

# 論文 繰り返し荷重履歴を受ける腐食鉄筋とコンクリートの付着応力モデル

高田 翔太\*1・山崎 理美\*2・大下 英吉\*3

**要旨:** 既存の構造物は経年劣化に伴い腐食が生じている。それだけでなく実構造物には地震など繰り返し荷重が作用している。本研究において、付着応力とすべりの関係を鉄筋腐食の影響、腐食ひび割れの影響、せん断補強筋の影響をそれぞれパラメータとし、モデルを構築した。構築モデルを実験値と比較する事により結果として、繰り返し荷重下における RC 部材の載荷経路、除荷経路および再載荷経路の付着応力とすべりの関係を硬化域、硬化域～軟化域、軟化域それぞれについて評価可能とした。

**キーワード:** 付着応力, 繰り返し載荷, 載荷経路, せん断補強筋, 鉄筋腐食

## 1. はじめに

近年、既存 RC 構造物において経年劣化による構造性能や耐久性能など構造性能の大幅な低下が深刻な問題となっている。特に、各種劣化が生じた RC 構造物の構造性能に関しては、人的被害にも直結するため、その劣化の程度の推定や構造性能に及ぼす影響および現時点で保有する構造性能とその将来予測手法の確立は急務となっている。

RC 構造物において構造性能を低下させる要因は様々であるが、その中でも中性化、塩害に起因する鉄筋腐食は非常に重要な要因である。昨今、鉄筋腐食した RC 部材の構造性能に関する研究は、盛んに行われており、鉄筋の腐食性状と耐荷機構の関連性はある程度明らかにされているが、構造性能の定量化には至っていない。

鉄筋腐食した RC 部材の耐荷機構および構造性能を決定付ける主たる要因としては、鉄筋の腐食率とその不均一性、コンクリートの腐食ひび割れ幅や間隔および、腐食鉄筋とコンクリートの付着性状が挙げられる。耐荷力の予測においては、それぞれの要因の影響度合い或いは複合的な影響度合いにより定性的かつ定量的に評価しなければならない。特に、鉄筋とコンクリートの一体性が前提条件である RC 部材にとって、腐食鉄筋とコンクリートの付着性状は非常に重要な要因であり、その定量的評価が必要不可欠である。

既往の研究<sup>1)</sup>において、梁全長にわたり鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の残存耐力は、せん断補強筋および定着フックを有さない状態において、定着部からの鉄筋の抜け出しにより、大幅な耐力低下が生じることが報告されている。この要因として、鉄筋の腐食およびそれに伴って発生するコンクリートの腐食ひび割れの影響による鉄筋とコンクリートの付着応力の低下が指摘された。し

たがって、腐食劣化が生じた RC 構造物の構造性能を評価するためには、腐食を生じた鉄筋とコンクリートの付着応力性状の定量化が極めて重要であるということが、再確認されたのである。

鉄筋腐食を生じた鉄筋とコンクリートの付着性状に関しては、従来、鉄筋定着長の短い試験体を対象として最大付着応力およびその定着区間の平均的な付着応力とすべり関係に着目した研究が行われていた。しかしながら、鉄筋の付着性状は、断面内はもちろんのこと、軸方向にも極度な不均一性を有するものであるため、付着性状は単にある領域の平均で表すことができず、鉄筋自体の挙動もそうであるが、不均一性に関連付けた検討が必要となった。このような観点から、最近では島らが提案した定着長の長い腐食鉄筋を対象とした付着応力性状の定量化が実施されつつある。加藤ら<sup>2)</sup>は非線形有限要素解析を基に鉄筋腐食を生じた鉄筋とコンクリートの付着性状を示したが、単調載荷の評価に留まっている。一方、鈴木ら<sup>3)</sup>は繰り返し荷重を受ける腐食した鉄筋とコンクリートの付着応力性状に関する実験的検討を実施したが、そのモデル化には至っていない。

一般に、実構造物で特に地震時には繰り返し荷重を受けたり、あるいは、単調荷重が載荷されたとしてもひび割れ発生や変形の局所化により、その領域では繰り返し荷重下にある。したがって、このような繰り返し荷重下における腐食した鉄筋とコンクリートの付着性状の評価ならびにそのモデル化が必要となっている。

