

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

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

(構造エネルギー工学専攻)

指導教員 金久保 利之

2011年 3月

# 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

## 論 文 概 要

鉄筋コンクリート部材は、圧縮力を負担するコンクリートと引張力を負担する鉄筋とが一体となって荷重に耐えることを前提とした複合構造であり、その一体性は両者の付着性状に依存している。そのため、鉄筋とコンクリート間の付着性状は鉄筋コンクリート構造の重要な因子の1つであり、これまでも数多くの研究が行われている。しかし、そのほとんどは単調な荷重が作用した場合のものであり、実構造物の設計の際に必要とされる地震力や風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に関する研究はあまり多くは行われていないのが現状である。繰返し荷重により、ひび割れ幅がどのように推移していくか、また付着強度がどの程度低下し、それが残留変形量や終局変形量および構造物自体の耐力にどのような影響を与えるか等、推定する必要がある。本研究では繰返し荷重下における付着性状に関して詳細に検討するため、割裂によるひび割れが生じないマッシブなコンクリートにおける付着性状と、横補強筋により横拘束力が作用している場合の付着性状とに場合分けし、繰返し荷重下における付着性状を把握し、履歴モデルの構築および付着解析による解析結果と実験結果との比較・検討を行い、繰返し荷重下における付着性状を評価することを目的とした。

本論文は、全4章から構成される。各章の概要は以下の通りである。

第1章では、研究背景について整理し、研究目的を明快にする。

第2章では、マッシブなコンクリートにおける付着性状の評価を目的とした。RC部材の付着性状に特に大きな影響を与える因子として、コンクリート強度および鉄筋径を実験要因とし、繰返しの片引き試験および両引き試験を行い、実験要因の付着性状に与える影響を整理し、実験的に繰返し荷重の影響を把握した。また、片引き試験の結果をもとに局所の付着応力-すべり量関係の履歴モデルを構築し、両引き試験を対象とした付着解析を行い、実験結果と比較することでモデルの妥当性を確認した。

単調載荷試験の結果より、コンクリート強度 $\sigma_B$ が高くなるほど最大付着応力 $\tau_{max}$ は大きくなり、概ね $\sigma_B^{2/3}$ に比例する関係が得られた。また、鉄筋径が大きくなるほど最大付着応力時のすべり量 $S_{max}$ は大きくなり、概ね鉄筋径 $d_b$ の値に比例する関係が得られた。また、これらの結果より、 $\tau_{max}$ および $S_{max}$ の値を定式化した。繰返し載荷試験の片引き試験および両引き試験の実験結果より、繰返し荷重下による除荷開始点への指向性の低下が確認できた。しかし、片側繰返し荷重下では包絡線の低下はほとんどなかった。

片引き試験の実験結果より構築した局所付着性状（付着応力-すべり量関係）の履歴モデルを用いて、両引き試験の付着解析を行った。解析結果は実験結果の傾向をよく表現できており、本研究で構築した履歴モデルが妥当であることが確認できた。

第3章では、繰返し荷重下における付着性状に横拘束力が与える影響を把握することを目的とし、横拘束力をオイルジャッキにより直接作用させた状態での繰返し引抜試験を行った。また、実験結果を用いて横拘束力が作用している場合の局所の付着応力-すべり量関係の履歴モデルを構築し、片持梁型試験体の引抜試験を対象とした付着解析を行い、考察を加えた。

繰返し载荷試験の実験結果より、スリップ域の付着応力と拘束応力との間には明確な比例関係が見られた。また、拘束応力が高くなると除荷開始点への指向性が高くなる傾向が確認できた。

実験結果より構築した局所付着性状（付着応力-すべり量関係）履歴モデルを用いて、片持梁型試験体による引抜試験の付着解析を行った。解析結果より、正負繰返し载荷により付着強度が低下し、もっとも低下したもので73%まで低下する結果が得られた。

第4章では、本論文の結論について述べた。

# 目次

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第1章 序論 .....               | 1  |
| 第2章 マッシュなコンクリートの付着性状 ..... | 3  |
| 2.1 はじめに .....             | 3  |
| 2.2 片引き試験 .....            | 4  |
| 2.2.1 実験概要 .....           | 4  |
| 2.2.2 実験結果 .....           | 7  |
| 2.3 両引き試験 .....            | 14 |
| 2.3.1 実験概要 .....           | 14 |
| 2.3.2 実験結果 .....           | 16 |
| 2.4 付着解析 .....             | 25 |
| 2.4.1 履歴モデル .....          | 25 |
| 2.4.2 付着解析 .....           | 28 |
| 2.5 まとめ .....              | 34 |
| 第3章 横拘束力のある場合の付着性状 .....   | 35 |
| 3.1 はじめに .....             | 35 |
| 3.2 実験概要 .....             | 36 |
| 3.2.1 試験体 .....            | 36 |
| 3.2.2 実験方法 .....           | 38 |
| 3.2.3 加力履歴 .....           | 39 |
| 3.3 実験結果 .....             | 41 |
| 3.3.1 単調載荷試験 .....         | 41 |
| 3.3.2 繰返し載荷試験 .....        | 44 |
| 3.4 付着解析 .....             | 59 |
| 3.4.1 履歴モデル .....          | 59 |
| 3.4.2 付着解析 .....           | 62 |
| 3.5 まとめ .....              | 66 |

|                |    |
|----------------|----|
| 第 4 章 結論 ..... | 67 |
| 謝辭 .....       | 68 |
| 参考文献 .....     | 69 |

# 第1章 序論

鉄筋コンクリート（以下 RC）部材は、圧縮力を負担するコンクリートと引張力を負担する鉄筋とが一体となって荷重に耐えることを前提とした複合構造であり、その一体性は両者の付着性状に依存している。そのため、鉄筋とコンクリート間の付着性状は RC 構造の重要な因子の 1 つであり、ひび割れ幅の算定や部材変形量の推定などに用いられる。

付着性状の評価には、構成則として、付着応力とコンクリートと鉄筋間の相対変位であるすべり量の関係が用いられる。1960 年代からこの付着応力とすべり量の関係を検討し、微小区間における変形の適合条件と力の釣り合いより付着性状に関する基礎微分方程式が確立されている（この基礎微分方程式を解くために必要な構成則が付着応力－すべり量関係である）<sup>1)</sup>。その後も RC 部材の付着性状に関する研究はこれまでも数多くの研究が行われている（例えば 2）。

しかし、そのほとんどは単調な荷重が作用した場合のものであり、実構造物の設計の際に必要なとされる地震力や風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に関する研究はあまり多くは行われていないのが現状である。繰返し荷重により、ひび割れ幅がどのように推移していくか、また付着強度がどの程度低下し、それが残留変形量や終局変形量および構造物自体の耐力にどのような影響を与えるか等、推定する必要がある。

そこで、著者は既往の研究 <sup>3)</sup>として、繰返し載荷による片引試験を行い、繰返し荷重下における局所付着性状を把握するとともに、実験結果をもとに図 1.1 に示すような、付着応力－すべり量関係の履歴モデルの構築を行い、構築した履歴モデルを用いた付着解析を行い解析結果に関して考察を行っている。

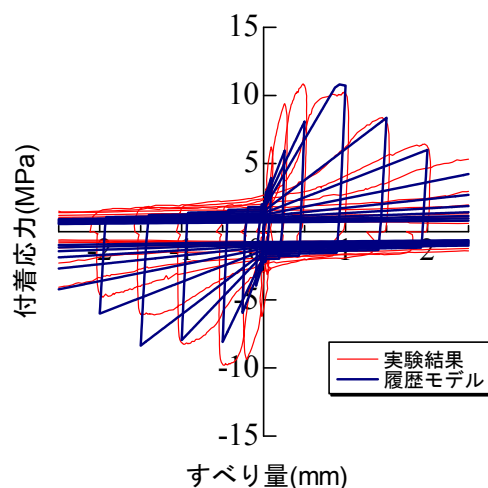


図 1.1 既往の研究による付着応力－すべり量関係履歴モデル <sup>3)</sup>

以上のような背景を受けて、本研究では繰返し荷重下における付着性状に関してより詳細に検討するため、割裂によるひび割れが生じないマッシブなコンクリートにおける付着性状と、横補強筋により横拘束力が作用している場合の付着性状とに場合分けし、実験より繰返し荷重下における付着性状を把握し、履歴モデルの構築および付着解析による解析結果と実験結果との比較・検討を行い、繰返し荷重下における付着性状を評価することを目的とした。

以下に本論文の構成および目的を示す。

本章では、研究背景について整理し、研究目的を明快にした。

第2章では、マッシブなコンクリートにおける付着性状の評価を目的とする。RC部材の付着性状に特に大きな影響を与える因子として、コンクリート強度および鉄筋径を実験要因とし、繰返しの片引き試験および両引き試験を行い、実験要因の付着性状に与える影響を整理し、実験的に繰返し荷重の影響を把握する。また、片引き試験の結果をもとに局所の付着応力-すべり量関係の履歴モデルを構築し、両引き試験を対象とした付着解析を行い、実験結果と比較することでモデルの妥当性を確認する。

第3章では、繰返し荷重下における付着性状に横拘束力が与える影響を把握することを目的とし、横拘束力をオイルジャッキにより直接作用させた状態での繰返し引抜試験を行う。また、実験結果を用いて横拘束力が作用している場合の局所の付着応力-すべり量関係の履歴モデルを構築し、片持梁型試験体の引抜試験を対象とした付着解析を行い、考察を加える。

第4章では、本論文の結論を述べる。

## 第2章 マッシブなコンクリートの付着性状

### 2.1 はじめに

第1章で述べたように、著者は既往の研究<sup>3)</sup>で繰返し荷重下における鉄筋コンクリート部材の局所付着性状を把握するため繰返し引抜試験を行い、履歴モデルを構築している。しかし、先の実験では付着性状に影響を与える様々な因子を実験要因とせず、それぞれ固定して実験を行っている。

鉄筋コンクリート部材の付着性状に影響を与える因子は数多く、コンクリート強度、鉄筋形状、かぶり厚、補強筋比など様々である。本章では、マッシブなコンクリートを研究対象とし、鉄筋コンクリート部材の付着性状に特に大きな影響を与える因子として、コンクリート強度および鉄筋径を実験要因とし、繰返しの片引き試験および両引き試験を行う。片引き試験の結果より、各実験要因が局所付着性状に与える影響を把握するとともに、最大付着応力 $\tau_{max}$ および最大付着応力時のすべり量 $S_{max}$ の値の定式化を行う。両引き試験では、付着長が長く、より実部材に近い条件下での付着性状を把握する。また、片引き試験の実験結果をもとに、付着応力-すべり量関係履歴モデルを構築し、構築した履歴モデルを用いて両引き試験を対象とした付着解析を行う。解析結果と実験結果との比較を行い、履歴モデルの妥当性を確認する。

片引き試験および両引き試験で用いる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。用いた普通コンクリートの力学特性を表2.1に、異形鉄筋の力学特性を表2.2に示す。

表 2.1 コンクリートの力学特性

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

表 2.2 異形鉄筋の力学特性

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



## 2.2 片引き試験

### 2.2.1 実験概要

片引き試験の試験体形状を図 2.1 に示す。試験体の形状は、用いる鉄筋の径 ( $d_b$ ) に対して比例させて設計した。試験体断面は  $16d_b \times 16d_b$  の正方形断面とし、断面中央に異形鉄筋を 1 本配した。断面は割裂によるひび割れが生じないように十分大きい断面としている。試験体の幅は  $7d_b$  とし、両端部に  $1.5d_b$  ずつ付着絶縁区間を設け、付着区間を  $4d_b$  とした。打設は鉄筋が水平筋になるよう試験体側方から行った。

試験体一覧を表 2.3 に示す。試験体は各実験要因（コンクリート強度 3 種×鉄筋径 3 種，計 9 種）に対して，単調載荷試験 3 体，繰返し載荷試験 2 体（加力履歴 2 種）とし，試験体総数は 45 体である。

繰返し載荷試験の加力履歴を図 2.2 に示す。片引き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  $S_f/d_b$ ）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。履歴 1 (C1) はすべり量制御での繰返しとし， $S_f/d_b = 0.5 \sim 2.5\%$  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  $S_f/d_b = 5.0 \sim 15.0\%$  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点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。

加力方法を図 2.3 に示す。加力台の上に加力板，テフロンシート，石こうを介して試験体を設置し，鉛直方向に鉄筋を引き抜く。計測項目は引抜荷重と自由端すべり量である。

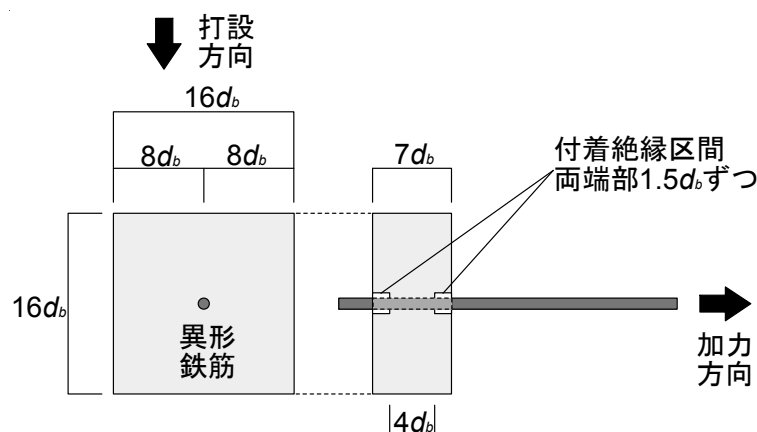


図 2.1 片引き試験 試験体形状

表 2.3 片引き試験 試験体一覧

| 試験体<br>名称  | 異形鉄筋 | コンクリート<br>目標強度<br>(MPa) | 載荷<br>方法   |
|------------|------|-------------------------|------------|
| P10-13M1~3 | D10  | 13.5                    | 単調 (M)     |
| P10-13C1   |      |                         | 繰返し 1 (C1) |
| P10-13C2   |      |                         | 繰返し 2 (C2) |
| P10-21M1~3 |      | 21                      | 単調 (M)     |
| P10-21C1   |      |                         | 繰返し 1 (C1) |
| P10-21C2   |      |                         | 繰返し 2 (C2) |
| P10-36M1~3 |      | 36                      | 単調 (M)     |
| P10-36C1   |      |                         | 繰返し 1 (C1) |
| P10-36C2   |      |                         | 繰返し 2 (C2) |
| P13-13M1~2 | D13  | 13.5                    | 単調 (M)     |
| P13-13C1   |      |                         | 繰返し 1 (C1) |
| P13-13C2   |      |                         | 繰返し 2 (C2) |
| P13-21M1~2 |      | 21                      | 単調 (M)     |
| P13-21C1   |      |                         | 繰返し 1 (C1) |
| P13-21C2   |      |                         | 繰返し 2 (C2) |
| P13-36M1~3 |      | 36                      | 単調 (M)     |
| P13-36C1   |      |                         | 繰返し 1 (C1) |
| P13-36C2   |      |                         | 繰返し 2 (C2) |
| P16-13M1~3 | D16  | 13.5                    | 単調 (M)     |
| P16-13C1   |      |                         | 繰返し 1 (C1) |
| P16-13C2   |      |                         | 繰返し 2 (C2) |
| P16-21M1~3 |      | 21                      | 単調 (M)     |
| P16-21C1   |      |                         | 繰返し 1 (C1) |
| P16-21C2   |      |                         | 繰返し 2 (C2) |
| P16-36M1~3 |      | 36                      | 単調 (M)     |
| P16-36C1   |      |                         | 繰返し 1 (C1) |
| P16-36C2   |      |                         | 繰返し 2 (C2) |

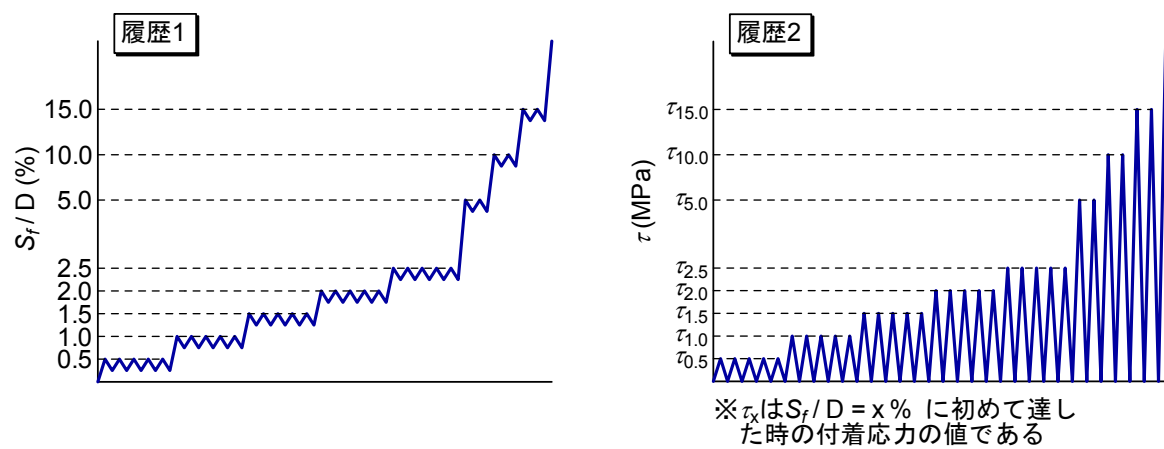


図 2.2 片引き試験 加力履歴

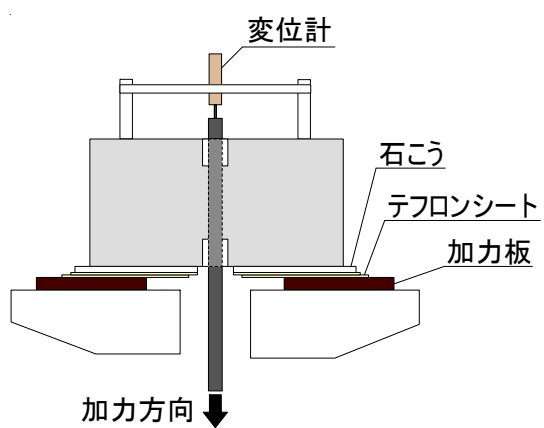


図 2.3 片引き試験 加力方法

## 2.2.2 実験結果

### (1) 単調載荷試験

単調載荷試験の付着応力 - 荷重端すべり量関係（以下， $\tau$ - $S$  関係）を図 2.4 に示す。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，荷重端すべり量は，付着区間での付着応力の分布が一定であると仮定して，自由端すべり量に付着区間における鉄筋の伸びを加算して算出した。

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  $\sigma_B$  と鉄筋径  $d_b$  の値で整理したものを図 2.5 および図 2.6 に示す。図 2.5 より，コンクリート強度  $\sigma_B$  が高くなるほど  $\tau_{max}$  は大きくなり，概ね  $\sigma_B^{2/3}$  に比例する関係が得られた。これは既往の研究<sup>例えば 4)</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，図 2.6 より鉄筋径が大きくなるほど  $S_{max}$  は大きくなり，概ね鉄筋径  $d_b$  の値に比例する関係が得られた。しかし，この関係においてもばらつきが大きく，特に異形鉄筋 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。

以上の結果をもとに，最大付着応力  $\tau_{max}$  および最大付着応力時のすべり量  $S_{max}$  を以下の式 (2.1)，式 (2.2) のように定式化した。

$$\tau_{max} = 1.06 \sigma_B^{2/3} \quad (2.1)$$

$$S_{max} = 0.126 d_b \quad (2.2)$$

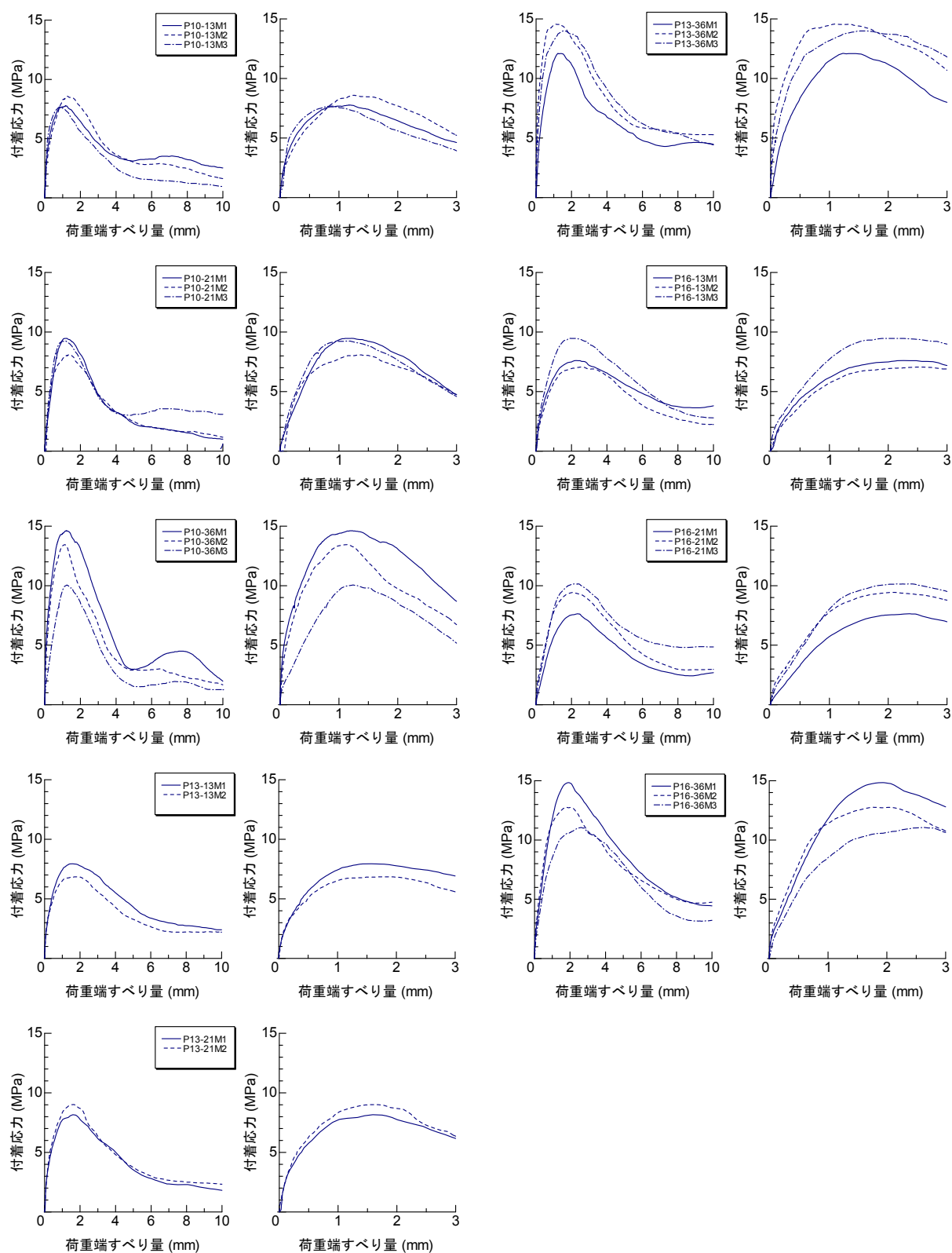


図 2.4  $\tau$  -  $S$  関係【単調載荷試験】

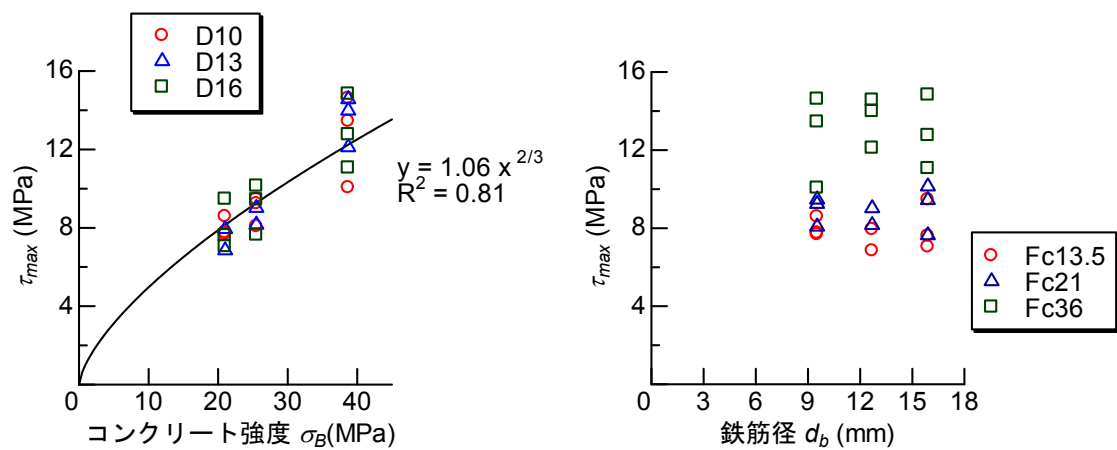


図 2.5  $\tau_{max}$  とコンクリート強度（左図）および鉄筋径（右図）の関係

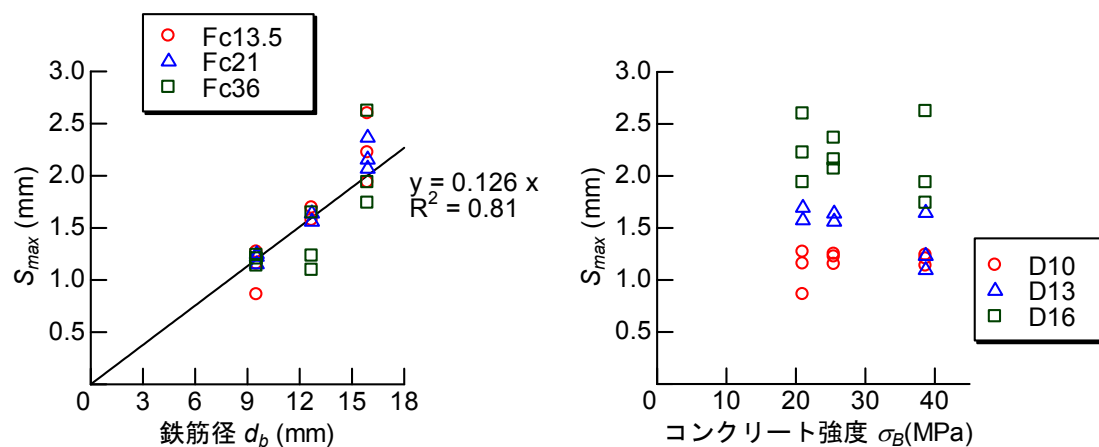


図 2.6  $S_{max}$  と鉄筋径（左図）およびコンクリート強度（右図）の関係

## (2) 繰返し載荷試験

繰返し載荷試験の $\tau$ - $S$ 関係を図 2.7 および図 2.8 に示す。左図は関係全体を、右図はすべり量が 0.5mm までの関係を示したものである。図 2.9 に $\tau$ - $S$ 関係の一部（履歴性状の例）を示す。単調載荷試験と同様に付着応力は付着区間の平均付着応力として算出し、荷重端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びを加算して算出した。

