

論文 PC 圧着関節工法における PC 鋼棒および PC 鋼より線の付着特性に関する実験的研究

今井 孝^{*1}・松崎 育弘^{*2}・坂田 弘安^{*3}・杉山 智昭^{*4}

要旨：筆者らは建築物の損傷を制御する方法として、PC 圧着関節工法を提案している。この工法では、PCa の柱および梁部材を圧着接合し、圧着に用いた PC 鋼材の緊張力を 50%程度とすることで、圧着目地部(関節部)に PC 鋼材の伸び出しによる弾性的な回転を生じさせ、損傷を制御する。本報では、PC 鋼棒および PC 鋼より線の付着特性について検討を行い、さらに部材関節部の弾性回転挙動を把握した。

キーワード：PC 圧着関節工法, 損傷制御効果, PC 鋼材の付着特性, 弾性回転

1. はじめに

著者らは地震時の建物の損失を制御する方法の一つとして、PC 圧着関節工法を提案している。本工法は、PC 鋼材を用いて PCa 部材を圧着接合する際に、初期プレストレス導入力を柱梁圧着の場合 50%程度、柱圧着の場合 30~50%程度に設定することで、関節部に PC 鋼材の伸び出しによる回転変形を許容し、変形を関節部に集中させるものである。関節部の回転変形が架構の変形の大部分を占めることで、損傷制御効果は高くなるといえる。よって本工法において、設計段階から架構の履歴性状を知るためには、PC 鋼材の伸び出し変形を評価する必要がある。

本研究では、柱梁圧着用の PC 鋼より線および

柱圧着用の丸鋼 PC 鋼棒について、付着特性を明らかにするとともに、その歪み度分布のモデル化を行い、部材の曲げモーメント M -回転角 θ 関係を確立することを目的とする。

2. 梁型試験体(PC 鋼より線)の実験概要

2.1 試験体要因

表-1 に梁型試験体一覧、図-1 に梁型試験体形状を示す。試験体は実大の約 1/2.5~1/3 スケールとし、片側が圧着接合された梁部材を想定した。また、梁断面を $b \times D = 230 \times 420(\text{mm})$ 、コンクリート設計基準強度(F_c)を $90(\text{N}/\text{mm}^2)$ とした。各試験体に 2 本ずつ配置した鋼製シース管に、防錆を目的にエポキシ被膜された PC 鋼より線

表-1 梁型試験体一覧

No.	試験体形状		コンクリート	主筋	せん断補強筋	幅止め筋	プレストレス用PC鋼材					セメントグラウト				
	断面 (mm) × (mm)	定着長さ L (mm)					F_c (N/mm^2)	本数	材種	呼び径	公称断面積 a_p (mm^2)	降伏強度 σ_y^{*2} (N/mm^2)	ヤング係数 E_{exp} $\times 10^5$ (N/mm^2)	初期プレストレス導入力 P_{ini} (kN)	シース管径 内法/外法 (mm)	圧縮強度 σ_B (N/mm^2)
1	230 × 420	1522	90	4-D10 SD295A	D6@75 SD295A	D6@300 SD295A	3	エポキシ防錆被膜有り PC鋼より線 ^{*1}	12.7	98.71	1642	2.14	0.25 P_y^{*3} /本	91/96	78	2.28
2							45						-			
3							92						2.27			
4							92						2.27			
5							92						2.27			
6							42						-			
7							20						-			
8							72						2.47			
9							44						-			

*1 材種：S1PR7B, *2 σ_y は0.2%オフセット法により算出, *3 P_y ：規格降伏荷重 (=156kN)

*1 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 東京理科大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

*3 東京工業大学 建築物理研究センター准教授 工博 (正会員)

*4 東京理科大学 工学部建築学科助教 工博 (正会員)

(φ12.7, SWPR7D)を挿入して緊張力を導入し、セメントグラウトを充填した。

変動要因は、初期プレストレス導入力(0.25Py/本,0.50Py/本(Py:PC鋼材規格降伏強度)),セメントグラウト圧縮強度(20,40,90(N/mm²))およびPC鋼より線の本数(1,3,5本)の3要因とした。

2.2 実験方法

図-2に加力計測方法、表-2に载荷サイクルを示す。加力方法は自己反力型の一方向繰り返し漸増載加とした。ジャッキ荷重はセンターホール型ロードセルで計測し、伸び出し量はアンカーヘッドと定着板の相対変位で計測した。

