

論文 鉄筋腐食によるひび割れを模擬した RC 柱の中心圧縮性状

藻川 哲平*1・八十島 章*2・金久保 利之*3・大屋戸 理明*4

要旨：鉄筋腐食によるかぶりコンクリートのひび割れが RC 部材の圧縮性状に及ぼす影響を把握することを目的とし、スリットによりひび割れを模擬した RC 柱部材の中心圧縮試験を行った。その結果、スリットおよびコンクリートの破壊の局所化が応力-歪曲線の最大応力以降の挙動に影響を及ぼしていることを確認した。実験結果を基に、コンクリートのひび割れおよび破壊の局所化を考慮した Popovics モデルを用いて、応力-歪曲線のモデル化を行った。

キーワード：鉄筋腐食、ひび割れ、中心圧縮、破壊の局所化、座屈、Popovics モデル

1. はじめに

近年、建設から年数が経過した鉄筋コンクリート（以下 RC と記す）造構造物が増加してきており、塩害や中性化など環境要因や経年劣化に伴う性能低下が問題化してきている。性能低下の原因の一つには、鉄筋の腐食が挙げられている。

鉄筋の腐食は鉄筋単体の力学性能を低下させることに加え、鉄筋表面に生成される腐食生成物の発生によって体積膨張が起こり、コンクリートにひび割れが発生することで構造物の耐荷性能が低下する。既往の研究¹⁾では、圧縮側鉄筋を電食によって腐食させた RC 梁部材の曲げ試験が行われ、腐食によって発生した圧縮側コンクリートのひび割れおよび圧縮側鉄筋の座屈が、RC 梁部材の力学挙動に影響を及ぼすという結果が示されている。

本研究では、鉄筋の腐食による体積膨張に伴って発生したかぶりコンクリートのひび割れに着目し、切削による鉄筋腐食およびスリットによるひび割れを模擬した RC 柱部材の圧縮試験を行い、コンクリートのひび割れが圧縮性状へ及ぼす影響を把握することを目的とする。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体形状および鉄筋切削概要を図-1、試験体一覧を表-1に示す。試験体は全25体で、断面150mm×235mm、試験体両端部には帯鉄筋（D6@50）を配し、試験体中央部を試験区間とした。主鉄筋にはD10異形鉄筋を4本使用している。コンクリートのひび割れは、コンクリート打設前に厚さ0.5mmのポリプロピレンシートを主鉄筋表面に接着し、試験体表面までスリットを入れることにより模擬した。変動因子はスリットの方および位置、鉄筋腐食による断面欠損を模した主鉄筋の切削の有無および試験区間長である。スリットの方

交わる試験体断面の辺（長辺または両辺）で表している。コンクリートのひび割れを模したスリット配置図の一例を図-2に示す。スリット長さ（腐食ひび割れ長さ）の和を試験区間長で除した値（以下、腐食ひび割れ長さ比）を、各試験区間長で変動させた。鉄筋には既往の研究²⁾を参考に、鉄筋腹部の最小径位置における深さによって切削することで、腐食による局所的な断面欠損を模擬した。公称断面積と等価な断面積を有する楕円に対して切削率30%となるように深さを決定した。切削を行う試験体は既往の研究²⁾では、試験区間長が長い場合には切削の影響が明確に現れなかったため、試験区間長150mmの試験体のみとした。切削位置はスリットの位置に応じて、試験体中央と中央から上下37.5mmの位置に行う2種類とした。

