

論文 鉄筋の腐食を考慮した RC 柱の中心圧縮性状

齋藤 祐哉^{*1}・大屋戸 理明^{*2}・金久保 利之^{*3}・山本 泰彦^{*4}

要旨：鉄筋の腐食が横拘束下におけるコンクリートの圧縮性状に及ぼす影響を把握することを目的とし、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腐食を模擬し、腐食想定位置、腐食想定方法、腐食想定量を実験因子とした RC 柱の中心圧縮実験を実施した。実験の結果、主鉄筋の腐食は最大軸応力に大きく影響し、帯鉄筋の腐食は最大軸応力以降の応力軟化域に大きく影響することを確認した。また、帯鉄筋の腐食に伴う最大軸応力以降の応力軟化域を考慮した横拘束を受ける RC 柱の中心圧縮性状をモデル化した。

キーワード：鉄筋腐食、拘束効果、電食、切削、中心圧縮実験

1. はじめに

RC 構造物の維持管理とライフサイクルコスト削減の両立のため、鉄筋腐食と構造性能の低下の関係について研究がなされている^{例え¹}。しかしながら、従来の電食や自然暴露などにより鉄筋を腐食させる方法では、腐食量や腐食位置のコントロールが難しく、構造性能の低下を定量的に評価することが難しい。

著者らはこれまで、鉄筋の腐食量や腐食位置をコントロールするため、切削した鉄筋や細径の丸鋼を用いることで腐食を模擬した RC 柱の正負交番繰返し載荷実験を行い、その構造性能に関して検討を行っている²。本研究では、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腐食を模擬し、鉄筋の腐食が中心圧縮性状に与える影響を検討した。

東コンクリートの応力-歪関係を得るため、すべての試験体のかぶりを除いている。実験のパラメータは腐食を想定する鉄筋の位置（一面、二面、全面）、腐食量（20%、40%、60%、80%）、および腐食の模擬方法（電食、切削、細径丸鋼）である。主鉄筋は D16、帯鉄筋は D6 を用いているが、帯鉄筋の腐食位置が全面である場合は、腐食想定部の帯鉄筋に腐食量に応じた細径の丸鋼（ $\phi 6$ 、 $\phi 5$ 、 $\phi 4$ 、 $\phi 3$ ）を用いている。なお、腐食量は最大断面減少率を示している。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体配筋例を図-1 に、試験体一覧を表-1 に示す。試験体の断面は $180 \times 180\text{mm}$ 、高さは 660mm で、試験区間は 360mm （腐食想定部 200mm ）である。なお、帯鉄筋の腐食は腐食想定部の 4 本を対象としており、コア断面内の拘

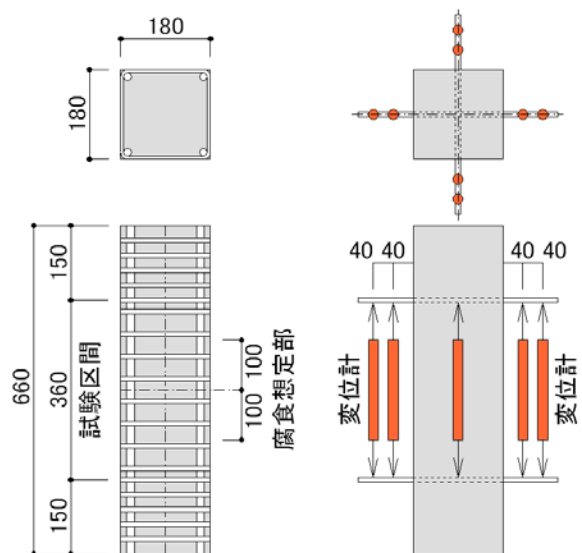


図-1 試験体配筋例および軸変位測定位置

*1 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 学士 (工学) (正会員)

*2 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 博士 (工学) (正会員)

*3 筑波大学大学院 システム情報工学研究科助教授 博士 (工学) (正会員)

*4 筑波大学大学院 システム情報工学研究科教授 工博 (正会員)

