

# 論文 エポキシ樹脂補修による丸鋼付着履歴特性のモデル化

洪 成\*1・荒木 秀夫\*2・加川 順一\*3

**要旨：**本研究は繰返し引き抜き荷重を受ける丸鋼とコンクリート間の付着応力度—抜け出し変位履歴関係について、エポキシ樹脂注入で補修された丸鋼の履歴特性のモデル化を試みたものである。履歴モデルの各基準点は先に実施された実験から回帰的に求めている。提案したモデルと実験で得られた履歴曲線と比較し、全体的な履歴特性が推測できることを確認した。また、エネルギー吸収量、等価粘性減衰定数と抜け出し変位関係を比較検討し、提案したモデル化曲線で推測可能であることを示した。

**キーワード：**エポキシ樹脂補修, 丸鋼, 付着応力—抜け出し変位履歴, モデル化

## 1. はじめに

1970年代以前に建設されたRC建物には、主筋に丸鋼を使用していたものが多く存在している。これまでに行われた丸鋼を主筋としたRC部材の性能評価実験<sup>1)</sup>では、曲げ耐力を危険側に評価しやすく、またその荷重変形履歴特性はエネルギー吸収能力の乏しいスリップ形となることが分かっている。これは主筋が降伏する前に滑り出す付着滑脱破壊が原因と考えられている。筆者等はこれまでに丸鋼の付着特性を明らかにするためにプリズム試験体を用いた引き抜き試験<sup>2) 3)</sup>を実施し、その付着履歴特性のモデル化を報告してきた<sup>4)</sup>。一方、このような付着滑脱破壊を防ぐために、エポキシ樹脂を主筋周りに注入して丸鋼の付着性能向上を目指す試みも実施し、その大幅な改善効果も確認している。この方法を柱部材に適用し、主筋降伏による曲げ耐力の確保とスリップ型の履歴特性からエネルギー吸収の大きな履歴特性となることを実験的に確認している<sup>5)</sup>。

本論文は丸鋼の付着性能改善に焦点を置き、主筋周りにエポキシ樹脂を注入した丸鋼試験体の付着履歴特性のモデル化を試みたものである。その手法は既報<sup>4)</sup>と同様とし森田等<sup>6)</sup>が提案したモデル曲線のルールに基づき、既往の実験データを用いて、エポキシ樹脂補修を行った丸鋼の付着応力度—抜け出し変位（以下 $\tau$ - $S$ ）履歴関係のモデル化を試みた。また、提案した履歴モデルの妥当性を検討するため、実験で得られた履歴特性との比較を行った。先に述べた部材試験におけるエネルギー吸収改善効果に関連して、付着履歴特性においても単位面積当たりのエネルギー吸収量、等価粘性減衰定数と抜け出し変位関係について実験値との比較検討を行った。

## 2. 補修した丸鋼の付着履歴特性

筆者らはエポキシ樹脂注入により補修した丸鋼の付

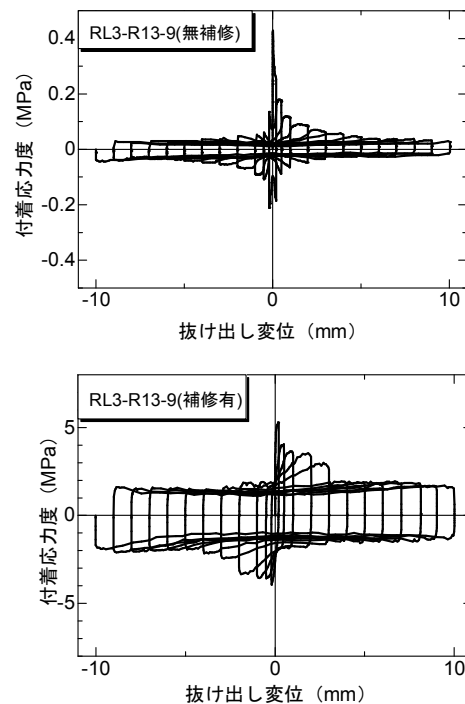


図-1 付着応力度—抜け出し変位関係

着強度の上昇効果及びその付着履歴特性を調べるために単調および繰返し引き抜き試験を実施して、エポキシ樹脂を主筋周りに注入し大幅な付着力上昇効果を確認してきている<sup>2) 3)</sup>。繰返し引き抜き試験における $\tau$ - $S$ 履歴特性はエポキシ樹脂を注入しない丸鋼の履歴特性と形状的には類似しているが、エポキシ樹脂を注入した荷重変形関係の各基準点の値は前者のそれと大きく異なっている。図-1に丸鋼13 $\phi$ の付着履歴特性におけるエポキシ樹脂注入の有無による違いを例示する。

