

論文 切削模擬した腐食鉄筋の座屈挙動と RC の中心圧縮性状

金久保 利之^{*1}・八十島 章^{*2}・大屋戸 理明^{*3}

要旨: 鉄筋腐食した RC 部材の圧縮性能を把握することを目的とし、腐食鉄筋の影響のみを検討するために、切削により腐食の断面減少を模擬した切削模擬鉄筋を用いて、鉄筋単体の圧縮座屈実験および RC 部材の中心圧縮実験を行った。実験の結果、弾性座屈範囲内で切削位置において降伏が先行しなければ、座屈モードに変化は生じず軟化勾配にも大きな差は見られないこと、切削部を除いた残存断面での断面二次モーメントおよび降伏荷重を用いて、切削鉄筋の座屈荷重を評価できること、RC 部材の中心圧縮時の最大荷重は切削率が大きくなると減少するが、軟化勾配に関しては明瞭な傾向は見られなかったこと等の知見が得られた。

キーワード: 鉄筋腐食, 切削, 細長比, 座屈荷重, 軟化勾配, 帯筋ピッチ, 座屈長

1. はじめに

電食や屋外暴露などで鉄筋を腐食させた鉄筋コンクリート（以下 RC）部材の載荷実験より、鉄筋の腐食が曲げ耐荷性能に及ぼす影響が検討されている。それらでは腐食が鉄筋の引張性能の低下を引き起こすという観点から部材の耐荷性能が検討されており、腐食による部材の圧縮側の圧縮性能の変化の観点から検討が行われた例は少ないのが現状である。著者らは、電食により圧縮鉄筋のみを腐食させた梁部材の曲げ載荷実験を行っている¹⁾。電食（圧縮鉄筋の質量減少率は 11.8~20.9%）により、腐食による鉄筋に沿ったひび割れが圧縮側コンクリートに発生し、最大荷重以降にかぶりの剥落および圧縮鉄筋の座屈を伴いながら、顕著な耐力低下を起こした。また、鉄筋の座屈は、図-1 に示すように、鉄筋の断面積の最小部分で折れ曲がるようなモードを示した。このように、腐食 RC 部材の変形性能を把握するためには、圧縮側のコンクリートや鉄筋の圧縮性状の評価も重要である。

本研究では、特に腐食した鉄筋の圧縮および座屈性状に着目し、切削により腐食の断面減少を模擬した切削模擬鉄筋を用いて、鉄筋単体の圧縮座屈実験および RC 部材の中心圧縮実験を行った。腐食ひび割れが生じたコンクリート部分の圧縮性状の把握も重要であるが、本稿では、切削模擬した鉄筋の圧縮性状のみに着目している。コンクリート自体の圧縮性能の劣化およびかぶりコンクリートとの複合的な破壊性状に関する検討は、別稿にて報告したいと考えている。



図-1 電食した圧縮鉄筋の座屈の様子¹⁾

2. 切削模擬鉄筋の座屈挙動

2.1 健全鉄筋の座屈実験

異形鉄筋の座屈挙動に着目した既往の研究や報告はあまり多くなく、特に、座屈実験を行う際の試験片端部の境界条件や変形の計測方法に関する情報は少ない。本研究では、まず健全鉄筋の座屈実験を行い、実験方法の確認および座屈荷重の理論値との比較を行った。

実験に用いた異形鉄筋の引張試験により得られた力学的性質を表-1 に、応力-ひずみ関係を図-2 に示す。用いた異形鉄筋は SD490 の D13 で、後の切削模擬鉄筋の座屈実験および RC 部材の中心圧縮実験でも同一の鉄筋を用いている。SD490 材を用いたことに大きな理由はないが、ロットの管理が明確で強度のばらつきが小さいこと、明確な降伏棚を有することが使用理由に挙げられる。降伏比は 0.800 である。

座屈実験における端部の境界条件は、実験の容易さを考慮し、固定-固定とした。加力および計測の状況を図-3 に示す。試験体端部に剛性の大きな治具を設け、治具を万能試験器のヘッドに固定した。治具には鉄筋の

表-1 引張試験結果

種別	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	破断伸び (%)	弾性係数 (GPa)
D13(SD490)	565	707	18.9	196