図より、繰返し載荷による $\tau$ - $S$ 関係の包絡線の低下の程度は小さいことが確認できる。この傾向は既往の研究とも一致する。しかし、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の割合を表 2.4 に示す。表より、コンクリート強度、鉄筋径および除荷点のすべり量によらず付着応力の低下量の割合はほとんどが 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加割合を表 2.5 に示す。表より、コンクリート強度、鉄筋径および除荷点のすべり量によらず、すべり量の増加割合はほとんどが 4～8%であった。

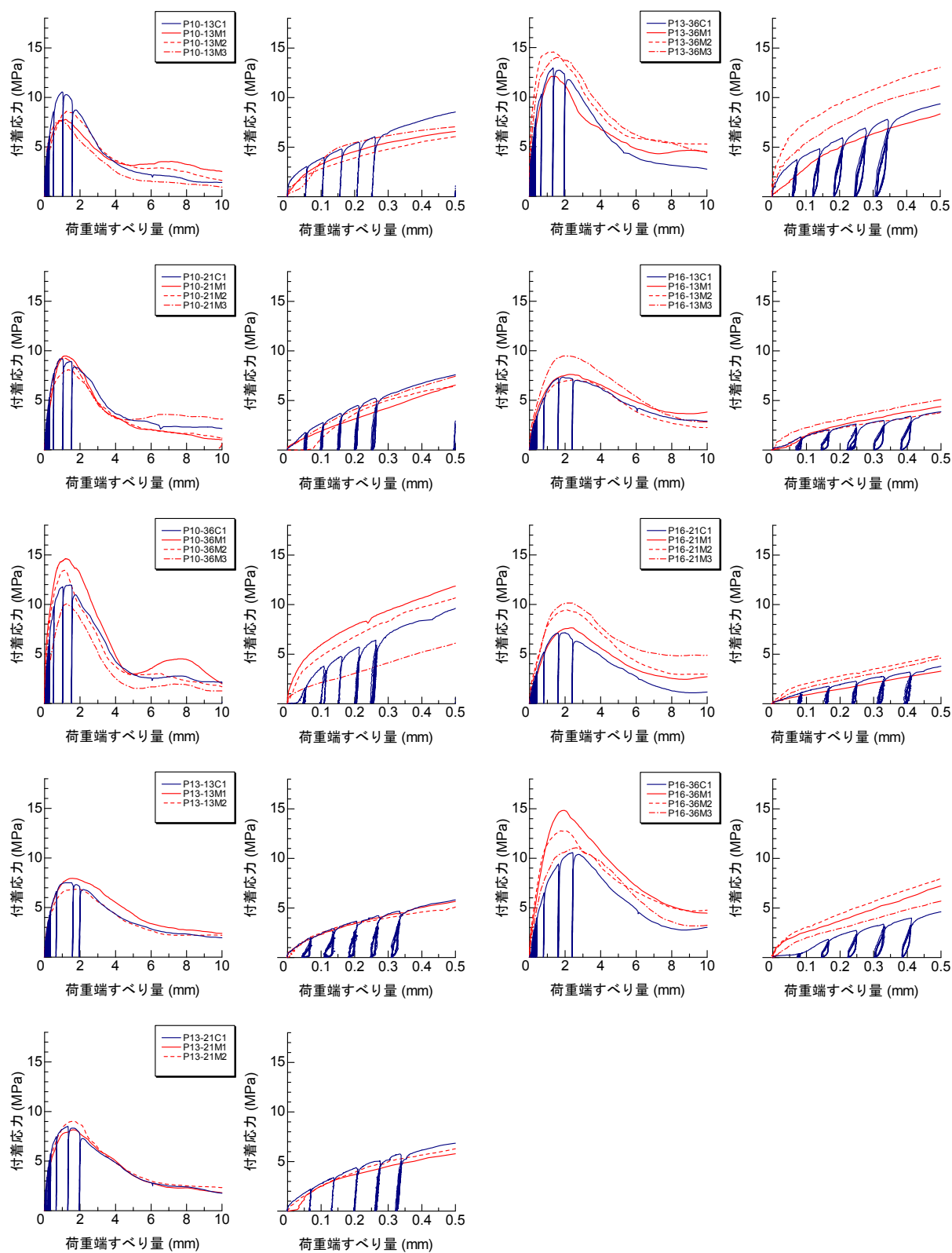


図 2.7  $\tau$  - S 関係 (繰返し載荷試験 履歴 1)



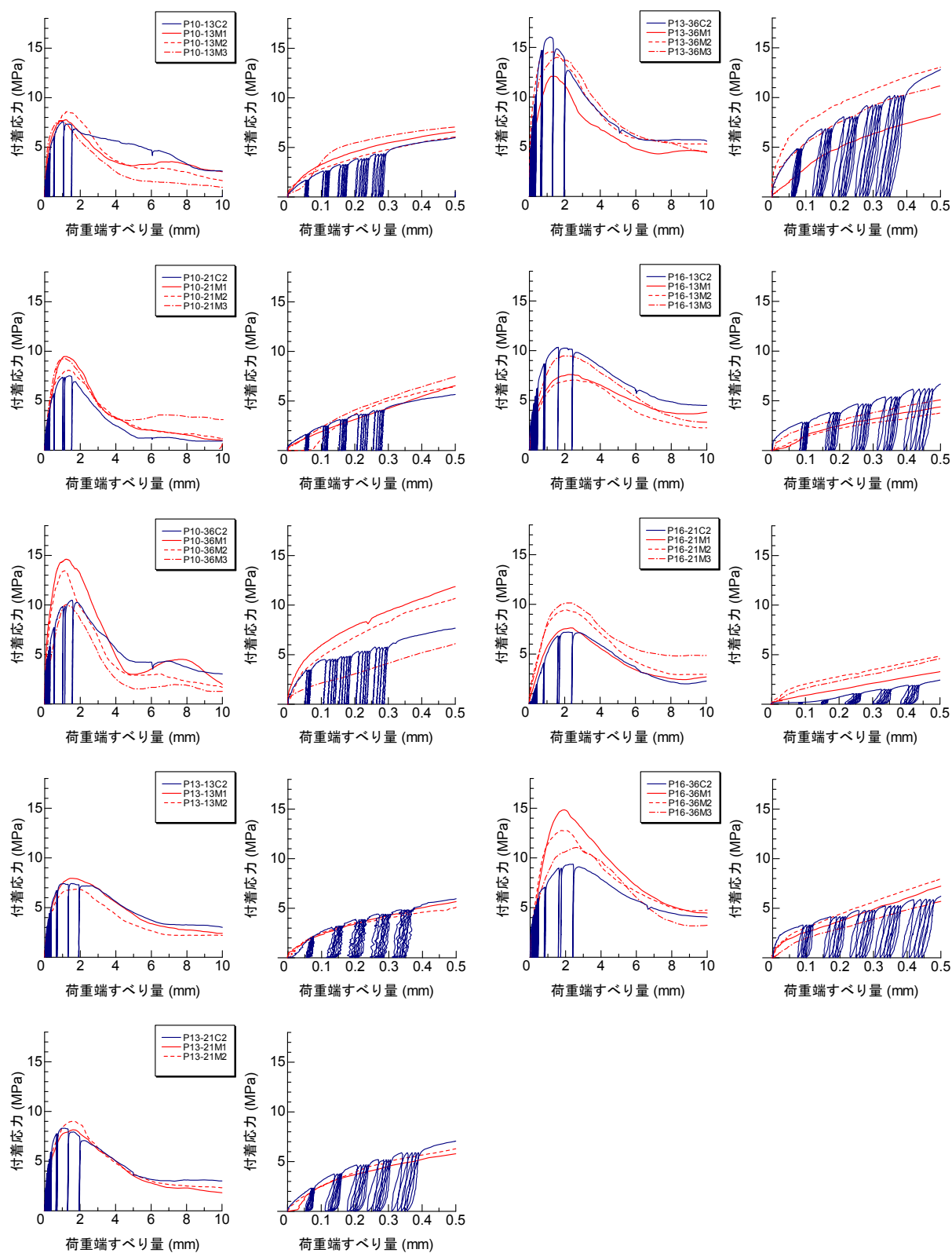


図 2.8  $\tau$  - S 関係 (繰返し載荷試験 履歴 2)

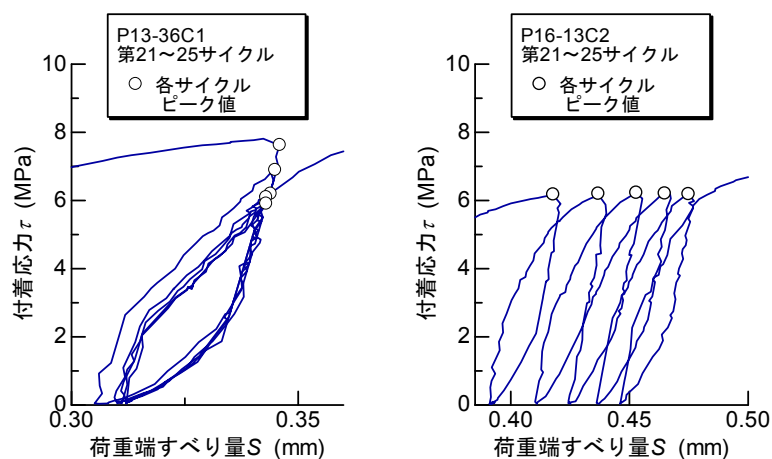


図 2.9  $\tau$ - $S$  関係（履歴性状の例）

表 2.4 付着応力の低下割合

| $S_f/d_b$<br>(%)<br>試験体 | 0.5   | 1.0   | 1.5   | 2.0   | 2.5   | 5.0   | 10.0  | 15.0  |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| P10-13C1                | 0.104 | 0.145 | 0.152 | 0.177 | 0.296 | 0.212 | 0.229 | 0.101 |
| P10-21C1                | 0.048 | 0.062 | 0.114 | 0.111 | 0.078 | 0.155 | 0.137 | 0.109 |
| P10-36C1                | -     | -     | 0.155 | 0.146 | 0.173 | 0.140 | 0.143 | 0.139 |
| P13-13C1                | 0.171 | 0.045 | 0.174 | 0.202 | 0.113 | 0.208 | 0.192 | 0.259 |
| P13-21C1                | 0.099 | 0.126 | 0.112 | 0.164 | 0.116 | 0.093 | 0.097 | 0.142 |
| P13-36C1                | 0.142 | 0.127 | 0.111 | 0.077 | 0.095 | 0.075 | 0.114 | 0.117 |
| P16-13C1                | 0.169 | 0.166 | 0.156 | 0.154 | 0.162 | 0.141 | 0.103 | 0.120 |
| P16-21C1                | -     | 0.164 | 0.110 | 0.149 | 0.113 | 0.097 | 0.083 | 0.153 |
| P16-36C1                | -     | 0.102 | 0.132 | 0.121 | 0.187 | 0.138 | 0.127 | 0.122 |

表 2.5 すべり量の増加割合

| $S_f/d_b$<br>(%)<br>試験体 | 0.5   | 1.0   | 1.5   | 2.0   | 2.5   | 5.0   |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| P10-13C2                | 0.056 | 0.076 | 0.071 | 0.053 | 0.039 | 0.061 |
| P10-21C2                | 0.076 | 0.048 | 0.045 | 0.053 | 0.039 | 0.062 |
| P10-36C2                | 0.130 | 0.155 | 0.044 | 0.057 | 0.050 | 0.078 |
| P13-13C2                | 0.029 | 0.094 | 0.049 | 0.052 | 0.048 | 0.069 |
| P13-21C2                | 0.043 | 0.072 | 0.058 | 0.055 | 0.050 | 0.095 |
| P13-36C2                | 0.068 | 0.075 | 0.080 | 0.057 | 0.037 | 0.094 |
| P16-13C2                | 0.090 | 0.070 | 0.063 | 0.057 | 0.046 | 0.082 |
| P16-21C2                | 0.012 | 0.000 | 0.033 | 0.034 | 0.032 | 0.034 |
| P16-36C2                | 0.133 | 0.093 | 0.079 | 0.051 | 0.048 | 0.064 |

## 2.3 両引き試験

### 2.3.1 実験概要

両引き試験の試験体形状を図 2.10 に示す。試験体の形状は片引き試験の試験体と同様に、用いる鉄筋の径 ( $d_b$ ) に対して比例させて設計した。試験体断面は片引き試験の試験体と同様に  $16d_b \times 16d_b$  の正方形断面とし、断面中央に異形鉄筋を 1 本配した。引張によるひび割れが生じないよう十分大きい断面としている。試験体の全長は  $50d_b$  とし、両端部に  $5d_b$  ずつ付着絶縁区間を設け付着区間を  $40d_b$  とした。鉄筋には、図に示す箇所に歪ゲージを  $5d_b$  間隔で表裏に貼付けした。コンクリートの目標強度が 21MPa の試験体 3 体に関しては、歪分布が試験体中央を境に対称であることを確認するため図中の破線で囲んだ位置にも歪ゲージを貼付けた。歪ゲージは鉄筋の縦筋に貼付け、付着性状への影響が小さくなるよう配慮した。打設は鉄筋が水平筋になるよう試験体側方から行った。

試験体一覧を表 2.6 に示す。試験体は各実験要因（コンクリート強度 3 種×鉄筋径 3 種、計 9 種）に対して、単調荷重試験および繰返し荷重試験をそれぞれ 1 体ずつ、計 18 体とする。

繰返し荷重試験の加力履歴を図 2.11 に示す。荷重端の引張応力の値で制御を行い、0～300MPa までは 50MPa ずつ、各 5 サイクルずつ、計 30 サイクルの加力履歴とした。

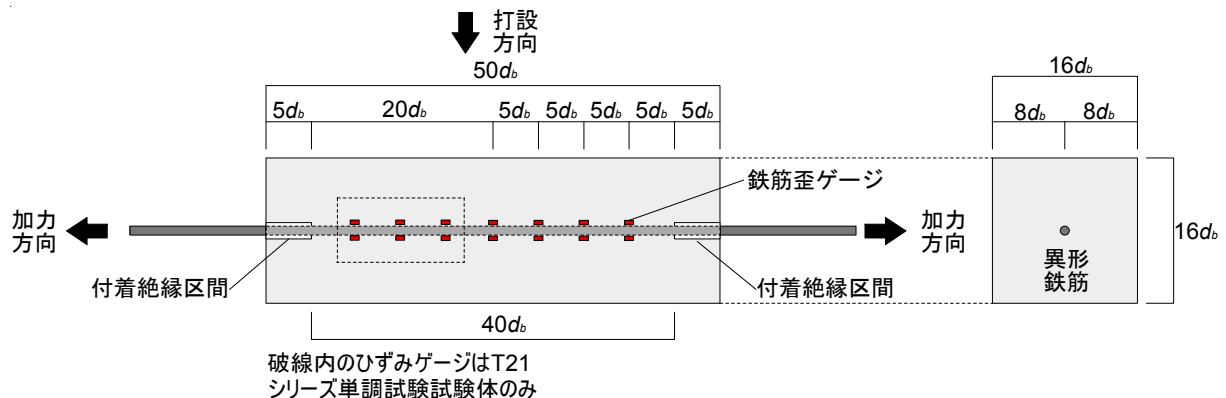


図 2.10 両引き試験 試験体形状

表 2.6 両引き試験 試験体一覧

| 試験体<br>名称 | 異形<br>鉄筋 | コンクリート<br>目標強度<br>(MPa) | 載荷<br>方法 |
|-----------|----------|-------------------------|----------|
| T10-13M   | D10      | 13.5                    | 単調 (M)   |
| T10-13C   |          |                         | 繰返し (C)  |
| T10-21M   |          | 21                      | 単調 (M)   |
| T10-21C   |          |                         | 繰返し (C)  |
| T10-36M   |          | 36                      | 単調 (M)   |
| T10-36C   |          |                         | 繰返し (C)  |
| T13-13M   | D13      | 13.5                    | 単調 (M)   |
| T13-13C   |          |                         | 繰返し (C)  |
| T13-21M   |          | 21                      | 単調 (M)   |
| T13-21C   |          |                         | 繰返し (C)  |
| T13-36M   |          | 36                      | 単調 (M)   |
| T13-36C   |          |                         | 繰返し (C)  |
| T16-13M   | D16      | 13.5                    | 単調 (M)   |
| T16-13C   |          |                         | 繰返し (C)  |
| T16-21M   |          | 21                      | 単調 (M)   |
| T16-21C   |          |                         | 繰返し (C)  |
| T16-36M   |          | 36                      | 単調 (M)   |
| T16-36C   |          |                         | 繰返し (C)  |

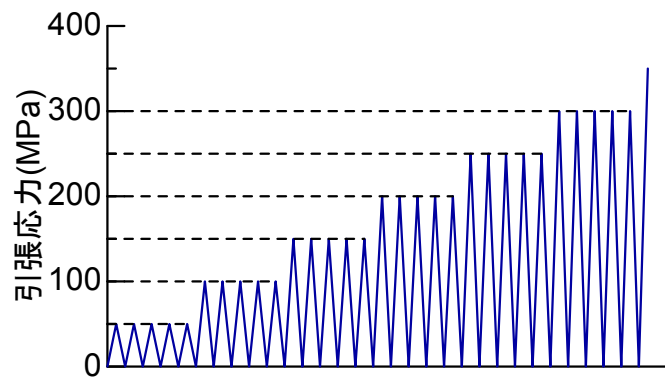


図 2.11 両引き試験 加力履歴

## 2.3.2 実験結果

### (1) 応力 - 平均歪関係

単調載荷試験の応力 - 平均歪関係を図 2.12 に、繰返し載荷試験の結果を図 2.13 にそれぞれ示す。繰返し載荷試験の結果には比較のため、単調載荷試験の結果を示す。応力は引張荷重を鉄筋断面積で除して算出した。また、平均歪は歪ゲージによる計測値の平均値とした。

図 2.12 上図は同一鉄筋を用いたコンクリート強度の異なる試験体の結果を比較したもの、同下図は同一コンクリート強度で異なる鉄筋を用いた試験体の結果を比較したものである。T10-13M 試験体および T10-21M 試験体に関しては、加力途中で歪ゲージが破損したため除外する。同一鉄筋を用いた試験体の結果を比較すると、例外（T13-13M）はあるが、コンクリート強度が高いほど剛性が大きくなる傾向が確認できる。これはコンクリート強度が高いほど付着応力の値が大きくなるためであると考えられる。同様に、同一コンクリート強度の試験体の結果を比較すると鉄筋径によらず勾配はほぼ一致する。付着区間長さは鉄筋径に比例するため、すべり量が鉄筋径に比例すると考えられる。これは片引き試験の結果とも一致する。

繰返し載荷試験の結果を見ると、繰返し載荷による包絡線の低下はほとんどない。残留歪は荷重の増加に伴い増加する傾向が見られる。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に収束していく。これは既往の研究<sup>2)</sup>と一致する結果である。

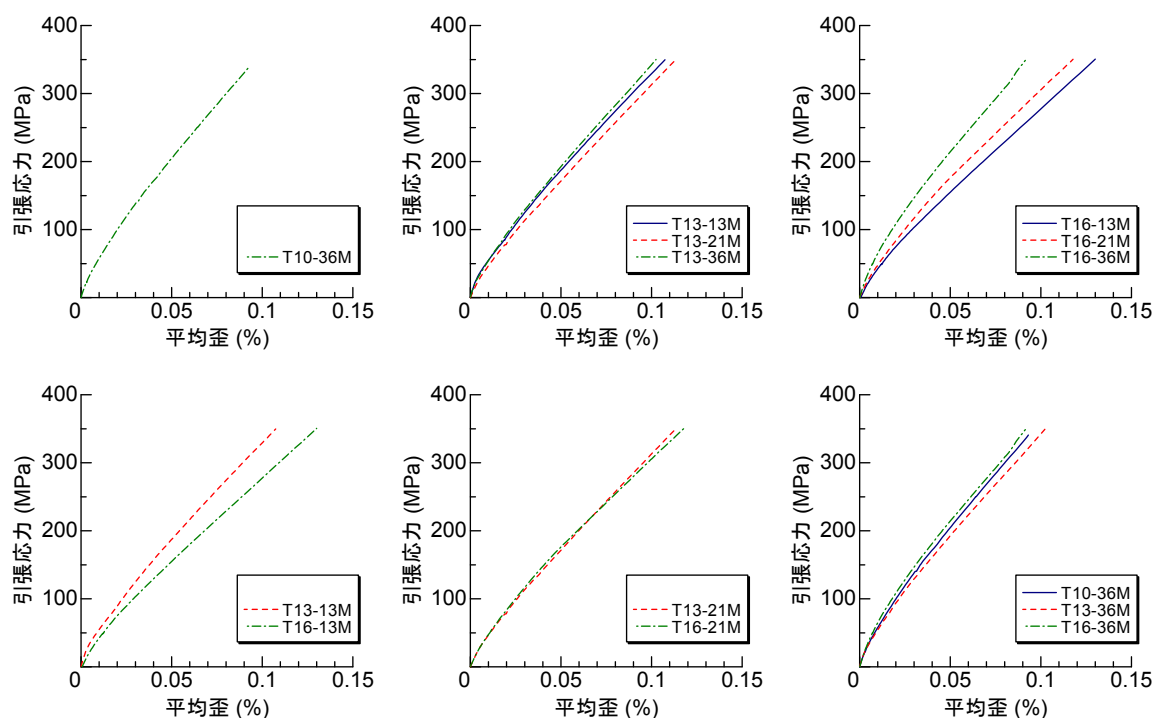


図 2.12 応力 - 平均歪関係【単調載荷試験】

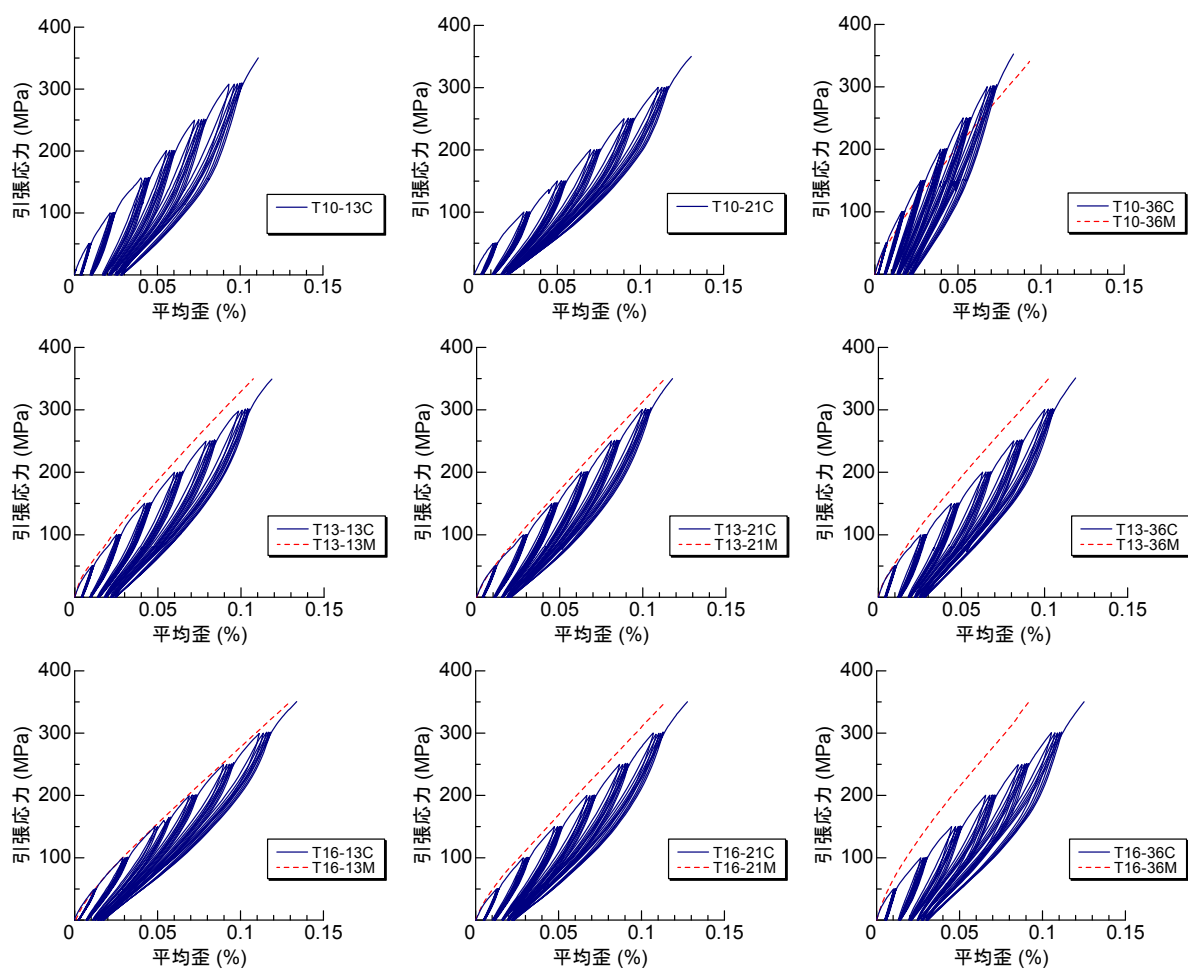


図 2.13 応力 - 平均歪関係【繰返し载荷試験】

## (2) 鉄筋歪分布

図 2.14 に単調載荷試験の歪分布の推移を鉄筋応力が 300MPa まで、50MPa 刻みで示す。T10-13M 試験体および T10-21M 試験体に関しては、加力途中で歪ゲージが複数破損したため除外する。同様に、図 2.15 に繰返し載荷試験の除荷時および再載荷時の歪分布の推移の例として、300MPa から除荷およびその後再載荷した際の歪分布の推移を示す。

