

# 論文 繰返し荷重下における鉄筋コンクリートの付着性状に関する研究

麻生 高行<sup>\*1</sup>・金久保 利之<sup>\*2</sup>

**要旨：**繰返し荷重下における付着性状の把握を目的とし、コンクリート強度および鉄筋径を実験要因とし繰返し両引試験および片引試験を行った。実験の結果を受けて、繰返し载荷によるすべり量の増加および付着応力の低下に着目し、既往の付着応力-すべり量関係の履歴モデルに修正を加えた。さらに、修正した履歴モデルを用いて両引試験を対象とした数値解析を行った。解析結果は繰返し载荷によるすべり量の増加および付着応力の低下に関してよく表現できた。

**キーワード：**両引試験, 片引試験, 付着応力, すべり量, 繰返し载荷, 履歴モデル

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の設計において、コンクリートと鉄筋間の局所付着性状はひび割れ幅の算定や部材変形量の推定の際に重要な因子となる。これまでも単調载荷における付着性状に関する研究<sup>1)</sup>は数多く行われている。実構造物の設計の際には、地震力などに代表されるような繰返し荷重下における付着性状がひび割れ幅の推移や残留変形量、終局変形量および構造物自体の耐久性に与える影響を考慮する必要がある。しかし、繰返し荷重下における付着性状に関する研究はあまり多く行われていない。壹岐ら<sup>2)</sup>は、両引試験や付着長の比較的長い片引試験を行い、繰返し荷重が付着性状に与える影響を検討している。しかし、定量的な検討にまでは至っていない。

そこで、著者らは繰返し载荷による片引試験より、繰返し荷重下における局所付着性状を把握し、付着性状の履歴モデルの構築を行った<sup>3)</sup>。本研究ではさらに、コンクリート強度および鉄筋径といった付着性状に与える影響の大きい因子を実験要因とし、繰返しの片引試験および両引試験を行い、実験結果をもとに履歴モデルに修正を加える。また、修正した履歴モデルを用いて数値解析を行って解析結果と実験結果の比較検討を行い、繰返し荷重下における付着性状の評価への足掛かりとすることを目的とする。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

本研究の試験体では、コンクリートの圧縮強度および鉄筋径を実験要因とした。コンクリートの目標強度は、13.5, 21, 36MPaの3種とした。また、用いた鉄筋は異形鉄筋D10, D13, D16の3種とした。

両引試験の試験体の概要を図-1に、片引試験の試験体の概要を図-2にそれぞれ示す。試験体の断面は両試験体で統一し、鉄筋径 $D$ に対して $16D \times 16D$ の正方形断面とし、断面中央に異形鉄筋を1本配した。両引試験の試験体の全長は $50D$ とし、試験体両端部に付着絶縁区間を $5D$ ずつ設け、付着区間を $40D$ とした。また、鉄筋には図-1に示す箇所に歪ゲージを $5D$ 間隔で表裏に貼付した。歪ゲージは鉄筋の縦節に貼付し、付着性状への影響が小さくなるよう配慮した。両引試験の計測項目は引張荷重および歪ゲージを貼付した箇所の鉄筋の歪である。片引試験の試験体の全長は $7D$ とし、試験体両端部に付着絶縁区間を $1.5D$ ずつ設け、付着区間を $4D$ とした。片引試験の計測項目は引抜荷重および自由端すべり量である。

試験体に用いたコンクリートは普通コンクリートで、その力学特性を表-1に示す。打設は、両試験体とも鉄筋が水平筋となるように試験体側面方向から行った。用

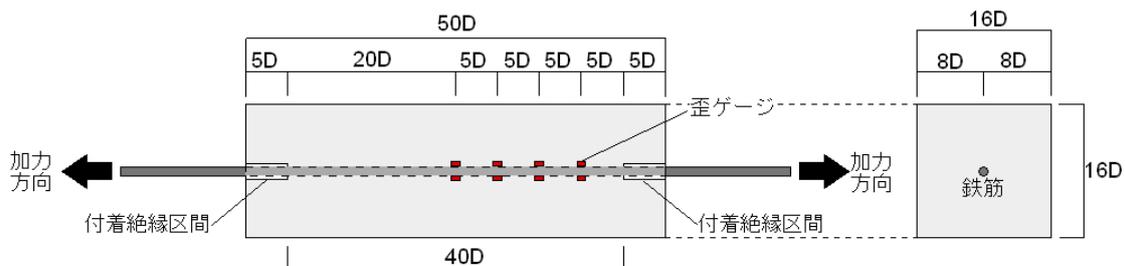


図-1 両引試験試験体概要

\*1 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 (正会員)

