

# 論文 グラウト-PC 鋼材の付着強度試験方法に関する検討

細居 清剛\*<sup>1</sup>・市来 隆志\*<sup>2</sup>・中塚 信\*<sup>3</sup>

要旨：本研究では従来のグラウトと PC 鋼材との付着強度試験方法を検討した。その結果，従来の試験方法では，いくつかの問題点があることがわかった。それらの問題点を解決するために新たな試験方法を提案して付着強度試験を行い，試験方法の妥当性を検証した。また，試験時の PC 鋼より線の緊張力，より線の回転拘束の有無およびグラウト強度等が試験結果に与える影響を評価した。

キーワード：グラウト，PC 鋼材，付着強度，試験方法

## 1. はじめに

部材変形の把握は，これからの PC 構造の性能設計に不可欠であると考えられる。しかし，現状では PC 部材の変形を明確に把握することは出来ておらず，したがって設計限界変形時あるいは保証限界変形時における部材耐力を評価することもできていない。その大きな理由の一つに，PC 部材の変形に大きく影響して設計上の不可欠な基礎知見である，PC 鋼材とグラウトとの付着特性がほとんどわかっていないことが挙げられる。

本研究では，PC 部材の性能設計に必要な PC 鋼より線の付着強度を測定するための試験方法を提案し，その妥当性を検証した。また，試験時の PC 鋼より線の緊張力，回転等が，試験結果に与える影響を評価した。

## 2. 従来の付着強度試験

### 2.1 試験方法

従来のグラウトと PC 鋼材との付着強度試験の概要図を図 - 1 に示す。

この試験方法を用いて PC 鋼より線の付着強度試験を行った場合，硬化したグラウトに形成されたより線の溝に沿って，PC 鋼より線は回転

しながらグラウトから抜け出てくることが予想される。しかし，一般には引張側端部では PC 鋼材は拘束された状態にあるため，抜け出し時により線全体は一樣に回転しない。したがって，より線のよりが戻ろうとし，さらに撚りピッチが伸びようとする。それによって，より線の外層線と硬化したグラウトに形成された溝との間に側圧力が発生する。この側圧力が引抜き荷重に影響を与えると考えられる。一方，このより線の戻り量は余長部（図 - 1 参照）に分散されるため，余長部の長さが長いほど，よりが戻ろうとする力は弱まる。すなわち，この方法では，

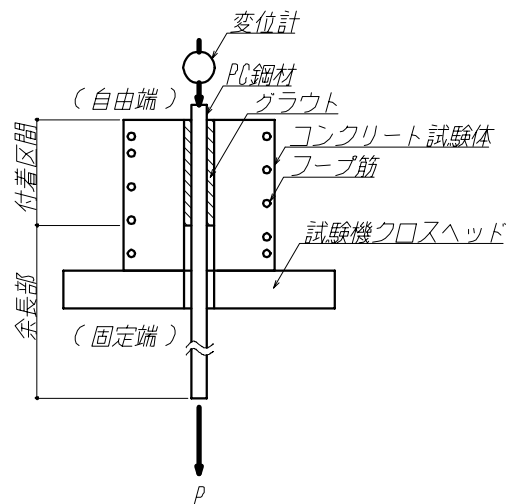


図 - 1 試験方法

\*1 神鋼鋼線工業（株） 鋼線事業部 PC 加工技術部 （正会員）

\*2 住友電気工業（株） 特殊線事業部 技術開発部

\*3 大阪大学大学院助教授 工学研究科 建築工学専攻 工博 （正会員）

引抜き荷重は余長部の長さに影響を受けることが予想される。そこで、本研究では余長部の長さを要因とした付着強度試験を行った。

## 2.2 試験結果

試験は、余長部の長さを 45mm および 735mm の 2 水準として行った。付着応力 ( ) と自由端 (図 - 1 参照) 拔出し量 (S) の関係を図 - 2 に、自由端側のより線回転角と自由端拔出し量の関係を図 - 3 に示す。図 - 2 によれば、 $\sigma$ -S 関係はごく初期の段階で一度ピークを示し、またその後は漸増して再度ピークを示す曲線となった。表 - 1 に、付着強度についての結果を示す。ここで平均付着強度は、最初の付着応力のピーク値とした。また最大平均付着強度は付着