## 3 補修有試験体のモデル曲線

本論文では補修無しのモデル曲線<sup>4)</sup>と同じように荷重変形関係の包絡線と繰返し履歴特性に分けてモデル化

\*1 広島大学大学院 工学研究科 建築学専攻

\*2 広島工業大学 工学部 教授 工博 (正会員)

\*3 SG エンジニアリング (株)

表-1 試験体一覧 (単調載荷)<sup>2)</sup>

試験体名	試験体数	鉄筋種類	鉄筋位置	鉄筋方向	コンクリート断面
HR13-9	5	13φ	中央	水平	150×150
VR13-9	3			垂直	
HR13-9-B	3	19φ	下端	水平	150×382
HR19-9	5			垂直	
VR19-9	3	19φ	中央	水平	150×150
HR19-9-B	3			垂直	
			下端	水平	150×382

表-2 試験体一覧 (繰返し載荷)<sup>3)</sup>

試験体名	試験体数	鉄筋種類	鉄筋位置	鉄筋方向	載荷方法
R13-9-1	1	13φ	中央	水平	シリーズ1
R13-9-2	1				シリーズ2
R13-9-3	6				シリーズ3
R19-9-3	3	19φ			

表-3 エポキシ樹脂の力学特性

密度 (g/cm <sup>3</sup> )	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	破断時伸び (%)
1.1	88.2	39.9	6.0

することとした。

### 3.1 試験体及び補修方法

エポキシ樹脂注入した丸鋼の引き抜き実験のデータを使用して履歴特性のモデル化を行った。単調載荷包絡線を決めるための試験体を表-1に、文献<sup>3)</sup>の繰返し載荷試験体を表-2に示す。繰返し履歴の包絡線を決めるための試験体は表-2中のシリーズ3である。シリーズ1は大振幅1回繰返しであり、シリーズ2は片振幅繰返し載荷であるので、その包絡線は単調載荷のものと同じであるとしている。丸鋼の付着強度はばらつくことが多いため同一の変数による試験体数は複数としている。丸鋼は13φと19φ、コンクリートの打設方向は水平と鉛直、それぞれの2種類である。実験では鉄筋の埋め込み位置は上端筋、中央筋、下端筋の3種類実施

したが、上端筋の $\tau$ - $S$ 関係はブリージング等の影響を受けて他の2種類と大きな相違があったため、本論文では中央筋と下端筋の実験データのみを用いている。プリズム試験体のコンクリート強度は11N/mm<sup>2</sup>である。低強度コンクリートの場合、普通強度のコンクリートに比べ相対的に付着強度が低くなるのが分かっており<sup>2)</sup>、その改善効果の可能性を調べることも本研究の目的の一つである。引き抜き試験体の詳細及び載荷方法は文献<sup>2)</sup>を参考にされたい。補修方法も文献<sup>4)</sup>と同じ、スプリング方式のカプセルを用いたエポキシ樹脂低圧注入工法であり、プリズム試験体の表面6ヶ所から径6mmで鉄筋位置まで穿孔した後、エポキシ樹脂を注入した。エポキシ樹脂の力学特性を表-3に示す。

### 3.2 単調載荷包絡線

単調載荷時に仮定した包絡線を図-2に示す。包絡線の各基準点は表-1に示す引き抜き試験からの回帰的に抽出したものである。13φと19φの試験体それぞれ11体である。図中において最大付着応力度に対応する座標B ( $\tau_B, S_B$ )を基準とし、他のA, C, Dの各点を決めている。補修無しのモデル包絡線では固着力が全付着領域で喪失し、自由端部に変位が発生し始める付着応力度を最大付着応力度 $\tau_B$ の約8割として設定していたが、補修有りの場合、変位が発生し始める点の応力度 $\tau_A$ と最大応力度 $\tau_B$ の関係をプロットしてみると、図-3に示すように大きくばらついていた。そこで、本提案では補修無しの場合のように抜け出し変位が0における基準点を設定するのではなく、原点から初期勾配をもって最初の折れ点A点に向かうとした。すなわち、単調載荷包絡線の $\tau$ - $S$ 関係をO-A-B間(付着力上昇域)、B-C間(付着力下降域)、C-D間(付着力一定領域)の3領域に分けた。