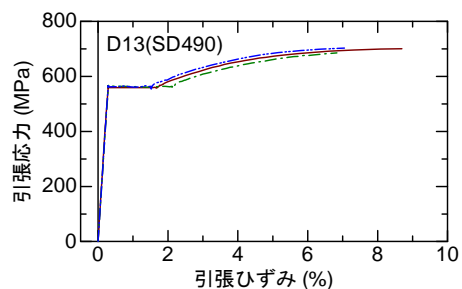


図-2 使用鉄筋の応力-ひずみ関係

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

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

*3 鉄道総合技術研究所 コンクリート構造主任研究員 博士（工学）（正会員）

最外径より若干小さな孔 ($\phi 13.5\text{mm}$) を設け、試験鉄筋端部を研磨し孔に挿入することで、極力、孔内での鉄筋の横方向変形が生じないように配慮した。変形は、治具間の変位量を、120 度ずつ設置した 3 つの変位計により計測した。

実験因子は試験長（座屈長）とし、公称径 ($d=13\text{mm}$) に対して 6~40 倍の 8 レベルに設定し、各試験長で 3 体の加力を行った。

各試験長の試験体の代表的な圧縮応力-ひずみ関係を図-4 に示す。圧縮応力は、計測された荷重を公称断面積 (126.7mm^2) で除すことによって求め、ひずみは、計測された変形から治具孔内 ($104\text{mm}\times 2$ カ所) の鉄筋の弾性変形を差し引き、試験長で除すことにより求めた。試験長が $16d$ 以下の試験体では、最大荷重は鉄筋の降伏により決定した。

加力後の試験体の一例を図-5 に示す。治具孔内において、目視で確認できる鉄筋の変形はなかった。細長比と座屈荷重実験値の関係を図-6 に示す。実線は、弾性

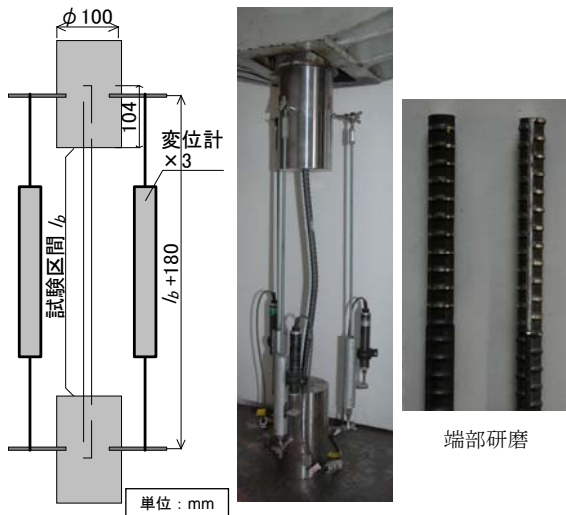


図-3 座屈実験状況

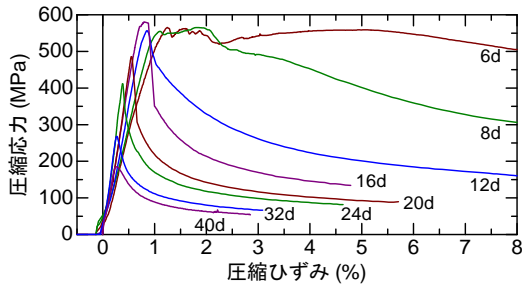


図-4 圧縮応力-ひずみ関係（健全鉄筋）



図-5 加力後の試験体（健全鉄筋 32d）

座屈荷重理論値および鉄筋の降伏強度を示す。座屈応力および細長比を算出するにあたっては、公称断面積を用いた。異形鉄筋の場合、公称断面積は節部分も含めた鉄筋質量から算出されるが、座屈荷重に節部分が寄与するとは考えにくく、実験においても図-5 に示したように、必ず縦節に直交する方向（弱軸方向）に座屈変形が生じた。したがって、断面二次モーメントには、公称断面積を有する真円 (1277mm^4) とした場合と、節のない腹の箇所の最小値の実測値 (11.65mm) を径とする円 (904mm^4) とした場合の 2 通りを計算に用いた。図-6 より、断面二次モーメントを 904mm^4 とした場合の座屈荷重理論値と実験値との整合性はよく、本研究の実験方法により、両端固定の境界条件における異形鉄筋の座屈実験を、良好に行うことが可能であると考えられる。

2.2 切削模擬鉄筋の座屈実験

(1) 実験概要

鉄筋には前節と同一の異形鉄筋 D13 を用い、試験長、腐食による断面減少を模擬した切削の位置および断面減少量を実験因子とした。切削の状況を図-7 に示す。断面減少量は、公称断面積に対する減少率で 15%、30% および 45% に設定した。

