

論文 PC 鋼より線の付着特性に関する実験的研究

足立 将人^{*1}・高津 比呂人^{*1}・西山 峰広^{*2}

要旨: グラウトとPC鋼より線間の付着特性を確認するために、シースをコンクリートブロックに埋め込み、PC鋼より線を通した後グラウトを施した試験体を作成し、単調及び繰返し引き抜き実験を行った。実験変数は付着区間数、载荷条件(载荷履歴)及び有効プレストレスの有無とし、PC鋼より線の基本的な付着性状を確認した。また実験結果に基づいて付着降伏時の付着応力度及びすべり量などの定量化を行った。さらには過去に提案されている付着応力度-すべり量モデルと比較検討した。

キーワード: PC鋼より線, 付着特性, 履歴载荷, プレストレス

1. はじめに

PC構造部材の曲げに対する履歴性状を解明するためには、PC鋼材の付着応力度-すべり量関係(以下 $\tau-s$ 関係)を明確にすることが不可欠である。過去に行われたPC鋼材の付着性状を考慮した部材解析では、付着降伏応力度及び初期付着剛性の値により部材の荷重-変形関係に及ぼされる影響が大きいことが指摘されている。しかしながら、一般に緊張材として用いられているPC鋼より線とグラウト材間の付着性状に関する実験研究は十分ではない。特に繰返し载荷を受けるPC鋼より線の $\tau-s$ 関係に着目した研究は少なく、未だその挙動については不明な点が多い。

本研究では载荷履歴を主な変数とした実験を行い、各種载荷履歴がPC鋼より線の $\tau-s$ 関係に及ぼす影響を把握することを目的とする。

2. 実験概要

2.1 試験体形状

試験体は载荷直前に変位計測用器具を設置し、より線にひずみゲージを貼付することを目的とした開口部を持つ。断面は幅120mm、高さ240mmであり、その断面の重心にシースを配置して試験体躯体部を打設した。打設後2週間でシースにより線を通し、開口部に挟まれた部分のみを付着区間と

してグラウトを施した。試験体の両端部はグラウト処理を行わないため、アンボンド状態となる。全試験体で用いたより線は7本より公称径12.7mmのPC鋼より線(SWPR 7B)である。またシースは内径26mm、外径29mm、管厚0.25mmのフレキシブルシースを用いた。

本実験では付着区間が一つである試験体(シリーズI)及び三つである試験体(シリーズII)を設定した。これはシリーズIでは両端の鋼材応力をジャッキで直接操作でき、シリーズIIでは連続した三箇所の付着応力度及びすべり量が得られる利点があるためである。

試験体一覧を表1に示す。実験変数は付着区間数と载荷条件及び導入プレストレス力の有無であ

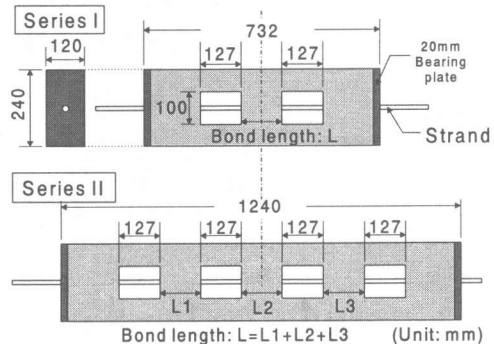


図1 試験体図

*1 京都大学大学院 工学研究科建築学専攻 工修 (正会員)

*2 京都大学助教授 工学研究科建築学専攻 工博 (正会員)

表 1 試験体一覧

試験体名	付着 区間数	載荷条件			導入 プレストレス	グラウト	付着長さ L (mm)	
			載荷履歴	引き抜かれる側 の支持条件				
I-M1-1	1	M1	単調	自由	なし	グラウト 1	121.5	
I-M1-2		M1	単調	自由			120.5	
I-M2-1		M2	単調	制御 ^{*1}			120.0	
I-M2-2		M2	単調	制御 ^{*1}			121.0	
I-C1		C1	漸増繰返し(1回)	自由			123.0	
I-C2		C2	漸増繰返し(1回)	自由			122.0	
II-M1-1	3	M1	単調	自由	なし	グラウト 2	379.5	
II-M1-2		M1	単調	自由			379.5	
II-C1		C1	漸増繰返し(1回)	自由			378.0	
II-C3		C3	漸増繰返し(5回)	自由			378.5	
II-C4		C4	片振り繰返し(1回)	自由			364.5	
II-C5		C5	漸減繰返し(1回)	自由			380.5	
II-M1-P		M1	単調	自由相当 ^{*2}			0.5Py	376.5
II-C1-P		C1	漸増繰返し(1回)	自由相当 ^{*2}			0.5Py	380.0

