

論文 腐食を模擬した鉄筋の座屈性状に関する研究

墨野倉 駿*1・金久保 利之*2・八十島 章*3・大屋戸 理明*4

要旨: 本研究では、鉄筋単体の座屈性状に着目し、切削および電食によって腐食を模擬した鉄筋を用いた座屈試験より、座屈荷重および応力-歪関係の検討を行った。その結果、鉄筋軸方向における最小断面積の位置が腹になるモードで座屈が見られ、断面減少率の増加にともなって最大応力の低下が見られた。切削鉄筋および電食鉄筋の座屈荷重は、腐食による断面の偏心荷重による全塑性モーメントを考慮した降伏荷重で安全側に評価できた。試験結果より最大応力以降の応力-歪関係のモデル化を行い、最小断面積による断面減少率を用いて表現したモデルを提案した。

キーワード: 鉄筋腐食, 断面減少, 座屈, 応力-歪関係, 切削, 電食

1. はじめに

近年、建設から年数の経った鉄筋コンクリート（以下 RC）造構造物が増加してきている。それに伴い、環境作用による構造物の経年劣化が懸念されている。劣化の中でも、塩害、中性化などによる鉄筋の腐食が挙げられ、RC 造構造物の耐荷性状に影響を及ぼす代表的な劣化原因となっている。

鉄筋の腐食による引張性能に関する研究が多数なされている一方で、圧縮性能に関する研究はほとんどなされていない。既往の研究¹⁾では、圧縮側の鉄筋を腐食させた RC 梁部材の曲げ載荷試験が行われ、鉄筋の腐食による周辺のコンクリートの腐食ひび割れ、さらには腐食鉄筋の座屈により RC 部材が脆性的に破壊する可能性が指摘された。そこで、鉄筋単体の座屈性状に着目し、鉄筋の軸方向断面の腐食形状を切削により模擬した鉄筋を用いた座屈試験が行われた²⁾。しかし、実際の腐食形状は様々であり、さらなるデータの蓄積が必要であると考えられる。

本研究では、既往の研究と同様に鉄筋単体の座屈性状に着目し、切削および電食によって腐食を模擬した鉄筋の座屈試験を行い、座屈荷重および応力-歪関係を検討する。さらに、最大応力以降の応力-歪関係のモデル化を行う。

2. 試験概要

2.1 試験体

本研究で使用する試験体は異形鉄筋とし、健全鉄筋、切削鉄筋および電食鉄筋を用意した。

(1)健全鉄筋

健全鉄筋試験体の一覧を表-1 に示す。本研究では、異形鉄筋 D16(SD345)および D10(SD295)を用いた。実験

表-1 健全鉄筋試験体の一覧

| 試験体名 | 試験長 d:鉄筋径(mm) |
|---------|--------------------------------------|
| 健全鉄筋D16 | 6d, 8d, 10d, 12d, 14d, 16d, 18d, 20d |
| 健全鉄筋D10 | |

表-2 切削鉄筋試験体の一覧

| 試験体名 | 試験長 d:鉄筋径(mm) | 切削率(%) | | |
|----------------|------------------|--------|----|----|
| | | U | C | D |
| U-0,C-15,D-0 | 16d | - | 15 | - |
| U-15,C-0,D-15 | | 15 | - | 15 |
| U-15,C-15,D-15 | | 15 | 15 | 15 |
| U-30,C-0,D-0 | | 30 | - | - |
| U-0,C-30,D-0 | | - | 30 | - |
| U-30,C-30,D-0 | | 30 | 30 | - |
| U-30,C-0,D-30 | | 30 | - | 30 |
| U-30,C-30,D-30 | | 30 | 30 | 30 |
| U-0,C-45,D-0 | | - | 45 | - |
| U-45,C-0,D-45 | | 45 | - | 45 |
| U-45,C-15,D-45 | | 45 | 15 | 45 |
| U-45,C-30,D-45 | | 45 | 30 | 45 |
| U-45,C-45,D-45 | | 45 | 45 | 45 |

因子は試験長とし、6d, 8d, 10d, 12d, 14d, 16d, 18d, 20d (d:鉄筋径) の計 8 種類 (有効細長比でおおよそ 100 未満) の試験体を用意した。