そこで本研究では、鉄筋腐食した RC はり部材の繰り返し荷重下における付着応力とすべり関係のモデルの構築を目的として、腐食した鉄筋とコンクリートの引抜き実験を行うとともに、モデルの構築と検討を行った。

\*1 中央大学 理工学部都市環境学科 (学生会員)

\*2 中央大学 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

\*3 中央大学 理工学部都市環境学科 教授 工博 (正会員)

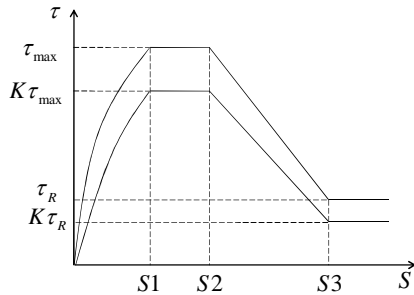


図-1 付着応力-すべり関係

## 2. 既往のモデル

加藤ら<sup>2)</sup>が提案した付着応力すべり関係は図-1となるとし、鉄筋腐食した RC 梁部材の鉄筋とコンクリートの付着応力モデルを次式のように定義した。

$$\tau = \tau_{\max} \left( \frac{s}{s_1} \right)^a \quad (0 < s \leq s_1) \quad (1)$$

$$\tau = K\tau_{\max} \quad (s_1 < s \leq s_2) \quad (2)$$

$$\tau = K \frac{\tau_{\max} - \tau_R}{s_3 - s_2} \quad (s_2 < s \leq s_3) \quad (3)$$

$$\tau = K\tau_R \quad (s_3 < s) \quad (4)$$

ここで、 $\tau_{\max}$ [N/mm<sup>2</sup>]は最大付着応力、 $\tau_R=0.3$ N/mm<sup>2</sup>、 $s$ [mm]はすべり量、 $s_1=0.05$ mm、 $s_2=0.6$ mm、 $s_3=1.0$ mm、 $a=0.4$ である。また、 $K$ は腐食率 $\alpha$ [%]からもとまる剛性の低下は次式で定義される。

$$K = e^{-6.07\alpha} \quad (5)$$

このモデルは、単調荷重による評価にとどまっている。しかしながら、繰返し荷重において、付着応力とすべり関係にはさらに除荷時および再荷重時のものが加わる。よって、加藤らの付着応力モデルでは繰返し荷重における評価を行うには不十分な点がある。

## 3. 繰返し荷重履歴を受ける付着応力

2章で述べたモデルが構築される中、繰返し荷重における確固たる付着応力モデルが構築されていないのが現状である。そこで、本章では繰返し荷重の影響を考慮した新たな付着応力モデルの構築内容を示す。

### 3.1 モデル構築までの流れ

一般的に単調荷重時、非腐食時において鉄筋とコンクリートの付着応力とすべり関係は放物線的に上昇（硬化域）した後、ある値に漸近（軟化域）する。しかしながら、腐食時は、図-2に示すように付着応力は放物線的に上昇（硬化域）した後、腐食ひび割れなどの影響により減少（軟化域）し、その後ある値に漸近（軟化域）する。一方、繰返し荷重を受ける場合、図-3における①および②に示すように除荷経路は原点指向<sup>3)</sup>あるいは

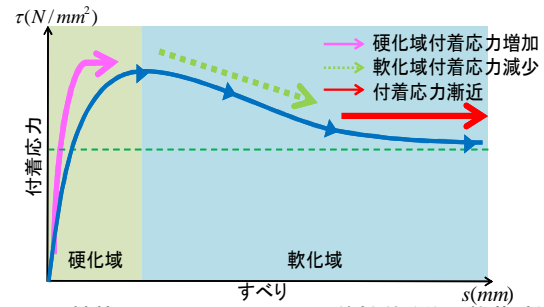


図-2 鉄筋とコンクリートの付着性状(単調荷重時)

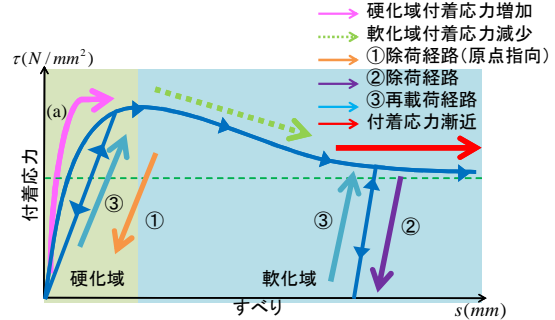


図-3 鉄筋とコンクリートの付着性状(繰返し荷重時)