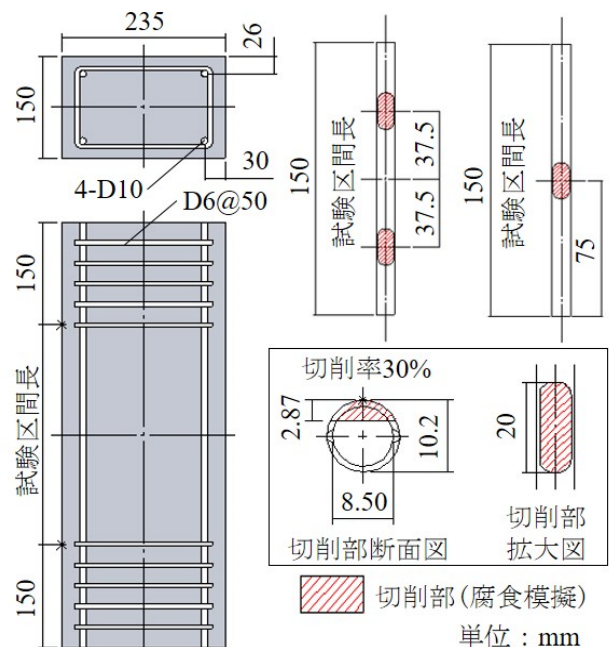


図-1 試験体形状および鉄筋切削概要

*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）

*3 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）

*4 鉄道総合技術研究所 企画室 主査 博士（工学）（正会員）

表-1 試験体一覧

試験体名*1	試験区間長 L (mm)	鉄筋切削率(%)	スリット方向	L_{cr}/L
SN-N0.00	150	-	-	0.00
SN-L0.33			長辺	0.33
SN-L0.67				0.67
SN-L1.00				1.00
SN-B1.00			両辺	1.00
SN-B1.33				1.33
SN-B1.67				1.67
SN-B2.00				2.00
SR-N0.00		30	-	0.00
SR-L0.33			長辺	0.33
SR-L0.67				0.67
SR-L1.00				1.00
SR-B1.00			両辺	1.00
SR-B1.33				1.33
SR-B1.67				1.67
SR-B2.00				2.00
MN-N0.00	235	-	-	0.00
MN-L1.00			長辺	1.00
MN-B2.00			両辺	2.00
LN-N0.00	400	-	-	0.00
LN-L0.50			長辺	0.50
LN-L1.00				1.00
LN-B1.00			両辺	1.00
LN-B1.50				1.50
LN-B2.00				2.00

*1：記号は、試験区間長(S,M,L)、鉄筋切削の有無(N,R)、スリット方向(N,L,B)、腐食ひび割れ長さ比 L_{cr}/L の順

2.2 使用材料

(1) 鉄筋

主鉄筋に用いた異形鉄筋 D10 の引張試験の結果を表-2 に示す。鉄筋の引張試験を 3 本行い、その平均値を示している。

(2) コンクリート

コンクリートには、目標強度を 13.5MPa とした最大骨材寸法 20mm の普通コンクリートを用いた。加力時材齢におけるコンクリートの材料試験結果を表-3 に示す。圧縮試験 3 体、割裂引張試験 3 体の試験を行い、その平均値を示している。

2.3 加力および計測方法

加力には 2MN 万能試験機を用いて一方向単調圧縮荷重を行った。計測項目は軸圧縮力および試験体表面における軸方向変形量である。加力および計測方法を図-3 に示す。変位計は全ての面に 2 本ずつ等間隔に設置した。

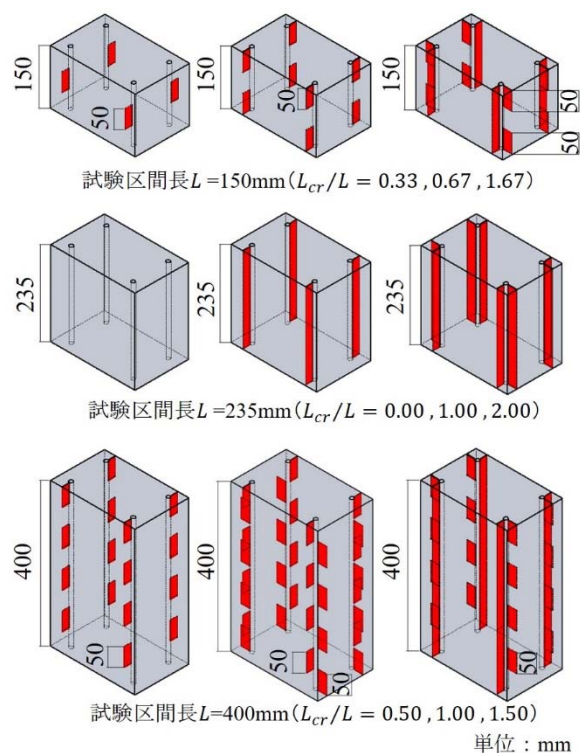


図-2 スリット配置図の一例

表-2 鉄筋引張試験結果

種別	引張強度 (MPa)	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
異形鉄筋 D10	468	346	192

表-3 コンクリート材料試験結果

目標強度 (MPa)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	割裂強度 (MPa)
13.5	14.1	17.1	1.44