\*2 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 准教授 博士(工学) (正会員)

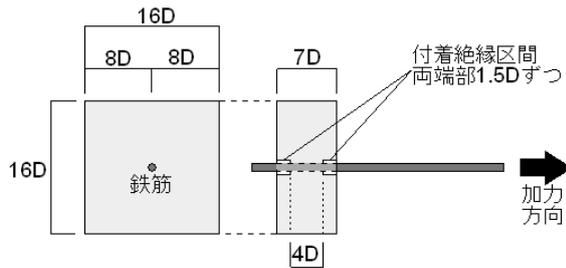


図-2 片引試験試験体概要

表-1 コンクリートの力学特性

目標強度	圧縮強度 (MPa)	割線弾性係数 (GPa)	割裂引張強度 (MPa)
13	21.0	20.8	2.25
21	25.5	22.0	2.55
36	38.7	25.5	3.26

表-2 鉄筋の力学特性

種類	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
D10	378.0	533.2	192.0
D13	368.8	543.0	192.8
D16	441.9	664.5	189.9



図-3 鉄筋形状

いた異形鉄筋の力学特性を表-2 に、形状寸法を図-3 にそれぞれ示す。

試験体の名称を図-4 に示す。両引試験の試験体は各実験要因に対して単調載荷、繰返し載荷ともに1体ずつ、計18体とした。片引試験の試験体は、各実験要因に対して単調載荷試験を3体、繰返し載荷試験を2つの加力履歴に対して1体ずつの計45体とした。

## 2.2 加力履歴

両引き試験の繰返し載荷の加力履歴を図-5 に示す。引張応力の値で制御することとし、0~300MPaを50MPa刻みで5サイクルずつ、計30サイクルとした。

片引試験の繰返し載荷の加力履歴を図-6 に示す。片引試験の繰返し載荷は、両引試験の結果と比較させるため、自由端すべり量/鉄筋径(以下 $S_f/D$ )の値が0.5~2.5%の比較的すべり量が小さい範囲で繰返し載荷を行う。なお、履歴モデル構築におけるすべり量を鉄筋径で基準化して行うために、鉄筋径で除した値で制御するものとした。履歴1(C1)はすべり量制御での繰返しとし、 $S_f/D = 0.5 \sim 2.5\%$ を0.5%刻みで5サイクルずつ、さらに比較のためすべり量の比較的大きい $S_f/D = 5.0 \sim 15.0\%$ を5.0%刻みで2サイクルずつ、計31サイクルとした。また、履

歴2(C2)は付着応力(荷重)制御での繰返しとした。目標のすべり量を履歴1と同様とし、初めて目標のすべり量に達した時の付着応力の値で履歴1と同数の繰返し載荷を行う。ただし、最大付着応力点を超えた場合は履歴1と同様のすべり量制御へ移行することとした。

## 3. 実験結果

### 3.1 両引試験

#### (1) 実験経過

全試験体とも加力終了時までコンクリートにひび割れが発生することはなかった。引張応力-平均歪(以下 $\sigma-\epsilon$ )関係の例を図-7 に示す。平均歪は、歪ゲージによる計測値の平均値とした。同上図が単調載荷試験の、