切削模擬鉄筋を図-8 に示す。断面切削量は断面図に示すように、腹部の最小径に対する切削深さによって決定した。切削の領域は、著者らの電食により圧縮側鉄筋のみを腐食させた梁部材の曲げ載荷実験¹⁾の腐食鉄筋（図-1）の 3D スキャナによる断面積分布の計測結果を参考にして、鉄筋軸方向に 26mm ($2d$) の領域とした。

実部材における腐食した圧縮鉄筋の座屈長には、横補強鉄筋間隔、鉄筋腐食域、コンクリートの損傷領域等、様々な因子が影響すると考えられる。本実験での試験長

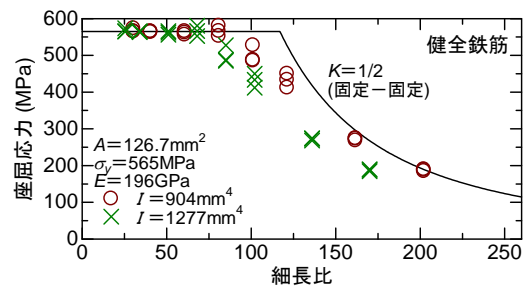


図-6 座屈荷重-細長比関係（健全鉄筋）

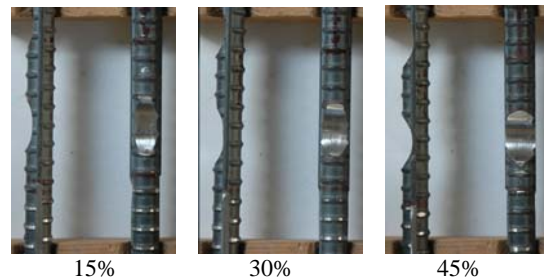


図-7 切削状況（座屈実験）

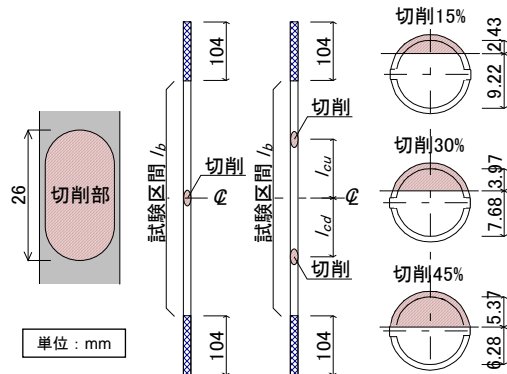


図-8 切削模擬鉄筋（座屈実験）

は、健全鉄筋の座屈実験において弾性座屈を生じた 32d (d は公称径) および降伏が生じた 16d, 8d の 3 水準とした。切削位置は試験区間の中心位置（呼称 C）または試験区間を 4 等分した上下位置（呼称 U および D）である。これらの切削位置の設定は重要な検討因子となり得るが、本実験では、座屈挙動に大きく影響すると考えられる位置とした。試験体の一覧および実験結果を表-2 に示す。試験体数は、全 36 体である。

実験方法、計測方法は、前節の健全鉄筋に対する座屈実験と同様である。

(2) 実験結果

実験により得られた座屈荷重（公称断面積 126.7mm^2 で除した座屈応力）は表-2 に示した。加力後の試験体の状況を図-9 に示す。切削位置を中心位置としたシリーズでは、切削率に依らず、最終的な座屈波形は中心位置で折れ曲がるモードとなった。一方、切削位置を上下位置としたシリーズでは、32d-U15/D0, 32d-U30/D0 および 32d-U15/D15 において切削位置とは関係なく、中心位置で折れ曲がるモードとなった。このことから、弾性座屈荷重範囲内で切削位置において降伏が先行して生じなければ、鉄筋単体の座屈モードに変化は生じないことが予想される。その他の試験体では、切削率の大きい位置で折れ曲がるモードとなっている。

切削位置を中心位置とした各試験体の圧縮応力-ひずみ関係を図-10 に、上下位置とした各試験体を図-11 に示す。圧縮応力は、計測された荷重を公称断面積 (126.7mm^2) で除すことによって求め、ひずみは、計測された変形から治具孔内 ($104\text{mm} \times 2$ カ所) の鉄筋の弾性変形を差し引き、試験長で除すことにより求めた。図中の破線は、図-4 に示した健全鉄筋の圧縮応力-ひずみ関係を示している。同図より、切削率の増加にしたがって座屈荷重が低下していることが確認できる。最大応力以降の軟化勾配は、試験長 32d および 16d の試験体で