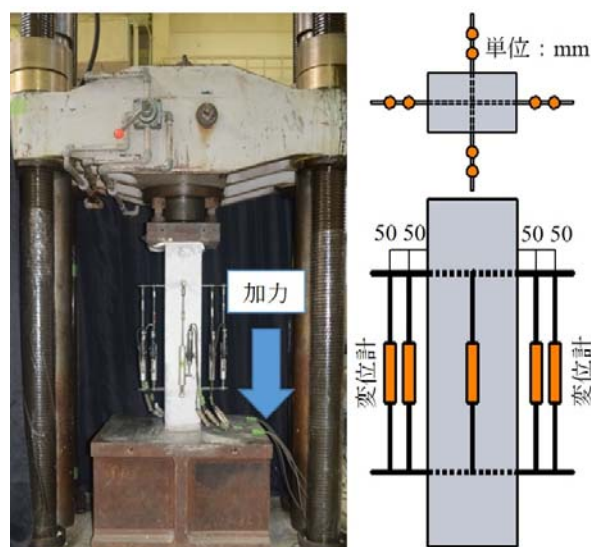


図-3 加力および計測方法

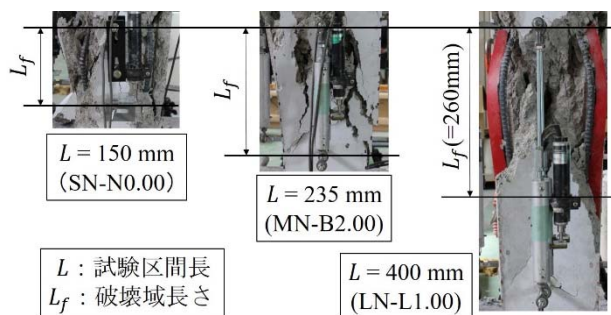


図-4 最終破壊状況

3. 実験結果

3.1 破壊状況

試験体の破壊状況の例を図-4に示す。すべての試験体においてかぶりコンクリートのひび割れ発生後に最大荷重を迎えた。その後、かぶりコンクリートの剥離および剥落と同時に荷重が急激に低下し、最終破壊に至った。試験区間長が150mmおよび235mmの試験体では概ね試験区間全体が破壊する挙動が確認されたが、400mmの試験体では破壊が試験区間全体ではなく一部に局所化する傾向が見られた。また、かぶりコンクリートの剥落位置において、主鉄筋の座屈挙動が見られた。

3.2 応力-歪曲線

実験結果一覧を表-4に示す。応力は荷重を試験体断面積で除した値、歪は試験区間変形量を試験区間長で除した値である。

(1) 鉄筋切削有無の比較

主鉄筋の切削の有無で比較した応力-歪曲線を図-5に示す。最大応力に関しては、差が最も大きい $L_{cr}/L = 0.33$ の試験体において4%未満の応力低下にとどまり、 $L_{cr}/L = 1.67$ の試験体の様に増加した試験体も見られたことから、主鉄筋の切削が試験体の最大応力に及ぼす明瞭な傾向は見られなかった。最大応力時の歪も同様に、約半数の試験体で切削有より無の方が上回っていることから、鉄筋切削による明瞭な傾向が見られなかった。最大応力以降の負勾配は、既往の研究³⁾と同様に、切削有りの試験体の方が切削無しの試験体より勾配が緩やかになる傾向が見られた。最大応力に到達後、ひび割れの進展と同時にかぶりコンクリートの拘束がなくなり、鉄筋単体の座屈挙動と同様の挙動を示したと考えられる。

(2) 試験区間長の比較

スリットが入っていない試験体の応力-歪曲線について、試験区間長ごとによる比較を図-6に示す。試験区間長が増大するにつれて最大応力以降の軟化勾配が大きくなった。図-4に示したように、コンクリートの破壊の局所化が影響していると考えられる。

