

# 論文 異形鋼棒とグラウトとの付着特性に関する実験的研究

巽 英明<sup>\*1</sup>・田坂 誠一<sup>\*2</sup>・寒川 勝彦<sup>\*3</sup>・中塚 佑<sup>\*4</sup>

**要旨:** コンクリート中のシースにグラウトを介して固着された異形鋼棒 (D32) の引抜き実験を行い, 鋼棒とグラウトとの付着性状を検討した。実験は, (1)鋼棒弾性単調引抜き, (2)鋼棒弾塑性単調引抜き, (3)鋼棒弾性交番繰返し引抜き, の3種類について行い, 付着領域における付着応力度 ( ) とすべり量 (S) との関係性を求めた。実験後の観察により, (1)と(3)のほとんどの試験体において部分的なグラウト - シース間の付着切れが生じ, 鋼棒 - グラウト間の付着破壊とは異なる破壊モードの発生が認められた。

**キーワード:** 異形鋼棒, グラウト, シース, 付着応力度 - すべり関係, 付着破壊モード

## 1. はじめに

異形鋼棒とコンクリート(あるいはグラウト)との付着特性の解明は, 鉄筋コンクリート部材やプレストレストコンクリート(PC)部材あるいは梁 - 柱圧着接合部の設計などにおいて重要であり, これまで多くの研究の蓄積がある<sup>1), 2), 3)</sup>。また, プレキャスト部材の接合に適用されるグラウト充填式継手への応用に関する研究も見られる<sup>4), 5), 6)</sup>。しかしながら, 特に交番繰返し荷重を受ける場合の付着特性や, 鋼棒の弾塑性域における付着性状などについては未だ未解明の部分が多く, 更なる実験データの蓄積が必要と考えられる。

本研究では, ポストテンション工法によるプレストレストコンクリート部材や梁 - 柱圧着接合法などに一般的に用いられる, シース内にグラウトを介して固着された異形鋼棒(D32)の付着性状を調べるため, 試験体を製作し引抜き試験を行った結果を報告する。実験は, (1)鋼棒弾性単調引抜き, (2)鋼棒弾塑性単調引抜き, (3)鋼棒弾性交番繰返し引抜き, の3種類である。ここでは付着の基本的な性状を検討するため, 鋼棒にはプレストレスは導入していない。本実

験の主たる目的は以下のものである。

- 1) 生じ得る種々の付着破壊モードのうち, 鋼棒 - グラウト間の付着破壊とは異なるグラウト - シース間での付着破壊に着目し, その付着応力度 ( ) とすべり量 (S) との関係 ( - S 特性) に及ぼす影響を検討する。
- 2) 鋼棒の塑性化に伴う付着特性の変化の状況を調べる。
- 3) 交番繰返し載荷において, 繰返しに伴う付着応力度の変動状況を調べる。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

上記3種類の実験(1), (2), (3)を, 以後実験1, 2, 3と呼ぶ。各実験に用いた試験体を図-1に示す。試験体は各実験について各々3体製作した。図には示していないが, 各試験体には鋼棒引抜き時のコンクリートの割裂ひび割れ発生を避けるため, 直径240mm, ピッチ40mmのスパイラル筋(SD295, D10@40)を埋め込んでいる。また, コンクリートはすべて横打ちとし, グラウト(膨張材を添加したセメントペースト)は鉛直方向に向けた試験体シー

\*1 明石工業高等専門学校 専攻科学生 (正会員)

\*2 明石工業高等専門学校教授 建築学科 工博 (正会員)

\*3 (株)ピーエス三菱 大阪支店 PC建築事業部 (正会員)

\*4 大阪大学助教授 建築工学科 工博 (正会員)

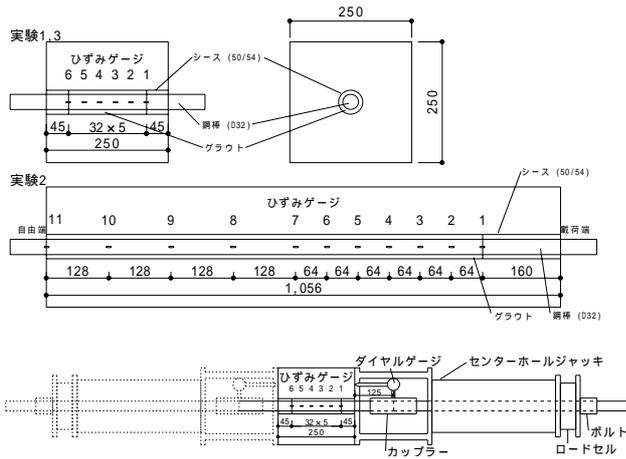


図 - 1 試験体及び荷重方法概要

ス内に上方から流し込む方法で注入した。各鋼棒には軸方向に沿って 5mm×5mm(幅×深さ)の溝を両側に設け、付着領域内に所定の間隔でひずみゲージ(図中に番号で示したもの)を貼付した。

