

論文 PC 鋼より線の付着応力 - すべり - ひずみ関係に関する実験的研究

足立 将人^{*1}・西山 峰広^{*2}・河野 進^{*3}

要旨:7本より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,単調引き抜き載荷実験を行い,PC鋼より線の基本的な付着性状を得た。実験変数はグラウト強度及び付着区間自由端の境界条件とした。実験結果より,引き抜き載荷時に発生するPC鋼より線の鋼材ひずみの大きさが,付着降伏点以降の付着性状に影響を与えることが分かった。また,付着降伏応力度とグラウト強度との相関性について既往のモデルとの比較検討を行った。

キーワード:PC鋼より線,付着,鋼材ひずみ,グラウト,プレストレス

1. はじめに

コンクリート系構造部材の履歴性状を解明するためには,鋼材とコンクリート間の付着応力 - すべり関係(τ - S 関係)を明らかにすることが不可欠である。両者間の付着性状は,多くの要因によって影響を受けることが指摘されており,その要因の一つに付着区間両端の境界条件が挙げられる。

島ら¹⁾は,異形鉄筋を用いた引き抜き付着試験において,自由端側の境界条件がその付着性状に影響を及ぼすことを指摘し,鉄筋に沿った任意の位置における付着応力を導くために, τ - S 関係に鋼材ひずみの影響を考慮した付着応力 - すべり - ひずみ関係(τ - S - ϵ 関係)を定式化している。

機械的作用による付着抵抗が大きい異形鉄筋と異なり,プレストレストコンクリート構造(以下PC構造)で一般に緊張材として用いられているPC鋼より線は摩擦的付着抵抗の要素が無視できない。また,その物理的形狀によって,PC鋼より線は鋼材ひずみが上昇すると,そのよりが締まり,鋼材表面とグラウトとの肌離れが発生し,付着抵抗が低下することが考えられる。そのため,PC鋼より線の付着試験において鋼材ひずみが付着性状に及ぼす影響は,異形鉄筋の場合よりも大

きいことが予想できる。

本研究では,付着区間の自由端での支持条件及びグラウト強度を実験変数とした単調引き抜き載荷実験を行い,PC鋼より線の τ - S 関係に鋼材ひずみが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

図 - 1 に試験体図を示す。試験体の断面は幅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を打設した。打設後2週間でシースにより線を通してセメントペーストによりグラウトを施した。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(SWPR7B)である。またシースは内径26mm,外径29mm,管厚0.25mmのワインディングシースである。また載荷上の都合により,本実験ではPC鋼より線にプレストレスは導入していない。

図 - 2 に載荷装置を示す。載荷端側には引き抜き載荷用,自由端側には境界条件を制御することを目的として,載荷フレームの両端部にセンターホールジャッキを配置した。

同図には計測装置の配置状況も示している。

*1 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 京都大学工学部建築 助教授、工博 (正会員)

*3 京都大学工学部建築 助手、PhD (正会員)

本実験では、ロードセルを用いてジャッキ位置での鋼材応力を計測している。また、引き抜き側の荷重フレームに設けられた開口部位置、及び自由端側では変位計測用金属製アングルを鋼材に取り付け、試験体躯体に埋め込んだナットに取り付けられた変位計固定用金具との間の相対変位を測定した。

試験体一覧を表 - 1 に示す。実験変数は自由端側の境界条件及びグラウト強度である。本実験では、自由端側の境界条件を鋼材ひずみ ε_f とすべり S_f との比 (ε_f/S_f) で表すこととする。

鋼材ひずみは自由端側ロードセルにより得られた鋼材応力から計算し、すべりは自由端側変位計測用アングルで得られた変位として、その比 ε_f/S_f が荷重中常に一定値を保つように自由端側のジャッキで制御を加えた。本実験で採用した ε_f/S_f の値は $\varepsilon_f/S_f = 0$ (自由端側無制御), 1000, 1500 及び 2000 ($10^{-6}/\text{mm}$) の 4 種類とし、これらをそれぞれシリーズ 0, 1, 2 及び 3 とする。これらの値は、十分長い付着長さを持つ試験体からの引き抜き実験²⁾ より得られた鋼材ひずみ - すべり関係を参考に定めた。