*1: 引き抜かれる側の変位を拘束

*2: 初期有効プレストレスを保持

る。載荷条件とは、付着区間に与えたすべり載荷履歴及び引き抜かれる側のより線の支持条件の二項目から単調引き抜き試験体 M1, M2 及び繰返し引き抜き試験体 C1～C5 に分類される。載荷履歴の概略図を図 2 に示す。

・ 単調引き抜き試験体 M1, M2

M1 と M2 の違いは引き抜かれる側のより線の支持条件にある。付着引き抜き実験には、JIS 原案として提案されている付着試験法のように、比較的短い付着区間を設けた試験体を作成して引き抜き載荷を行うケース、あるいはより実構造物に近い状態での鋼材の付着性状を把握するためにマッシュシブなコンクリートに埋め込まれた鋼材にひずみゲージを貼付し引き抜き載荷を行うケースなどがある。前者のケースでは、引き抜かれる側の鋼材は拘束されていない、すなわち引き抜かれる側の

鋼材応力は 0 である。しかしながら、前者と同様の短い付着区間が連続しているとして後者を見た場合、各付着区間での拘束条件は前者と異なる。これらの違いを確認するために、M1 では引き抜かれる側の鋼材を自由とし、M2 では引き抜かれる側の変位が 0 を保つようジャッキによる制御を行った。

・ 繰返し引き抜き試験体 C1～C5

C1, C2 及び C3 ではすべり量漸増繰返し引き抜き載荷を行った。C1～C5 に共通して、繰り返すすべり量は $S = \pm 0.5, \pm 1.0, \pm 2.0, \pm 3.0, \pm 4.0$ 及び $\pm 5.0\text{mm}$ である。

C1 では各すべり量での 1 回繰返し載荷を行い、C3 では 5 回繰返し載荷を行った。C2 では付着降伏以前での繰返し載荷が付着降伏点以降の $\tau - S$ 関係に及ぼす影響を調べるために、 $\tau = \pm 1.0, \pm 2.0, \pm 3.0\text{MPa}$ で繰返し載荷を行い、付着降伏に達した後、C1 と同様に各すべり量での 1 回繰返し載荷を行った。付着降伏の定義は 3 章に示す。

C4 では正側だけに片振り繰返し載荷を、C5 では $S = 5.0\text{mm}$ から漸減繰返し載荷を行った。

有効プレストレスの存在する II-M1-P 及び II-C1-P では、ポストテンション方式によりプレストレスを導入し、グラウトを施した。これらの試験体では、付着劣化が生じすべり量が大きくなると引き抜かれる側の鋼材応力が上昇するために、引き抜かれる側の鋼材応力が初期の有効プレストレスを

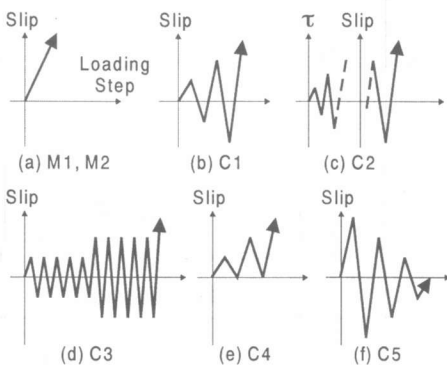


図 2 載荷履歴

保つようにジャッキで制御を行った。これは有効プレストレスが存在しない試験体における引き抜かれる側自由支持に相当する。導入されたプレストレスは、両試験体とも $0.5P_y$ とした。ここで P_y : PC 鋼より線の 0.2% オフセット降伏応力である。

表 1 には各試験体の付着長さも併せて示している。付着長さは公称鋼材径の 10 倍 (127mm) としたが、グラウトのブリージングにより若干減少していたため、荷重前に再度付着長さを測定した。シリーズIIの試験体については、三ヶ所の付着区間で付着長さの和を示している。