表-2 切削模擬鉄筋の座屈実験試験体一覧

名称	試験長 (mm)	切削位置	切削率		座屈応力 (MPa)	名称	試験長 (mm)	切削位置	切削率		座屈応力 (MPa)
			上部	下部					上部	下部	
32d-C15 32d-C30 32d-C45	416	中心	15%		251	16d-U15/D0 16d-U30/D0 16d-U45/D0	上下	15%	切削なし	436	
			30%		167			30%	349		
			45%		130			45%	296		
16d-C15 16d-C30 16d-C45	208	中心	15%		379	16d-U15/D15 16d-U30/D15 16d-U45/D15	上下	15%	15%	431	
			30%		298			30%	355		
			45%		213			45%	264		
8d-C15 8d-C30 8d-C45	104	中心	15%		479	16d-U30/D30 16d-U45/D30 16d-U45/D45	上下	30%	30%	316	
			30%		376			45%	281		
			45%		317			45%	293		
32d-U15/D0 32d-U30/D0 32d-U45/D0	416	上下	15%	切削なし	294	8d-U15/D0 8d-U30/D0 8d-U45/D0	上下	15%	切削なし	504	
			30%		280			30%	428		
			45%		182			45%	344		
32d-U15/D15 32d-U30/D15 32d-U45/D15	416	上下	15%	15%	275	8d-U15/D15 8d-U30/D15 8d-U45/D15	上下	15%	15%	466	
			30%		248			30%	415		
			45%		180			45%	312		
32d-U30/D30 32d-U45/D30 32d-U45/D45	416	上下	30%	30%	265	8d-U30/D30 8d-U45/D30 8d-U45/D45	上下	30%	30%	405	
			45%	30%	173			45%	355		
			45%	45%	178			45%	336		