T13-21M 試験体および T16-21M 試験体の結果を見ると、歪分布が試験体中央を境に概ね対称であることが確認できる。よって、歪分布は試験体中央を境に対称であり、中央ですべり量は 0 であるとして今後の検討を行う。

図 2.14 より、例外 (T13-13M) はあるが、コンクリート強度が高いほど分布の勾配が大きくなり、試験体中央の歪の値が小さくなる傾向が確認できる。コンクリート強度が高いほど付着応力の値が大きくなることに起因すると考えられる。また、同一強度の試験体の結果を比較すると、勾配は概ね等しく、試験体中央の歪の値もほぼ等しい。

図 2.15 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、加力開始時の歪の値の変化が比較的大きい。

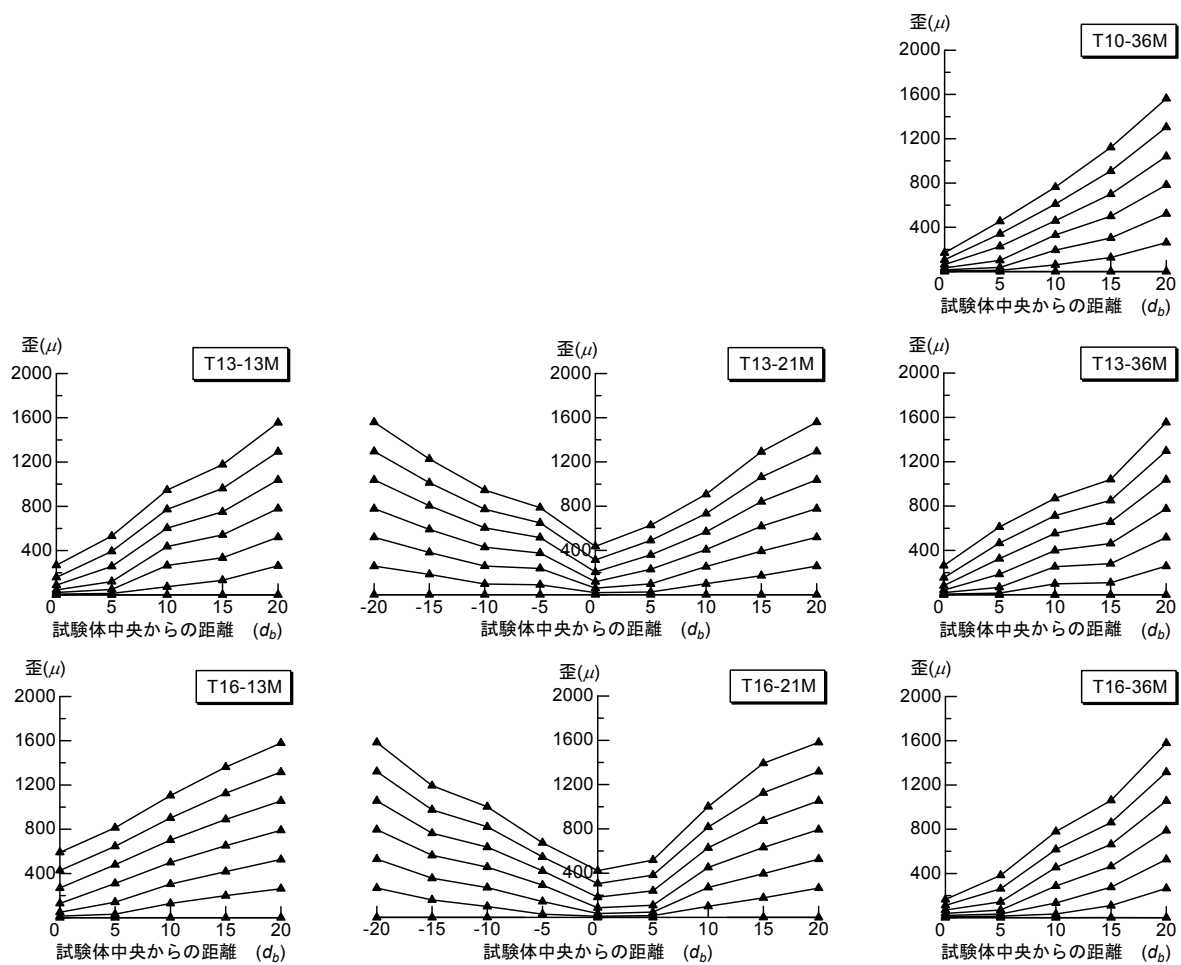


図 2.14 歪分布【単調載荷試験】



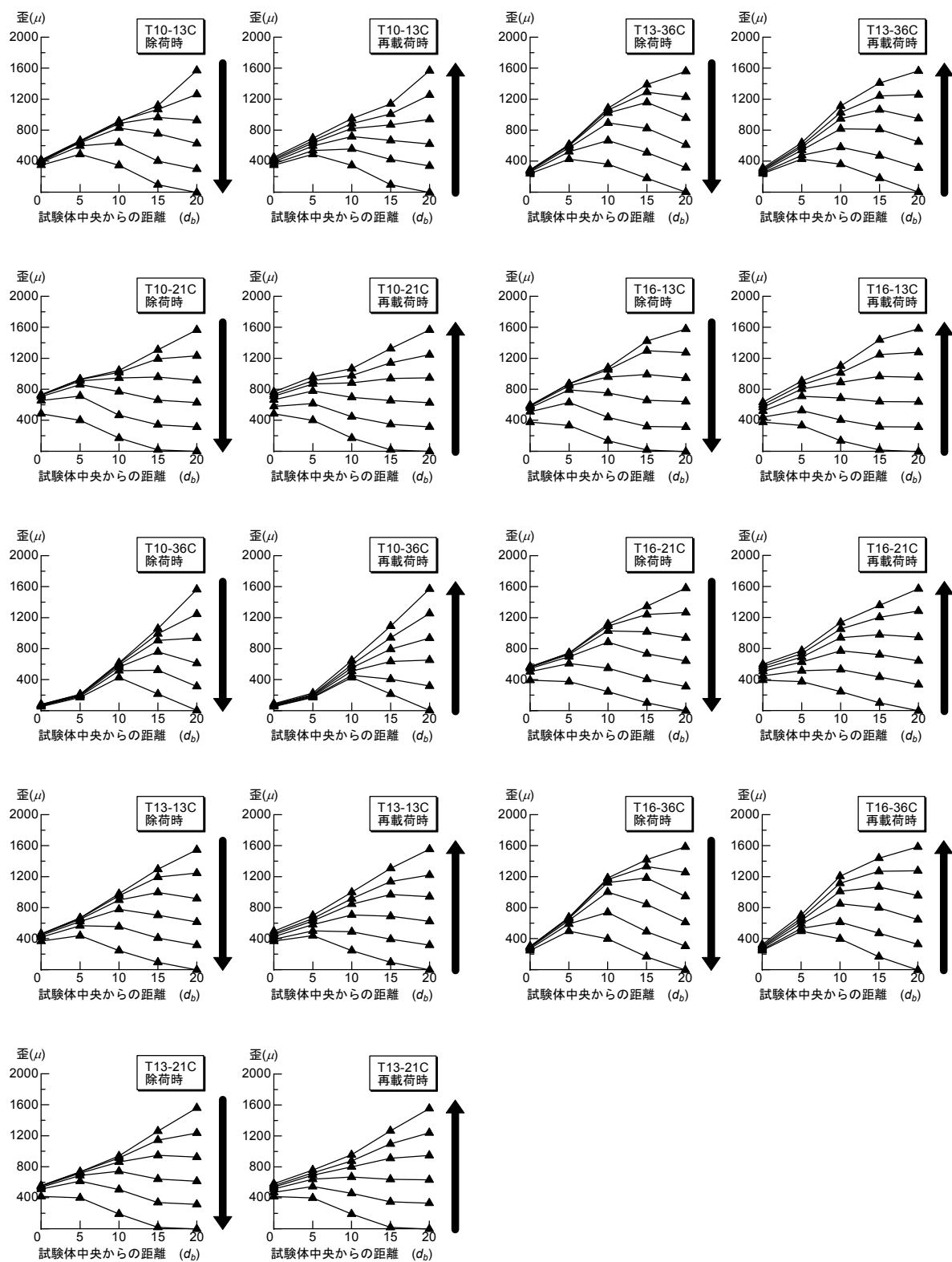


図 2.15 歪分布【繰返し載荷試験 除荷時・再載荷時】

### (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 $\tau$ - $S$ ）関係を図 2.16 および図 2.18 に示す。これらは引張応力が 350MPa まで载荷したものである。

付着応力は、以下の式（2.3）より、歪を計測した区間での平均付着応力として算出した。

$$\tau = \frac{E_s A_s}{\phi} \frac{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i}{5d_b} \quad (2.3)$$

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、 $5d_b$ ：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。

単調载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>1)</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。

繰返し载荷試験の結果を単調载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明確な付着応力の低下は確認できない。しかし、同一応力下で 5 サイクルの繰返し加力を行った履歴を見ると、ピーク点は徐々に右下がりに低下していくことが確認できる。

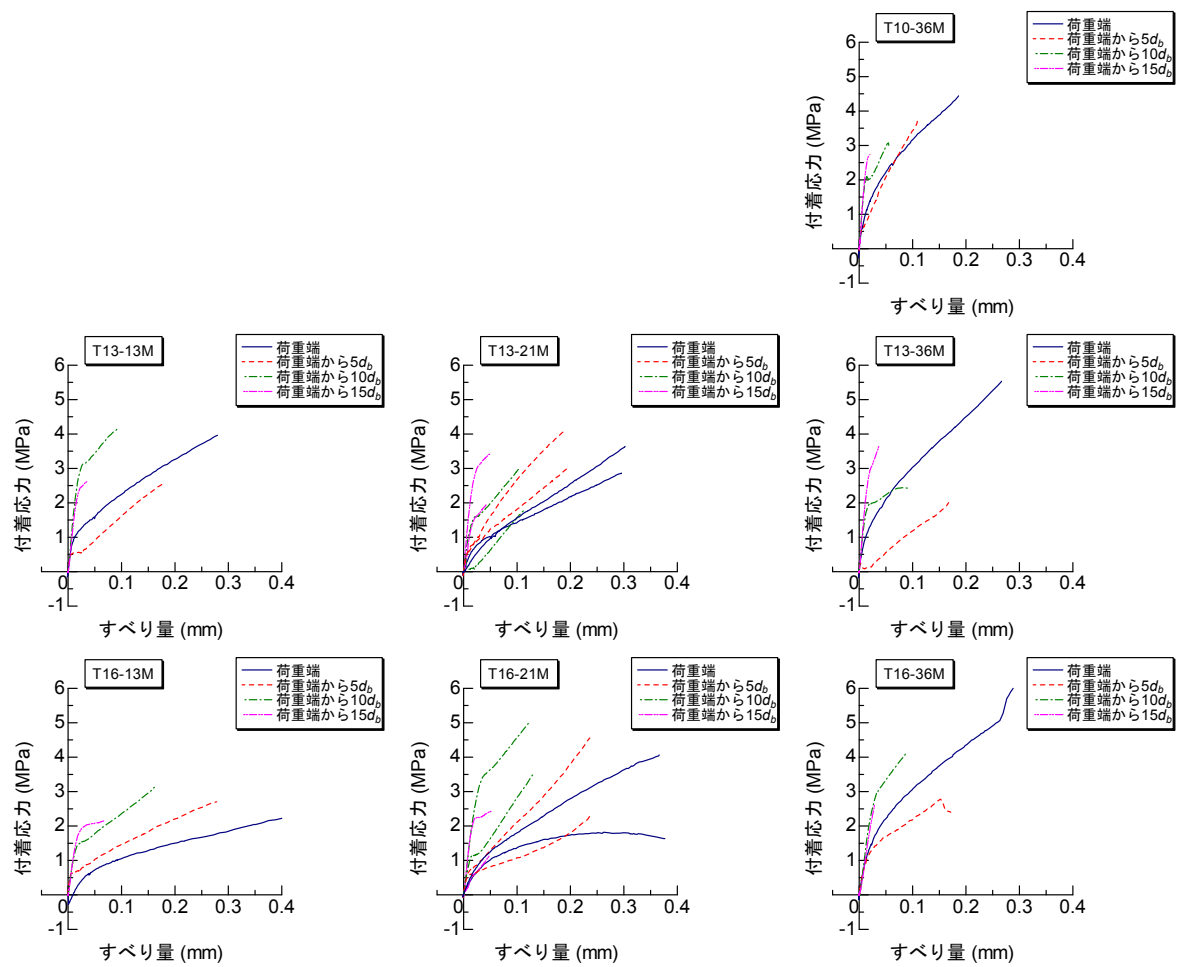


図 2.16  $\tau$  - S 関係【単調載荷試験】

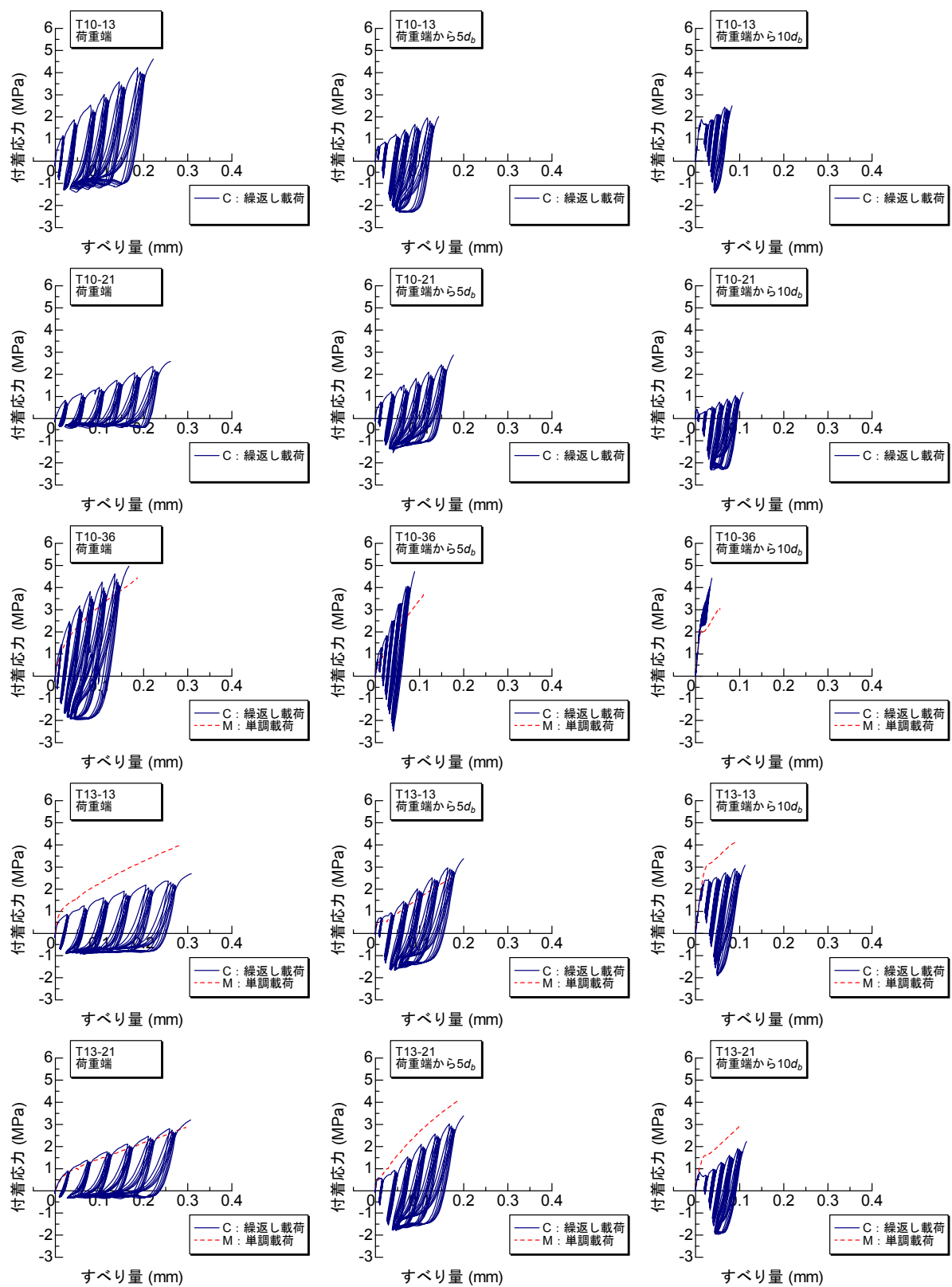


図 2.17  $\tau$  -  $S$  関係【繰返し載荷試験】

(a)

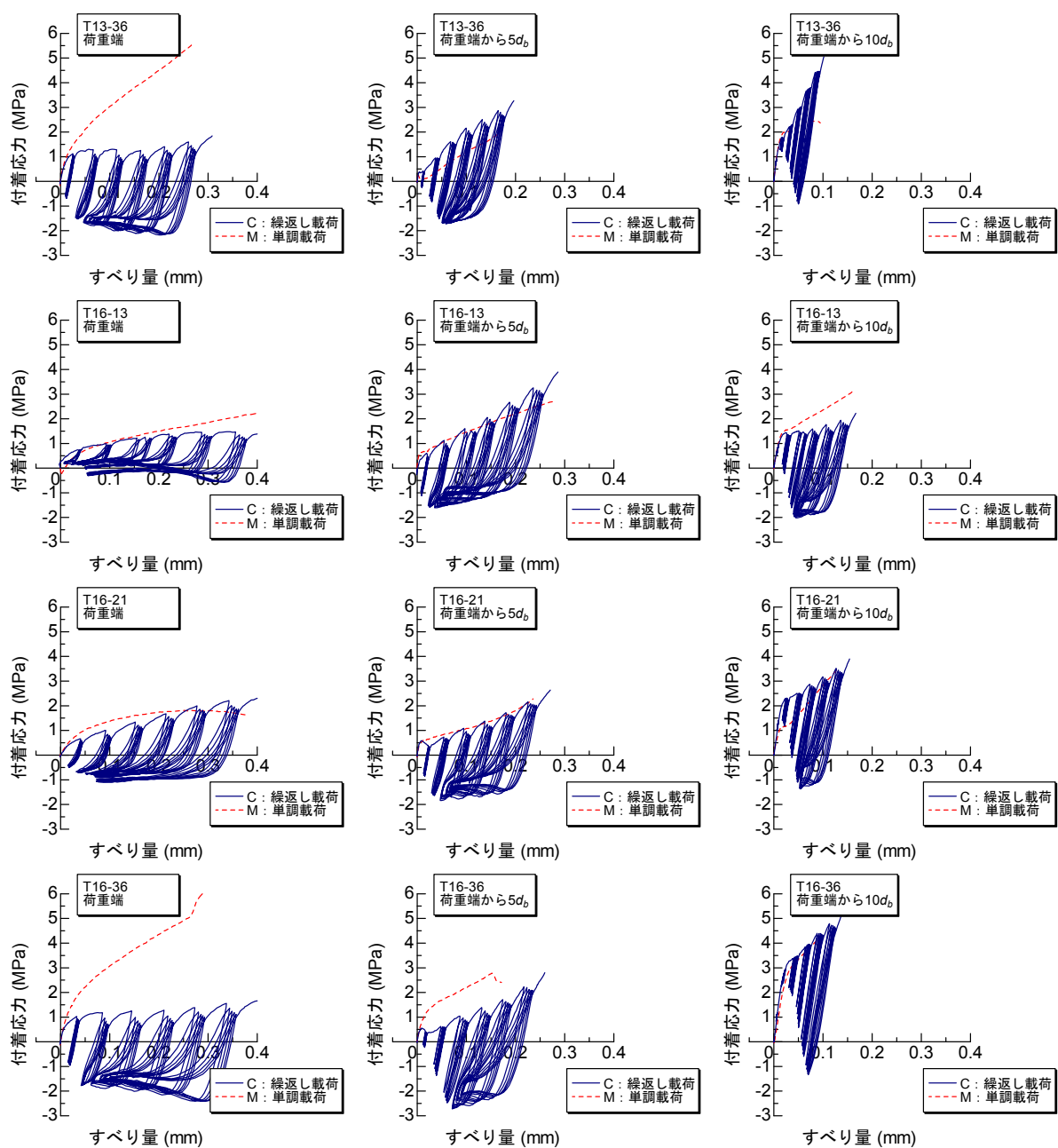


図 2.18  $\tau$  -  $S$  関係【繰返し載荷試験】

(b)

## 2.4 付着解析

### 2.4.1 履歴モデル

#### (1) 包絡線

片引き試験の実験結果をもとに、局所における $\tau$ - $S$ 関係の履歴モデルを構築する。履歴モデルは、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 $S_{max}$ でそれぞれ無次元化する。 $\tau_{max}$ および $S_{max}$ の値は、片引き試験の実験結果より、それぞれ以下の式(2.4) および式(2.5) で与える。

$$\tau_{max} = 1.06\sigma_B^{2/3} \quad (2.4)$$

$$S_{max} = 0.126 d_b \quad (2.5)$$

単調载荷試験の結果より、 $S/S_{max}$ が0～1までの付着応力の平均値(計25体)をプロットしたものを図2.19に示す。ピーク(点C)までを3直線で、表すこととした。同図に履歴モデルの包絡線形状を示す。点A～Cの座標は以下のとおりである。

点A (0.1, 0.40)      点B (0.5, 0.85)      点C (1.0, 1.00)

