

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

座屈する腐食鉄筋の圧縮応力－歪関係

墨野倉 駿

修士（工学）

（構造エネルギー工学専攻）

指導教員 金久保 利之

2016年 3月

座屈する腐食鉄筋の圧縮応力-歪関係

論 文 概 要

塩害や中性化などの環境作用による鉄筋コンクリート造構造物の鉄筋の腐食は、構造物の性能低下を引き起こす代表的な劣化原因として挙げられている。本研究では、鉄筋コンクリート部材の圧縮側の腐食鉄筋に着目し、座屈する腐食鉄筋の圧縮応力-歪関係モデルを提案することを目的とし、種々の座屈試験を行い、圧縮応力-歪関係の検討を行った。第2章では、健全鉄筋の座屈性状に着目し、座屈試験を行った。その結果、試験長が小さくなるにつれ明瞭な降伏棚がみられるようになり、圧縮応力-歪関係の軟化曲線は緩やかになる傾向がみられた。鉄筋径および試験長を用いてモデル化した。第3章では、断面欠損の位置、箇所数および切削率を変動因子とした切削鉄筋の座屈性状に着目し、座屈試験を行った。その結果、断面減少率の増加に伴い、圧縮応力-歪関係の軟化曲線は緩やかになる傾向がみられた。第2章のモデルをもとに最小断面積による断面減少率を用いたモデルを提案した。第4章では、電食鉄筋を用いた座屈試験より、第3章のモデルの適用性について検討した。その結果、3Dスキャナで計測した断面減少率を用いた提案モデルは、試験結果を概ね表現できた。第5章では、コアコンクリートの拘束を模擬した座屈試験を行った。その結果、断面減少率の増加に伴い、座屈荷重の低下がみられるものの、座屈形状の違いにより、拘束がない場合よりも拘束がある場合の方が座屈荷重は上昇した。断面減少率の増加および腐食断面による座屈長さの減少に伴い、圧縮応力-歪関係の軟化曲線は緩やかになる傾向がみられた。第3章のモデルをもとに腐食断面による座屈長さを用いてモデルを提案した。第6章では、暴露腐食鉄筋を用いた座屈試験より、第5章のモデルの適用性について検討した。その結果、ノギスを用いて得た断面減少率を用いた提案モデルは、試験結果を概ね表現できた。

座屈する腐食鉄筋の圧縮応力－歪関係

目 次

第1章 序論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	3
第2章 健全鉄筋の座屈時の圧縮応力－歪関係.....	4
2.1 はじめに.....	4
2.2 試験概要.....	5
2.2.1 試験体.....	5
2.2.2 材料試験結果.....	6
2.2.3 加力および計測方法.....	8
2.3 試験結果.....	9
2.3.1 加力後の試験体状況.....	9
2.3.2 圧縮応力－歪関係.....	10
2.4 圧縮応力－歪関係のモデルの提案.....	12
2.5 モデルと試験結果の比較.....	14
2.6 まとめ.....	16
第3章 切削鉄筋の座屈性状.....	17
3.1 はじめに.....	17
3.2 試験概要.....	18
3.2.1 試験体.....	18
3.2.2 加力および計測方法.....	20
3.3 試験結果.....	21
3.3.1 加力後の試験体状況.....	21
3.3.2 圧縮応力－歪関係.....	22
3.3.3 断面減少率－座屈荷重比関係.....	23
3.4 圧縮応力－歪関係のモデルの提案.....	24
3.5 モデルと試験結果の比較.....	25
3.6 まとめ.....	27
第4章 電食による腐食鉄筋の座屈性状.....	28
4.1 はじめに.....	28
4.2 試験概要.....	29
4.2.1 試験体.....	29
4.2.2 加力および計測方法.....	30
4.3 試験結果.....	31
4.3.1 加力後の試験体状況.....	31

4.3.2 圧縮応力－歪関係	32
4.3.3 断面減少率－座屈荷重比関係	33
4.4 モデルと試験結果の比較	34
4.5 まとめ	35
第5章 コンクリートの拘束を考慮した切削鉄筋の座屈性状	36
5.1 はじめに	36
5.2 試験概要	37
5.2.1 試験体	37
5.2.2 加力および計測方法	39
5.3 試験結果	40
5.3.1 加力後の試験体状況	40
5.3.2 圧縮応力－歪関係	42
5.3.3 断面減少率－座屈荷重比関係	44
5.4 圧縮応力－歪関係のモデルの提案	45
5.5 モデルと試験結果の比較	46
5.6 まとめ	48
第6章 コンクリートの拘束を考慮した暴露腐食鉄筋の座屈性状	49
6.1 はじめに	49
6.2 試験概要	50
6.2.1 試験体	50
6.2.2 軸方向断面積の計測方法	52
6.2.3 加力および計測方法	53
6.3 試験結果	54
6.3.1 加力後の試験体状況	54
6.3.2 圧縮応力－歪関係	55
6.3.3 断面減少率－座屈荷重比関係	56
6.4 モデルと試験結果の比較	57
6.5 まとめ	59
第7章 結論	60
謝辞	61
参考文献	62

座屈する腐食鉄筋の圧縮応力－歪関係

図 表 目 次

表 2.1 健全鉄筋試験体の一覧.....	5
表 2.2 鉄筋の引張試験結果一覧.....	6
表 3.1 切削鉄筋試験体の一覧.....	18
表 4.1 電食鉄筋試験体の最小断面積と平均断面積	30
表 5.1 切削鉄筋試験体の一覧.....	37
表 6.1 ノギスによる計測値および楕円補正した断面積	52
図 1.1 実構造物から採取した腐食鉄筋	1
図 1.2 レプリカの作製方法およびレプリカと鉄筋の外観の比較	1
図 1.3 曲げ載荷試験前後の RC 梁部材の外観.....	2
図 1.4 曲げ載荷試験結果（荷重－たわみ関係）	2
図 2.1 応力－歪関係：D10(SD295)	7
図 2.2 応力－歪関係：D13(左図-SD295,右図-SD490)	7
図 2.3 応力－歪関係：D16(左図-SD295,右図-SD345).....	7
図 2.4 加力および測定方法	8
図 2.5 研磨した鉄筋端部の外観.....	8
図 2.6 加力後の健全鉄筋試験体の例（D16:SD345）	9
図 2.7 健全鉄筋試験体の圧縮応力－歪関係（D10:SD295）	10
図 2.8 健全鉄筋試験体の圧縮応力－歪関係（D13:SD295）	10
図 2.9 健全鉄筋試験体の圧縮応力－歪関係（D13:SD490）	10
図 2.10 健全鉄筋試験体の圧縮応力－歪関係（D16:SD295）	11
図 2.11 健全鉄筋試験体の圧縮応力－歪関係（D16:SD345）	11
図 2.12 σ_b と ε_b の決定法.....	12
図 2.13 試験長/鉄筋径と β の関係	12
図 2.14 試験長/鉄筋径と $\varepsilon_b / \varepsilon_y$ の関係.....	13
図 2.15 健全鉄筋試験体のモデルと試験結果の比較（D10:SD295）	14
図 2.16 健全鉄筋試験体のモデルと試験結果の比較（D13:SD295）	14
図 2.17 健全鉄筋試験体のモデルと試験結果の比較（D13:SD490）	14
図 2.18 健全鉄筋試験体のモデルと試験結果の比較（D16:SD295）	15
図 2.19 健全鉄筋試験体のモデルと試験結果の比較（D16:SD345）	15
図 3.1 切削鉄筋試験体.....	19
図 3.2 切削率および切削深さ	19
図 3.3 加力後の切削鉄筋試験体の例	21
図 3.4 切削鉄筋試験体の圧縮応力－歪関係の例	22

図 3.5 切削鉄筋試験体の基準化圧縮応力－歪関係の例	22
図 3.6 切削鉄筋試験体の断面減少率－座屈荷重比関係	23
図 3.7 降伏荷重の評価	23
図 3.8 切削鉄筋試験体のモデルと試験結果の比較例（C シリーズ）	25
図 3.9 切削鉄筋試験体のモデルと試験結果の比較例（U-L シリーズ）	25
図 3.10 切削鉄筋試験体のモデルと試験結果の比較例（U-C-L シリーズ）	26
図 4.1 電食鉄筋試験体の外観	29
図 4.2 電食鉄筋試験体の軸方向断面積分布	30
図 4.3 加力後の電食鉄筋試験体	31
図 4.4 電食鉄筋試験体の圧縮応力－歪関係	32
図 4.5 電食鉄筋試験体の断面減少率－座屈荷重比関係	33
図 4.6 電食鉄筋試験体のモデルと試験結果の比較	34
図 5.1 実構造物での座屈モード	36
図 5.2 切削鉄筋試験体	38
図 5.3 加力および測定方法	39
図 5.4 下部固定用ジグの詳細	39
図 5.5 加力前後の切削鉄筋試験体の変形（上図：C-15,L-45、下図：C-45,L-45）	40
図 5.6 加力後の拘束を考慮した切削鉄筋試験体の例	41
図 5.7 拘束を考慮した切削鉄筋試験体の圧縮応力－歪関係の例	42
図 5.8 拘束を考慮した切削鉄筋試験体の基準化圧縮応力－歪関係の例	43
図 5.9 同一の最小断面積の箇所を複数有する試験体の変形過程(切削率：45%,切削間隔：4d)	43
図 5.10 拘束を考慮した切削鉄筋試験体の断面減少率－座屈荷重比関係	44
図 5.11 切削鉄筋試験体の腐食断面による座屈長さ	45
図 5.12 拘束を考慮した切削鉄筋のモデルと試験結果の比較（1 ヶ所切削の試験体）	46
図 5.13 拘束を考慮した切削鉄筋のモデルと試験結果の比較（同一の最小断面積の箇所を複数有する試験体）	47
図 6.1 暴露前の試験体の様子：挿入部の腐食保護について	50
図 6.2 試験体の暴露	51
図 6.3 暴露腐食鉄筋試験体の外観	51
図 6.4 暴露腐食鉄筋試験体の軸方向の断面積の計測方法	52
図 6.5 試験体の固定方法	53
図 6.6 加力後の暴露腐食鉄筋試験体	54
図 6.7 暴露腐食鉄筋試験体の圧縮応力－歪関係	55
図 6.8 暴露腐食鉄筋試験体の断面減少率－座屈荷重比関係	56
図 6.9 暴露腐食鉄筋試験体のモデルと試験結果の比較	58

第1章 序論

1.1 研究背景

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ている¹⁾（図 1.1 参照）。鉄筋の腐食は、腐食による断面積の減少に伴う鉄筋単体の力学性能の低下に加え、腐食生成物の体積膨張に伴い発生するコンクリートのひび割れが耐荷性能の低下を引き起こすなど、代表的な劣化原因となっている。その他にも、錆汁の流出による美観的問題、コンクリートの剥落による人的被害の危険性などが挙げられている。RC 造構造物の健全度を確保しながら長期にわたって供用していくためには、予防保全の観点から適切な維持管理が必要とされている。またそのために、鉄筋の腐食劣化による RC 造構造物の性能低下を定量的に評価し、その劣化度合いや進行度合いにより将来性能を予測し、RC 造構造物の劣化が著しく進行する前に補修や補強の判断を行うことが重要視されている。鉄筋の劣化状況の評価方法として、電磁誘導法などの非破壊試験や、はつり調査などがある²⁾。また、鉄筋のレプリカ（図 1.2 参照）と非接触レーザー方式 3D スキャナを用いて腐食鉄筋の軸方向断面積分布を測定し、評価する方法がある¹⁾。鉄筋の腐食劣化状況を把握することは、RC 造構造物の性能評価を行うための不可欠な要素であると考えられている。

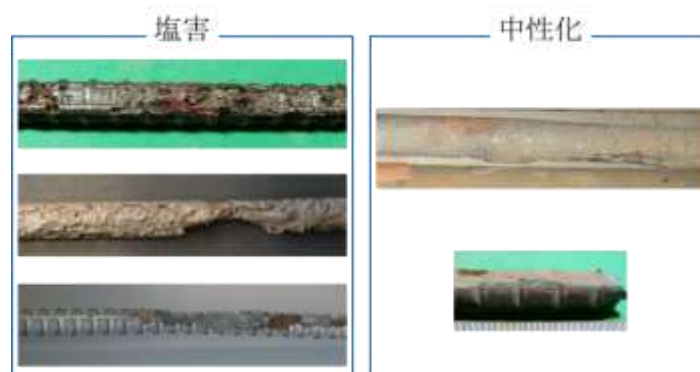


図 1.1 実構造物から採取した腐食鉄筋¹⁾

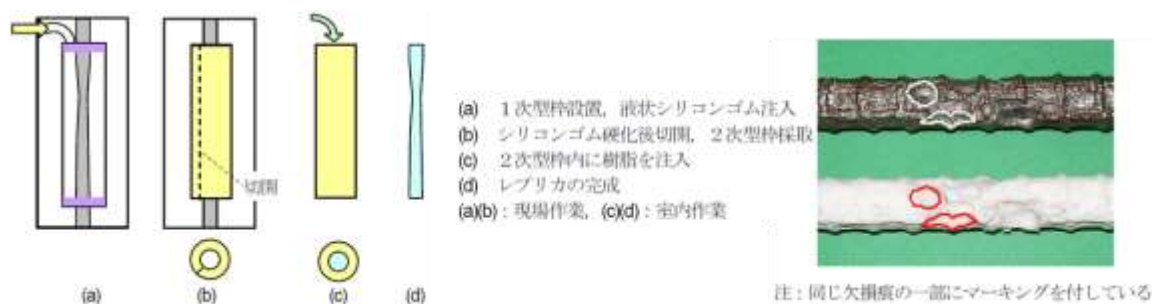


図 1.2 レプリカの作製方法およびレプリカと鉄筋の外観の比較¹⁾

現在までに、鉄筋の腐食劣化状況を表す指標として平均質量減少率（健全鉄筋の質量に対する腐食による質量減少）や最小断面積の値を用いた鉄筋の引張性能に関する研究は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³⁾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、鉄筋腐食による周辺コンクリートのひび割れ、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（図 1.3 参照）。同研究の曲げ載荷試験より得られた荷重－たわみ関係を図 1.4 に示す。鉄筋腐食の増加に伴い、荷重の低下、靱性の乏しい挙動が確認された。さらに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ている⁴⁾。断面減少率の増加に伴い座屈荷重の低下が確認され、座屈荷重の評価方法についての提案が行われた。また既往の健全鉄筋の座屈性状に関する研究⁵⁾より提案されている中村らの圧縮応力－歪関係の軟化曲線のモデル式(1-1)を用いて、試験結果との比較が行われた。しかし、腐食鉄筋の圧縮応力－歪関係のモデルの提案には至っていない。



図 1.3 曲げ載荷試験前後の RC 梁部材の外観³⁾

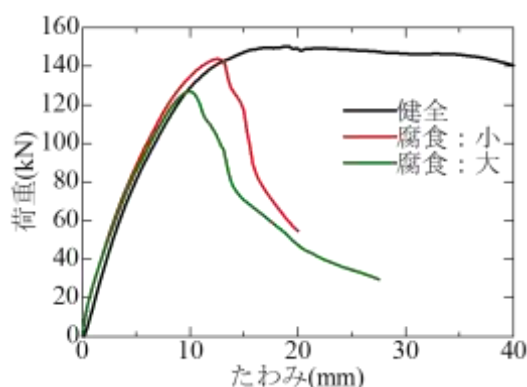


図 1.4 曲げ載荷試験結果（荷重－たわみ関係）³⁾

$$\sigma = f_y \exp(0.17(L/D)^2(\varepsilon_b - \varepsilon)) \quad (1-1)$$

ここで、 f_y ：降伏強度、 L ：両端固定条件での鉄筋の長さ、 D ：鉄筋径、 ε_b ：座屈開始の平均軸方向歪である。

1.2 研究目的

本研究では、座屈する腐食鉄筋の圧縮応力－歪関係のモデルを提案することを目的とし、孔食を想定した断面欠損の位置や箇所数、コンクリートによる鉄筋座屈変形の拘束を模擬した座屈試験を行い、鉄筋の圧縮応力－歪関係の検討を行う。第 2 章では、健全鉄筋試験体を用いた座屈試験より圧縮応力－歪関係の検討を行うとともに、試験結果をもとに最大応力以降の圧縮応力－歪関係のモデルの提案を行う。第 3 章では、鉄筋の腐食形状を模擬した切削鉄筋試験体を用いた座屈試験より、第 2 章で提案するモデルをもとに最大応力以降の圧縮応力－歪関係のモデルの提案を行う。第 4 章では、電食鉄筋を用いた座屈試験を行い、提案したモデルの適合性の検討を行う。第 5 章では、実構造物内での鉄筋の座屈性状に着目し、コアコンクリートの拘束を考慮したジグを用い、切削鉄筋試験体を用いた座屈試験を行う。座屈荷重および圧縮応力－歪関係の検討を行うとともに、第 3 章で提案する圧縮応力－歪関係のモデルの適合性を検討する。第 6 章では、暴露腐食鉄筋試験体を用いた座屈試験を行い、第 5 章で提案するモデルの適合性の検討を行う。

第2章 健全鉄筋の座屈時の圧縮応力－歪関係

2.1 はじめに

鉄筋単体の座屈試験は、端部拘束条件や変形の計測など実験技術上工夫を要することが多く、今までにあまり行われていない。前章で紹介した中村らの圧縮応力－歪関係の軟化曲線のモデル式⁵⁾は、有限要素解析により得られた結果をモデル化したものである。本研究では、腐食鉄筋の座屈時の圧縮応力－歪関係を検討することを目的とするが、その前提として、健全鉄筋の座屈時の圧縮応力－歪関係を精度良く表現する必要があると考えられる。本章では、第3章以降の切削鉄筋試験体、電食鉄筋試験体、暴露腐食鉄筋試験体の座屈試験の試験結果の比較および圧縮応力－歪関係のモデルの提案を行うために、鋼材の種類、鉄筋径、試験長を変動因子とした健全鉄筋試験体を用いた座屈試験を行い、座屈荷重および圧縮応力－歪関係の検討を行い、試験結果をもとに最大応力以降の圧縮応力－歪関係のモデルの提案を行う。

2.2 試験概要

2.2.1 試験体

健全鉄筋試験体の一覧を表 2.1 に示す。本研究では異形鉄筋 D10(SD295)、D13(SD295,SD490) および D16(SD295,SD345)を用いた。試験体ごとに変動因子は試験長とし、 $20d, 18d, 16d, 14d, 12d, 10d, 8d$ (d : 鉄筋径) の計 7 種類 (有効細長比でおよそ 100 未満) の試験体を用意した。

表 2.1 健全鉄筋試験体の一覧

試験体		試験長
D10	SD295	$20d, 18d, 16d, 14d, 12d, 10d, 8d$
D13	SD295	
	SD490	
D16	SD295	
	SD345	

2.2.2 材料試験結果

鉄筋の引張試験結果一覧を表 2.2 に、応力－歪関係を図 2.1～図 2.3 に示す。加力には 500kN 万能試験機を用いた。応力は荷重を公称断面積で除して求め、歪は歪ゲージにより計測し、弾性係数を求めた。本章以降に用いる鉄筋の材料試験結果の値は各試験体 3 体（D16SD345 は 2 体）の平均値とした。