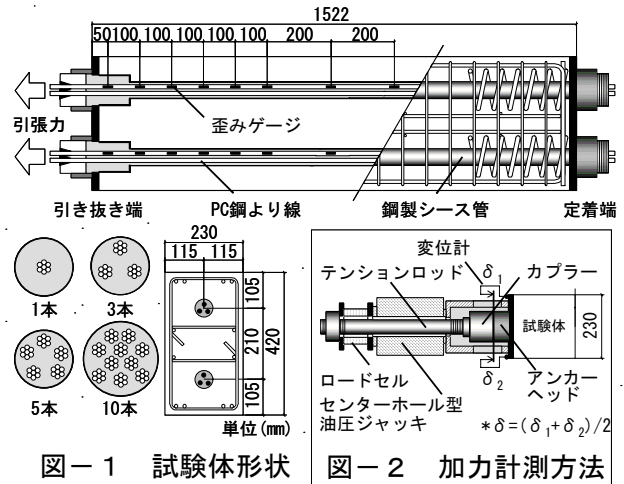


図-1 試験体形状

図-2 加力計測方法

表-2 载荷サイクル

伸び出し後増分荷重 ΔP (kN)	0.25Py/本	0.35Py/本	0.55Py/本	0.70Py/本	0.80Py/本
サイクル	1	2	3	4	5

3 梁型試験体の実験結果および検討

3.1 荷重P-伸び出し量 δ 関係の比較

3.1.1 初期プレストレス導入力 P_{ini}

図-3に $P_{ini}=0.25Py/本$ のNo.1と $P_{ini}=0.50Py/本$ のNo.2のP- δ 関係を示す。荷重がそれぞれの P_{ini} と等しくなった時点で伸び出しが開始しており、その後の性状は近似していることから、 P_{ini} が付着性状に与える影響は小さいといえる。

3.1.2 セメントグラウト圧縮強度 $G\sigma_B$

図-4に $G\sigma_B$ を変動要因とした、伸び出し後増分荷重 ΔP -伸び出し量 δ 関係を示す。 $\Delta P=0.5Py/本$ に達するまでは ΔP - δ 関係に大きな差異はなく、 $G\sigma_B$ による影響はないといえる。

3.1.3 PC鋼より線の本数

図-5に一本あたりの伸び出し後増分荷重 ΔP_1 -伸び出し量 δ 関係を示す。 ΔP_1 は ΔP をPC鋼より線の本数で除した値である。PC鋼より線は本数に関わらず同様の性状を示すといえる。

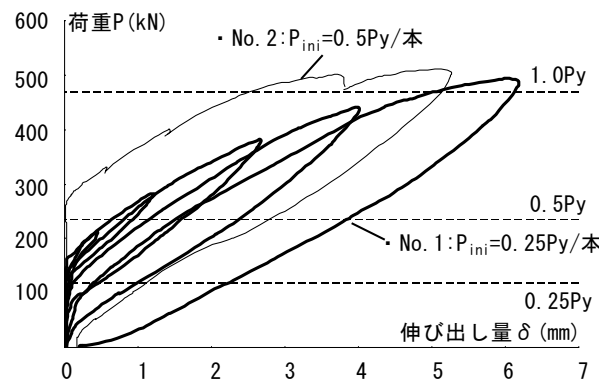


図-3 P- δ 関係(P_{ini} 比較)

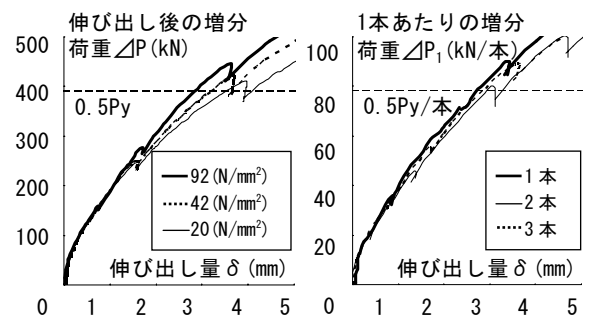


図-4 ΔP - δ 関係($G\sigma_B$ 比較)

図-5 ΔP_1 - δ 関係(本数比較)

3.2 歪み性状

図-6にNo.4の歪み度分布を示す。载荷中は荷重が P_{ini} と等しくなると、引き抜き端の歪み度が増加し始め、付着区間全域にかけてほぼ直線的な分布になっている。また、その直線の勾配(付着応力度 τ に相当)は、ほぼ一定のまま大きくなっており、同時に付着区間の長さが長くなっていることがわかる。