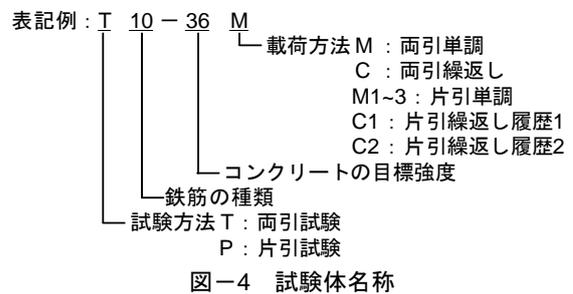


図-4 試験体名称

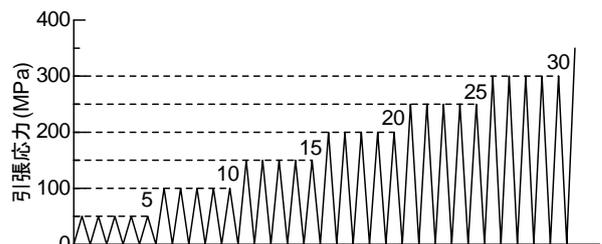


図-5 両引試験加力履歴

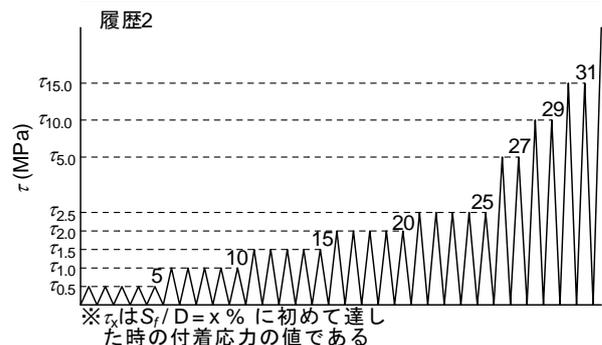
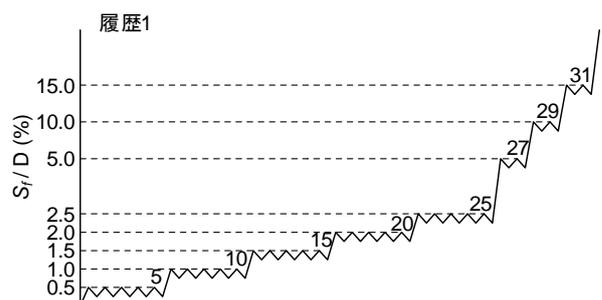


図-6 片引試験加力履歴

下図が繰返し載荷試験の結果である。また、比較のため、繰返し試験の結果には同一試験体の単調載荷試験の結果も示す。同一鉄筋を用いた試験体の結果を比較すると（上左図）、コンクリート強度が高いほど勾配が大きくなる傾向がみられる。しかし、T10-13MとT10-21Mの試験体の差はほとんど見られなかった。これは使用コンクリートの実強度にほとんど差が出なかったことが原因であると考えられる。同様に、同一強度の試験体の結果を比較すると（上右図）、鉄筋径によらず勾配はほぼ一致する。付着区間は鉄筋径に比例するので、この結果より、すべり量が鉄筋径に比例すると考えられる。繰返し載荷試験の結果を見ると、残留歪は荷重の増加に伴い増加する。しかし、繰返し回数が増すに従い残留歪の値はほぼ一定の値となった。これは既往の研究<sup>2)</sup>と一致する結果である。

### (2) 鉄筋歪分布

除荷時および再載荷時の鉄筋歪分布の例として、T10-16Cの第26, 27サイクルの鉄筋歪分布を図-8に示す。同図は300MPaから除荷した時およびその後再び載荷した時のものである。同図より、除荷開始後、歪の分布が下に凸な形状から上に凸な形状へと移行し残留歪を生じていることが確認できる。これは既往の研究<sup>4)</sup>と一致する傾向である。また、除荷後再び載荷を開始すると、最終的な歪分布は除荷前とほぼ同じ分布となる。しかし、その過程においては再載荷時のほうが分布の勾配が緩やかである。次に同一箇所での歪の値の変化を見ると試験体の中央に近いほど歪の値の変化は小さい。また除荷開始時は歪の値の変化は小さく、徐々に変化が大きくなる傾向が見られる。一方、再載荷時は、加力開始時の歪の変化が大きい。

### (3) 付着応力-すべり量関係

鉄筋の歪分布より算出した荷重端および各ゲージ位置での付着応力-すべり量（以下 $\tau-S$ ）関係の例としてT10-36MおよびT10-36Cの $\tau-S$ 関係を図-9に示す。これらは引張応力が350MPaまでの載荷時のものである。また、繰返し載荷試験の図には同位置での単調載荷試験より得られた $\tau-S$ 関係を示す。なお、付着応力は式(1)より求めた。

$$\tau = \frac{E_s A_s}{\phi} \frac{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i}{5D} \quad (1)$$