表 2.2 鉄筋の引張試験結果一覧

試験体		引張強度 (MPa)	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	降伏歪 (%)	備考
D10	SD295	468	346	192	0.178	電食鉄筋試験体以外
		538	400	188	0.215	電食鉄筋試験体 ³⁾ (第 4 章)
D13	SD295	484	344	192	0.178	
	SD490	707	565	196	0.295	
D16	SD295	482	334	197	0.174	
	SD345	516	358	198	0.190	

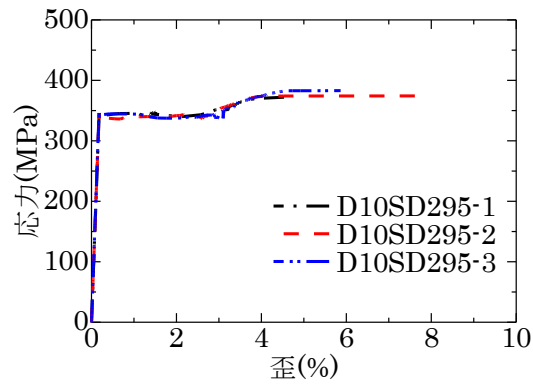


図 2.1 応力－歪関係：D10(SD295)

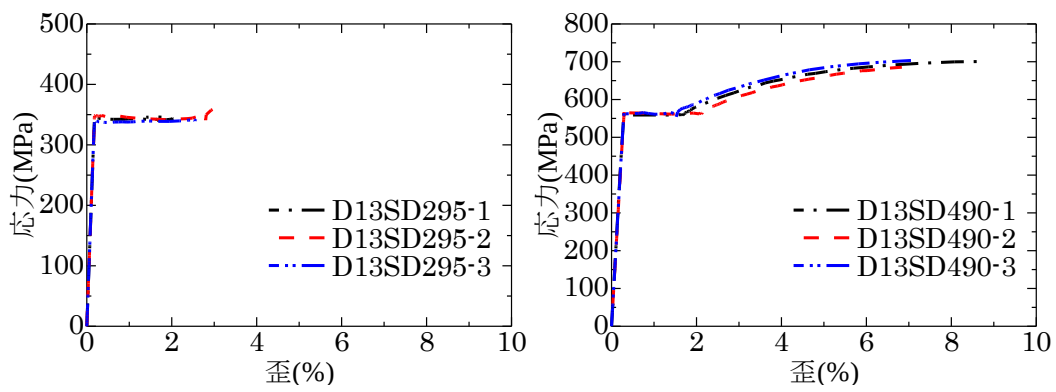


図 2.2 応力－歪関係：D13(左図-SD295,右図-SD490)

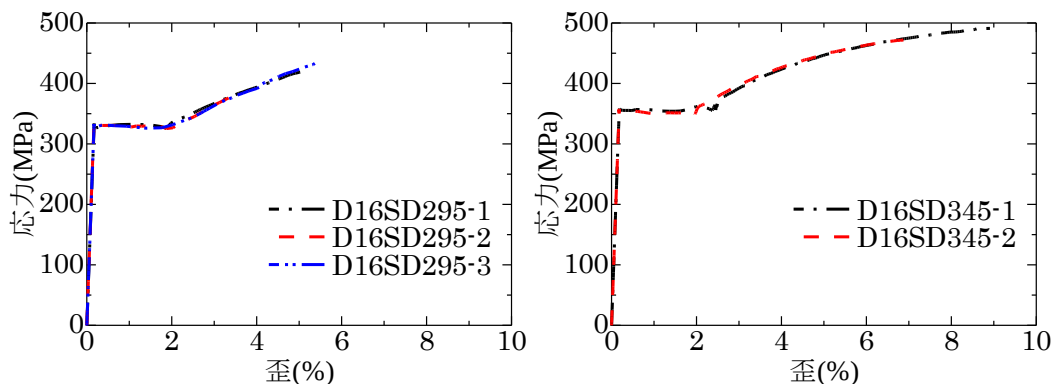


図 2.3 応力－歪関係：D16(左図-SD295,右図-SD345)

2.2.3 加力および計測方法

加力および測定方法を図 2.4 に示す。加力には 500kN 万能試験機を用い、単調圧縮载荷を行った。試験機ヘッドに試験体固定用のジグを取り付け、ジグ内に鉄筋の端部 $8d$ を挿入することで端部境界条件を固定とした。なお、挿入部の鉄筋端部を研磨（図 2.5 参照）し、ジグの孔と鉄筋の間に隙間が生じないように配慮した。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。なお、試験区間の圧縮変形は、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。

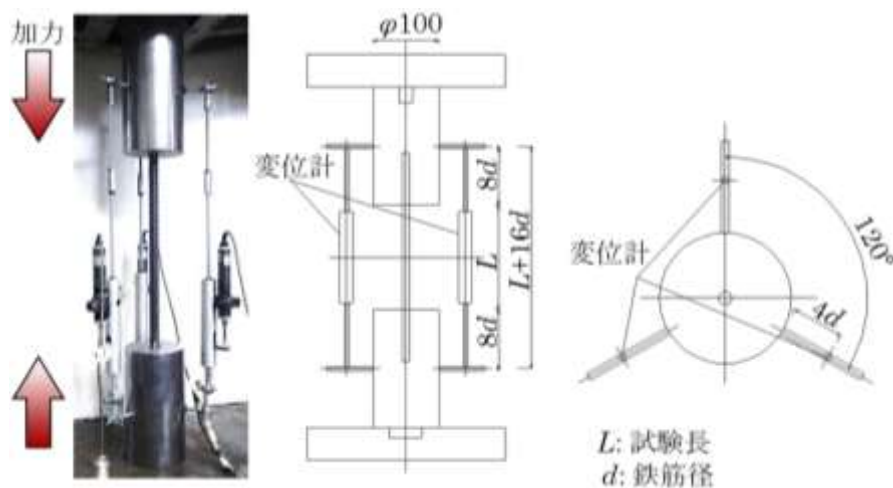


図 2.4 加力および測定方法



図 2.5 研磨した鉄筋端部の外観

2.3 試験結果

2.3.1 加力後の試験体状況

加力後の健全鉄筋試験体の例（D16:SD345）を図 2.6 に示す。各試験体とも弱軸（鉄筋の縦筋を結ぶ軸）周りの方向に、試験区間の中心が腹となるモードで座屈が見られた。

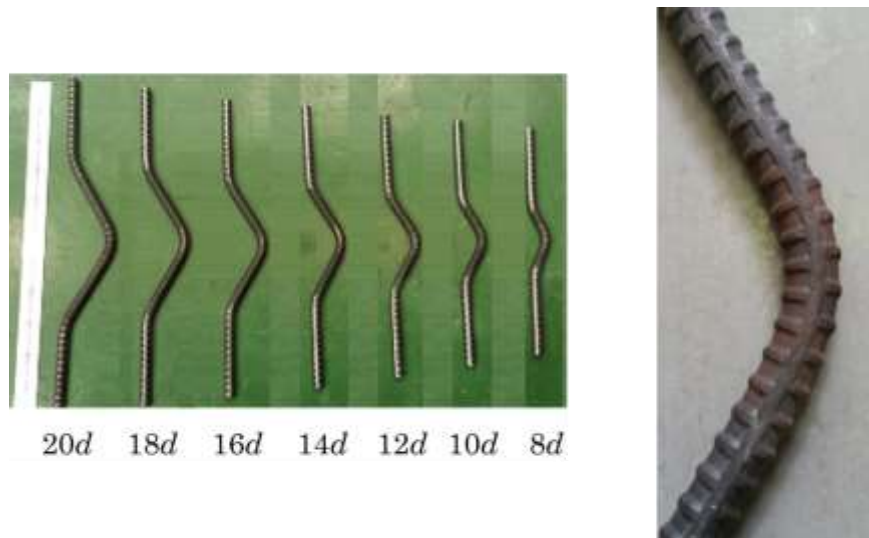


図 2.6 加力後の健全鉄筋試験体の例（D16:SD345）

2.3.2 圧縮応力－歪関係

全試験体の圧縮応力－歪関係を図 2.7～図 2.11 に示す。圧縮応力は荷重を公称断面積で除して求め、歪は試験区間の変形を試験長で除して求めた。各試験体とも、概ね圧縮応力が引張試験で得られた降伏強度に達した後座屈した。また、試験長が小さくなるにつれ明瞭な降伏棚がみられるようになり、圧縮応力－歪関係の軟化曲線は緩やかになる傾向がみられた。

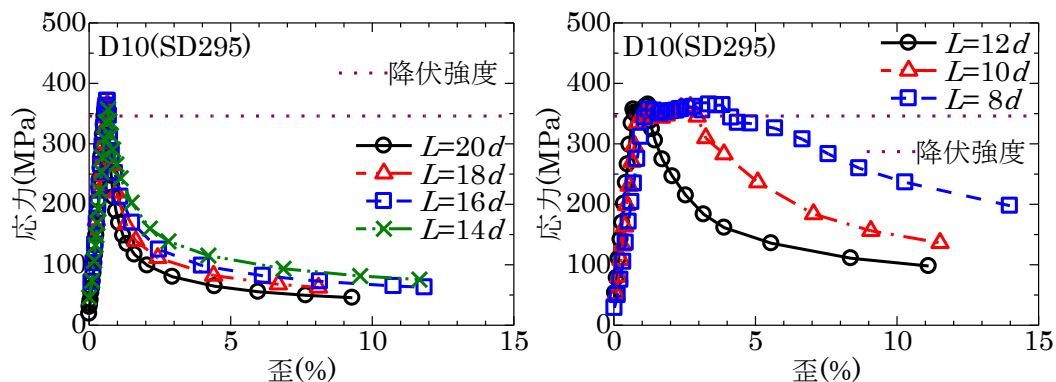


図 2.7 健全鉄筋試験体の圧縮応力－歪関係 (D10:SD295)

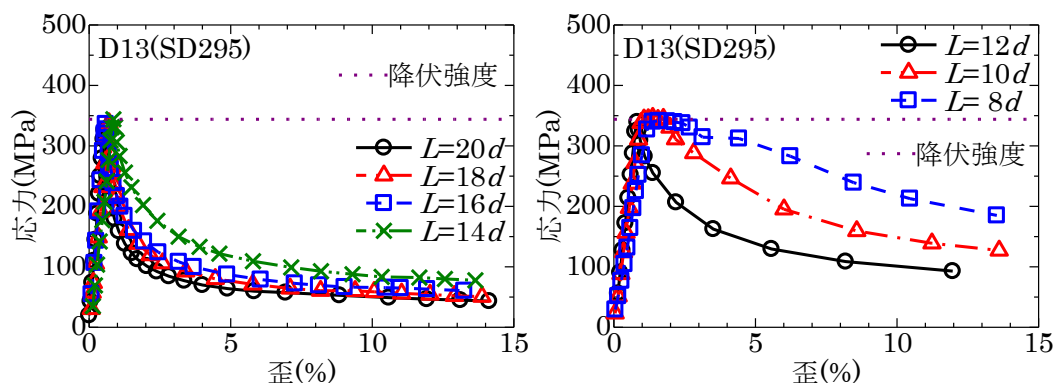


図 2.8 健全鉄筋試験体の圧縮応力－歪関係 (D13:SD295)

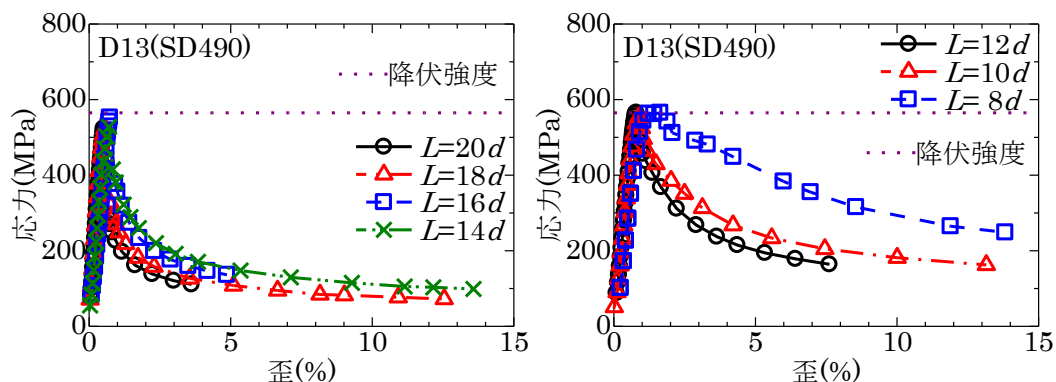


図 2.9 健全鉄筋試験体の圧縮応力－歪関係 (D13:SD490)

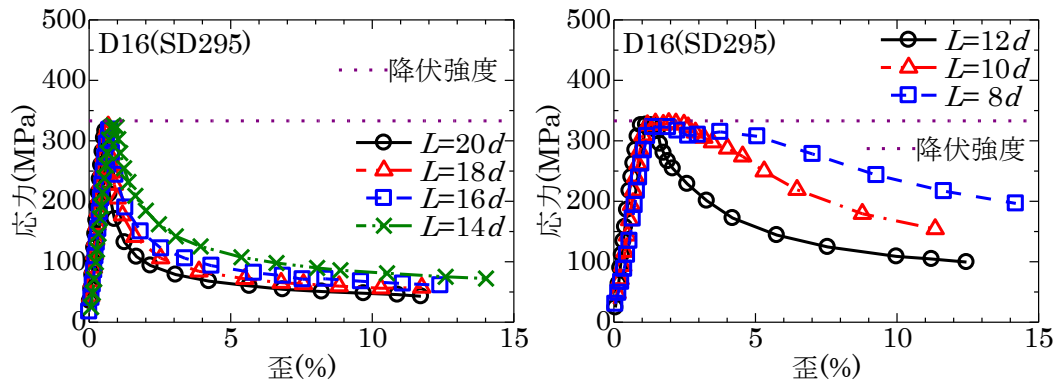


図 2.10 健全鉄筋試験体の圧縮応力-歪関係 (D16:SD295)

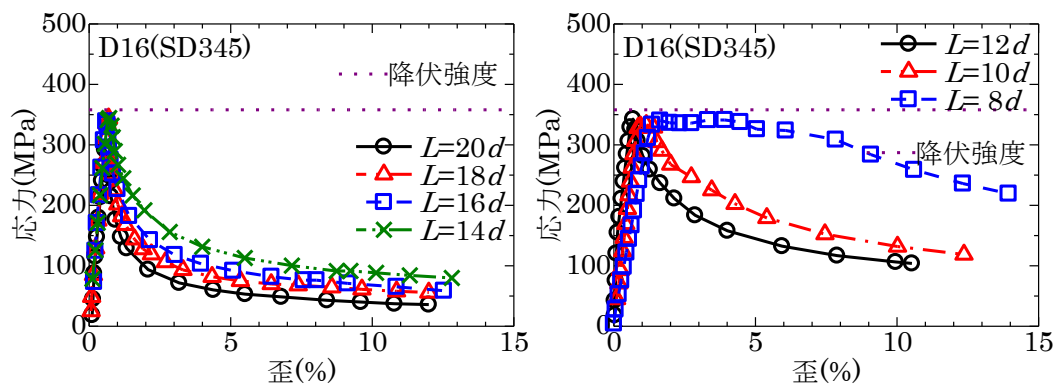


図 2.11 健全鉄筋試験体の圧縮応力-歪関係 (D16:SD345)

2.4 圧縮応力－歪関係のモデルの提案

健全鉄筋試験体の最大圧縮応力以降の圧縮応力－歪関係を式(2-1)で定式化する。ここで σ_b は座屈強度、 ε_b は座屈開始時歪である。係数 β は軟化勾配の差異を表現する係数で、試験結果より、試験長を用いて評価することとする。試験結果を用いるにあたり、座屈強度 σ_b および座屈開始時歪 ε_b は、降伏棚がない試験体の場合は、それぞれ最大圧縮応力および最大圧縮応力時の歪とした。降伏棚がある試験体の場合は、図 2.12 に示すように、軟化曲線上における降伏点 σ_y 時の歪を ε'_y とし、 $\varepsilon'_y - \varepsilon_y$ 間の応力の平均値を σ_b 、その値と軟化曲線との交点の歪を ε_b とした。

各試験体の軟化曲線より β の値を最小二乗法により求めた。試験体ごとに試験長を鉄筋径で除した値と β の関係を図 2.13 に示す。試験長が小さいほど β の値は小さくなり、軟化勾配が緩やかになる傾向を示している。鋼種の違いによる明確な傾向がみられないことから、本研究では全試験体の試験結果を用いて最小二乗法により式(2-2)を得た。

$$\sigma = \sigma_b (\varepsilon_b / \varepsilon)^\beta \quad (2-1)$$

$$\beta = 0.049(L/d) \quad (2-2)$$

ここで、 σ_b ：座屈強度、 ε_b ：座屈開始時歪係数、 L ：試験長、 d ：鉄筋径である。

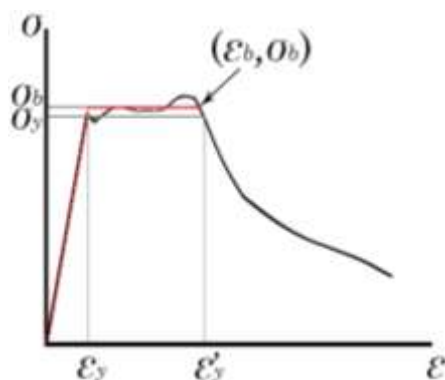


図 2.12 σ_b と ε_b の決定法

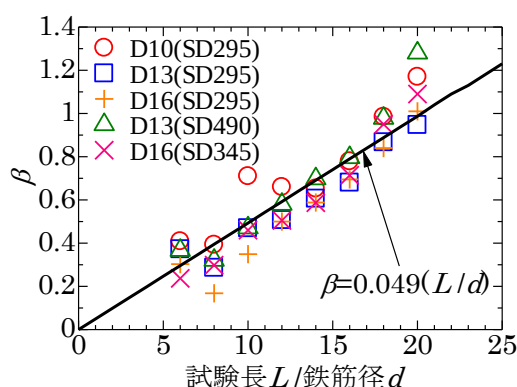


図 2.13 試験長/鉄筋径と β の関係

試験体ごとに試験長を鉄筋径で除した値と、座屈開始時歪 ε_b を引張試験により得られた降伏歪 ε_y で除した値の関係を図 2.14 に示す。試験長が小さいほど座屈開始時歪は大きくなる傾向を示している。全試験体の結果を用いて、最小二乗法により式(2-3)で定式化した。

$$\varepsilon_b = \varepsilon_y e^{21.7/(L/d)} \quad (2-3)$$

ここで、 ε_y ：引張試験より得られた降伏歪である。

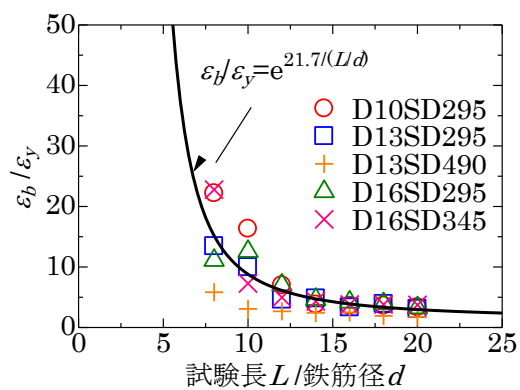


図 2.14 試験長/鉄筋径と $\varepsilon_b / \varepsilon_y$ の関係

2.5 モデルと試験結果の比較

2.4 節により提案したモデルと圧縮応力-歪関係の試験結果との比較を図 2.15～図 2.19 に示す。圧縮応力は各試験体の座屈強度 σ_b で基準化している。提案したモデルは圧縮応力-歪関係の試験結果を概ね表現できている。