次に除荷していくと、引き抜き端から先行し

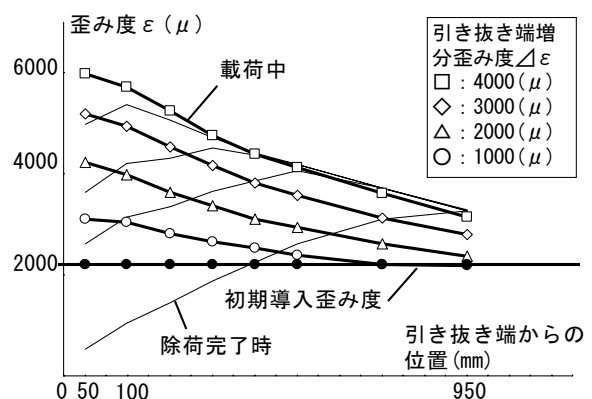


図-6 歪み度分布(No.4)

て歪み度が減少していき、荷重中の直線と逆勾配で分布している。除荷完了時には、引き抜き端の歪み度は初期歪み度よりも小さくなっており、 P_{ini} が減少しているといえる。

3.3 付着応力度 τ と付着周長 ϕ

3.2 に示したように、PC 鋼より線は付着劣化がなく、摩擦的な挙動で伸び出す「弾性的な付着特性(弾性付着)」を有するといえる。そこでこの弾性付着を評価するため、付着強度 τ_{max} と付着周長 ϕ について考察する。

ここで、PC 鋼より線一本(素線 7 本)あたりの付着周長 ϕ_1 を図-7 のように仮定する。本数が複数の場合、群の効果は考慮せず、付着周長 ϕ_n は本数倍で考えることとした($\phi_n = \phi_1 \times n$)。

3.3.1 付着応力度 τ

図-8 に No.3,4,5 の平均付着応力度 τ - 増分歪み度積分値 ΔS 関係を示す。 τ は歪み度のばらつきが少ない断面 4 から 8 の区間から、図-7 の式(1)を用いて算出する。 ΔS は断面 4 と 8 の歪み度の 2 点を通る直線で決まる三角形分布の面積とする。 τ は ΔS が生じるとすぐに 0.6 (N/mm²)程度を示し、徐々に増加した後 $\Delta S \approx 2.5$ (mm)前後で付着強度 $\tau_{max} = 1.1$ (N/mm²)に達し、その後は $\tau = 1.1$ (N/mm²)を維持している。

3.3.2 付着周長 ϕ

本数が複数の場合でも付着強度 τ_{max} が 1 本の場合と等しいと仮定すると、付着周長 ϕ は式(2)から算出される。

図-9 より、PC 鋼より線一本あたりの付着周長 ϕ_1 を本数倍した付着周長 ϕ_n と図-7 の式(2)から求めた付着周長 ϕ を比較すると、ほぼ同等であり ϕ_n は ϕ_1 の本数倍で評価できるといえる。

4. 梁型試験体の M- θ 関係の推定

実験結果より歪み度分布および付着応力度をモデル化し、梁端の曲げモーメント M-回転角 θ 関係を確立し、既往の研究から得られた M- θ 関係との評価を行う。この提案モデルの適用範囲は、PC 鋼より線 (ϕ 12.7, SWPR7D)の本数が

$$\tau = (\Delta \varepsilon_4 - \Delta \varepsilon_8) \times E_{exp} \times a_p \times n / (L \times \phi_n) \dots (1)$$

$$\phi = (\Delta \varepsilon_4 - \Delta \varepsilon_8) \times E_{exp} \times a_p \times n / (L \times \tau_{max}) \dots (2)$$

E_{exp} : PC鋼より線のヤング係数, 付着周長
 a_p : 公称断面積(mm²), $\phi_1 = d/3 \times \pi \times 2/3 \times 6 = 53.2$ (mm)
 n : 本数,
 ϕ_n : 本数倍した付着周長(= $n \times \phi_1$),
 τ_{max} : 1本タイプの付着強度 (=1.10 (N/mm²))

