剛性(K_{dl})で先に記録した正荷重側の荷重 Q_{d0} に達するまで進む。応答点が荷重 Q_{d0} に達した後、先に記録した第3勾配線上の最大応答点に向かって進む。応答点が先に記録した最大応答に到達した後は、第3勾配線上を進む。

3.3.2)応答点が荷重 Q_{d0} に達した後、先に記録した第3勾配線上の最大応答点に向かって進む線上から除荷により離れる時、剛性 K_{d0} で荷重が Q_{d0} に達するまで戻る。応答点の荷重が Q_{d0} に達した後は、剛性(K_{dl})で負荷重側の荷重 $-Q_g'$ に達するまで進む。応答点の荷重が $-Q_g'$ に達した後、先に記録した負荷重側の降伏点に向かう線上から離れた点に向かって進む。応答点が、負荷重側の降伏点に向かう線上から離れた点に達した後は降伏点に向かって進む。応答点が負荷重側の降伏点に到達した後は、第3勾配線上を進む。

3.4)応答点が荷重 Q_{d0} に到達した後、負荷重側において先に記録した最大応答がひび割れ点を超えて降伏点に向かう線上にあった場合、負荷重側における先の応答で各式(3.1-3.3)により決められた荷重 $-Q_{g0}'$ に達するまで剛性(K_{dl})で進む。応答点の荷重が $-Q_{g0}'$ に達した後、降伏点に向かって進み、更に応答点が降伏点に達した後は第3勾配線上を移動する。

3.4.1)応答点が荷重 $-Q_{g0}'$ から降伏点に向かう線上から除荷により離れる時、剛性(K_{sy})で荷重が $-Q_{g0}'$ に達するまで戻る。応答点が $-Q_{g0}'$ に達した後は、剛性(K_{dl})で正荷重側の荷重 Q_{d0} に達するまで進む。その後は、3.3.1)と同じ。

3.5)応答点が荷重 Q_{d0} に到達した後、負荷重側において先に記録した最大応答が降伏点を超えていた場合、剛性(K_{dl})で、負荷重側における先の最大応答で記録した荷重が $-Q_{d0}'$ に達するまで進む。応答点が荷重 $-Q_{d0}'$ に達した後は、先に記録した第3勾配線上の最大応答点に向かって進む。その後は、更に第3勾配線上を移動する。

3.3 実験結果との比較

上記、2. PC部材の非線形性状、3.1 曲げひび割れ後の履歴 および 3.2 曲げ降伏後の履歴 においてPC部材の非線形性状およびひび割れ後ならびに降伏後の履歴性状を仮定した。これらの仮定によるPC部材の各特性を用いて計算(材端剛塑性パネ法による非線形漸増載荷解析)した各PC供試体の履歴と実験による結果を、部材の最大変形角を2%の範囲に限定して比較した。仮定したPC部材に関する各特性は、PCからPPC部材まで各供試体の履歴性状を概ね表現することができた。各PC供試体の履歴計算に用いた各係数(λ' および γ)の値を図6に示す。 λ' の度合いを表す係数(λ')は、PC鋼材による曲げ終局強度比(λ)に対して直接的な比例関係を示さないが、係数(λ')の値は、純PC部材に近い3供試体(λ :0.8~1.0)については曲げ終局強度比(λ)の値と概ね一致した。また、 λ が0.8以下のPPC供試体(λ :0.5~0.8)では、係数(λ')が0.3~0.8まで概ね規則的な比例関係($\lambda' = 1.67\lambda - 0.53$)を示した。一方、部材の曲げ降伏後における剛性低下を表す係数(γ)の値は、純PCに近い各供試体(λ :0.7~1.0)は概ね一定の値; 0.8を示し、その他の各PPC供試体(λ :0.5および0.6)については、係数(γ)の値は曲げ終局強度比(λ)に伴い概ね規則的な変化($\gamma = 0.5 + 0.4\lambda$)を示した。

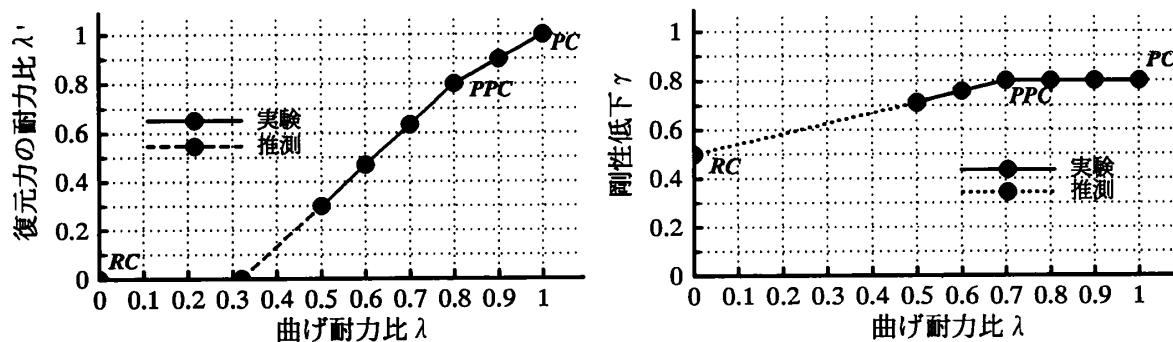


図.6 各供試体に用いた各係数(λ' および γ)の値

各PC部材における履歴特性の計算結果と実験結果の比較を図7に示す。各PC供試体の両結果の比較から、PC鋼材による曲げ終局強度比が中間の値($\lambda:0.5$ および 0.6)となるNo.1および2各供試体ならびに純PC部材に近いNo.5および6各供試体($\lambda:0.9$ および 1.0)については、履歴挙動が比較的よく一致した。しかし、 λ の値が 0.7 および 0.8 となるNo.3および4の各供試体の結果については、概ね一致するが、Decompression Momentに相当する荷重の近傍で、その挙動を表現しにくい傾向を示した。