応力の最大値とした。余長部長さ 45mm では、試験後も残存するほどの「撚りわらい」(撚りが変形し開いた状態)が発生した。また、平均付着強度、最大平均付着強度共に、余長部長さ 45mm の方が大きくなった。これは前述したように、余長部の短い試験体の方が、より線のねじりによるより線とグラウト材の接触面での側圧が強いためであると考えられる。いずれの試験体も、自由端の回転は、ほぼ撚りピッチを基にした計算どおりの回転を示した。以上の結果より、余長部の長さが、測定された付着強度に影響を与えることが確認できた。

表 - 1 試験結果一覧

試験体	余長部長さ mm	平均付着強度 MPa	最大平均付着強度 MPa
L045	45	2.18	5.50
L735	735	1.83	3.82

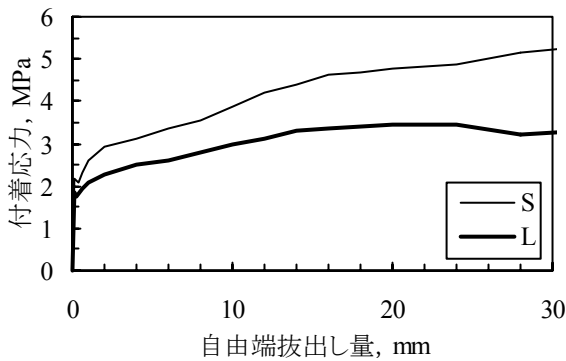


図 - 2 付着応力と自由端拔出し量の関係

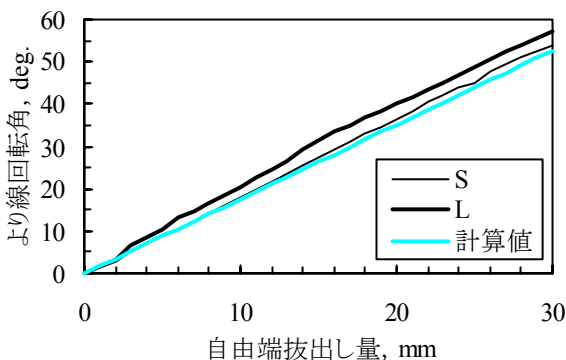


図 - 3 回転角と自由端拔出し量の関係

## 3. 提案試験方法

### 3.1 試験方法

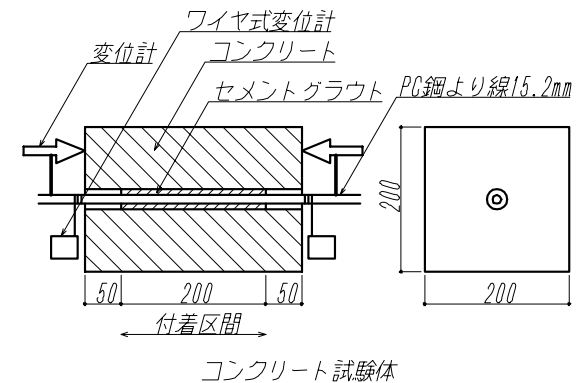
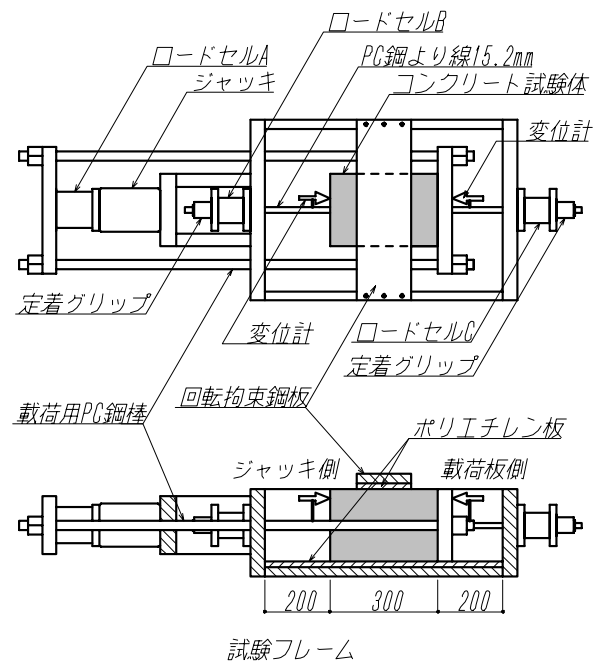