またグラウトは混和材を使用せず、普通ポルトランドセメントと水のみを配合して製作し、打設後は実験室内の空气中で養生した。本実験で採用した水セメント比は 35%, 45% 及び 55% の三種類であり、それぞれグラウト A, B 及び C とした。よって 12 種類の試験体が存在し、基本的には各種 3 体ずつ実験を行った。但し B-3 は 2 体のみであるため、総試験体数は 35 体となる。以後、例えばグラウト A, シリーズ 0 の一体目の試験体は A-0-1 と呼ぶこととする。

付着長さは試験体幅 (150mm) を目安としたが、グラウトのブリージングの影響により各試験体で若干異なったため、実験荷重前に目視により付着長さを測定した。その付着長さを平均すると約 147mm となった。これは PC 鋼より線公称径のおよそ 11.6 倍である。

各試験体で用いた材料諸特性を、躯体コンクリート及びグラウトについては表 - 2 に、PC 鋼

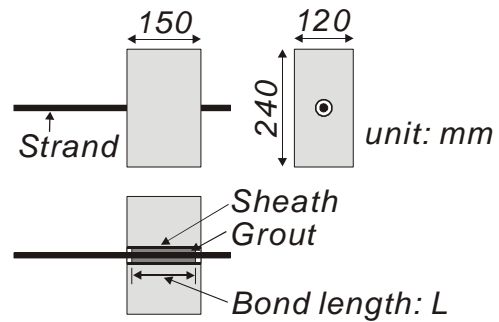


図 - 1 試験体図

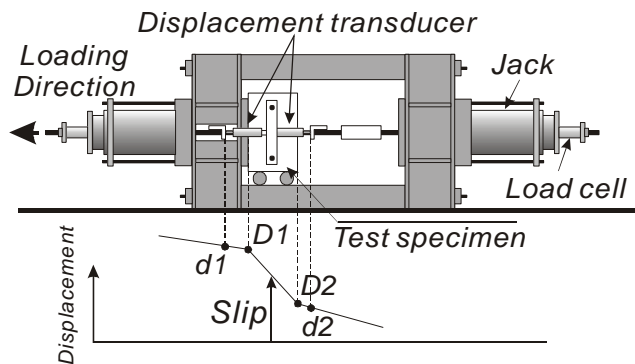


図 - 2 荷重装置図

表 - 1 試験体一覧

		ε_f/S_f ($10^{-6}/\text{mm}$)			
		0	1000	1500	2000
Grout	A (w/c=35%)	A-0	A-1	A-2	A-3
	B (w/c=45%)	B-0	B-1	B-2	B-3
	C (w/c=55%)	C-0	C-1	C-2	C-3

表 - 2 コンクリート材料特性

	Concrete	Grout		
		A	B	C
f'_c (MPa)	33.0	56.3	48.0	45.2
f_t (MPa)	2.44	4.39	3.23	1.93
E_c (GPa)	21.8	18.8	18.3	13.2

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

表 - 3 PC 鋼より線材料特性

A_p (mm^2)	98.7
f_y (MPa)	1740
f_u (MPa)	1970
E_p (GPa)	192

A_p : 公称断面積
 f_y : 0.2% オフセット降伏
 応力度
 f_u : 引張強度
 E_p : 初期弾性係数

より線については表 - 3 にそれぞれ示す。

全試験体で、基本的にはすべり量が5mmに達するまで単調引き抜き荷重を行った。これは、部材が大変形に達した際に到達すると考えられる危険断面からのPC鋼より線の抜け出しを考慮したためである。但し、荷重中に本実験で使用したPC鋼より線の鋼材ひずみが7000 (10⁻⁶)に達すると、線形弾性範囲を逸脱するため、荷重を打ち切った。

