

# 論文 アンボンドPC鋼材を用いたPCa圧着梁部材の履歴特性モデルに関する研究

小林 正仁<sup>\*1</sup>・越川 武晃<sup>\*2</sup>・上田 正生<sup>\*3</sup>・菊地 優<sup>\*4</sup>

**要旨**：本研究はアンボンドPC鋼材を用いたプレキャスト(PCa)圧着梁部材を対象に、種々のパラメトリック解析を行い、解析結果に基づいてその履歴特性を簡便に表現し得るモデルを提案するものである。解析では、プレストレスの導入レベルといったPC部材特有のパラメータを設定し、それらが部材の履歴特性に及ぼす影響について考察した。また、提案モデルと既往の実験結果との比較・検討を行い、良好な対応を得た。

**キーワード**：アンボンドPC, 履歴特性モデル, PCa圧着梁

## 1. はじめに

アンボンドPC鋼材を用いたプレキャスト(PCa)圧着部材が注目を集めている。この種の部材は、その施工性の良さはもちろんのこと、RC架構等と比較して地震力を経験したあとの残留変形量を小さくできる高い原点志向性を有しており、また近年ではエネルギー吸収デバイスと組み合わせた損傷制御型のPCa圧着部材も提案されている。

しかしながら、PCa圧着部材の履歴特性モデルに関しては、ボンドタイプの部材を基本としたものがいくつか提案されているが<sup>1), 2)</sup>、アンボンドPC鋼材のみで圧着接合されたPCa部材までをも対象とする事のできる有効なモデルは現状では未だ確立されておらず、その確立はこの種の部材の更なる発展に繋がるものとする。

本論文ではまず、著者等の材料非線形解析法を用いて<sup>3)</sup>、アンボンドPC鋼材のみで圧着接合されたPCa梁部材に対するパラメトリック解析を行い、各パラメータが部材の履歴特性に及ぼす影響についての考察から、PCa圧着梁部材の履歴特性モデルを提案する。更に、既往の実験結果との比較・考察を行い、提案モデルの適

合性について検討している。

## 2. 提案履歴特性モデルの概要

本論文で提案する履歴特性モデルは、降伏点と終局耐力点を特性点とするトリリニア型のスケルトンカーブと、初期剛性直線上の戻り点を目指す履歴経路によって構成されている。すなわち、終局耐力点以降の耐力は一定とした上で、降伏点並びに終局耐力点を推定することによりスケルトンカーブを形成し、次いで初期剛性直線上の戻り点を推定し、同点へ到る履歴経路を解析結果と適合するよう設定する。

図-1は、本論文で提案する履歴特性モデルの履歴ルールを模式的に示したものである。この履歴ルールの概要について以下に示す。

- 1) 過去の除荷点を越えて変形が進む場合はスケルトンカーブ上を移動する。
- 2) 降伏点(図中点A)に到達する以前は初期剛性直線上で弾性的に挙動する。
- 3) 降伏点経験後に除荷点(図中点B)より除荷する場合は、初期剛性直線上への戻り点(図中点D)に到る除荷曲線上を移動する。ここで戻り点Dは、後述するパラメトリック解析におい

---

\*1 北海道大学大学院工学研究科 大学院生 (正会員)  
 \*2 北海道大学大学院工学研究科 助手 博士(工学) (正会員)  
 \*3 北海道大学大学院工学研究科 教授 博士(工学) (正会員)  
 \*4 北海道大学大学院工学研究科 助教授 博士(工学)

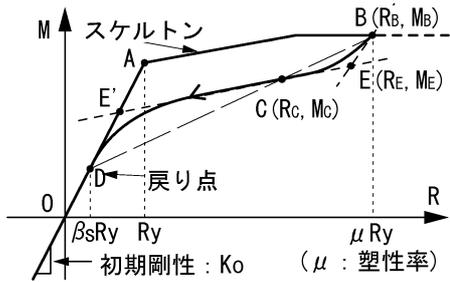


図-1 履歴特性モデル概要

て、その除荷曲線が初期荷重曲線と一致する点として定義する。また除荷曲線は、アンボンドPC圧着部材特有の初期剛性上の点に緩やかに収束していく経路を表現するため、除荷点と戻り点を結ぶ直線上に中間点（図中点C）を定めた上で、図中B→C、C→Dの2区間に2点の座標と傾きから滑らかな曲線を導くことのできるスプライン関数を適用した。例として、B→C区間上の点 $(R_x, M_x)$ は図-1中の記号を用いて下式のように表される。

