

# 論文 静的繰返し載荷が異型鉄筋の付着特性に及ぼす影響

壹岐直之\*1・清宮 理\*2

**要旨：**繰返荷重下での異型鉄筋とコンクリート間の付着特性を明らかにするため、鉄筋降伏を最大荷重とした静的繰返載荷実験を行った。実験結果より以下のことを把握した。繰返回数に伴ない、最大荷重時の鉄筋ひずみは増加したが、除荷後の残留ひずみは、最大荷重時のひずみが800 $\mu$ 程度を超えた後は増加しなかった。繰返回数に伴ない載荷端付近の付着応力は減少し、すべりは増加した。加力時の付着応力は、既往の付着応力関係式で算定した値に比例するが、繰返回数に伴ない算定値より低下した。残留すべりは最大荷重時のすべりにほぼ比例し、荷重端での残留すべりは最大荷重時のすべりの24.1~35.1%となった。

**キーワード：**局所付着特性、残留ひずみ、付着応力、すべり、繰返し載荷

## 1. まえがき

コンクリートと異形鉄筋の付着特性は、ひびわれ幅の予測や終局変形量の予測など構造物の挙動を推定する上で重要な因子のひとつである。これまで、付着特性に関する研究<sup>1),2)etc</sup>はいくつか行われているが、除荷経路での付着特性や、繰返載荷が付着特性に及ぼす影響に関する研究については、1回の正負交番載荷を行った中嶋らの研究<sup>3)</sup>以外には見当たらない。構造物での除荷後の残留変形や、繰返荷重による変形量の増加を推定するためには、繰返載荷が付着特性に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

本論文は、構造物内での鉄筋周辺のコンクリートの応力状況を考慮した繰返載荷実験の結果を基に、除荷後の残留変形と繰返載荷による付着特性の低下について評価し、若干の考察を加えたものである。なお、本実験は特に地震や疲労を対象としたものではなく、載荷速度が比較的遅く、載荷回数の少ない“静的”な載荷である。また、載荷は正負交番ではなく、鉄筋引張の一方のみである。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験要因および載荷方法

実験要因の組み合わせを表-1に示す。供試体

は6体である。コンクリートの直径は30および45cmの2種類とした。表中のDは鉄筋径である。

載荷方法は、鉄筋に軸引張力のみ載荷する“両側引張(T)”，供試体の両側で鉄筋軸引張力の反力をコンクリートに軸圧縮力として載荷する“両側引抜(B)”，これを供試体の片側のみとした“片側引抜(P)”の3種類とした。載荷方法を図-1に示す。(T)と(B)の違いはコンクリートの応力状態にあり、(T)では軸引張応力、(B)では軸圧縮力が作用する<sup>4)</sup>。(B)と(P)の違いは境界条件にあり、(B)では供試体の中央においてすべりS=0、鉄筋ひずみ $\epsilon_s \neq 0$ であり、(P)では自由端においてS $\neq 0$ 、 $\epsilon_s = 0$ である<sup>5)</sup>。すなわち、各供試体での応力と境界の条件は、(T)は梁構造などでのひびわれに挟まれた部分に相当し、(P)はJSCE-G503-1988などの引抜付着実験に相当する。(B)は(T)と(P)の条件の違いを補間するものである。

表-1 実験要因の組み合わせ

供試体の名称	コンクリートの直径[cm]	載荷方法	付着長[cm] (鉄筋径:D)
T-30	30	両側引張	63.6 (40D)
B-30		両側引抜	
P-30		片側引抜	
T-45	45	両側引張	63.6 (40D)
B-45		両側引抜	
P-45		片側引抜	

\*1 若築建設 (株) 土木本部 技術研究所 (正会員)

\*2 早稲田大学 理工学部 土木工学科 教授 工博 (正会員)