2.2 各種データ整理方法

(a) 付着応力度

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

$$\tau = \Delta P / \pi L \phi \quad (1)$$

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 ($\phi = 12.7\text{mm}$) である。

(b) すべり量

すべり量の算出方法の概略を図 - 2 に併せて示す。荷重端側及び自由端側に設置した変位計で得られた変位: $d1, d2$ 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: $D1, D2$ 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。

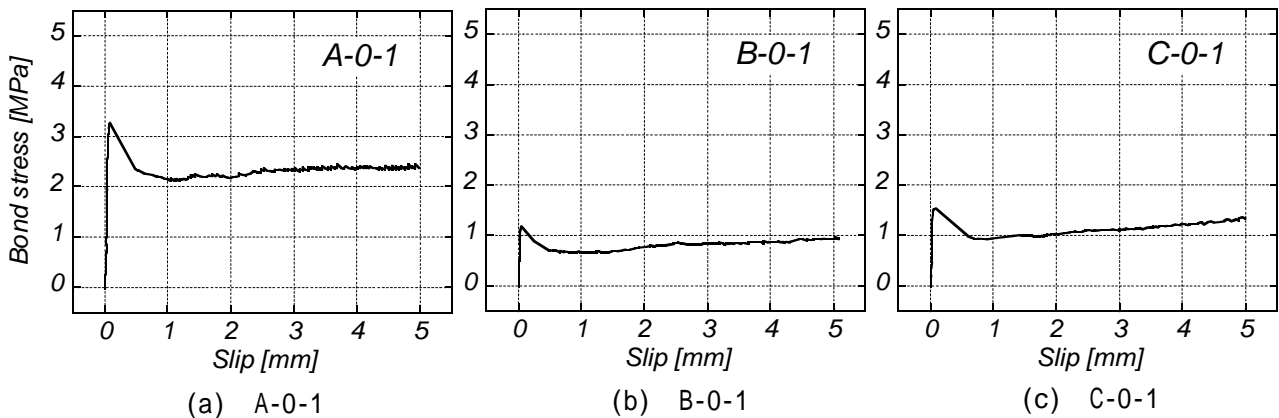


図 - 3 付着応力 - すべり関係

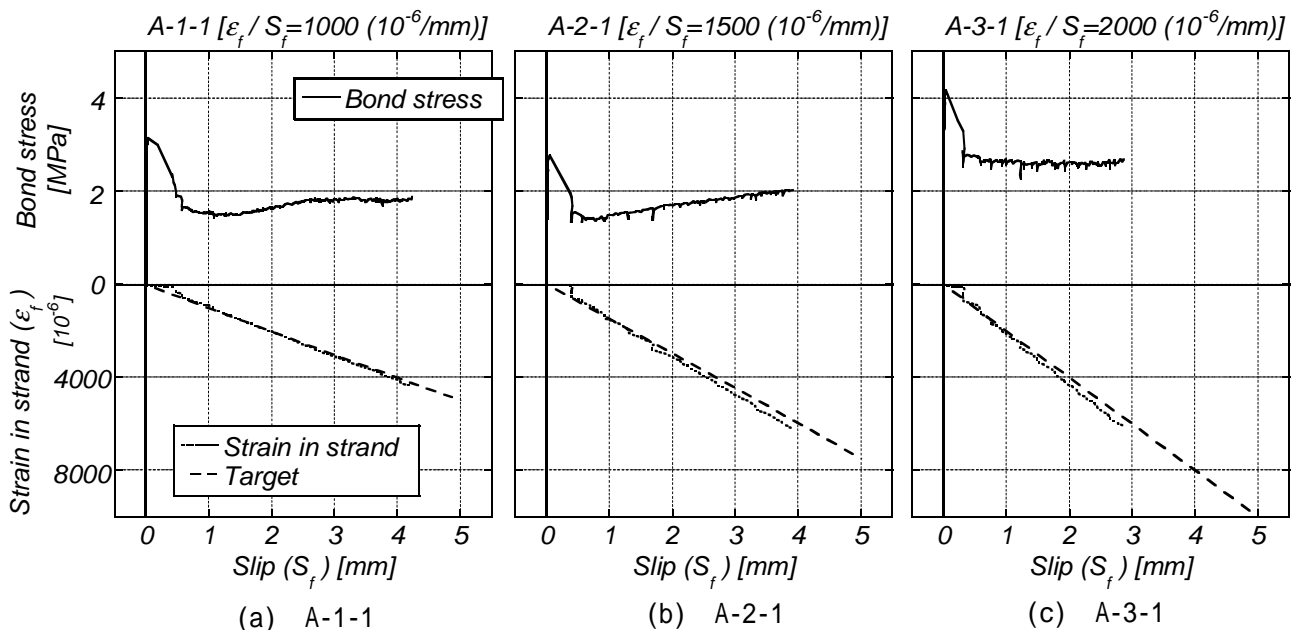


図 - 4 付着応力 - 自由端側すべり - 自由端側鋼材ひずみ関係

表 - 4 付着降伏点特性 実験結果一覧

(a) グラウト A ($f'_c=56.3\text{MPa}$) (b) グラウト B ($f'_c=48.0\text{MPa}$) (c) グラウト C ($f'_c=45.2\text{MPa}$)

	τ_y MPa	S_y mm	K_{slip}		τ_y MPa	S_y mm	K_{slip}		τ_y MPa	S_y mm	K_{slip}
A-0-1	3.28	0.079	41.3	B-0-1	1.19	0.051	23.4	C-0-1	1.54	0.094	16.4
A-0-2	3.43	0.131	26.3	B-0-2	2.08	0.064	32.5	C-0-2	2.35	0.053	44.7
A-0-3	2.16	0.073	29.7	B-0-3	2.20	0.044	49.9	C-0-3	1.82	0.050	36.7
A-1-1	3.16	0.057	55.1	B-1-1	2.10	0.073	28.7	C-1-1	0.74	0.045	16.4