$$M_x = (M_B - 2M_E + M_C)t^2 + 2(M_E - M_C)t + M_C \quad (1)$$

$$t = \frac{-s + \sqrt{s^2 + r(R_C - R_x)}}{r} \quad (2)$$

$$\text{但し、 } r = R_B - 2R_E + R_C \quad (3)$$

$$s = R_E - R_C \quad (4)$$

同様に、C→D区間の点はC点、D点及びE'点の座標を用いて表現される。

4) 負側からの再荷重時は負側の戻り点より、初期剛性上を正側の前回の戻り点まで移動した後、前回の正側の除荷点まで履歴曲線上を移動する。

従って本モデルを構成するためには、降伏点、終局耐力点、初期剛性直線上の戻り点、および除荷点と戻り点を結ぶ直線上にある中間点の4つの特性点を推定することとなる。

### 3. パラメトリック解析

提案履歴特性モデルの各特性点を推定するために、PC鋼材の付着特性を考慮した材料非線形解析法<sup>3)</sup>を用いて、種々のパラメトリック解析を行った。この解析法は、梁要素に補強材の

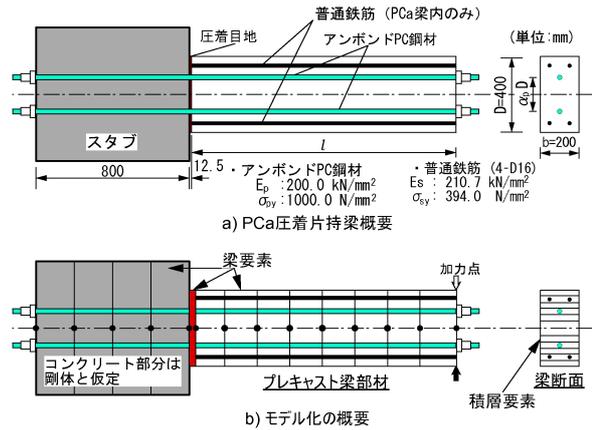


図-2 解析対象PCa 圧着梁部材

表-1 解析パラメーター一覧

解析Case	$\lambda_N$	$\lambda_P$	初期プレストレス $P_0$ (kN)	PC鋼材総断面積 $A_{pc}$ (mm <sup>2</sup> )
1	0.1	0.3	320	1066.7
2		0.4		800.0
3		0.5		640.0
4		0.6		533.3
5	0.2	0.3	640	2133.3
6		0.4		1600.0
7		0.5		1280.0
8		0.6		1066.7
9	0.3	0.3	960	3200.1
10		0.4		2400.0
11		0.5		1920.0
12		0.6		1600.0

すべりを相対変位として設定し、付着すべりの影響を直接表現できる解析法である。パラメトリック解析では、図-2 (a) のような梁幅  $b = 200\text{mm}$ 、梁せい  $D = 400\text{mm}$  の断面を有する試験体レベルのPCa圧着片持梁を設定し、同図 (b) のようにモデル化し、次いでスタブ部分のコンクリートを剛体と仮定して変形を拘束した上で、梁の自由端部における一方向荷重および繰返し荷重を行なった。ここではPCa圧着梁のシアスパン比  $l/D$  は3, 4, 5, 8の4水準、コンクリートの圧縮強度  $\sigma_{cc}$  は  $40.0\text{N/mm}^2$ ,  $50.0\text{N/mm}^2$ ,  $60.0\text{N/mm}^2$  の3水準、PC鋼材間距離  $\alpha_p D$  は  $0.0D$  (断面中央に集中配置),  $0.4D$ ,  $0.6D$  (断面上下に対称配置) の3水準とし、計36種のPCa圧着梁を設定した。