(2)切削鉄筋

切削鉄筋試験体の一覧を表-2 に、試験体の詳細を図-1 に示す。健全鉄筋試験体と同一の異形鉄筋 D10 を用い、試験長は 16d とした。既往の研究²⁾と同様に、かぶり面での腐食が進行する場合を考慮して、ディスクサンダーを用い、図-1 下図に示す領域を切削した。切削箇所は中央部のみ (C シリーズ)、上下 2 カ所 (U-D シリーズ) および 3 カ所 (U-C-D シリーズ) である。切削は鉄筋腹部の最小径位置における切削深さにより行い (図-1

*1 筑波大学大学院 システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻 (学生会員)

*2 筑波大学准教授 システム情報系構造エネルギー工学域 博士 (工学) (正会員)

*3 筑波大学助教 システム情報系構造エネルギー工学域 博士 (工学) (正会員)

*4 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

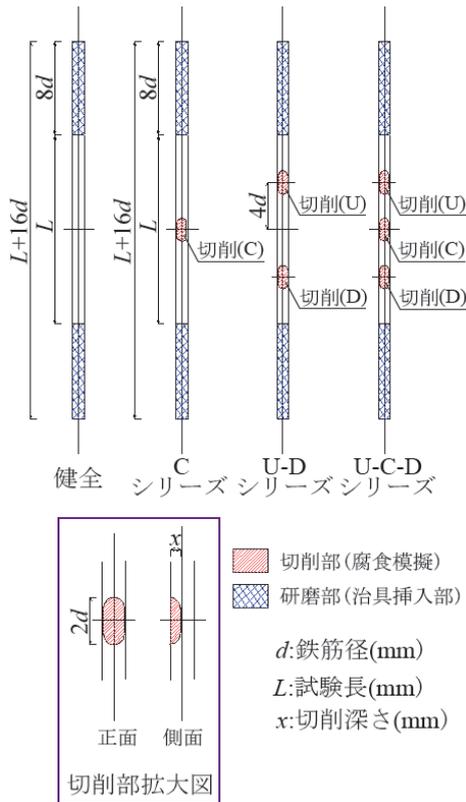


図-1 切削鉄筋試験体の詳細

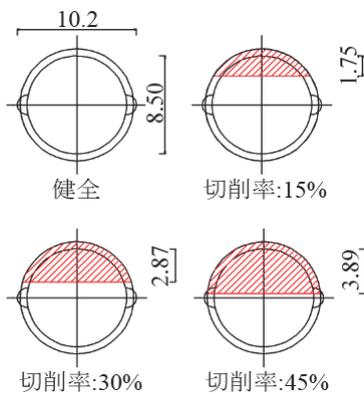


図-2 切削率および切削深さ

2), 公称断面積と等価な断面積を有する楕円に対して、断面積比(切削率)が15%, 30%, 45%となるように決定した。

(3)電食鉄筋

既往の研究¹⁾で、載荷試験を行った、圧縮側の鉄筋を電食により腐食させたRC梁部材の圧縮側鉄筋(D10)をはつりだし、計6体の電食鉄筋を用意した。試験長は16dである。はつりだした後、除錆した試験体の外観の例を図-3に示す。試験体No.1では、全体的に腐食が進行している。試験体No.6では、全体的に腐食が見られ、かつ、局所的な腐食も見られる。3Dスキャナによる断面計測手法³⁾を用い、各試験体の断面積分布を計測した。計測結果を図-4に示す。図中の破線は、同様に3Dスキャナに

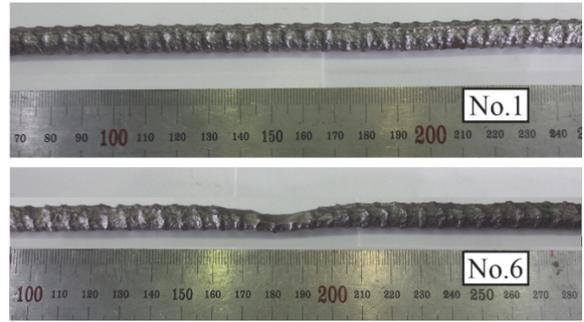


図-3 電食鉄筋試験体の外観の例(No.1, No.6)