(1) 実験 1, 3

一辺 250mm の直方体コンクリートにシースを埋め込み、付着長さ 5D (D は鋼棒の呼び名の数値) 及びその両側に非付着領域 (45mm) を確保した。ひずみゲージは付着領域内に 1D 間隔で貼付した

(2) 実験 2

断面 250×250mm、長さ 1056mm のコンクリートにシースを埋め込み、付着長さ 28D、荷重端側に非付着領域 160mm を確保した。

2.2 使用材料

実験に用いたグラウト及び異形鋼棒(D32)の特性を各々図 - 2 と図 - 3 に示す。試験当日のグラウト強度は 29.4 N/mm<sup>2</sup> である。グラウト材は、普通ポルトランドセメントを水セメント比 45% で調合したノンブリーディングの膨張タイプである(膨張率は測定していない)。また、異形鋼棒とコンクリートの特性をまとめて表 - 1 に示す。

鋼棒は、ピッチ 0.5D、高さ 2.4mm、底幅 8.1mm、頂幅 3.3mm の節を有している。シースは薄鋼板製で内径 50mm、外径 54mm の円形断面であり、表面にピッチ 30mm で高さ 2mm、底幅 7mm の

三角形の螺旋状突起を有している。シースの断面積に対する鋼棒の断面積の割合は 40.4% である。

2.3 実験方法

各実験とも試験体は床面と平行に設置し、床面と試験体との間には鋼管を並べ、ローラーを形成して摩擦抵抗が生じないようにした。荷重時には荷重端側で異形鋼棒とテンションバーをカップラーで接合し、試験体表面に接する荷重板とラムチェアを介してセンターホールジャッキにてテンションバーに引抜き力(実験 3 では交番引抜き力)を与え、異形鋼棒に生じるひずみを計測した。また、自由端側と荷重端側では試験体コンクリート表面と鋼棒との相対変位量(すべり量)をダイヤルゲージを用いて測定した。付着領域内のすべり量は、ひずみ分布曲線を区分的線形としてひずみデータより求め、それを積分し、自由端側のすべり量を加えて算定した。実験 3 では、荷重方向の反転毎に前回の荷重端側すべり位置を起点として自由端側のすべり量とし、これに付着領域内のすべり量を加えて求めた。実験 3 の荷重方法の概要を図 - 1 に示す。実験 1 と 2 では片側のジャッキのみを用いて同様の方法で荷重した。

実験 1 では自由端側の鋼棒に十分なすべり量が生じるまで、実験 2 では鋼棒に生じる最大ひずみ度が 2% 程度になるまで荷重した。実験 3 では繰返しの基準を自由端側のすべり量(S<sub>0</sub>)で与え、S<sub>0</sub>=±0.5mm、±2mm、±5mm を限界値として各々 5 回の正負交番繰返し荷重を行った。