ここで、 $\tau$ : 付着応力、 $\phi$ : 鉄筋周長、 $A_s$ : 鉄筋断面積、 $E_s$ : 鉄筋弾性係数、 $\varepsilon_i$ :  $i$ 番目の位置の鉄筋歪、 $5D$ : 歪ゲージの貼付間隔である。また、すべり量は試験体中央部でのすべり量を0と仮定し、中央部から各歪ゲージの位置までの鉄筋歪の積分値として算出した。

単調載荷試験の結果を見ると、計測位置によって多少のばらつきが見られるが、既往の研究<sup>例えば5)</sup>を参考に、

位置による $\tau-S$ 関係の違いは大きくないものとして今後の検討を行う。繰返し載荷試験の結果を単調載荷試験の結果と比較すると、本実験の範囲内では繰返しによる付着応力の低下は確認できない。T10-36Cの荷重端における $\tau-S$ 関係を単調載荷の関係と比較すると、同一すべり量が与える付着応力の値は繰返し載荷試験のほうが高いが、両者の差異は繰返し載荷を開始する以前から確認できるため、この差異は試験体の違いによるばらつきの範囲内であると考えられる。

### 3.2 片引試験

単調載荷試験の $\tau-S$ 関係の例を図-10示す。付着応力は付着区間の平均付着応力として算出した。また、すべり量は自由端すべり量に付着区間における鉄筋の伸