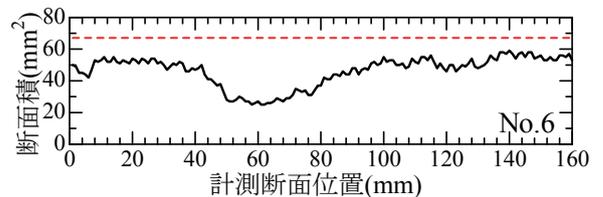
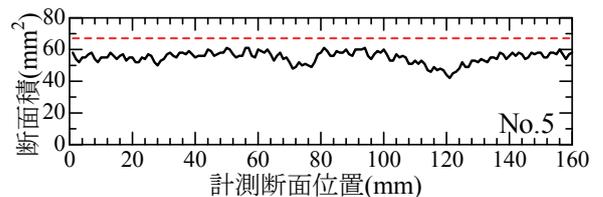
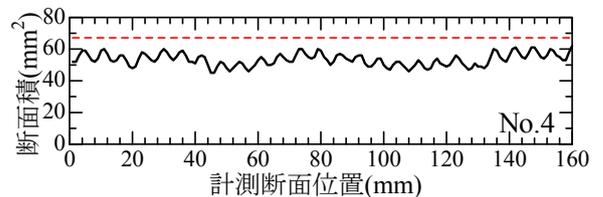
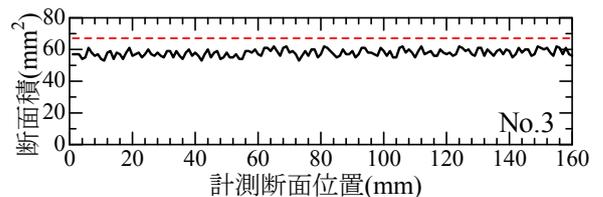
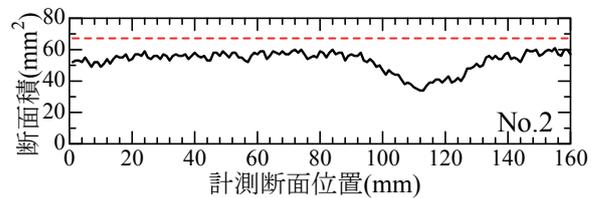
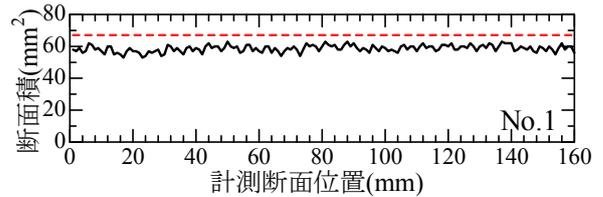


図-4 電食鉄筋試験体の軸方向の断面積分布

より計測した同一の健全鉄筋の平均断面積(67.11mm²)を示している。電食鉄筋の平均断面積、最小断面積および断面減少率(3Dスキャナによる健全鉄筋の平均断面積に対する比)の値を一覧を表-3に示す。各試験体の健全鉄筋の引張試験結果を表-4に示す。

表一三 電食鉄筋試験体の最小断面積と平均断面積

| 試験体名 | 試験長 d :鉄筋径(mm) | 最小断面積 | | 平均断面積 | |
|------|---------------------|--------------------|--------|--------------------|--------|
| | | (mm ²) | 減少率(%) | (mm ²) | 減少率(%) |
| No.1 | 16d | 52.79 | 21.34 | 58.66 | 12.60 |
| No.2 | | 34.25 | 48.96 | 52.95 | 21.10 |
| No.3 | | 53.32 | 20.54 | 57.86 | 13.79 |
| No.4 | | 44.59 | 33.55 | 53.32 | 20.55 |
| No.5 | | 42.38 | 36.84 | 55.06 | 17.96 |
| No.6 | | 24.99 | 62.76 | 46.29 | 31.02 |

表一四 引張試験結果

| 試験体 | 引張強度 (MPa) | 降伏強度 (MPa) | 弾性係数 (GPa) |
|---------|---------------|---------------|---------------|
| 異形鉄筋D16 | 516 | 358 | 198 |
| 異形鉄筋D10 | 468 (538) | 346 (400) | 192 (188) |