(3) スリット差異の比較

表-4より、最大応力は試験区間長によって若干の差異

表-4 実験結果一覧

試験体名	試験区間長 L (mm)	最大応力 (MPa)	最大応力時の歪(%)
SN-N0.00	150 (切削無し)	13.5	0.37
SN-L0.33		14.0	0.54
SN-L0.67		13.9	0.39
SN-L1.00		13.4	0.49
SN-B1.00		13.6	0.50
SN-B1.33		14.1	0.51
SN-B1.67		13.7	0.76
SN-B2.00		13.9	0.64
SR-N0.00	150 (切削有り)	13.1	0.54
SR-L0.33		13.5	0.55
SR-L0.67		13.4	0.39
SR-L1.00		13.1	0.56
SR-B1.00		13.4	0.54
SR-B1.33		13.8	0.62
SR-B1.67		13.9	0.52
SR-B2.00		13.9	0.59
MN-N0.00	235	13.2	0.40
MN-L1.00		12.6	0.43
MN-B2.00		12.7	0.47
LN-N0.00	400	12.9	0.33
LN-L0.50		12.6	0.29
LN-L1.00		13.1	0.31
LN-B1.00		12.4	0.31
LN-B1.50		11.2	0.34
LN-B2.00		13.0	0.39

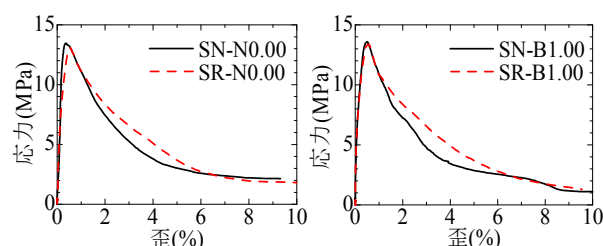


図-5 応力-歪曲線（変動因子：鉄筋切削有無）の例

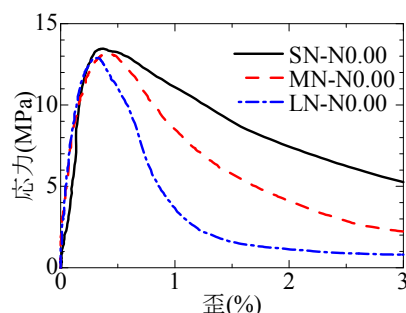


図-6 応力-歪曲線（変動因子：試験区間長）の例

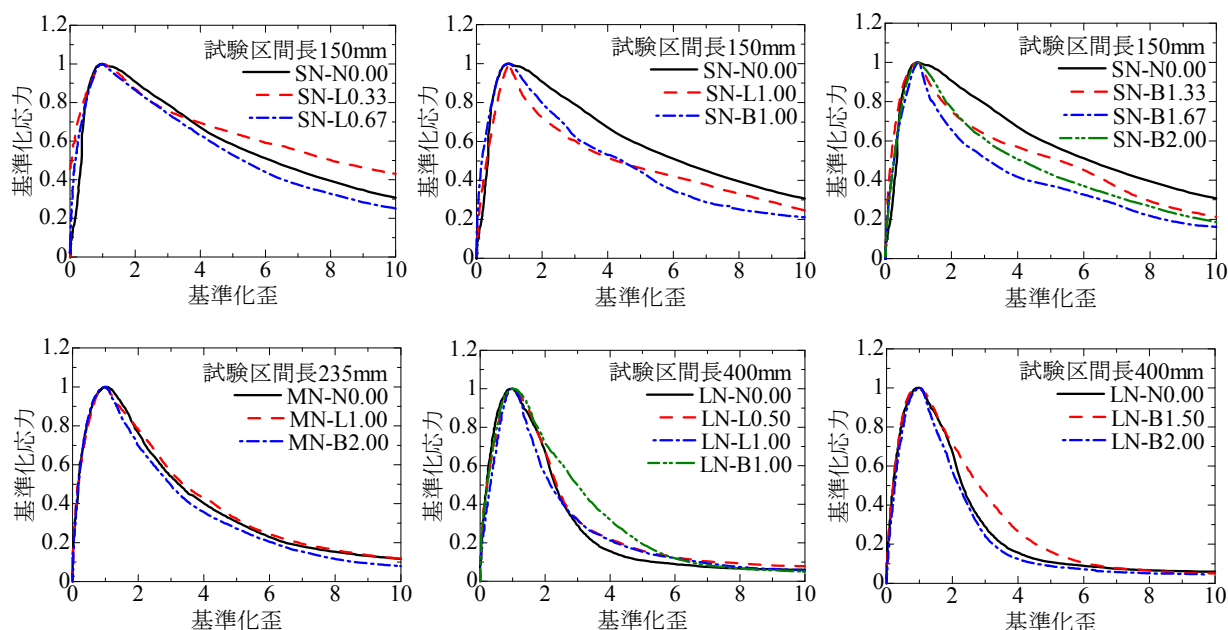


図-7 応力-歪曲線（変動因子：スリット）の例

が見られるが、各試験区間長においてスリットが入っていない試験体 ($L_{cr}/L = 0.00$) とスリットを設置した試験体の応力-歪曲線を比較すると、約7割の試験体が上回っており、スリットの方および位置によって大きな差異は見られなかったことから、スリットが最大応力に及ぼす影響は少ないと考えられる。また、最大応力時の歪はスリットの存在によって増大していることが確認できる。最大応力以降の挙動に着目するために、実験で得た応力-歪曲線を、各試験体の最大応力および最大応力時の歪で基準化した例を図-7に示す。スリットの存在が応力-歪曲線の最大応力以降の挙動に影響を及ぼし、腐食ひび割れ長さ比が増大するにつれて軟化勾配が大きくなる傾向が見られた。