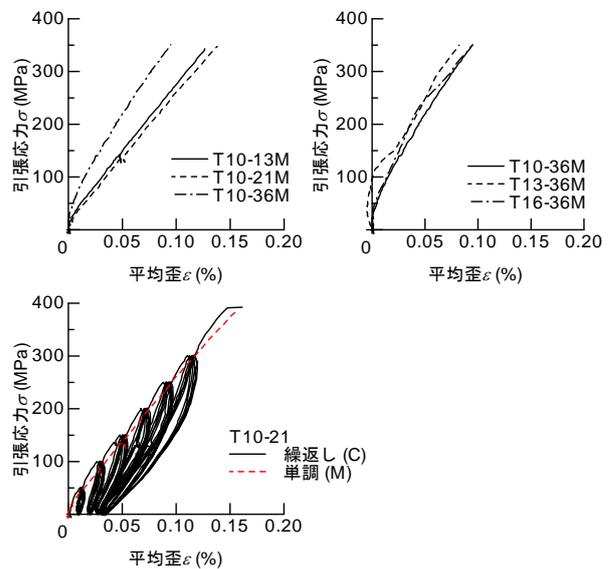


図-7  $\sigma-\varepsilon$ 関係

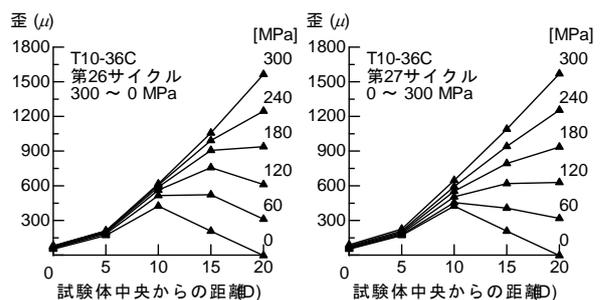


図-8 鉄筋歪分布

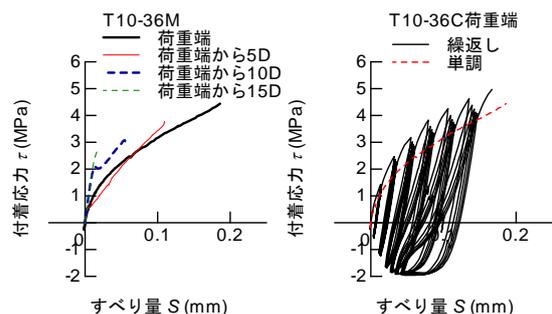


図-9 両引試験の $\tau-S$ 関係

びを加算して算出した荷重端すべり量とした。最大付着応力  $\tau_{max}$  および最大付着応力を与えるすべり量  $S_{max}$  を、それぞれコンクリート強度  $f_c'$  と鉄筋径  $D$  の値で整理した関係を図-11 および図-12 に示す。また、 $\tau_{max}$  および  $S_{max}$  の値を、実験要因ごとの3体の平均値 (P13-13M および P13-21M は各1体に加力上の不備があったため、2体の平均値) として表-3 に示す。図-10~12 および表-3 より、コンクリート強度が高くなるほど  $\tau_{max}$  は大きくなり、概ね  $f_c'^{2/3}$  に比例する関係が得られた。これは既往の研究<sup>例え 6)</sup>と一致する結果であるが、本実験においてはばらつきが大きい結果となった。また、鉄筋径が大きくなるほど  $S_{max}$  は大きくなり、概ね鉄筋径  $D$  の値に比例する関係が得られた。これは両引試験の結果とも一致する。しかし、この関係においてもばらつきが大きく、特にD16を用いた試験体においてそのばらつきが顕著であった。一方、コンクリート強度が  $S_{max}$  に、鉄筋径が  $\tau_{max}$  にそれぞれ与える影響は本実験の結果からは見ることはできなかった。

繰返し載荷試験体の  $\tau-S$  関係を図-13 に示す。同図の左図が履歴1、右図が履歴2によるものである。また、上図が関係全体、下図がその一部を示した図である。履歴1の結果を見ると同一すべり量下での繰返しを行うと、付着応力が徐々に低下することが確認できる。また、その低下量は繰返し回数に伴い小さくなる傾向が見られる。同一すべり量下での1回目の繰返しによる付着応力の低下量は除荷点のすべり量によらずほとんどが10~20%であった。同様に履歴2の結果を見ると、同一付着応力下での繰返しによって徐々にすべり量は増加することが確認できる。すべり量の増加量は繰返し回数に伴い小さくなる傾向が見られた。また、同一付着応力下での1回目の繰返しによるすべり量の増分はすべり量にはよらずそのほとんどが4~8%であった。

#### 4. 付着解析

##### 4.1 解析モデル

解析に用いる  $\tau-S$  関係の履歴モデルは、著者らの既往の研究<sup>3)</sup>によるモデルを基本とする。付着応力は最大付着応力  $\tau_{max}$  で、すべり量は最大付着応力を与えるすべり量  $S_{max}$  でそれぞれ正規化する。図-14 に示す鉄筋とコンクリート間の摩擦による挙動を表すスリップモデルと図-15 に示す鉄筋とコンクリート間の機械的な噛み合わせによる挙動を表すベアリングモデルの和によって  $\tau-S$  関係を表す。

スリップモデルは文献3)と同様とする。包絡線は図-14 に示すように bi-linear モデルとする。また、直線を決定する各係数の値は文献3)と同値で、次の値を用いる。

$$K_a = 4.399 \quad K_b = 0.010 \quad \beta = 0.153$$

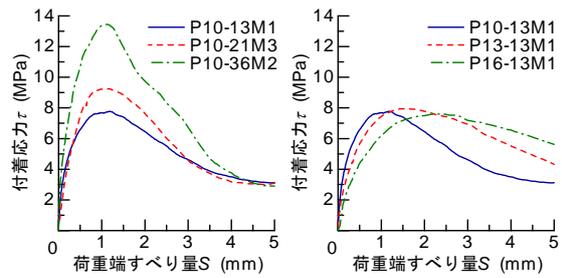


図-10 片引試験の  $\tau-S$  関係 (単調載荷)

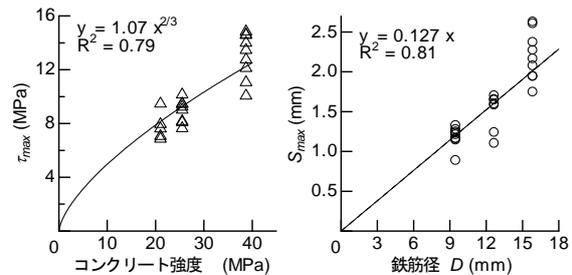


図-11  $\tau_{max}-f_c$  関係

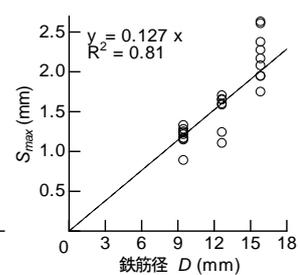


図-12  $S_{max}-D$  関係

表-3  $S_{max} \cdot \tau_{max}$  一覧

試験体名称	$\tau_{max}$ (MPa)	$S_{max}$ (mm)
P10-13M	8.01	1.102
P10-21M	8.93	1.231
P10-36M	12.7	1.193
P13-13M	7.39	1.633
P13-21M	8.59	1.614
P13-36M	13.6	1.323
P16-13M	8.04	2.266
P16-21M	9.07	2.196
P16-36M	12.9	2.098