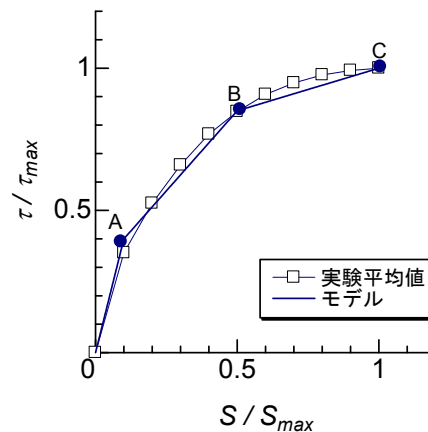


図 2.19 履歴モデルの包絡線形状

## (2) 履歴形状

履歴モデルの履歴形状を図 2.20 に示す。除荷開始点を点 M ( $S_m, \tau_m$ ) とし、勾配  $K$  で降下する。この時の勾配  $K$  は、既往の研究<sup>3)</sup>と同様に以下の式 (2.6) で与える。除荷後の履歴形状は以下の①～④に場合分けして与える。また、スリップ域に関しても同様に既往の研究<sup>3)</sup>と同様の式 (2.7) で与える。

$$K = 6.89 S_m^{-0.208} \quad (2.6)$$

$$\frac{\tau}{\tau_{max}} = 0.01 S \pm 0.153 \quad (2.7)$$

- ① スリップ域 (式 (2.7)) に達する前に再載荷する場合 (点 E)

$$E \rightarrow N \rightarrow M' \rightarrow L$$

- ② スリップ域上、除荷終了点のすべり量が点 P のすべり量より大きい場合 (点 F)

$$F \rightarrow R \rightarrow N \rightarrow M' \rightarrow L$$

点 F の座標を( $S_f, \tau_f$ )とし、勾配  $K_f$  で点 R まで上昇。ここで、 $K_f = 6.89 S_f^{-0.208}$  とする。点 R の座標は付着応力の値が 0 となる点であり、以下のようになる。

$$\text{点 R } (S_f - \frac{\tau_f}{K_f}, 0)$$

- ③ スリップ域上、除荷終了点のすべり量が点 P のすべり量より小さい場合 (点 G)

$$G \rightarrow S \rightarrow P \rightarrow N \rightarrow M' \rightarrow L$$

点 G の座標を( $S_g, \tau_g$ )とし、勾配  $K_g$  で点 S まで上昇。点 P について詳細は後述する。仮に ( $S_p, 0$ ) とする。点 S は以下の式 (2.8) との交点である。

$$\frac{\tau}{\tau_{max}} = 0.01(S - S_p) \quad (2.8)$$

- ④ すべり量の正負が入れ替わる場合 (点 H)

$$H \rightarrow N \rightarrow M' \rightarrow L$$

ここで、点 N、点 M'、点 P の座標はそれぞれ以下のとおりである。点 N は ME 上の点、点 M' は点 M と付着応力が等しい点、点 P は付着応力が 0 ですべり量が除荷開始点のすべり量  $S_m$  の  $\gamma$  倍の点である。

$$\text{点 N } (S_m - \frac{(1-\alpha)\tau_m}{K}, \alpha\tau_m)$$

$$\text{点 M' } ((1+\beta)S_m, \tau_m)$$

$$\text{点 P } (\gamma S_m, 0)$$

ここで、 $\alpha$ と $\beta$ はそれぞれ付着応力の低下率とすべり量の増加率である。片引き試験の結果をもとに以下のように決定した。

$$\alpha = 0.85 \quad \beta = 0.06 - 0.01(n - 1)$$

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。また、 $\gamma$ は再載荷時の履歴を決定する係数であり、実験結果に合うように $\gamma = 0.6$  と決定した。

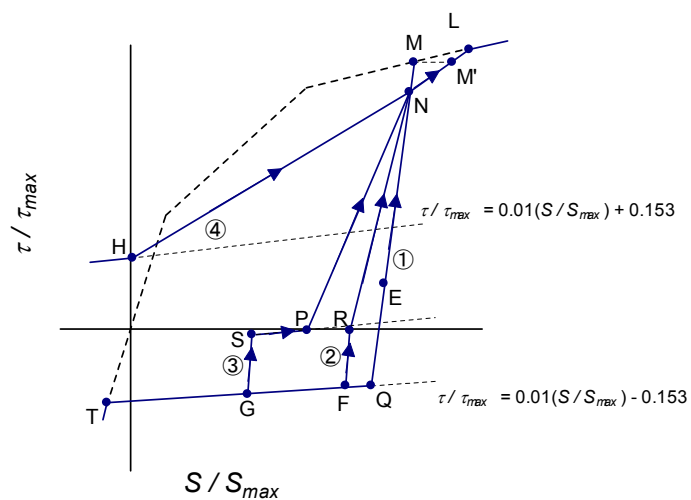


図 2.20 履歴モデルの履歴性状



## 2.4.2 付着解析

### (1) 解析方法

構築した履歴モデルを用いて、両引き試験を対象とした付着解析を行う。解析方法については、式(2.9)～式(2.11)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、試験体中央部から逐次計算を行った。両引き試験は試験体中央を境に対称な現象であるため、解析対象は試験体中央から試験体端部までの  $20d_b$  の付着区間とする。

$$\tau_x = f(S_x) \quad (2.9)$$

$$P_{sx,i+1} = P_{sx,i} + \tau_x \cdot \phi \cdot dx \quad (2.10)$$

$$S_{x,i+1} = S_{x,i} + \frac{P_{sx,i+1} + P_{sx,i}}{2E_s A_s} \cdot dx \quad (2.11)$$

ここで、 $\tau_x$ ：付着応力、 $S_x$ ：すべり量、 $\phi$ ：主筋の周長、 $E_s$ ：主筋の弾性係数、 $A_s$ ：主筋断面積、 $P_{sx}$ ：主筋引張力である。

## (2) 解析結果

解析より得られた応力ー平均歪の関係を図 2.21 および図 2.22 に示す。図 2.21 は単調載荷試験の解析結果である。同左図は同一鉄筋を用いた試験体を対象とした解析結果を比較した図，同右図は同一コンクリート強度試験体を対象として解析結果を比較した図である。同一鉄筋を用いた試験体の解析結果を見ると，実験結果同様に，コンクリート強度が高くなるほど剛性が高くなる傾向をうまく表現できている。また，同一コンクリート強度の試験体の解析結果を見ると，実験結果同様に鉄筋の径によらず，概ね同等の結果が得られた。図 2.22 は繰返し載荷試験の解析結果である。同図より，繰返し載荷による包絡線の低下がほとんどない点や，残留歪の値が，ほぼ一定の値に収束していく点など，実験結果と同様の傾向が得られた。

解析より得られた歪分布の推移を図 2.23 および図 2.24 に示す。図 2.23 は単調載荷試験の解析結果であり，引張応力が 300MPa までを 50MPa ごとに示している。同図より，解析結果が実験結果を概ねよく表現できていることが確認できる。しかし，試験体中央部分で実験値と解析値に差異が見られ，今後の検討課題である。図 2.24 は繰返し載荷試験の除荷時および再載荷時の歪分布の推移を示したものである。例外はあるものの，実験結果と解析結果は概ね一致しており，残留歪の値についても概ね評価できている。

付着応力ーすべり量関係の例として T10-36C 試験体の解析結果と実験結果を図 2.25 に示す。同より，包絡線および履歴挙動ともに解析結果が十分表現できていることが確認できる。

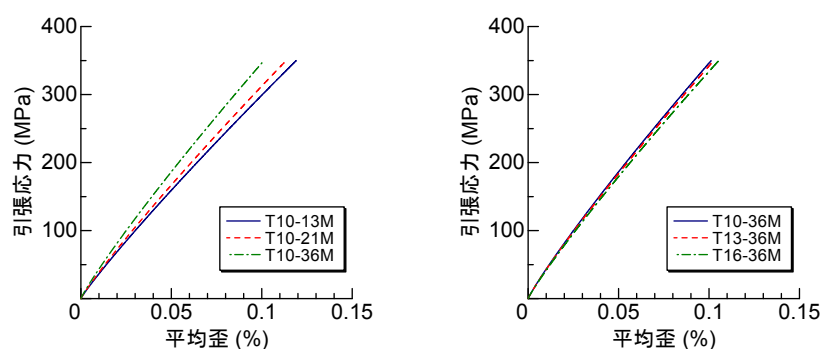


図 2.21 引張応力－平均歪関係（単調載荷試験）【解析結果】

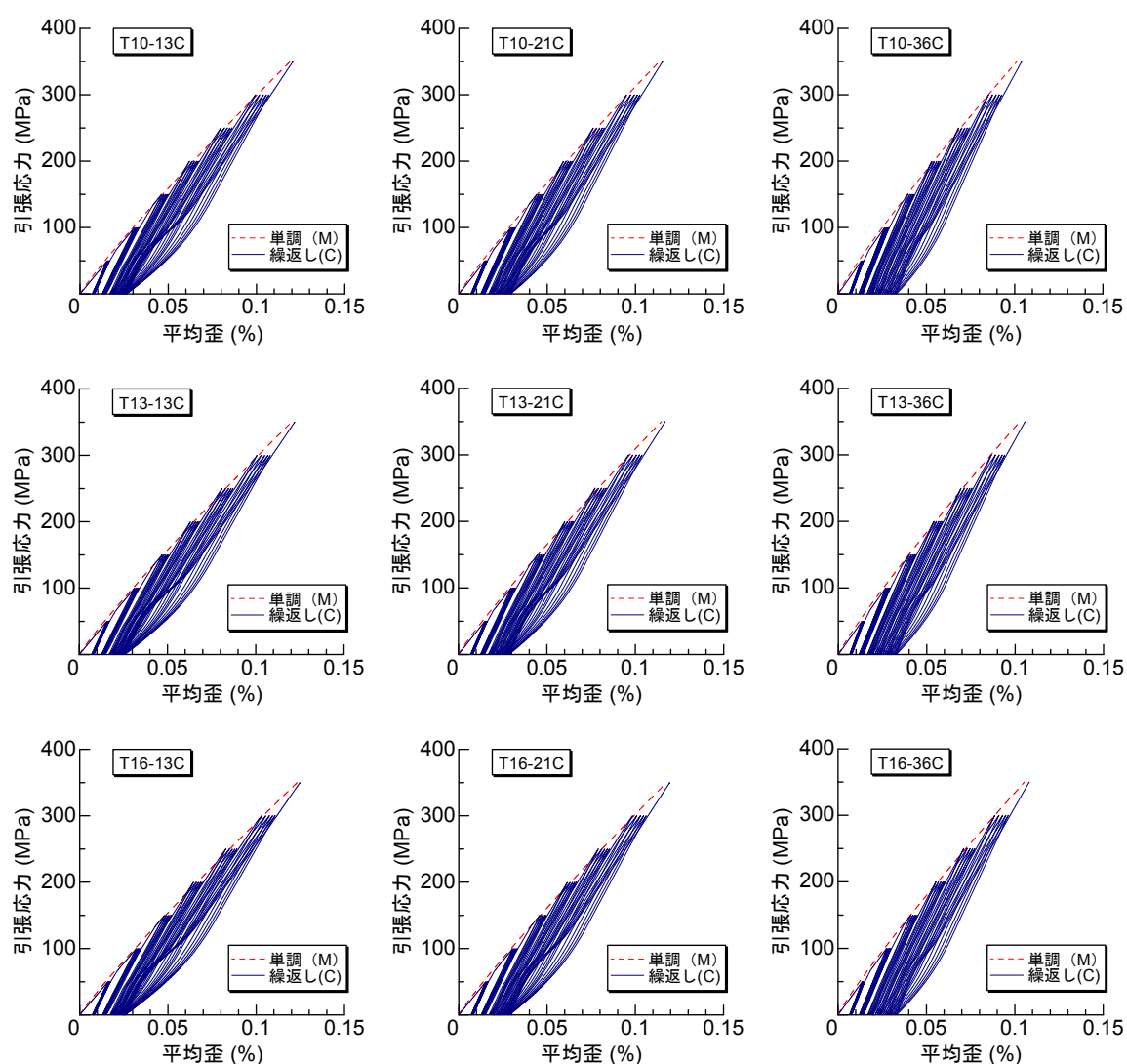


図 2.22 引張応力－平均歪関係（繰返し載荷試験）【解析結果】

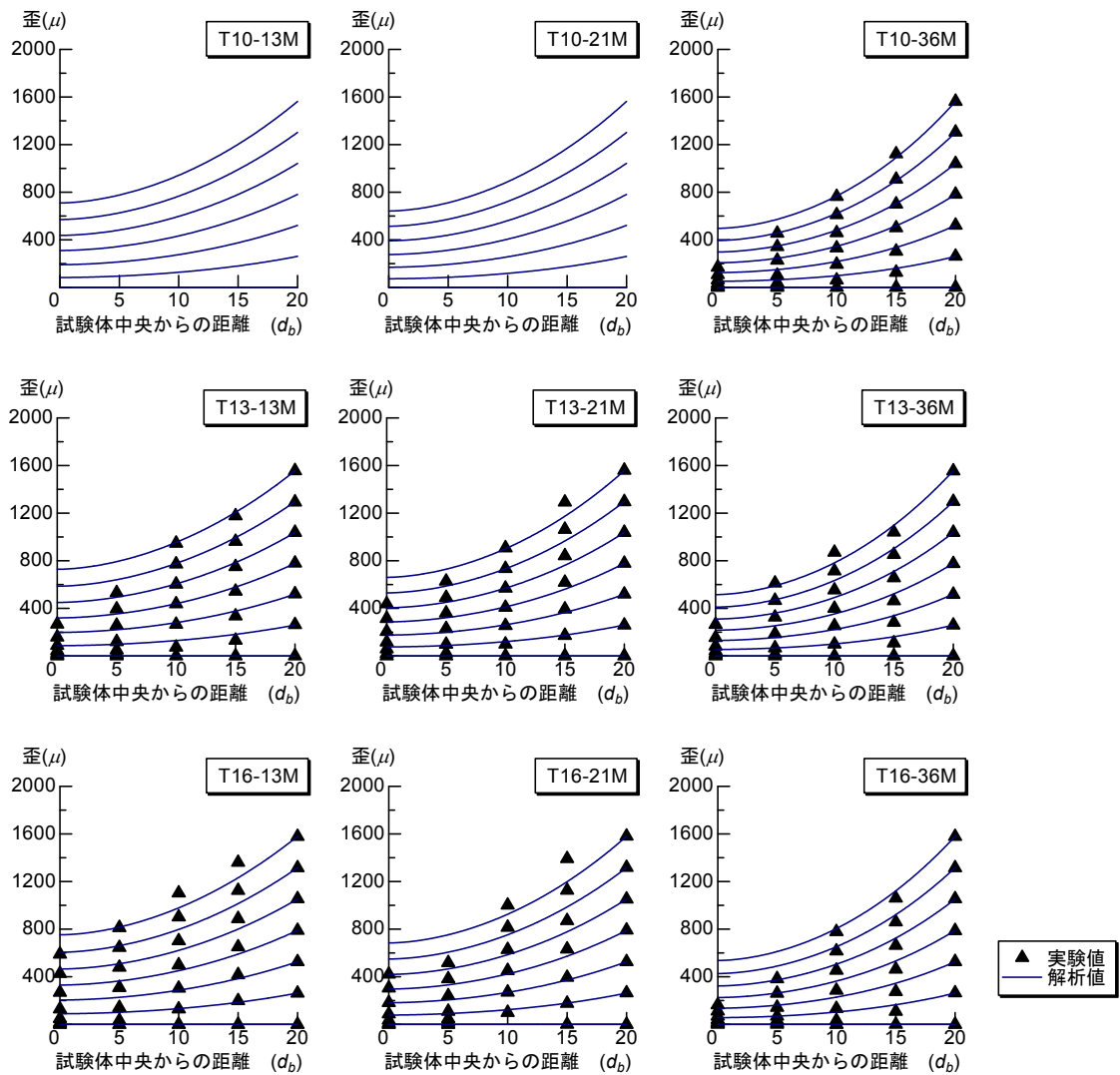


図 2.23 歪分布（単調載荷試験）【解析結果】

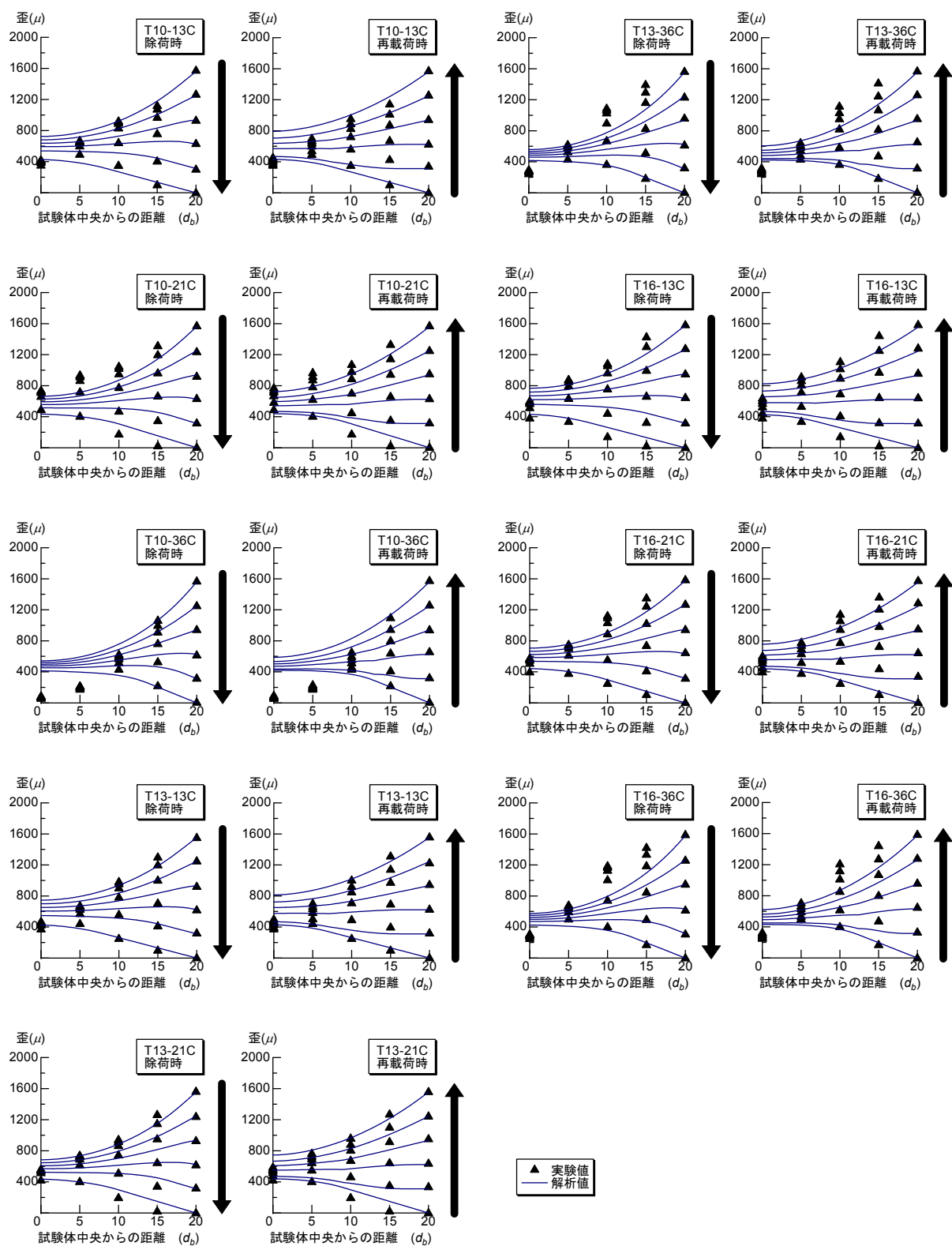


図 2.24 歪分布（繰返し載荷試験）【解析結果】

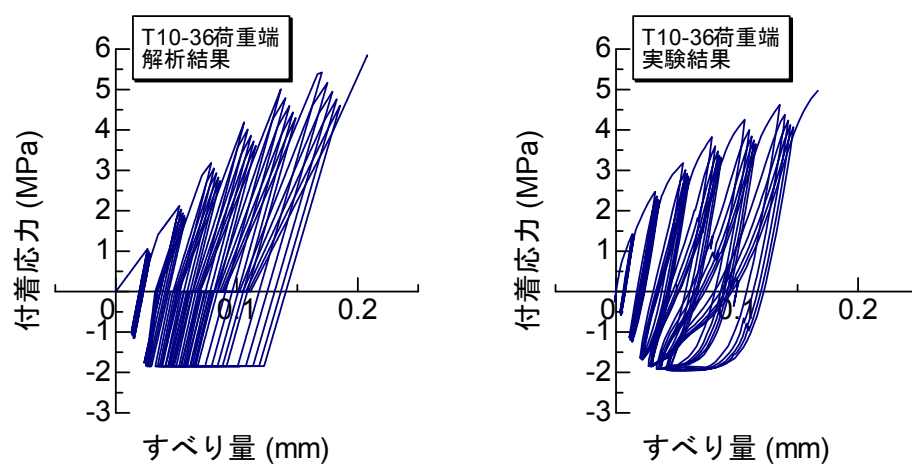


図 2.25  $\tau$  -  $S$  関係の例【解析結果】

## 2.5 まとめ

マッシブなコンクリートを対象とし、鉄筋コンクリート部材の付着性状に与える、コンクリート強度および鉄筋径の影響を把握するため、繰返しの片引き試験および両引き試験を行った。片引き試験の結果より、各実験要因が局所付着性状に与える影響を把握するとともに、最大付着応力 $\tau_{max}$ および最大付着応力時のすべり量 $S_{max}$ の値の定式化を行った。また、両引き試験より、付着長が長く実部材に近い条件下での付着性状を把握した。

片引き試験の実験結果をもとに、局所における付着応力-すべり量関係履歴モデルを構築し、構築した履歴モデルを用いて両引き試験を対象とした付着解析を行った。解析結果と実験結果とを比較すると、解析結果は実験結果を概ね評価できることが確認できた。

## 第3章 横拘束力のある場合の付着性状

### 3.1 はじめに

RC の実部材中では割裂ひび割れが発生した後も、横補強筋により主筋に拘束力が作用し、急激な付着力の低下を防止している。このため、横補強筋のある試験体および横拘束力を直接作用させることで横補強筋による拘束力を模擬した試験体の付着性状に関する研究は現在までに数多く行われている。しかし、横拘束力と繰返し荷重が付着性状に与える影響について合わせて検討している研究はない。

本章では、繰返し荷重下における局所付着性状に与える横拘束力の影響の把握を目的とし、横拘束力をオイルジャッキにより直接作用させた状態<sup>6)</sup>での繰返し引抜試験を行う。

また、本実験の結果を用いて横拘束力が作用している場合の付着応力-すべり量関係の履歴モデルの構築を行い、片持梁型試験体の引抜試験を対象とした付着解析を行い、考察を加える。



## 3.2 実験概要

### 3.2.1 試験体

試験体形状を図 3.1 に示す。試験体断面は  $224 \times 224\text{mm}$  の正方形断面とし、断面中央に異形鉄筋 D16 を配した。試験体の幅は  $112\text{mm}$  とし、両端部に  $24\text{mm}$  ずつ付着絶縁区間を設け付着区間を  $64\text{mm}$  ( $4d_b$ ) とした。また、主筋が横補強筋に拘束されている状態を表現するために、断面中央にスポンジと鉄板でスリットを設け、コンクリートブロックを完全に分離している。

試験体一覧を表 3.1 および表 3.2 に示す。本実験の実験要因は横拘束力 3 水準およびコンクリート強度 2 種とした。各実験要因に対して、単調載荷試験 3 体、繰返し載荷試験 5 体（加力履歴 5 種）とし、試験体総数は 48 体である。