じることとなる。また③に示す、再載荷経路は除荷経路をたどるかあるいは、より非線形の大きい挙動となる。

そこで、本モデルでは図-3に示すように付着応力の荷重、除荷、再載荷といった繰返し履歴モデルを構築する。

### 3.2 付着応力性状に及ぼす各種要因評価

既往の研究<sup>1)</sup>において鉄筋腐食が各種耐荷性能に大きな影響を及ぼすことならびにせん断補強筋を有することで、付着応力が増加することが報告されている。そのため、これらの影響を加味したモデルの構築をすることが重要である。

#### (1) 鉄筋腐食の影響評価

鉄筋腐食が生じると鉄筋に腐食生成物が生じ、体積膨張によりコンクリートとの摩擦が生じ、付着応力が増加する。本モデルでは鉄筋腐食の影響を考慮するパラメータ  $M_1$ 、 $M_2$  として次式を定義した。

$$M_1 = \frac{\alpha_1}{100 \times (1+m)} \quad (6)$$

$$M_2 = \frac{m\alpha_2}{100 \times (1+m)} \quad (7)$$

$$m = \frac{m_2}{m_1} \quad (8)$$

ここで  $m_1$ 、 $m_2$  は単位主鉄筋量およびせん断補強筋量、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  は主鉄筋の腐食率およびせん断補強筋の腐食率である。

#### (2) 腐食ひび割れの影響評価

コンクリートに腐食ひび割れが発生する以前においては、拘束圧に応じ付着応力が増加する。しかしながら、鉄筋腐食が進行すると腐食膨張圧の増加により、鉄筋のかぶり方向にひび割れが生じる。このひび割れ発生によ

り拘束圧が解放され、それに伴い付着応力が低下する。本モデルではひび割れ発生により、付着応力が低下することを考慮するパラメータ  $W$  として次式で定義する。

$$W = \frac{\delta}{b} \tau_{\max} \quad (9)$$

ここで、 $\delta$ は初期腐食ひび割れ幅、 $b$  は試験体幅、 $\tau_{\max}$  は各載荷履歴の最大付着応力である。また、ひび割れ幅  $\delta$ は、既往の研究<sup>5)</sup>より次式で表される。

$$\delta = 0.122 \times \alpha_1 + 0.082 \quad (10)$$

### (3) せん断補強筋の影響評価

せん断補強筋を配筋することで鉄筋の抜け出しが抑制され、付着応力は増加する。さらに、せん断補強筋が腐食すると、腐食生成物の膨張圧により主鉄筋の拘束圧が増加する。本モデルではせん断補強筋配筋による付着応力の増加を考慮するパラメータ  $A$  を次式のように定義した。

$$A = \frac{d_1 \times 1 + d_2(1+c)}{l} \times \frac{\tau_{ave}}{\tau_{\max}} \quad (11)$$

ここで、 $d_1$ は試験体自由端部からせん断補強筋までの距離、 $d_2$ はせん断補強筋配筋間隔、 $c$ は一对のせん断補強筋本数、 $l$ は試験体長さ、 $\tau_{\max}$ は各載荷履歴の最大付着応力、 $\tau_{ave}$ は全載荷履歴の平均付着応力である。

### 3.3 構築モデル

本研究では、鈴木ら<sup>6)</sup>が定義したせん断ばねの付着特性を参考とし、腐食した鉄筋とコンクリートの付着応力とすべり関係の硬化域および軟化域における載荷時、除荷時および再載荷時のそれぞれ付着応力モデルを前節で示したパラメータを用いて構築する。

#### (1) 載荷時における付着応力モデル

図-3中の(a)に示すように、載荷時に付着応力が増加傾向にある際の付着応力とすべり関係は硬化域、軟化域ともに次式で表される。

$$\tau = \left( \tau_{(n)\max} - W \right) \left[ 1 - \left\{ 1 - \frac{s}{s_{(n)}} - (1 - M_1 + M_2 \times A) \right\}^a \right] \quad (12)$$

ここで、 $\tau_{(n)\max}$  は  $n$  回目の載荷時における最大付着応力、 $s_{(n)}$  は  $\tau_{(n)\max}$  に対応するすべり量である。また、 $a$  は定数である。