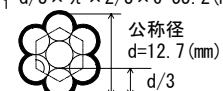


図-7 付着応力度計算

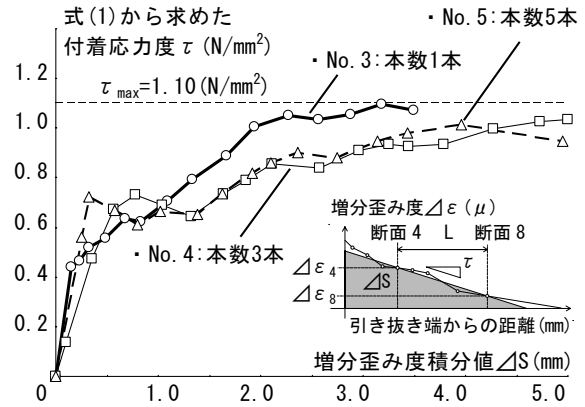


図-8 $\tau - \Delta S$ 関係

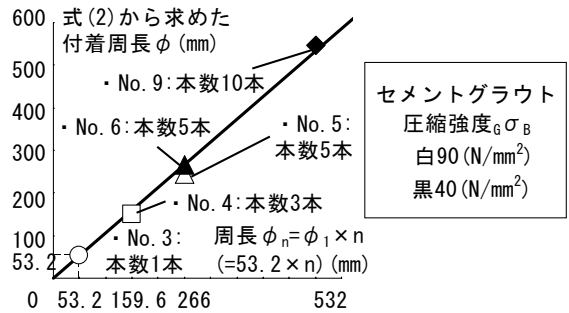
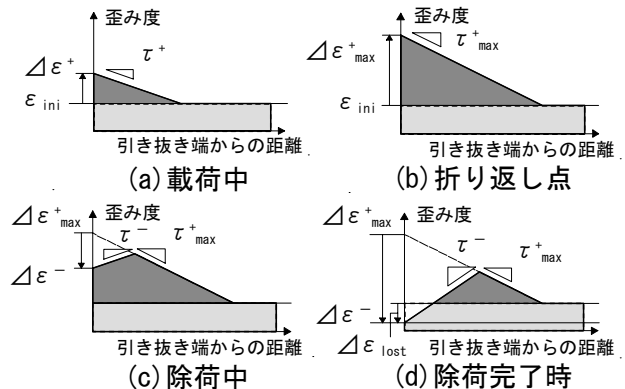


図-9 付着周長比較



$[\Delta \varepsilon^+$: 引き抜き端増分歪み度, $\Delta \varepsilon^+$: 経験した最大増分歪み度,
 $\Delta \varepsilon^-$: $\Delta \varepsilon^+$ からの減少歪み度, $\Delta \varepsilon_{lost}$: 除荷時に消失した歪み度,
 τ^+ : 荷重中の付着応力度, τ^- : 除荷中の付着応力度]

図-10 歪み度分布モデル

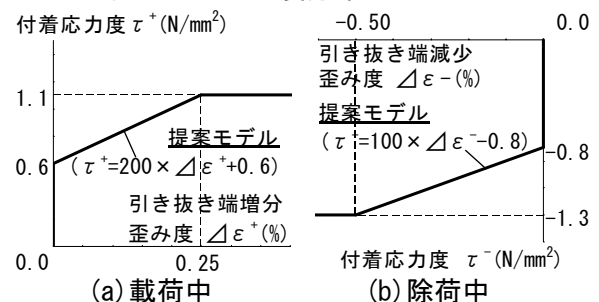


図-11 $\tau - \Delta \varepsilon$ 関係モデル

1~10本, $G\sigma_B$ が20~90(N/mm²)の範囲とする。

図-10に歪み度分布モデル, 図-11に平均付着応力度 τ -引き抜き端歪み度 $\Delta\varepsilon$ 関係モデル, 図-12に引き抜き端が経験した最大増分歪み度 $\Delta\varepsilon_{max}$ -除荷完了時に初期歪み度 ε_{ini} から減少した引き抜き端歪み度 $\Delta\varepsilon_{lost}$ 関係モデルを示す。図中の諸値は図-8をもとにし, 载荷中, 除荷中および再载荷中の3状態を考えることとする。

- ・载荷中:Pに対する引き抜き端増分歪み度 $\Delta\varepsilon$ から図-11(a)より载荷中の付着応力度 τ^+ を求める。歪み度分布を直線分布とし, τ^+ と $\phi_n(=n \times \phi_j)$ を用いて必要付着長さを求め, 歪み度分布を決定する(図-10(a), (b))。
- ・除荷中:Pの減少に伴う引き抜き端減少歪み度 $\Delta\varepsilon^-$ を用いて, 図-11(b)より除荷中の付着応力度 τ^- を求め, 歪み度分布を決定する(図-10(c))。また, 除荷終了時は図-12より $\Delta\varepsilon_{lost}$ を求め, 歪み度分布を決定する(図-10(d))。
- ・再载荷中:図-10(d)に(a)を足し合わせる。