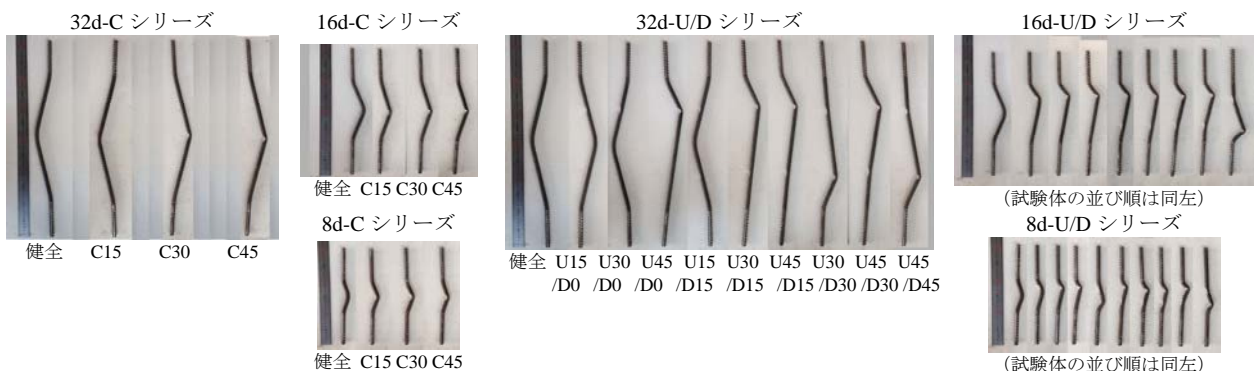


図-9 加力後の試験体（切削模擬鉄筋）

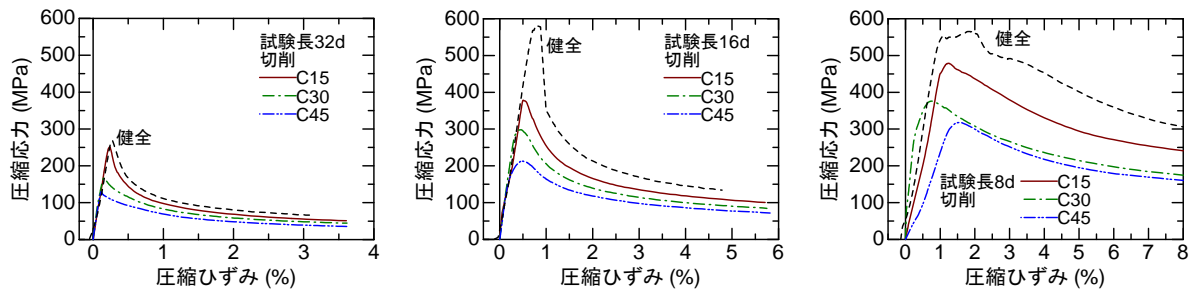


図-10 切削模擬鉄筋の圧縮応力-ひずみ関係（中心位置切削）

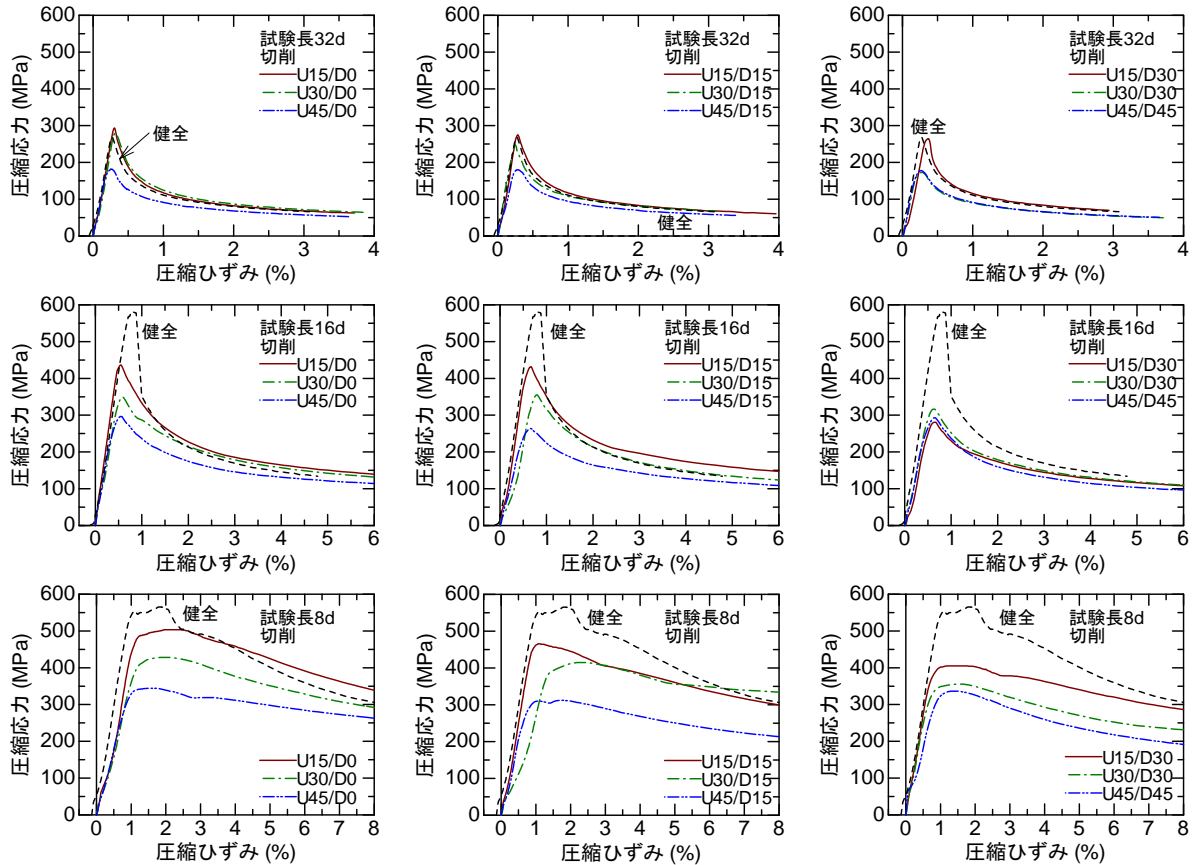


図-11 切削模擬鉄筋の圧縮応力-ひずみ関係（上下位置切削）

は健全鉄筋と比較して、あまり大きな違いは見られない。試験長 8d の試験体では、中心位置切削の試験体では健全鉄筋と同様な軟化勾配を示しているが、上下位置切削試験体では軟化勾配は健全鉄筋より緩やかになっている。