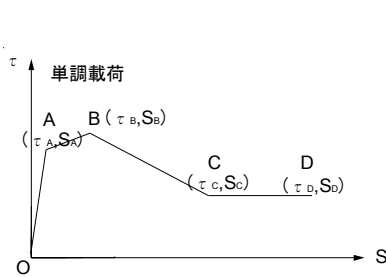


図-2 単調載荷包絡線

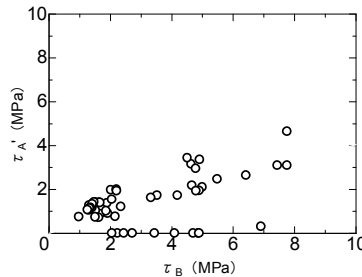


図-3  $\tau_A$ と $\tau_B$ の関係

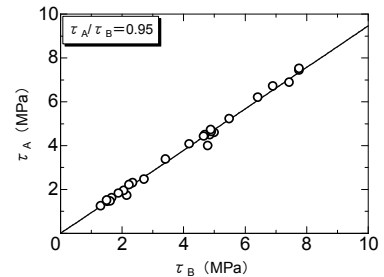


図-4  $\tau_A$ と $\tau_B$ の関係

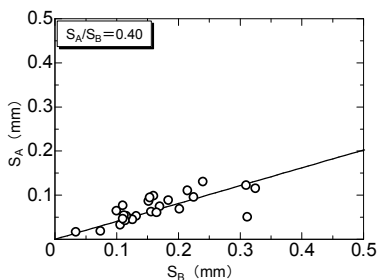


図-5  $S_A$ と $S_B$ の関係

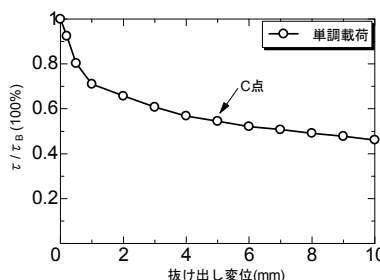


図-6 C点変位の決定方法

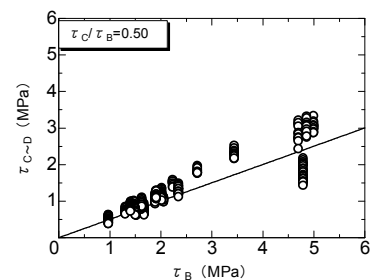


図-7  $\tau_{C\sim D}$ と $\tau_B$ の関係

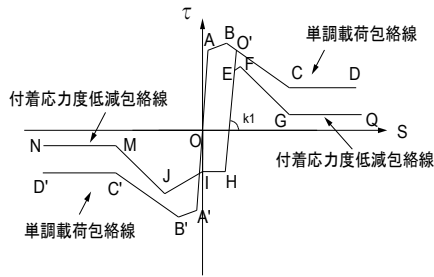


図-8 基準モデル曲線

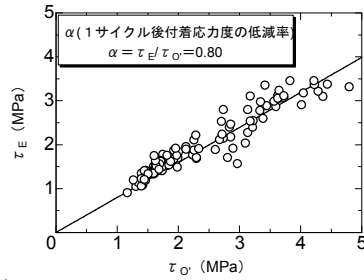


図-9 αの決定方法

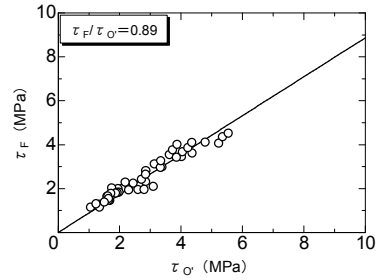


図-10 F点の付着応力度

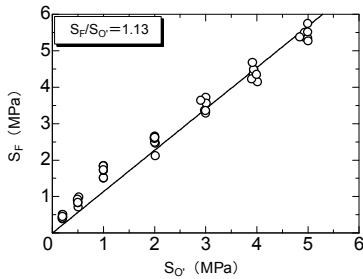


図-11 F点の抜け出し変位

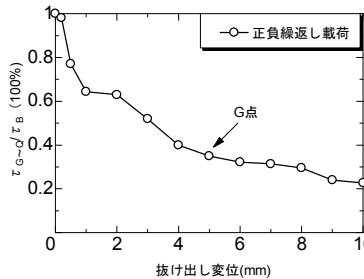


図-12 G点変位の決定方法

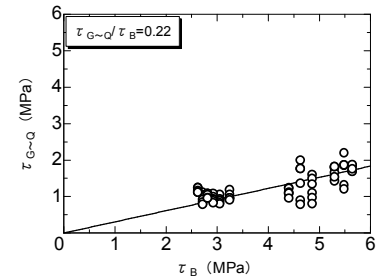


図-13 τ\_{G-Q}とτ\_Bの関係

また、最大付着応力度 $\tau_B$  はエポキシ樹脂の充填性及びエポキシ樹脂の性質などと関係があると考えため、補修無しの場合と同様に、実験で得られた個々の最大付着応力を用い、それぞれの履歴特性と対応させるようにした。単調載荷包絡線の付着応力上昇域で、最初に折れ曲がるA点は最大付着応力度 $\tau_B$  とその時の変位 $S_B$ を基に図-4、図-5から以下のように決めた。

$$A (\tau_A, S_A) = (0.95\tau_B, 0.40 S_B)$$