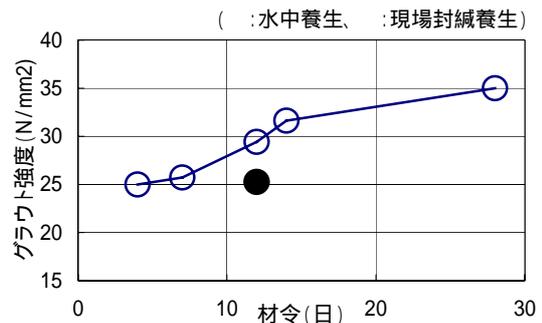


図 - 2 グラウトの強度特性

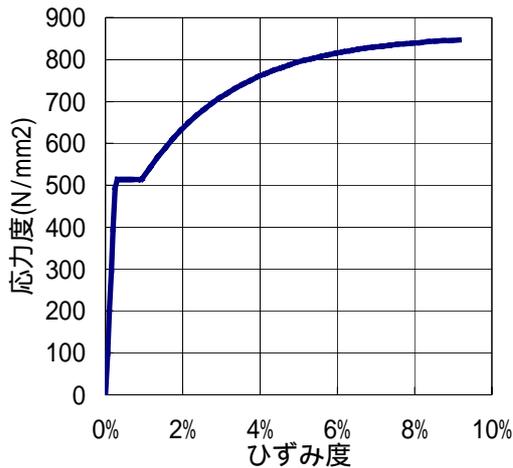


図 - 3 異形鋼棒の応力 - ひずみ関係

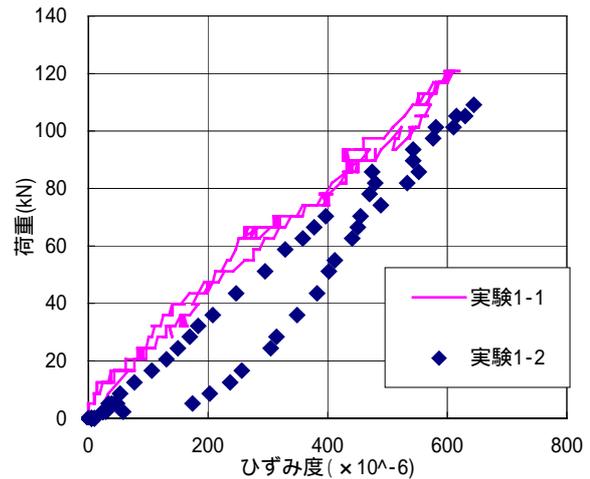


図 - 4 荷重 - ひずみ度関係 (ゲージ No.3)

表 - 1 鋼棒とコンクリートの特性

異形鋼棒	
呼び名	D32
断面積	794mm <sup>2</sup>
周長	100mm
降伏応力度	514N/mm <sup>2</sup>
弾性係数	1.98 × 10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup>
ひずみ硬化開始点	0.94%
引張強度	850N/mm <sup>2</sup>
コンクリート	
4週強度	50.9N/mm <sup>2</sup>

### 3. 実験結果

#### 3.1 実験 1

3体の試験体に対する実験をここでは実験 1-1, 1-2, 1-3 と呼ぶ。実験 1-1 と 1-2 で得られた荷重 - ひずみ度 (ゲージ No.3) 関係のグラフを図 - 4 に示す。

図に見られるように、除荷時の経路がかなり相違している。これは試験体内部における鋼棒 - グラウト - シース系の付着破壊状況の相違に起因するものと考えられる。すなわち、実験後に鋼棒を引抜いてグラウトの鋼棒への付着状況を調べたところ、写真 - 1 のような違いが見られた。(実験 1-3 は 1-2 とほぼ同じ状況であった。)写真 - 1 によれば、実験 1-1 のグラウトは引抜き実験時に鋼棒との付着破壊を起こして脱落しているが、実験 1-2 では部分的にグラウト

- シース間での付着切れが先行し、当該部分(付着領域の荷端側約 2/3 の部分)では鋼棒とグラウトとの付着は健全な状態である。このため、後者では除荷時の鋼棒のひずみ低下に遅れが生じたものと考えられる。付着破壊にこのような相違が生じた原因は明らかではない。

実験 1-1 と 1-2 の  $\sigma - \delta$  関係を各々図 - 5 (1) と(2)に示す。図中の曲線は実験データに滑らかな曲線を当てはめて描いたものである。なお、 $\sigma_{i-j}$  とはゲージ No.  $i$  と  $j$  ( $i=1$  から  $5$  まで、 $j=i+1$ ) の間の付着領域での平均的な付着応力度を表している ( $\sigma_{i-j}$  も同様)。また、 $\sigma_{av}$  とは引抜き力を全付着面積で除したもので、付着領域全体の平均的な付着応力度を表している。

同図に見られるように、 $\sigma_{4-5} - \delta_{4-5}$  関係にかなりの相違が認められる。この領域は鋼棒 - グ



写真 - 1 実験 1-1 (上) と実験 1-2 (下) のグラウト付着状況

ラウト間の付着破壊とグラウト - シース間の付着切れが共存する領域 (写真 - 1) であり, 後者の付着破壊モードが影響しているものと考えられる。すなわち, グラウト - シース間の付着破壊が先行する部分では, グラウトがほぼ健全な状態でシース間とのすべりが生じるため, グラウト破壊による付着応力度の低下のような現象が顕著には生じないと考えられる。