本研究ではこれらのPCa圧着片持梁に対し、プレストレスの導入レベルに関する以下の二つのパラメータを設定した。

- コンクリートにかかる初期プレストレス応力の圧縮強度  $\sigma_{cc}$  に対する比  $\lambda_N$  (式 (5))
- 初期プレストレス力  $P_0$  のPC鋼材の降伏時耐力  $P_y$  に対する比  $\lambda_P$  (式 (6))

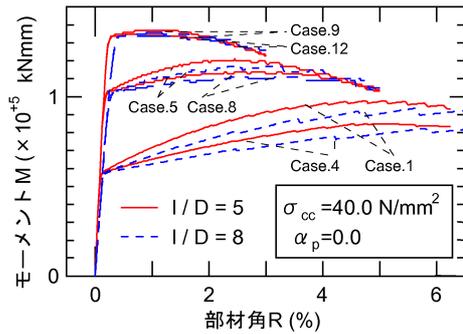


図-3 モーメント-部材角関係の解析結果

この二つのパラメータは式(7)のようにPC鋼材の断面積  $A_{pc}$  を調節することにより種々の組合せを設定できる。本解析では各PCa圧着梁について、表-1に示すように  $\lambda_N = 0.1, 0.2, 0.3$  および、 $\lambda_P = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$  の全12ケースの解析を行った。

$$\lambda_N = \frac{P_o}{bD\sigma_{cc}} \quad (5)$$

$$\lambda_P = \frac{P_o}{P_y} \quad (6)$$

$$\frac{\lambda_N}{\lambda_P} = \frac{P_y}{bD\sigma_{cc}} = \frac{\sigma_{py}}{bD\sigma_{cc}} A_{pc} \quad (7)$$

但し、 $\sigma_{py}$  : PC鋼材の降伏時応力

#### 4. 解析結果に基づく特性点の推定

##### 4.1 スケルトンカーブの推定

図-3に  $\sigma_{cc} = 40.0 \text{ N/mm}^2, \alpha_p = 0.0$  とした場合の各解析ケースについて、一方向荷荷時のモーメント-部材角関係を示す。解析結果を見比べてみると、降伏点は  $\lambda_N$  により異なり、終局耐力点は  $\lambda_N$  と  $\lambda_P$ 、およびシアスパン比  $l/D$  によって異なることがわかる。この結果を踏まえ、降伏点及び終局耐力点を推定していく。

##### (1) 降伏点の推定

アンボンドPC鋼材のみを使用した圧着部材は、降伏点付近で履歴曲線が弧を描くために明確な降伏点を一義的に定義することが困難であり、既往の研究では降伏点を終局耐力の90%の点とする方法<sup>1)</sup>、ディコンプレッションモーメントの2倍点とする方法<sup>4)</sup>などが提案されているが、その理論的根拠は乏しいように思われる。