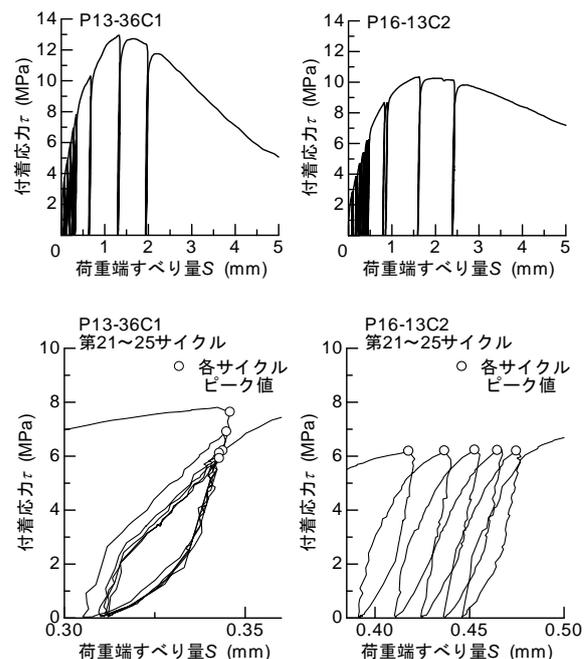


図-13 片引試験の  $\tau-S$  関係 (繰返し載荷)

点 C を除荷開始点とすると、その後の履歴は C→D→E→B→C→F となる。

次に修正を加えるベアリングモデルについて述べる。ベアリングモデルの包絡線形状は図-15(a)に示すように bi-linear モデルとした。点 A' の付着応力の値は、本実験の結果の平均値が文献3)による値よりも高かったため、次のように定めた。点 B' は文献3)と同様である。以上より各直線の勾配  $K_1$ 、 $K_2$  も以下のように決定される。

$$A'(0.5, 0.689) \quad B'(1.0, 0.837)$$

$$K_1 = 1.378 \quad K_2 = 0.296$$

ベアリングモデルの履歴形状を図-15(b)に示す。点 M を除荷開始点( $S_m/S_{max}$ ,  $\tau_m/\tau_{max}$ )とすると、その後の履歴は M→L→N→M'→P→Q となる、ML 間の除荷勾配  $K$  は文献3)と同様に以下の式(2)で表す。

$$K = 6.89 \cdot (S_m/S_{max})^{-0.208} \quad (2)$$

点 M' は ML 上の点であり、その付着応力は  $\alpha \cdot \tau_m/\tau_{max}$  である。 $\alpha$  の値は文献3)では  $\alpha = 0.90$  としたが、本実験の片引試験履歴1の実験結果をもとに  $\alpha = 0.75$  とした。これはスリップモデルとベアリングモデルを足し合わせた際に付着応力の低下量が概ね10~20%となるように決定した値である。片引試験履歴2の結果を見ると、再載荷時の履歴は、除荷時の履歴との交点を境に勾配が変化する傾向が確認できる。それを模擬する点として本研究では新たに点 P を定めた。点 P は片引き試験の実験結果をもとに以下のように定める。

$$P((1+\beta) \cdot S_m/S_{max}, \tau_m/\tau_{max})$$

$$\beta = 0.06 - 0.01(n-1)$$

ここで、 $n$  は経験した最大の付着応力以下での繰返し回数であり、付着応力の最大値が更新された場合  $n = 1$  となる。ただし、 $n > 6$  となった場合、 $\beta = 0.01$  の一定値とする。これは、増加率は繰返し回数に伴い徐々に低下するが、0 になることはないと考えたためである。点 Q は M'P の延長線上の点かつ包絡線上の点であり、点 Q に戻った後の履歴は包絡線を辿る。