その後、A点から最大付着応力度の発生するB点に向かうものとする。補修無しの場合には最大付着応力を発生するB点の変位 $S_B$ は既往の文献<sup>7)</sup>を参考にして、一率0.1mmに決めた<sup>4)</sup>が、補修有りの場合は0mmから0.448mmにかけて分布するため、本論文では $S_B$ を補修無しの場合の2倍の0.2mmとした。ここで、図-2に示すように付着力上昇域(O-A, A-B)における傾きはそれぞれ以下のように表せる。

$$K_1 = 2.375 K_B N/mm^3 \quad S \leq S_A$$

$$K_2 = 0.083 K_B N/mm^3 \quad S_A < S \leq S_B$$

ここで、 $K_B$ ：最大付着応力時の等価剛性 ( $N/mm^3$ )

付着応力が一定となるC点は無補修の場合と同じとして5mmとした。しかし、実験では図-6に示すように変形が大きくなるにつれて付着力応力度は僅かながら漸減するが、モデルではある変位から一定値を保持すると仮定した。その時点の付着応力度は図-7から、 $0.50\tau_B$ とした。補修無しの場合に一定値となる付着応力度を $0.21\tau_B$ としたのに比較すると、エポキシ樹脂注入により最大応力度からの低下度合いは半分以下になっていることが分かる。C点の座標は以下のようになる。

$$C (\tau_C, S_C) = (0.50\tau_B, 5mm)$$

載荷の最終点のD点はC点と同じ付着応力度を採用し、座標は以下のようになる。

$$D (\tau_D, S_D) = (0.50\tau_B, S > 5mm)$$

### 3.3 正負繰返し載荷用の包絡線

$\tau$ - $S$ 履歴における包絡線を図-8に示す。このモデル曲線は既報<sup>5)</sup>に提案した補修無しの場合のモデル化ルールと同様に、付着応力度の上昇域O-A-Bまでは前項に示した単調載荷包絡線を辿り、その後、繰返しにより低減された包絡線と履歴ルールに移行するとしている。負側の包絡線は正側の包絡線に原点对称に移動したものである。 $S_B$ 以降で荷重が反転する点をO'点とすると、負方向への $\tau$ - $S$ 関係における基準包絡線はO'-H-I-J-M-Nの経路を辿るとする。再度、荷重が反転し正側に向かう時再び戻ってくる時に目指す点をE点とすると、正方向へ $\tau$ - $S$ 関係における基準包絡線はE-F-G-Qを辿る。E点の座標を以下のように示す。