4. 応力-歪曲線のモデル化

座屈を生じる鉄筋とコンクリートの応力-歪曲線を基に、中心圧縮を受けるRC柱部材の応力-歪曲線のモデル化を行う。

4.1 鉄筋のモデル

3.1節の試験体の最終破壊状況で、鉄筋の座屈はかぶりコンクリートが破壊された領域で確認されたことから、コンクリートの破壊域長さを主鉄筋の座屈長であると定義し、モデル化を行う。既往の研究⁴⁾で実験的に算出された破壊域長さに基づき、本実験での破壊域長さと対応が良いことから、表-5のように定義した。

鉄筋の最大応力以降の応力-歪曲線のモデルは既往の研究^{3,5)}で提案されている式(1)~(3)を用いた。試験区間長が400mmの試験体について、座屈長が260mmで弾性座屈する範囲であり、式(2)および式(3)の適用外のため、既

表-5 鉄筋モデルの変数一覧

試験区間長 $L(\text{mm})$	破壊域(座屈) 長さ $L_f(\text{mm})$	σ_s (MPa)	ε_s (%)	β
150	150	346	0.85	0.74
235	200	346	0.59	0.98
400	260	307	0.42	1.40

ここで、 σ_s :最大応力、 ε_s :最大応力時の歪、 β :実験定数

往の研究²⁾と同一の方法でD10の座屈試験を行ってモデル化した。モデル化で用いた各変数の値を表-5に示す。

$$\sigma/\sigma_s = \begin{cases} \text{鉄筋切削なし} \\ (\varepsilon_s/\varepsilon)^\beta \\ \text{鉄筋切削あり} \\ (\varepsilon_s/\varepsilon)^{\beta\sqrt{1-\alpha/100}} \end{cases} \quad (1)$$

$$\beta = 0.049(L/D) \quad (2)$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_y e^{21.7/(L/D)} \quad (3)$$

ここで、 α :鉄筋切削率(%), L :試験区間長(mm),

D :鉄筋径(mm), ε_y :引張試験で得られた降伏歪

4.2 コンクリートのモデル

コンクリートのモデルには式(4)に示すPopovicsモデル⁶⁾を用い、スリットおよび破壊の局所化による軟化勾配の違いを表現したモデルを構築する。

$$\frac{\sigma}{\sigma_c} = \frac{n(\varepsilon/\varepsilon_c)}{n-1+(\varepsilon/\varepsilon_c)^n} \quad (4)$$