#### 4.2 解析方法

数値解析の対象は両引試験 T10-36C とする。解析に用いる  $\tau_{max}$  および  $S_{max}$  の値は、それぞれ片引試験のコンクリート強度 36MPa 試験体の平均値および D10 を用いた試験体の平均値として以下の値を用いる。

$$\tau_{max} = 13.1 \text{ MPa} \quad S_{max} = 1.175 \text{ mm}$$

解析方法については、式(3)~式(5)に示すように、微小区間での力のつり合いおよび変形の適合条件を考慮し、逐次計算を行った。

$$\tau_x = f(S_x) \quad (3)$$

$$P_{sx,i+1} = P_{sx,i} - \tau_x \cdot \phi \cdot dx \quad (4)$$

$$S_{x,i+1} = S_{x,i} - \frac{P_{sx,i+1} + P_{sx,i}}{2E_s A_s} \cdot dx \quad (5)$$

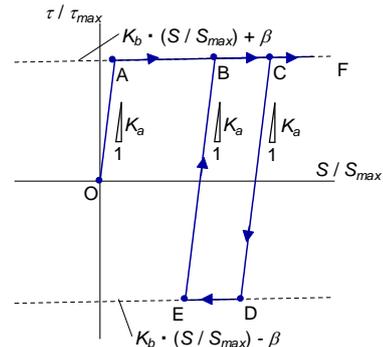


図-14 スリップモデル形状

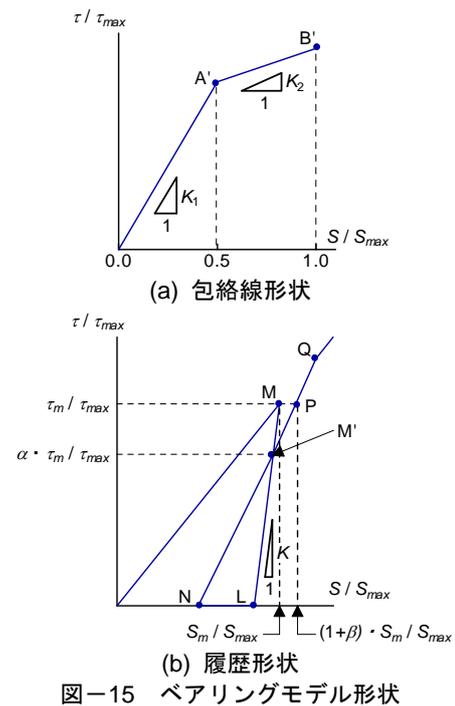


図-15 ベアリングモデル形状

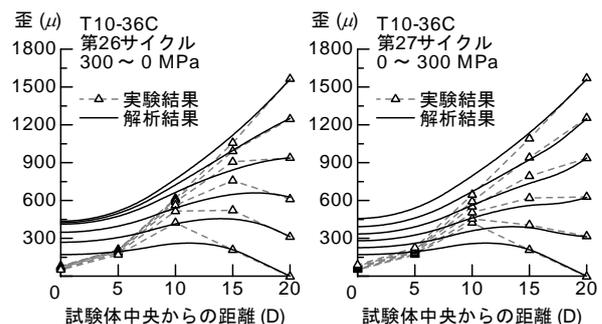


図-16 鉄筋歪分布 (解析結果)

ここで、 $P_{sx}$  : 鉄筋引張力である。その他の係数は式(1)と同様である。

#### 4.3 解析結果

解析結果より得られた歪分布の例を図-16に示す。実験結果は図-8に示したグラフと同一である。実験結果と解析結果を比較すると、試験体中央から10~20Dの範囲では解析結果が実験結果をよく表現できている。また、同一箇所での歪の値の変化は、試験体中央に近づくにつ

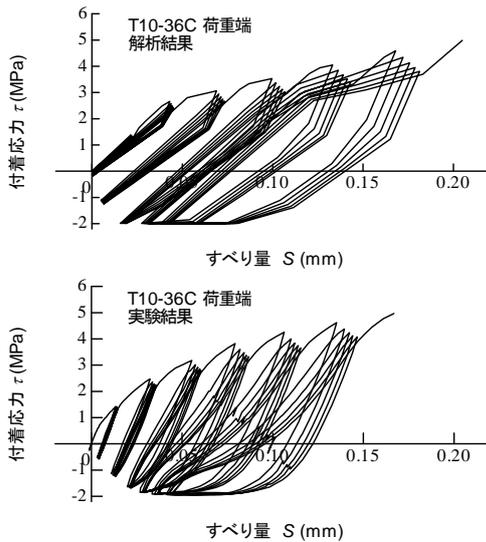


図-17  $\tau$ - $S$  関係 (解析結果)