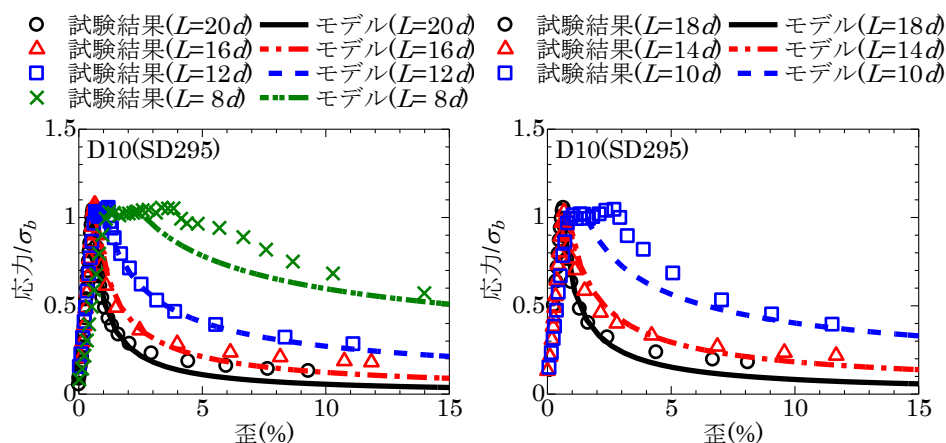


図 2.15 健全鉄筋試験体のモデルと試験結果の比較 (D10:SD295)

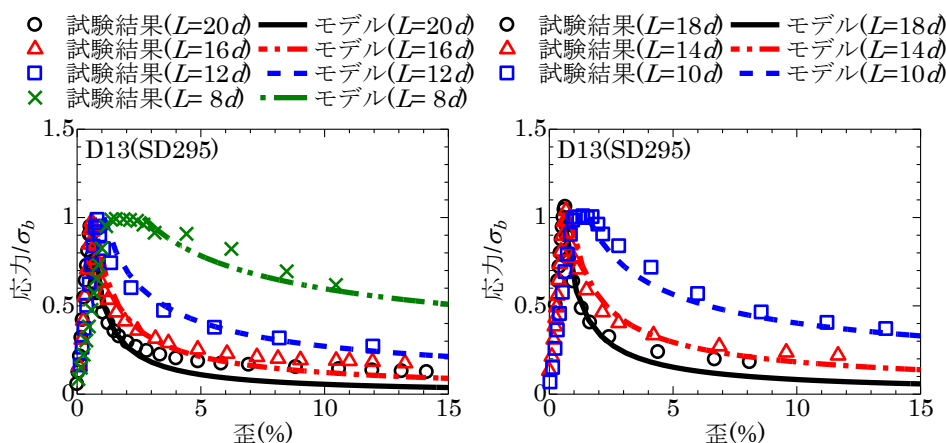


図 2.16 健全鉄筋試験体のモデルと試験結果の比較 (D13:SD295)

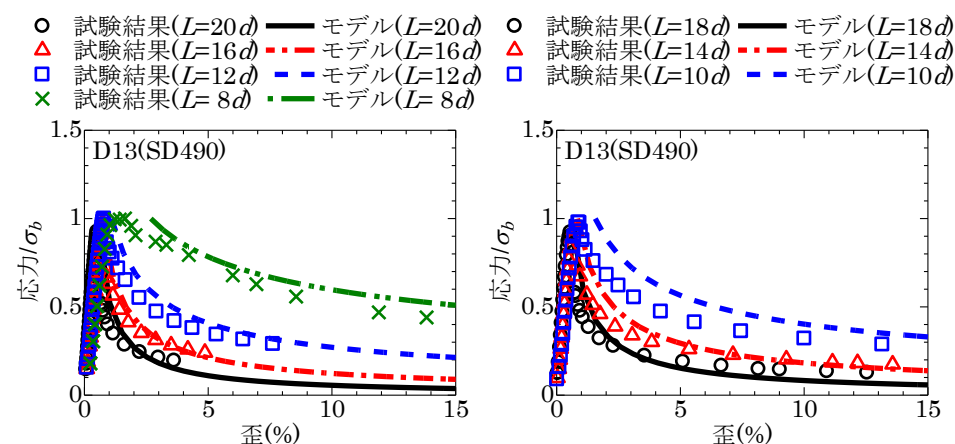


図 2.17 健全鉄筋試験体のモデルと試験結果の比較 (D13:SD490)

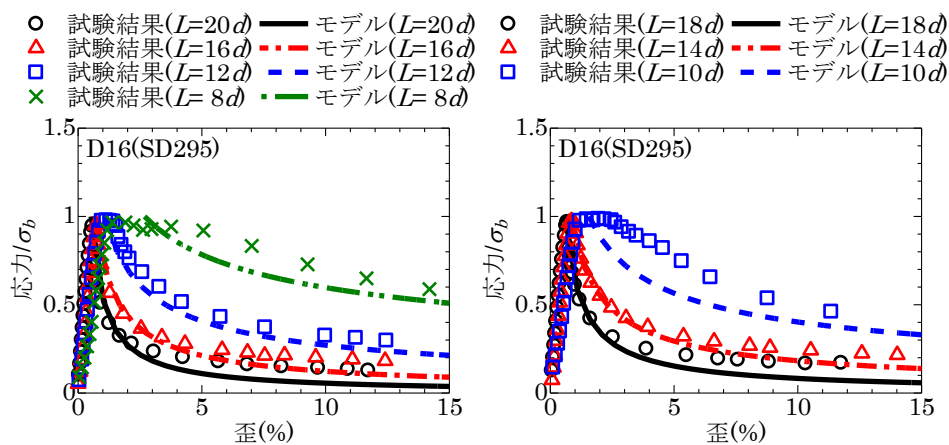


図 2.18 健全鉄筋試験体のモデルと試験結果の比較 (D16:SD295)

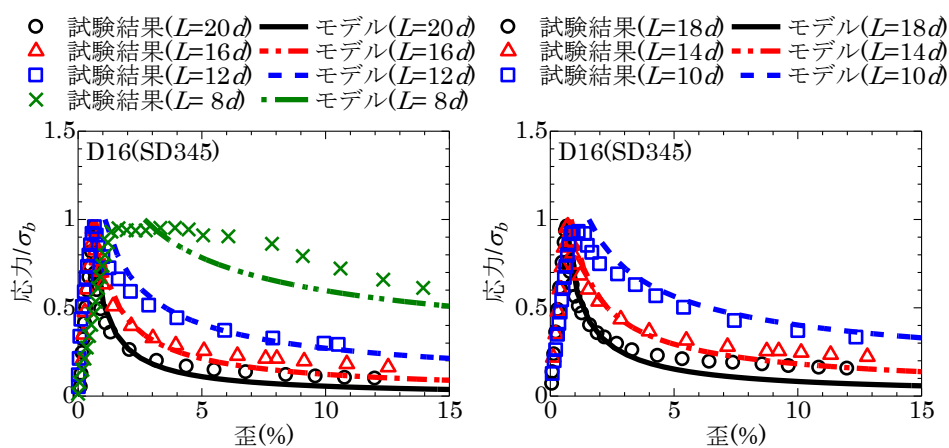


図 2.19 健全鉄筋試験体のモデルと試験結果の比較 (D16:SD345)

2.6 まとめ

本章では、鋼材の種類、鉄筋径、試験長を変動因子とした健全鉄筋試験体を用いた座屈試験を行い、圧縮応力－歪関係の検討を行うとともに、試験結果をもとに最大応力以降の圧縮応力－歪関係のモデルの提案を行った。

- (1)各試験体ともに、概ね圧縮応力が降伏強度に達した後、弱軸（鉄筋の縦節を結ぶ軸）周りの方向に、試験区間の中心が腹となるモードで座屈がみられた。
- (2)試験長が小さくなるにつれ明瞭な降伏棚がみられるようになり、圧縮応力－歪関係の軟化曲線は緩やかになる傾向がみられた。
- (3)圧縮応力－歪関係の軟化曲線を試験長および鉄筋径を用いてモデル化した。モデルと試験結果を比較し、モデルが概ね試験結果を表現できていることを確認した。

第3章 切削鉄筋の座屈性状

3.1 はじめに

既往の研究⁶⁾では、電食による促進劣化や、切削した鉄筋、細径の丸鋼を用いて鉄筋の腐食を模擬し、主鉄筋の腐食が中心圧縮性状に与える影響を検討しており、鉄筋の腐食が最大軸応力に大きく影響することが確認されている。また既往の研究³⁾より、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ており、圧縮側鉄筋が腐食した RC 部材の圧縮側の終局挙動を評価する上で、腐食鉄筋の座屈性状の評価は重要であると考えられる。本章では、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を行い、座屈荷重および圧縮応力-歪関係の検討を行う。さらに、第 2 章により提案したモデルおよび切削鉄筋の試験結果をもとに、最大応力以降の圧縮応力-歪関係のモデルの提案を行う。

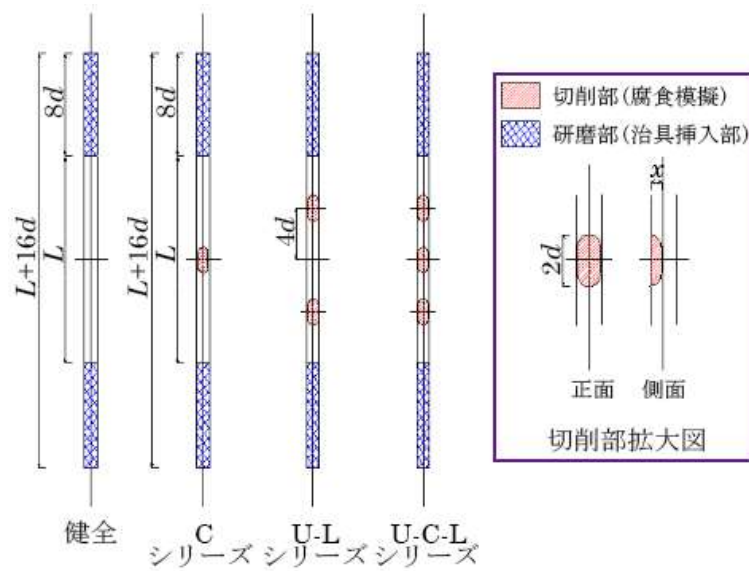
3.2 試験概要

3.2.1 試験体

切削鉄筋試験体の一覧を表 3.1 に、試験体の詳細を図 3.1 に示す。切削鉄筋試験体には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。かぶりコンクリート側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 3.1 右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 ヲ所 (U-L シリーズ) および 3 ヲ所 (U-C-L シリーズ) とした。なお、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、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 (図 3.2)。

表 3.1 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(%)			切削箇所
		U	C	L	
U-0,C-15,L-0	16d	-	15	-	1
U-15,C-0,L-15		15	-	15	2
U-15,C-15,L-15		15	15	15	3
U-30,C-0,L-0		30	-	-	1
U-0,C-30,L-0		-	30	-	1
U-30,C-30,L-0		30	30	-	2
U-30,C-0,L-30		30	-	30	2
U-30,C-30,L-30		30	30	30	3
U-0,C-45,L-0		-	45	-	1
U-45,C-0,L-45		45	-	45	2
U-45,C-15,L-45		45	15	45	3
U-45,C-30,L-45		45	30	45	3
U-45,C-45,L-45		45	45	45	3



d : 鉄筋径 L : 試験長 x : 切削深さ

図 3.1 切削鉄筋試験体

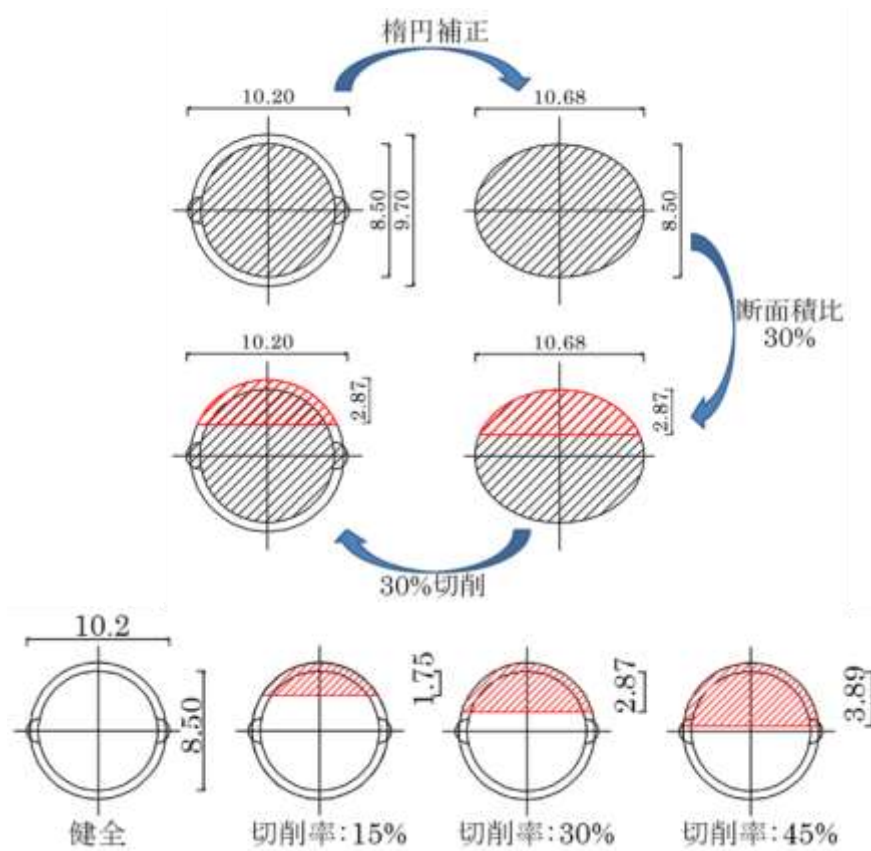


図 3.2 切削率および切削深さ

3.2.2 加力および計測方法

加力および計測方法は、第 2 章の 2.2.3 項と同様である。

3.3 試験結果

3.3.1 加力後の試験体状況

加力後の切削鉄筋試験体の例を図 3.3 に示す。最小断面積の切削位置が腹となるモードであり、切削面とは反対方向に座屈がみられた。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、試験体中心が腹となるモードで座屈がみられた。一方、切削率が 15%の試験体においては切削による影響があまり見られず、中心が腹となるモードで座屈がみられた。

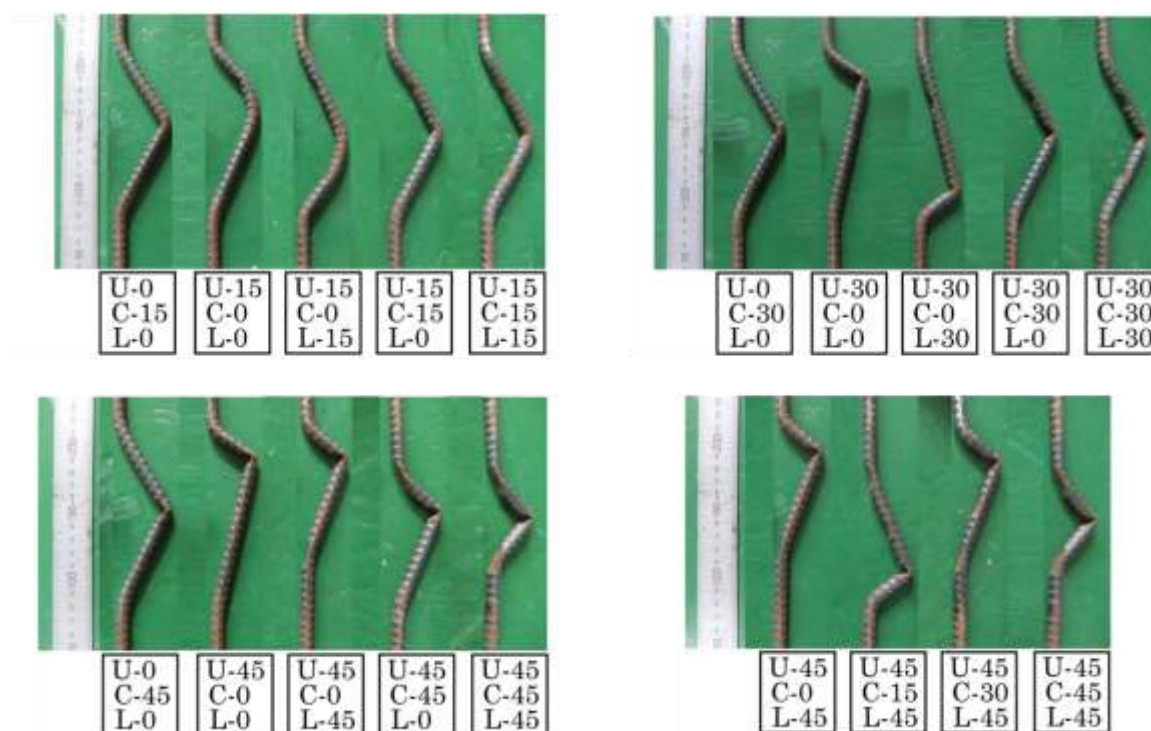


図 3.3 加力後の切削鉄筋試験体の例

3.3.2 圧縮応力－歪関係

切削鉄筋試験体の圧縮応力－歪関係の例を図 3.4 に示す。圧縮応力は荷重を公称断面積で除して求め、歪は試験区間の変形を試験長で除して求めた。また、各試験体の座屈強度 σ_b で基準化した圧縮応力－歪関係の例を図 3.5 に示す。断面減少率の増加に伴い、座屈強度の低下がみられた。また、圧縮応力－歪関係の軟化曲線は、断面減少率の増加に伴い、緩やかになる傾向がみられた。さらに、座屈モードの腹の位置によって最大圧縮応力以降の軟化曲線に差異が見られ、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。