図 - 4 提案試験方法

上述したように、従来の試験方法では余長部の長さの違いによって試験結果が異なり、また実際の部材では、より線が容易に回転しながら抜け出すということは予想されないため、上述したように、余長部の長さの違いによって試験結果が異なる従来の試験方法には問題があると考えられる。

本研究では図 - 4 に示す試験装置を用いた試験方法を提案する。試験の手順を以下に示す。

- 1) あらかじめシースを配置したコンクリート試験体に PC 鋼材を挿入する
- 2) PC 鋼材を試験フレームに緊張・定着する。
- 3) シースにグラウトを注入する。
- 4) グラウト硬化後、ジャッキを用いてコンクリート試験体を移動させる。
- 5) ロードセルおよび変位計により、抜け出し荷重と抜け出し量を測定する。

本試験方法では、PC 鋼材を緊張することによって実際の構造物に発生する現象に近似した状態を作り出すことを目的としている。すなわち、PC 鋼材が緊張されていること、また、そのことによって PC 鋼材の両端の回転が拘束されていることなどである。

### 3.2 試験概要

試験方法の妥当性を検証するために試験を行った。試験体一覧を表 - 2 に示す。試験には、PC 鋼より線 15.2mm を使用し、試験体数は各試験体シリーズで 3 体とした。グラウトには早強セメントおよびノンブリージング型の混和剤を用い、W/C は 45% とした。試験条件の要因は、

表 - 2 試験体一覧

試験体シリーズ	グラウト強度, MPa	初期緊張力*	回転拘束
30-00R	30	0.0Py	片端拘束
30-02F	30	0.2Py	両端拘束
30-07F	30	0.7Py	両端拘束
15-07F	15	0.7Py	両端拘束
60-07F	60	0.7Py	両端拘束
80-07F	80	0.7Py	両端拘束

\* Py : 規格降伏荷重

グラウト強度、初期緊張力および鋼材の回転拘束の有無とした。より線の抜け出し量は、試験体端面より 50mm 離れた位置で、治具を介してより線に固定した変位計を用いて、試験体端面との相対変位として測定した。また、両端拘束の試験体は両端の定着グリップの回転を拘束し、片端拘束の試験体は、支圧板側の定着グリップの回転を拘束した。

### 3.3 試験結果および考察

#### (1) 初期緊張力の影響

初期緊張力別にまとめた付着応力とより線抜け出し量の関係の一例を図 - 5 に示す。より線抜け出し量は、コンクリート試験体端部に取り付けられた 2 本の変位計の平均値とした。

通常、鉄筋等の付着強度試験の場合、付着応力は最初のピーク後、応力が低下するのに対して、PC 鋼より線の場合は、最初のピークを越えて一旦は応力が低下するが、その後再び増加し、最初のピークを越えて応力が増加していく。

初期緊張力別にまとめた付着応力とより線回転角の関係の一例を図 - 6 に示す。より線回転角は、コンクリート試験体両端部近傍のより線にワイヤ式変位計のワイヤを巻き付け、その伸び量とより線の周長より算出した。

両端が拘束された試験体の場合、コンクリート試験体の両端近傍のより線の回転角はほぼ等しく、理論回転角よりも小さな値となった。これは、より線の両端が拘束されているために、より線の回転（ねじれ）が抑制されたためである。

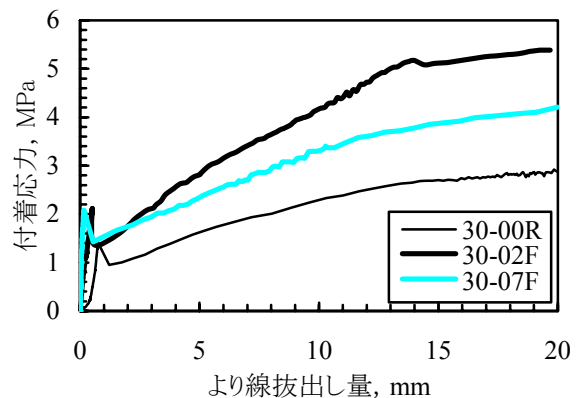


図 - 5 初期緊張力別にまとめた付着応力とより線抜け出し量

と考えられる。

一方、片端拘束の場合は、拘束された側のより線の回転角は理論回転角よりも小さく、拘束されていない側の回転角は、ほぼ理論回転角どおりであった。これは、この試験条件で行った試験が、従来の付着強度試験と同じ状況であることを示している。