A-1-2	3.31	0.046	71.6	B-1-2	2.11	0.077	27.4	C-1-2	1.89	0.024	80.0
A-1-3	2.46	0.062	39.4	B-1-3	1.17	0.040	29.7	C-1-3	1.37	0.028	49.5
A-2-1	2.79	0.084	33.1	B-2-1	1.87	0.049	38.4	C-2-1	1.46	0.092	15.8
A-2-2	2.96	0.076	39.1	B-2-2	1.85	0.065	28.7	C-2-2	1.42	0.069	20.5
A-2-3	3.19	0.069	45.9	B-2-3	2.38	0.087	27.2	C-2-3	2.13	0.084	25.3
A-3-1	4.18	0.129	32.4	B-3-1	2.48	0.082	30.1	C-3-1	2.00	0.054	37.4
A-3-2	2.94	0.063	47.0	B-3-2	1.94	0.044	44.3	C-3-2	1.46	0.050	29.2
A-3-3	3.40	0.104	32.7					C-3-3	1.52	0.021	73.9
Ave.	3.10	0.081	41.1	Ave.	1.94	0.061	32.7	Ave.	1.64	0.055	37.2

3. 実験結果

3.1 実験結果概要

実験結果の一例として A-0-1、B-0-1 及び C-0-1 各試験体の $\tau - S$ 関係を図 - 3 (a) ~ (c) に示す。グラウト強度及び自由端の境界条件に関わらず、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、ある時点で付着応力度が急激に低下し、大きくすべ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) とし、次式から得られる K_{slip} を初期付着剛性とする。

$$K_{slip} = \tau_y / S_y \quad (2)$$

A-1-1、A-2-1 及び A-3-1 の各試験体について横軸に自由端すべり、縦軸正方向に付着応力、縦軸負方向に自由端鋼材ひずみを取った図を併せて図 - 4 (a) ~ (c) に示す。同図には各試験体で目標となる ϵ_f / S_f 関係も併せて示している。