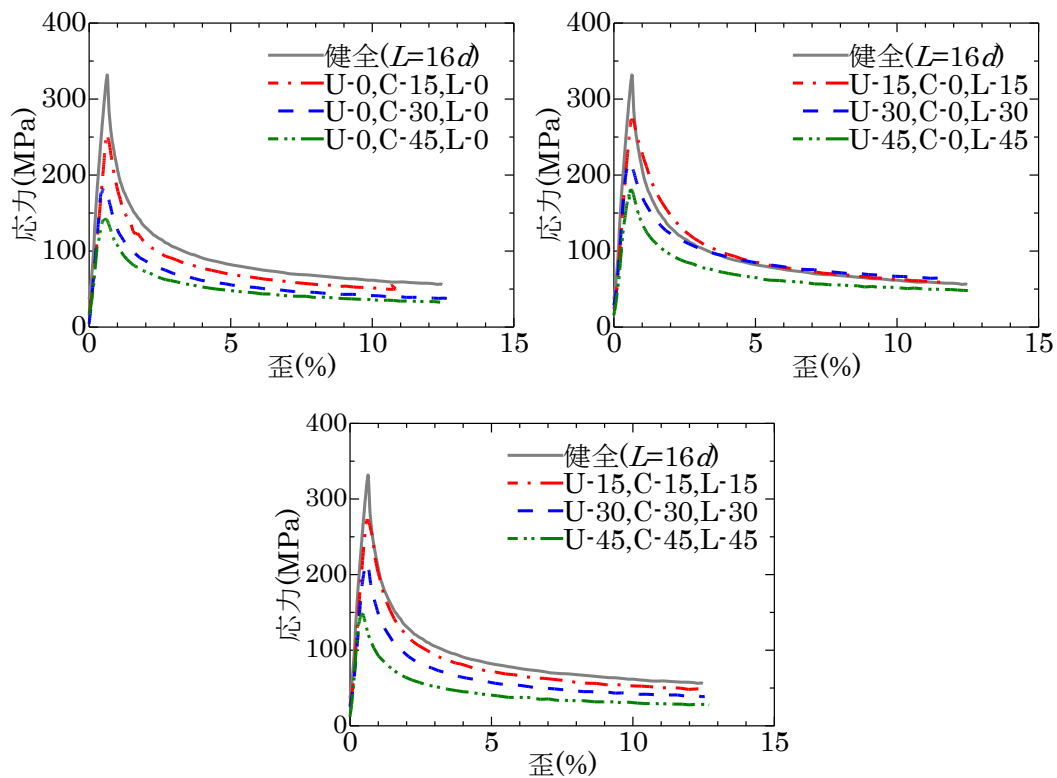


図 3.4 切削鉄筋試験体の圧縮応力－歪関係の例

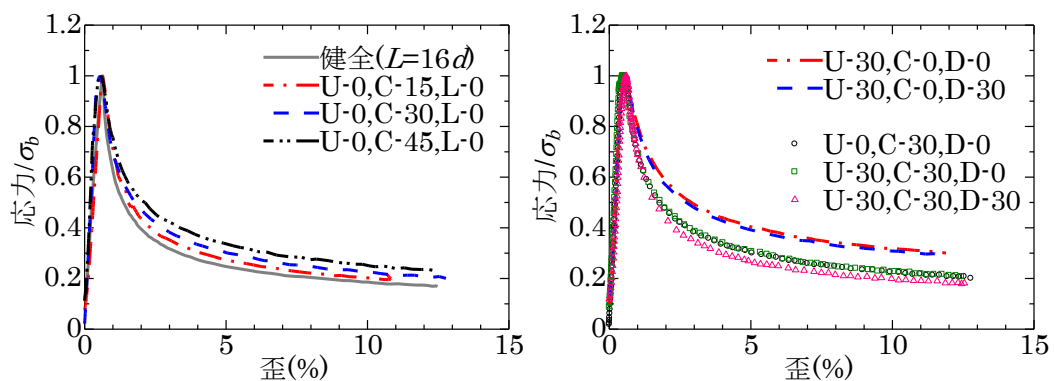


図 3.5 切削鉄筋試験体の基準化圧縮応力－歪関係の例

3.3.3 断面減少率－座屈荷重比関係

切削鉄筋試験体の断面減少率－座屈荷重比関係を図 3.6 に示す。ここで、座屈荷重比は健全鉄筋の座屈荷重に対する比とし、断面減少率は試験区間における最小断面積を公称断面積で除した値としている。既往の研究⁴⁾より提案された座屈荷重の評価方法である、(1)切削位置の断面減少を考慮した降伏荷重（図 3.7 左図参照）、(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（図 3.7 右図参照）により評価を行った。切削鉄筋試験体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。(1)の降伏荷重は作用力の偏心を無視し、断面減少のみを考慮した降伏荷重で式(3-1)で求めるものである。(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態になる中立軸を求め、その時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ることを確認した。

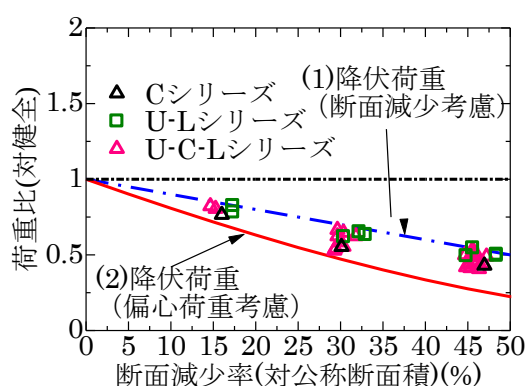


図 3.6 切削鉄筋試験体の断面減少率－座屈荷重比関係

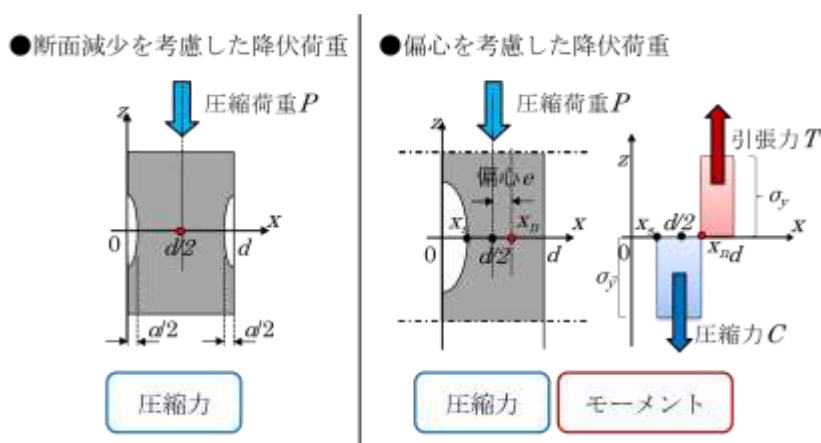


図 3.7 降伏荷重の評価

$$P = P_y (1 - \alpha / 100) \quad (3-1)$$

ここで、 P_y ：健全鉄筋の座屈荷重、 α ：断面減少率(%)である。

3.4 圧縮応力－歪関係のモデルの提案

切削鉄筋試験体の圧縮応力－歪関係の軟化域を式(3-2)で定式化する。図 3.5 左図より、断面減少率の増加に伴い、圧縮応力－歪関係の軟化曲線は緩やかになることから、健全鉄筋試験体の圧縮応力－歪関係に対して、提案したモデル式(2-1)に最小断面積における断面減少率 α を考慮しモデル化を行った。断面減少率 α が大きいほど軟化勾配が緩やかになる傾向を表現している。

$$\sigma = \sigma_b (\varepsilon_b / \varepsilon)^{\beta \sqrt{1 - \alpha / 100}} \quad (3-2)$$

ここで、 σ_b ：座屈強度、 ε_b ：座屈開始時歪、 β ：軟化勾配の差異を表現する係数、 α ：断面減少率(%)である。

3.5 モデルと試験結果の比較

前節により提案したモデルと圧縮応力-歪関係の試験結果との比較を図 3.8～図 3.10 に示す。圧縮応力は座屈強度 σ_b で基準化している。提案したモデルは圧縮応力-歪関係の試験結果を概ね表現できている。

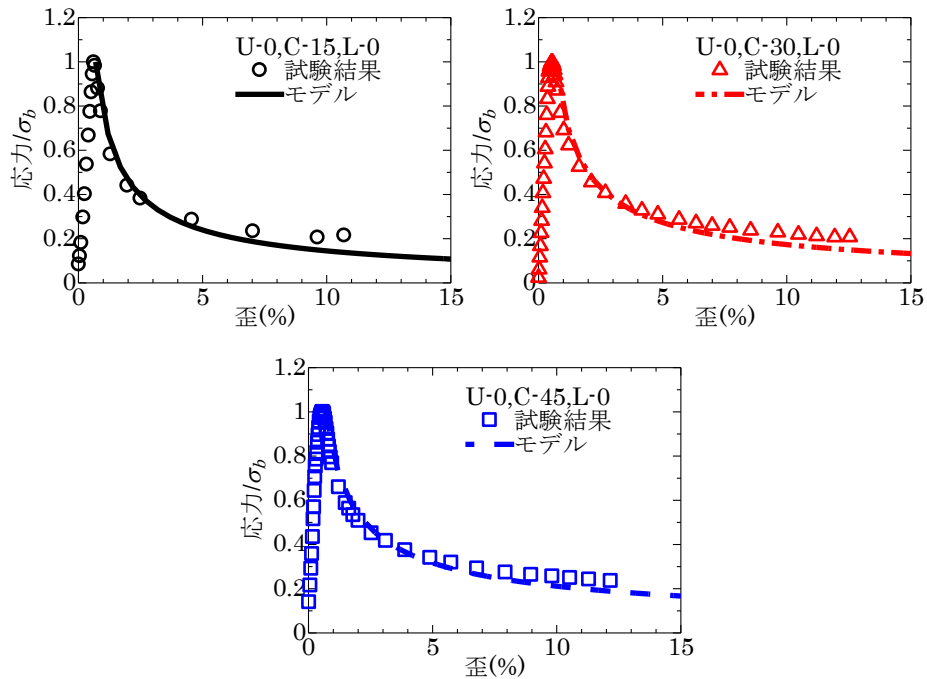


図 3.8 切削鉄筋試験体のモデルと試験結果の比較例 (C シリーズ)

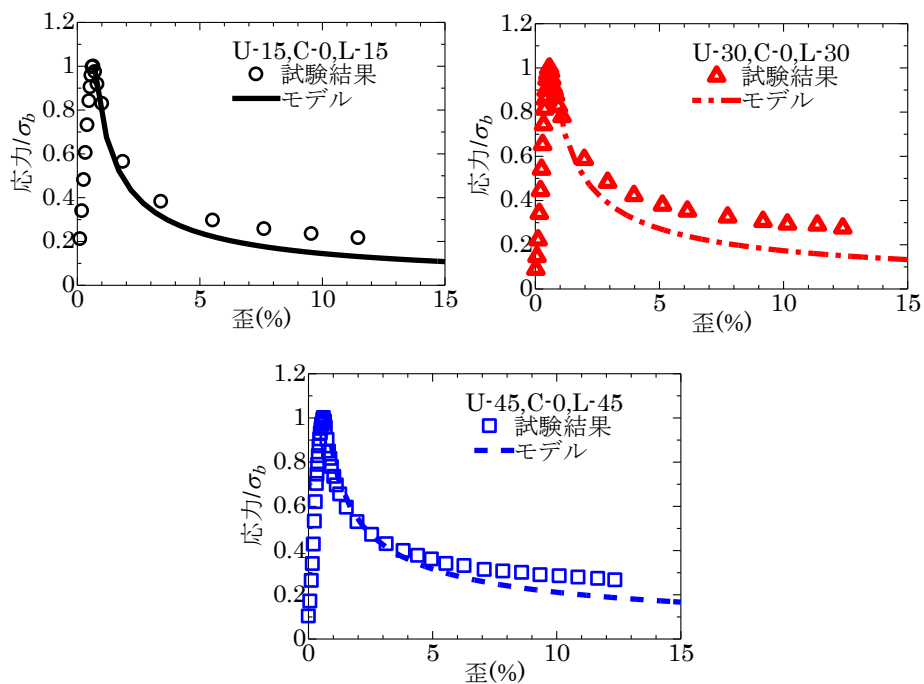


図 3.9 切削鉄筋試験体のモデルと試験結果の比較例 (U-L シリーズ)

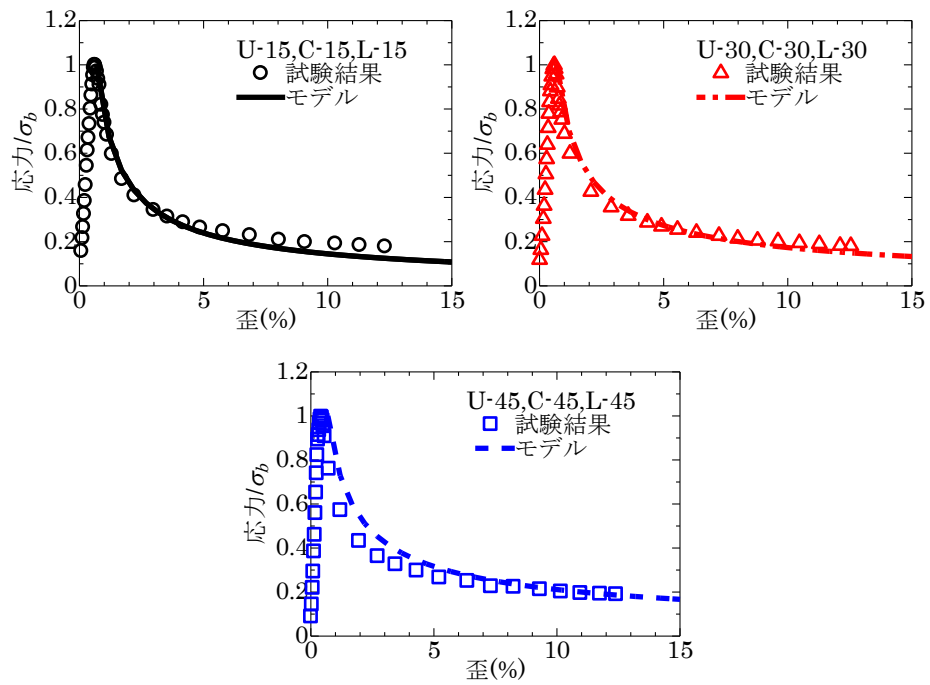


図 3.10 切削鉄筋試験体のモデルと試験結果の比較例 (U-C-L シリーズ)

3.6 まとめ

本章では、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を行い、座屈荷重および圧縮応力－歪関係の検討を行うとともに、健全鉄筋試験体に対して提案したモデルをもとに最大圧縮応力以降の圧縮応力－歪関係モデルの提案を行った。

- (1) 切削鉄筋試験体の座屈は、最小断面積の位置が腹となるモードで生じ、断面減少率の増加に伴って座屈荷重の低下がみられた。また、圧縮応力－歪関係の軟化曲線は緩やかになる傾向がみられた。
- (2) 切削鉄筋試験体の座屈荷重は、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することができた。
- (3) 健全鉄筋試験体に対して提案したモデルをもとに最小断面積による断面減少率を用いてモデル化した。モデルと試験結果を比較し、モデルが概ね試験結果を表現できていることを確認した。

第4章 電食による腐食鉄筋の座屈性状

4.1 はじめに

第3章では、局所腐食を模擬した切削鉄筋試験体を用いて座屈試験を行い、座屈荷重および圧縮応力－歪関係の検討、最大圧縮応力以降の圧縮応力－歪関係のモデルの提案を行った。しかし、実際の腐食形状は様々である。本章では、既往の研究で載荷を行った、圧縮側鉄筋を電食により腐食させた RC 梁部材の圧縮鉄筋をはつりだし、非一様な軸方向断面を有する腐食鉄筋試験体を用いて座屈試験を行い、座屈荷重および圧縮応力－歪関係の検討を行う。さらに、第3章で提案した最大圧縮応力以降の圧縮応力－歪関係のモデルの適用性について検討を行う。

4.2 試験概要

4.2.1 試験体

既往の研究³⁾で載荷試験を行った、圧縮側鉄筋を電食により腐食させた RC 梁部材の圧縮側鉄筋をはつりだし、計 6 体の試験体を用意した。鋼材は異形鉄筋 D10 である。はつり出した後、除錆した試験体の外観を図 4.1 に示す。3D スキャナによる断面計測手法⁷⁾を用い、各試験体の軸方向の断面積分布を計測した。計測結果を図 4.2 に示す。図中の破線は、同様に 3D スキャナにより計測した同一の健全鉄筋試験体の平均断面積 (67.11mm^2) を示している。

試験体 No.1、No.3 および No.4 では全体的に腐食が進行している。試験体 No.2、No.5 および 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。電食鉄筋試験体の平均断面積、最小断面積および断面減少率の一覧を表 4.1 に示す。ここで、断面減少率は 3D スキャナによる健全鉄筋の平均断面積に対する比とした。

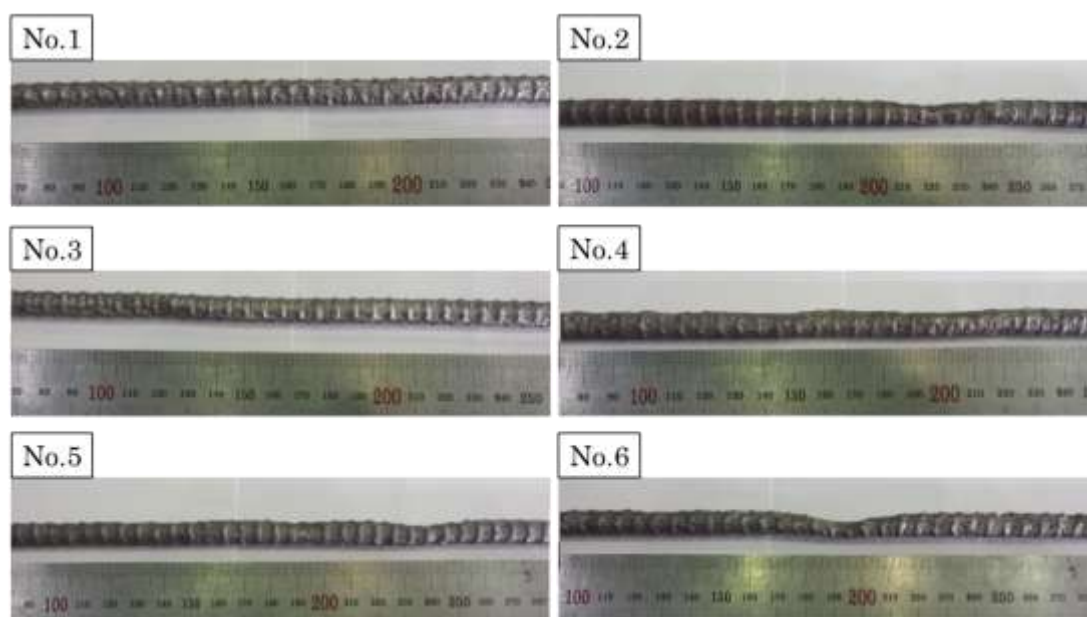


図 4.1 電食鉄筋試験体の外観

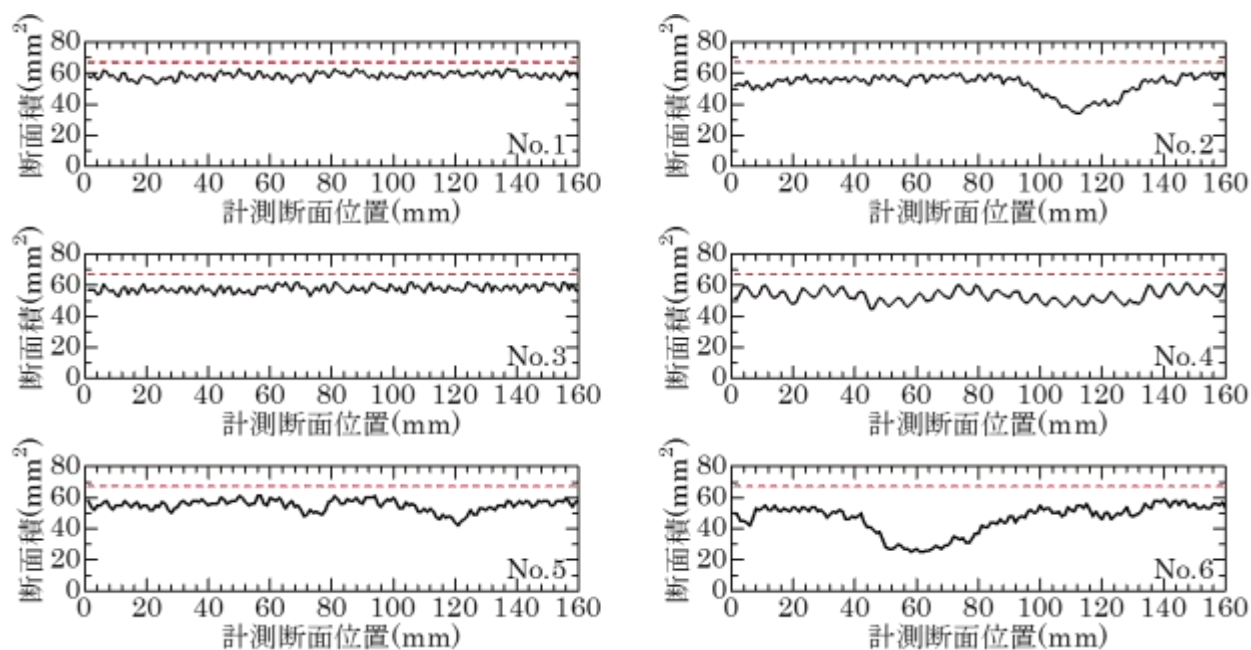


図 4.2 電食鉄筋試験体の軸方向断面積分布

表 4.1 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

4.2.2 加力および計測方法

加力および計測方法は、第 2 章の 2.2.3 項と同様である。

4.3 試験結果

4.3.1 加力後の試験体状況

加力後の電食鉄筋試験体を図 4.3 に示す。本試験では試験体 No.6 のみが最小断面積の切削位置が腹となるモードで座屈がみられた。残りの試験体 No.1~No.5 においては、全体的に腐食が進行していることや、平均的な軸方向断面に対して、局所腐食による影響があまり見られず、中心が腹となるモードで座屈がみられた。