表-1 試験体一覧

試験体 No.	主鉄筋	帯鉄筋		
	腐食方法 (腐食量)	腐食位置	腐食方法	腐食量
1	D16 健全	D6@45 健全		
2	電食 (5%)			
3	電食 (15%)			
4	電食 (30%)			
5	なし*	D6@45 健全		
6	なし*	全面	$\phi 6@49.5$	20%
7			$\phi 5@46$	40%
8			$\phi 4@44.5$	60%
9			$\phi 3@50$	80%
10	なし*	一面	D6@45	20%
11			切削	40%
12				60%
13				80%
14	なし*	二面	D6@45	20%
15			切削	40%
16				60%
17				80%
18	D16 切削 (30%)	全面	$\phi 6@49.5$	20%
19			$\phi 5@46$	40%
20			$\phi 4@44.5$	60%
21			$\phi 3@50$	80%
22	なし*	D6@45 健全		

*組み立て筋として $\phi 3$ 鉄筋を配筋

2.2 加力および計測方法

加力は2MNユニバーサル万能試験機を用いて、変位制御による一方向単調載荷を行った。測定項目は軸圧縮力、図-1に示す試験区間の4面における軸方向変形量である。

3. 鉄筋腐食の模擬

3.1 電食による腐食の模擬

電食方法を図-2に示す。腐食想定部に固定した水槽をNaCl水溶液で満たし、水槽内に試験体を囲むように銅板を設置した。定電流発生装置の陽極を主鉄筋4本に、陰極を銅板に繋ぎ、鉄筋の質量減少率の目標を5%、15%および30%として電流を印加した。試験終了後、はつり出した鉄筋を除錆し、実際の腐食量を測定した結果、No.2の腐食量は帯鉄筋、主鉄筋ともに目標をやや上回り、No.3、No.4の腐食量は帯鉄筋が目標の2倍程度、主鉄筋が目標の約半分であった。

電食終了後の試験体はかぶりコンクリートが

ないため、帯鉄筋から直接錆汁が流れ出し、試験体4隅に軸方向にひび割れが発生しているのが確認できた。

3.2 細径丸鋼による腐食の模擬

細径丸鋼は帯鉄筋の腐食が全面に生じた場合を想定しており、腐食量に対する帯鉄筋比がほぼ同じになるようにピッチを調節している。なお、丸鋼にはビニールテープを用いて付着を絶縁している。

3.3 切削による腐食の模擬

実際の腐食鉄筋を模擬して³⁾作製した切削鉄筋の概要を図-3に示す。D16切削鉄筋の腐食想定長さは200mmとし、一次切削として腐食想定部全体にわたり平均的に断面積を15%切削し、二次切削として局所的に健全時の断面積の30%減となるように切削した。なお、D16切削鉄筋の二次切削部は15mmずつ二箇所に分けて切削した。D6切削鉄筋の腐食想定長さは100mmとし、一次切削の断面減少率が二次切削の1/2となるように切削した。なお、切削面にはビニールテープを用いて付着を絶縁している。

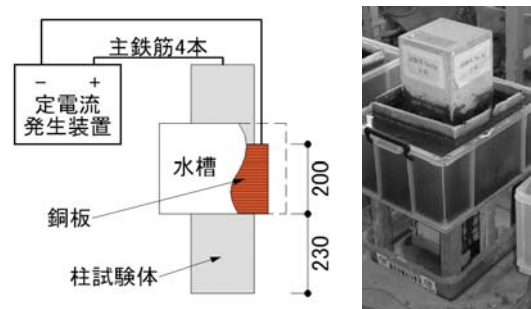


図-2 電食方法

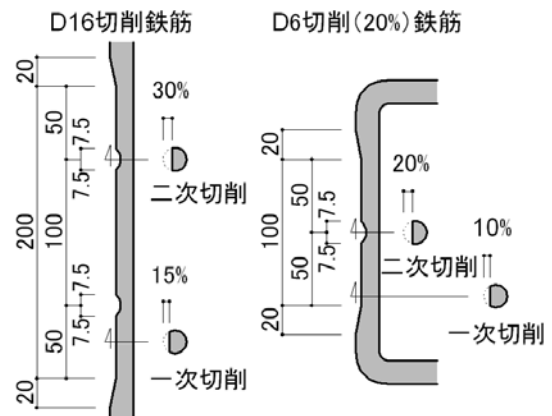


図-3 切削鉄筋概要

4. 材料試験結果

切削鉄筋の引張試験における歪の測定方法を図-4に示す。腐食想定長さはD16切削鉄筋、D6切削鉄筋とも100mmとしている。歪の測定には、検長が16d(D16切削鉄筋)または24d(D6切削鉄筋)の変位1、検長が50mmの変位2および二次切削部、一次切削部の裏表と一次切削開始部に貼付した歪ゲージを用いた。応力は引張力を公称断面積で除して求めた。歪は変位1を検長で除した変位1歪、変位2を検長で除した変位2歪、および歪ゲージ1, 2による平均歪について求め、それぞれの変形区間での見掛けの降伏応力および弾性係数を算出した。