また、軟化域の載荷時の付着応力が減少傾向にある際は付着応力とすべり関係は次式となる。

$$\tau = \left( \tau_{(n)\max} - W \right) \left\{ \frac{s_{(n)\max} + s_{(n)}' - s}{s_{(n)\max} + s_{(n)}' - s_1} - (1 - M_1 + M_2 \times A) \right\}^b \quad (13)$$

ここで、 $s_{(n)\max}$  は  $n$  回目の載荷時における最大すべり量、 $s_{(n)}'$  は付着応力が一定値に漸近しはじめるすべり量である。また、 $b$  は定数である。

#### (2) 除荷時における付着応力モデル

硬化域における除荷時の付着応力の低下は原点指向であるため、付着応力とすべり関係は次式で表される。

$$\tau = \frac{\tau_{(n)\max} s}{s_{(n)}} \quad (14)$$

一方、軟化域においては残留すべりがあるため、除荷時の付着応力とすべり関係は次式となる。

$$\tau = \left( \tau_{(n)\max} - W \right) \left[ 1 - \left\{ 1 - \frac{s}{s_{(n)}} - (1 - M_1 + M_2 \times A) \right\}^a \right] \quad (15)$$

#### (3) 再載荷時における付着応力モデル

再載荷時における付着応力とすべり関係は硬化域、軟化域ともに次式で表される。

$$\tau = \left( \tau_{(n+1)\max} - W \right) \left[ 1 - \left\{ 1 - \frac{s}{s_{(n+1)}} - (1 - M_1 + M_2 \times A) \right\}^a \right] \quad (16)$$

ここで、 $\tau_{(n+1)\max}$  は  $n+1$  回目の載荷時における最大付着応力、 $s_{(n+1)}$  は  $\tau_{(n+1)\max}$  に対応するすべり量である。

また、付着応力が増加および減少後ある一定の値に漸近する際、式(12)、(13)、(16)の最大すべり量における付着応力を一定の値とした。

## 4. モデルの適用性評価

### 4.1 実験概要

#### (1) 試験体概要

試験体の形状寸法を図-4に示す。試験体は、 $240 \times 200 \times 875$ mmの直方体であり、かぶり40mmの位置にD16(SD295A)異形鉄筋を60mm間隔で3本配筋した(3本の鉄筋をそれぞれL鉄筋、M鉄筋、R鉄筋と称する)。まず、せん断補強筋が無い試験体では、自由端からの鉄筋の抜け出しを抑制するため、自由端から130mmの領域に定着筋を2本配筋した。また、せん断補強筋を有する試験体は、定着筋に加え、D6のせん断補強筋(SD295A)を80mm間隔で配筋した。

試験体は、打設後48時間で脱型した後に、28日間湿布養生を施した。荷重の載荷は、材齢36日時点とした。コンクリートの配合は表-1に示す通りである。なお、練混ぜ水には鉄筋腐食を促進させるため、5%NaCl水溶液を用いた。

実験パラメータは、表-2に示すように主鉄筋の腐食率およびせん断補強筋の有無である。なお、目標腐食率は10%および20%の2水準とした。なお、以降においてせん断補強筋が配筋されていない試験体BD-S0-10L、BD-S0-20LをS0シリーズ、せん断補強筋を配筋した試験体BD-S80-10L、BD-S80-20LをS80シリーズと称する。

鉄筋腐食には図-5に示す比較的容易に目標腐食率が

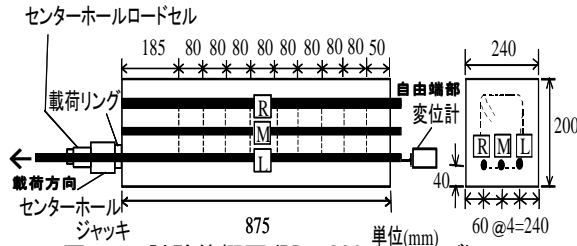


図-4 試験体概要 (BD-S80 シリーズ)

表-1 コンクリートの配合表

| 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |        |       |       |     |      |
|--------------------------|--------|-------|-------|-----|------|
| 水 W                      | セメント C | 細骨材 S | 粗骨材 G | 混和剤 | NaCl |
| 168                      | 280    | 826   | 996   | 2.8 | 8.11 |