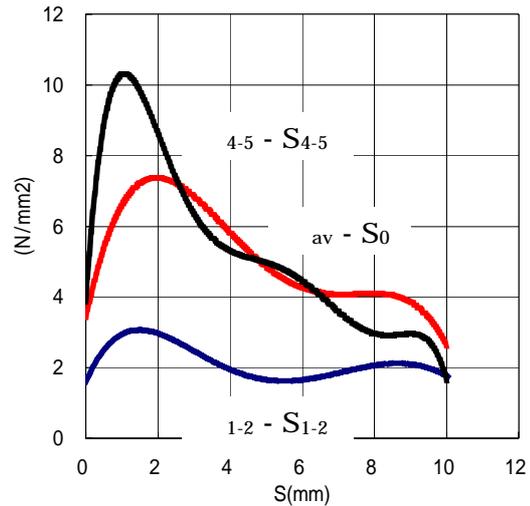
### 3.2 実験 2

本実験では比較的データの良好な一体の結果について報告する。

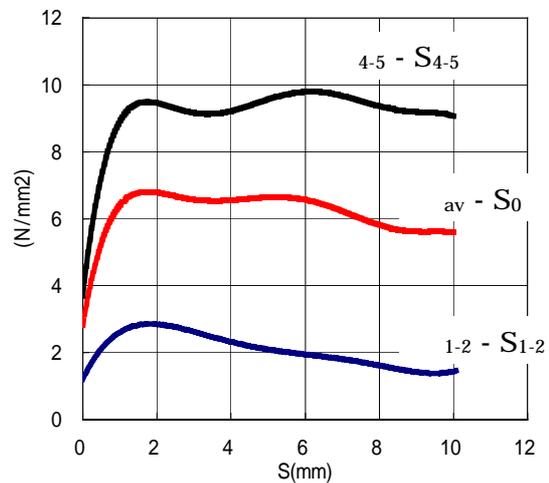
図 - 6 はいくつかの荷重(引抜き力)段階(P1 から Pmax まで)における付着領域各部のひずみ度の状況を描いたものである。横軸はひずみ測定位置の載荷端側からの距離を表しており, ゲージ No.1 の位置が原点である。一部ゲージの不具合によるデータの欠落があるが, 同図によれば, 最大荷重時において, 載荷端からおよそ 300mm の位置まで鋼棒の塑性化が進展していることがわかる。

図 - 7 は図 - 6 の縦軸を鋼棒応力度に変えて描いたものである。応力度は荷重を鋼棒の公称断面積で除して求めた(溝による欠損は考慮していない)。載荷端側から自由端側へと応力度は単調に減少するが, やや波打つような変化の様子がみられる。また, 降伏応力度を超える領域では応力度の勾配が低下する様子も認められる。

図 - 8 は隣接するひずみゲージ間の付着領域を部分付着領域とし, その中央位置を荷重端からの距離として付着応力度の変化の様子を描いたものである。一部 P6 や Pmax のデータが欠落しているが, P4 や P5 の荷重レベルでは, 鋼棒が塑性域に達すると弾性時最大付着応力度の 1/3 程度まで付着応力度が低下することがわかる。このような現象は, 鋼棒 - グラウト間の付着破壊時にも見られること, 本実験では実験終了後のグラウトの付着状況を実験 1 のような方法では確認していないこと, などから付着破壊モードの影響については不明であり, 今後