(): 電食鉄筋に用いた異形鉄筋 D10 の材料試験結果¹⁾

2.2 加力および計測方法

加力および計測方法を図一五に示す。加力には 500kN 万能試験機を用い、単調圧縮荷重を行った。試験機のヘッドに試験体固定用のジグを取り付け、ジグ内に研磨した鉄筋の端部を $8d$ 挿入することで境界条件を固定とし、座屈試験を行った。なお、ジグの孔径は異形鉄筋 D16 の場合、16.3mm、D10 の場合、9.6mm とし、孔と研磨した鉄筋の間に隙間が生じないようにした。計測項目は、圧縮力およびジグ間の 3 箇所における軸方向変形である。試験区間における圧縮変形は、計測された軸方向変形からジグ内に挿入した部分の鉄筋の変形（弾性を仮定）を差し引くことにより求めた。

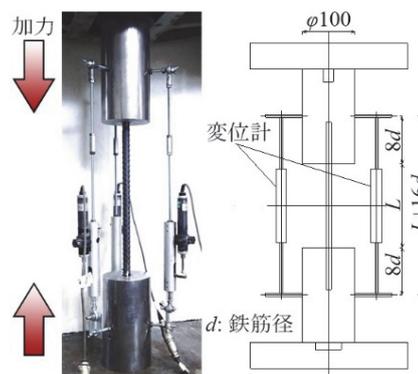
3. 試験結果

3.1 健全鉄筋

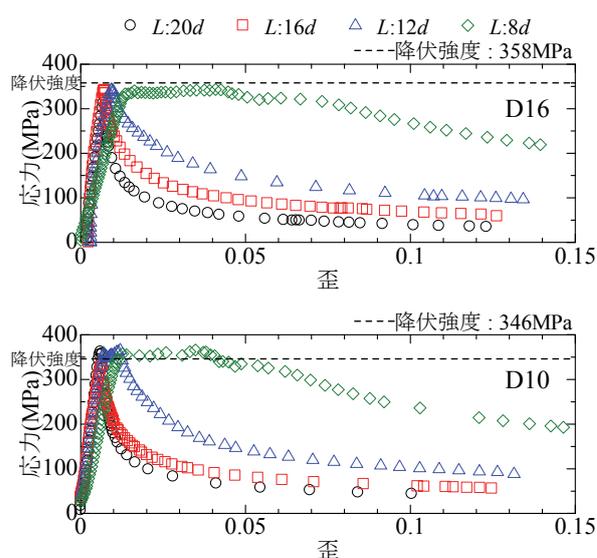
健全鉄筋の応力-歪関係の例を図一六に示す。各試験体ともに、概ね引張試験で得られた降伏強度で座屈が見られた。最大応力以降の曲線は、試験長が短くなるにつれ緩やかになる傾向が見られた。また、試験長が $12d$ 以下の試験体においては、降伏棚が見られた。

3.2 切削鉄筋

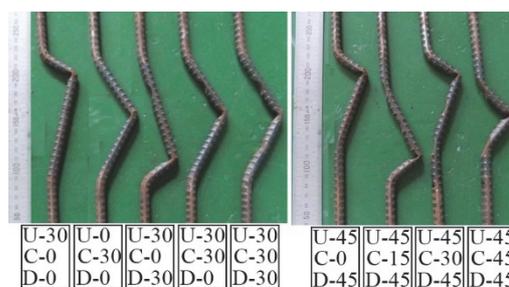
座屈試験後の切削鉄筋の例を図一七に示す。最小断面積の切削位置が腹となるモードで座屈が見られた。また、同一の最小断面積の箇所が中心位置を含め複数ある場合、試験体の中心位置が腹となるモードで座屈が見られた。切削鉄筋の応力-歪関係の例を図一八に示す。また、各試験体の最大応力で基準化した応力-歪関係の例を図一九に示す。断面減少率の増加により最大応力の低下が見られた。また、最大応力以降の曲線は、断面減少率の増加にしたがって緩やかになる傾向が見られた。さらに、座屈モードの腹の位置によって最大応力以降の曲線に差



図一五 加力および計測方法



図一六 健全鉄筋 D16 および D10 の応力-歪関係の例



図一七 座屈試験後の切削鉄筋の例

異が見られ、試験区間の中心が腹となる場合よりも端部に近い位置で腹となる場合の方が、試験体の曲げ剛性が大きくなることから、緩やかになる傾向を示した。切削鉄筋の断面減少率と座屈荷重比（健全鉄筋の座屈荷重に対する比）の関係を図一十に示す。図中に示す、(1)切削位置の断面減少を考慮した降伏荷重、(2)切削断面の偏心荷重による全塑性モーメントを考慮した降伏荷重²⁾（図一十一）で評価を行った。切削鉄筋では圧縮荷重の作用位置と切削断面の図心に偏心が生じるためモーメント荷重の影響を受ける。(2)の降伏荷重は、作用力の偏心を考慮し、切削断面における圧縮、引張の応力分布が全塑性状