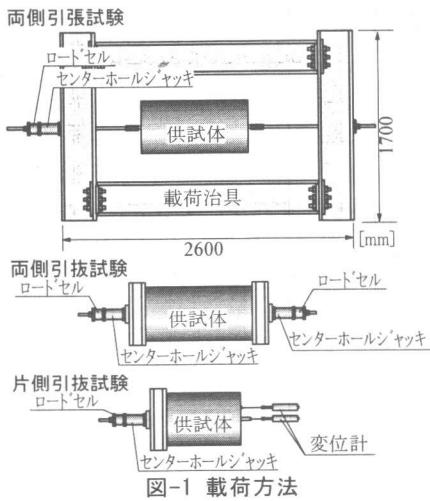


図-1 荷重方法

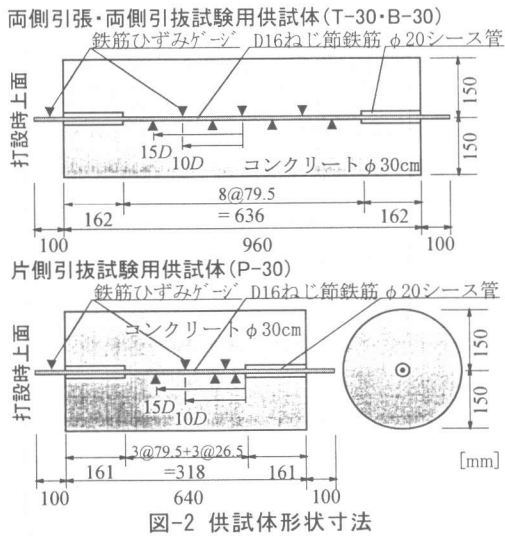


図-2 供試体形状寸法

鉄筋とコンクリートの付着長は、荷重方法によって異なり、両側引張および両側引抜では鉄筋径 $D$ の40倍の63.6cm、片側引抜では20 $D$ の31.8cmとした。

## 2.2 供試体および計測項目

コンクリート直径30cmの供試体の形状寸法を図-2に示す。コンクリートの形状は円筒形とし、断面の中央に公称径 $D=15.9\text{mm}$ のネジ節鉄筋を埋め込んだ。供試体の両端には、コンクリート圧縮荷重が一部へ集中しないようにするため、また、実験条件を同じにするため、すべての供試体に長さ10 $D$ 程度の非付着区間を設けた。

鉄筋のひずみは、図-2に示す箇所のひずみゲ

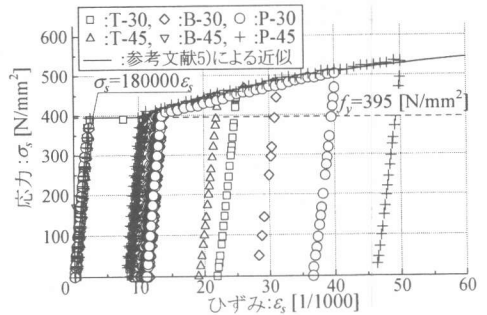


図-3 鉄筋の応力-ひずみ関係

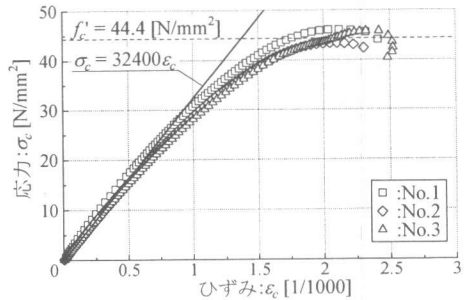
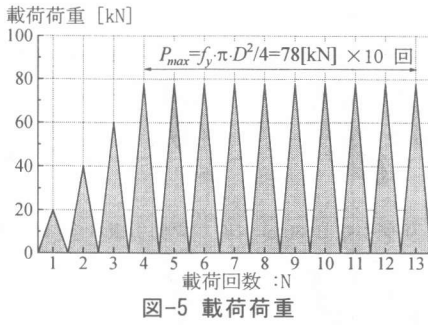


図-4 コンクリートの応力-ひずみ関係

ージで測定した。ひずみゲージは、付着特性に及ぼす影響が最小限になるように山尾ら<sup>6)</sup>の研究を参考にし、荷重中の鉄筋に偏心がないことを確認するため表裏交互に、5 $D$ の間隔で貼付けた。片側引抜の自由端付近では、鉄筋ひずみの変化が大きいため、間隔を5/3 $\cdot D$ とした。荷重荷重はセンターホールロードセルで計測した。片側引抜は、自由端で $S \neq 0$ となるためコンクリートと鉄筋の相対変位を変位計で計測した。