$$E (\tau_E, S_E) = (\alpha\tau_O, S_O - (1-\alpha) \cdot \tau_O / K_1)$$

$\alpha$ は除荷時から1サイクルの履歴を経験したことによる付着応力度の低減率を図-9から以下のように決めた。

$$\alpha = |\tau_E / \tau_O| = 0.80$$

E点から正側に加力すると、付着応力度はF点まで上昇する。F点は図-10、図-11から除荷点O'と関係づけて、以下のように決めた。

$$F (\tau_F, S_F) = (0.89\tau_O, 1.13S_O)$$

F点に到達後、Gに向かう。G点は図-12に示すよう

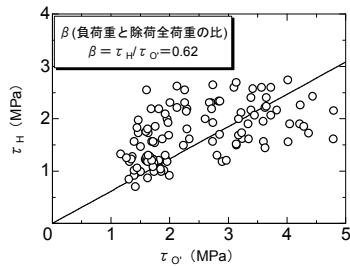


図-14 βの決定方法

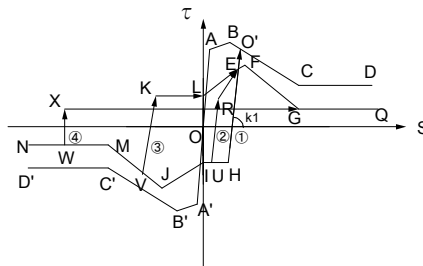


図-15 モデル履歴曲線 (B-C)

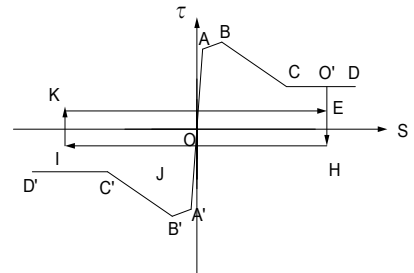


図-16 モデル履歴曲線 (C-D)

に繰返し载荷における付着応力がほぼ一定となる点である。G点の付着応力度と最大付着応力度 $\tau_B$ の関係は図-13から以下のように決めた。

$$G(\tau_G, S_G) = (0.22\tau_B, 5\text{mm})$$

補修無しの場合は付着応力度が一定となる時の付着応力度を $0.07\tau_B$ としたので、エポキシ樹脂注入によって3倍以上の付着応力度を見込むことになる。最終のQ点の座標を以下のように示す。

$$Q(\tau_Q, S_Q) = (0.22\tau_B, S > 5\text{mm})$$

負側の経路J-M-Nは正側経路F-G-Qと原点对称に移動した低減包絡線と仮定する。

### 3.4 正負繰返し载荷用の履歴特性

$\tau$ -S履歴における履歴特性を除荷開始点の変位により分けて提案することとする。すなわち、付着応力度が最大となるB点から付着応力度が一定値となるC点の領域と付着応力度が一定値とC点からD点の領域である。

#### (1) B-Cの間で除荷する場合

B-C間で任意のO'点から除荷する時、付着力と変位は一定の勾配をもって減少する。付着力0から更に逆方向に荷重を加えると、除荷勾配と同じ勾配で、H点に至る。その勾配はO-Aにおける初期勾配 $K_1$ とする。これは補修無しの場合の除荷においては、荷重のみ減少し、変位はある応力に達するまでは変わらない点とは大きな相違である。H点の付着応力度 $\tau_H$ とその時の変位 $S_H$ は除荷時のO点との関係を付けて以下のように表す。

$$H(\tau_H, S_H) = (-\beta\tau_{O'}, S_{O'} - (1+\beta)\tau_{O'}/K_1)$$

式中の $\beta$ は除荷時付着応力度 $\tau_{O'}$ と到達付着応力度 $\tau_H$ の比率であり、図-14から以下のように決めた。

$$\beta = |\tau_H/\tau_{O'}| = 0.62$$

その後、一定の付着応力度 $\tau_H$ を保持し、変位0まで戻る。この点をI点に達する。さらに負側に進入すると、I点からJ点まで応力が上昇する。J点、M点、N点の座標は正側におけるF点、G点、Q点と原点对称の位置にあるとし、以下のように表す。