引き抜き荷重開始から付着降伏に達するまでは、自由端側にすべり及び鋼材ひずみの増加は見られないため ϵ_f / S_f の制御は行わなかった。また、付着降伏以降は ϵ_f / S_f が目標値 (A-1-1 の場合 $\epsilon_f / S_f = 1000 (10^{-6}/\text{mm})$) を保つように制御を

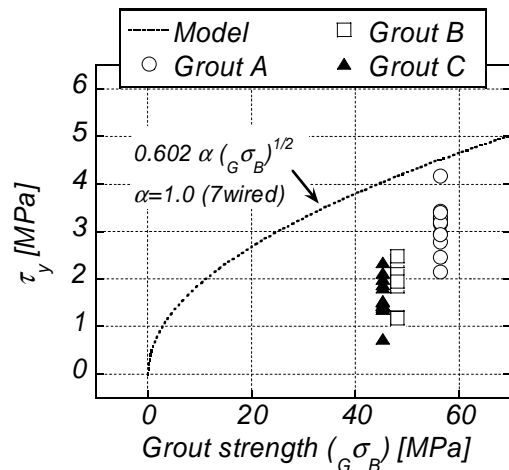


図 - 5 グラウト強度 - 付着降伏応力関係

行った。図 - 4 (a) ~ (c) によると、 ϵ_f / S_f 関係の計測値と目標値との適合性は非常に良好で、自由端における ϵ_f / S_f の制御は概ね順調に行うことができた。

全試験体の実験結果から得られた付着降伏点 τ_y, S_y 及び K_{slip} の一覧を表 - 4 に示す。前述したように付着降伏までは自由端側の制御を行っていないため、シリーズ 0 ~ 3 の区別は無い。よって同グラウト内での各値を平均した結果を同表に併せて示している。これによるとグラウト強度が高い試験体ほど τ_y 及び S_y の値が大きくなっており、両者の比である K_{slip} の値は各グループ間で大差が無い様子が分かる。

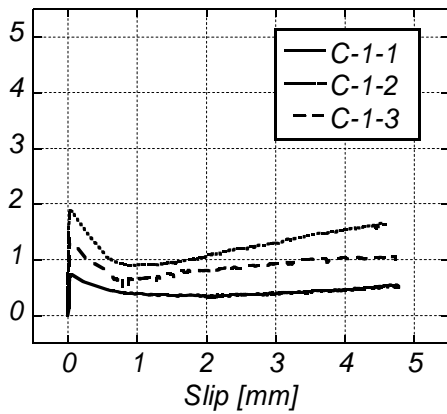


図 - 6 付着応力 - すべり関係 (C-1)

全試験体のグラウト強度を横軸に τ_y の値を縦軸に採った図を図 - 5 に示す。同図には是永ら³⁾の提案したPC鋼より線のグラウト強度 - 付着強度関係式を破線で併せて示している。本実験で得られた τ_y の値は、提案式を大きく下回った。これは、提案式では付着応力を算出する際に基準となる付着長さがPC鋼より線公称径の10倍であるのに対し、本実験では約11.6倍と長かったために、付着区間内での付着応力度が平均化されたことが要因の一つとして考えられる。

