

論文 繰返し荷重下における RC の付着性状に与える横拘束力の影響

麻生 高行^{*1}・金久保 利之^{*2}

要旨：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、横拘束力およびコンクリート強度を実験要因とした引抜試験を行った。横拘束力はオイルジャッキにより直接作用させ、目標値を保持した状態で、すべり量を制御した繰返し加力を行った。横拘束力下においても、加力履歴の差異による最大付着応力および τ - S 関係の履歴性状への影響が見られ、正負繰返し加力における付着応力の低下の度合いが顕著であった。実験結果をもとに横拘束力が作用する場合の τ - S 関係の履歴モデルを構築し、片持梁型試験体の繰返し引抜試験の付着解析を行った結果、付着強度の低下が確認された。

キーワード：引抜試験, 付着応力, すべり量, 繰返し載荷, 横拘束力, 履歴モデル, 片持梁型試験体

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。これまでも単調載荷における付着性状に関する研究¹⁾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。そこで、著者らは既往の研究において、横補強筋のない場合を対象として繰返し載荷による片引試験および両引試験を行い、繰返し荷重下における付着性状を把握し、付着性状の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の比較検討を行っている^{2),3)}。

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。本研究ではこの横補強筋による拘束力が繰返し荷重下における局所付着性状に与える影響を把握するため、横拘束力をオイルジャッキにより直接作用させた状態⁴⁾での繰返し引抜試験を行った。また、実験結果をもとに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、検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

本実験の実験要因は横拘束力およびコンクリートの圧縮強度とした。横拘束力は 2.0, 6.0, 10.0kN の 3 水準とした。また、コンクリートの目標強度は 21, 36MPa の 2 種とした。

試験体形状を図-1 に示す。断面形状は 224×224mm の正方形断面とし、断面中央に異形鉄筋 D16 (SD345) を配した。試験体の幅は 112mm とし、試験体両端部に付着絶縁区間を 24mm ずつ設け付着区間は 64mm (主筋径の 4 倍) 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、断面中央に鉄板とスポンジを用いてスリットを設け、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。用いた異形鉄筋の力学特性を表-2 に示す。

試験体の名称を図-2 に示す。試験体は各実験要因に対して単調載荷試験 3 体、繰返し載荷試験 3 体 (加力履歴 C1~C3) とし、計 36 体とした。

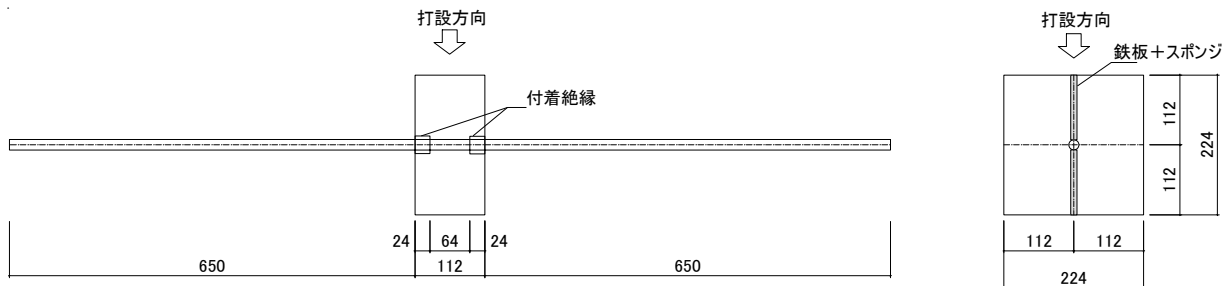


図-1 試験体形状

*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)

2.2 加力方法

加力方法を図-3に示す。テフロンシートを介して試験体を加力台に設置し、センターホールジャッキを試験体を両側から挟み込むように設置する。両側のセンターホールジャッキを別個に制御することで加力を行った。また、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作用させ、加力中、目標値を一定に保つように制御した。

計測項目は引抜荷重、荷重端側および自由端側変位、横拘束力およびひび割れ幅（スリット間変位）とした。

2.3 加力履歴

加力履歴は、荷重端のすべり量で制御することとした。最大荷重点以後の軟化域も含め付着応力-すべり量関係の全体で繰返し荷重の影響を把握するため、繰返しの目標値を荷重端すべり量 $S=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0\text{mm}$ とした。各加力履歴の詳細を図-4に示す。履歴1 (C1) は載荷・除荷の繰返し載荷、履歴2 (C2) は除荷後すべり量を 0mm まで戻す繰返し載荷、履歴3 (C3) は正負の繰返し載荷とした。