使用した鉄筋の応力-ひずみ関係を図-3に示す。これは、供試体の鉄筋のコンクリートに埋め込まれていない箇所に貼り付けたひずみゲージによって、繰返荷重中に計測した結果である。降伏応力 $f_y=395\text{N/mm}^2$ 、弾性係数 $E_s=180\text{kN/mm}^2$ 、ひずみ硬化の初期ひずみ $\epsilon_{sh}=11000\mu$ であった。

使用したコンクリートの応力-ひずみ関係を図-4に示す。これは、供試体と同じ条件で養生した $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 試験体を用いた圧縮試験の結果である。圧縮強度 $f'_c=44.4\text{N/mm}^2$ 、割線弾性係数 $E_c=32.4\text{kN/mm}^2$ であった。また、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 試験体での割裂引張試験の結果、引張強度 $f_t=6.5\text{N/mm}^2$ であった。



### 2.3 載荷荷重の設定

載荷荷重の設定を図-5に示す。20kN,40kN,および60kNで一旦除荷を行い、その後、鉄筋の降伏荷重78kNを最大荷重とする載荷-除荷を10回繰り返した。78kN載荷時に、コンクリートに埋め込まれていない部分の鉄筋が降伏していることは、図-3から判る。載荷および除荷の速度は、およそ20kN/min（載荷端鉄筋ひずみ速度では2μ/sec程度）とし、5kN毎に計測を行った。

## 3. 実験結果 および その評価

### 3.1 鉄筋ひずみ

境界（両側引張・引抜では供試体中央，片側引抜では自由端。図-2参照）から15Dと10Dの位置で計測した鉄筋ひずみの履歴を図-6,7に示す。両側引張・引抜では供試体の左右で付着特性が異なる<sup>7)</sup>が、載荷端がコンクリート打設時の上面となる側を示した。載荷荷重に対する鉄筋ひずみの大きさは、おおむね両側引張>両側引抜>片側引抜であった。鉄筋ひずみは、載荷荷重に伴って増加し、鉄筋降伏荷重での載荷回数が増えるに従っても増加した。残留ひずみは荷重の増加と回数の増加に伴ない増加したが、最大荷重時のひずみが500~1000μを超えると、除荷経路での鉄筋ひずみはある一点への指向性を有した。

図-8は最大荷重時のひずみと残留ひずみを、載荷回数を横軸にとって表したものである。載荷回数:N<4では載荷荷重が増加しているため最大荷重時のひずみと残留ひずみは増加した。N≧4では載荷回数の増加に伴って、最大荷重