$$J(\tau_J, S_J) = (-\tau_F, -S_F)$$

$$M(\tau_M, S_M) = (-\tau_G, -S_G)$$

$$N(\tau_N, S_N) = (-\tau_Q, -S_Q)$$

負側の経路H-I-J-M-N上のO'点で除荷する場合、図-15に示すように除荷点変位 $S_{O'}$ の位置によって①～④に分けてモデル化した。

#### ① $S_H \leq S_{O'} < S_O$ の場合

H-O'間の任意点から再载荷する場合、 $\tau$ -S関係は勾配 $K_1$ の直線に沿ってO'点に戻り、その後の経路は元の単調包絡線を辿る。

#### ② $0 \leq S_{O'} < S_H$ の場合、経路:U-R-E-F-G-Q

I-H間の任意点(U点)から再载荷する時、勾配 $K_1$ に沿ってR点まで至り、その後、R点からE点に向かって上昇し、そして付着応力度低減包絡線を辿る。R点は以下のように決めることができる。

$$R(\tau_R, S_R) = (-\beta\tau_U, S_U - (1+\beta)\tau_U/K_1)$$

#### ③ $S_M \leq S_{O'} < 0$ の場合、経路:V-K-L-E-F-G-Q

M-I間の任意点のV点から再载荷する時、勾配 $K_1$ に沿って、K点まで至る。K点の座標はR点の場合と同様で、以下のように表す。

$$K(\tau_K, S_K) = (-\beta\tau_V, S_V - (1+\beta)\tau_V/K_1)$$

その後再载荷すると、付着応力度を維持したまま、K点から変位0のL点に至り、E点に向かう。L点の座標は下のように表す。

$$L(\tau_L, S_L) = K(\tau_K, S_K)$$

#### ④ $S_{O'} < S_M$ の場合、経路:W-X-G-Q

大変形域で荷重が反転する場合、変位は変わらず、応力のみ逆方向に反転するものとする。

#### (2) C-Dの間で除荷する場合

大変形域C-DまたはG-Qの間で除荷また再载荷する場合を図-16に示す。補修無し場合のモデル曲線と同じように、O'から除荷すると除荷時の変位は変わらないままH点に至る。H点の付着応力度は $\tau_H = -0.22\tau_B$ とする。H点に達した後、初めて変形が増加し始める。その後は負側の繰返しにおいても同様の履歴特性を示すと仮定する。