切削模擬鉄筋の細長比と座屈荷重実験値の関係を図-12 に示す。上図は健全鉄筋と同値の断面二次モーメントを、下図は切削部を除いた断面での断面二次モーメントを用いた細長比との関係を示しており、上下位置切削試験体では、より大きい切削箇所としてのプロットした。曲線は弾性座屈荷重理論値を、4本の直線は断面積残存率(1-切削率)を考慮した降伏強度を示している。

試験長 8d の試験体では、切削位置にかかわらず、健全鉄筋の降伏強度に断面積残存率を乗じた応力で座屈荷重をおおむね評価できている。試験長 32d の試験体では、切削部を除いた断面の断面二次モーメントを用いた細長比の弾性座屈荷重理論値により、座屈荷重を安全側に評

価している。試験長 16d の試験体では座屈荷重を危険側に評価しているが、通常の鋼材の座屈荷重においても降

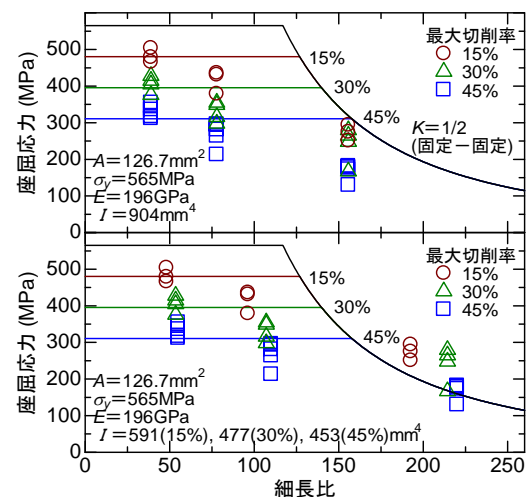


図-12 座屈荷重-細長比関係（切削鉄筋）

伏荷重と弾性座屈荷重の遷移領域の評価は実験式に依っており、例えば両領域を放物線で補間する Johnson の式などの適用の可能性が伺える。

3. 切削模擬鉄筋を用いた RC の中心圧縮実験

3.1 実験概要

試験体の断面は、著者らの電食により圧縮側鉄筋のみを腐食させた梁部材の曲げ載荷実験¹⁾の試験体と同一断面とし、かぶり部分のコンクリートの影響を除くためにコア断面のみとした。これらの試験体形状の設定は、梁部材の載荷実験の結果を受け、より明瞭に鉄筋の座屈性状を観察しようと意図したものである。試験体配筋図を図-13に示す。主鉄筋には前章と同一の異形鉄筋 D13 を4本用い、試験区間は $32d$ (d は鉄筋公称径) の 416mm とした。試験体両端部 150mm の区間は D6 帯鉄筋を 30mm ピッチで配した。