3. 実験結果

3.1 単調載荷試験

単調載荷試験の試験結果一覧を表-3に示す。表中の値はそれぞれ試験体3体の平均値である。付着応力は荷

表-1 コンクリートの力学特性

種類	圧縮強度 (MPa)	割裂強度 (MPa)	割線弾性係数 (GPa)
Fc36	37.2	2.97	28.6
Fc21	22.3	2.44	24.0

表-2 異形鉄筋の力学特性

降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
388	573	199

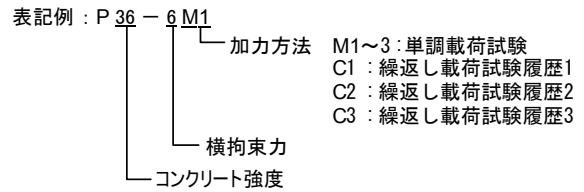


図-2 試験体名称

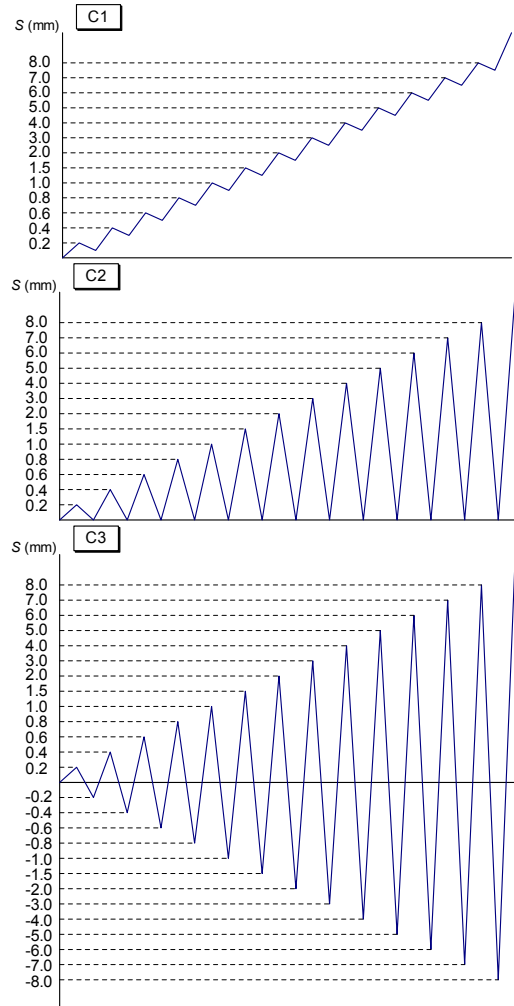


図-4 加力履歴

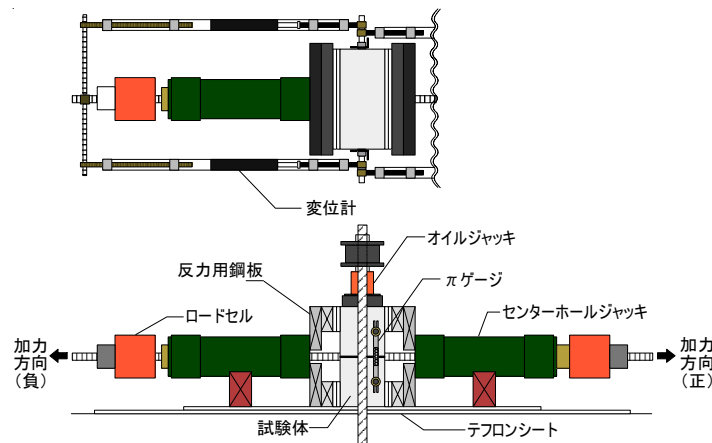


図-3 実験方法

表-3 単調載荷試験体の試験結果一覧

試験体名称	圧縮強度 (MPa)	横拘束		最大荷重時		
		横拘束力 (kN)	拘束応力 (MPa)	付着応力 (MPa)	荷重端すべり量 (mm)	ひび割れ幅 (mm)
P36-2M	37.2	2.0	1.97	6.10	1.563	0.521
P36-6M		6.0	5.90	9.38	0.706	0.178
P36-10M		10.0	9.83	12.07	1.031	0.106
P21-2M	22.3	2.0	1.97	5.70	0.937	0.337
P21-6M		6.0	5.90	6.97	0.910	0.093
P21-10M		10.0	9.83	8.94	1.225	0.064