各試験体で用いた材料諸特性を、コンクリート及びグラウトについては表 2 に、より線については表 3 にそれぞれ示す。グラウト 1 及び 2 は共に、普通ポルトランドセメントを水セメント比 45% で調合したセメントペーストであるが、大きな強度の差が生じた。

2. 2 荷重・計測装置

図 3 に荷重装置図 (シリーズI) を示す。荷重条件が M1 である試験体では片側のみ、それ以外では試験体の両端部にセンターホールジャッキを配置し引き抜き荷重を行った。

同図には計測装置の配置状況も示している。本実験では、ロードセルを用いてジャッキ位置での、また開口部の鋼材にひずみゲージを貼付することにより同位置での鋼材応力の計測を行った。ひずみゲージは開口部一ヶ所あたり、より線の側線 6 本に対して 1 本おきに計 3 枚、あるいは 2 本おきに計 2 枚貼付した。また開口部それぞれの中央で鋼材に金属製アングルを取り付け、試験体駆体コンクリート部に埋め込まれたナットに取り付けられた変位計固定金具との間の相対変位を測定した。

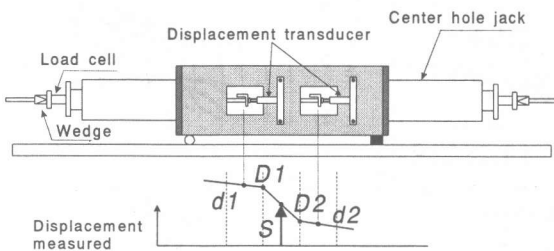


図 3 荷重、計測装置 (シリーズI)

表 2 コンクリート、グラウト材料特性

	コンクリート	グラウト 1	グラウト 2
fc' (MPa)	36.7	29.0	44.8
ft (MPa)	2.92	1.93	2.52
Ec (GPa)	24.5	14.1	15.6

fc' : 圧縮強度 ($\phi 10 \times 20$ cm 標準シリンダーより。但しグラウトは $\phi 5 \times 10$ cm), ft : 割裂引張強度, Ec : $1/3$ fc' 割線弾性係数

表 3 PC 鋼より線材料特性

Ap (mm ²)	98.71	Ap : 公称断面積
fy (MPa)	1820	fy : 0.2% オフセット降伏応力
fu (MPa)	1930	fu : 引張強度
Ep (GPa)	228	Ep : 初期弾性係数

2. 3 各種データ整理方法

(a) 鋼材応力及び付着応力

当初、開口部において鋼材に貼付されたひずみゲージの測定値を基に同位置での鋼材応力を算出することを予定していたが、荷重直前にひずみゲージを貼付したにも関わらず測定値に大きなばらつきが生じた。このばらつきは付着降伏以降、すべり量が大きくなるほど、また繰返し荷重が進むに連れ顕著となった。この原因の一つとして鋼材がすべるときに、必ずしも 7 本の素線が一体となってすべるわけではないことが挙げられる。

シリーズIの試験体では、開口部で鋼材に貼付したひずみゲージから得られた鋼材応力とロードセルから得られた鋼材応力は一致するはずである。しかしながら実験結果は非常に大きな差を示したため、本稿ではロードセルの測定値を基に鋼材応力を算出することとした。よってシリーズIIの試験体では三ヶ所の付着区間を一つの区間として取り扱う。

本稿ではより線断面はその公称径を直径とする円形であると仮定し、次式からより線の付着応力を算出した。

$$\tau = \frac{\Delta P}{\pi \cdot L \cdot \phi} \quad (1)$$

ここで ΔP : 左右のロードセルから得られた応力の差, L : 付着長さ, ϕ : より線の公称径 ($\phi = 12.7$ mm) である。

(b) すべり量

すべり量の算出方法の概略を図 3 に併せて示

す。付着区間の左右の開口部に設置した変位計で得られた変位： d_1, d_2 の値から、付着区間端部と変位測定位置との間における鋼材の伸びを差し引いた付着区間両端の変位： D_1, D_2 を算出し、その平均値をもって付着区間のすべり量 S とした。

3. 実験結果

3.1 シリーズI 実験結果概要

シリーズIの6体の実験結果から得られた τ - S 関係を図4 (a)～(f)に示す。全ての試験体で、荷重開始直後ではすべり量の進行に伴い付着応力度がほぼ線形に上昇していくが、ある時点から付着応力度が急激に低下し、大きく滑り出す現象が見られた。この現象を本稿では付着降伏と呼び、その点を付着降伏点(τ_y, S_y)とする。