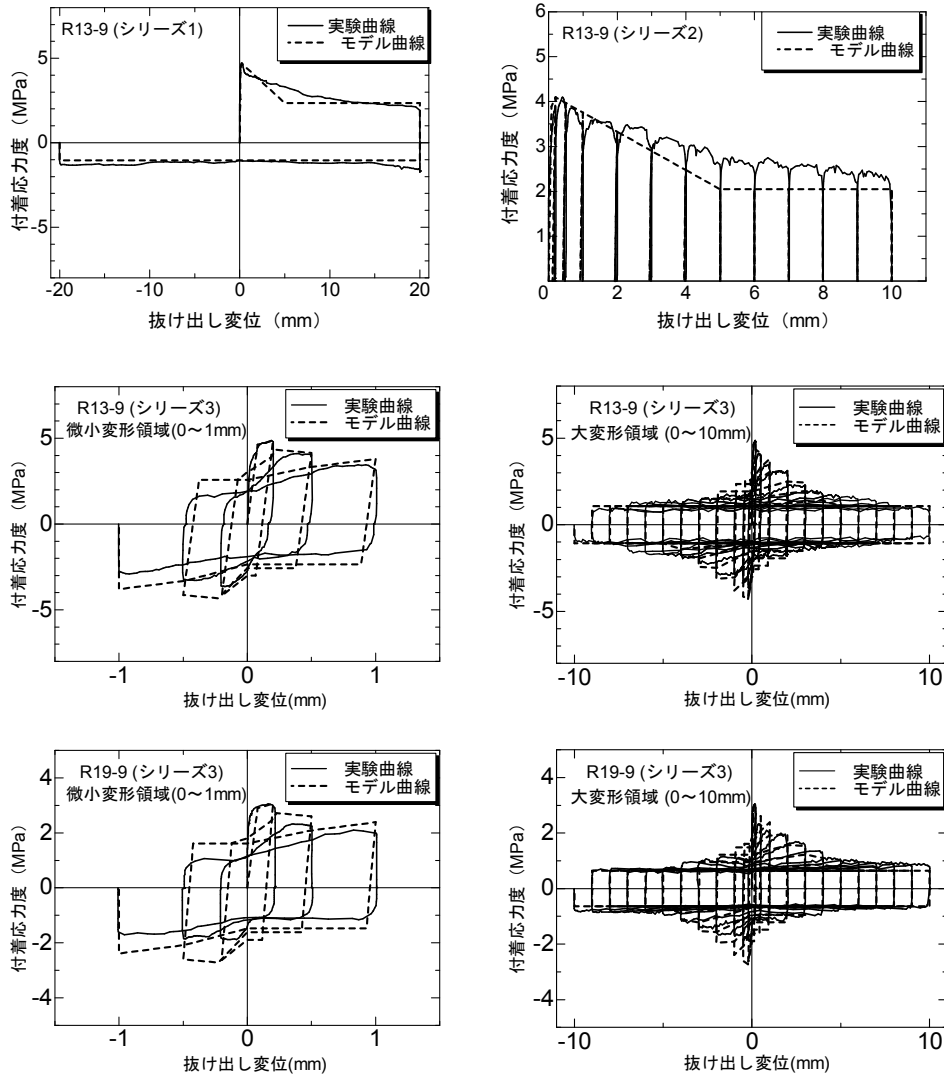


図-17 実験値とモデル曲線の比較

#### 4 モデル曲線妥当性の検討

##### 4.1 付着応力度-抜け出し変位関係

提案した履歴モデルの妥当性を検討するため、実験値との比較を行った。比較対象は表-2に示す繰り返し引き抜き試験体のものである。比較検討例を図-17に示す。同図上段の2つは大振幅一回繰り返しと片振幅繰り返しの比較であり、その包絡線は単調荷重包絡線のルールに従っている。徐荷時ルールは大振幅一回繰り返しの場合、C-D間で除荷するルールに従い、片振幅繰り返しの場合はB-C間で除荷する場合の第①のルールに従っている。中段および下段の比較例は提案したモデル曲線におけるB-C間で除荷する場合の第③と④のルールに従っている。全体的に見ると、実験結果を追跡し得ていると思われる。ただし本実験で設定したパラメータ $\alpha$ と $\beta$ については繰返し回数の増加ばかりでなくコンクリート強度によってもそれらの値は変動すると考えられ、提案した履歴モデルの汎用性を確保するためには、今後データの蓄積が望まれる。

##### 4.2 ループ特性

繰り返し引き抜き荷重時の $\tau$ - $S$ 関係のループ面積を測ることによって丸鋼の単位面積あたりエネルギー吸収量及びその等価粘性減衰定数を算定した。13 $\phi$ 及び19 $\phi$ の実験値と解析値の比較例を図-18と図-19に示す。また、図中のモデル曲線を作成する際に用いた $\tau_B$ はこれまでの実験で得られた最大付着応力度の平均値である。補修した試験体における最大付着応力度の平均値は13 $\phi$ 及び19 $\phi$ で、それぞれ4.88MPa、2.91MPaである<sup>3)</sup>。このように鉄筋径によって差があるのはブリージング等によって鉄筋下に来る空隙に注入されるエポキシ樹脂の多寡による影響と考えられ、細径のほうが相対的に多く注入されると推測される。図-18に示すように、13 $\phi$ の試験体における各サイクルのエネルギー吸収量は2.13~51.23MPa $\cdot$ mmの値に分布し、19 $\phi$ の試験体は1.11~30.91MPa $\cdot$ mmの値に分布している。図-19に示すように、全ての補修有り試験体の等価粘性減衰定数はほぼ同じで、約40%~60%になった。

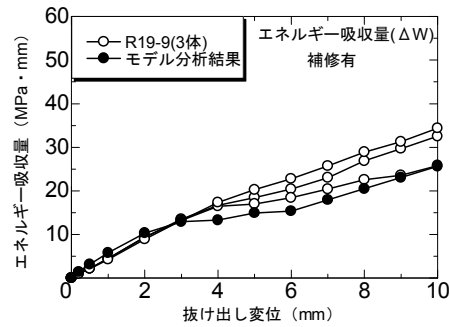
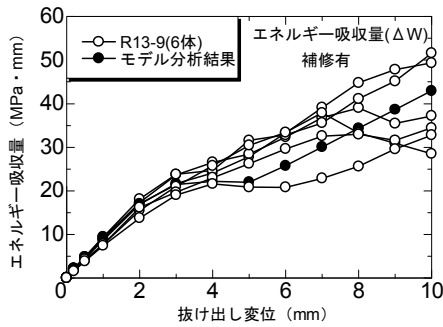