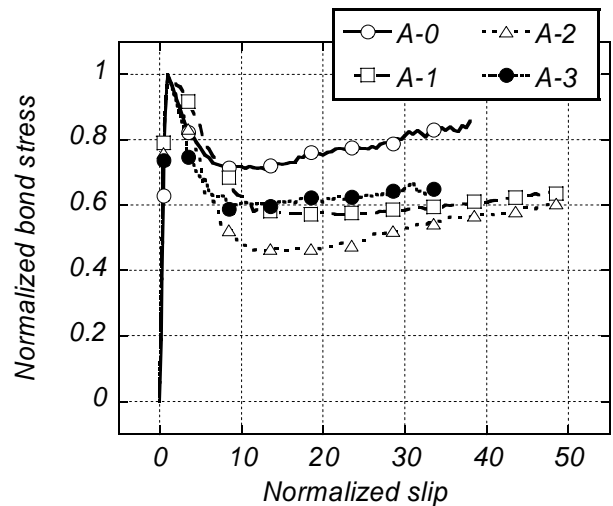
3.2 - S 曲線形状

図6に同一実験変数を持つC-1-1、C-1-2及びC-1-3試験体の - S 関係を示す。同図から分かるように、同一な実験変数を持つ試験体でも、付着降伏応力度、その後の付着応力低下量、付着剛性など、その - S 関係には多くのばらつきが見られた。

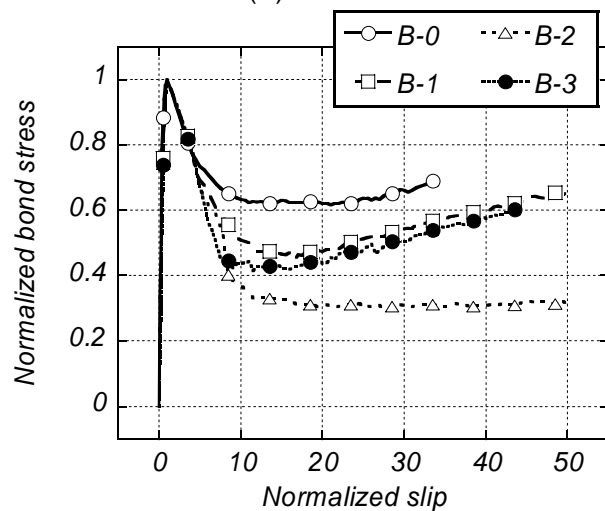
よって、実験変数毎の - S 曲線を比較するために、各試験体の - S 関係を付着応力は τ_y で、すべりは s_y で基準化し、同一な実験変数を持つ試験体毎に平均化した - S 関係で比較を行う。

- S 関係の平均化は、基準化すべり0.025ごとの基準化付着応力度を算出し、3体の平均値を導くことで行った。その結果得られた - S 関係を図7(a) ~ (c)にそれぞれ示す。

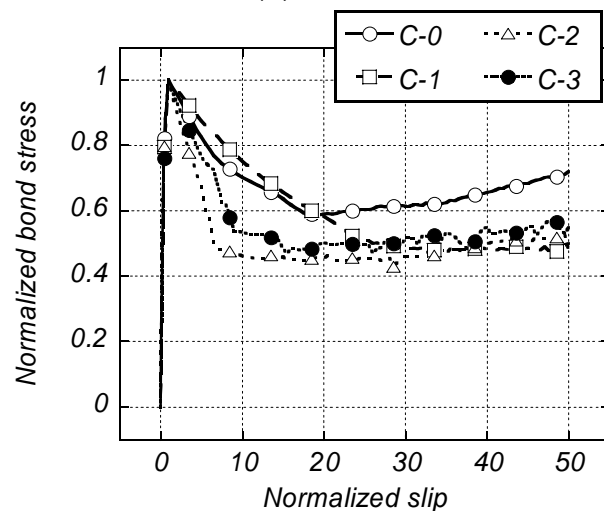
図 - 7によると、全ての試験体で付着降伏を経験した後に急激に付着応力が低下し、一定値を保つか、或いは再び付着応力が増加している。この傾向を明らかにするために、付着降伏以降で経験