実験因子は主鉄筋の切削率、切削位置および帯鉄筋の配筋ピッチである。切削率は前章と同様に 15%、30%、45% の3水準とした。切削位置は、前章の座屈実験の結

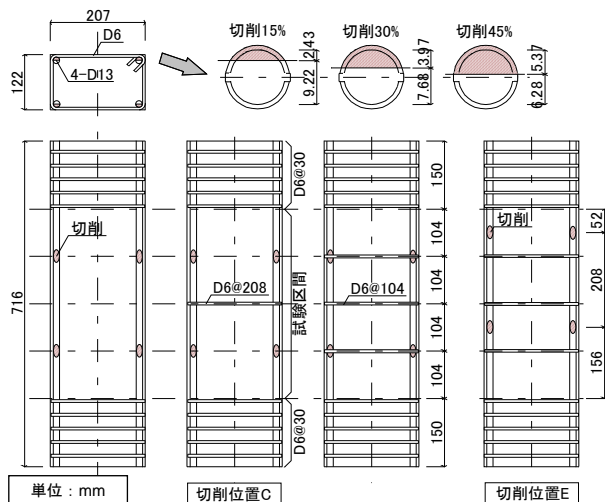


図-13 中心圧縮実験試験体

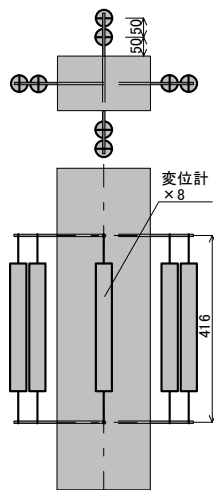


図-14 変位計設置

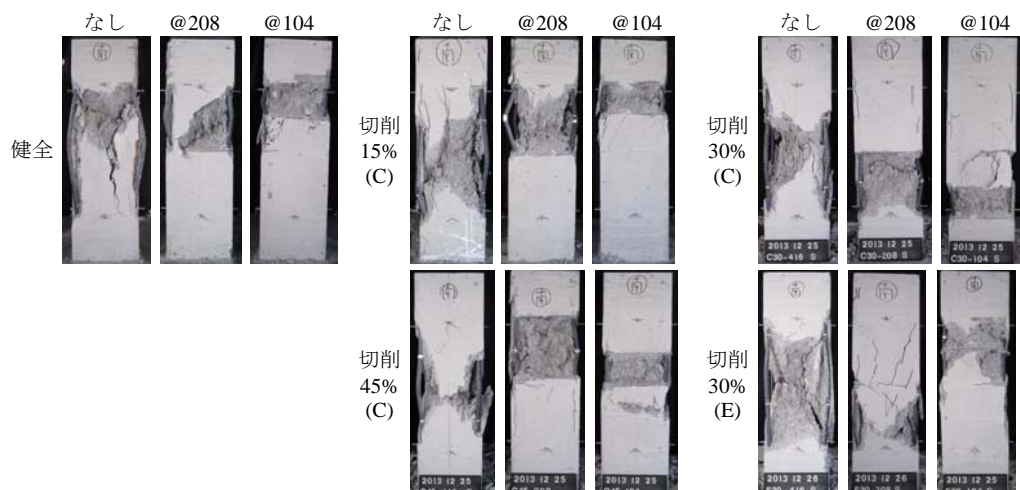


図-15 最終破壊状況 (中心圧縮実験)

果との対応を明確にするため、主鉄筋の4等分区間の上下位置に設けた「切削位置 C」、およびその位置から上方向に 52mm ($4d$) 移動させた「切削位置 E」(切削率 30%のみ)とした。切削の向きは断面側面外側方向となるように設置した。なお、実部材における腐食した圧縮鉄筋の座屈性状には、鉄筋腐食域および腐食量、コンクリートの損傷領域等、様々な因子が影響すると考えられる。帯鉄筋は、試験区間に配しないもの、208mm、104mm ピッチの3種である。これらの因子の組合せ、および健全鉄筋試験体の計 15 体の実験を行った。

使用したコンクリートの目標圧縮強度は、先の梁試験体と同様の 15MPa としたが、加力時材令におけるテストピースの圧縮試験結果は 13.1MPa であった。計測項目は、荷重値および試験区間の軸変形量である。変位計の設置位置を図-14に示す。軸変形が増大するにつれて変位計固定用ボルトが変形するために、各側面に2つずつの変位計を設け、ボルトの傾きを修正した軸変形を算出した。

3.2 実験結果

加力後の各試験体の最終破壊状況を図-15に示す。いずれの試験体においても、コンクリートの圧縮破壊の進行にともなって主鉄筋の座屈が見られた。特に帯鉄筋のない試験体では、主鉄筋の座屈とともに急激に荷重が低下した。主鉄筋の座屈は、おおむね帯鉄筋位置を節、中間位置を腹とする変形モードで生じ、その区間のコンクリートは損傷して剥落している。切削率 30% や 45% で帯鉄筋ピッチが 104mm の試験体では、主鉄筋の切削箇所を外側に向けたために、断面内側に変形するモードで座屈した主鉄筋も見られた。

各試験体の圧縮荷重-圧縮ひずみ関係を図-16に示す。圧縮ひずみは、試験区間の変形を試験区間長で除した平均ひずみである。帯鉄筋の有無および配筋ピッチによって荷重-ひずみ関係の軟化領域が明確に変化しており、帯鉄筋によるコンクリートの拘束効果および主鉄筋