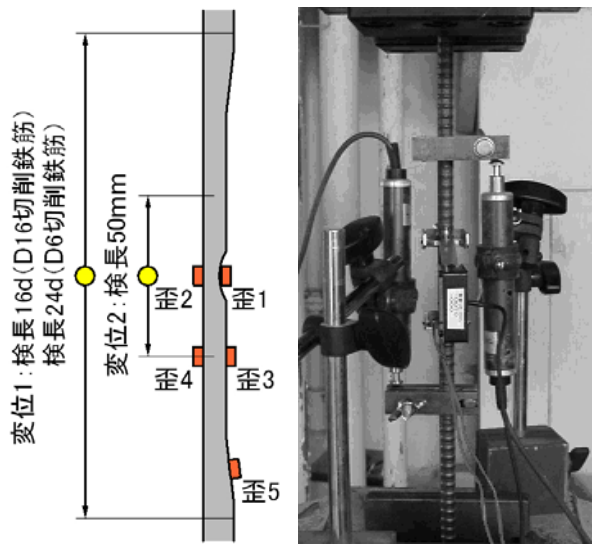


図-4 歪の測定

健全鉄筋と切削鉄筋の材料試験結果を表-2に、切削鉄筋の変位1歪による応力-歪関係を図-5に示す。全体として、腐食の増加に伴う強度低下や伸びの低下など、腐食鉄筋の力学的性状を模擬できるものと考えられる。

D16切削鉄筋の場合、まず二次切削してある部分の歪1が早期に降伏し、線形性を失う。歪2は曲げの影響を受け遅れて降伏し、歪2が降伏すると全体の剛性が低下する。その後二次切削部は直ちに歪硬化領域に達するものと考えられ、さらに荷重が増加すると一次切削部の歪3および歪4が降伏する。若干の降伏棚を示した後、一次切削部も歪硬化領域に達すると考えられ、その後は一次切削開始部の歪5も降伏し、その後は非切削部まで降伏が進展すると考えられる。

腐食量20%のD6切削鉄筋の場合、一次切削部の降伏まではD16切削鉄筋と同様の挙動を示すが、一次切削部は降伏後直ちに歪硬化領域に達すると考えられ、明確な降伏棚は見られなかった。その後は一次切削開始部の歪5が降伏し、非切削部まで降伏が進展すると考えられる。

腐食量40%のD6切削鉄筋の場合、一次切削部の降伏まではD16切削鉄筋と同様の挙動を示すが、一次切削部の降伏以降は一次切削開始部の歪5が降伏することなく破断した。

腐食量60%および80%のD6切削鉄筋の場合、

表-2 引張試験結果

種別	使用試験体 No.	見掛けの降伏応力 (MPa)			見掛けの弾性係数 (GPa)			
		変位1歪算出	変位2歪算出	歪1・2算出	変位1歪算出	変位2歪算出	歪1・2算出	
D16	健全	1	383			180		
	切削 30%	18~21	314*	290*	214*	147	237	100
D6	健全	1, 5	419*			171		
		22	378*			162		
	切削 20%	10, 14	404*	400*	349*	165	204	151
	切削 40%	11, 15	317*	299*	240*	136	190	117
	切削 60%	12, 16	240*	212*	143*	74	95	86
	切削 80%	13, 17	51*	-	46*	8	-	60
φ6	健全	6, 18	348*			213		
φ5	健全	7, 19	481*			204		
φ4	健全	8, 20	565*			208		
φ3	健全	9, 21	683*			214		