表 - 3 および図 - 7 に、試験結果一覧を示す。表 - 3 中で、 $\tau_0$  は最初の付着応力のピーク値、

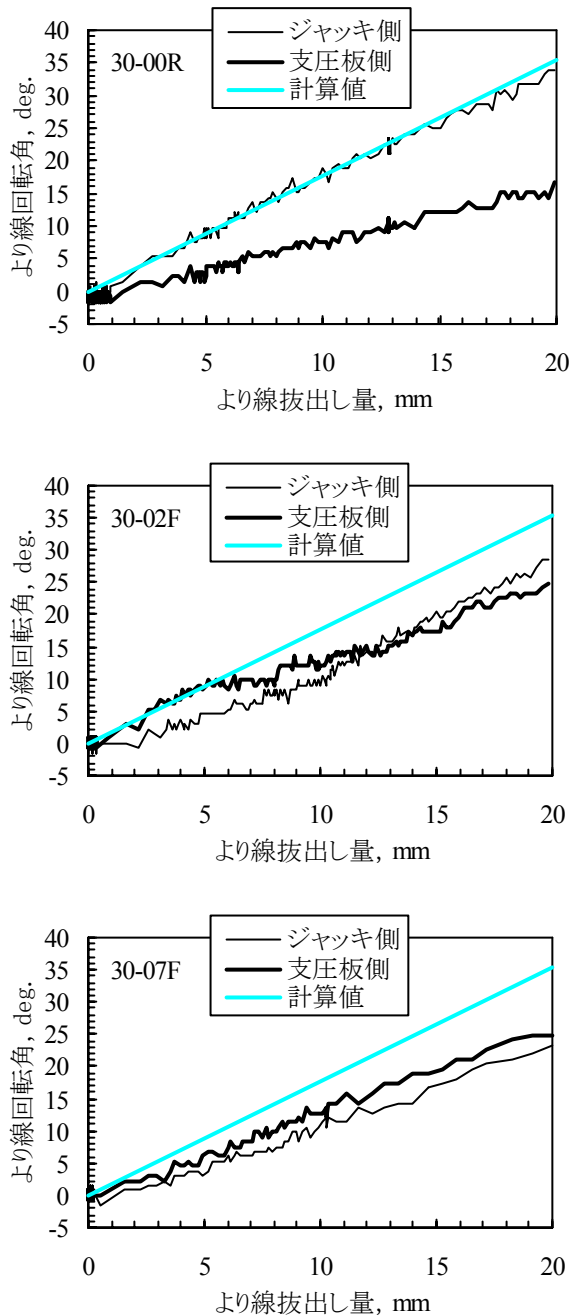


図 - 6 初期緊張力別にまとめたより線回転角とより線拔出量

$\tau_5, \tau_{10}, \tau_{15}, \tau_{20}$  は、それぞれ拔出量が 5, 10, 15, 20mm での付着応力である。

これらの結果より、全ての応力レベルで概ね 30-00R, 30-07F, 30-02F の順で付着強度が大きくなっていることがわかる。

30-00R で最も付着強度が小さいのは、片端が自由に回転するので、よりの戻りによる抵抗が少ないためであると考えられる。これは、従来の付着強度試験方法に対応するため、従来の方法では実際よりも小さな付着強度となることが予想される。

30-07F の方が 30-02F よりも小さな付着強度を示した理由の一つとして、次のようなことが考えられる

表 - 3 試験結果一覧

試験体	付着応力, MPa				
	0	5	10	15	20
30-00R -1	1.6	1.8	2.4	2.8	3.3
-2	1.4	1.6	2.4	2.7	2.9
-3	1.5	2.2	2.9	3.5	3.8
平均	1.5	1.9	2.6	3.0	3.3
30-02F -1	2.7	3.1	4.3	5.1	5.4
-2	2.1	2.8	4.2	5.1	5.4
-3	2.1	3.1	4.6	5.2	5.4
平均	2.3	3.0	4.4	5.1	5.4
30-07F -1	2.1	2.4	3.3	3.9	4.2
-2	1.8	2.5	3.4	4.1	4.4
-3	1.9	2.4	3.4	4.0	4.3
平均	1.9	2.4	3.4	4.0	4.3