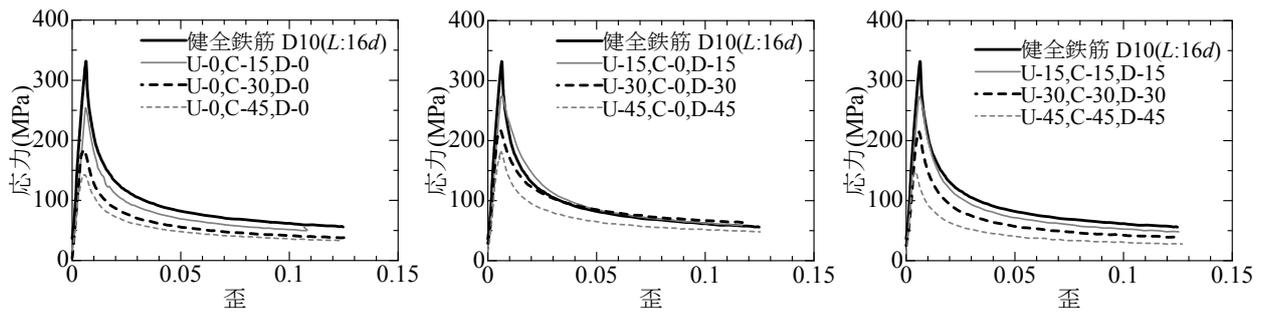


図-8 切削鉄筋の応力-歪関係の例

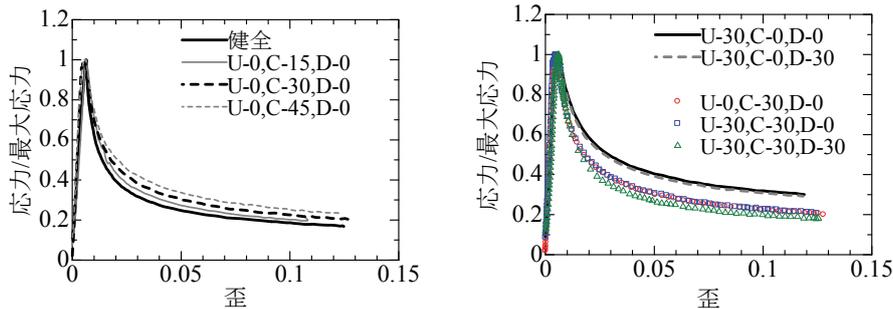


図-9 切削鉄筋の基準化応力-歪関係の例

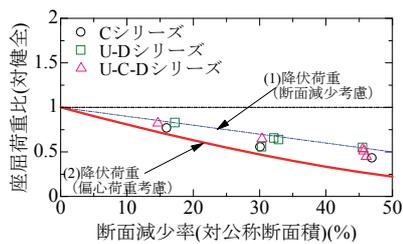


図-10 切削鉄筋の断面減少率(最小断面積)と座屈荷重比の関係

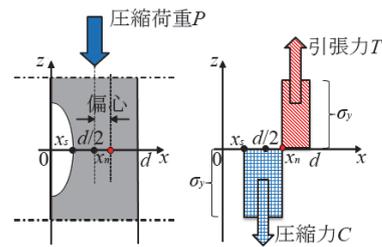


図-11 偏心荷重による全塑性モーメントを考慮した降伏荷重の評価

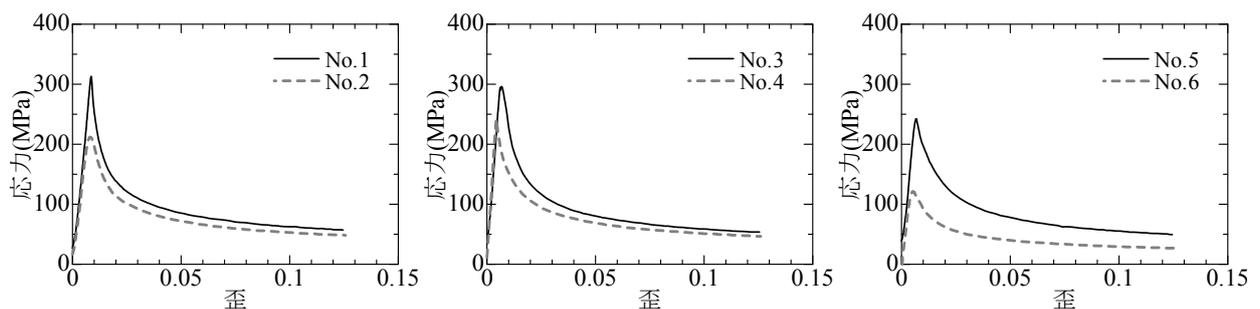


図-12 電食鉄筋の応力-歪関係

態になる中立軸位置を求め、そのときの曲げモーメントおよび圧縮荷重を断面解析により求めるものである。本試験結果は、(2)の降伏荷重で安全側に評価できている。

3.3 電食鉄筋

電食鉄筋の応力-歪関係を図-12に示す。切削鉄筋の場合と同様に断面減少率の増加により最大応力の低下が見られた。電食鉄筋の断面減少率と座屈荷重比の関係を図-13に示す。梁部材の既載荷試験により既に座屈を経

験しており、座屈屈曲部での降伏強度が見かけ上引張試験結果より増加している可能性があるが、3D スキャナにより計測した最小断面積による断面減少率を用いて、降伏比(0.74)を考慮しても(2)の降伏荷重で安全側に評価できている。実際の構造物における鉄筋腐食には様々な形態が考えられるが、(2)の降伏荷重は、腐食の偏在を考慮した座屈荷重の下限值を示すと考えられる。

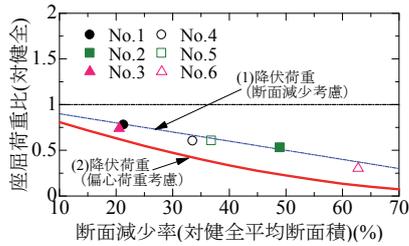


図-13 電食鉄筋の断面減少率（最小断面積）と座屈荷重比の関係