ここで、 σ_c :最大応力(MPa), ε_c :最大応力時の歪

n :曲線形状係数

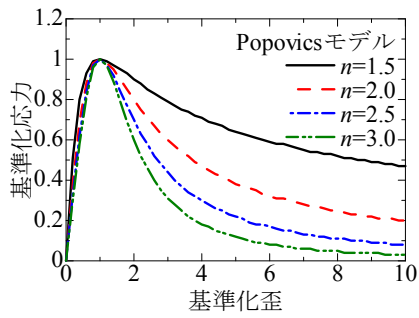


図-8 Popovics モデル

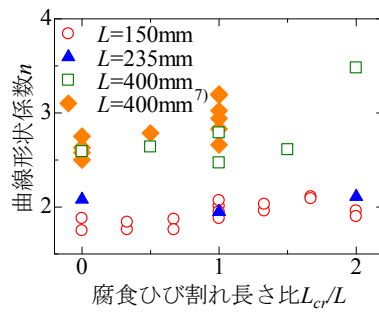


図-9 係数 n と腐食ひび割れ長さ比 L_{cr}/L の関係

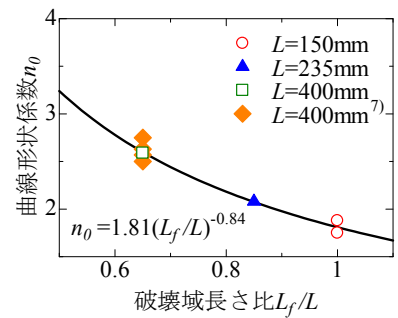


図-10 係数 n_0 と破壊域長さ比 L_f/L の関係

Popovics モデルの曲線形状を図-8 に示す。式(4)の係数 n は、応力-歪曲線の形状を決定する係数であり、係数 n の値が大きくなるにつれて、最大応力以降の負勾配が大きくなる。この係数 n にひび割れを模擬したスリットおよび破壊の局所化の影響が生じることが考えられる。平面保持を仮定し、各試験体の結果から鉄筋モデルの応力を差し引き、コンクリート負担分の応力-歪曲線を算出し、最小二乗法による近似により各試験体の曲線形状係数を算出した。同様の条件で実験を行った既往の研究⁷⁾と共に、腐食ひび割れ長さ比 L_{cr}/L と係数 n の関係を図-9 に示す。腐食ひび割れ長さ比 L_{cr}/L および試験区間長 L が大きくなるにつれて、係数 n の値が大きくなる傾向が確認できる。破壊の局所化による影響を定式化するため、スリットの無い試験体について、破壊域長さ L_f を試験区間長 L で除した値（以下、破壊域長さ比）と曲線形状係数 n_0 の関係を図-10 に示す。破壊域長さ比が小さいほど、係数 n_0 の値が大きくなる傾向を示している。最小二乗法による回帰計算から、式(5)を得た。次に、式(5)を用いて各試験体の係数 n を基準化した値と腐食ひび割れ長さ比の関係を図-11 に示す。ばらつきは多いものの、右上がりの傾向が確認できる。最小二乗法による直線近似を行い、式(6)を得た。式(5)および式(6)から式(7)を導出した。なお、最大応力時の歪 ε_c には、実験で得られた各試験区間長の最大応力時の歪の平均値を適用した。

$$n_0 = 1.81(L_f/L)^{-0.84} \quad (5)$$

$$n/n_0 = 0.071(L_{cr}/L) + 1 \quad (6)$$

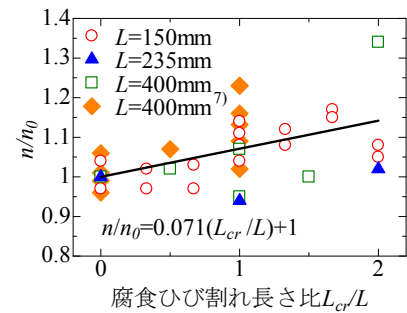


図-11 n/n_0 と腐食ひび割れ長さ L_{cr}/L の関係

ここで、 L_{cr} :腐食ひび割れ長さ(mm)、 L :試験区間長(mm)
 L_f :破壊域長さ(mm)

$$n = \frac{0.13(L_{cr}/L) + 1.81}{(L_f/L)^{0.84}} \quad (7)$$

ここで、 $1.81 \leq n \leq 2.97$, $0.65 \leq L_f/L \leq 1.00$,
 $0.00 \leq L_{cr}/L \leq 2.00$

4.3 実験結果とモデルの比較

平面保持の仮定に基づき、4.1 節で得た座屈鉄筋の応力-歪曲線と、4.2 節で提案したコンクリートの応力-歪曲線を足し合わせ、全荷重を試験体断面積で除した応力-歪曲線のモデルを構築した。各試験体の最大応力および最大応力時の歪で基準化した応力-歪曲線の実験値とモデルの比較を図-12 および図-13 に示す。実験結果では応力上昇域の曲線形状係数に大きな差異は見られず、Popovics モデルで適用した係数 n の範囲で、応力上昇域