重を付着面積で除して算出した。加力時に鉄筋の抜け出しにより付着面積が減少するが、付着長に対して抜け出し量は非常に小さいためこの影響は無視する。荷重端すべり量は荷重端変位から付着絶縁区間の鉄筋の伸びを差し引いて算出した。表より、コンクリート強度が高いほど、また横拘束力が強いほど最大付着応力が高くなる傾向が確認できる。また、ひび割れ幅はコンクリート強度が高いほど大きくなり、横拘束力が強いほど小さくなる傾向が確認できる。これらの傾向は既往の研究結果⁵⁾とも一致する。しかし、最大荷重時の荷重端すべり量に関しては、本実験では実験要因との間に明確な関係は見られなかった。

3.2 繰返し載荷試験

実験結果より得られた付着応力-荷重端すべり量関係（以下、 τ - S 関係）の例を図-5に示す。比較のため図中に単調載荷試験の結果も示す。

C1試験体の結果を見ると、繰返し載荷による最大付着応力および包絡線の低下はほとんど見られない。C2およびC3試験体の結果を見ると、繰返し載荷による最大付着応力の低下はC1試験体と同様にほとんど見られない。しかし、最大付着応力点以降、除荷開始点（最大すべり量経験点）への指向性は低下し、付着応力の値が徐々に低下する傾向が確認でき、この傾向はC3試験体でより顕著であった。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 τ_{sl} とすると、 τ_{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。

C1試験体の除荷時の勾配 K を除荷開始点のすべり量で整理したものを図-6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

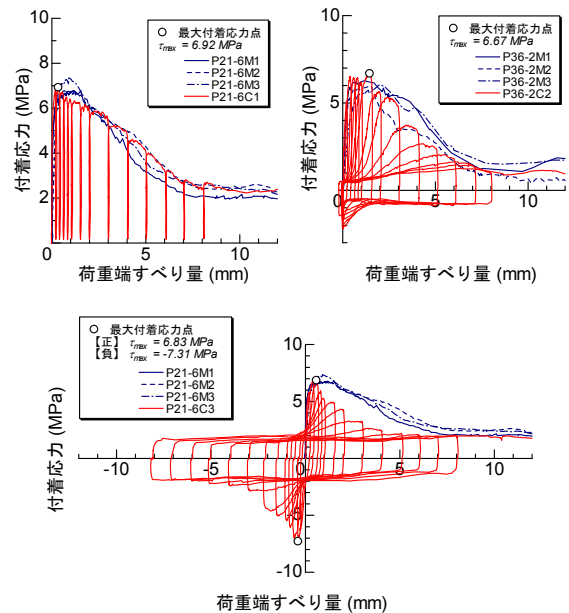


図-5 τ - S 関係【繰返し載荷試験】

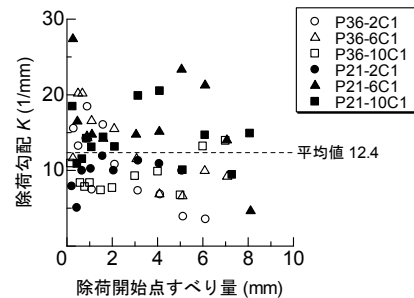


図-6 除荷勾配-除荷開始点すべり量関係

った。これは補強筋のない場合の付着実験²⁾より得られた傾向とは異なる結果である。

C2およびC3試験体の τ_{sl} と拘束応力（以下、 σ_L ）の関係をプロットしたものを図-7に示す。同図より、 τ_{sl} はコンクリート強度の値によらず、 σ_L に比例する結果が得られた。

図-8に繰返し載荷試験の除荷および再載荷時の履歴の例を示す。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 α とする。 α 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、 α の値と σ_L の関係を図-9に示す。同図より、拘束応力の値が高くなると α の値も高くなる傾向が確認できる。

4. 付着解析

4.1 解析モデル

解析に用いる履歴モデルは、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 τ_{max} の値は既往の研究結果⁵⁾を参考に以下の式(1)で与える。式(1)と単調載荷試験の結果をプロットしたものを図-10に示す。

$$\frac{\tau_{max}}{\sigma_B} = 0.681 \left(\frac{\sigma_L}{\sigma_B} \right) + 0.100 \quad (1)$$

ここで、 σ_B はコンクリートの圧縮強度である。

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-11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-11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⁴⁾をもとに以下の式(2)で表すこととする。

$$\frac{\tau}{\tau_{max}} = \frac{l_n - S}{l_n - S_{max}} \quad (2)$$

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。

モデルの履歴形状を図-12に示す。繰返し加力による包絡線の低下に関しては今後の検討課題とし、本研究では繰返し加力による包絡線の低下はないものとする。除荷開始点を点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、 $K = 12.4 (1/\text{mm})$ とした。除荷後の履歴形状は以下の①~③の場合分けし、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→N→M'→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→I→N→M'→L