(1) 実験 1-1



(2) 実験 1-2

図 - 5 実験 1 における  $\sigma - S$  関係

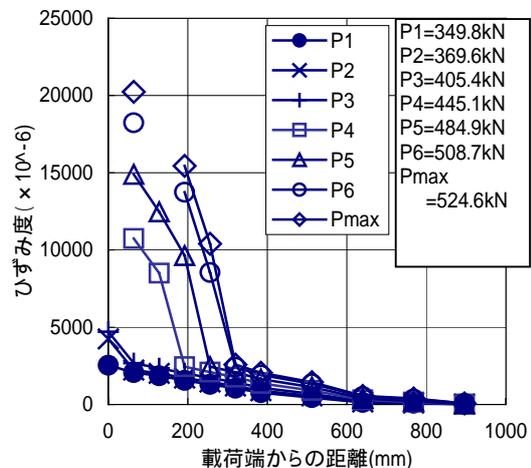


図 - 6 付着領域における鋼棒ひずみ分布

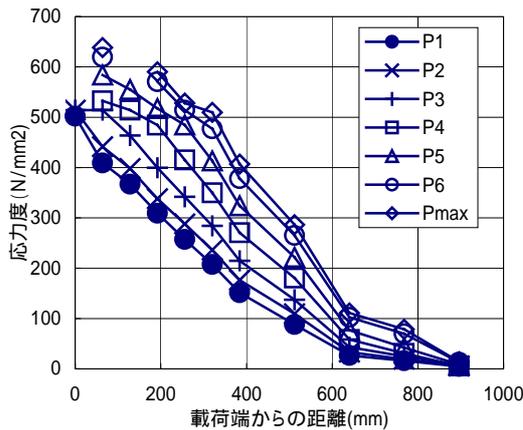


図 - 7 付着領域における鋼棒応力度分布

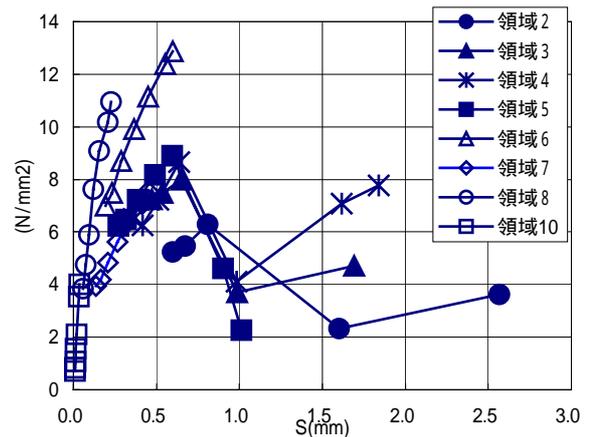


図 - 9 - S 関係

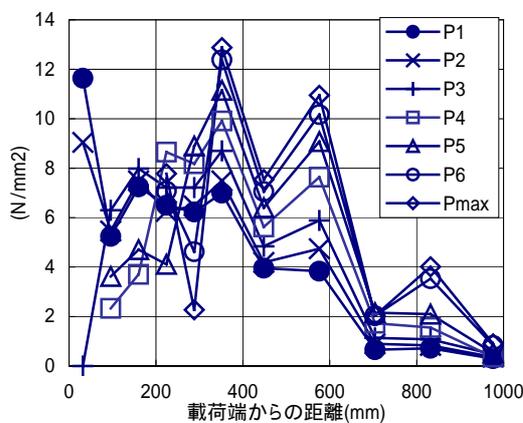


図 - 8 付着領域における付着応力度分布

更なる検討を要する。

図 - 9 は部分付着領域ごとに荷重の増加に伴う  $\sigma - S$  関係を示したものである。ここに、例えば図中の領域 2 とは図 - 1 におけるひずみゲージ No.2 と No.3 の間の領域を表している。図によれば、鋼棒の塑性化はすべり量がおよそ 0.6mm を超える時点で生じている。また、塑性化後にひずみ硬化の影響で再び付着応力度が上昇している領域が見られる。図 - 6 を参照すると、ひずみ硬化に入るあたりのすべり量は 1.6mm 程度であることがわかる。なお、本実験では自由端における変位は認められなかった。

### 3.3 実験 3

実験後のグラウト付着状況を写真 - 2 に示す。いずれの試験体も、付着領域の一部、特に中央部付近でグラウト - シース間での付着切れが生じた様子が見て取れる。以下では、実験 3-2

の結果について報告する。

図 - 10 に、実験で得られた  $\sigma_{2-3} - S_{2-3}$  関係を示す(添字の意味は実験 1 と同様)。この領域はグラウト - シース間で付着破壊が生じた領域である。荷重プログラムでは、各設定  $S_0$  に対して正方向と負方向それぞれ 5 回の繰返しを行っており、第 1 回目の荷重方向を 負の方向とした。ただし、基準  $S_0 = \pm 0.5\text{mm}$  では第 1 回目(負方向)と 5 回目(正、負方向)のデータが欠損している。

同図によれば付着応力度の正側と負側で繰返しに伴う変化の状況が異なることがわかる。すなわち、各設定  $S_0$  における初回の荷重(負側)ではすべり量が増大するにつれて付着応力度が増加する傾向にあるが、正側では逆に減少の傾向にある。このような履歴曲線の非対称の傾向は、鋼棒 - グラウト間で付着破壊が生じる場合にはあまり見られず、グラウト - シース間での付着



写真 - 2 実験 3 のグラウト付着状況

切れの特徴とも考えられる。

また、履歴特性として、いずれの基準  $S_0$  においてもすべり量が零の付近で付着応力度が極めて小さくなる傾向があり、エネルギー吸収能がかなり低下している様子が認められる。