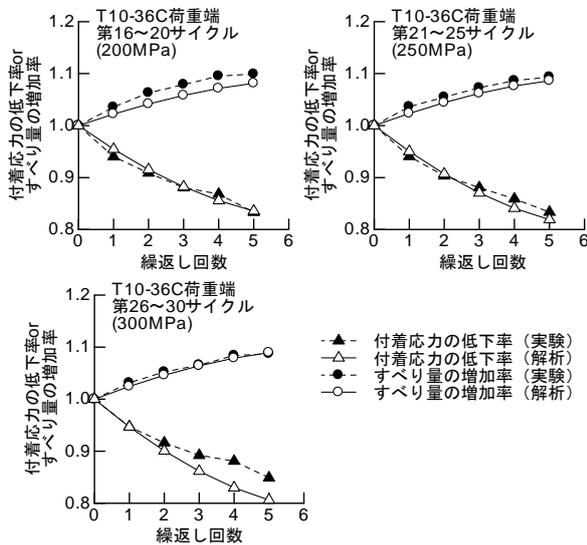


図-18 付着応力の低下率・すべり量の増加率

れ小さくなり、また、荷重が 0MPa に近いほど大きくなっており、実験の傾向を良くとらえている。しかし、試験体中央に近付くにつれて実験結果と解析結果の差異が大きくなり、試験体中央部では歪の値が倍以上異なっている。履歴モデルの包絡線における初期勾配が実験結果をよく捉えられておらず、実験結果よりも過小に評価していることが原因であると考えられる。今後の課題として、包絡線を決定する各点の設定を検討し、実験結果をより良く近似することが必要であると考えられる。

解析より得られた  $\tau$ - $S$  関係の例として、荷重端の  $\tau$ - $S$  関係を、図-17 上図に示す。また、比較のため同下図に実験結果を示す。両者を比較すると、包絡線の初期勾配に差異がみられるが、二次勾配は概ね一致する。しかし、除荷時の勾配や、再載荷時の挙動に差異がみられる。これらの差異の原因として、すべり量が小さい範囲ではスリップモデルの与える付着応力の全体に対する割合が

比較的大きくなるという点が考えられる。この点については今後検討し、モデルにさらなる修正を加える必要があると考えられる。

引張応力が 200, 250, 300MPa で複数回繰返した際の付着応力の低下率および、すべり量の増加率を図-18 に示す。図中の値は、それぞれ初めて各ピークの引張応力値に達したときの付着応力とすべり量に対する割合である。同図より、今回行った数値解析によって繰返しによる付着応力の低下および、すべり量の増加を良く追従できることが確認できる。よって、今回ベアリングモデルにおける付着応力の低下率およびすべり量の増加率を片引試験の結果をもとに決定したが、それらの値の適合性は良いと考えられる。

## 5.まとめ

1. 両引試験において、除荷および再載荷時の歪分布の変化は、除荷開始後、歪の分布が下に凸な形状から上に凸な形状へと移行して残留歪が生じ、再載荷時のほうが分布の勾配が緩やかである。
2. 片引試験による繰返し載荷時の付着応力の低下およびすべり量の増加を考慮した履歴モデルを用いた数値解析によって、両引試験の付着応力の低下およびすべり量の増加の程度を良く追従できた。

## 参考文献

- 1) 島 弘, 金久保利之: 補強材とコンクリートの付着・定着, コンクリート工学, Vol.39, No.9, pp.124~129, 2001.9
- 2) 壹岐直之, 清宮 理: 静的繰返し載荷が異形鉄筋の付着特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol22, No.3, pp.1195~1200, 2000
- 3) 麻生高行, 金久保利之, 他: 繰返し荷重下における鉄筋コンクリートの付着性状に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.599~603, 2009.8
- 4) 壹岐直之, 清宮 理: 除荷時における異形鉄筋の局所付着特性に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol24, No.2, pp.817~822, 2002
- 5) 六車 熙, 森田司郎, 他: 鋼とコンクリートの付着に関する基礎研究 (I 付着応力分布について) - (I), 日本建築学会論文報告集, No.131, pp1~8, 1967.1
- 6) 島 弘, 周 礼良, 他: マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり量-ひずみ関係, 土木学会論文集, No.378/V-6, pp.165~174, 1987.2