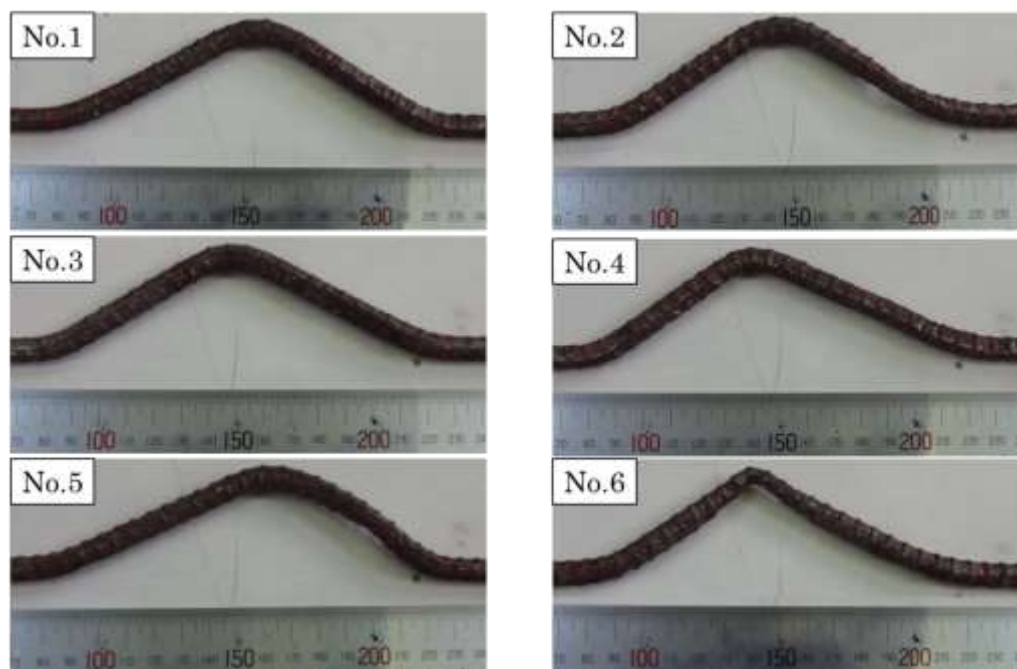


図 4.3 加力後の電食鉄筋試験体

4.3.2 圧縮応力－歪関係

電食鉄筋試験体の圧縮応力－歪関係を図 4.4 に示す。圧縮応力は荷重を公称断面積で除して求め、歪は試験区間の変形を試験長で除して求めた。切削鉄筋試験体の座屈試験結果同様に、断面減少率の増加に伴い、座屈強度の低下が見られた。

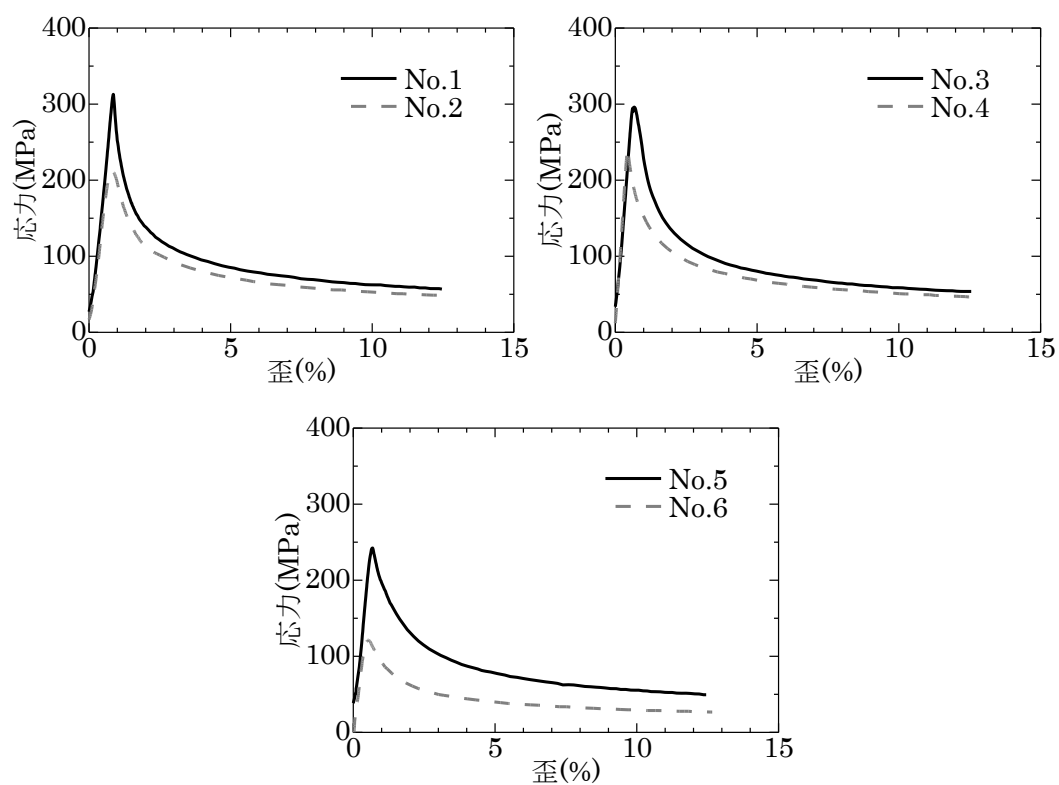


図 4.4 電食鉄筋試験体の圧縮応力－歪関係

4.3.3 断面減少率－座屈荷重比関係

電食鉄筋試験体の断面減少率－座屈荷重比の関係を図 4.5 に示す。第 3 章同様に(1)切削位置の断面減少を考慮した降伏荷重、(2)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評価を行った。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。

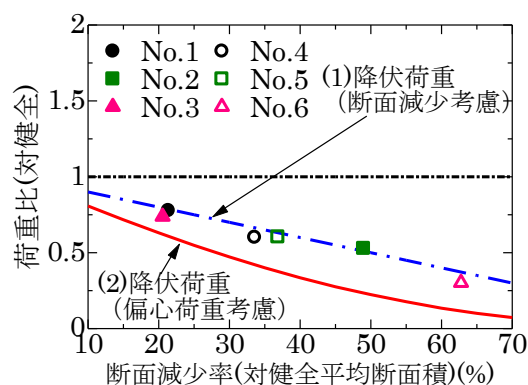


図 4.5 電食鉄筋試験体の断面減少率－座屈荷重比関係

4.4 モデルと試験結果の比較

第3章により提案したモデルと圧縮応力-歪関係の試験結果との比較を図4.6に示す。圧縮応力は座屈強度 σ_b で基準化している。式(3-2)の断面減少率 α は、3D スキャナにより計測した最小断面積より求めた値とした。提案したモデルは圧縮応力-歪関係の試験結果を概ね表現できている。

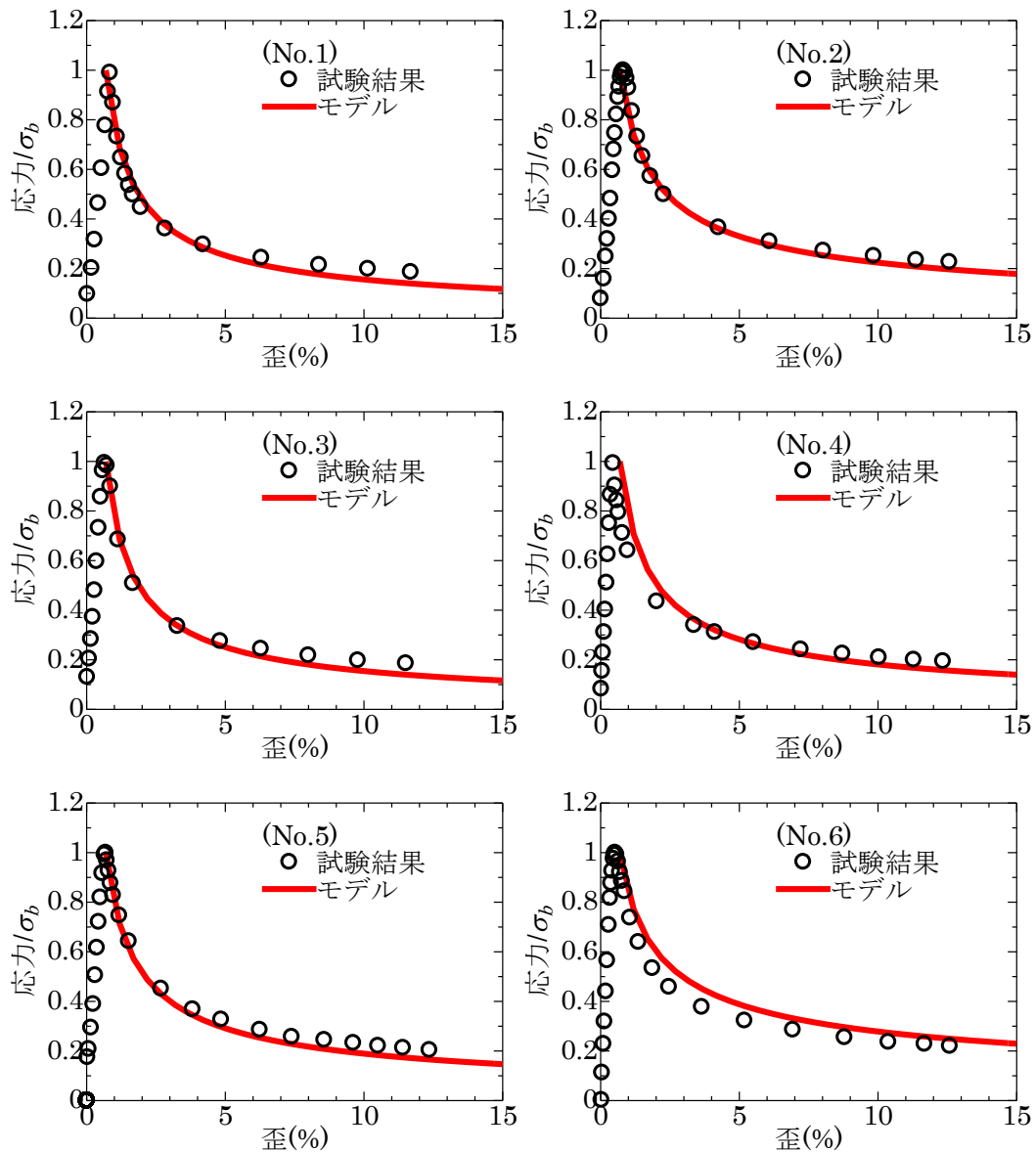


図 4.6 電食鉄筋試験体のモデルと試験結果の比較

4.5 まとめ

本章では、電食鉄筋試験体を用いて座屈試験を行い、座屈荷重および圧縮応力－歪関係の検討を行うとともに、第 3 章で提案した圧縮応力－歪関係のモデルの適用性について検討した。

- (1)切削鉄筋試験体の座屈試験結果同様に、断面減少率の増加に伴い、座屈荷重の低下がみられた。
- (2)電食鉄筋試験体の座屈荷重は 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、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することができた。
- (3)3D スキャナにより計測した最小断面積の値を用いて、第 3 章で提案したモデルにより圧縮応力－歪関係の試験結果を概ね表現できた。

第5章 コンクリートの拘束を考慮した切削鉄筋の座屈性状

5.1 はじめに

鉄筋の腐食によりかぶりコンクリートにひび割れや剥落が生じることを考慮すると、図 5.1 に示すように、RC 部材内の鉄筋はかぶりコンクリート側に座屈することが考えられる。第 3 章や第 4 章で座屈試験を行った試験体では、偏心荷重の影響により、最終的に切削面や腐食により凹になった面が内側に折れるモードで座屈したが、かぶりコンクリート側から腐食が進行することを考慮すると、そのモードで座屈する方向にはコアコンクリートがあり、座屈変形が拘束されることが考えられる。本章では、座屈変形を拘束するジグを用い、切削鉄筋試験体がコアコンクリートの拘束を受ける際の座屈荷重および圧縮応力-歪関係の検討を行う。

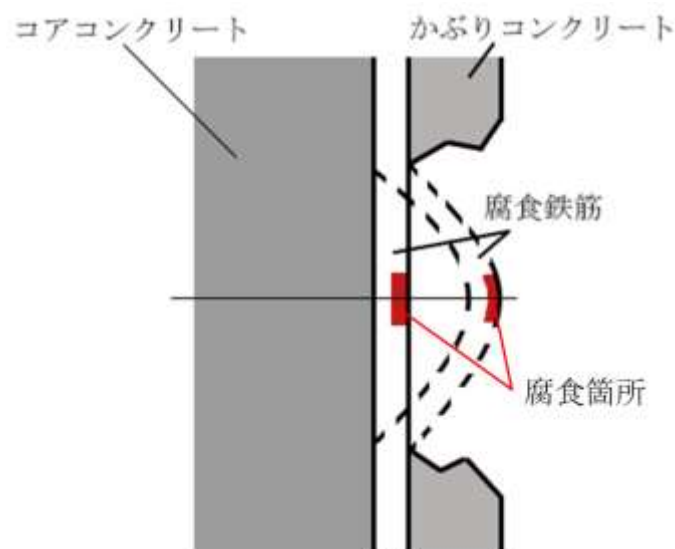


図 5.1 実構造物での座屈モード

5.2 試験概要

5.2.1 試験体

切削鉄筋試験体の一覧を表 5.1 に、試験体の詳細を図 5.2 に示す。切削鉄筋試験体には第 2 章および第 3 章と同一の異形鉄筋 D10 を用い、試験長は $16d$ とした。切削箇所は中央部のみ (C シリーズ)、上下 2 ヲ所 (C-L シリーズ) とし、C-L シリーズにおいて座屈変形の拘束を受ける位置での 2 ヲ所の切削位置の間隔を実験因子とした。なお、切削量は第 3 章と同様に断面積比 (切削率) が 15%、30%、45%となるように決定した。

表 5.1 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(%)		切削箇所	切削間隔
		C	L		
C-15,L-0	$16d$	15	-	1	-
C-0,L-15		-	15	1	-
C-15,L-15		15	15	2	$4d$
C-30,L-0		30	-	1	-
C-0,L-30		-	30	1	-
C-30,L-30		30	30	2	$2d, 4d, 6d$
C-45,L-0		45	-	1	$4d$
C-45,L-15		45	15	2	$4d$
C-45,L-30		45	30	2	$4d$
C-0,L-45		-	45	1	-
C-15,L-45		15	45	2	$4d$
C-30,L-45		30	45	2	$4d$
C-45,L-45		45	45	2	$2d, 4d, 6d$

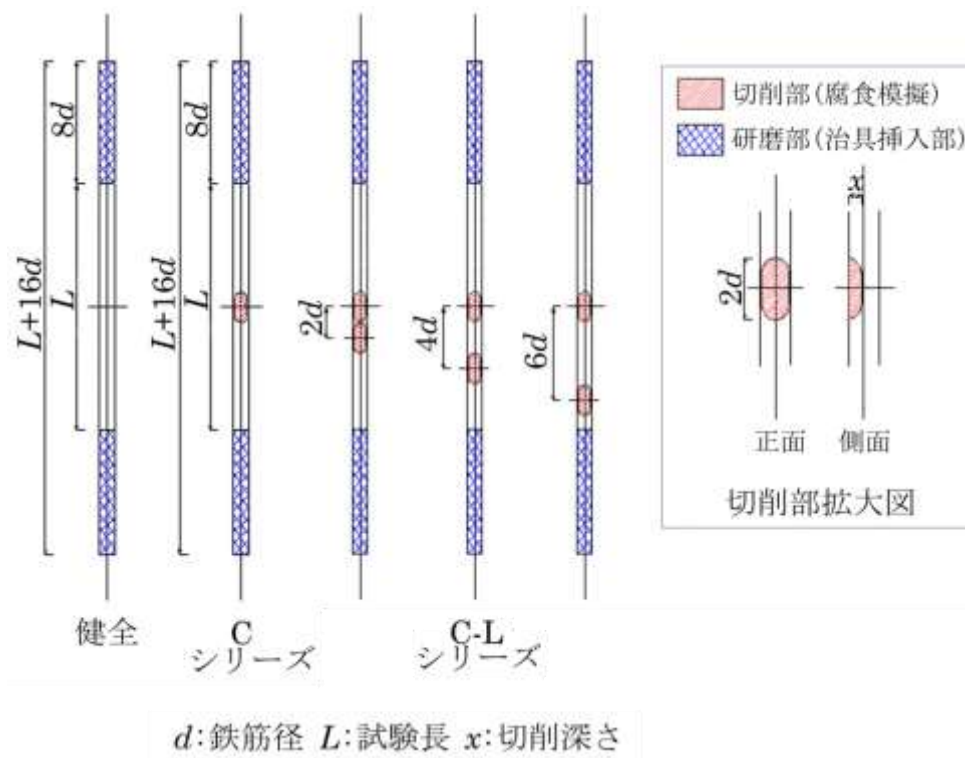


図 5.2 切削鉄筋試験体

5.2.2 加力および計測方法

加力および測定方法を図 5.3 に示す。下部固定用ジグ以外は前章までと同一である。下部固定用ジグの詳細を図 5.4 に示す。下部固定用ジグは、試験区間 $16d$ ($=160\text{mm}$)のうちの $12d$ ($=120\text{mm}$)においてコアコンクリートの拘束を模擬するよう、鉄筋断面の半分がジグに設けた溝に接するように作製した。切削鉄筋試験体は切削面が溝の外側に向くようにジグ内に挿入した。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。なお、試験区間による圧縮変形は、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。