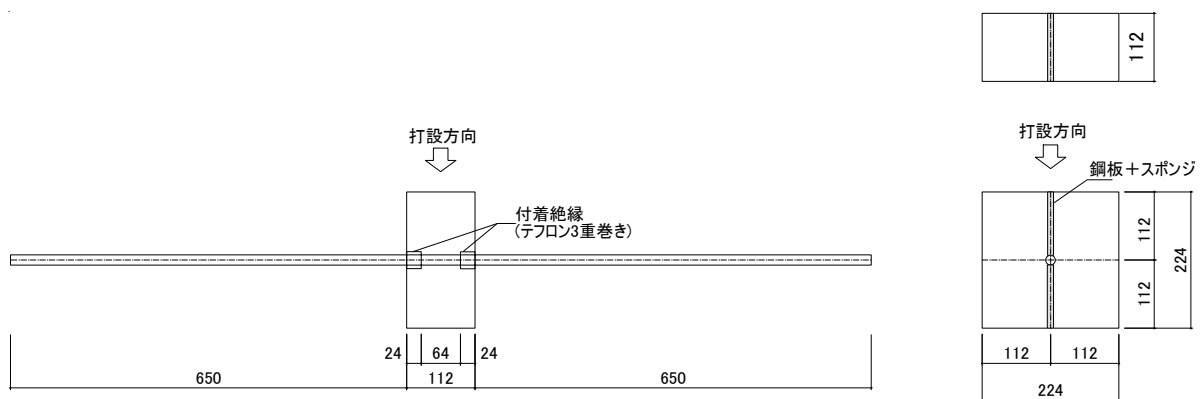


図 3.1 試験体形状

表 3.1 試験体一覧【単調載荷試験】

| 試験体<br>No. | 目標強度<br>(MPa) | 横拘束         |               |
|------------|---------------|-------------|---------------|
|            |               | 拘束力<br>(kN) | 拘束応力<br>(MPa) |
| 1～3        | 36            | 2.00        | 1.97          |
| 4～6        |               | 6.00        | 5.90          |
| 7～9        |               | 10.00       | 9.83          |
| 10～12      | 21            | 2.00        | 1.97          |
| 13～15      |               | 6.00        | 5.90          |
| 16～18      |               | 10.00       | 9.83          |

表 3.2 試験体一覧【繰返し載荷試験】

| 試験体<br>No. | 目標強度<br>(MPa) | 横拘束         |               | 加力<br>履歴 |
|------------|---------------|-------------|---------------|----------|
|            |               | 拘束力<br>(kN) | 拘束応力<br>(MPa) |          |
| 19         | 36            | 2.00        | 1.97          | C1       |
| 20         |               | 6.00        | 5.90          |          |
| 21         |               | 10.00       | 9.83          |          |
| 22         |               | 2.00        | 1.97          | C2       |
| 23         |               | 6.00        | 5.90          |          |
| 24         |               | 10.00       | 9.83          |          |
| 25         |               | 2.00        | 1.97          | C3       |
| 26         |               | 6.00        | 5.90          |          |
| 27         |               | 10.00       | 9.83          |          |
| 28         |               | 2.00        | 1.97          | C4       |
| 29         |               | 6.00        | 5.90          |          |
| 30         |               | 10.00       | 9.83          |          |
| 31         |               | 2.00        | 1.97          | C5       |
| 32         |               | 6.00        | 5.90          |          |
| 33         |               | 10.00       | 9.83          |          |
| 34         | 21            | 2.00        | 1.97          | C1       |
| 35         |               | 6.00        | 5.90          |          |
| 36         |               | 10.00       | 9.83          |          |
| 37         |               | 2.00        | 1.97          | C2       |
| 38         |               | 6.00        | 5.90          |          |
| 39         |               | 10.00       | 9.83          |          |
| 40         |               | 2.00        | 1.97          | C3       |
| 41         |               | 6.00        | 5.90          |          |
| 42         |               | 10.00       | 9.83          |          |
| 43         |               | 2.00        | 1.97          | C4       |
| 44         |               | 6.00        | 5.90          |          |
| 45         |               | 10.00       | 9.83          |          |
| 46         |               | 2.00        | 1.97          | C5       |
| 47         |               | 6.00        | 5.90          |          |
| 48         |               | 10.00       | 9.83          |          |

### 3.2.2 実験方法

図 3.2 に実験方法を示す。テフロンシートを介して試験体を加力台に設置し，試験体を両側から挟み込むように，反力用鋼板，センターホールジャッキ，ロードセルを設置する。横拘束力は，オイルジャッキ 2 個を用いて，試験体上部から直接横拘束力を作用させながら加力を行う。加力中は横拘束力を一定の目標値に保持した。また，加力は左右のセンターホールジャッキを別々に制御することで加力を行った。

計測項目は，引抜荷重，横拘束力，荷重端・自由端側の変形量およびひび割れ幅である。ひび割れ幅はスリット間変形を $\pi$ ゲージを用いて計測した。

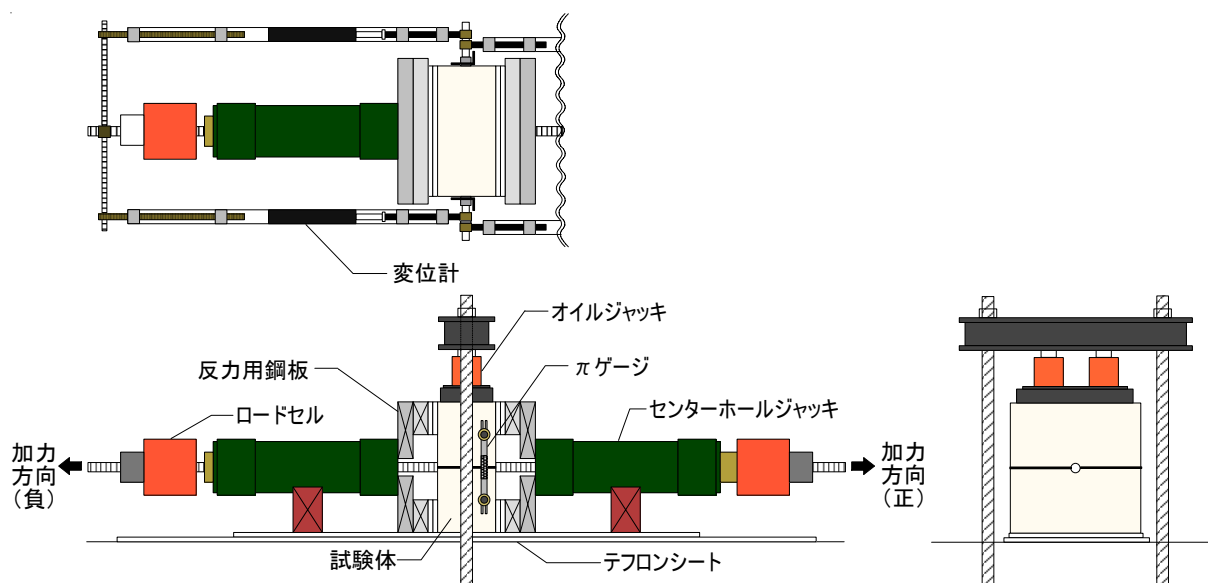


図 3.2 実験方法

### 3.2.3 加力履歴

繰返し載荷試験の加力履歴を図 3.3 および図 3.4 に示す。加力履歴はシリーズ I 3 種 (C1, C2, C3) とシリーズ II 2 種 (C4, C5) の計 5 種とした。

シリーズ I の加力履歴は、ピーク後の軟化域も含めて  $\tau$ - $S$  関係全体で繰返し載荷の影響を把握する加力履歴である。目標値は、 $S = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0\text{mm}$  の 13 サイクルとした。C1 は載荷除荷の繰返し載荷、C2 は除荷後すべり量を  $0\text{mm}$  まで戻す繰返し載荷、C3 は正負繰返し載荷の加力履歴とした。

シリーズ II の加力履歴は、ピーク前のすべり量が比較的小さい範囲の履歴性状を確認する履歴とした。付着応力の値で制御し、定めたすべり量 ( $S = 0.1, 0.3, 0.5\text{mm}$ ) に初めて達したときの付着応力で 5 サイクルずつ加力を行う。図 3.4 中の  $\tau_x$  は初めてすべり量が  $x\text{ mm}$  に達したときの付着応力の値である。付着応力が目標値まで達しない場合は鉄筋を単調に引き抜くこととした。また、繰返し加力の途中ですべり量が次の目標値に達した場合は前の目標値で 5 サイクル加力を行い、その後鉄筋を単調に引き抜くこととした。C4 は除荷後すべり量を  $0\text{mm}$  まで戻す繰返し載荷、C5 は正負繰返し載荷の加力履歴とした。

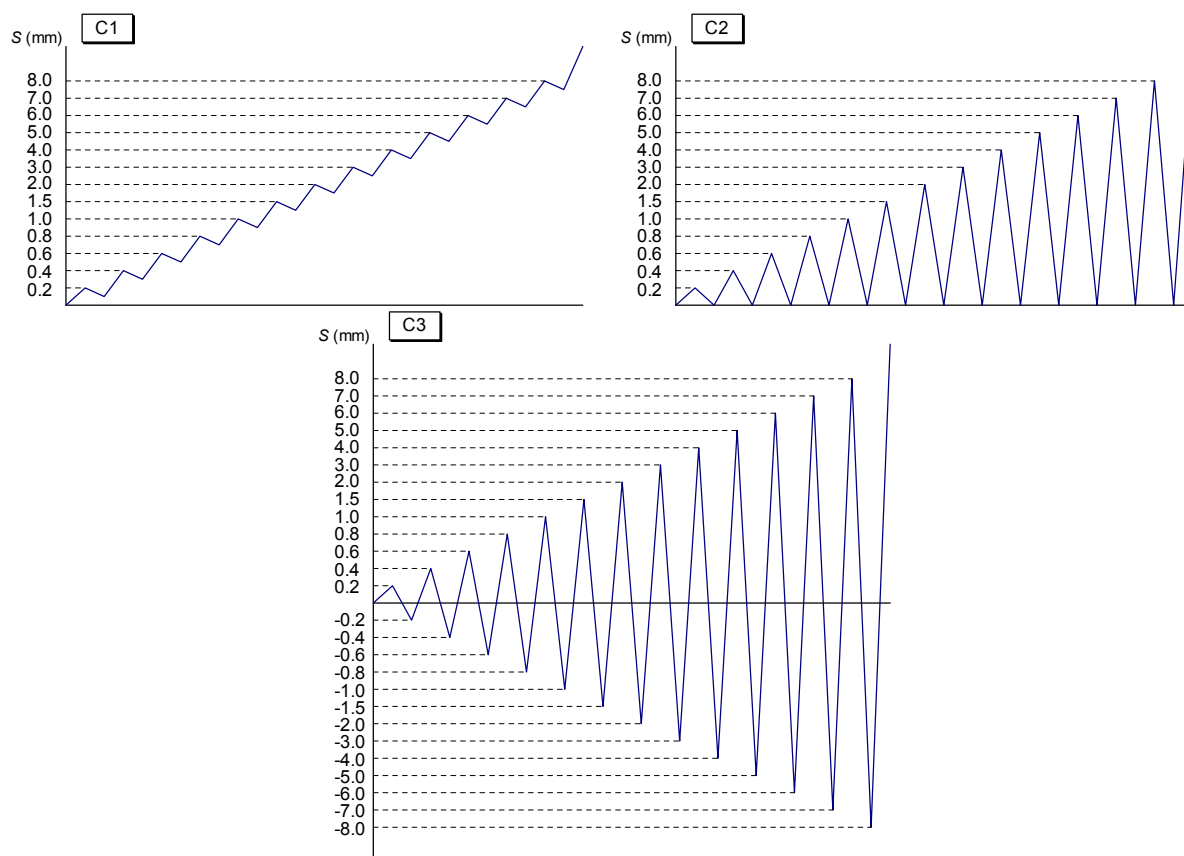


図 3.3 加力履歴 (シリーズ I)

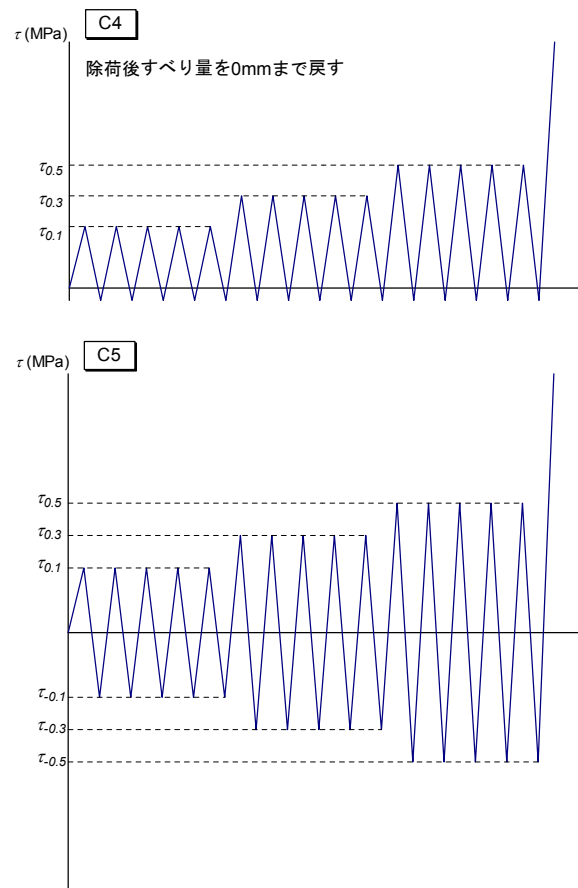


図 3.4 加力履歴（シリーズⅡ）

### 3.3 実験結果

#### 3.3.1 単調載荷試験

単調載荷試験の実験結果の一覧を表 3.3 に示す。付着応力は引張荷重を付着面積で除した平均付着応力とした。また、ひび割れ幅は、拘束力を加えた後の値を 0mm と補正した場合の値を示す（拘束力を加えた段階でひび割れ幅が減少するため）。実験より得られた付着応力－荷重端すべり量関係（以下 $\tau$ - $S$ 関係）を図 3.5 に示す。 $S=0.2\sim0.5\text{mm}$  程度までにピーク値に達し、 $S=2.0\text{mm}$  程度まではほぼ一定の付着応力を保持するといった傾向が、ほぼすべての試験体に見られた。最大付着応力 $\tau_{\max}$ の値は、同一要因 3 体に関してそれぞれほぼ一定の値を示し、拘束力が強いほど、またコンクリート強度が高いほど $\tau_{\max}$ は大きい値をとる。しかし、最大付着応力時のすべり量 $S_{\max}$ の値に関してはばらつきが大きく、本実験では一定の傾向を示さなかった。ひび割れ幅に関しては、拘束力が強いほど小さく、またコンクリート強度が強いほうが大きくなる傾向が確認できる。

表 3.3 単調載荷試験体の実験結果一覧

| 名 称     |   | 圧縮<br>強度<br>(MPa) | 横拘束              |                   | 最大荷重時         |       |                 |       |                            |       | 最大ひび<br>割れ幅 <sup>*</sup><br>(mm) |       |
|---------|---|-------------------|------------------|-------------------|---------------|-------|-----------------|-------|----------------------------|-------|----------------------------------|-------|
|         |   |                   | 横拘<br>束力<br>(kN) | 拘束<br>応力<br>(MPa) | 付着応力<br>(MPa) |       | 荷重端すべり量<br>(mm) |       | ひび割れ幅 <sup>*</sup><br>(mm) |       |                                  |       |
| P36-2M  | 1 | 37.2              | 2.00             | 1.97              | 6.27          | 6.10  | 1.164           | 1.563 | 0.547                      | 0.521 | 1.287                            | 0.965 |
|         | 2 |                   |                  |                   | 5.98          |       | 1.526           |       | 0.511                      |       | 0.988                            |       |
|         | 3 |                   |                  |                   | 6.06          |       | 1.998           |       | 0.504                      |       | 0.621                            |       |
| P36-6M  | 1 |                   | 6.00             | 5.90              | 9.08          | 9.38  | 0.698           | 0.706 | 0.238                      | 0.178 | 0.508                            | 0.370 |
|         | 2 |                   |                  |                   | 9.85          |       | 0.544           |       | 0.070                      |       | 0.267                            |       |
|         | 3 |                   |                  |                   | 9.19          |       | 0.876           |       | 0.226                      |       | 0.335                            |       |
| P36-10M | 1 |                   | 10.00            | 9.83              | 12.38         | 12.07 | 1.086           | 1.031 | 0.107                      | 0.106 | 0.242                            | 0.230 |
|         | 2 |                   |                  |                   | 12.56         |       | 1.011           |       | 0.169                      |       | 0.229                            |       |
|         | 3 |                   |                  |                   | 11.27         |       | 0.996           |       | 0.044                      |       | 0.219                            |       |
| P21-2M  | 1 | 22.3              | 2.00             | 1.97              | 5.81          | 5.70  | 1.153           | 0.937 | 0.352                      | 0.337 | 0.598                            | 0.601 |
|         | 2 |                   |                  |                   | 5.42          |       | 1.336           |       | 0.428                      |       | 0.737                            |       |
|         | 3 |                   |                  |                   | 5.88          |       | 0.324           |       | 0.229                      |       | 0.468                            |       |
| P21-6M  | 1 |                   | 6.00             | 5.90              | 6.79          | 6.97  | 1.178           | 0.910 | 0.045                      | 0.093 | 0.320                            | 0.319 |
|         | 2 |                   |                  |                   | 6.77          |       | 0.644           |       | 0.140                      |       | 0.277                            |       |
|         | 3 |                   |                  |                   | 7.35          |       | 0.907           |       | 0.096                      |       | 0.359                            |       |
| P21-10M | 1 |                   | 10.00            | 9.83              | 9.06          | 8.94  | 1.463           | 1.225 | 0.078                      | 0.064 | 0.190                            | 0.187 |
|         | 2 |                   |                  |                   | 8.94          |       | 0.847           |       | 0.070                      |       | 0.170                            |       |
|         | 3 |                   |                  |                   | 8.81          |       | 1.366           |       | 0.043                      |       | 0.200                            |       |

\*拘束力を加えた後からのひび割れ幅

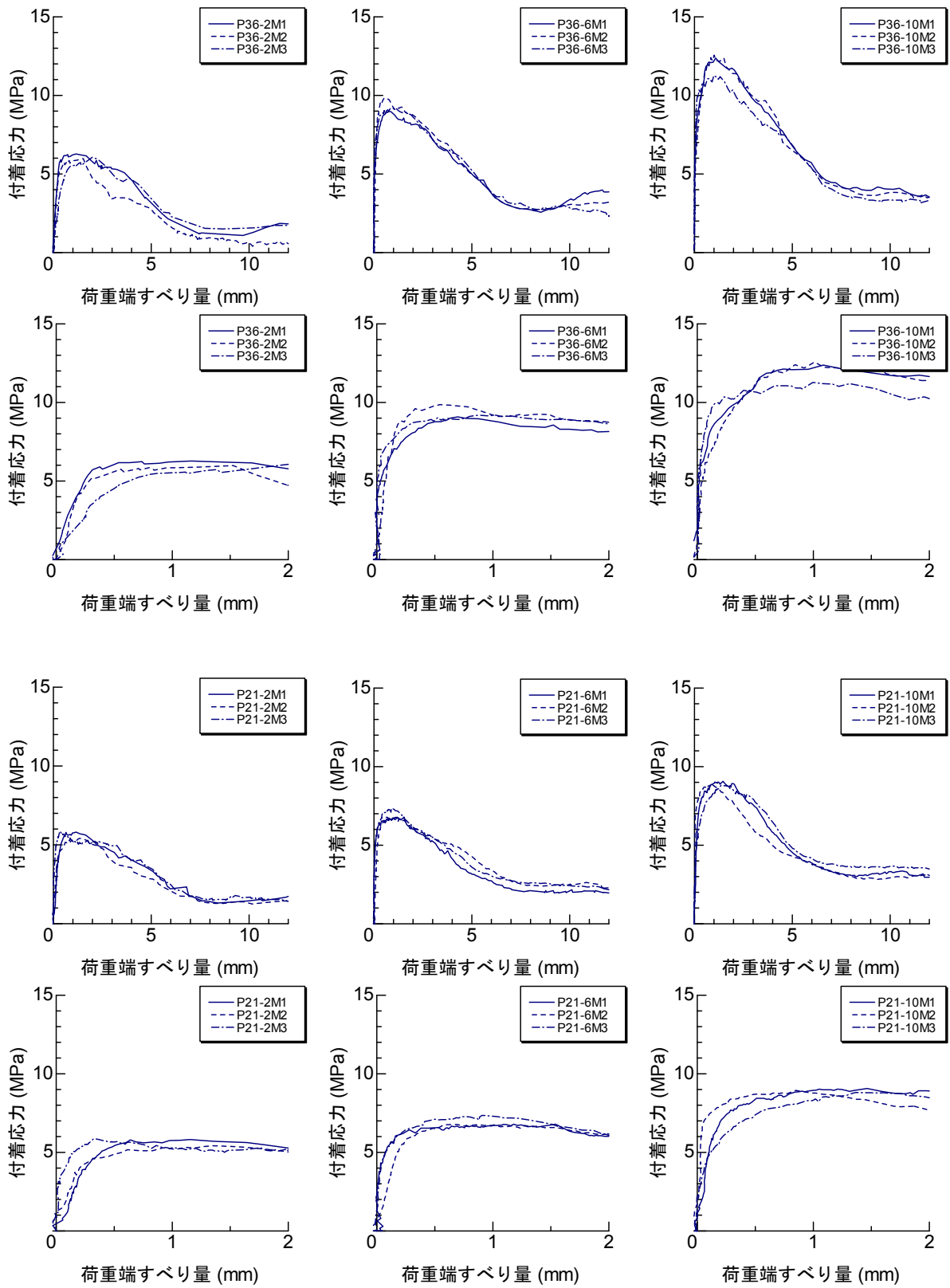


図 3.5 付着応力－荷重端すべり量関係

最大付着応力と拘束応力の関係を図 3.6 に示す。コンクリート強度の影響を除去するため、最大付着応力および拘束応力を圧縮強度で除し無次元化している。同図より、拘束応力が大きくなると最大付着応力が線形に増大する傾向が確認できる。また、図中の式は既往の研究結果<sup>7)</sup>によるものであるが、本実験の結果は概ねよく一致している。

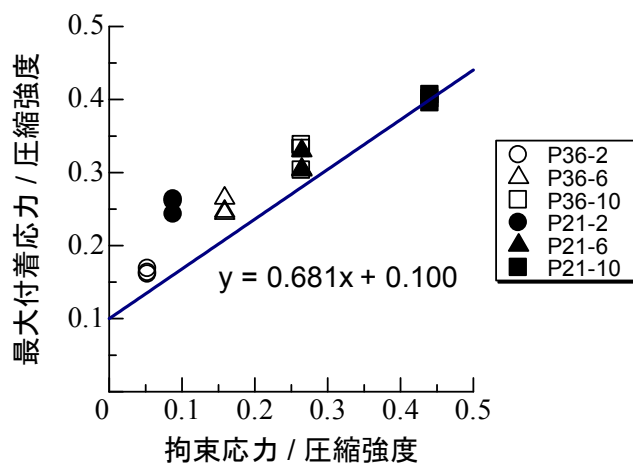


図 3.6 最大付着応力と拘束応力の関係



### 3.3.2 繰返し载荷試験

#### (1) 付着応力-すべり量関係

実験結果より得られた $\tau$ - $S$ 関係を図 3.7～図 3.16 に示す。比較のため図中に単調载荷試験の結果も示す。

シリーズⅠの結果については、C1 試験体と C2, C3 試験体で異なる傾向が得られた。C1 試験体は繰返し载荷による除荷開始点への指向性はほとんど変化しないが、最大付着応力点以降で、包絡線から付着応力が若干低下する試験体も見られた。しかし、全体的には包絡線の低下の程度は小さく、付着性状の劣化は小さいと考えられる。C2, C3 試験体は C1 試験体と同様に最大付着応力の低下はほとんど見られない。しかし、ピーク前のすべり量が小さい範囲と比較して、ピーク付近から除荷開始点への指向性が低下していることが確認できる。特に、C3 試験体の軟化域においてこの低下が顕著にみられる。また、C2 および C3 試験体に共通して、除荷後付着応力がほぼ一定ですべり量のみが推移する領域（以下、スリップ域）が見られる。スリップ域の付着応力を $\tau_{sl}$ とする。 $\tau_{sl}$ の値は C2・C3 試験体ともに正側・負側でほぼ等しい値であった。

シリーズⅡの結果に関しては、C4, C5 試験体ともに同様の傾向を示した。両試験体とも、目標値 0.3mm での繰返し加力の途中ですべり量が次の目標値の 0.5mm に達したため、もしくは目標値 0.3mm での繰返し加力の途中で荷重が目標値まで上がらなくなったため、ほとんどの試験体で繰返し加力を行うことができなかった。 $\tau_{0.1}$ （すべり量が初めて 0.1mm に達した点の付着応力）での 5 サイクルに関しては、C4, C5 とともにほとんどの試験体でほぼ同様の履歴を描いた。これは除荷開始点への指向性が低下せず、付着性状の劣化がほぼないためであると考えられる。一方で $\tau_{0.3}$ （すべり量が初めて 0.3mm に達した点の付着応力）での繰返しに関しては、試験体によって付着応力の低下の割合（低下率）およびすべり量の増加の割合（増加率）のばらつきが大きいことが確認できる。よって、すべり量 0.3mm 付近で付着応力の低下率およびすべり量の増加率が変化する点があると推察される。