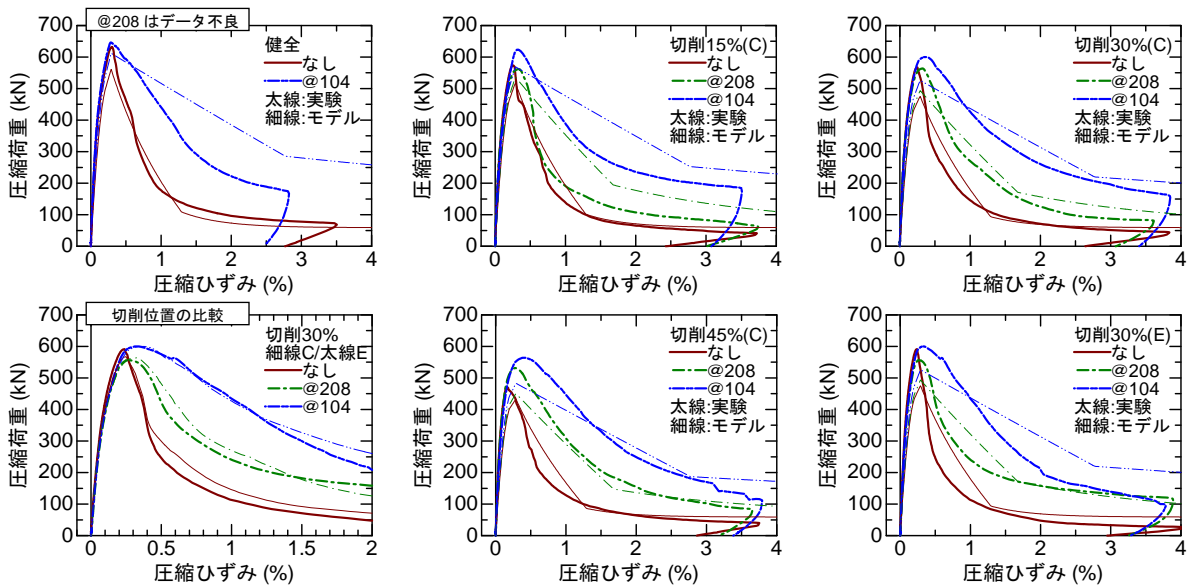


図-16 圧縮荷重-圧縮ひずみ関係

の座屈長の変化の両者の影響によるものと考えられる。切削率の差異の影響を見ると、最大荷重は切削率が大きくなると減少する傾向があるが、軟化勾配に関しては明瞭な傾向は見られない。切削位置 C と E の試験体の圧縮荷重-圧縮ひずみ関係を比較すると (図-16 左下), 切削位置の違いによる明確な差異はみられない。

実験により得られた圧縮荷重-圧縮ひずみ関係と既往のモデルとの比較を行った。コンクリートのモデルには Kent-Park モデル、圧縮鉄筋の座屈挙動には中村らのモデル²⁾を用い、平面保持の仮定に基づき、コンクリート負担分の荷重と鉄筋の荷重を足し合わせた。中村らのモデルを適用するにあたっては、座屈開始点のひずみは一律に健全鉄筋の降伏ひずみとし、鉄筋長さは帯鉄筋のピッチ (帯鉄筋なしの場合は 416mm) とした。切削率は、鉄筋断面積を減らすことによって表現した。荷重-ひずみ関係モデルを、実験結果と比較して図-16 に示した。帯鉄筋なしおよびピッチ 208mm の試験体では、切削率に依らず、実験結果とモデルには比較的良い適合性が見られる。ピッチ 104mm の試験体では、実験結果とモデルの乖離が見られる試験体がある。実験結果は試験区間長で除した平均ひずみであるが、中村らのモデルは座屈区間長さでのひずみであり、ピッチ 104mm の試験体では座屈はおおむね帯筋ピッチ内で生じるため、見かけ上、実験結果のひずみが小さく算定されると考えられる。

4. まとめ

(1) 腐食鉄筋を模擬した切削鉄筋の座屈実験では、弾性座屈荷重範囲内で切削位置での降伏が先行しなければ、座屈モードに変化は生じないと予想される。

- (2) 最大応力以降の軟化勾配は、試験長 32d および 16d の試験体では健全鉄筋と比較して、あまり大きな違いは見られなかった。
- (3) 切削部を除いた残存断面での断面二次モーメントおよび降伏荷重を用いて、切削鉄筋の座屈荷重を評価できると考えられる。
- (4) 切削鉄筋を用いた RC 部材の中心圧縮実験では、主鉄筋の切削率が大きくなると最大荷重は減少する傾向があるが、軟化勾配に関しては明瞭な傾向は見られなかった。
- (5) 既往のコンクリートと座屈鉄筋のモデルを用いた圧縮荷重-ひずみ関係は、おおむね良好に実験結果を表現できた。

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。実験にあたっては、筑波大学大学院生鈴木健二氏、卒研究生武田惇志氏の協力を得た。

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・耐久性性能評価の体系化シンポジウム論文集, pp.259-264, 2013.11
- 2) 中村光, 二羽淳一郎, 田辺忠顕: 鉄筋の座屈が RC 構造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