図 - 11 は繰返し毎の付着応力度の最大値 ( $\max$ ) の変化を、正側と負側に分けて表したものである。正側は 1 回目の値を、負側は 2 回目の値を基準としてその比率を示した。これにより、履歴曲線の包絡特性も概略見ることができる。

図によれば、正側は 2 回目を除き、繰返し毎に最大付着応力度は低下しているが、負側では各設定  $S_0$  における初回 (繰返し数が 2, 6 及び 11) の最大付着応力度が  $S_0$  の増加とともに増大していることがわかる。また、各設定  $S_0$  では、

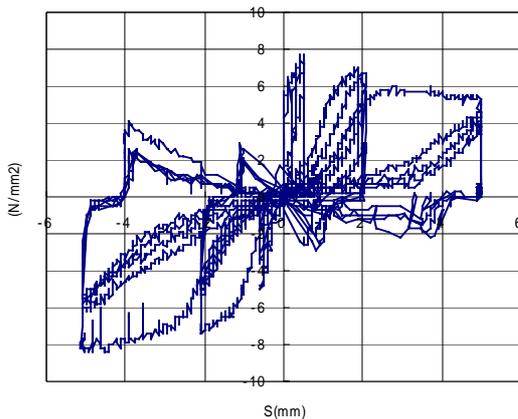


図 - 10 2-3 -  $S_{2-3}$  関係

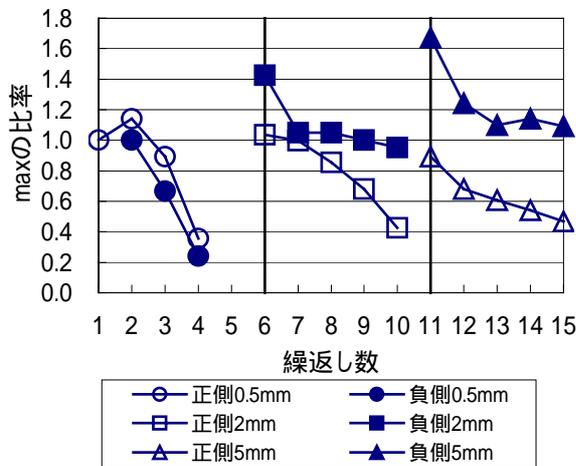


図 - 11 繰返し毎の最大付着応力度の変化

一部を除き繰返し毎に最大付着応力度は低下しており、特に負側では 2 回目 (繰返し数が 7 及び 12) の低下率が大きい。このような現象は鋼棒 - グラウト間の付着破壊でも見られるところであるが、上述のように正側と負側でやや挙動が異なっており、この原因としてグラウト - シース間の付着切れが影響している可能性が考えられる。

#### 4 まとめ

本研究では、異形鋼棒 - グラウト - シース系の付着特性に関する種々の実験を行い、 $-S$  関係の性状を調べた。特にグラウト - シース間の付着破壊が付着領域の一部で生じる場合があり、この影響を検討した。試験体数が少ないこともあり、当該付着破壊モードの特性については不明な部分も多い。今後、更に検討を重ねる予定である。

#### 謝辞

本研究は PC 付着研究会 (構成者: 大阪大学・中塚 侑, オリエンタル建設, 高周波熱錬, 神鋼鋼線工業, 住友電工スチールワイヤー, ドーピー建設工業, ピーエス三菱) の援助を受けて行ったものである。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 森田 司郎, 角 徹三: 繰返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第 229 号, pp.15-24, 1975.3
- 2) Shima, H., Chou, L.L. and Okamura, H.: Bond Characteristics in Post-Yield Range of Deformed Bars, Concrete Library of JSCE, No.10, 1987.12
- 3) 岡村 甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, pp.160-182, 1991
- 4) 林 芳尚, 清水良平, 中塚 侑, 鈴木計夫: 鋼管スリーブを用いたグラウト充填式継手における鉄筋の付着応力度 - すべり特性, 日本建築学会論文報告集, 第 462 号, pp.131-139, 1994.8
- 5) 林 芳尚, 中塚 侑, 見分一郎, 鈴木計夫: 鋼管スリーブを用いたグラウト充填式鉄筋継手の繰返し荷重下における基礎的性能, 日本建築学会構造系論文集, 第 496 号, pp.91-98, 1997.6
- 6) 林 芳尚, 中塚 侑, 鈴木計夫: グラウト充てん式鉄筋継手に関する研究の動向, コンクリート工学, Vol.34, No.4, 1996.4