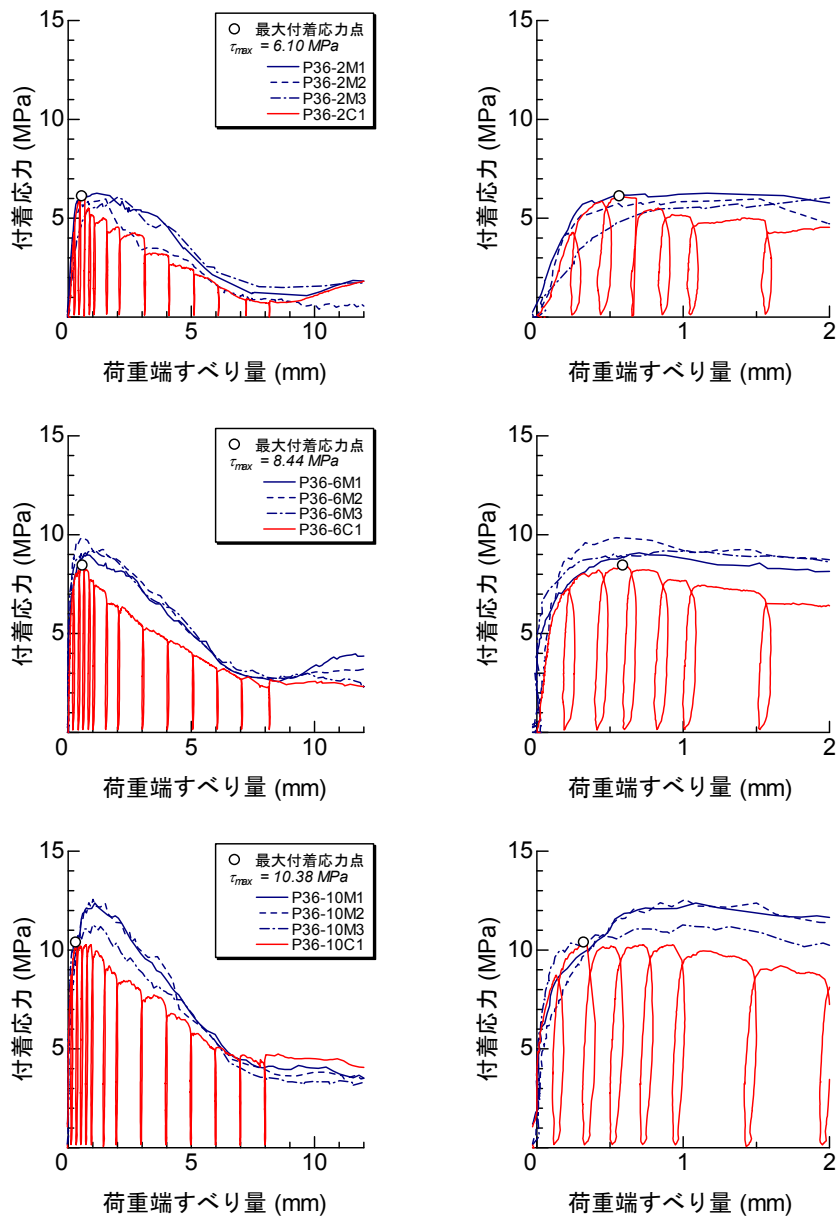


図 3.7  $\tau$  - S 関係 (C1 Fc36 試験体)

(左図 : S = 12mm まで / 右図 : S = 2.0mm まで)

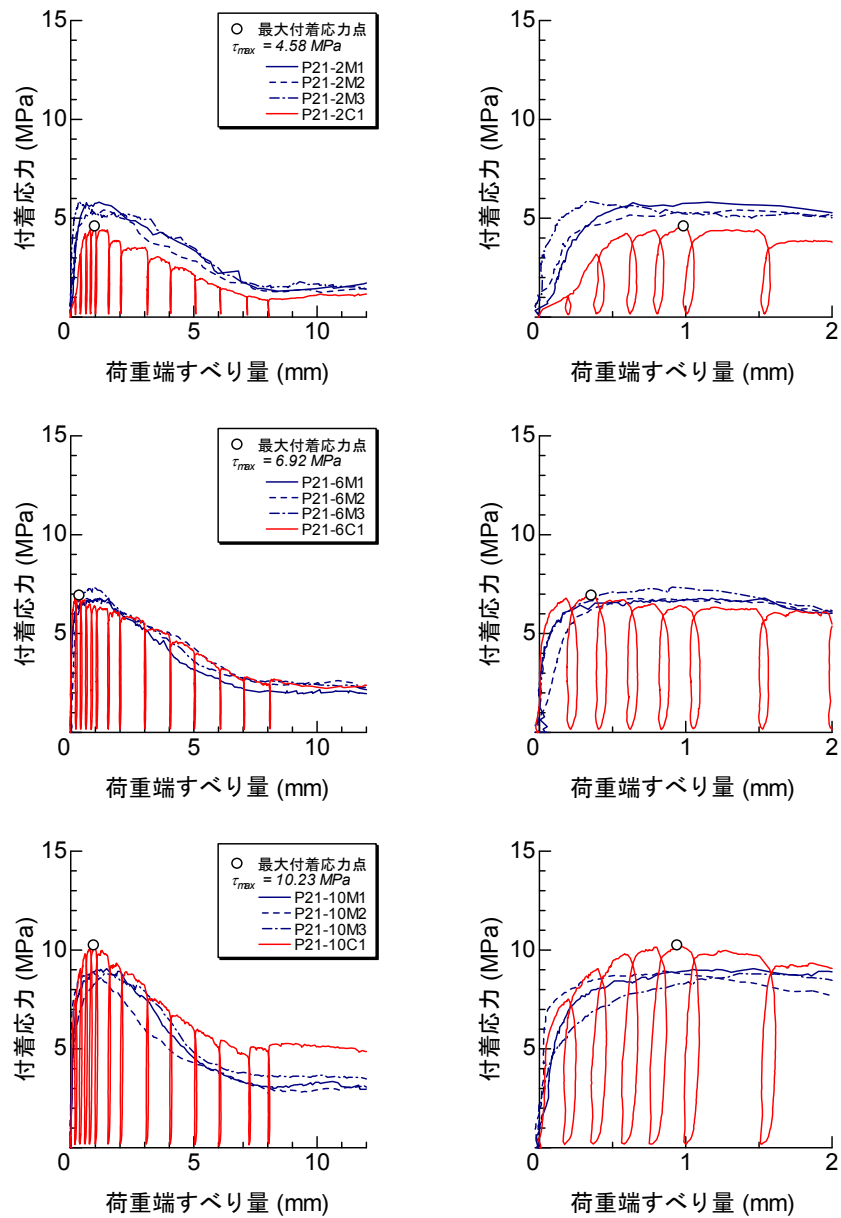


図 3.8  $\tau$  - S 関係 (C1 Fc24 試験体)

(左図 : S = 12mm まで / 右図 : S = 2.0mm まで)

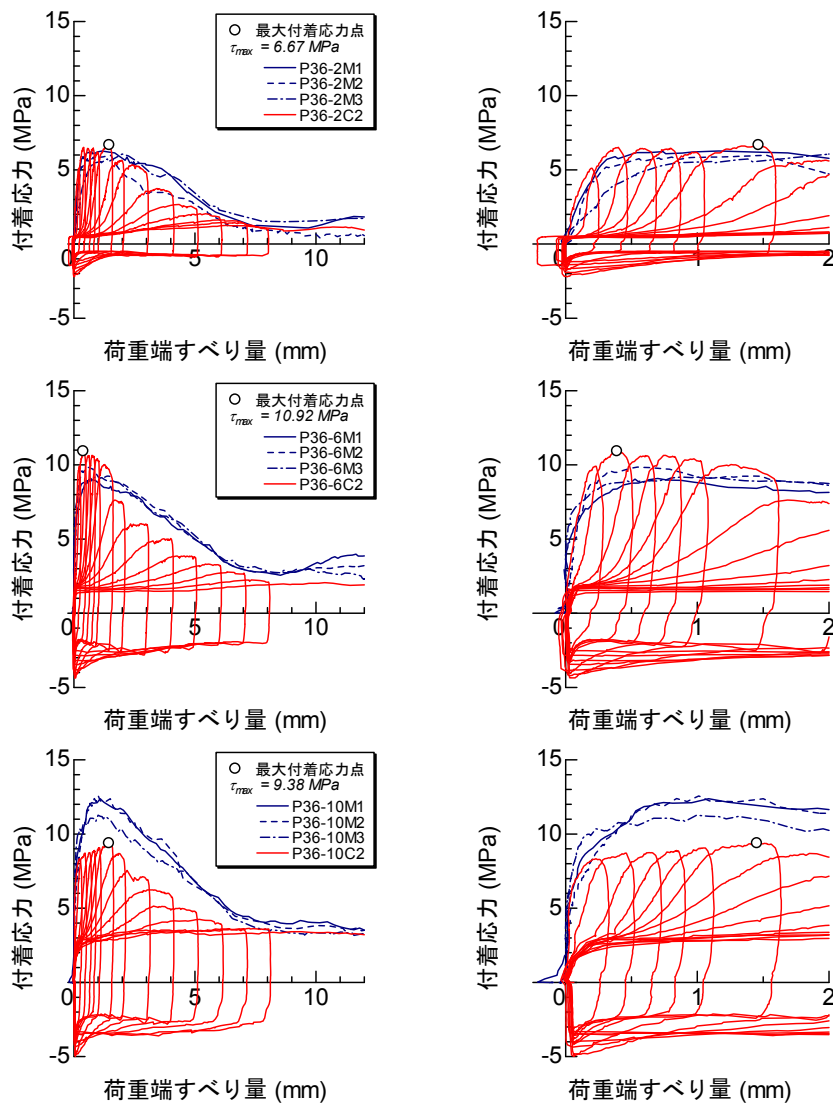


図 3.9  $\tau$ -S 関係 (C2 Fc36 試験体)

(左図 : S = 12mm まで / 右図 : S = 2.0mm まで)

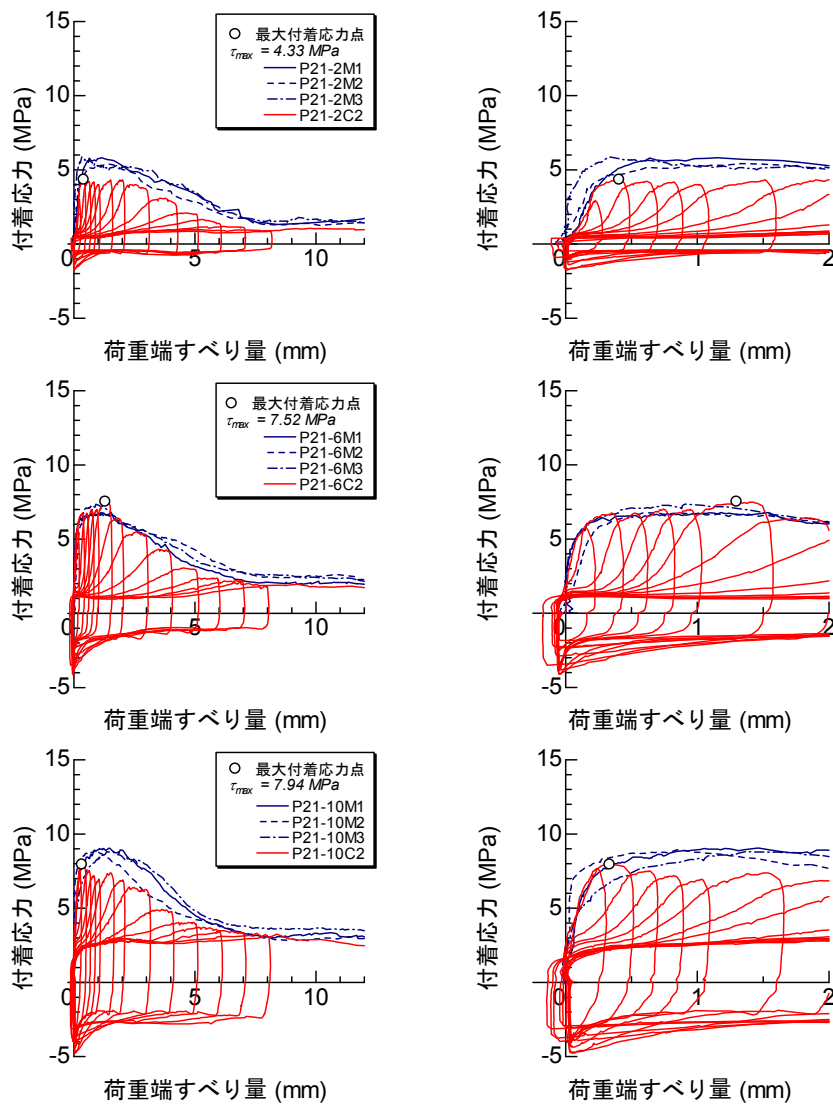


図 3.10  $\tau$  - S 関係 (C2 Fc21 試験体)

(左図 : S = 12mm まで / 右図 : S = 2.0mm まで)

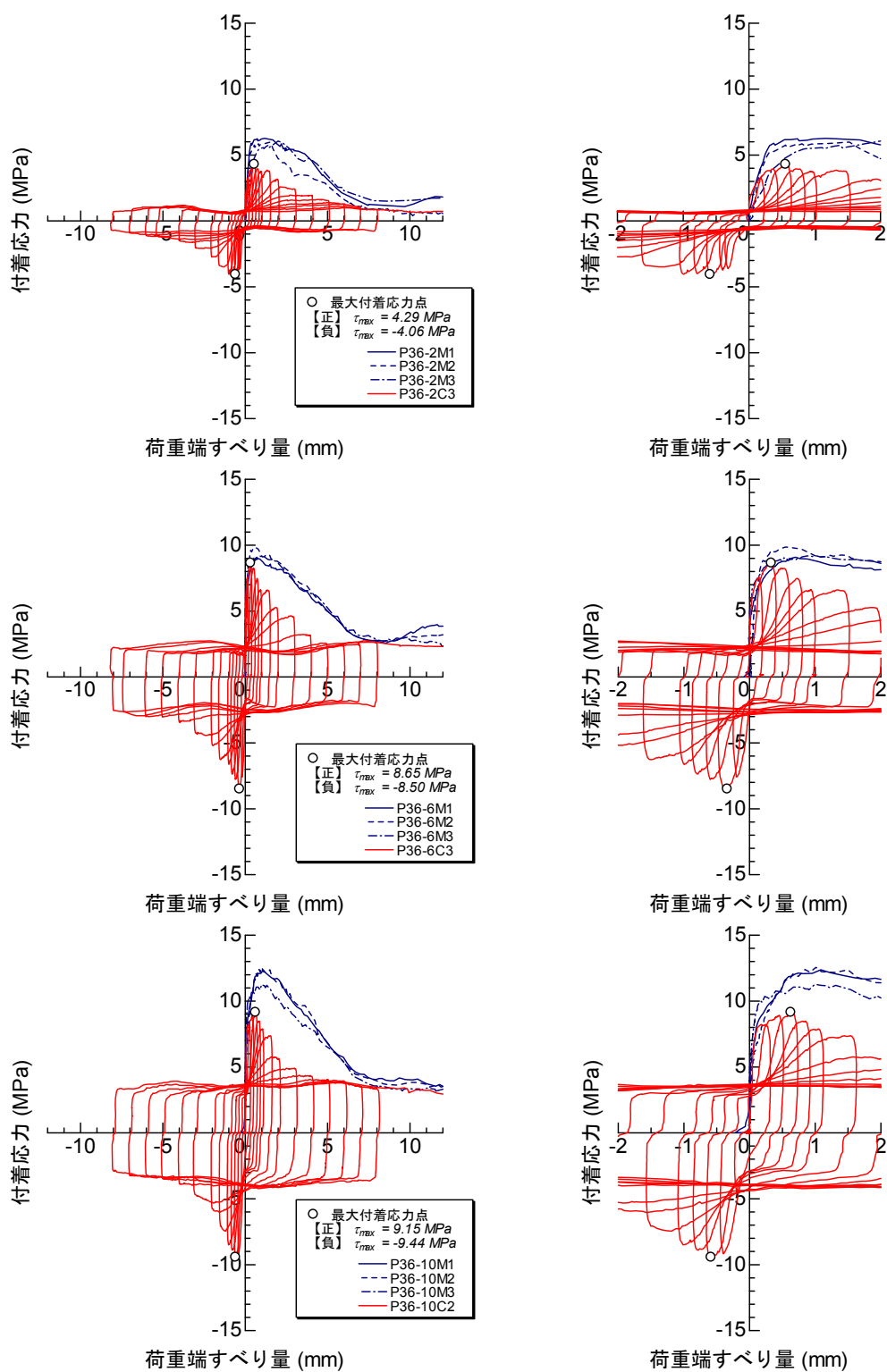


図 3.11  $\tau$  -  $S$  関係 (C3 Fc36 試験体)

(左図 :  $S = 12\text{mm}$  まで / 右図 :  $S = 2.0\text{mm}$  まで)

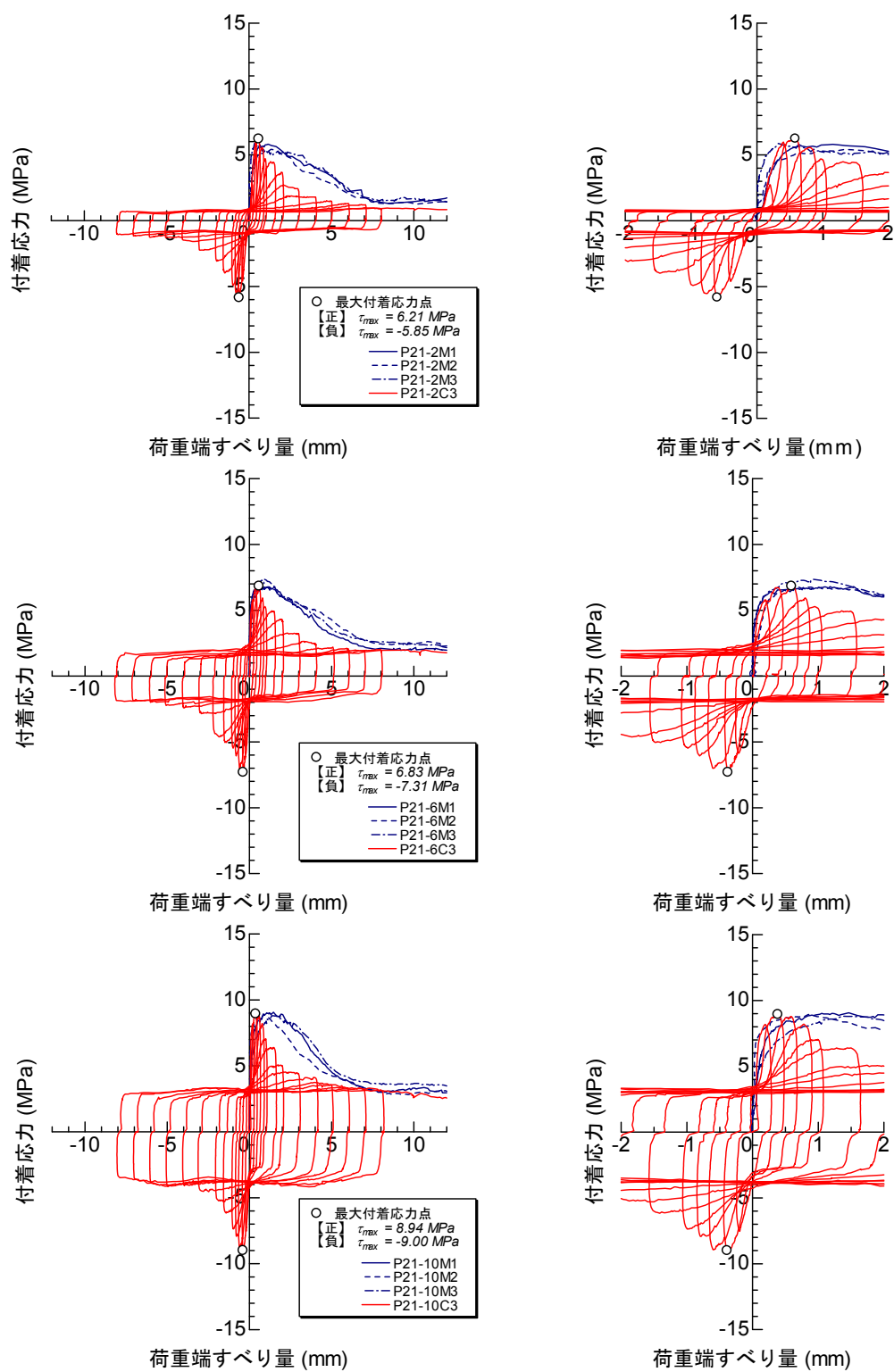


図 3.12  $\tau$  -  $S$  関係 (C3 Fc21 試験体)

(左図 :  $S = 12\text{mm}$  まで / 右図 :  $S = 2.0\text{mm}$  まで)

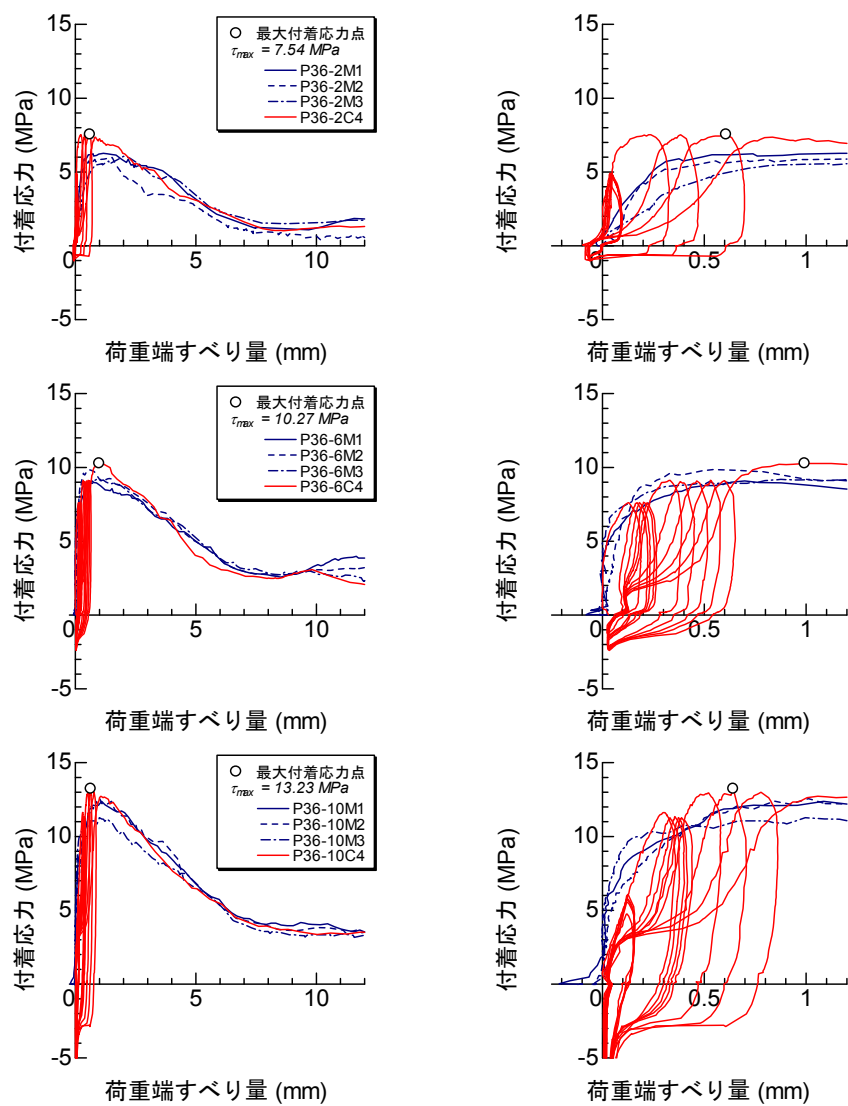


図 3.13  $\tau$  -  $S$  関係 (C4 Fc36 試験体)

(左図 :  $S = 12\text{mm}$  まで / 右図 :  $S = 2.0\text{mm}$  まで)