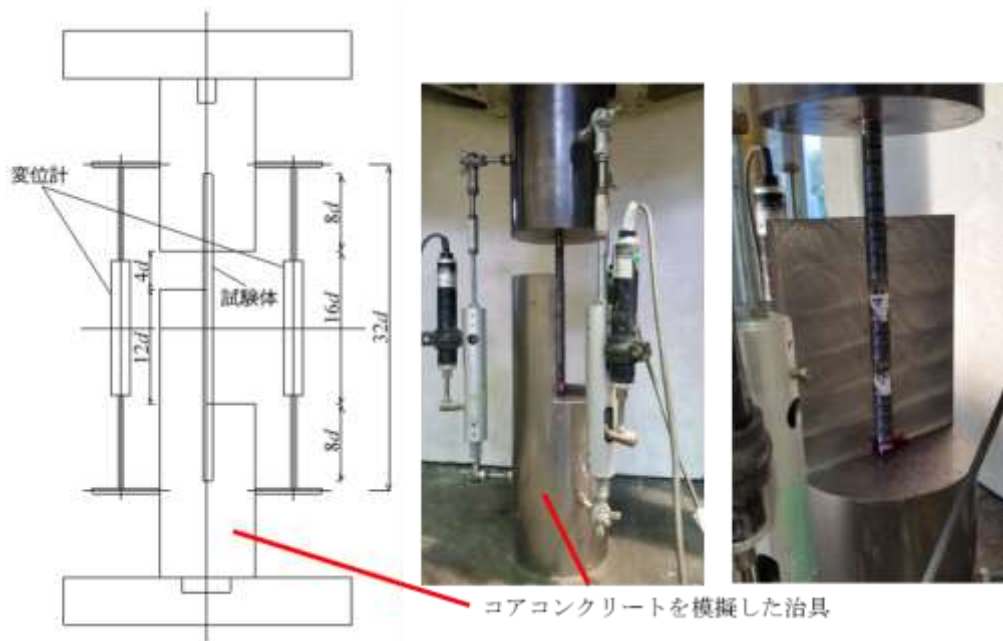


図 5.3 加力および測定方法

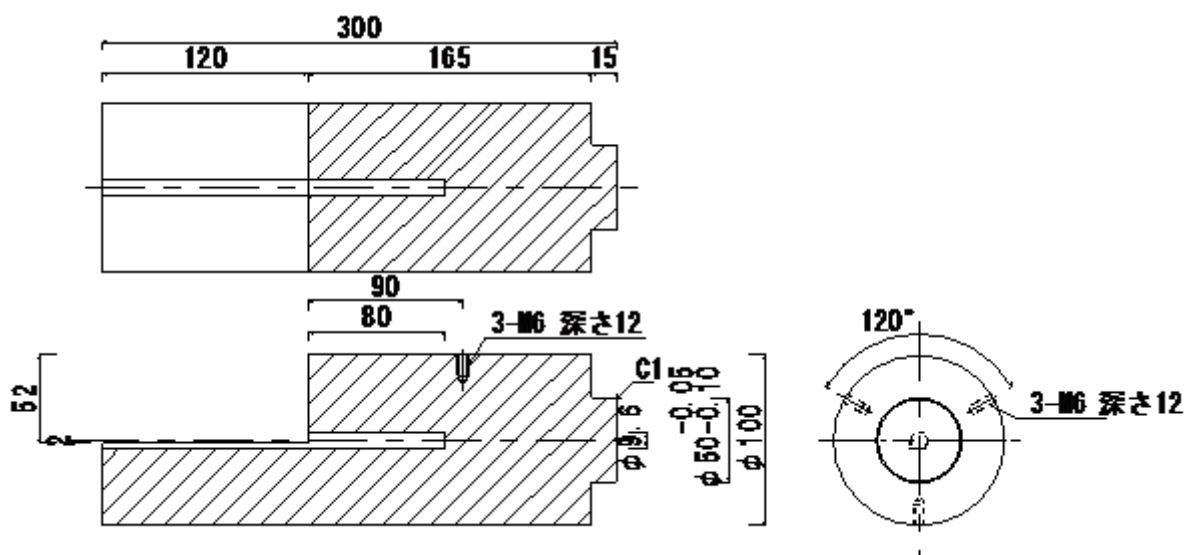


図 5.4 下部固定用ジグの詳細

5.3 試験結果

5.3.1 加力後の試験体状況

加力前後の切削鉄筋試験体の変形を図 5.5 に示す。図 5.5 上図に示すように、最小断面積の位置が支点となり、試験長から最小断面積の位置から端部までの長さを差し引いた区間の中心が腹となるモードで座屈が見られた。また図 5.5 下図に示すように、同一の最小断面積の箇所を複数有する試験体においては、試験長から端部に近い最小断面積の位置から端部までの長さを差し引いた区間の中心が腹となるモードで座屈がみられた。以上の座屈変形の区間長を、本研究では「腐食断面による座屈長さ」と定義する。図 5.6 に加力後の切削鉄筋試験体の例を示す。切削率が 30%以上の試験体においては腐食断面による座屈長さの中心が腹となるモードで座屈がみられた。一方で、切削率が 15%の試験体においては切削による影響が見られず、試験長の中心が腹となるモードで座屈がみられた。

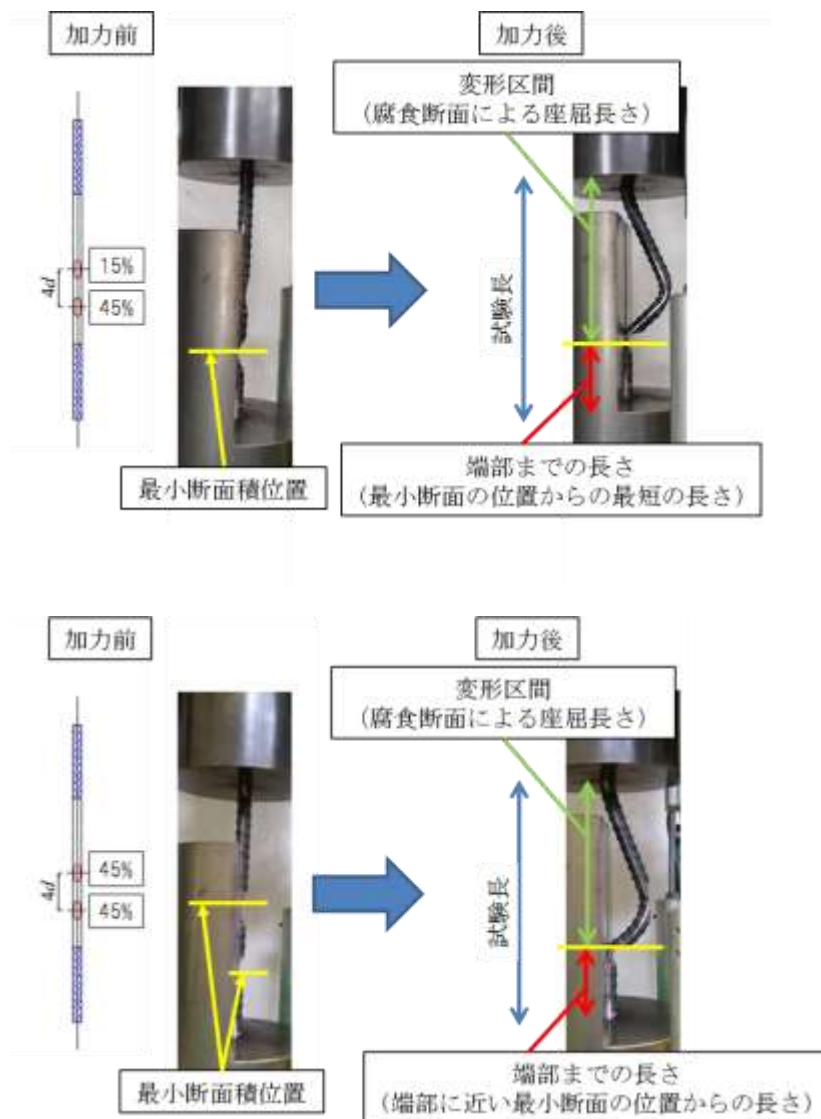


図 5.5 加力前後の切削鉄筋試験体の変形（上図：C-15,L-45、下図：C-45,L-45）

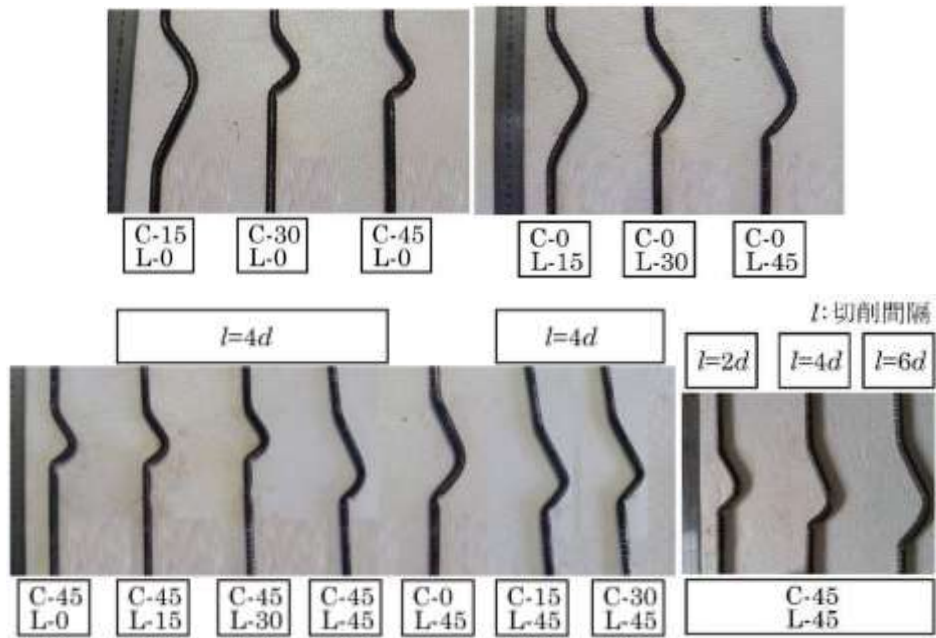


図 5.6 加力後の拘束を考慮した切削鉄筋試験体の例

5.3.2 圧縮応力－歪関係

圧縮応力－歪関係の例を図 5.7 に示す。圧縮応力は荷重を公称断面積で除して求め、歪は試験区間の変形を試験長で除して求めた。また、各試験体の座屈強度で基準化した圧縮応力－歪関係の例を図 5.8 に示す。断面減少率の増加に伴い、座屈強度の低下が見られた。最大圧縮応力以降の軟化曲線は、断面減少率の増加に伴い、緩やかになる傾向がみられた。また、腐食断面による座屈長さが小さくなるに伴い、緩やかになる傾向がみられた。特に 30%以上の断面減少率を有する試験体においては、大きな違いがみられた。切削箇所が 1 ヲ所の試験体の圧縮応力－歪関係と比較して、同一の最小断面積の箇所を複数有する試験体では、最大圧縮応力付近においてふくらみのある曲線となり、最大圧縮応力に到達した後、急激に応力の低下がみられた。これは図 5.9 に示すように、最大圧縮応力付近において切削位置の間隔 $4d$ の区間で変形が生じ、その後、腐食断面による座屈長さの中心が腹となるモードとなる座屈変形に切り替わったためであると考えられる。

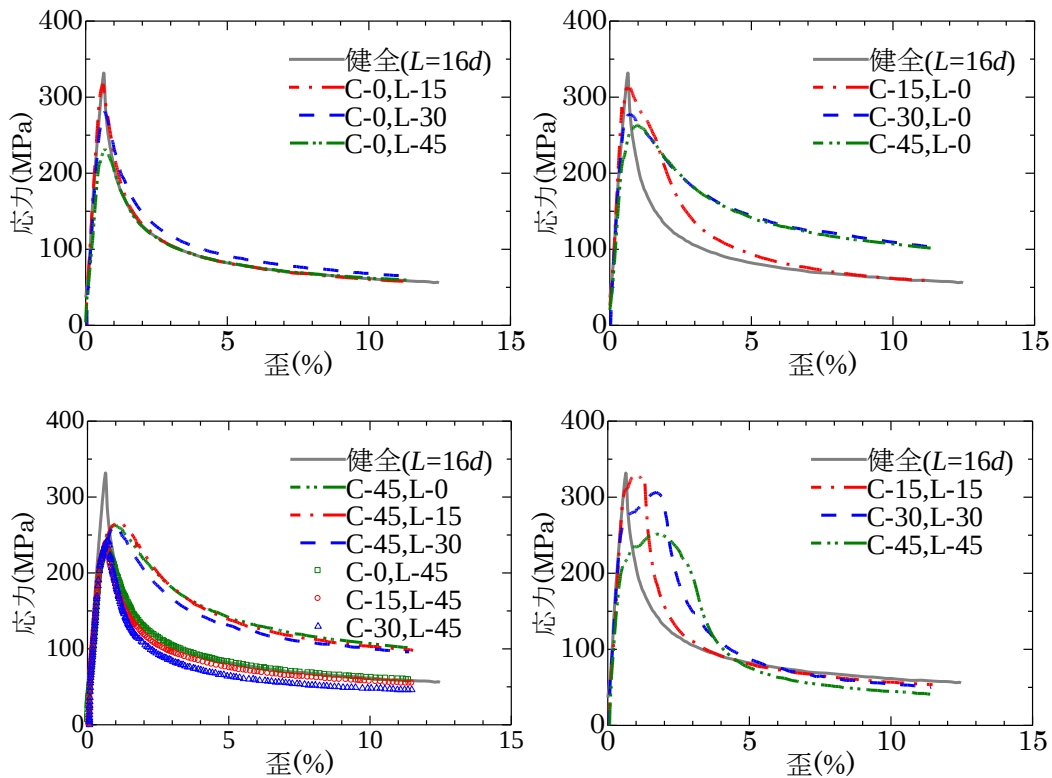


図 5.7 拘束を考慮した切削鉄筋試験体の圧縮応力－歪関係の例

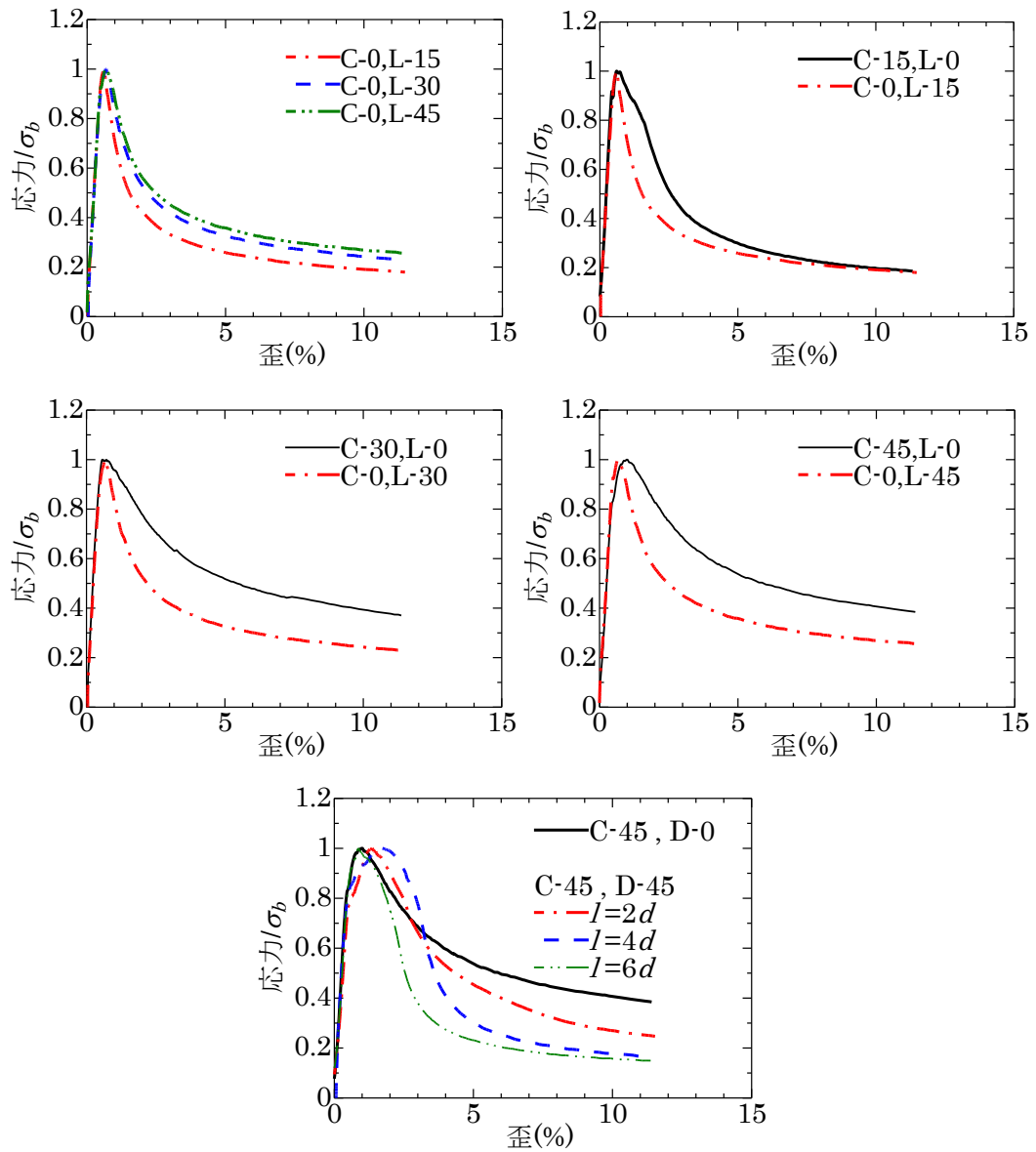


図 5.8 拘束を考慮した切削鉄筋試験体の基準化圧縮応力－歪関係の例

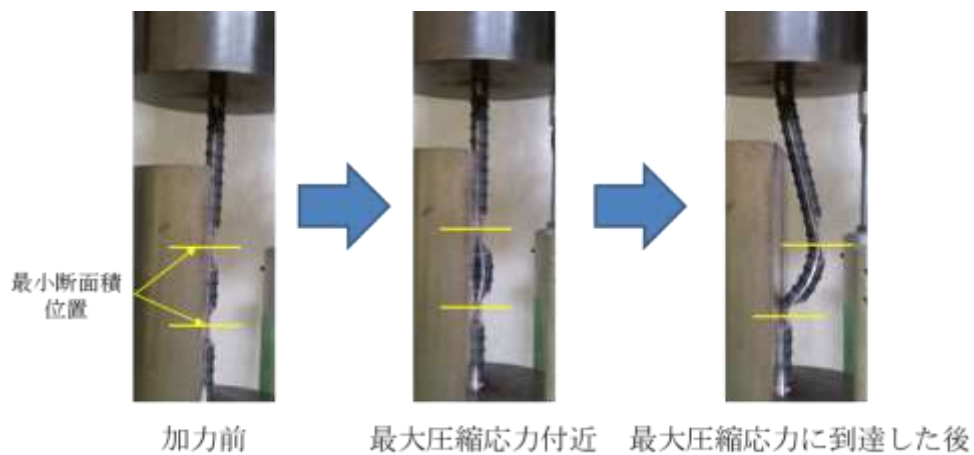


図 5.9 同一の最小断面積の箇所を複数有する試験体の変形過程
(切削率：45%, 切削間隔：4d)

5.3.3 断面減少率－座屈荷重比関係

拘束を考慮した切削鉄筋試験体の断面減少率－座屈荷重比関係を図 5.10 に示す。図中には第 3 章より得られた切削鉄筋試験体の断面減少率－座屈荷重比関係の結果（拘束なし）も示している。座屈する方向および座屈形状の違いにより、第 3 章の拘束がない場合の座屈荷重よりも本章の拘束がある場合の方が座屈荷重は大きくなっていることがわかる。