(a) 単調引き抜き 引き抜かれる側の鋼材は自由支持 (I-M1-1, I-M1-2 試験体 図4 (a), (b))

これら2体に対しては、鋼材のすべり量が大きくなった場合を想定し、すべり量10mmまで引き抜き荷重を行った。

実験より得られた τ - S 関係では、付着降伏に達した後、すべり量2mm前後で τ の値が下限値をとり、荷重終了まで再度 τ が上昇した。その結果

I-M1-2では最終的に付着応力度が $1.33\tau_y$ にまで達した。

(b) 単調引き抜き 引き抜かれる側は応力制御 (I-M2-1, I-M2-2 試験体 図4 (c), (d))

鋼材が引張降伏する前に荷重を終了したため、荷重終了時に到達したすべり量は他の試験体と比較して非常に小さい。

I-M2-1では、付着降伏に達した後 τ の値が一定値を保っているように見える。しかしI-M2-2では付着降伏後再び τ が上昇していく傾向にあり、この実験結果からでは引き抜かれる側の応力を制御したことによる影響は明確ではなかった。

(c) 繰返し荷重

(I-C1, I-C2 試験体 図4 (e), (f))

図4 (e)には単調引き抜き荷重を行ったI-M1-2の実験結果も併せて示した。I-M1-2と比較すると、繰返し荷重による付着劣化のために、I-C1の包絡線が著しく低下している。

I-C2では、正側で $\tau=+3.2\text{MPa}$ を経験した後、負側 $\tau=-3\text{MPa}$ に向かう途中で付着降伏が生じた。I-C1と比較すると、付着降伏以前で繰返し荷重を経験しても、その後の τ - S 関係には殆ど影響がないことが分かる。

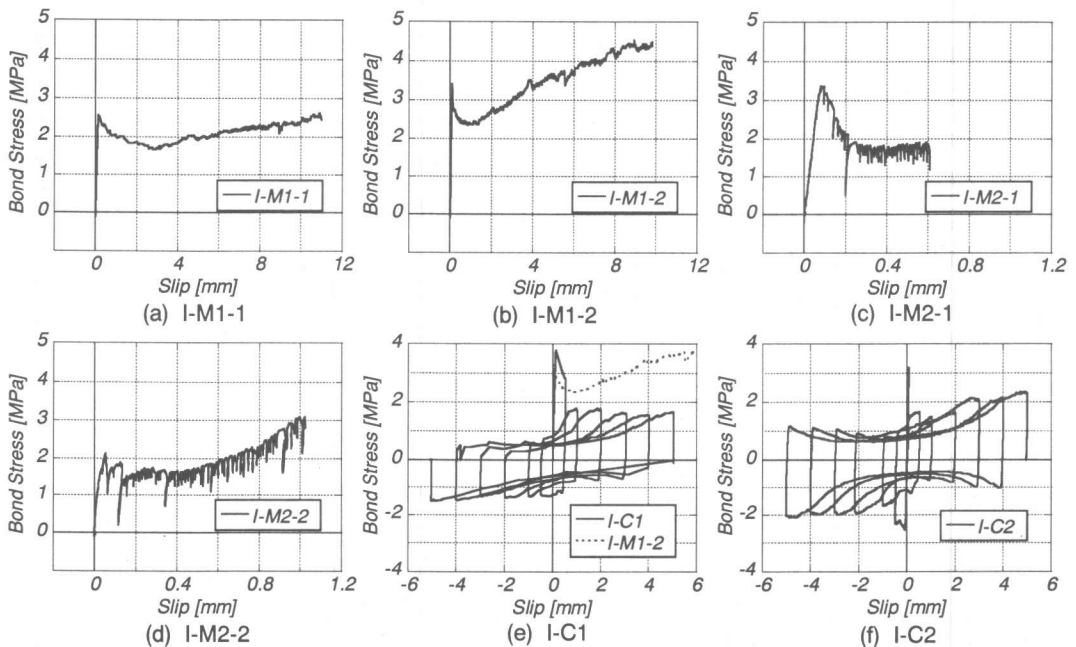


図4 付着応力度-すべり量関係 (シリーズI)

表4 τ_y , $S_{\tau y}$ 一覧 (シリーズI)