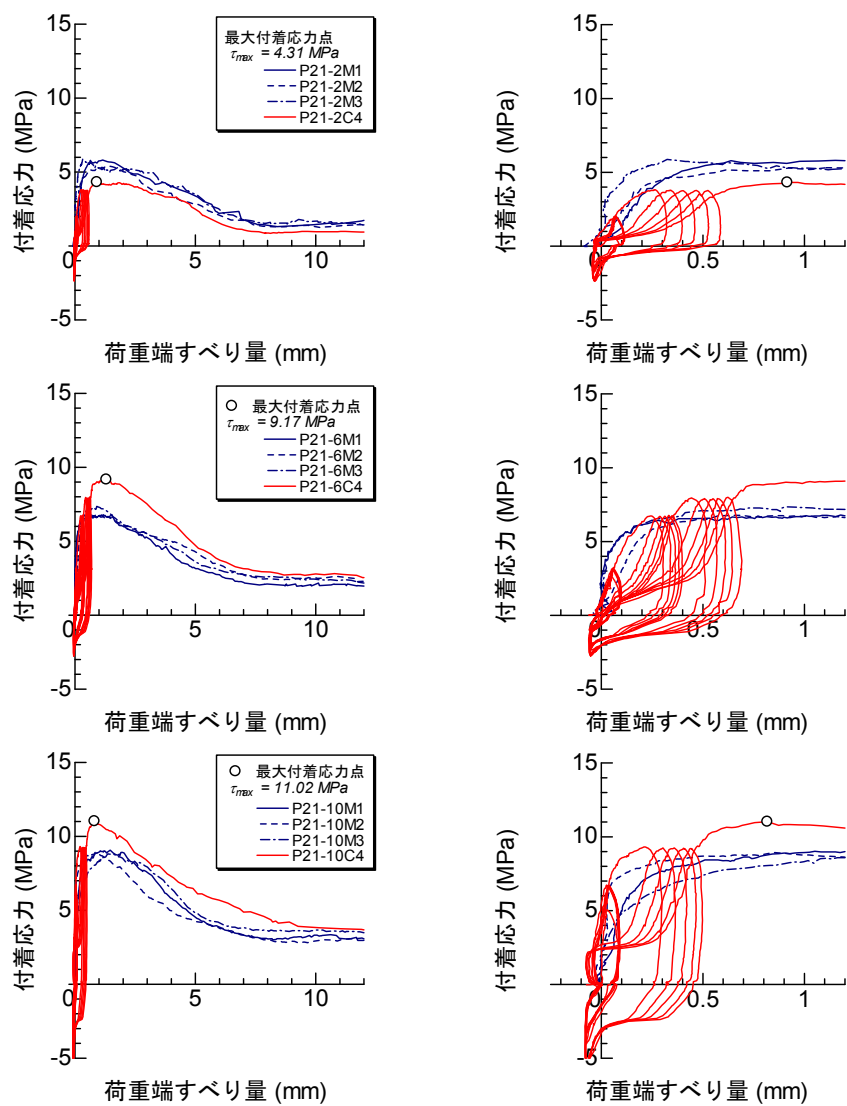


図 3.14  $\tau$  - S 関係 (C4 Fc21 試験体)

(左図 : S = 12mm まで / 右図 : S = 2.0mm まで)

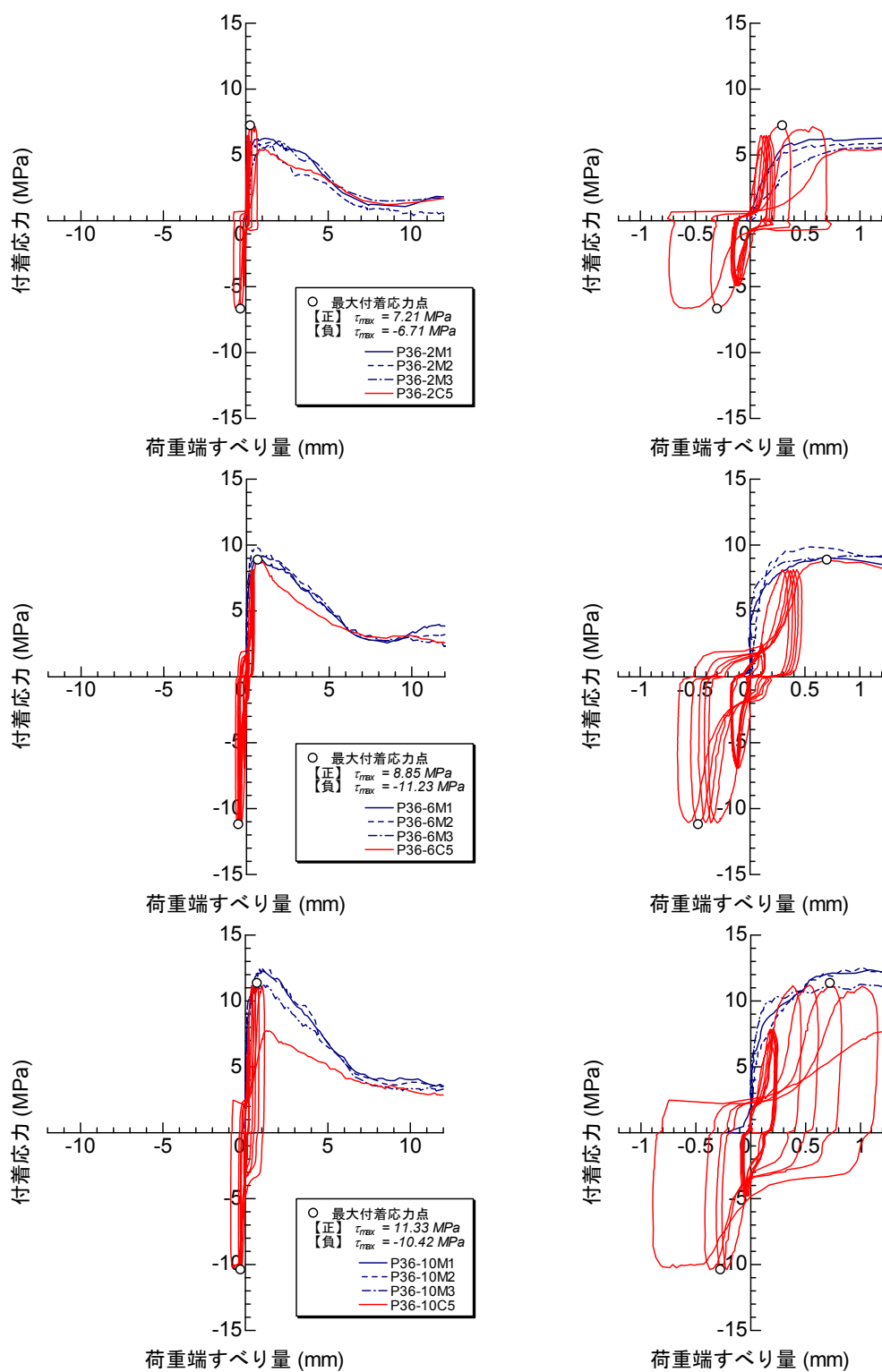


図 3.15  $\tau$  -  $S$  関係 (C5 Fc36 試験体)

(左図 :  $S = 12\text{mm}$  まで / 右図 :  $S = 2.0\text{mm}$  まで)

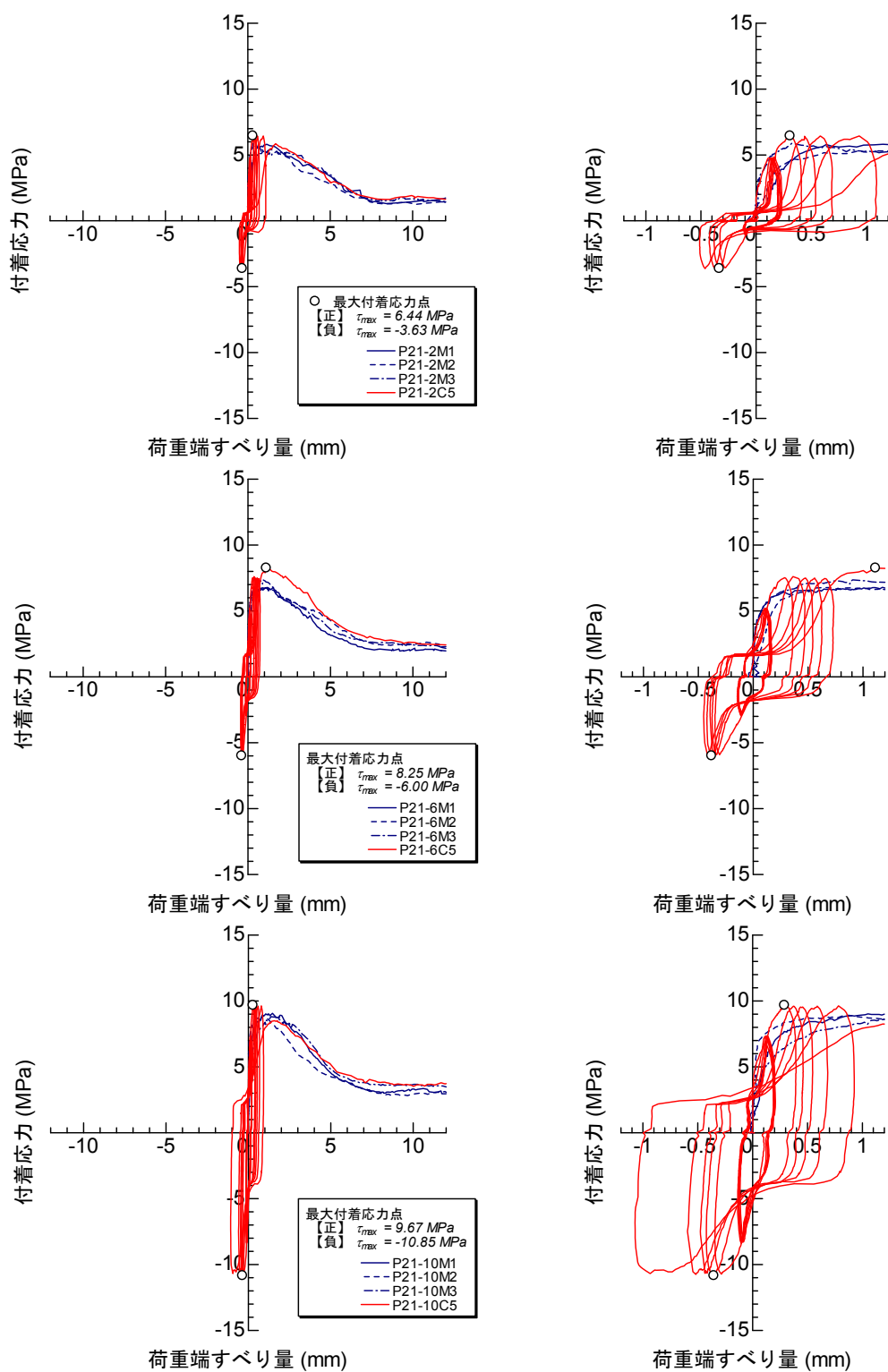


図 3.16  $\tau$  - S 関係 (C5 Fc21 試験体)

(左図 : S = 12mm まで / 右図 : S = 2.0mm まで)

C1 試験体の除荷時の勾配  $K$  と除荷開始点のすべり量の関係を図 3.17 に示す。ここで、コンクリート強度および横拘束力の影響を除去するため、繰返し載荷試験の付着応力を単調載荷試験の最大付着応力（各要因ごとに 3 体の平均値）で除した後、算出した。単位は (1/mm) である。同図より、 $K$  の値は概ね 10~15 (1/mm) 程度であるが、ばらつきが大きく一定の傾向を示さなかった。これは拘束力のない場合の付着実験<sup>3)</sup>より得られた傾向とは異なる結果である。

C2~C5 試験体の  $\tau_{sl}$  と拘束応力  $\sigma_L$  の関係を図 3.18 に示す。同図より、 $\tau_{sl}$  はコンクリート強度の値によらず、拘束応力  $\sigma_L$  に比例する結果が得られた。

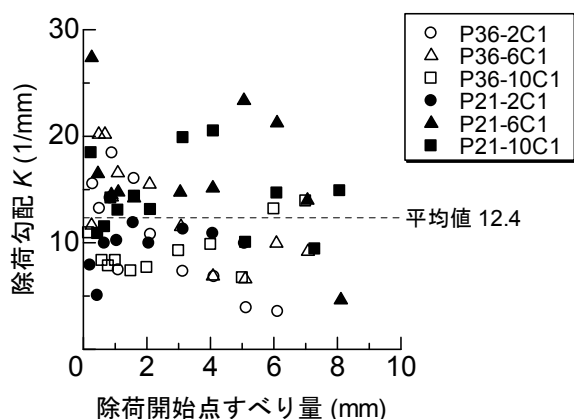


図 3.17 除荷勾配－除荷開始点すべり量関係

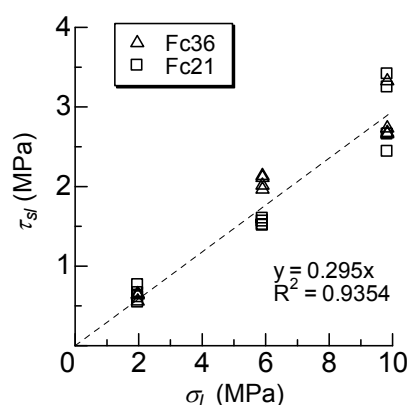


図 3.18  $\tau_{sl}$ － $\sigma_L$  関係

図 3.19 に示すような除荷後、再載荷したときの除荷開始点指向性の程度を表す係数を低下率  $\alpha$  とする。 $\alpha$  の値は、除荷開始時の付着応力の値と、除荷時の履歴と再載荷時の履歴の交点の付着応力の値の比である。C1 試験体に関して、 $\alpha$  の値と拘束応力  $\sigma_L$  の関係を図 3.20 に示す。同図より、拘束応力の値が高くなると  $\alpha$  の値も高くなる傾向が確認できる。

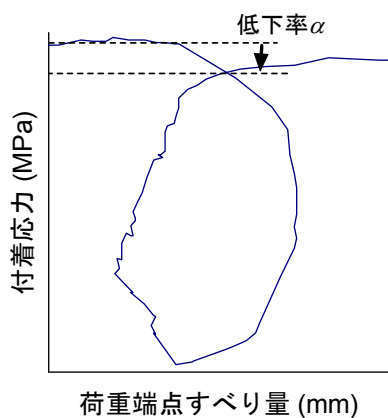


図 3.19 除荷開始点への指向性

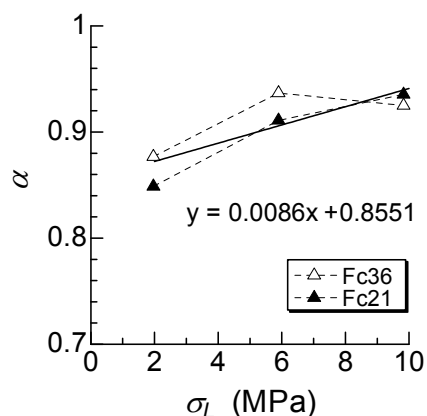


図 3.20  $\alpha$ － $\sigma_L$  関係

## (2) 付着応力－ひび割れ幅関係

繰返し载荷試験の付着応力－ひび割れ幅関係を図 3.21～図 3.25 に示す。C1 試験体の結果のみ比較のため、図中に単調载荷試験の結果を示す。

C1 試験体の結果を見ると、繰返し载荷に伴いひび割れ幅は徐々に増加する。また、ほとんどの試験体で、ひび割れ幅の最大値は単調载荷試験の場合と同程度となっている。一方、C2、C3 試験体の結果を見ると、荷重がピークに達するまではほとんどの試験体でひび割れ幅は繰返し载荷に伴い増加しているが、ピークを迎えるとひび割れ幅は徐々に小さくなる傾向が見られる。しかし、拘束力が 10kN の試験体の中には加力開始とともにひび割れが減少する試験体も見られた。

一方、シリーズⅡの結果を見ると、C4、C5 試験体ともに、繰返し载荷終了後、単調に鉄筋を引き抜くとピーク後にひび割れ幅は減少に転じず、単調载荷試験に近い挙動を示す。また、ひび割れ幅の最大値は C4 試験体のほうが大きい傾向にある。