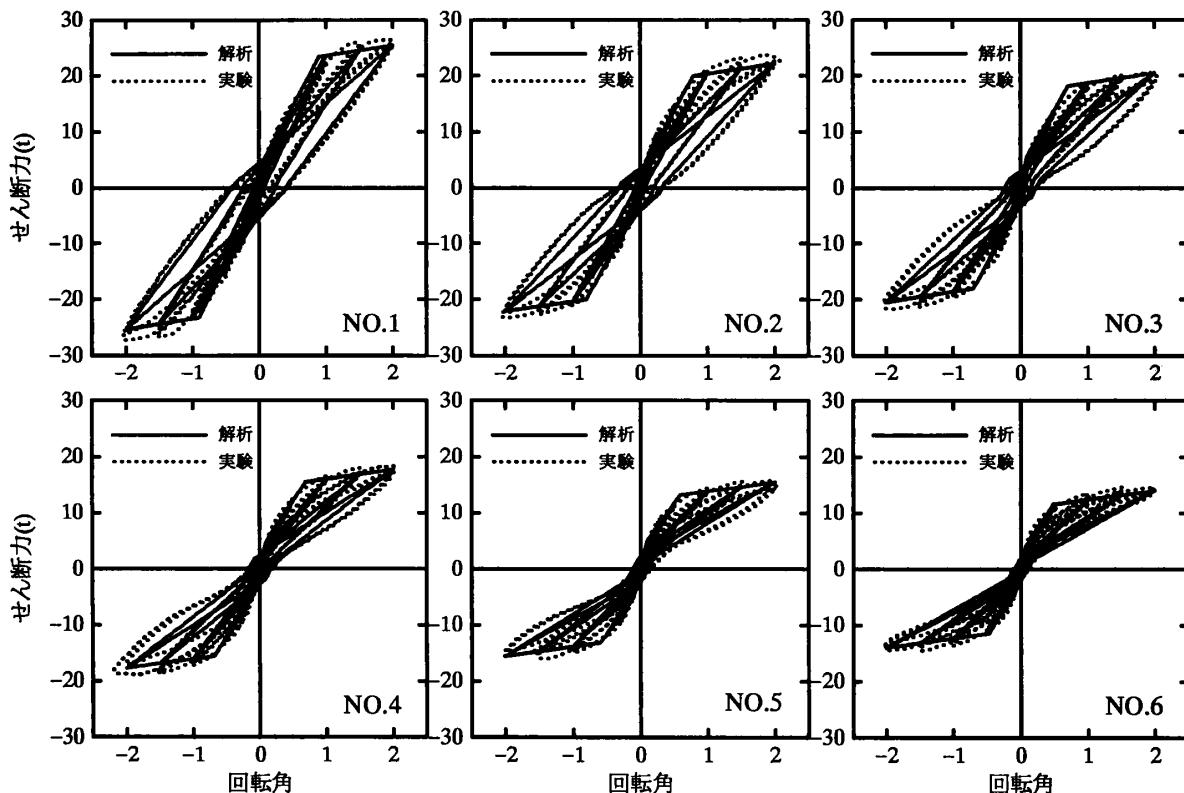


図7. 各PC供試体の履歴比較

4. まとめ

実施した各PC供試体の実験結果を基に、RC部材の非線形性状と履歴特性を表すモデルとしてよく用いられる菅野の式および武田履歴モデルならびにPC構造物の履歴特性を表す岡本履歴モデルを参考にしてPC部材の履歴を表すモデルの作成を試みた。各PC供試体の履歴の変化は、 $\text{アーチストレスの度合いを表す係数}(\lambda)$ および曲げ降伏後における部材の剛性低下を表す係数(γ)の組み合わせとした。以上のPC部材の履歴に関する研究から次のことが言える。

- 1) 仮定した履歴特性は、 λ および γ の組み合わせによりRCから純PC造部材まで、その履歴性状を概ね表現することができる。
- 2) 部材の曲げ強度に占めるPC鋼材による曲げ終局強度の比が70%を超える純PC造に近い部材は、曲げ降伏後の塑性率に伴う復元剛性の低下は、概ね一定の値($\gamma = 0.8$)である。
- 3) $\text{アーチストレスの度合いを表す係数}(\lambda)$ は、部材の曲げ強度に占めるPC鋼材による曲げ終局強度比の変化に伴い概ね規則的に変化する。

参考文献

- 1) 日本建築学会刊行 "鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説" 1988, pp.59-64.
- 2) Takeda, T., M. A. Sozen, and N. N. Nielsen, "Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquake", Proceedings, ASCE, Vol.96, No.ST12, December 1970, pp. 2557-2573.
- 3) 岡本 伸, 加藤 博人 "PC造建物の地震応答性状" アーチストレットコンクリート技術協会誌, Vol.33, No.4.
- 4) 大沼, 川股, 林 "アーチストレット鉄筋コンクリート梁の履歴性状に関する実験的研究" 日本建築学会学術講演梗概集(中国大会), 1990年 10月.