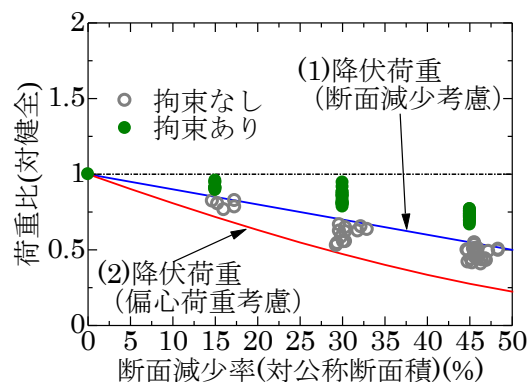


図 5.10 拘束を考慮した切削鉄筋試験体の断面減少率－座屈荷重比関係

5.4 圧縮応力－歪関係のモデルの提案

コンクリートの拘束を考慮した切削鉄筋試験体では、本章の試験結果より、断面減少率の増加に伴い応力－歪関係の軟化曲線が緩やかになる傾向に加え、5.3.1 節で述べた腐食断面による座屈長さの減少によっても緩やかになる。コンクリートの拘束を考慮した最大圧縮応力以降の圧縮応力－歪関係を、第 2 章で提案した式(2-2)に対して「腐食断面による座屈長さ」(図 5.11 参照)を用い、軟化勾配の差異を表現する係数 β を式(5-4)で表して、モデル化する。

$$\beta = 0.049(L'/d) \quad (5-4)$$

ここで、 L' ：腐食断面による座屈長さ、 d ：鉄筋径である。

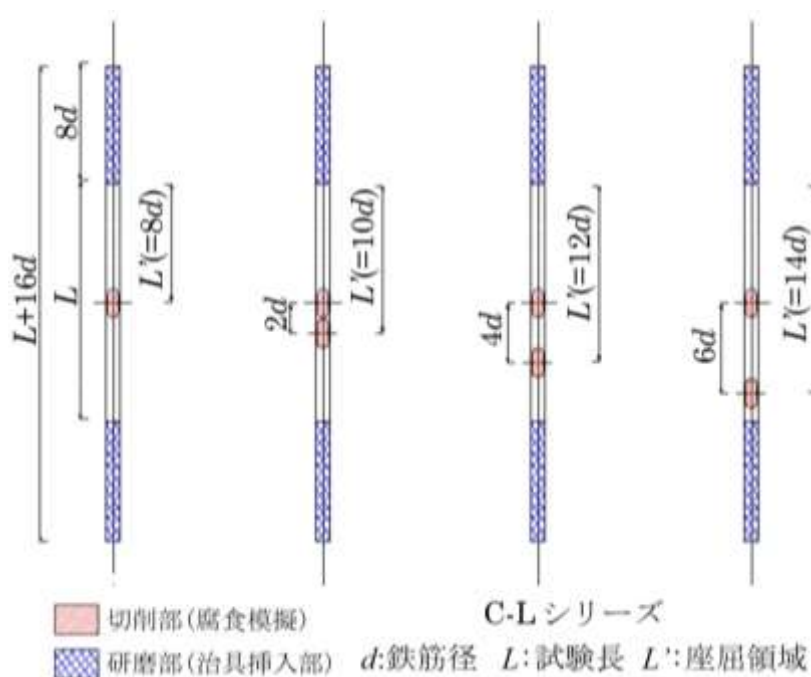


図 5.11 切削鉄筋試験体の腐食断面による座屈長さ

5.5 モデルと試験結果の比較

前節により提案したモデルと圧縮応力-歪関係の試験結果との比較を図 5.12 および図 5.13 に示す。圧縮応力は座屈強度 σ_b で基準化している。軟化勾配の差異を表現する係数 β を、腐食断面による座屈長さ L' を用いた式(5-4)で評価したモデルと試験長 L を用いた式(2-2)で評価したモデルを図中に示した。30%以上の切削率の試験体では、腐食断面による座屈長さ L' を用いた式(5-4)で評価することで概ね表現できている。一方で、切削率が 15%の試験体においては、切削による影響が見られず、中心が腹となるモードで座屈が見られたことから試験長 L を用いた式(2-2)で評価することで概ね表現できている。同一の最小断面積の箇所を複数有する試験体においては急激な荷重低下を表現することはできていないが、試験長 L を用いた式(2-2)で評価することで、概ね下限値を表現することができている。

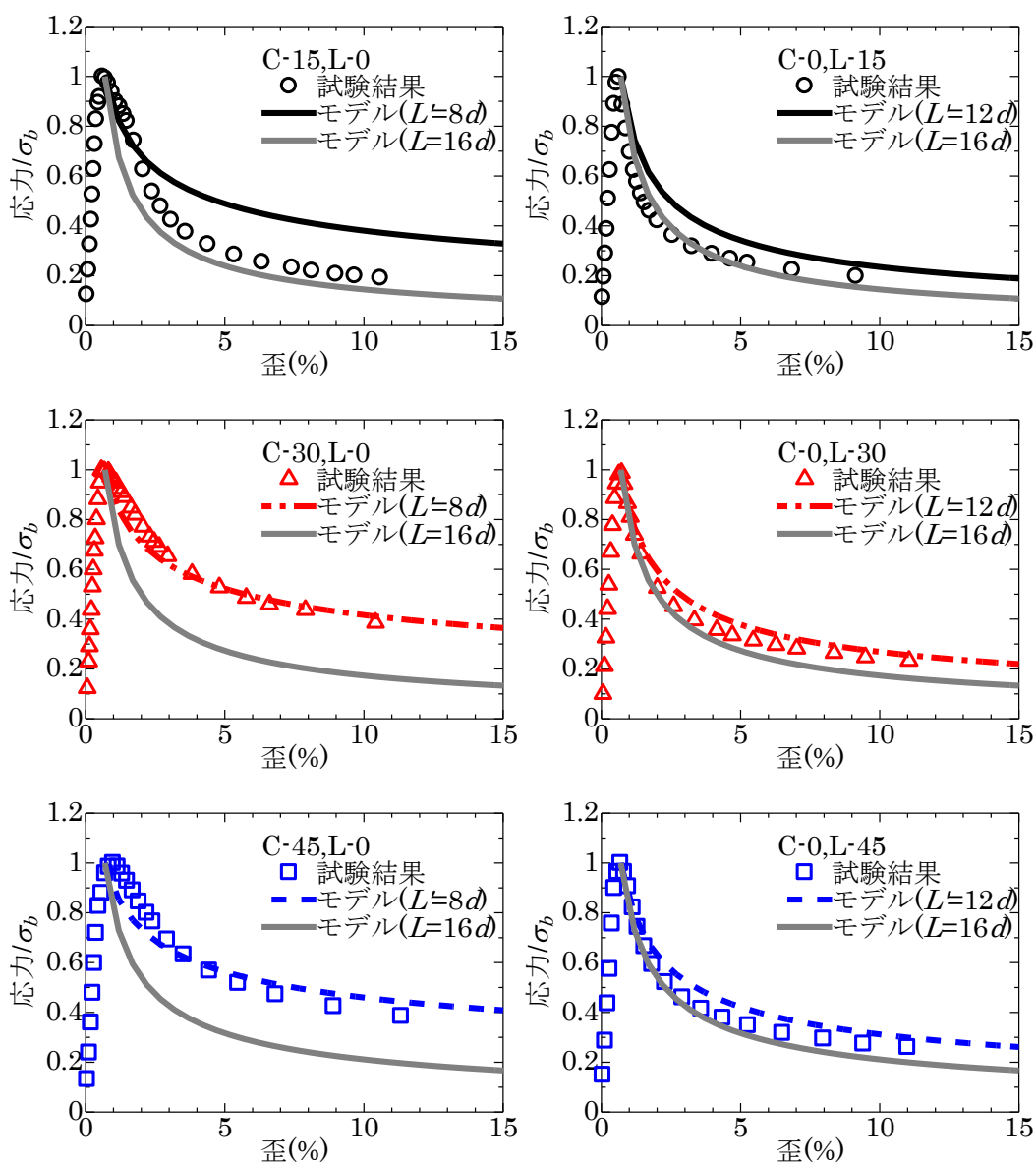


図 5.12 拘束を考慮した切削鉄筋のモデルと試験結果の比較

(1 ヲ所切削の試験体)

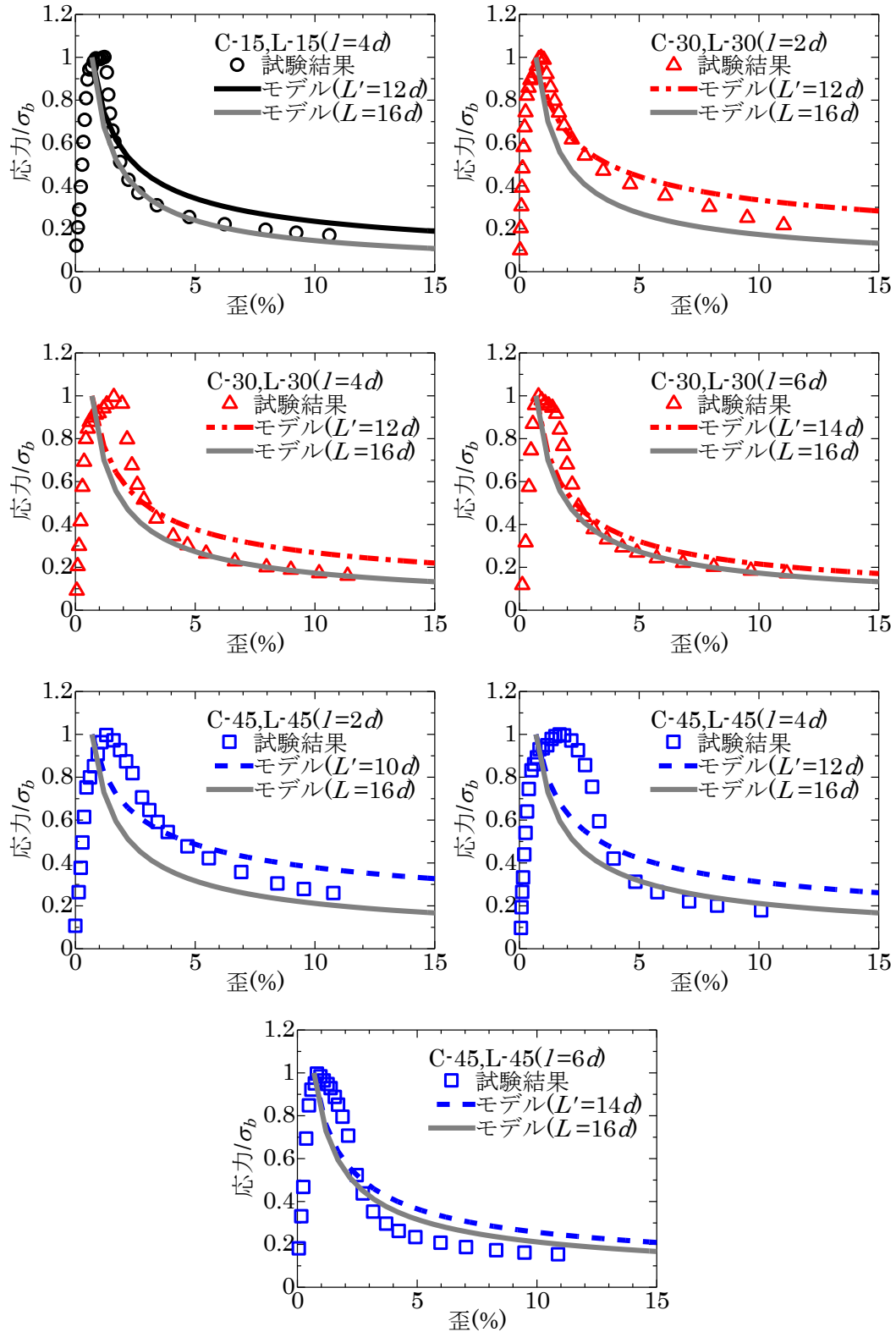


図 5.13 拘束を考慮した切削鉄筋のモデルと試験結果の比較
(同一の最小断面積の箇所を複数有する試験体)

5.6 まとめ

本章では、コアコンクリートの拘束を考慮したジグを用い、切削鉄筋試験体を用いた座屈試験を行い、座屈荷重および圧縮応力－歪関係の検討を行うとともに、第 3 章で提案した圧縮応力－歪関係のモデルをもとに検討を行った。

- (1)最小断面積の切削位置が支点となり、腐食断面による座屈長さの中心が腹となるモードで座屈がみられた。最大圧縮応力以降の軟化曲線は、断面減少率の増加および腐食断面による座屈長さの減少に伴い、緩やかになる傾向がみられた。
- (2)断面減少率の増加に伴い、座屈荷重の低下は見られるものの、拘束がない場合よりも拘束がある場合の方が座屈荷重は大きい。
- (3)腐食断面による座屈長さを用いたモデルで、30%以上の切削率の試験体では、モデルが概ね試験結果を表現できていることを確認した。
- (4)切削率が 15%の試験体および同一の最小断面積の箇所を複数有する試験体では、拘束がない場合のモデルで圧縮応力－歪関係の下限値を表現する。

第6章 コンクリートの拘束を考慮した暴露腐食鉄筋の座屈性状

6.1 はじめに

本章では、拘束のある場合について、第4章と同様に暴露による実際の腐食鉄筋試験体を用いて座屈試験を行い、座屈荷重および圧縮応力－歪関係の検討を行う。さらに、第5章で提案した最大圧縮応力以降の圧縮応力－歪関係のモデルの適用性について検討を行う。

6.2 試験概要

6.2.1 試験体

暴露腐食鉄筋試験体には第2章、第3章および第5章と同一の異形鉄筋 D10 を用い、試験長は $16d$ とした。暴露前の試験体の様子を図 6.1 に示す。ジグ内に挿入する領域の試験体両端部 $8d$ 区間にエポキシ樹脂を塗布することにより腐食保護を行った。

暴露の様子を図 6.2 に示す。架台に計 120 本の試験体を設置し、塩化ナトリウム水溶液の入ったタンクから塩ビ管を通して、試験体に塩化ナトリウム水溶液を 1 日 2 回、一定の時間噴霧するようタイマーを設定した。497 日間暴露後、本試験では 8 体の試験体を架台から取り出し試験に供した。試験体を 10%クエン酸二アンモニウム水溶液に浸漬した後、ワイヤーブラシを用いて腐食生成物の除去作業を行った。暴露腐食鉄筋試験体の外観を図 6.3 に示す。全体的に腐食しており、横節部が腐食により欠損している部分も見られた。暴露期間および暴露方法が全試験体とも同じであったことから本試験体 8 体とも同様な腐食形状であり、目視では局所的な腐食はあまり見られなかった。

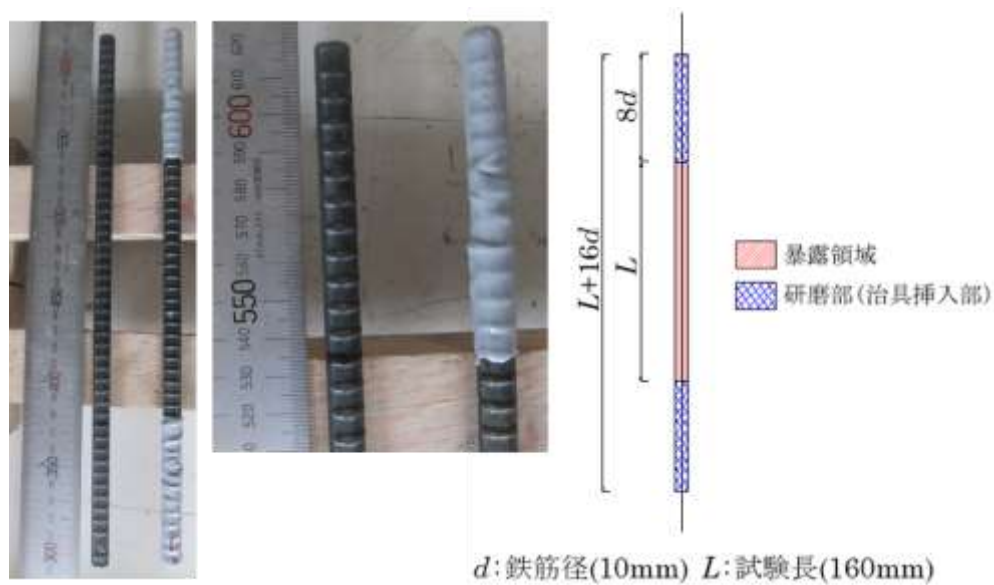


図 6.1 暴露前の試験体の様子：挿入部の腐食保護について



2014年8月5日～2015年12月14日

497日間



図 6.2 試験体の暴露

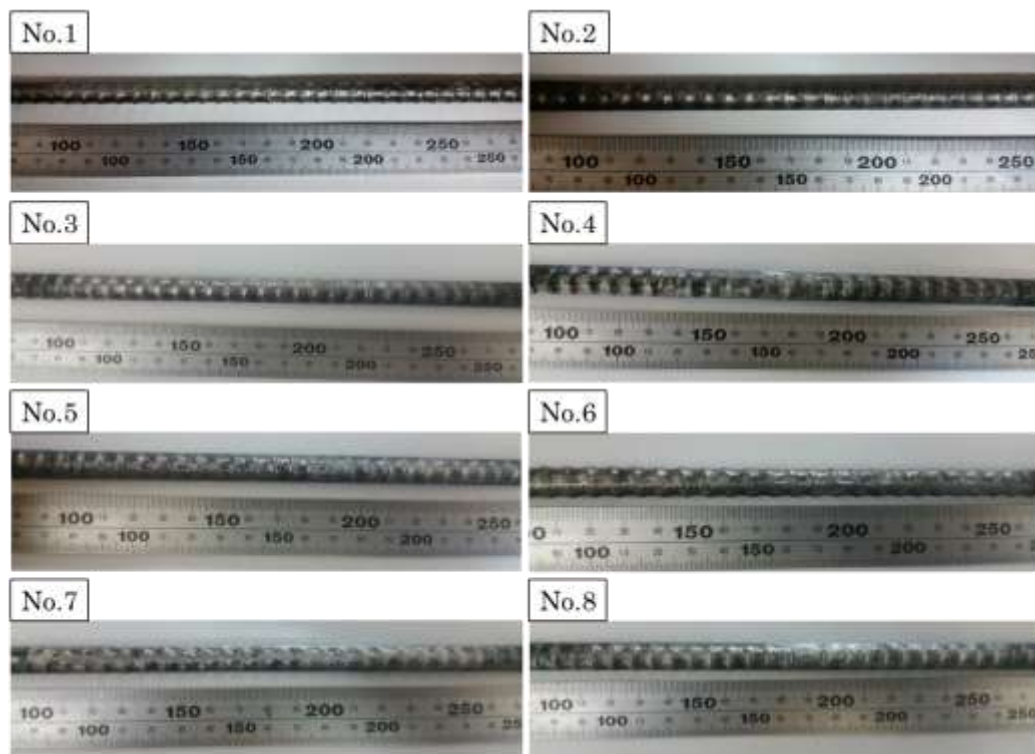


図 6.3 暴露腐食鉄筋試験体の外観

6.2.2 軸方向断面積の計測方法

暴露腐食鉄筋試験体 8 体の軸方向断面積の計測は、ノギスを用いて行った。図 6.4 に示すように試験区間内 2mm 間隔で試験体のマーキングを行い、ノギスにより最小径および計測した最小径から 90° 回転させた径の計測を行った。2 つの径の値を用いて楕円の断面積に補正し、公称断面積に対する断面減少率の算出を行った。計測値および楕円補正した断面積の一覧を表 6.1 に示す。