③すべり量の正負が入れ替わる場合

J→N→M'→L

ここで、点Mの座標を (S_m, τ_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

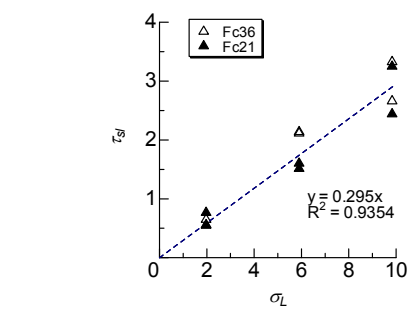


図-7 τ_{sl} - σ_L 関係

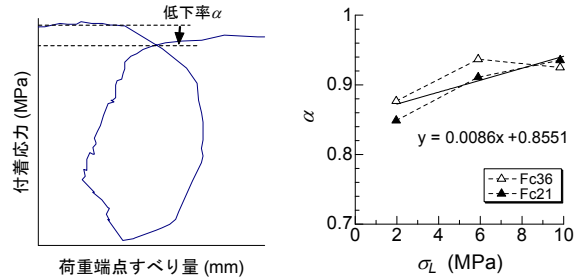


図-8 除荷開始点への指向性 図-9 α - σ_L 関係

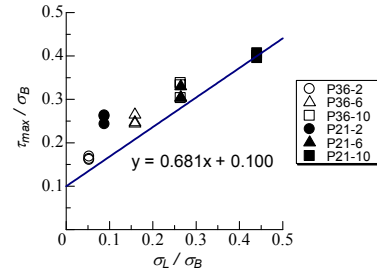


図-10 σ_L と τ_{max} の関係

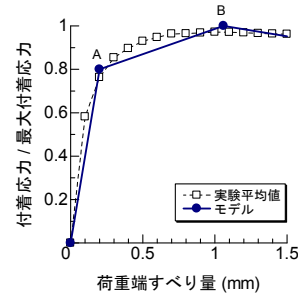


図-11 履歴モデル【包絡線形状】

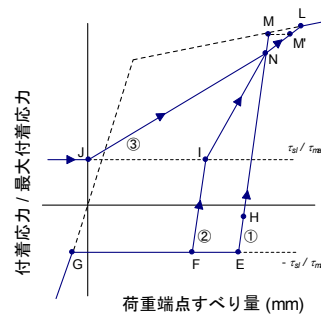


図-12 履歴モデル【履歴形状】

ある。

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

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

ここで、 α と β 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-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、 α の値は図-9の結果を直線近似した以下の式(3)で与えることとする。また、スリップ域の付着応力 τ_{sl} は図-7の結果より以下の式(4)で与えることとする。

$$\alpha = 0.0086\sigma_L + 0.8551 \quad (3)$$

$$\tau_{sl} = 0.295\sigma_L \quad (4)$$

構築した履歴モデルとP21-6C3試験体の実験結果を比較した $\tau-S$ 関係を図-13に示す。同図より、履歴モデルが実験結果を概ねよく表現できている。

4.2 付着解析

図-14に解析対象とする片持梁型試験体⁶⁾の形状を示す。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-5に示す。拘束応力の値は既往の研究⁵⁾より、以下の式(5)より算出した。

$$\sigma_L = \sqrt{k \frac{b \cdot p_w \cdot h}{N \cdot d_b \cdot l_{we}} \cdot E_s \cdot \sigma_B} \quad (5)$$

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。

解析方法については、式(6)~式(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。

$$\tau_x = f(S_x) \quad (6)$$

$$P_{sx,i+1} = P_{sx,i} + \tau_x \cdot \phi \cdot dx \quad (7)$$

$$S_{x,i+1} = S_{x,i} + \frac{P_{sx,i+1} + P_{sx,i}}{2E_s A_s} \cdot dx \quad (8)$$

ここで、 τ_x : 付着応力、 ϕ : 主筋の周長、 A_s : 主筋断面積、 P_{sx} : 主筋引張力である。

解析結果から得られた平均付着応力-荷重端すべり量関係を図-15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ともに、付着応力の最大値は単調載荷