*0.2%オフセット耐力

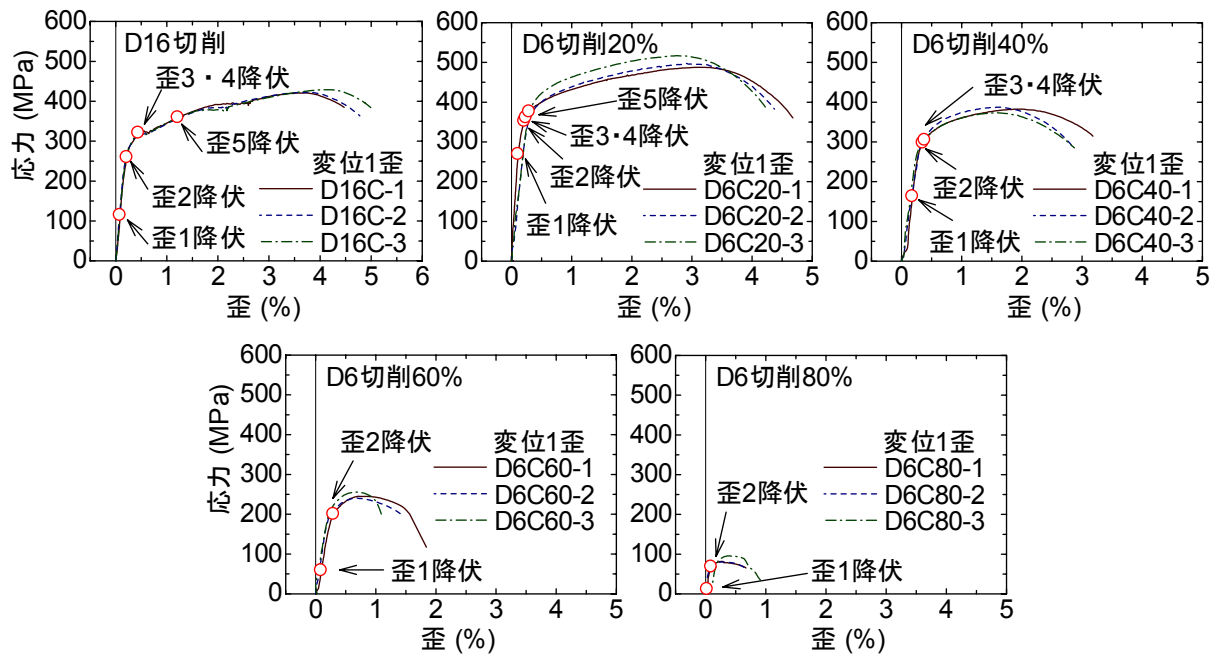


図-5 切削鉄筋の応力-歪（変位1歪）関係

二次切削部の降伏までは D16 切削鉄筋とほぼ同様の挙動を示すが、二次切削部の降伏以降は一次切削部の歪 3 および歪 4 が降伏することなく破断した。D6 切削鉄筋の場合、腐食量を 60%以上とした場合に強度や伸びが著しく低下していた。これは、二次切削部のみでの降伏で破断したことによる。また、D6 健全鉄筋の降伏比が 0.69 であったことから、腐食量をおおむね 30%以上とすると、降伏は非切削部まで進展せずに破断すると考えられる。

コンクリートの材料試験結果を表-3 に示す。なお、テストピースの養生は現場気中とした。

表-3 コンクリートの材料試験結果

使用試験体 No.	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	割裂強度 (MPa)
1~5	24.2	22.1	2.26
6~22	27.9	23.1	-

5. 実験結果

実験のパラメータごとに比較した軸応力-軸歪関係を図-6 に示す。なお、軸応力はコンクリートの圧縮強度で除して無次元化している。

帯鉄筋のみを腐食想定とした試験体 (No.6~No.17) から、最大耐力は腐食方法により若干の

差が見られるが、腐食方法が同一である場合はほとんど差が見られず、最大耐力以降の応力軟化域に大きな差が見られた。また、腐食位置を全面とし、細径の丸鋼を用いて腐食を模擬した試験体 (No.6~No.9) の荷重低下の度合いは腐食量に比例して大きくなっていったのに対し、切削鉄筋を用いて腐食を模擬した試験体 (No.10~No.17) の荷重低下の度合いは、腐食量を 60%以上とした場合に急激に大きくなった。これは、切削鉄筋の材料試験結果から、腐食量を 60%以上とすると鉄筋は 2 次切削部のみでの降伏で破断してしまうため、十分な拘束効果を得ることができなかったためと考えられる。

電食により主鉄筋と帯鉄筋を腐食させた試験体 (No.2~No.4) から、腐食の増加に伴い最大耐力の低下が見られた。帯鉄筋の腐食が最大耐力以降の応力軟化域に影響を及ぼすことを踏まえると、主鉄筋の腐食は最大耐力に影響を及ぼすものと考えられる。

主鉄筋の腐食量を 30%とし、帯鉄筋の腐食を細径丸鋼により模擬した試験体 (No.18~No.21) から、最大耐力は主鉄筋の腐食量が同じであれば、帯鉄筋の腐食量によらずほとんど差が見られなかった。