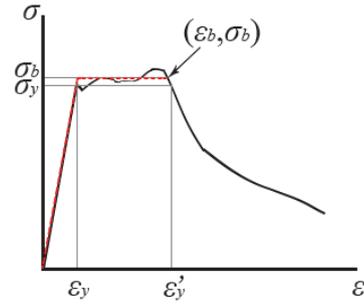


図-14 σ_b および ϵ_b の決定法

4.最大応力以降の応力-歪関係のモデル化

4.1 モデル化の方法

(1)健全鉄筋

本研究で用いた異形鉄筋 D16 および D10 に加え、既往の研究²⁾による異形鉄筋 D13 の試験結果を用いてモデル化を行った。健全鉄筋の最大応力以降の応力-歪関係は、式(1)で定式化する。式(1)における座屈強度 σ_b および座屈開始時歪 ϵ_b について、降伏棚がない試験体の場合はそれぞれ最大応力および最大応力時の歪とし、降伏棚がある試験体の場合は、図-14 に示すように、 $\epsilon_y - \epsilon'_y$ （降伏点 σ_y 時の歪 ϵ_y と最大応力以降の負勾配曲線との交点の歪 ϵ'_y ）間の応力の平均値およびその値と負勾配曲線との交点の歪とした。降伏棚がある健全鉄筋試験体の座屈開始時歪 ϵ_b の一覧を表-5 に示す。 β の値は以上の方法で試験体ごとに求め、最小二乗法により式(2)を得た(図-15)。

$$\sigma = \sigma_b (\epsilon_b / \epsilon)^\beta \quad (1)$$

$$\beta = 0.051(L/d) \quad (2)$$

ここで、

σ_b : 座屈強度(MPa)

- 最大応力 (降伏棚がない場合)
- $\epsilon_y - \epsilon'_y$ 間の応力の平均値 (降伏棚がある場合)

ϵ_b : 座屈開始時歪

- 最大応力時の歪 (降伏棚がない場合)
- 応力の平均値と負勾配曲線との交点の歪 (降伏棚がある場合)

L: 試験長(mm)

d: 鉄筋径(mm)