	I-M1-1	I-M1-2	I-M2-1	I-M2-2	I-C1	I-C2	Ave.
τ_y (MPa)	2.57	3.42	3.37	2.14	3.87	-2.51	2.98
$S_{\tau y}$ (mm)	0.11	0.08	0.08	0.05	0.11	-0.11	0.09

またI-C1, C2に共通して、一度付着降伏を経験すると、逆側载荷時に十分な付着抵抗を発揮しなくなることが言える。

(d) 付着降伏点

表4にシリーズIから得られた τ_y 及び $S_{\tau y}$ の一覧を示す。同表には文献2及び文献3での提案式に基づいた算出値も併せて示す。実験結果から得られた各値はばらつきがあるものの、平均値をとると $\tau_y = 2.98$ MPa, $S_{\tau y} = 0.09$ mmとなった。これは文献2と3の中間程度の値となる。

実験より得られた τ - S 関係を付着応力度は τ_y で、すべり量は $S_{\tau y}$ でそれぞれ基準化し、その降伏点近傍の様子を図5に示す。文献2では τ - S 関係をモデル化しており、このモデル(以下是永モデル)に基づいた関係を同図に点線で併せて示す。

是永モデルでは降伏点までの τ - S 関係を二次曲線で表現しているが、これに対して本実験結果では直線に近い様子が分かる。

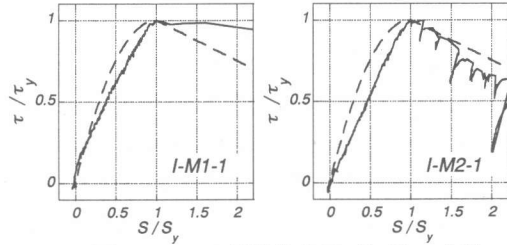


図5 τ - S 基準化曲線 (シリーズI)

3. 2 シリーズII 実験結果概要

図6(a)~(f)にシリーズIIの8体の実験結果から得られた τ - S 関係を示す。

シリーズIIで用いた試験体では、付着長さがシリーズIと比較しておよそ3倍であり、異なる長さの付着区間に対して引き抜き試験を行った結果を単純に比較することはできない。また開口部の存在が τ - S 関係に及ぼす影響も無視することはできない。よって本節ではシリーズIIから得られた結果同士を比較することで、各種パラメータの影響を考察する。

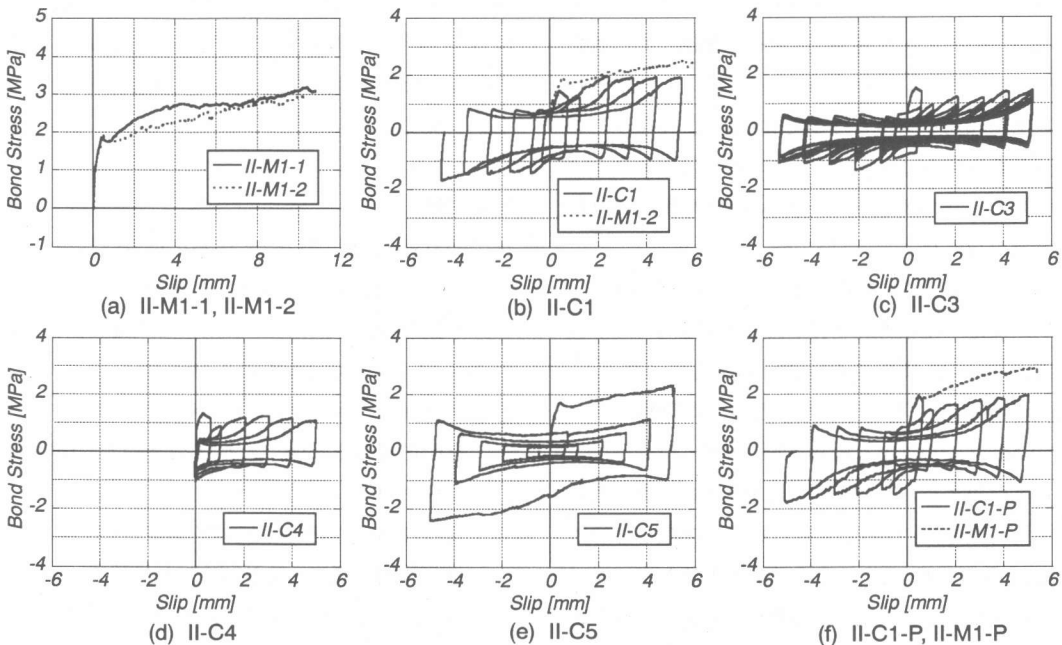


図6 τ - S 関係 (シリーズII)