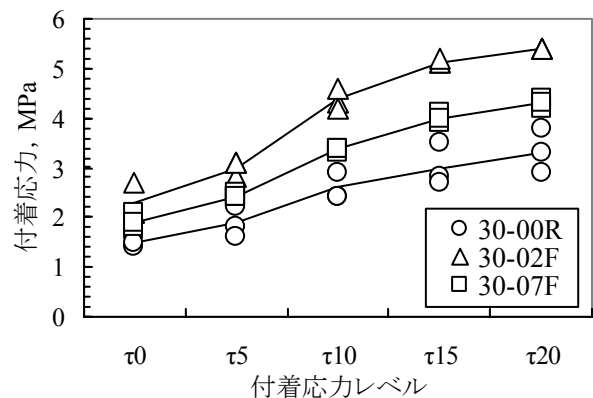


図 - 7 試験結果一覧

一般に、コンクリート試験体の移動は、グラウト内に形成されているより線の溝形状に沿って、コンクリート試験体の両端部にあるより線を回転させようとする。しかし、より線の両端は拘束されており、より線は容易に回転しないため、異形鉄筋に近い抜け出し性状を示す。この傾向は、撚りピッチが長いほど小さくすると予想される。すなわち、初期緊張力が大きくて撚りピッチが伸び、形状が平行に近づいたため、30-07Fの付着強度が低くなったと推測される。

(2) グラウト強度の影響

グラウト強度別にまとめた付着応力とより線拔出し量の関係の一例を図-8に示す。なお、30-07Fの試験結果は、前述した初期緊張力の影響を調査するために行った試験のデータを用いた。

全体の傾向として、80-07Fの試験体が他の試験体と異なる S 関係を示している。この理由として、次の2点が推測される。第1点は、80MPa級グラウトの材料・配合が、その他のグラウトと異なる点。第2点は、付着強度が大きいため、より線が試験体内部で引張応力と側応力との複合応力によって降伏したと推測される。すなわち、図-8において、初期ピーク以降の応力低下が小さく、大きな拔出し変形を示しているのは、降伏に起因する現象と推測される。

15-07F、30-07Fおよび60-07Fの曲線は、概ねグラウト強度に応じた形状になり、付着応力の

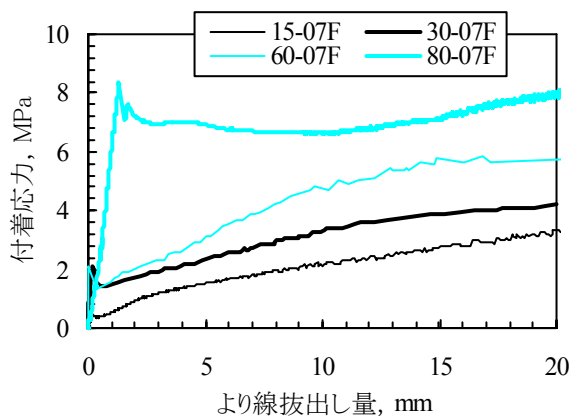


図-8 グラウト強度別にまとめた付着応力とより線拔出し量の関係

最初のピークを迎えた後も、付着応力は増加し続けた。

表-4および図-9に、試験結果一覧を示す。

一般に、付着強度で重要になるのは、より線拔出し時の付着強度、すなわち  $\tau_0$  であるので、 $\tau_0$ とグラウト強度の関係を図-10に示す。図-10によれば、グラウト強度と  $\tau_0$ は、概ね直線関係にあることがわかる。

表-4 試験結果一覧

試験体	付着応力, MPa				
	0	5	10	15	20
15-07F -1	0.3	1.2	2.4	3.7	-
-2	0.5	0.9	1.6	1.8	2.1
-3	0.6	1.4	2.2	2.6	3.3
平均	0.5	1.2	2.0	2.7	2.7
30-07F -1	2.1	2.4	3.3	3.9	4.2
-2	1.8	2.5	3.4	4.1	4.4
-3	1.9	2.4	3.4	4.0	4.3
平均	1.9	2.4	3.4	4.0	4.3
60-07F -1	2.4	4.2	5.2	6.3	5.9
-2	2.1	2.9	4.8	5.7	5.8
-3	1.3	2.9	4.6	4.9	5.1
平均	1.9	3.4	4.9	5.6	5.6
80-07F -1	6.0	7.6	8.3	9.4	10.8
-2	8.4	6.9	6.7	7.1	7.9
-3	8.1	6.5	6.6	7.5	8.3
平均	7.5	7.0	7.2	8.0	9.0