(2)切削鉄筋・電食鉄筋

切削鉄筋および電食鉄筋では、断面減少率の増加により最大応力以降の曲線は緩やかになることから、式(1)に対して最小断面積における断面減少率を考慮し、式(3)で定式化する。

$$\sigma = \sigma_{max} (\epsilon_b / \epsilon)^\beta \sqrt{1 - \alpha/100} \quad (3)$$

ここで、

σ_{max} : 最大応力 (MPa)

ϵ_b : 座屈開始時歪

表-5 座屈開始時歪（降伏棚がある健全鉄筋）

| 試験長 d:鉄筋径(mm) | 座屈開始時歪 ϵ_b | | |
|------------------|---------------------|--------|-------|
| | D16 | D13 | D10 |
| 12d | — | 0.0094 | — |
| 10d | 0.014 | 0.019 | 0.029 |
| 8d | 0.043 | 0.049 | 0.026 |
| 6d | 0.19 | — | 0.076 |

— : 降伏棚がない健全鉄筋

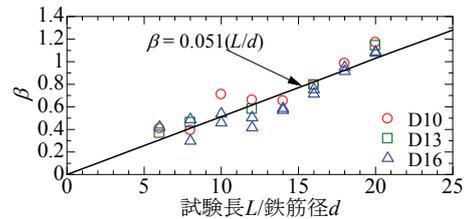


図-15 β と試験長・鉄筋径の関係

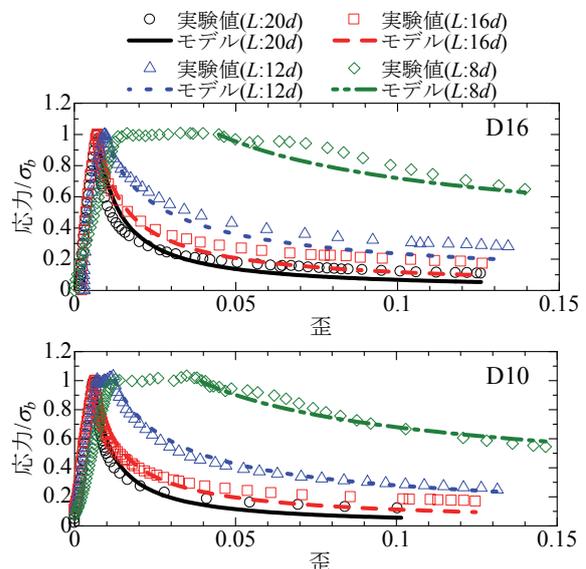
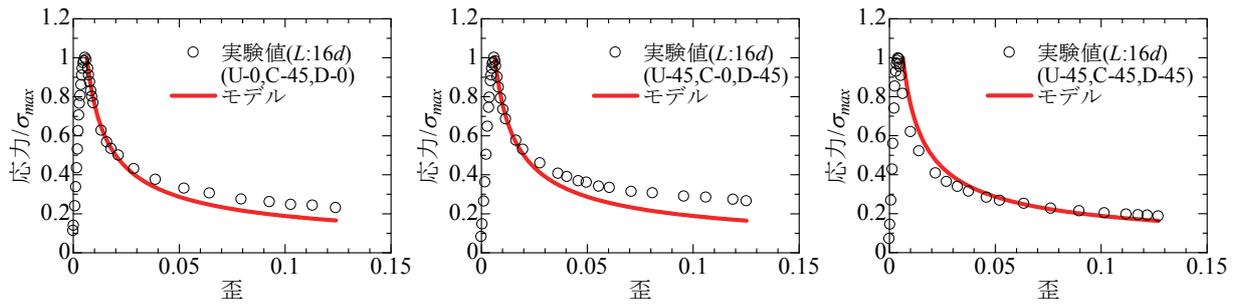