表-2 実験パラメータ

| 試験体名       | せん断補強筋 | 引き抜き鉄筋 | 目標腐食率[%] | 実測値  |
|------------|--------|--------|----------|------|
| BD-S0-10L  | 無し     | L(外側)  | 10       | 10.4 |
| BD-S0-20L  |        |        | 20       | 14.5 |
| BD-S80-10L | 有り     | L(外側)  | 10       | 8.2  |
| BD-S80-20L |        |        | 20       | 14.7 |

得られる電食試験法を採用した。試験体を 5% の NaCl 水溶液を満たした水槽内に浸漬させ、鉄筋を陽極側、銅版を陰極側に接続し直流定電流 20A を所定の積算電流量に到達するまで通電した。

### (2) 試験方法

引抜試験方法の概要を以下に示す。引抜鉄筋は配筋された3本の鉄筋のうち、試験体側面から60mmの位置に配筋された外側の鉄筋(L鉄筋)である。なお、荷重速度は 9.8kN/min とした。荷重方法は図-6に示すように20kN、40kNおよび60kNまで繰り返し荷重させた後に除荷を行い、鉄筋の降伏荷重である70.5kNを最大荷重とする荷重・除荷を10回繰り返し10回目で試験体が破壊に至るまで荷重を荷重し続けた。

### (3) 測定項目

測定項目は、鉄筋の軸方向ひずみ、自由端すべりおよび腐食率である。鉄筋ひずみの測定は図-7に示すように、鉄筋を軸方向に切断後その断面に2mm×4mmの溝を掘り、ひずみゲージを貼り付けた後、2対の切断された鉄筋をエポキシ樹脂接着剤により貼り合わせ1本の鉄筋とすることで測定した。貼り合わせた鉄筋は3本の鉄筋のうち引抜鉄筋のみとし、残りの2本の鉄筋は通常の鉄筋を使用した。なお、ひずみゲージの貼り付け間隔は鉄筋径の3倍すなわち3D (Dは呼び径) である。なお、鉄筋の力学特性は通常の鉄筋と同等であり、断面積は4mm×4mm分減少している。