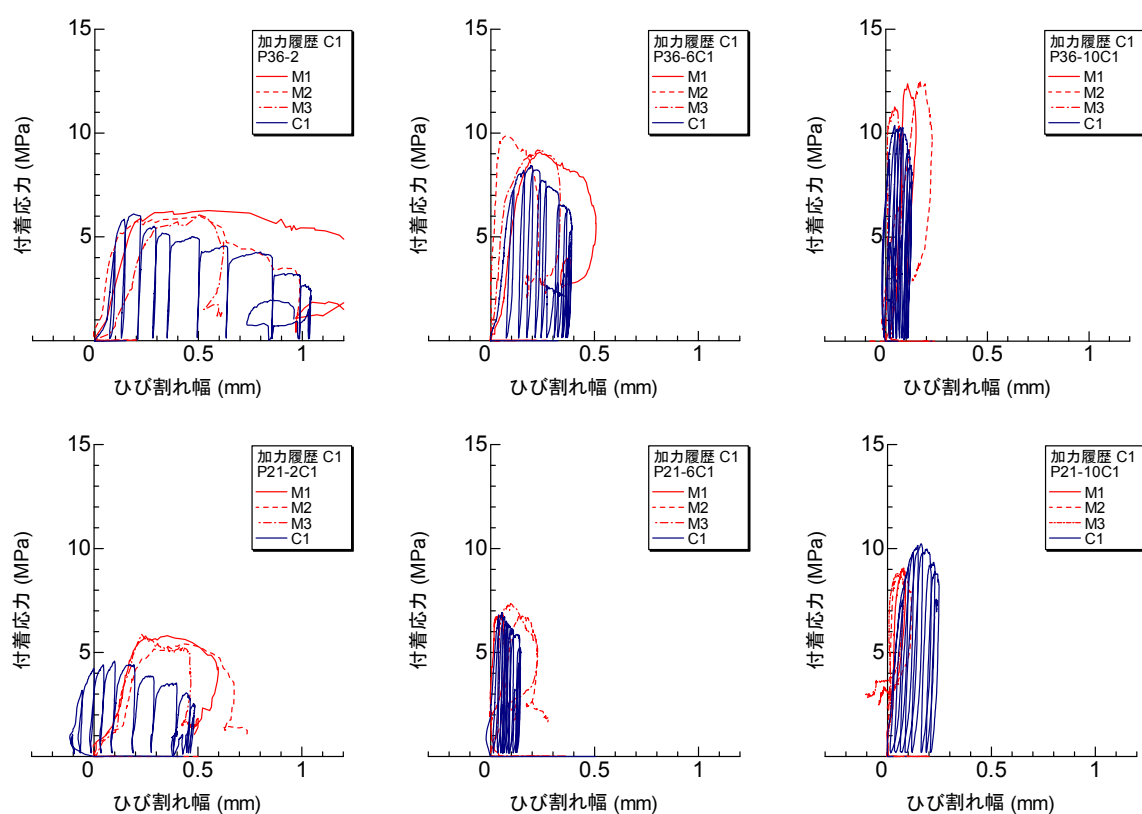


図 3.21 付着応力－ひび割れ幅関係（C1 試験体）

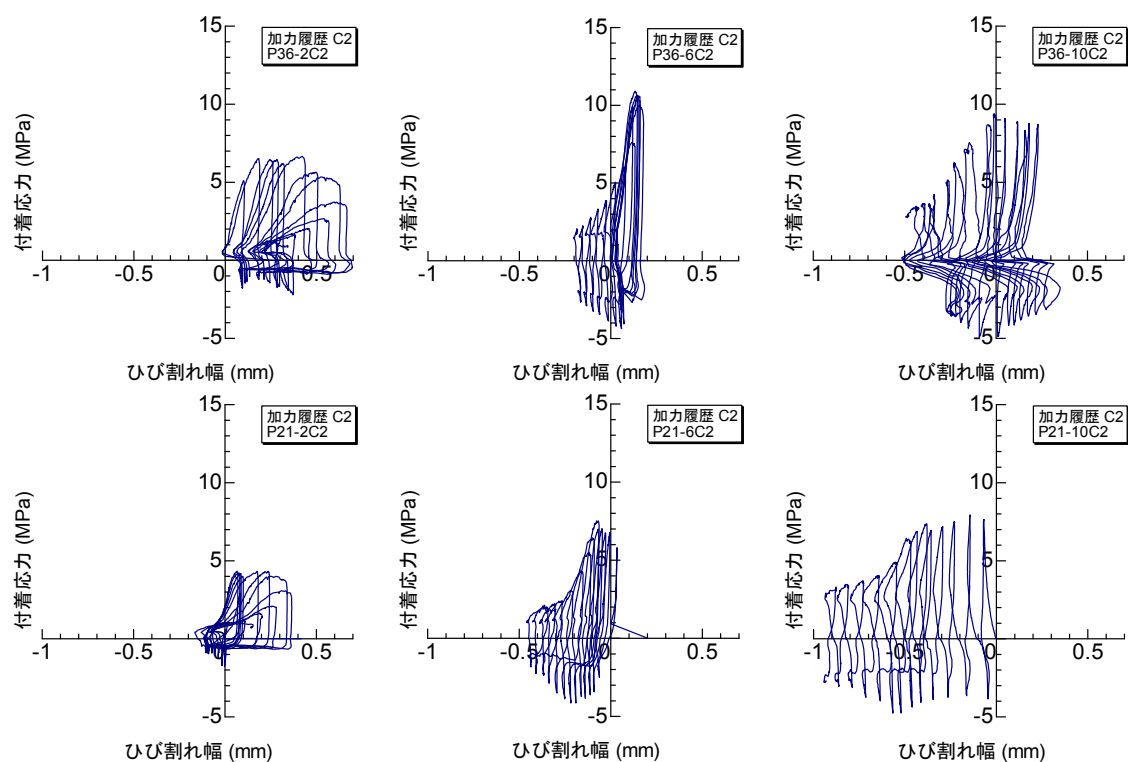


図 3.22 付着応力－ひび割れ幅関係（C2 試験体）

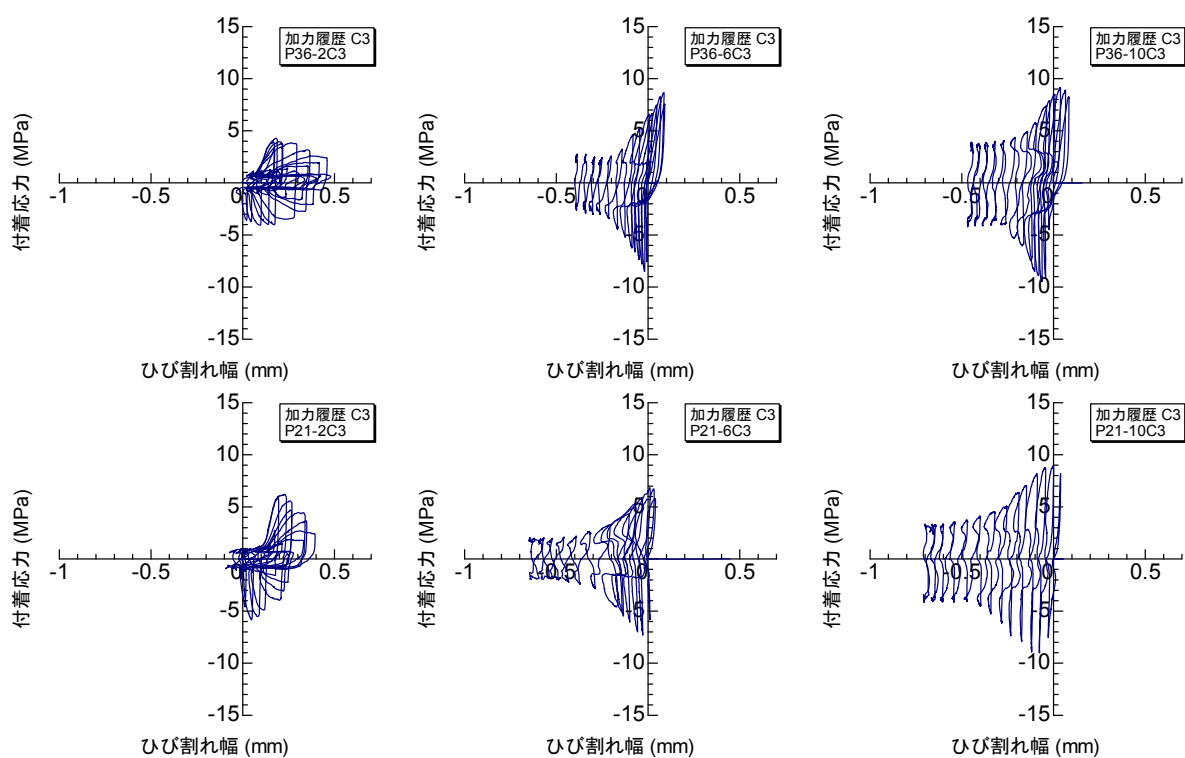


図 3.23 付着応力－ひび割れ幅関係（C3 試験体）

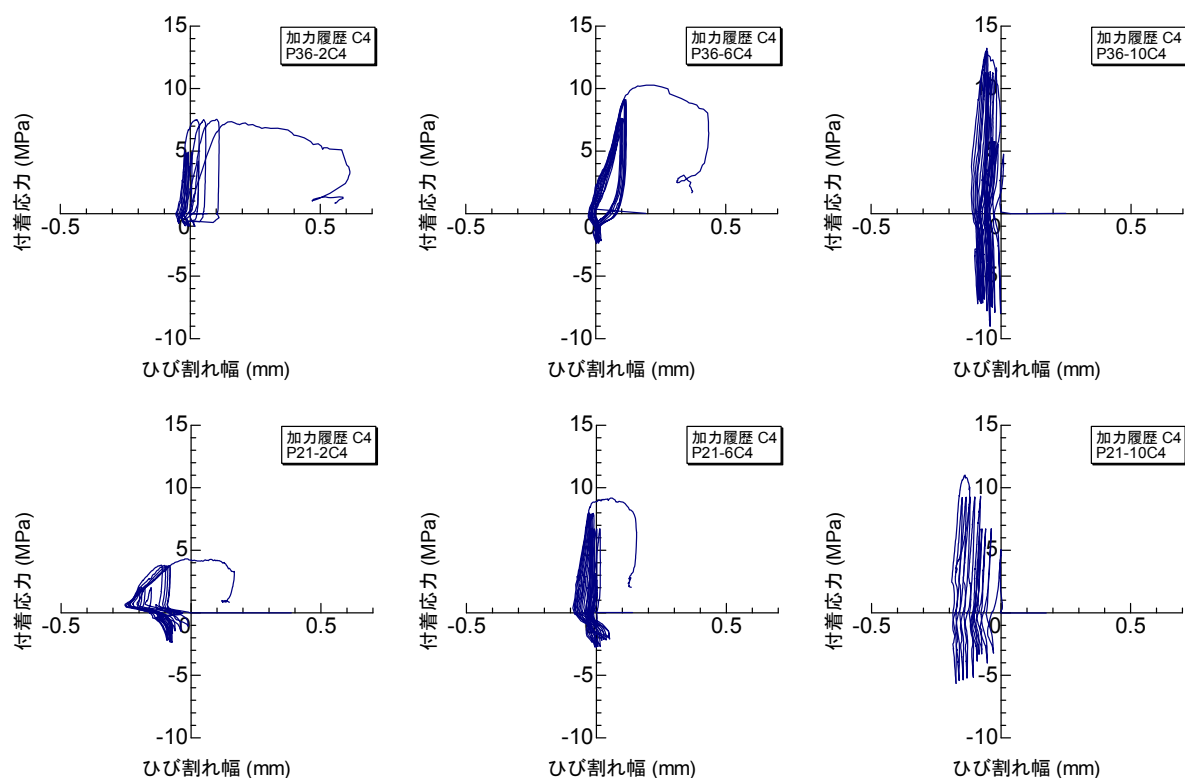


図 3.24 付着応力－ひび割れ幅関係（C4 試験体）

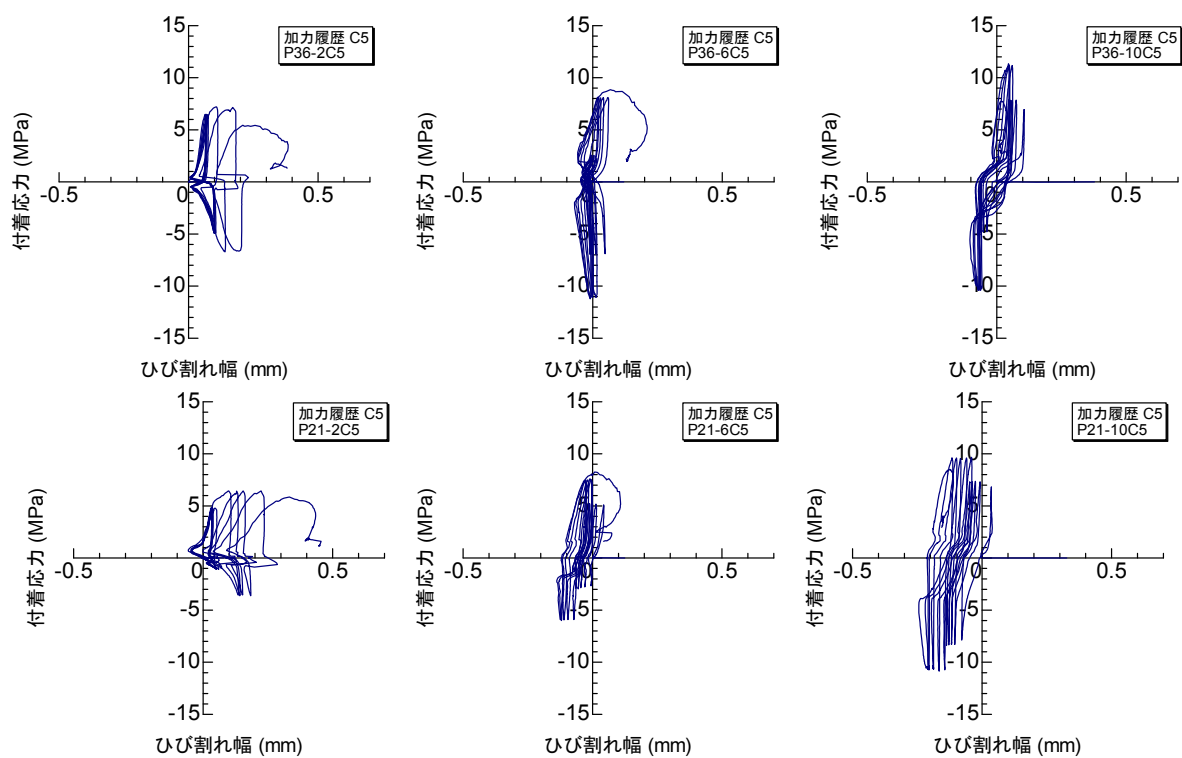


図 3.25 付着応力－ひび割れ幅関係（C5 試験体）

## 3.4 付着解析

### 3.4.1 履歴モデル

#### (1) 包絡線

実験結果をもとに、局所における $\tau$ - $S$ 関係の履歴モデルを構築する。履歴モデルは、付着応力を最大付着応力で無次元化して与えるものとする。最大付着応力 $\tau_{max}$ の値は既往の研究結果<sup>7)</sup>を参考に以下の式 (3.1) で与える。

$$\tau_{max}/\sigma_B = 0.681 \left( \sigma_L/\sigma_B \right) + 0.100 \quad (3.1)$$

ここで、 $\sigma_B$ はコンクリートの圧縮強度、 $\sigma_L$ は拘束応力である。

単調載荷試験の結果より、荷重端すべり量が0～1.5mmまでの付着応力の平均値(計18体)をプロットしたものを図 3.26 に示す。この結果をもとに、包絡線の形状を決定する。ピーク(点B)までを2直線で、ピーク後の軟化域を一つの直線で表すこととした。図 3.26 に履歴モデルの包絡線形状を示す。点Aおよび点Bの座標は以下のとおりである。

点A (0.2, 0.8)                      点B (1.061, 1.0)

また、軟化域は既往の研究<sup>7)</sup>をもとに以下の式 (3.2) で表すこととする。

$$\tau/\tau_{max} = \frac{l_n - S}{l_n - S_{max}} \quad (3.2)$$

ここで、 $S_{max}$ は最大付着応力時のすべり量で、単調載荷試験の平均値 $S_{max} = 1.061\text{mm}$ とした。 $l_n$ は異形鉄筋節間隔で、本実験で用いた異形鉄筋D16は $l_n = 10.29\text{mm}$ であった。



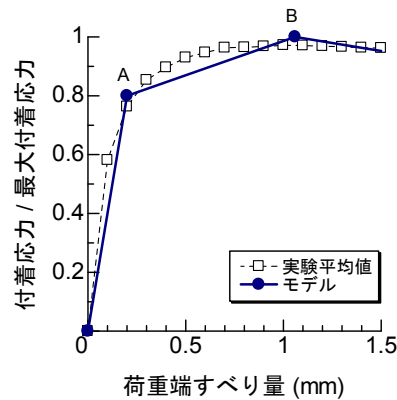


図 3.26 履歴モデル【包絡線形状】

## (2) 履歴形状

モデルの履歴形状を図 3.27 に示す。除荷開始点を点 M ( $S_m, \tau_m$ ) とし、勾配  $K$  で降下する。この時の勾配  $K$  の値は、実験結果の平均値とし、 $K = 12.4$  (1/mm) とした。除荷後の履歴形状は以下の①～③に場合分けし、与える。

- ① スリップ域に達する前に再載荷する場合（点 H）

$H \rightarrow N \rightarrow M' \rightarrow L$

- ② スリップ域上、すべり量の正負が入れ替わる前に再載荷する場合（点 F）

$F \rightarrow I \rightarrow N \rightarrow M' \rightarrow L$

第 2 章で述べたマッシブなコンクリートの履歴モデルでは、付着応力が 0 まで上昇した後、付着応力 0 のままスリップする履歴形状としたが、本モデルでは  $\tau_{sl}$  まで上昇した後、スリップする形状とした。これは  $\tau_{sl}$  の値が横拘束力のみによるという実験結果による。マッシブなコンクリートの場合、鉄筋を引抜いた後除荷をすると、鉄筋近傍のコンクリートにひび割れが生じ鉄筋を拘束する力がほぼ 0 となると考えられる。

- ③ すべり量の正負が入れ替わる場合

$J \rightarrow N \rightarrow M' \rightarrow L$

ここで、点 M の座標を  $(S_m, \tau_m)$  とする。このとき、点 N および点 M' の座標はそれぞれ以下のとおりである。点 N は ME 上の点、点 M' は点 M と付着応力が等しい点である。

$$\text{点 N } \left( S_m - \frac{(1-\alpha)\tau_m}{K}, \alpha\tau_m \right)$$

$$\text{点 M' } ((1+\beta)S_m, \tau_m)$$

ここで、 $\alpha$  と  $\beta$  はそれぞれ付着応力の低下率とすべり量の増加率である。これらの値は実験結果に合うように表 3.4 に示すように決定した。①の場合および②・③の除荷開始点すべり量の絶対値が 0.2mm 以下の場合、 $\alpha$  の値は図 3.20 の結果を直線近似した以下の式 (3.3) で与えることとする。また、スリップ域の付着応力  $\tau_{sl}$  は図 3.18 の結果より以下の式 (3.4) で与えることとする。

$$\alpha = 0.0086\sigma_L + 0.8551 \quad (3.3)$$

$$\tau_{sl} = 0.295\sigma_L \quad (3.4)$$

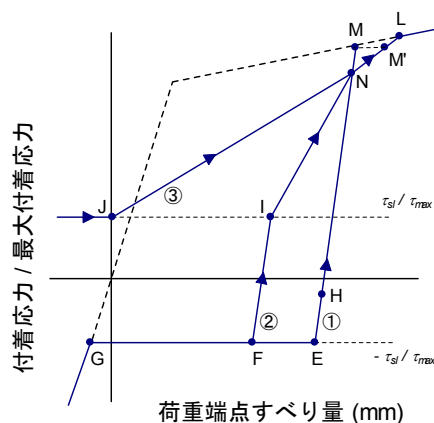


図 3.27 履歴モデル【履歴形状】

表 3.4  $\alpha$  と  $\beta$  の値

|          | ①      | ②・③              |               |
|----------|--------|------------------|---------------|
|          |        | $ S_m  \leq 0.2$ | $ S_m  > 0.2$ |
| $\alpha$ | 式(3.3) | 式(3.3)           | 0.75          |
| $\beta$  | 0.1    | 0.1              | 0.45          |

### 3.4.2 付着解析

#### (1) 解析対象

解析対象とする片持梁型試験体<sup>8)</sup>の形状を図 3.28 に示す。断面は 200×350mm、付着長は 300mm である。主筋には 4-D13、補強筋には 2-D6 を用い、補強筋比は 0.4% である。解析に用いる諸元を表 3.5 に示す。拘束応力 $\sigma_L$ の値は既往の研究<sup>7)</sup>より、以下の式 (3.5) より算出した。

$$\sigma_L = \sqrt{k \frac{b \cdot p_w}{N \cdot d_b} \cdot \frac{h}{l_{we}} \cdot E_{st} \cdot \sigma_B} \quad (3.5)$$

ここで、 $b$  は部材幅である。対象とした試験体は単調載荷試験体であるが、本研究では、提案したモデルによる解析によって、繰返し加力履歴が付着強度や歪分布に及ぼす影響を考察する。繰返し加力の加力履歴は、荷重端すべり量で制御することとし、目標値を 0.26mm (鉄筋径の 2%)、0.52mm (4%)、0.78mm (6%)、1.04mm (8%)、1.30mm (10%)、1.95mm (15%)、2.60mm (20%) とした。加力履歴 a (Ca) は載荷・除荷の繰返し載荷、加力履歴 b (Cb) は正負繰返し、加力履歴 c (Cc) は目標値で 2 サイクルずつ加力を行う正負繰返し載荷とした。

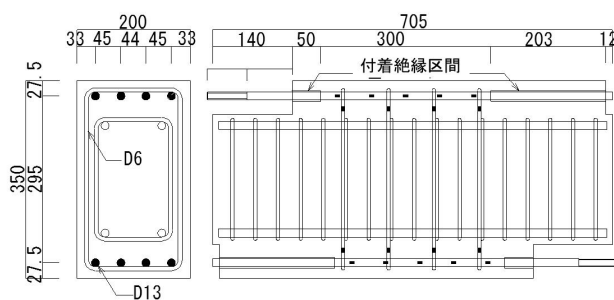


図 3.28 片持梁試験体形状

表 3.5 解析諸元

|                        |                        |       |
|------------------------|------------------------|-------|
| 横補強筋比                  | $p_w(\%)$              | 0.4   |
| 主筋本数                   | $N(\text{本})$          | 4     |
| 主筋節高さ                  | $h(\text{mm})$         | 0.9   |
| 主筋のヤング係数               | $E_s(\text{MPa})$      | 187   |
| 横補強筋の径                 | $d_w(\text{mm})$       | 6.35  |
| 横補強筋の付着有効長さ            | $l_{we}(\text{mm})$    | 57.15 |
| 横補強筋のヤング係数             | $E_{st}(\text{GPa})$   | 190   |
| コンクリート強度               | $\sigma_B(\text{MPa})$ | 33.4  |
| 拘束応力とひび割れ幅<br>の関係を表す定数 | $k$                    | 0.018 |

## (2) 解析方法

解析方法については、式(3.6)～式(3.8)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、自由端側から逐次計算を行った。

$$\tau_x = f(S_x) \quad (3.6)$$

$$P_{sx,i+1} = P_{sx,i} + \tau_x \cdot \phi \cdot dx \quad (3.7)$$

$$S_{x,i+1} = S_{x,i} + \frac{P_{sx,i+1} + P_{sx,i}}{2E_s A_s} \cdot dx \quad (3.8)$$

ここで、 $\tau_x$ ：付着応力、 $S_x$ ：すべり量、 $\phi$ ：主筋の周長、 $E_s$ ：主筋の弾性係数、 $A_s$ ：主筋断面積、 $P_{sx}$ ：主筋引張力である。

### (3) 解析結果

解析より得られた平均付着応力－荷重端すべり量関係を図 3.29 に示す。比較のため、単調載荷の解析結果を図中に破線で示す。履歴 Ca の解析結果を見ると、除荷後再び載荷をした場合の除荷開始点への指向性は徐々に低下している。しかし、履歴は包絡線まで戻り、付着応力の低下は見られず付着応力の最大値は単調載荷の場合と一致する。正負繰返し載荷の解析結果を見ると、履歴 Cb, Cc とともに、付着応力の最大値は単調載荷の値から低下し、履歴 Cb で 92%、履歴 Cc では 73%まで低下した。履歴 Cc では、第 3 サイクルでピークを迎えた後、付着応力は顕著に低下し、第 11 サイクル以後、付着応力の値はほとんど上昇しない結果となった。

解析結果から得られた  $\tau$ － $S$  関係の例として、付着応力の低下が著しい履歴 Cc の荷重端、荷重端から 100mm および 200mm の位置での  $\tau$ － $S$  関係を図 3.30 に示す。図より、位置により最大付着応力をとる加力サイクルが異なることが確認できる。荷重端は第 1 サイクル、荷重端から 100mm の位置では第 3 サイクルで、荷重端から 200mm の位置では第 5 サイクルでそれぞれ最大付着応力となっている。また、繰返し載荷によって、徐々に付着応力が低下し、最終的に  $\tau_{sl}$  に収束していく傾向が、位置によらず確認できる。荷重端では第 10 サイクルで、荷重端から 100mm および 200mm の位置では第 14 サイクルで概ね  $\tau_{sl}$  に収束している。

歪分布の推移の例として、履歴 Cc の最大荷重点からの除荷時の分布を図 3.31 に示す。図より、除荷後、分布の形状は徐々に上に凸な形状へと移行し、荷重が 0 のとき、試験体中央部で残留ひずみが生じる結果が得られた。これは第 2 章の両引き試験の結果と同様の傾向である。

今後の課題として、本研究における解析結果をより詳細に検討していくために、片持梁型の繰返し引抜試験を行い、実験結果と解析結果を比較していくことが必要であると考えられる。

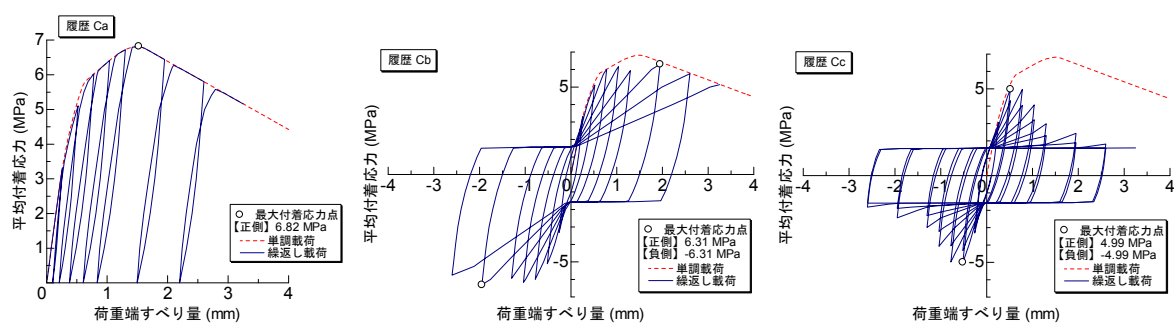


図 3.29 平均付着応力－荷重端すべり量関係【解析結果】

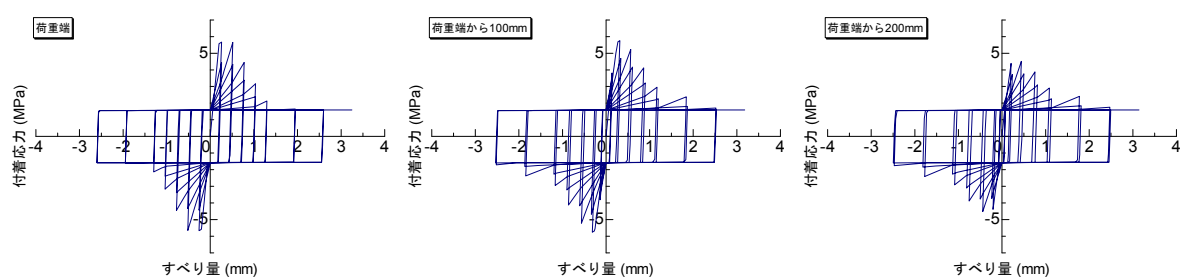


図 3.30 付着応力－すべり量関係【解析結果】

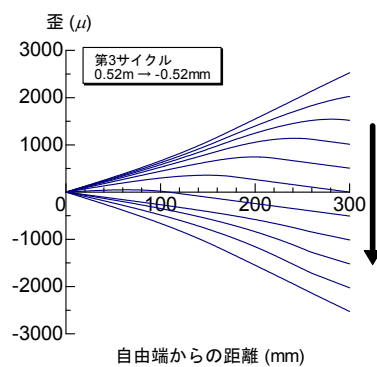


図 3.31 歪分布の推移【解析結果】

### 3.5 まとめ

繰返し荷重下における局所付着性状に与える横拘束力の影響の把握を目的とし、横拘束力をオイルジャッキにより直接作用させた状態での繰返し引抜試験を行った。

本実験の結果を用いて横拘束力が作用している場合の付着応力－すべり量関係の履歴モデルの構築し、片持梁型試験体の引抜試験を対象とした付着解析を行った。解析結果より、加力履歴による差異および繰返し荷重による付着強度の低下が確認できた。

## 第4章 結論

本研究では、繰返し荷重下における局所の付着応力－すべり量関係を実験的に把握し、履歴モデルの構築および付着解析により、繰返し荷重下における付着性状の評価を目的とした。以下に、本研究で得られた結論を述べる。

- (1) コンクリート強度 $\sigma_B$ が高くなるほど最大付着応力 $\tau_{max}$ は大きくなり、概ね $\sigma_B^{2/3}$ に比例する関係が得られた。また、鉄筋径が大きくなるほど最大付着応力時のすべり量 $S_{max}$ は大きくなり、概ね鉄筋径 $d_b$ の値に比例する関係が得られた。
- (2) マッシブなコンクリートを対象とした片引き試験および両引き試験において、繰返し荷重下による除荷開始点への指向性の低下が確認できた。しかし、片側繰返し荷重下では包絡線の低下はほとんどなかった。
- (3) マッシブなコンクリートにおける付着性状履歴モデルを構築し、両引き試験の付着解析を行った。解析結果は実験結果を概ね評価できることを確認した。
- (4) 横拘束力がある場合の付着応力－すべり量関係において、スリップ域の付着応力 $\tau_{sl}$ と拘束応力 $\sigma_L$ の間には明確な比例関係が見られた。また、拘束応力 $\sigma_L$ が高くなると、除荷開始点への指向性を表す $\alpha$ の値も高くなる傾向が確認できた。
- (5) 横拘束力のある場合の付着性状履歴モデルを構築し、片持梁型試験体の引抜き試験の付着解析を行った。解析結果より、繰返し加力により、付着強度が最も低下したもので73%まで低下することを確認した。

今後の課題として、片持梁型試験体を用いた繰返し引抜き試験を行い、解析結果と実験結果を比較・検討する必要がある。また、部材レベルでの繰返し付着実験を行い、本研究で構築した履歴モデルを用いて付着強度の低下などを十分に評価することが可能かどうか検討していく必要があると考えられる。



## 謝辞

本論文は、筆者が筑波大学大学院博士課程システム情報工学研究科の大学院生として、在学中の2年間に行った研究の成果をまとめたものです。筑波大学准教授 金久保利之先生には、本研究に着手する機会をいただき、本論文に関する一連の研究について、終始懇切な御指導と御鞭撻を賜りました。心より深謝の意を表します。

筑波大学教授 境有紀先生、筑波大学助教 八十島章先生には、論文を作成する上で、貴重なご意見を頂きました。厚く感謝致します。筑波大学技官 小島篤志氏には、試験体作成、設置から特殊な治具の製作まで、様々な面で多大なる便宜を図っていただきました。ここに御礼申し上げます。

本研究に関する一連の実験は、筑波大学 金久保研究室の多くの学生の協力の下に行われました。特に、卒業生の大和伸行氏には試験体作成など実験準備、から研究に臨む姿勢など、多くを学ばせていただきました。厚く感謝致します。研究内容に対して多くのご助言をいただきました研究室の卒業生である福原哲夫氏、松永健太郎氏に感謝致します。また、同先輩にあたる平野雄大氏、保坂剛氏、中山裕司氏、鬼塚由佳氏には、大変有意義で楽しい時間を共有する中で大変多くのことを学ばせていただきました。心より感謝申し上げます。研究室の同期である浅野浩平氏、重水法弘氏、田中慎治氏、張偉氏には、切磋琢磨し合った仲間として心から感謝するとともに、これから先も変わらぬお付き合いして頂きたい思います。後輩である、松本匡史氏は、共に過ごすことができ、とても有意義な研究室生活でした。

最後に大学生活を常に温かく見守り、支えてくれた両親に深く感謝いたします。

2011年3月

麻生 高行

## 参考文献

- 1) 六車熙，森田司郎，富田幸次郎：鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究(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，pp.1～8，1967.1
- 2) 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
- 3) 麻生高行，金久保利之，大和伸行：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) 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
- 5) 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
- 6) 金久保利之，酒井貴洋，米丸啓介，福山 洋：横拘束力が補強コンクリートの局所付着性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.3，pp.1201～1206，2000.6
- 7) 八十島 章，金久保利之；補強コンクリート部材の付着割裂性状に関する研究，その4 横補強筋のある場合の局所付着性状，日本建築学会構造系論文集，No.607，pp.141～148，2006.9
- 8) 八十島章，金久保利之，石川嘉崇：フライアッシュ高強度人工軽量骨材を用いた片持梁型試験体による付着割裂性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.961～966，2003.7