図-13に歪み度分布モデル, 図-14にM- θ 関係モデルを示す。Mは断面解析より求め, そのときのPC鋼より線に働く引張力と提案モデルを用いて θ を算出した。Mは小さく評価されているが θ は概ね適合しており, M- θ 関係の予測可能性を示したといえる。

図-13に歪み度分布モデル, 図-14にM- θ 関係モデルを示す。Mは断面解析より求め, そのときのPC鋼より線に働く引張力と提案モデルを用いて θ を算出した。Mは小さく評価されているが θ は概ね適合しており, M- θ 関係の予測可能性を示したといえる。

5 柱脚試験体(PC鋼棒)の実験概要

5.1 試験体要因

表-3に柱脚試験体一覧, 図-15に柱脚試験体形状を示す。試験体は柱脚部を含む一階柱部分とし, 実大の約1/2.5~1/3スケールを想定した。柱断面を**b**×**D**=320×320(mm)とし, $F_c=60$

(N/mm²)とした。各試験体に8本ずつ鋼製シース管を配置し, 丸鋼PC鋼棒($\phi 13$)を緊張後, セメントグラウト(50(N/mm²))を充填した。

また, 実際の本工法と同様に, 施工性の向上などを目的とした高さ140(mm)の台座ブロックを柱部材とスタブの間に設け, 目地モルタル(50(N/mm²))を敷いた。

変動要因は, 初期プレストレス導入力(0.40Py, 0.60Py), 軸力(軸応力度 $\sigma_0=0.1F_c, 0.0F_c, 0.4F_c$ (N/mm²))およびPC鋼棒の配筋(外側配筋, 内側配筋)の3要因とした。

5.2 実験方法

図-16に加力方法, 表-4に载荷サイクルを示す。载荷は部材角Rによる変位制御とし, 柱

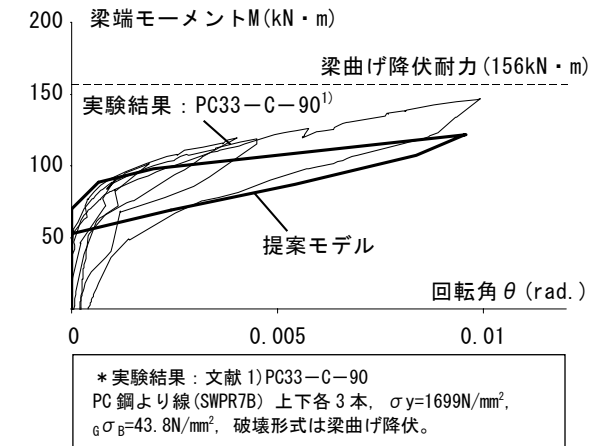
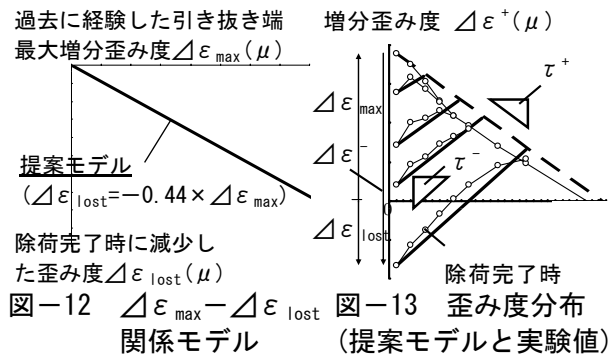


図-14 M- θ 関係モデル

表-3 柱脚試験体一覧

No.	軸応力度 σ_0 (N/mm ²)	試験体形状		コンクリート F _c (N/mm ²)	主筋	せん断補強筋	プレストレス用PC鋼材						シース管径 内法/外法 (mm)	圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	ヤング係数 E_c (N/mm ²)		
		断面 (mm) × (mm)	定着長さ L (mm)				本数	材種	呼び径	公称断面積 a _p (mm ²)	降伏強度 σ_y^2 (N/mm ²)	ヤング係数 E _{exp} (N/mm ²)				初期プレストレス導入力 P _{ini} (kN)	配筋位置
10	0.0F _c	320 × 320	柱区間 2215, スタブ区間 925	60	主筋 16-D6 SD295A, 隅筋 4-D10 SD295A	D6@70 SD295A	8	丸鋼 PC鋼棒 ^{*1}	13	132.7	1196	2.01	0.40Py ² /本	外側配筋	20/23	62	1.44
11	0.1F _c																
12	0.4F _c																
13	0.0F _c																
14	0.1F _c																
15	0.4F _c																
16	0.0F _c																
17	0.1F _c																
18	0.4F _c	0.40Py ² /本	内側配筋														