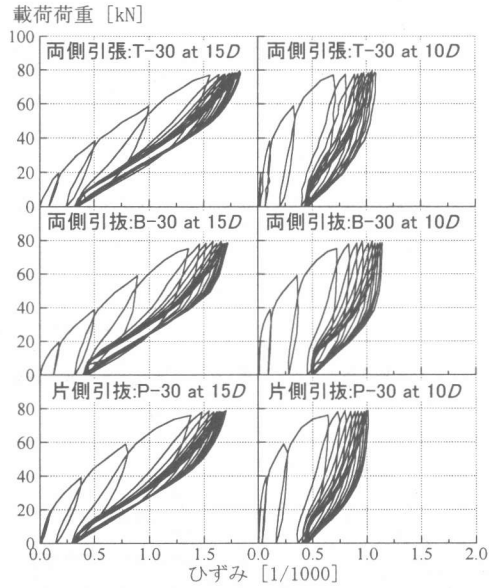


図-6 鉄筋ひずみ履歴（φ30cm シリーズ）

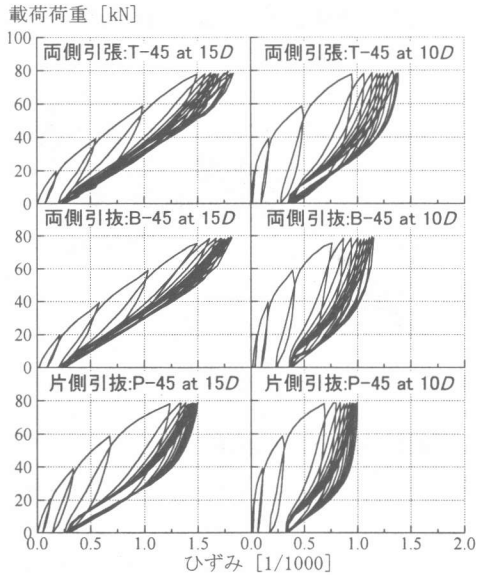


図-7 鉄筋ひずみ履歴（φ45cm シリーズ）

時のひずみは増加し、15Dと10Dでの増加の傾きはほぼ同じであった。残留ひずみについては、ほとんど変化しないか、若干減少した。

図-9に示すように、最大荷重時のひずみ:ε<sub>p</sub>と残留ひずみ:ε<sub>r</sub>の関係は、実験条件にかかわらずほぼ同一の傾向を示した。すなわち、残留ひずみは、ε<sub>p</sub><800μ程度ではε<sub>p</sub>に比例して増加するが、ε<sub>p</sub>>800μ程度になるとほぼ一定となり、ε<sub>p</sub>>1200μ程度になると減少に転じた。

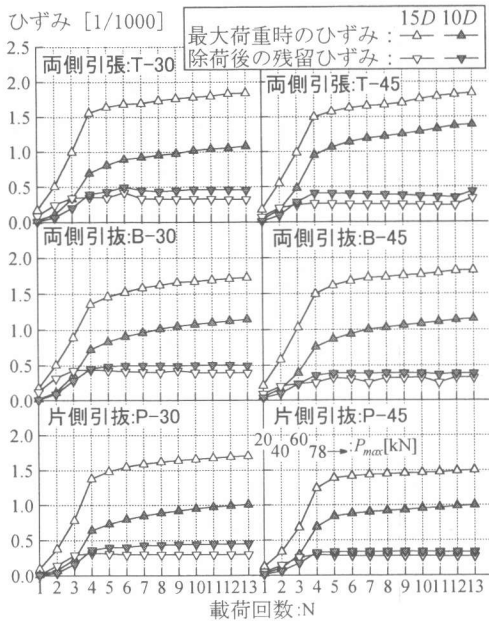


図-8 鉄筋ひずみと荷重回数の関係

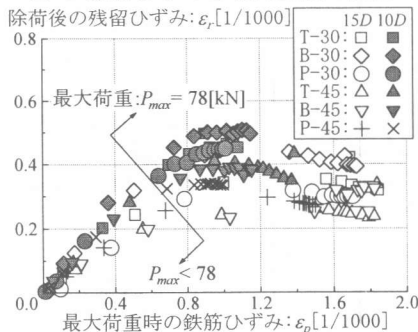


図-9 最大荷重時のひずみと残留ひずみの関係

### 3.2 付着応力-すべり関係

付着応力 $\tau$ と、すべり $S$ の決定方法は既往の研究<sup>2),6),8)</sup>と同じである。すなわち、鉄筋ひずみ曲線は、着目点と左右に隣接する点の3点を通る放物線で補間した。補間した放物線の範囲は着目点と隣接する点との中間までとした。付着応力は、着目点での鉄筋ひずみ曲線の微分値を用い、 $\tau = D/4 \cdot E_s \cdot d\varepsilon_s/dx$ として算定した。両側引張・引抜でのすべりは、鉄筋ひずみ分布曲線の傾きが0となる点から、着目点までの鉄筋ひずみ曲線の積分 $S = \int \varepsilon_s \cdot dx$ として算定した。片側引抜でのすべりは、自由端から着目点までの鉄筋ひずみ曲線の積分 $S = \int \varepsilon_s \cdot dx$ に、自由端で計測した鉄筋とコンクリートの相対変位を加えた。