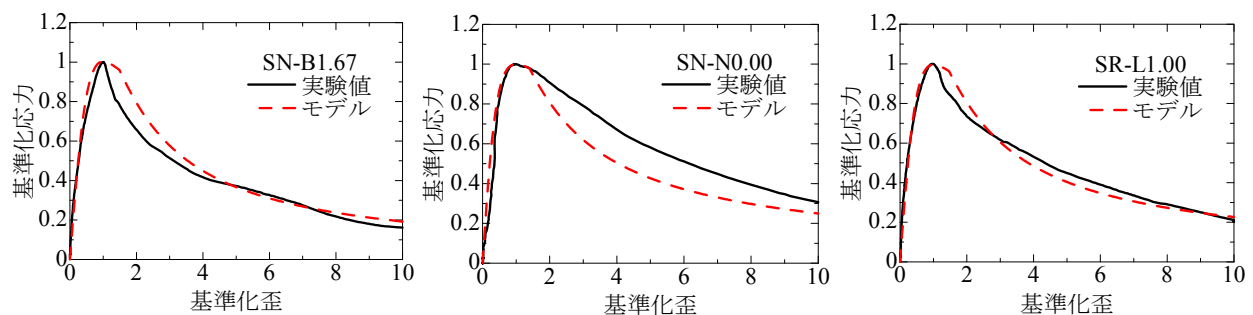


図-12 実験結果とモデルの比較（試験区間長 150mm）

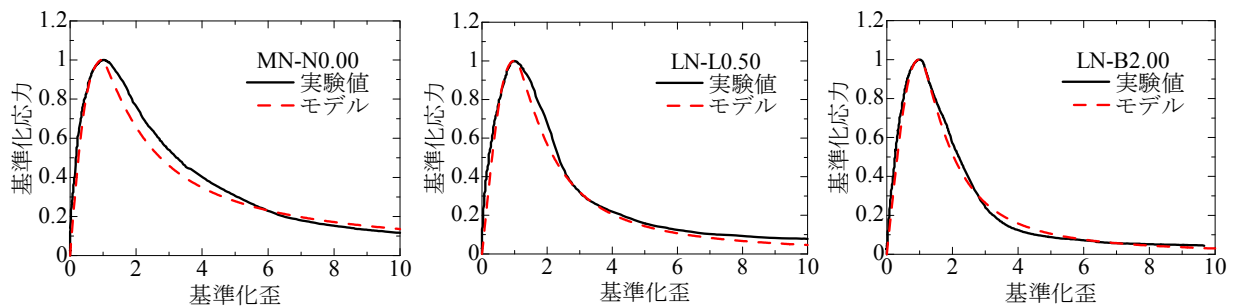


図-13 実験結果とモデルの比較（試験区間長 235mm, 400mm）

の同一歪における応力が 3 割程度の差異を生じるが、最大応力以降の負勾配の領域では、精度よく実験値を表していると考えられる。

5. まとめ

スリットによってかぶりコンクリートのひび割れを模擬した RC 柱の中心圧縮試験を行い、実験結果に基づいて応力-歪曲線のモデル化を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 最大応力はスリットの種類および鉄筋切削による明瞭な影響は見られず、腐食ひび割れが最大応力に及ぼす影響は少ないと考えられる。
- (2) ひび割れを模擬したスリットおよびコンクリートの破壊の局所化が、応力-歪曲線の最大応力以降の挙動に大きく影響を及ぼし、ひび割れの程度により応力-歪曲線の軟化勾配が大きくなる。
- (3) 腐食ひび割れ長さ比と破壊域長さ比を用いて、応力-歪曲線の形状を決定する関係式を提案し、実験結果の挙動を概ね再現できた。

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) 金久保利之ほか：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) 墨野倉駿，金久保利之，八十島章，大屋戸理明：腐食を模擬した鉄筋の座屈性状に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.973-978，2015.7
- 4) Nakamura, H and Higai, T : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length Concrete, JCI-C51E Post - Peak Behavior of RC Structures subjected to Seismic Loads, Vol.2, pp.252-272, 1999
- 5) 墨野倉駿，金久保利之，八十島章：座屈する異形鉄筋の応力-歪曲線の提案，土木学会年次学術講演会講演概要集，5-112 号，pp.223-224，2015.9
- 6) Popovics, S : A Numerical Approach to the Complete Stress - Strain Curve of Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.3, pp.583-599, 1973
- 7) 藻川哲平ほか：鉄筋の腐食によるコンクリートのひび割れを模擬した RC 部材の中心圧縮性状，土木学会年次学術講演会講演概要集，5-078 号，pp.155-156，2015.9