*1 材種: SBPR, B種1号, 930/1080, *2 σ_y は0.2%オフセット法により算出, *3 Py: 規格降伏荷重 (=123.4kN)

頭部を水平加力点とした正負交番繰り返し漸増
 増荷とした。また柱頭部にパンタグラフを設け、
 面外拘束を行った。軸力はアンボンドPC鋼棒(φ
 23)により導入することとし、試験体1体につき
 軸応力度を $\sigma_0=0.1F_c, 0.0F_c, 0.4F_c(N/mm^2)$ の順に
 変えた上で増荷を行った。

6 柱脚試験体の実験結果および検討

6.1 歪み性状

図-17 に No.11 の歪み度分布を示す。増荷中
 は荷重が P_{ini} に達すると、危険断面の歪み度が
 増加し始め、歪み度分布の勾配は一定のまま、
 付着区間全域にかけてほぼ直線的な分布になっ
 ている。そして、増分歪み度 $\Delta \epsilon = 1000(\mu)$ を超え
 た区間では、付着劣化により勾配が徐々に緩や
 かになり始めていることがわかる。

除荷中は危険断面から歪み度が減少していき、
 増荷中の直線と逆勾配で分布する。また、除荷
 完了時には歪み度の残留はほぼ見受けられない。

6.2 付着特性の検証

図-18 に No.11,14,17 の平均付着応力度 τ - 増
 分歪み度 $\Delta \epsilon$ 関係を示す。 τ は図-17 に示す a
 -b 区間より求め、 $\Delta \epsilon$ は a のゲージの値とした。

6.2.1 初期プレストレス導入力 P_{ini} の違い

図-18 の $P_{ini} = 0.40P_y$ である No.11 と $0.60P_y$
 である No.14 を比較すると、履歴性状はほぼ一
 致しており、 P_{ini} による影響はないといえる。

6.2.2 軸力の違い

図-19 に軸応力度を変動要因($\sigma_0 = 0.0F_c, 0.1$
 $F_c, 0.4F_c(N/mm^2)$)とした歪み度分布を示す。差異
 は見られず、軸力による影響はないといえる。

6.2.3 配筋位置の違い

図-18 の PC 鋼棒を外側配筋した No.11 と内側
 配筋した No.17 を見ると、若干のばらつきは見
 られるが、 τ_{max} はほぼ同程度となっている。よ
 って配筋位置による影響はないといえる。

7. 柱脚試験体の M- θ 関係の推定

PC 鋼棒についても歪み度分布および付着応力
 度 τ をモデル化することで、M- θ 関係の評価を

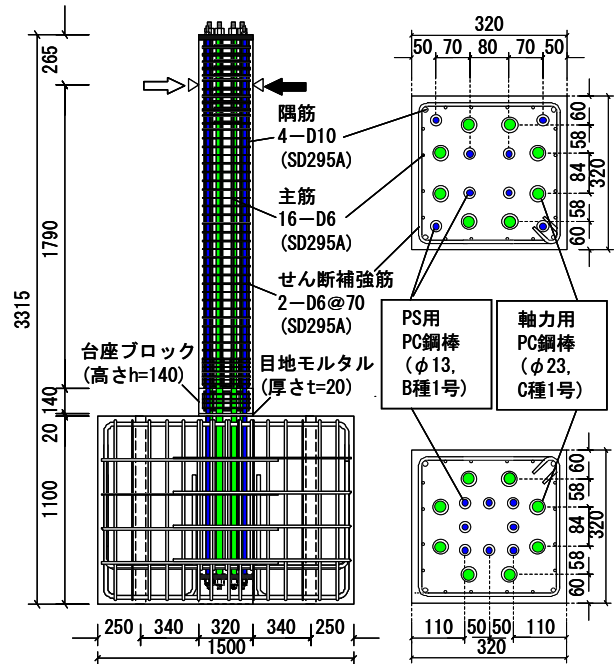


図-15 試験体形状

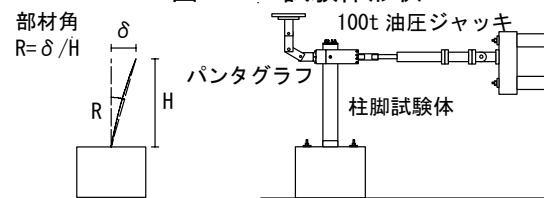


図-16 加力方法

表-4 増分歪み度

部材角R(rad.)	1/400	1/200	1/100	1/66	1/50	1/100*1
サイクル	±1	±2 ±3	±4 ±5	±6 ±7	±8 ±9	±10 ±11