表-4 α と β の値

	①	②・③	
		$ S_m \leq 0.2$	$ S_m > 0.2$
α	式(3)	式(3)	0.75
β	0.1	0.1	0.45

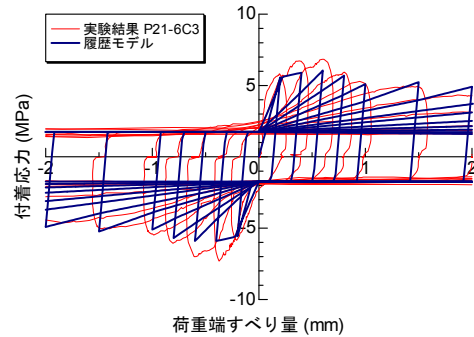


図-13 履歴モデル実験結果の比較

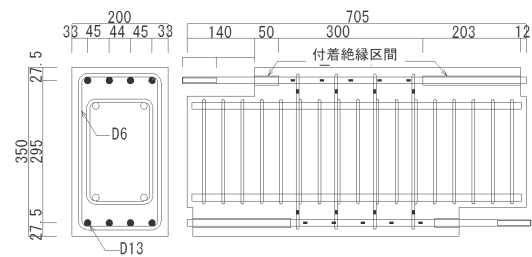


図-14 解析対象 片持梁型試験体形状

表-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の関係を表す定数	k	0.018

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。

解析より得られた $\tau-S$ 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の位置での $\tau-S$ 関係を図-16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 τ_{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の位置では第14サイクルで概ね τ_{sl} に収束している。

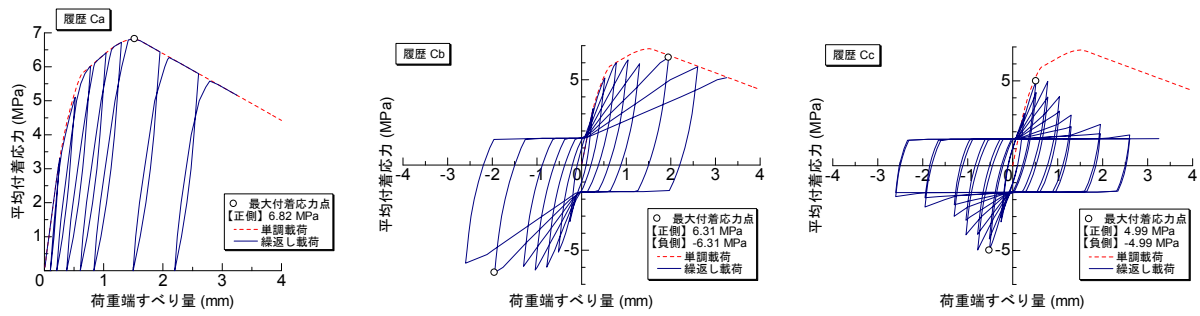


図-15 平均付着応力-荷重端すべり量関係【解析結果】

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-17 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、荷重端の歪が 0 (荷重が 0) のとき、試験体中央部で残留歪が生じる結果が得られた。これは既往の研究³⁾における両引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。

5. まとめ

1. 横拘束力下においても、加力履歴の差異による最大付着応力および τ - S 関係の履歴性状への影響が見られた。特に、正負繰返し加力における付着応力の低下の度合いが顕著であった。
2. 実験結果をもとに、横拘束力が作用している場合の τ - S 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った結果、付着強度の低下が確認された。

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) 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
- 3) 麻生高行, 金久保利之: 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, コンクリート工学年次論文集, vol.32, No.2, pp589~94, 2010.7
- 4) 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

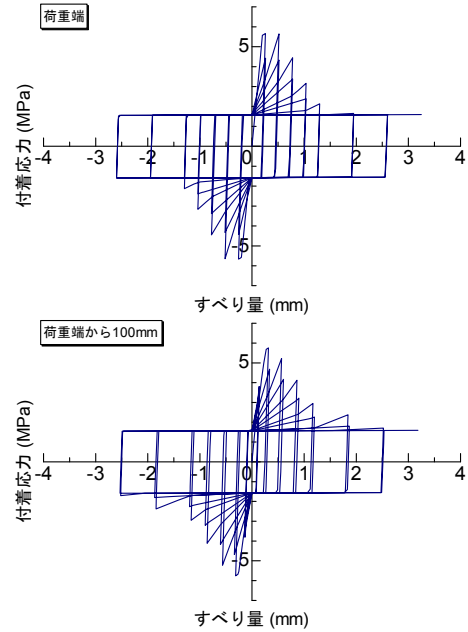


図-16 付着応力-すべり量関係【解析結果】

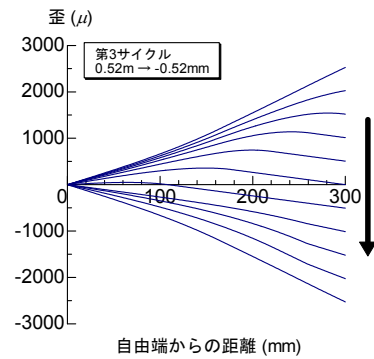


図-17 歪分布の推移【解析結果】

- 5) 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, pp141~148, 2006.9
- 6) 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