図-18 エネルギー吸収量-抜け出し変位関係

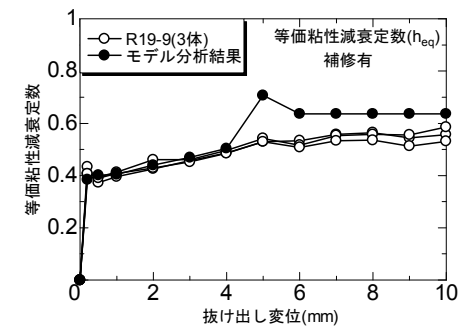
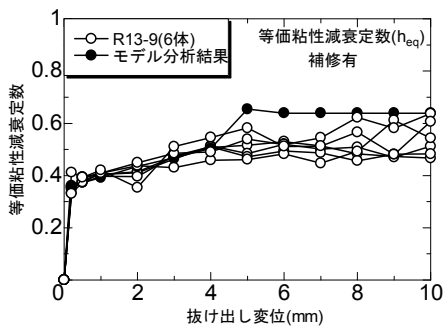


図-19 等価粘性減衰定数-抜け出し変位関係

図のように、実験値と提案した履歴モデル曲線による推定値は比較的対応している。平均した実験値と推定値の相関係数は13φ及び19φのエネルギー吸収量でそれぞれ0.98、0.99、等価粘性減衰定数で0.93、0.96となっている。しかし、付着応力度が一定となる大変形領域においては、繰り返し载荷による摩擦力の劣化が予想され、十分に追跡できていない部分も見られた。

## 5 結論

エポキシ樹脂で補修された丸鋼の付着履歴特性のモデル化曲線を実験結果から回帰的に求めた。実験から得られた履歴特性と比較した結果、実験した範囲において以下のことが分かった。

- 1) 得られたモデル化曲線の各基準点の値は補修無しモデル化曲線と大きく異なっていた。
- 2) 提案したモデル化曲線は実験で得られた履歴特性を推測が可能であることを示した。しかし、そのモデル曲線の特性値 $\alpha$ と $\beta$ は繰り返し回数等による鉄筋とコンクリート間の摩擦力の劣化の影響を受けるため、大変形領域で十分に追跡できていない部分が見られた。これらについては今後のデータの蓄積が必要と考えている。
- 3) 単位面積あたりのエネルギー吸収量と等価粘性減衰定数についてモデル曲線を用いて実験値をほぼ推測可能であることを示した。
- 4) 等価粘性減衰定数は鉄筋径に拘わらず、すべての試験体においてほぼ同様の傾向を示した。

## 謝辞

本研究の一部は平成23年度科学研究費補助金(基礎研究(B) 課題番号:21360268 代表研究者:広島大学大学院准教授荒木秀夫)の助成を受けた。

## 参考文献

- 1) 荒木秀夫, 伊木勇人: 主筋に丸鋼を用いた低強度コンクリート部材の耐震性能評価; 日本建築学会技術報告集, 第35号, pp.167-170, 2011.2
- 2) 荒木秀夫, 吉田俊太郎, 洪成, 加川順一: 低強度コンクリートと丸鋼の付着強度とその補強効果; コンクリート工学年次論文報告集, Vol.32, No.2, pp.883-888, 2010.7
- 3) 洪成, 荒木秀夫: 繰返し荷重下の低強度コンクリートと丸鋼の付着性状に関する研究; 日本建築学会技術報告集, 第38号, pp.171-176, 2012.2
- 4) 洪成, 荒木秀夫, 加川順一: 低強度コンクリートと丸鋼の付着履歴特性のモデル化; コンクリート工学年次論文報告集, Vol.32, No.2, pp.883-888, 2011.7
- 5) 荒木秀夫, 伊崎聖也: 被災した低強度コンクリート柱のエポキシ樹脂注入効果; 日本建築学会技術報告集, 第38号, pp.181-186, 2012.2
- 6) 森田司郎, 角徹三: 繰返し荷重下における鋼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
- 7) Duff A. Abrams : Tests of bond between concrete and steel, Published 1913 by University of Illinois in Urbana