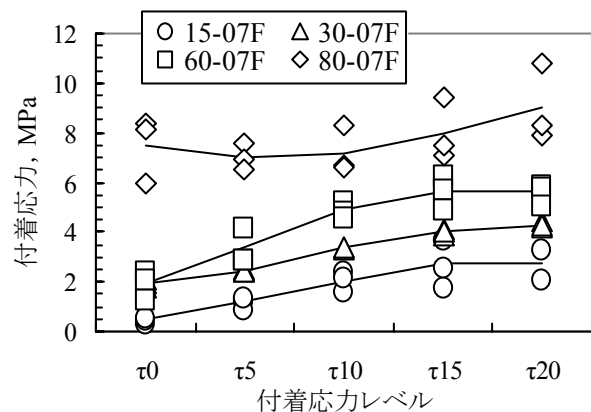


図-9 試験結果一覧

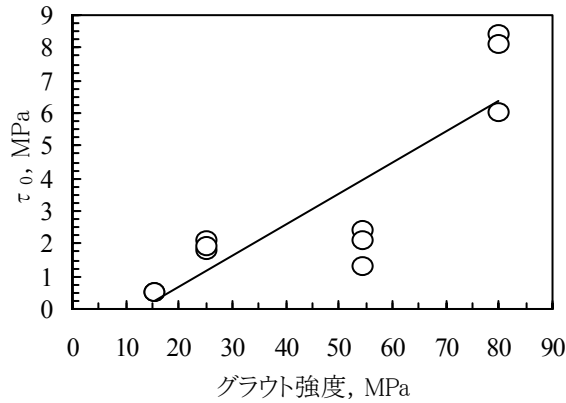


図 - 10 τ<sub>0</sub> とグラウト強度の関係

一般に、コンクリート中にある鉄筋の付着抵抗の発生機構を分類すると、(a)コンクリート中のセメントペースト硬化体と鋼材との化学的粘着、(b)鋼材表面での摩擦、および(c)機械的抵抗の3つの作用がある<sup>1)</sup>。普通丸鋼の場合は、低応力レベルで鉄筋とコンクリートの間にすべりが発生すると、上記(a)の抵抗作用はなくなり、その後は(b)の摩擦作用で抵抗する。また、表面形状が平滑であるため、(c)の機械的抵抗は期待できない。一方、異形鉄筋の場合は、(c)の機械的抵抗が期待できるため、丸鋼に比べて付着強度は著しく増大する。この機械的抵抗は、コンクリートの強度に依存するため、異形鉄筋の場合は普通丸鋼に比べて、コンクリート強度が付着強度に与える影響は大きいといえる。すなわち、今回の試験結果でグラウト強度とτ<sub>0</sub>がほぼ直線関係にあるということは、今回の試験におけるPC鋼より線の付着機構が、異形鉄筋に近いということを示している。これは、試験中により線の回転が抑えられ、実際の現象により近い状態で試験が行われたことを示している。

#### 4. 結論

本研究によって、以下の結論が得られた。

- (1) PC鋼より線に対する従来の付着強度試験方法は、試験時に生じるより線の回転についての評価が不明瞭なため、(a)付着特性を実際より過小評価したり、(b)余長部の長さの違いによって異なる試験結果を与える。
- (2) 試験時におけるPC鋼より線の回転を拘束して、実際の部材の状態を反映した提案試験法による試験から、次のような各主要因の影響がわかった。
  - (a) PC鋼より線の初期緊張力によって付着強度は変化する。
  - (b) PC鋼より線の付着強度はグラウト強度が大きいほど大きい。

#### 5. おわりに

本研究では、付着強度に及ぼす諸要因の影響を調査した。今後の課題として、さらに試験方法を改良しつつ試験数を増やす必要がある。特に鋼材降伏後の試験データを収集し、これらを含めたPC鋼材とグラウト間のτ<sub>0</sub>-s関係のモデル化を行うことも必要である。また、得られた結果を用いて、部材レベルでの数値シミュレーションおよび実際の試験を行い、更なる検証を行う予定である。

なお本研究は、「グラウト-PC鋼材の付着特性に関する研究会」(研究会構成:大阪大学大学院 中塚助教授, オリエンタル建設(株), ドーピー建設工業(株), (株)ピー・エス, 高周波熱錬(株), 神鋼鋼線工業(株), 住友電気工業(株))の活動の一環として実施したものである。

#### 参考文献

- 1) 小林和夫: コンクリート構造学, 森北出版, 1994