図-16 健全鉄筋 D16 および D10 の試験結果とモデルとの比較の例

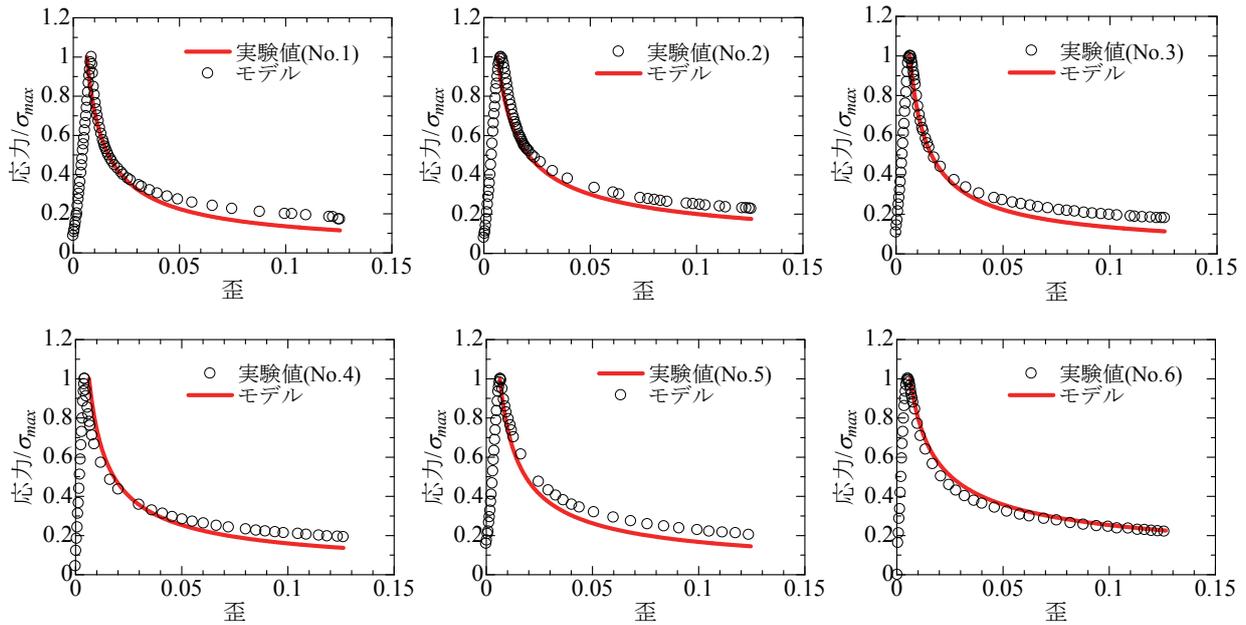
α : 断面減少率(最小断面積) (%)

4.2 試験結果とモデルとの比較

試験結果と提案したモデルとの比較（健全鉄筋では応力を σ_b で、切削鉄筋および電食鉄筋では σ_{max} で基準化）を図-16～図-18 に示す。提案したモデルによる座屈開



図一七 切削鉄筋の試験結果とモデルとの比較の例



図一八 電食鉄筋の試験結果とモデルとの比較

始時以降の応力-歪関係は、健全鉄筋、切削鉄筋および電食鉄筋ともに試験結果の挙動を概ね再現できている。

5.まとめ

腐食を模擬した切削鉄筋の座屈は、最小断面積の位置が腹になるモードで生じ、断面減少率の増加にともなって最大応力の低下が見られた。また、最大応力以降の応力-歪関係の曲線は緩やかになる傾向が見られた。鉄筋断面の片側で腐食が進行する場合を考慮した切削鉄筋の座屈荷重は、切削断面の偏心荷重による全塑性モーメントを考慮した降伏荷重で、安全側に評価できた。また、様々な腐食箇所を有する電食鉄筋においても、3D スキャナにより計測した最小断面積による断面減少率を用いて、同様に安全側に評価できた。

健全鉄筋の試験結果を基に最大応力以降の応力-歪関係のモデル化を行い、切削鉄筋、電食鉄筋ともに最小断面積による断面減少率を用いて表現することにより、試験結果の挙動を概ね再現できた。

謝辞

本研究は科学研究費助成事業（基盤研究（C）課題番号 24560593）によっている。

参考文献

- 1) 鈴木健二, 金久保利之, 八十島章, 大屋戸理明: 圧縮鉄筋が腐食した RC 梁部材の曲げ挙動, JCI, 鉄筋腐食したコンクリート構造物の構造・耐久性能評価の体系化シンポジウム論文集, pp.259-264, 2013.11
- 2) 金久保利之, 八十島章, 大屋戸理明, 武田惇志, 鈴木健二: 腐食を模擬した切削鉄筋の座屈性状, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 5-452 号, pp.905-906, 2014.9
- 3) 大屋戸理明, 金久保利之, 山本泰彦, 佐藤勉: 鉄筋腐食性状が鉄筋コンクリート部材の曲げ性状に与える影響, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.3, pp.542-554, 2006.8