図-4に解析ケースの一例について、モーメント-部材角関係を梁危険断面における圧縮側

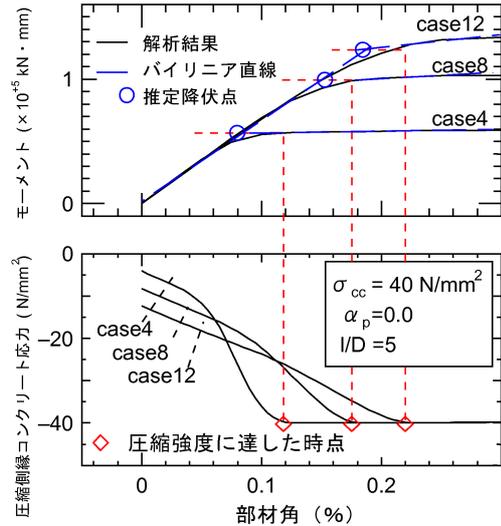


図-4 圧縮側縁コンクリートの応力とモーメントの相関

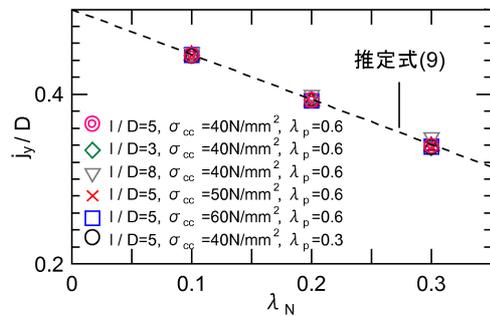


図-5  $j_y/D - \lambda_N$  関係

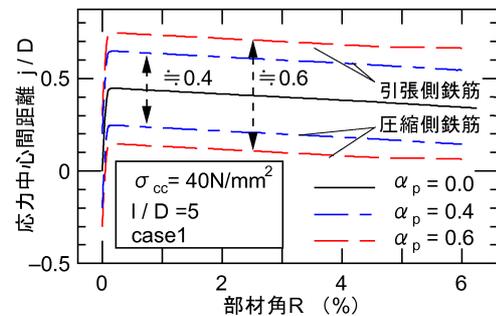


図-6 PC鋼材間距離と  $j - R$  関係

縁コンクリートの応力の推移と対応させて示した。図中に破線で示すように、圧縮側縁コンクリートが圧縮強度に達した時点のモーメントを降伏時モーメントとして用いることで、降伏点を概ねよく推定できることがわかる。降伏時モーメント  $M_y$  は危険断面におけるモーメントの釣合いから、降伏時のPC鋼材のプレストレス力  $P_y$  と応力中心間距離  $j_y$  を用いて、次式で表せる。

$$M_y = P_y j_y \quad (8)$$

ここで  $P_y$  は初期プレストレス力  $P_o$  より大きく変動しないことを考慮すると、 $M_y$  を求めるためには圧縮側縁コンクリートが圧縮強度に達した時点の  $j_y$  を定量化すれば良いことになる。

図-5に、PC鋼材を梁断面中央に集中配置した場合の、梁せい  $D$  によって基準化した  $j_y$  と  $\lambda_N$  の関係を示す。 $j_y/D$  は、他の要因によらず  $\lambda_N$  のみに対し一定の比例関係にあることがわかる。また、PC鋼材を上下に対称配置した場合の応力中心間距離  $j$  の推移を示した図-6から、それぞれのPC鋼材に対する応力中心間距離は、PC鋼材を断面中央に集中配置した場合の応力中心間距離から  $\alpha_p$  に応じて算定できることがわかる。

そこで、PC鋼材を断面中央に集中配置した場合の降伏時の応力中心間距離  $j_y$  と  $\lambda_N$  との関係解析結果から回帰的に求めたのが下式である。

$$\frac{j_y}{D} = 0.5 - 0.53\lambda_N \quad (9)$$

また、降伏耐力時の変形角  $R_y$  は弾性梁理論によって求めた初期剛性  $K_o$  を用いて下式で表す。

$$R_y = \frac{M_y}{K_o} \quad (10)$$

### (2) 終局耐力点の推定

終局耐力点の推定にあたって、終局耐力時のモーメント  $M_u$  は、終局耐力点におけるPC鋼材のプレストレス力  $P_u$  と応力中心間距離  $j_u$  から降伏時と同様の関係式(11)で表せる。

$$M_u = P_u j_u \quad (11)$$

そこでまず解析結果より、PC鋼材を断面中央に集中配置した場合の終局耐力時の応力中心間距離  $j_{uo}$  について、前述した終局耐力点に影響をもたらす  $\lambda_N$ 、 $\lambda_P$ 、および  $l/D$  を用いた重回帰分析を行い次式を得た。

$$\frac{j_{uo}}{D} = 0.36 - 0.24\lambda_N + 0.07\lambda_P + 0.0019 \frac{l}{D} \quad (12)$$

また、図-7に示すようにPC鋼材を上下対称配置した場合の  $j_u/D$  の平均値は、 $\lambda_N$  によって異なる勾配を有し、かつPC鋼材間距離の係数  $\alpha_p$  におおよそ比例する傾向が見られた。ここから、 $\lambda_N$  により決定される  $\alpha_p$  の影響を回帰