(a) 単調引き抜き

(II-M1-1, II-M1-2 試験体 図6 (a))

両試験体共に付着降伏に達した後付着応力度が低下する。その低下量はシリーズIに比べて小さく、以降最終すべり量まで付着応力度は上昇しつづけた。

(b) 繰返し載荷

(II-C1, C3, C4, C5 試験体 図6 (b)~(e))

図6 (b)には単調引き抜きを行った試験体(II-M1-2)の実験結果も併せて示した。1回繰返し載荷を行ったII-C1では、 τ - S 関係における包絡線と単調引き抜き試験体II-M1-2の τ - S 関係との間に大きな差が見られず、繰返し載荷による付着劣化への影響は比較的小さい。これに対して5回繰返し載荷を行ったII-C3では付着劣化が進行したために、その包絡線も低下しており、最終ループまで付着応力度の値が τ_y を上回ることにはなかった。

片振り繰返し載荷を行ったII-C4では、漸増繰返し載荷を行ったII-C1と比較して、付着降伏以降の包絡線が低下しているが、大きな挙動の差は見られなかった。

すべり量漸減繰返し載荷を行ったII-C5では、載荷が進行してすべり量の振幅が小さくなるに連れて、その τ - S 関係が $S=0\text{mm}$ を軸とする放物線に近づいていく様子がうかがえる。またすべり量漸増繰返し載荷を行ったII-C1とは異なり、載荷が進行するに連れて到達できる付着応力度の値は減少し、最終ループでは $\tau=0.2\text{MPa}$ 程度の付着抵抗となった。

繰返し載荷を行った全試験体では、シリーズIと同様に一度正方向で付着降伏を経験すると、負方向載荷で発揮できる付着耐力が低下した。

(c) 有効プレストレスの存在による影響

(II-M1-P, II-C1-P 試験体 図6 (f))

単調引き抜き載荷を行ったII-M1-Pで得られた τ - S 関係は、有効プレストレスの存在しないII-M1-1及びII-M1-2と、その挙動に大きな違いは見られなかった。同様に漸増繰返し載荷を行ったII-C1-PでもII-C1との差は小さく、 $0.5P_y$ 程度のプレ

ストレスの存在は τ - S 関係に影響を及ぼさないことが分かる。

4. まとめ

PC鋼より線をコンクリートブロックに埋め込んだ試験体を作成し、単調及び繰返し引き抜き実験を行った結果、以下の結論が得られた。

(1) 単調引き抜き載荷を行った場合、付着降伏点に達して一旦付着応力度は低下するが、すべり量2mm程度を下限值として再びすべり量と共に付着応力度は上昇する。

(2) 繰返し載荷を行った場合、付着降伏を経験すると逆側載荷時に発揮する付着耐力が低下する。また付着劣化のために、その包絡線は単調引き抜き載荷を行った場合の τ - S 関係を大きく下回る。その劣化の程度は繰返し回数が多いほど大きい。

(3) 降伏に達するまでの付着剛性は、付着降伏点を頂点とする二次曲線よりもむしろ直線的な傾向が強い。

(4) $0.5P_y$ 程度の有効プレストレスの存在が、より線の付着性状に及ぼす影響は殆ど見られない。

謝辞:本研究の試験体製作にあたっては神鋼鋼線工業株式会社の御協力を、また本実験遂行にあたっては本学大学院生 川西泰一郎君、卒論生 津越紀和君の協力をそれぞれ頂きました。ここに記して深く感謝致します。

参考文献

- 1) 足立将人, 西山峰広:緊張材の付着特性を考慮したプレレストコンクリート骨組の履歴挙動解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 3, pp.895-900, 1999.7
- 2) 是永健好, 渡辺英義:PC鋼より線とグラウト材の付着特性評価, 日本建築学会大会講演梗概集(中国), C2, pp.1083-1084, 1999.9
- 3) 建設省建築研究所ほか:PC鋼材とグラウトの付着特性に関する実験研究, 共同研究 PC構造設計・施工指針の作成 最終年度研究報告書, II-2-226-277, 1999.3