### 4.3 付着応力とすべり関係

引抜試験の結果より、鉄筋に沿った各位置にお

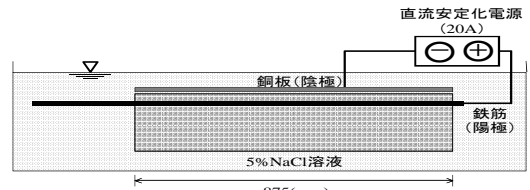


図-5 電食試験法

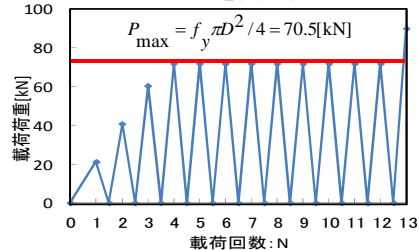


図-6 荷重履歴

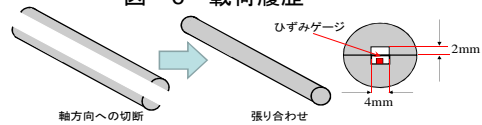


図-7 貼り合わせ鉄筋概要

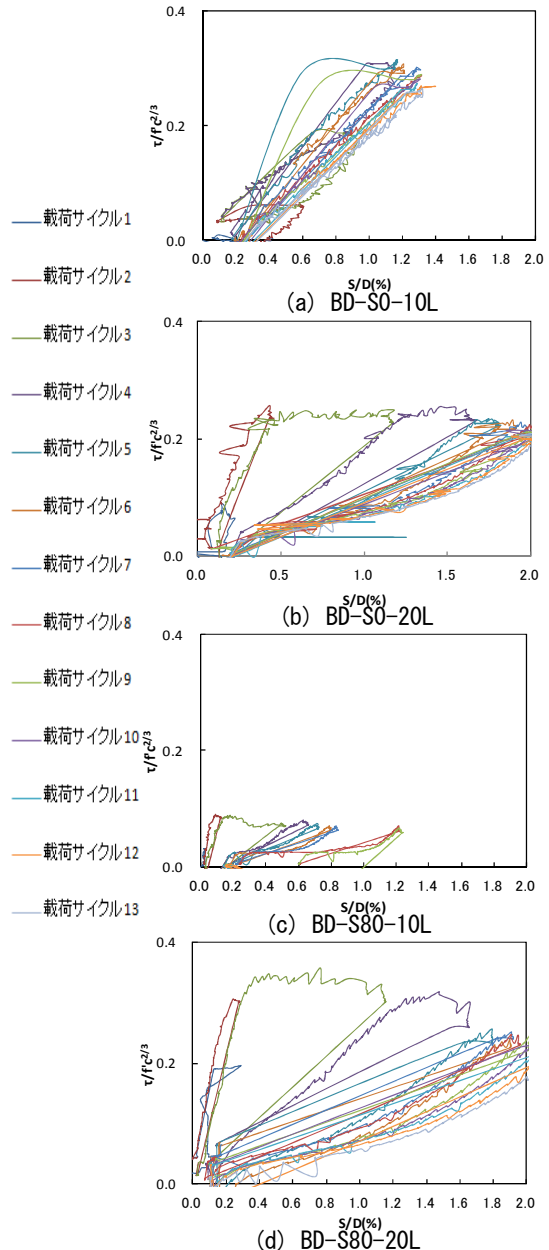


図-8 付着応力-すべり関係

る付着応力  $\tau$  は、次式を用い算出した。

$$\tau = \frac{1}{\pi D} \frac{dP}{dx} \quad (17)$$

ここで、 $D$  は鉄筋径、 $P$  は鉄筋力であり、鉄筋断面積は腐食試験体において計測した局所腐食率から次式を用い換算した。

$$J' = J \times (1 - \alpha_1) \quad (18)$$

ここで、 $J$ 、 $J'$  は健全鉄筋の断面積および腐食鉄筋の断面積である。

計測した局所腐食率から換算した断面積を乗じることにより算出した。具体的な鉄筋力勾配の算出方法であるが、着目する計測点を含む近傍の3点を通る2次曲線から、各測定点の鉄筋力勾配を算出した。すべり量は、鉄筋とコンクリートの相対的なずれが生じない位置(自由端部)を基準として、次式により算出される。

$$s = \int \epsilon dx \quad (19)$$

各試験体における測定位置 9D の付着応力とすべり関係を図-8 に示す。同図中 (a) ~ (d) はそれぞれ試験体 S0 シリーズおよび S80 シリーズに対応している。なお、既往の研究<sup>1)</sup>と同様に、付着応力は、圧縮強度の2/3乗、すべり量は鉄筋径で除することにより無次元化値で示している。なお、除荷経路が直線的だが、これは急激な除荷による影響でデータ収集が困難であるためである。また、同図の凡例に示すように各載荷履歴回数に応じて色分けして示している。

いずれの試験体においても載荷回数が増えるに従い、

付着応力の最大値が低下している。これは、載荷、除荷を繰り返すことによりコンクリート内にひび割れが発生し、コンクリートの拘束圧が解放されるためである。

BD-S0-20L および BD-S80-20L を比較すると、せん断補強筋を有する試験体 BD-S80-20L の付着応力が大きい。一般的に、せん断補強筋の膨張圧により主鉄筋が拘束され、せん断補強筋が鉄筋の抜け出しを抑制したため付着応力が増加するといえる。しかしながら、試験体 BD-S0-10L では、BD-S80-10L よりも大きな付着応力となっている。これは、載荷履歴全体の付着応力はいずれの載荷履歴においても腐食ひび割れによる付着応力の低下が顕著であったことによる。

#### 4.4 モデルの適用と検討

前章で構築したモデルに実験値を代入し、硬化域、硬化域~軟化域、軟化域に含まれる各載荷履歴における本モデルの整合性を検討する。

測定位置 9D における S0 シリーズおよび S80 シリーズの適用結果を図-9、図-10 に示す。

##### (1) S0 シリーズ

試験体 BD-S0-10L は載荷履歴 1 回目で軟化域に達したため、硬化域~軟化域および軟化域のみ示した。

S0 シリーズにおいて硬化域、硬化域~軟化域、軟化域すべての領域で精度良く評価できている。また、腐食率 10% および 20% の各領域において本モデルが適用できている。これにより、本モデルのひび割れ発生により、付着応力が低下することを考慮するパラメータの妥当性が確認された。