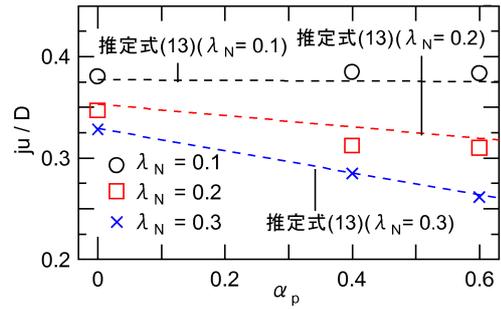


図-7  $j_u/D - \alpha_p$  関係

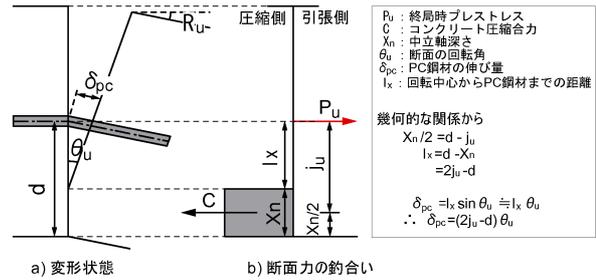


図-8 危険断面回転角とPC鋼材の伸び増分

的に求め、式(12)に加えることで、PC鋼材間距離が設定されている場合も含めた  $j_u$  について以下のような推定式を得た。

$$\frac{j_u}{D} = \frac{j_{uo}}{D} + (0.05 - 0.53\lambda_N)\alpha_p \quad (13)$$

次に、終局耐力時のPC鋼材のプレストレス力  $P_u$  について考える。図-8のような状態を想定した場合に、アンボンドPC鋼材の伸び量  $\delta_{pc}$  は圧着面のPC鋼材位置における離間変形量に等しいという仮定<sup>5)</sup>に基づくと、 $P_u$  は先に求めた終局耐力時の応力中心間距離  $j_u$  と危険断面の回転角  $\theta_u$  を用いることで幾何学的関係からその増分を求めることができる。即ち、圧縮側コンクリートの応力が方形分布していると仮定すると、終局耐力時のPC鋼材の伸び量  $\delta_{pc}$  は、 $j_u$  および  $\theta_u$  を用いて式(14)のように推定でき、終局耐力時のPC鋼材のプレストレス力増分  $\Delta P_u$  および終局時のPC鋼材のプレストレス力  $P_u$  が以下のように決定できる。

$$\delta_{pc} = (2j_u - d)\theta_u \quad (14)$$

$$\Delta P_u = \frac{\delta_{pc}}{l_{po}} E_p \quad (15)$$

$$P_u = P_o + \Delta P_u \quad (16)$$

但し、 $d$ : PC鋼材の有効せい、 $l_{po}$ : 初期状態におけるPC鋼材の全長、 $E_p$ : PC鋼材

のヤング係数

図-9はPC鋼材を断面中央に集中配置した場合の解析結果より得られた終局耐力時の危険断面回転角 $\theta_{uo}$ と $\lambda_N$ との関係を示したものである。 $\theta_{uo}$ は $\lambda_N$ の増加に伴い全般的には減少する傾向が見られ、 $l/D$ によりばらつきを示した。しかし、そのばらつきの程度は一様ではないため、ここでは $\theta_{uo}$ を $\lambda_N$ のみを変数として回帰的に次式を求めた。

$$\theta_{uo} = 0.068 - 0.21\lambda_N \quad (17)$$

次にPC鋼材間距離 $\alpha_p D$ を設けた場合の $\theta_u$ と $\lambda_N$ の関係を図-10に示した。同図より $\theta_u - \lambda_N$ 関係の切片と傾きは $\alpha_p$ の変化により異なることがわかる。そこで式(17)に $\alpha_p$ の影響を加えることでPC鋼材が対称配置された場合を含め全ての $\theta_u$ について下式のような推定式を得た。

$$\theta_u = \theta_{uo} - (0.072 - 0.47\lambda_N)\alpha_p \quad (18)$$

また、終局耐力時の部材角 $R_u$ は、シアスパン比の小さい部材においては危険断面の回転角 $\theta_u$ にほぼ等しいと見なせるが、シアスパン比の大きい部材についても適用できるように、回転角 $\theta_u$ にPCa部材の弾性変形分を重ね合わせて求めることとする。