*1 極大地震後の挙動を把握するために再度R=1/100(rad.)まで増荷した。
 なお、軸応力度 $\sigma_0=0.4F_c$ の試験体では増荷せず。

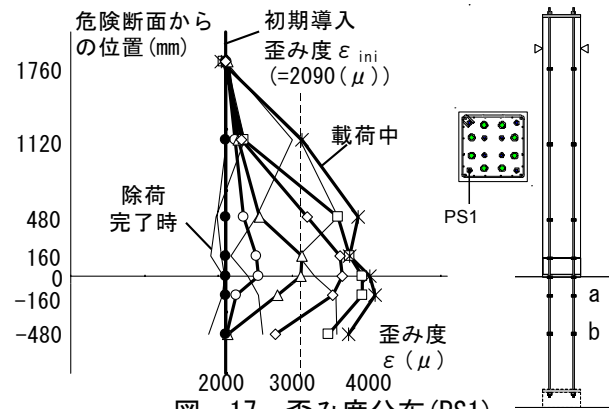


図-17 歪み度分布 (PS1)

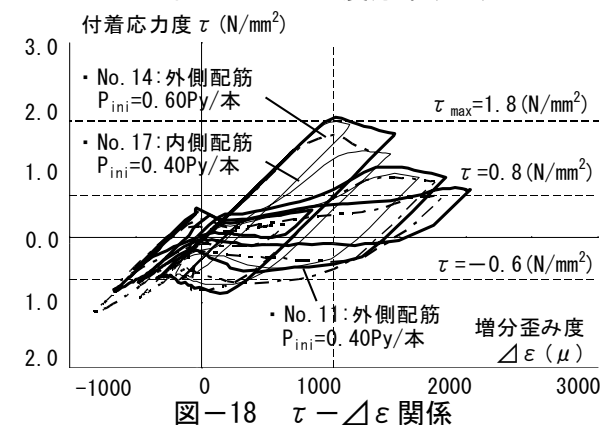


図-18 $\tau - \Delta \epsilon$ 関係

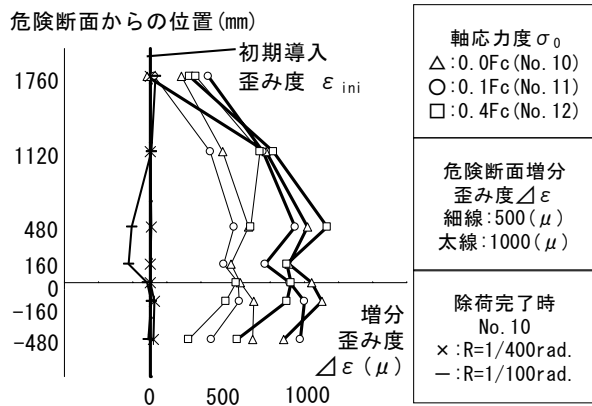
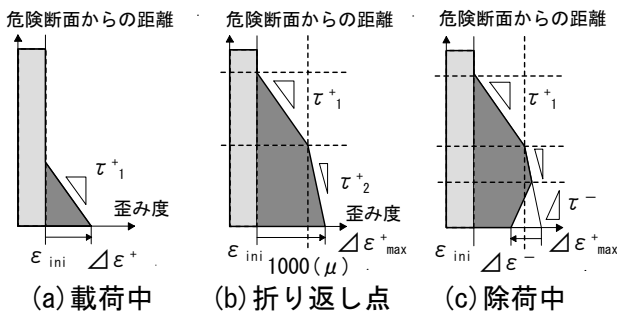
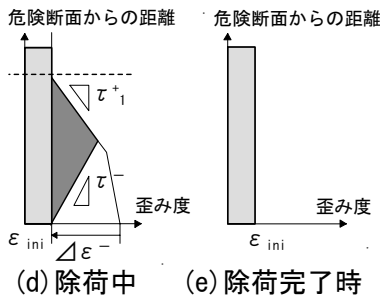