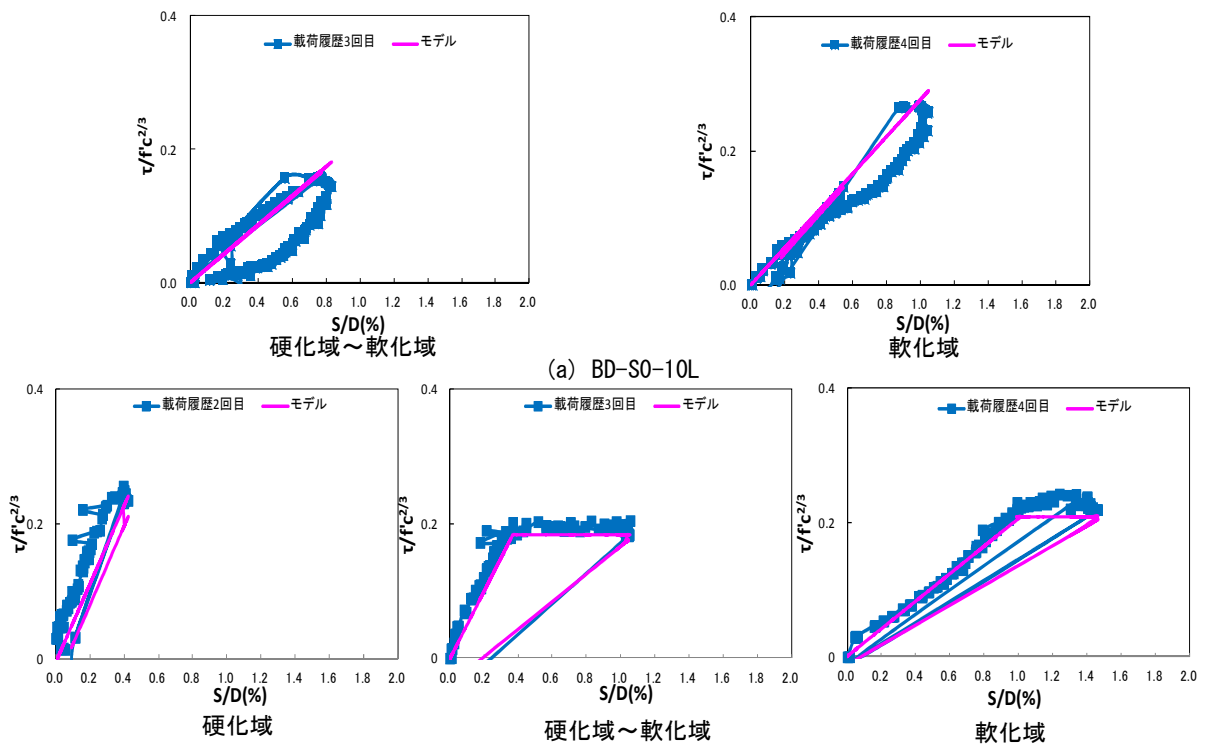


図-9 S0 シリーズ

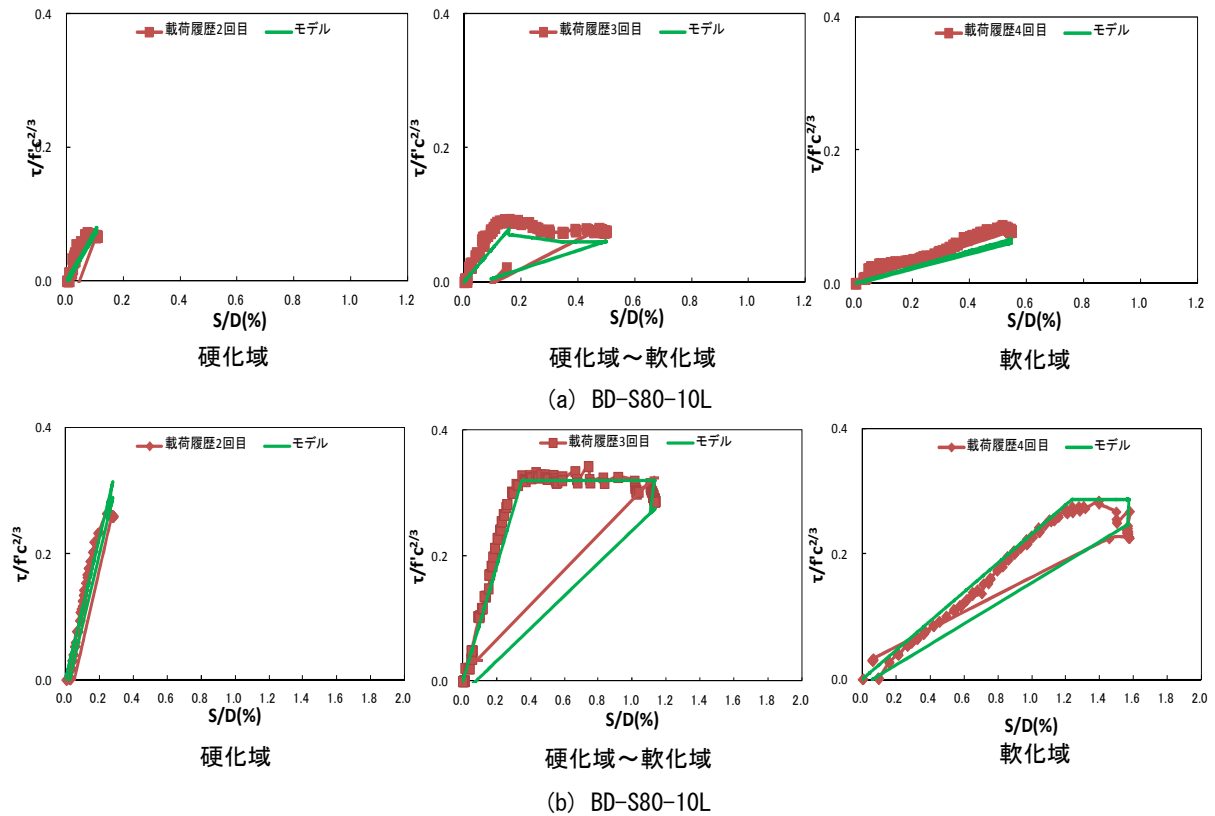


図-10 S80 シリーズ

## (2)S80 シリーズ

図-10 に示す試験体 BD-S80-10L において、硬化域～軟化域における荷重時の付着応力が減少傾向にある際、本モデルは実験値と同様な結果が確認できる。しかしながら、BD-S80-20L 試験体において、実験値との誤差が見られるため、鉄筋腐食の影響を考慮するパラメータの見直しが必要である。

## 5.まとめ

以下に本研究で得られた知見および課題を示す。

- (1) 鉄筋の腐食率および腐食ひび割れ幅、せん断補強筋の配筋を考慮に入れた付着応力モデルが構築された。
- (2) 本モデルの特徴でもある繰り返し荷重時の各領域について模擬することができた。
- (3) せん断補強筋の有無に対し設定したパラメータが効果的な役割を果たし、各条件下においても精度良く付着応力とすべり関係を模擬できた。
- (4) 本モデルの適用箇所により実験値とのばらつきが見られることがあるため、改善点を模索し、モデルの精度の更なる向上を図る。