(a) グラウト A



(b) グラウト B



(c) グラウト C

図 - 7 基準化付着応力 - 基準化すべり関係

した基準化最小付着応力、及びそれ以降の付着剛性の二点に着目する。

図 - 8には、横軸に ε_f/S_f 、縦軸に基準化した最小付着応力を採った図を示す。図 8による

と、グラウト強度が高いほど、また ε_f/S_f の値が小さいほど基準化した最小付着応力が高く、付着降伏以降での付着抵抗の低下が少ないことが分かる。

横軸に ε_f/S_f 、縦軸に最小付着応力を経験した後の基準化付着曲線上での付着剛性としてプロットしたものを図 9 に示す。これも図 - 8 と同様にグラウト強度が高いほど、また ε_f/S_f の値が小さいほど高い付着剛性を示すように見える。しかしながら、グループ B で最も ε_f/S_f の値が大きな B-3 において、全試験体中最も高い付着剛性を示すなど、その傾向は明確ではなかった。

また本実験では、付着降伏以降において付着降伏応力を上回る付着応力は、全試験体で観察されなかった。

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、付着区間の自由端での支持条件及びグラウト強度を実験変数とした単調引き抜き荷重実験を行った結果、以下の結論が得られた。

- (1) グラウト強度が高いほど、付着降伏応力度及び付着降伏点すべり量は大きくなったが、付着降伏点剛性には大きな違いは見られなかった。但し付着降伏応力度 - グラウト強度関係を是永らの提案式と照合した結果、実験値は提案式の値を下回った。
- (2) PC鋼より線の付着応力 - すべり関係では、付着降伏以降一旦付着応力は低下し、再び上昇するが、グラウト強度が高いほど、また自由端側の鋼材ひずみとすべりの比が小さいほど、その低下量及び再び上昇する剛性は大きくなる傾向が見られた。

謝辞：本研究の試験体製作にあたっては住友電気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卒論生 湊健太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。

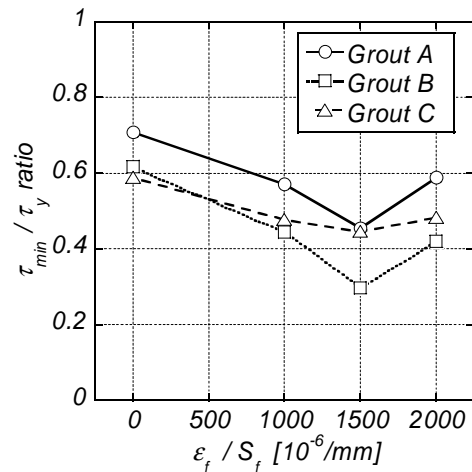


図 - 8 基準化最小付着応力 - ε_f/S_f 関係

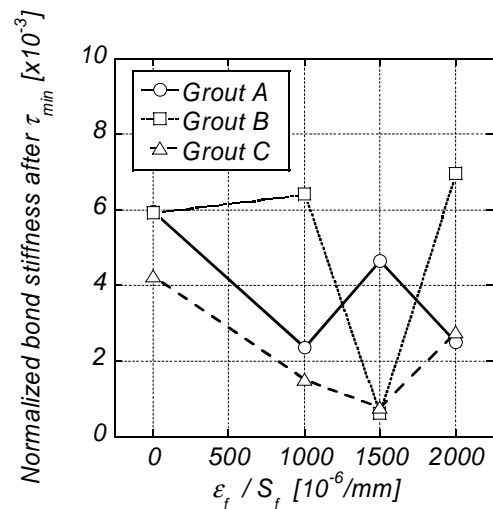


図 - 9 基準化付着剛性 - ε_f/S_f 関係

参考文献

- 1) 島 弘, 周 礼良, 岡村 甫: マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力 - すべり - ひずみ関係, 土木学会論文集, 第378号, V-6, pp. 165-174, 1987.2
- 2) 是永健好, 渡辺英義, 小林 淳: PC鋼より線の付着実験, 大成建設技術研究所報, 第27号, pp.111-116, 1994
- 3) 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

本研究は、科学研究費奨励(A)、課題番号・12750511を元に行われた。