#### 4.2 履歴経路の推定

##### (1) 戻り点の推定

図-11は繰返し載荷時の解析結果に対して、除荷曲線が初期剛性直線上に戻る点を $\beta_s R_y$ と表現した際の係数 $\beta_s$ と塑性率 $\mu$ との関係を示したものである。同図より $\beta_s$ は $\mu$ と高い相関を示し、 $\lambda_N$ によってその相関関係に差異があることがわかる。そこで本論文では $\beta_s$ を $\mu$ と $\lambda_N$ による下式の形で設定した。

$$\beta_s = 0.79 + (0.045 - 0.64\lambda_N)\mu \quad (19)$$

##### (2) 履歴経路の推定

履歴経路の曲線形状を二つのスプライン関数で表現するにあたり、解析結果とよく適合するように、中間点を除荷点と戻り点を結ぶ直線上に置き、その部材角 $R_c$ は下式で設定した。

$$R_c = 0.7(\mu R_y - R_y) + R_y \quad (20)$$

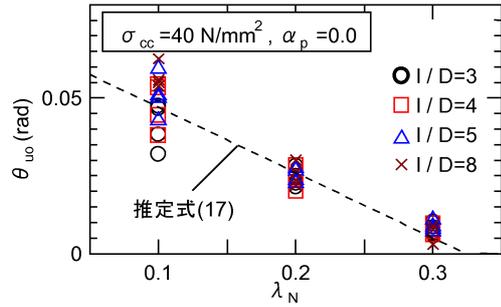


図-9  $\theta_{uo} - \lambda_N$  関係

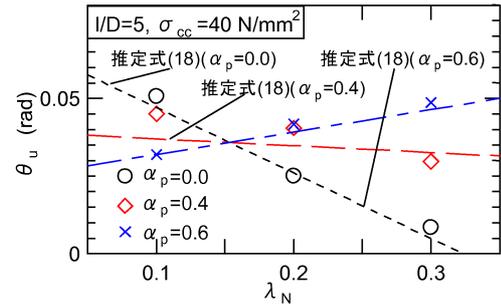


図-10  $\alpha_p$  の変化の伴う  $\theta_u - \lambda_N$  関係

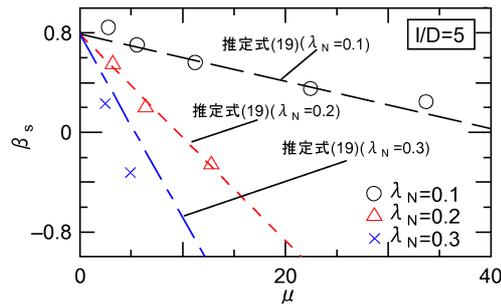


図-11  $\beta_s - \mu$  関係

また、スプライン関数を決定する際に必要な、除荷点における除荷勾配は正側の除荷点と負側の除荷点を結ぶ直線の勾配を用い、中間点の傾きは降伏点と終局耐力点から得られるスケルトンカーブ上の二次剛性を用いた。

#### 5. 実験結果との比較

ここでは、アンボンドPC鋼材のみで圧着接合されたPCa梁部材の既往の実験結果に対する本モデルの適合性について検討する。比較に用いた実験結果は菅田等<sup>5)</sup>が行ったPC鋼材を梁断面中央に1本集中配置した片持梁試験体(試験体名:100\_w\_69)と、岡本等<sup>6)</sup>が行ったアンボンドPCストランドを梁断面内に2本上下に対称配置したト型試験体(試験体名:UH3)の二つを対象とした。各試験体の概要と材料性状を