## 参考文献

- 1) 村上祐貴, 木下哲秀, 鈴木修一, 福本幸成, 大下英吉:鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の残存曲げ耐力性状に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.17, No.1, pp.61-74, 2006.1
- 2) 加藤絵万, 岩波光保, 横田弘, 伊藤始, 佐藤文則: 鉄筋とコンクリート間の付着性能に及ぼす鉄筋腐食の影響, 港湾空港技術研究所資料, NO.1044, 2003.3
- 3) 水野要, 中村光, 檜貝勇:繰り返し荷重を受けせん断破壊する RC 部材の挙動解析, コンクリート工学論文集, Vol.19, No.2, pp.795-800, 1997
- 4) 鈴木綾, 直兼司, 大下英吉: 繰り返し荷重を受ける鉄筋とコンクリートの付着性状に及ぼす鉄筋腐食の影響に関する研究, 第 39 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, V-10, 2012
- 5) 阿部哲雄, 番場俊介, 村上祐貴: かぶり面の腐食ひび割れ幅が異なる腐食した鉄筋コンクリートの付着応力性状に関する研究, 土木学会関東支部第 29 回新潟会研究調査発表会論文集, 2011.11
- 6) 鈴木暢恵, 三木朋宏, 二羽淳一郎:格子モデル解析による損傷 RC はり部材のせん断耐荷機構の評価, コンクリート工学論文集, Vol.28, No.2, pp.235-240, 2006.7