図 6.4 暴露腐食鉄筋試験体の軸方向の断面積の計測方法

表 6.1 ノギスによる計測値および楕円補正した断面積

試験体名	試験長 d 鉄筋径(mm)	最小径 (mm)	最小値に対して 90°の径 (mm)	楕円補正した断面積	
				(mm ²)	減少率(%)
No.1	16 d	7.88	9.97	61.70	13.50
No.2		7.97	9.87	61.78	13.38
No.3		7.95	8.25	51.51	27.78
No.4		7.97	9.63	60.28	15.49
No.5		8.02	8.62	54.30	23.88
No.6		7.76	8.87	54.06	24.21
No.7		8.08	9.94	63.08	11.57
No.8		7.96	9.79	61.20	14.19

6.2.3 加力および計測方法

加力および計測方法は、第5章の5.2.2項と同様である。なお、端部の挿入の際に、前節で計測した最小径の部分がコアコンクリートの拘束を模擬したジグに設けた溝に収まるように配慮した（図6.5参照）。



図 6.5 試験体の固定方法

6.3 試験結果

6.3.1 加力後の試験体状況

加力後の暴露腐食鉄筋試験体を図 6.6 に示す。全試験体ともに全体的に腐食していることや、局所腐食が見られなかったことから、概ね中心が腹となるモードで座屈がみられた。

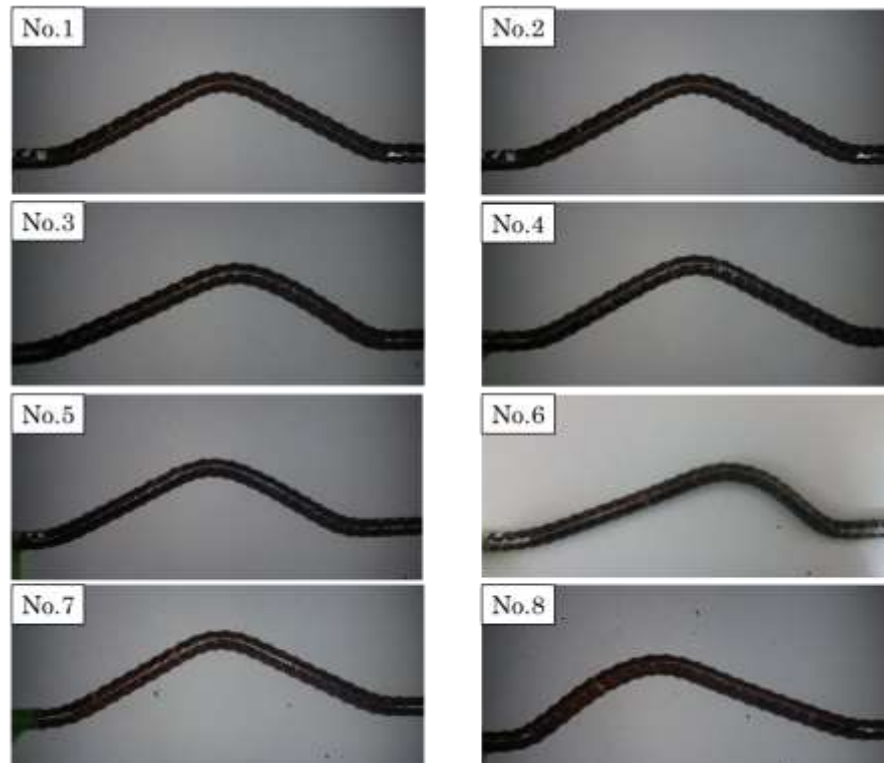


図 6.6 加力後の暴露腐食鉄筋試験体

6.3.2 圧縮応力－歪関係

暴露腐食鉄筋試験体の圧縮応力－歪関係を図 6.7 に示す。圧縮応力は荷重を公称断面積で除して求め、歪は試験区間の変形を試験長で除して求めた。腐食劣化による座屈強度の低下がみられた。全試験体の座屈強度を比較するとあまり大きな差は見られなかった。

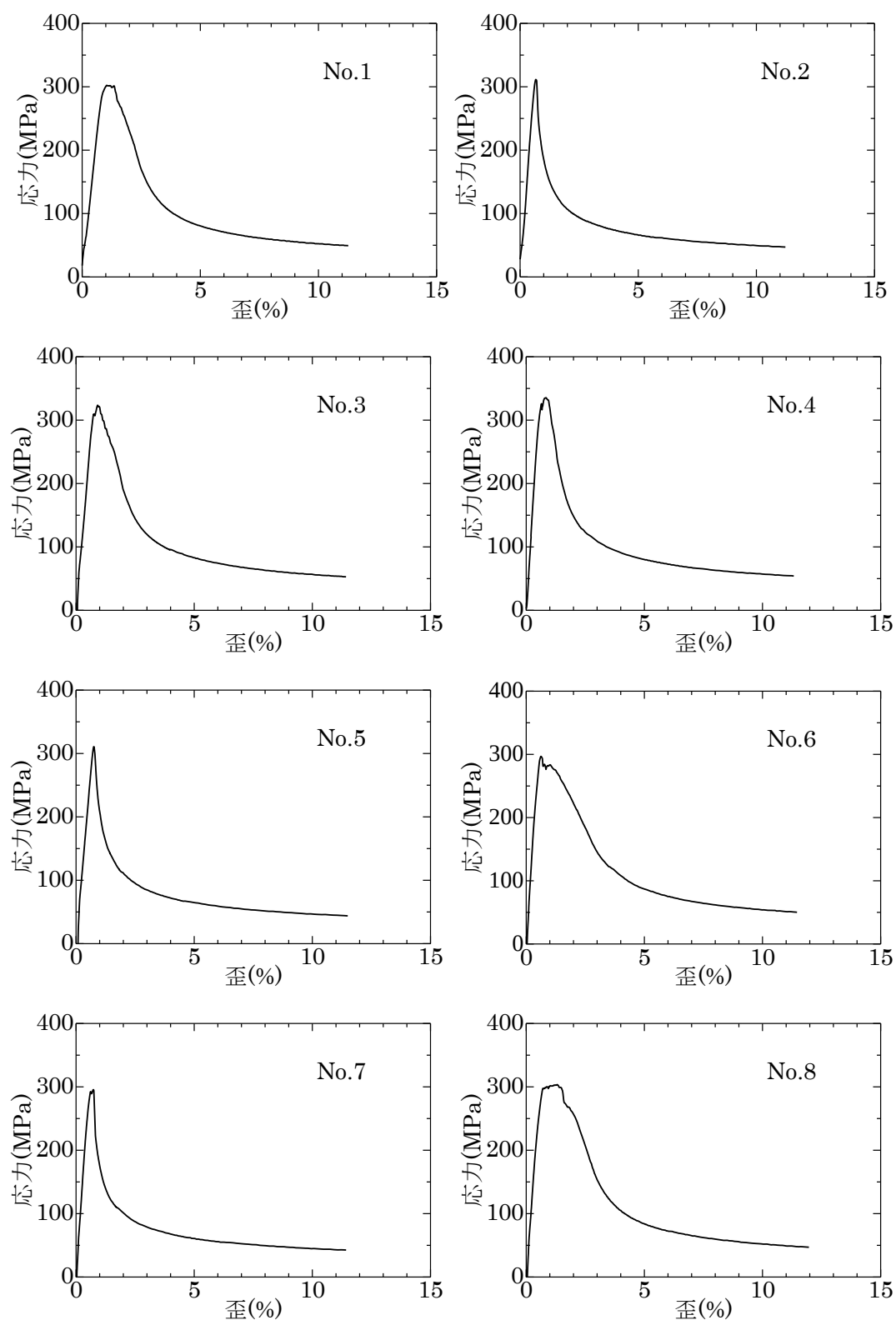


図 6.7 暴露腐食鉄筋試験体の圧縮応力－歪関係

6.3.3 断面減少率－座屈荷重比関係

暴露腐食鉄筋試験体の断面減少率－座屈荷重比関係を図 6.8 に示す。図中には第 5 章より得られた切削鉄筋試験体の断面減少率－座屈荷重比関係の結果も示している。データ数は少ないものの、ノギス計測値による断面積をもとに求めた断面減少率－座屈荷重比関係の値は、切削鉄筋試験体の座屈荷重と比較して、同様な値が得られている。

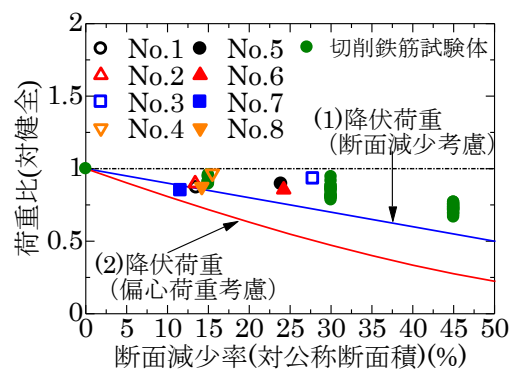


図 6.8 暴露腐食鉄筋試験体の断面減少率－座屈荷重比関係

6.4 モデルと試験結果の比較

第 5 章により提案したモデルと圧縮応力－歪関係の試験結果との比較を図 6.9 に示す。圧縮応力は座屈強度 σ_b で基準化している。式(3-2)の断面減少率 α は、6.2.2 項よりノギス計測値による断面積を公称断面積で除した値とした。なお、本試験体は全体的に腐食が進行していることから、軟化勾配の差異を表現する係数 β の値は試験長 L を用いた式(2-2)で評価することとした。提案したモデルは最大圧縮応力以降の圧縮応力－歪関係の試験結果を概ね表現できている。

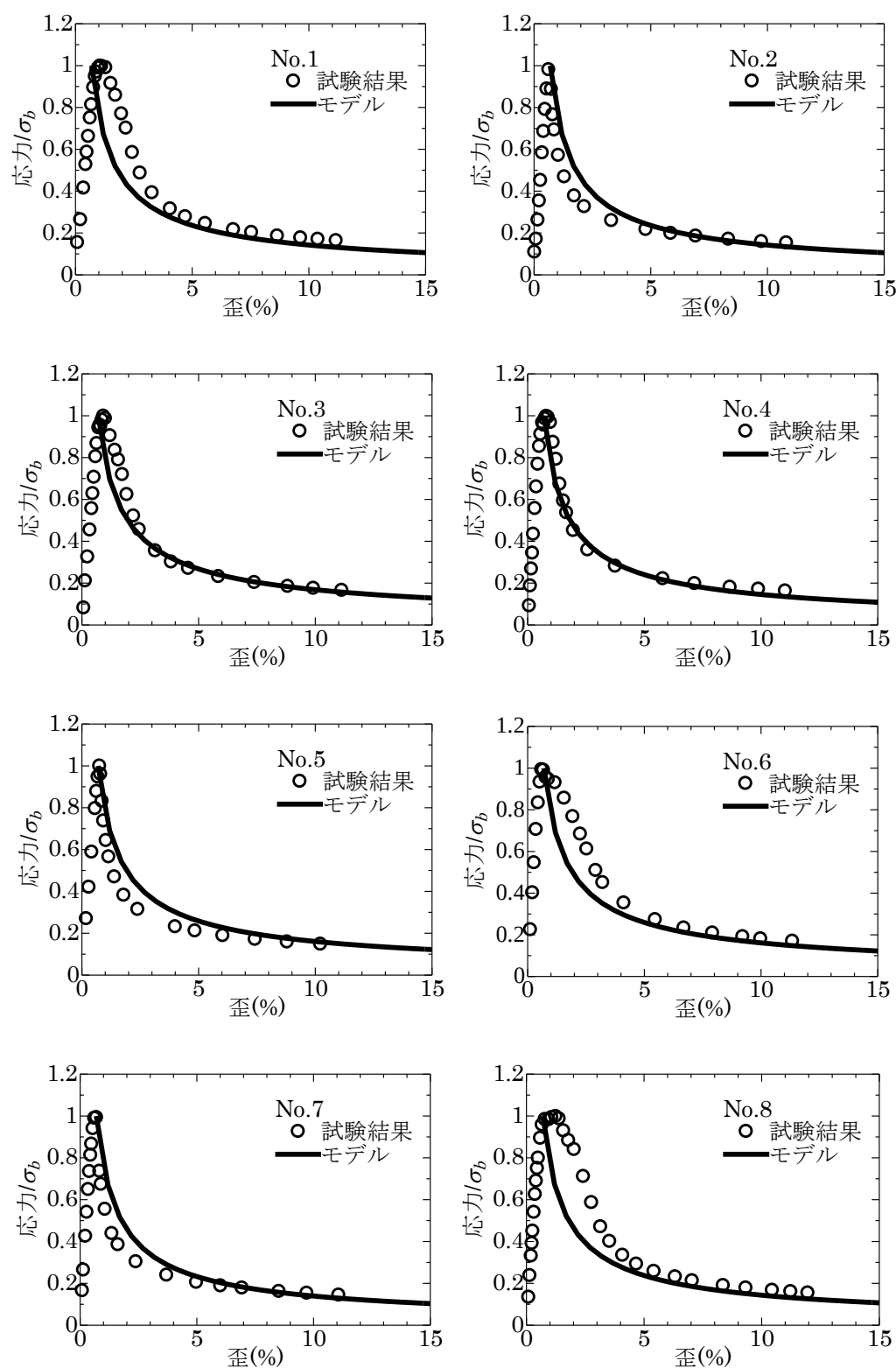


図 6.9 暴露腐食鉄筋試験体のモデルと試験結果の比較

6.5 まとめ

本章では、暴露腐食鉄筋試験体を用いて座屈試験を行い、座屈荷重および圧縮応力-歪関係の検討を行うとともに、第 5 章で提案した最大圧縮応力以降の圧縮応力-歪関係のモデルの適用性について検討した。

- (1) 本試験で用いた暴露腐食鉄筋試験体でも、腐食による座屈強度の低下がみられた。座屈強度は、断面減少を考慮した評価値に対して、切削鉄筋試験体と同様であった。
- (2) ノギスを用い、楕円補正して得た最小断面積により、本研究で提案しているモデルは、圧縮応力-歪関係の試験結果を概ね表現できている。

第7章 結論

座屈する腐食鉄筋の圧縮応力－歪関係について、第 2 章では、健全鉄筋試験体を用いた座屈試験より圧縮応力－歪関係の検討を行うとともに、試験結果をもとに最大応力以降の圧縮応力－歪関係のモデルの提案を行った。第 3 章では、鉄筋の腐食形状を模擬した切削鉄筋試験体を用いた座屈試験を行い、第 2 章で提案したモデルをもとに最大応力以降の圧縮応力－歪関係のモデルの提案を行った。第 4 章では、電食鉄筋試験体を用いた座屈試験を行い、第 3 章で提案したモデルの適用性の検討を行った。第 5 章では、実構造物内での鉄筋の座屈性状に着目し、コアコンクリートの拘束を模擬した座屈試験を行った。座屈荷重および圧縮応力－歪関係の検討を行うとともに、第 3 章で提案した圧縮応力－歪関係のモデルの適合性の検討を行った。第 6 章では、暴露腐食鉄筋試験体を用いた座屈試験を行い、第 5 章で提案したモデルの適合性の検討を行った。

以上から得られた結果を以下に示す。

- (1) 健全鉄筋試験体において、試験長が小さくなるにつれ、圧縮応力－歪関係の軟化曲線は緩やかになる傾向がみられた。最大圧縮応力以降の圧縮応力－歪関係を試験長および鉄筋径を用いてモデル化し、モデルが概ね試験結果を表現できていることを示した。
- (2) 断面減少率の増加に伴い、圧縮応力－歪関係の軟化曲線は緩やかになる傾向がみられ、座屈荷重の低下がみられた。最小断面積の値を用い、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座屈荷重は安全側に評価することを示した。
- (3) 切削鉄筋試験体の最大圧縮応力以降の圧縮応力－歪関係を、最小断面積による断面減少率を用いてモデル化し、モデルが電食鉄筋試験体の試験結果も含め概ね表現できていることを確認した。
- (4) コアコンクリートの拘束を模擬した座屈試験より、断面減少率の増加に伴い、座屈荷重の低下はみられるものの、拘束がない場合よりも拘束がある場合の方が座屈荷重は大きくなった。
- (5) 軸方向断面積の断面減少率の増加に加え、腐食断面による座屈長さの減少に伴い、圧縮応力－歪関係の軟化曲線は緩やかになる傾向がみられた。
- (6) コアコンクリートの拘束を考慮した切削鉄筋試験体および暴露腐食鉄筋試験体の最大圧縮応力以降の圧縮応力－歪関係を、断面減少率および腐食断面による座屈長さを用いてモデル化し、モデルが概ね試験結果を表現できていることを確認した。

謝辞

本論文を作成するにあたり、多くの方々に御指導と御協力を頂きました。筑波大学准教授 金久保利之先生には、研究テーマ、試験の実施、論文を校了するに至るまで終始懇切丁寧な御指導、御鞭撻を賜りました。心より感謝いたします。

副指導教員であります筑波大学助教 八十島章先生には試験方法、結果に対する評価方法など本論文を作成する上で、御指導頂きました。厚く感謝いたします。副指導教員であります筑波大学准教授 庄司学先生には研究に対する有益な助言を頂きました。深く感謝いたします。

筑波大学技術専門職員官 小島篤志氏には試験体の作成方法、ジグの設計、試験の補助など多大なる便宜を図って頂きました。心より感謝いたします。財団法人鉄道総合技術研究所 大屋戸理明氏には試験結果に対する有益な助言を頂き、終始お力添えを頂きました。心より感謝いたします。

本研究室に関する一連の試験は、筑波大学金久保研究室、八十島研究室の学生の協力のもと行われました。厚く感謝いたします。同期であります宮口大氏、村井凌氏、佐野直哉氏には多くの時間を共有し、支えて頂きました。研究室の先輩である余剣華氏、牟雨氏、万子銘氏には研究のみならず学生生活において御助力を頂きました。後輩であります、藻川哲平氏、山田大氏、渡邊啓介氏、錢暁鑫氏、安藤麻衣氏、大岡友梨子氏、掛川萌子氏、佐野達彦氏、橋本裕子氏、橋本京介氏には共に過ごす事ができ、とても有意義な研究室生活でした。皆様に、心より感謝申し上げます。

最後に、支えてくださった家族に改めて深く感謝すると共に、今後の自身の成長を見守っていただきたく存じます。

参考文献

- 1)大屋戸理明, 金久保利之, 山本泰彦, 飯島亨: 実構造物の調査結果に基づく腐食鉄筋の力学性状の評価, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.1, pp.143-155, 2007.3
- 2)日本コンクリート工学会: 既存コンクリート構造物の性能評価指針 2014, 2014.11
- 3)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, 公益社団法人日本コンクリート工学会, 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
- 4)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
- 5)中村光, 二羽淳一郎, 田辺忠顕: 鉄筋の座屈が RC 構造物のポストピーク挙動に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp.337-342, 1992
- 6)齋藤祐哉, 大屋戸理明, 金久保利之, 山本泰彦: 鉄筋の腐食を考慮した RC 柱の中心圧縮性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.3, pp.55-60, 2007.7
- 7)大屋戸理明, 金久保利之, 山本泰彦, 佐藤 勉: 鉄筋の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