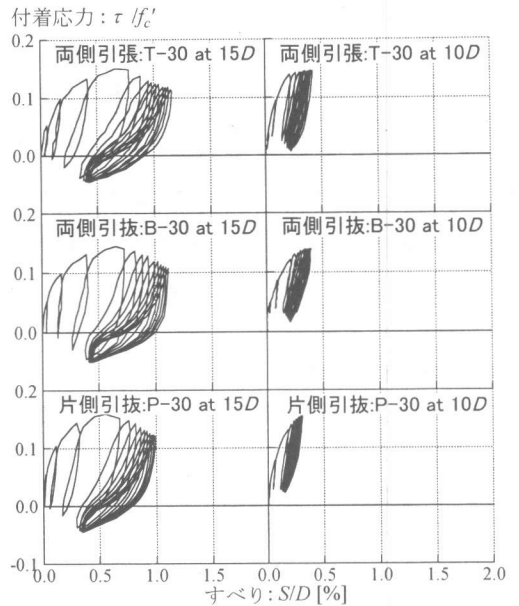


図-10 付着応力-すべり関係 (φ30cm シリーズ)

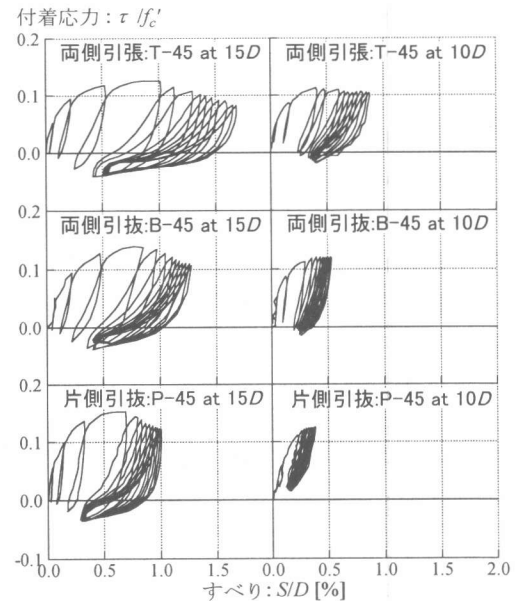


図-11 付着応力-すべり関係 (φ45cm シリーズ)

算定した $\tau$ - $S$ 関係の履歴を図-10, 11に示す。15Dでの最大付着応力の大きさは、両側引張(T) < 両側引抜(B) < 片側引抜(P)であり、最大すべりの大きさは(T) > (B) > (P)であった。荷重回数に伴ない、15Dの付着応力は減少し、すべりは増加する傾向を示した。また、15Dの残留ひずみが10Dの値より小さくなったため、除荷後、15Dでの付着応力の向きが逆転現象が生じた。

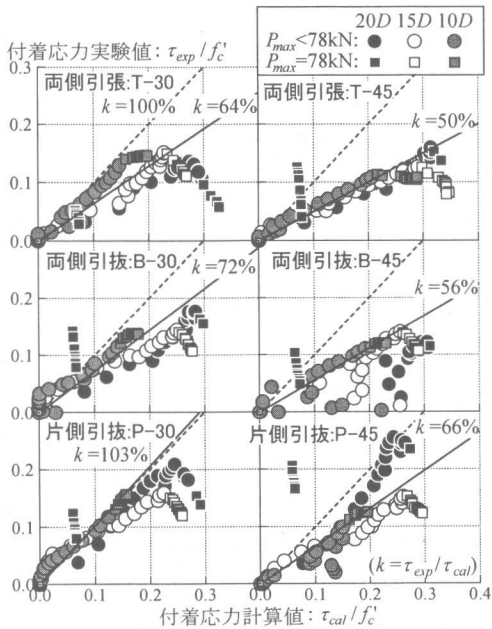


図-12 付着応力の実験値と計算値の比較

### 3.3 繰返载荷による付着応力の低下

繰返载荷による付着応力の低下を評価するため、付着応力の実験値と計算値とを比較した。実験値： $\tau_{exp}$ は3.2での算定値である。計算値： $\tau_{cal}$ は、島ら<sup>2)</sup>の式(1)に、実験での鉄筋ひずみ： $\varepsilon_s$ と、3.2で算定したすべり： $S$ を代入して算定した。

$$\tau_{cal} = 0.73 f_c' \{ \ln(1 + 5000 S / D) \}^3 \frac{1}{1 + 10^5 \varepsilon_s} \quad (1)$$