図-19 歪み度分布(軸力比較および除荷完了時)



(a) 荷重中 (b) 折り返し点 (c) 除荷中



(d) 除荷中 (e) 除荷完了時

[$\Delta\varepsilon^+$: 引き抜き端増分歪み度, $\Delta\varepsilon^+_{max}$: 経験した最大増分歪み度, $\Delta\varepsilon^-$: $\Delta\varepsilon^+$ からの減少歪み度, τ^+_1 : 荷重初期の付着応力度, τ^+_2 : 減少した付着応力度, τ^- : 除荷中の付着応力度]

図-20 歪み度分布モデル

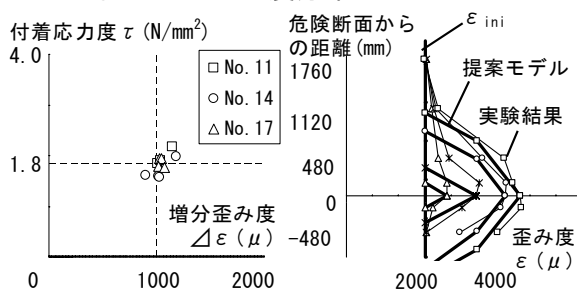


図-21 付着強度 図-22 歪み度分布 (提案モデルと実験値)

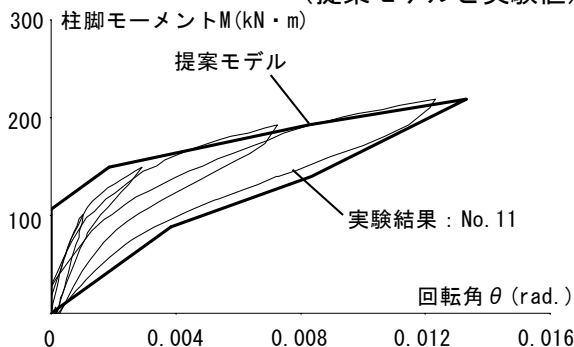


図-23 M-θ 関係モデル

行う。適用範囲は、 $G\sigma_B$ が $60(N/mm^2)$ 程度、軸応力度が $\sigma_0=0.0Fc\sim 0.4Fc(N/mm^2)$ の範囲とする。

図-20に歪み度分布モデル、図-21に付着強度を示す。図中の諸値は図-18をもとにした。

・荷重中: τ が一定のまま増分歪み度 $\Delta\varepsilon$ が上昇していき、 $\Delta\varepsilon=1000(\mu)$ に達すると τ が減少していく。そのときの τ は $1.8(N/mm^2)$ を示す(図-20(a))。その傾向は、図-21に示すように、ほとんどのPC鋼棒で確認できる。その後 $\tau=0.8(N/mm^2)$ 程度にまで減少する(図-20(b))。

・除荷中: τ は徐々に減少していき、 τ が荷重時と逆方向に $0.6(N/mm^2)$ 程度で概ね一定となる(図-20(c))。そして $\Delta\varepsilon=0(\mu)$ に低下した区間では ε はそれ以下にはならず(図-20(d))、除荷完了時には図-19に示すように、 $\Delta\varepsilon$ はすべての区間でほぼ $0(\mu)$ になっている(図-20(e))。

図-22に歪み度分布、図-23にNo.11のM- θ 関係モデルを示す。Mは実験値とし、 θ は提案モデルから算出した。実験結果と比較すると概ね適合性が良いといえる。

8 結論

PC鋼より線およびPC鋼棒の付着実験を行い、付着特性に関して以下の知見を得た。

1)PC鋼より線

- ・付着応力度は $\tau_{max}=1.1(N/mm^2)$ で一定となる。
- ・初期プレストレス導入力の違い、セメントグラウト圧縮強度および本数による影響はない。
- ・本数が複数の場合も、付着周長は1本あたりの付着周長の本数倍で評価できる。

2)PC鋼棒

- ・付着応力度は $\tau_{max}=1.8(N/mm^2)$ で一定となり、その後 $\tau=0.8(N/mm^2)$ に減少する。
- ・初期プレストレス導入力、軸力および配筋による影響はない。

3)提案モデルはM- θ 関係を概ね評価できる。

参考文献

- 1)岡野大志, 松崎育弘, 坂田弘安, 池澤誠: PC圧着関節工法を用いた損傷制御架構の構造性能に関する実験的研究, 日本コンクリート工学年次論文報告集, Vol.27, No.2, pp.547-552, 2005