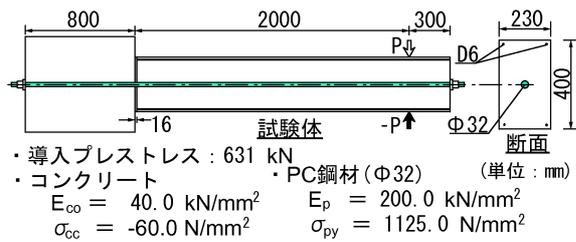


図-12 菅田等の試験体の概要

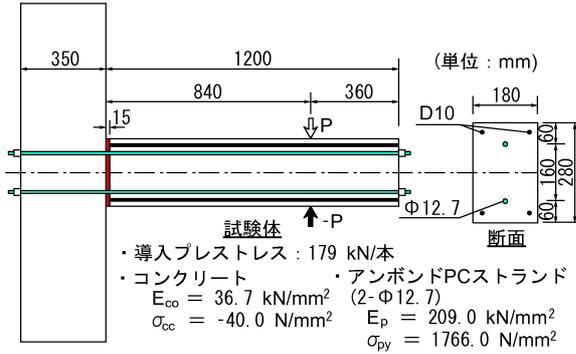


図-13 岡本等の試験体の概要

図-12, および図-13に示す。

図-14, および図-15は, それぞれの実験結果と提案モデルのモーメント-部材角関係を比較したものである。PC鋼材の配置や導入プレストレス力といった諸条件が異なるいずれの実験結果に対しても本提案モデルは, そのスケルトンカーブ, ならびに初期剛性直線へと滑らかに接していくようなアンボンドPC圧着部材特有の履歴曲線をスプライン関数を用いて良好に表現し得ているが, 変形が進むにつれてのモーメントの低下を表現しておらず, この点について今後検討する必要があるものと思われる。

## 6. まとめ

本論文では, アンボンドPC鋼材を用いたPCa圧着梁部材の履歴特性モデルについて提案した。

即ち, まず種々のPCa圧着片持梁に対し, 著者等の既往の材料非線形解析法を用いて, PC部材特有のパラメータを設定したパラメトリック解析を行い対象部材の履歴特性について検討を加えた。次に, それらのパラメータを用いて本提案モデルを構成するための4つの特性点を解析結果に基づいて推定した。更に, 既往の実験結果との比較により, 提案モデルが対象部材の

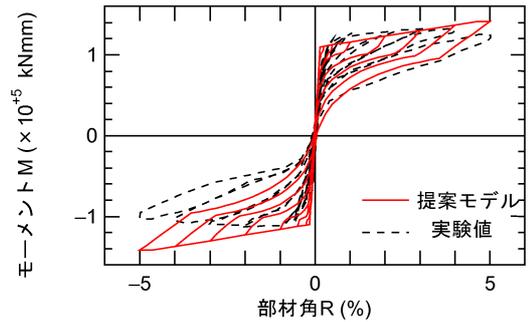


図-14 菅田等の実験結果との比較

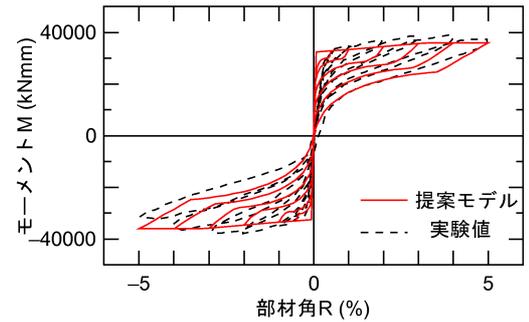


図-15 岡本等の実験結果との比較

スケルトンカーブのみならず, 履歴経路についてもアンボンドPC部材特有の履歴曲線を概ね表現可能であることを明らかにした。

謝辞: 本研究の一部は, 東京工業大学建築物理センター共同利用研究として行いました。

## 参考文献

- 1) 岡田満, 浜原正行, 末次宏光, 本岡順次郎: プレストレストコンクリート曲げ部材の復元力特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第410号, pp.63-69, 1990.4
- 2) 菅田昌宏, 中塚侑: アンボンドPC圧着エネルギー吸収型高復元性部材のフラッグ型履歴モデルに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第598号, pp.133-140, 2005.12
- 3) 越川武晃, 齊藤隆典, 上田正生, 菊地優: 緊張鋼材の付着すべりを考慮した圧着型PCaPC梁-柱部材の履歴挙動解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.37-42, 2004
- 4) Priestley, M. J. N. and Tao, J. R.: Seismic Response of Precast Prestressed Concrete Frames With Partially Debonded Tendons, PCI Journal, Jan-Feb, 1993
- 5) 菅田昌宏, 中塚侑: アンボンドPC圧着工法によるエネルギー吸収型高復元性部材の荷重-変形関係に関する実験的検討, 日本建築学会構造系論文集, 第584号, 153-159, 2004.10
- 6) 岡本晴彦, 平出亨, 太田義弘: プレキャストコンクリート柱・梁圧着接合面のせん断力伝達 (その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.901-902, 1997.9