この結果を図-12に示す。同図には、載荷荷重が増加するとき、つまり、 $\tau$ - $S$ 関係の包絡線上の付着応力のみ示した。図中の $k$ の傾きを持つ直線は、鉄筋降伏荷重78kNによる繰返载荷以前での、実験値の計算値に対する比率 $\tau_{exp} / \tau_{cal}$ の、20D、15D、および10Dの平均値： $k$ によるものである。 $k$ の値は、付着能力の高さを表す数値であり、実験条件によって異なる。この差異は著者らがこれまで示した内容<sup>4),7)</sup>と概ね一致した。

78kNの繰返载荷以前では、傾きは異なるものの、計算値と比例関係にある。しかし、繰返载荷以降では、比例関係になく、載荷回数の増加に伴って実験値は計算値よりも小さくなる傾向を示した。特に、載荷端に近い20D、15Dはその傾向は大きく、実験値の計算値に対する比

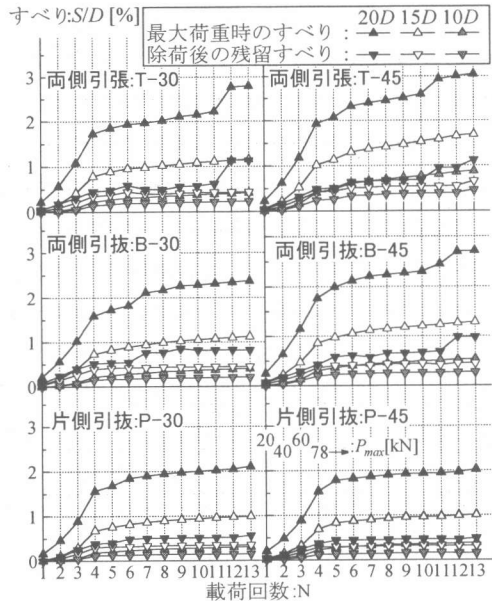


図-13 すべりと載荷回数の関係

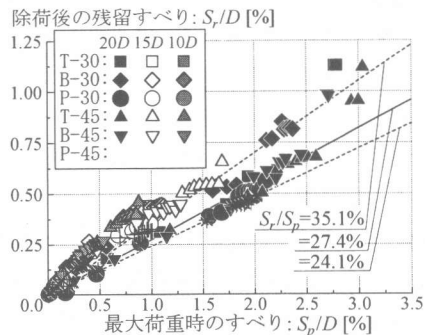


図-14 最大荷重時すべりと残留すべりの関係

表-2 残留すべりの最大すべりに対する比率[%]

境界からの距離	20D	15D	10D	平均
両側引張:T-30	27.1	43.2	55.9	42.1
両側引抜:B-30	35.1	51.8	58.8	48.6
片側引抜:P-30	26.3	39.8	53.4	39.8
両側引張:T-45	27.7	41.1	61.4	43.4
両側引抜:B-45	24.1	40.0	55.9	40.0
片側引抜:P-45	24.2	39.3	47.7	37.1
平均	27.4	42.5	55.5	41.8

率： $k$ が小さいと、10Dでもその傾向が認められた。なお、20Dで繰返载荷以降で計算値が不連続に小さくなったのは、20Dでの鉄筋が降伏し、鉄筋ひずみが増加したことが原因である。

### 3.4 最大荷重時のすべりと残留すべりの関係

載荷回数と、最大荷重時のすべりおよび残留すべりとの関係を図-13に示す。20Dでのすべり

が不連続(例えば,T-30の12回目)に増加しているのは、鉄筋の降伏域がコンクリートの内部へ進展したためである。載荷回数: $N < 4$ では載荷荷重が増加しているため最大荷重時のすべりと残留すべりは増加した。 $N \geq 4$ でも載荷回数の増加に伴って、最大荷重時のひずみは増加した。

図-14に示すように、最大荷重時のすべり: $S_p$ と残留すべり: $S_r$ の関係は実験条件にかかわらずほぼ同一の傾向を示し、前述の不連続なすべりの増加以前では $S_r$ は $S_p$ にほぼ比例した。不連続な増加以前での $S_r$ の $S_p$ に対する比率の平均値を表-2に示す。境界からの距離が遠いほど $S_r$ の比率は小さい。20Dでの $S_r$ の比率は24.1~35.1%であり、すべての供試体の平均は27.4%となった。

#### 4. 考察

本実験で得られた結果は、載荷時における鉄筋ひずみの増加に伴う鉄筋周辺のコンクリートの局所的な塑性変形と、減力時におけるコンクリートによる鉄筋への拘束作用とで、以下に示すように説明できると考えている。

残留ひずみは、鉄筋ひずみの応力減少に伴う弾性変形を、周辺の塑性変形したコンクリートが拘束するために生じるものである。したがって、コンクリートの塑性変形量と拘束作用の強さとが、最大荷重時の鉄筋ひずみ量に比例すれば、最大荷重時のひずみと残留ひずみが比例する(図-9)ことになる。次に、最大荷重時のひずみがある限界(本実験では800 $\mu$ 程度)を超えると、コンクリートの局所破壊がさらに進むため、拘束効果が弱くなる。このため、最大荷重時のひずみの増加に対して、残留ひずみは増加しなくなり、減少に転じると考える。

付着応力-すべり関係は、鉄筋ひずみ分布で決定されるため、鉄筋ひずみと同様に減力時の指向性(図-10, 11)が生じる。また、繰返載荷によって付着応力が低下する現象(図-12)は、鉄筋ひずみの増加-減少に伴って鉄筋周辺でのコンクリートの局所破壊が進展するため生じると考える。15Dでの付着応力の低下量が10Dよりも大

きく、最大付着応力の小さい供試体のほうが大きかったのは、その位置でのコンクリートの局所破壊がより進展していたためであろう。

本実験では、荷重端での残留すべりの最大荷重時のすべりに対する比率は24.1~35.1%(図-14)であった。荷重端のすべりは、構造物でのひびわれ幅や鉄筋拔出し量と同じ意味を持つ。本実験と同程度の付着能力を持つコンクリートの場合は、ひびわれ幅や鉄筋拔出しの残留量は、最大荷重時の30%前後になると考える。

#### 5. まとめ

繰返荷重下での付着特性を解明するため、鉄筋降伏を最大荷重とした静的載荷実験を行った。実験結果から得た主な結論を以下に示す。

- ①最大荷重時の鉄筋ひずみは繰返回数に伴ない増加した。除荷後の残留ひずみは、最大荷重時の鉄筋ひずみが800 $\mu$ 以上となった後は増加しなくなった。
- ②繰返回数の増加に伴って荷重端付近の付着応力は減少し、すべりは増加した。
- ③加力時の付着応力は既往の計算式と直線の関係を持つが、繰返回数の増加に伴ない計算値より低下した。
- ④除荷後の残留すべりは最大荷重時のすべりにほぼ比例し、荷重端での残留すべりは最大荷重時のすべりの24.1~35.1%となった。

#### 参考文献

- 1) 森田司郎：鉄筋コンクリートにおける付着とひび割れに関する研究, 京都大学学位論文, 1968.4
- 2) 島 弘, 周礼良, 岡村甫: 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-ひずみ関係, 土木学会論文集, No.378/V-6, pp.165~174, 1987.2
- 3) 中島 享, 山本康弘: 鉄筋コンクリートの付着応力度の履歴とひびわれの復元性に関する研究, 土木学会論文集, No.219, pp.95~105, 1973.11
- 4) 壹岐直之, 清宮 理, 山田昌郎: 付着応力-すべり関係に影響を及ぼす要因の実験的研究, 土木学会論文集, No.550/V-33, pp.73~83, 1996.11
- 5) 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, 1991.5
- 6) 山尾秀秀, 周 礼良, 岡村 甫: 付着応力-すべり関係に関する実験的研究, 土木学会論文, No.343, pp.219~228, 1984.3
- 7) 壹岐直之, 清宮 理: コンクリートの応力状態が異形鉄筋の付着強度に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21-No.3, pp.373~378, 1999
- 8) 島 弘, 周 礼良, 岡村 甫: 異形鉄筋の降伏後における付着特性, 土木学会論文集, No.378/V-6, pp.213~220, 1987.2