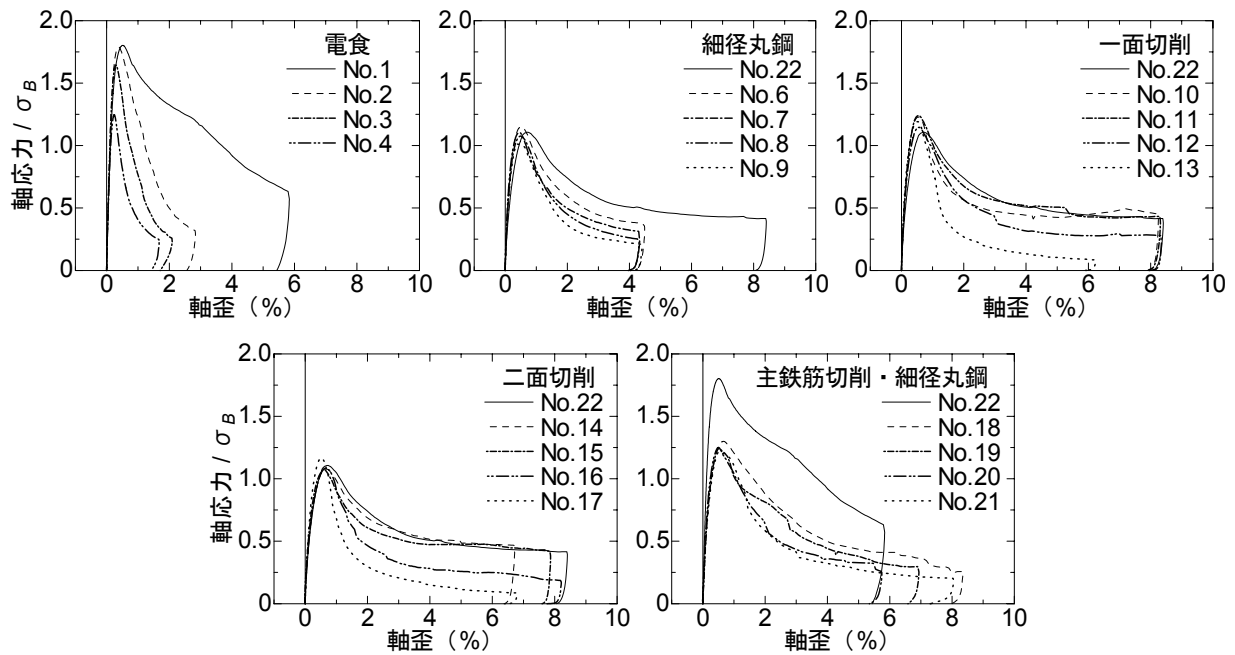


図-6 実験結果

6. 応力-歪関係のモデル化

帯鉄筋のみ腐食を想定した試験体 (No.6~No.17) の拘束コンクリートの応力-歪関係のモデル化を行う。モデルは既往の研究⁴⁾を参考にし、最大軸応力までは式(1)に従うものとし、図-7の関係から、軸歪2%時の軸応力を(2)式より、軸歪4%以降の軸応力を(3)式より求め、各々を直線で結ぶこととする。なお、(2)式および(3)式の α は、切削鉄筋を用いて腐食を想定する場合に、健全時の降伏比と腐食量の関係から算出される値である。但し、 α が負になる場合、または細径丸鋼を用いた場合は0とする。また、切削鉄筋を用いた場合の p_{wc} は、一次切削部の断面積を用いて算出することとする。最大軸応力は腐食方法別に(4)式、(5)式および(6)式より算出する。

図-8 に実験結果とモデルの比較を示す。モデ

ルはすべて実験値との対応が良く、最大軸応力以降の応力軟化域を精度良く表現できた。

$$\sigma/\sigma_m = 2(\varepsilon/\varepsilon_m) - (\varepsilon/\varepsilon_m)^2 \quad (1)$$

$$\sigma/\sigma_m = 0.256(p_{wc}/p_w) + b_2 - 0.6\alpha \quad (2)$$

$$\sigma/\sigma_m = 0.256(p_{wc}/p_w) + b_4 - 0.6\alpha \quad (3)$$

ここで

ε_m : 最大軸応力時の歪 (=0.5%)

σ_m : 最大軸応力 (MPa)

p_w : 帯鉄筋比 (%)

p_{wc} : 腐食想定部の帯鉄筋比 (%)

$b_2 = 0.305$ $b_4 = 0.17$ (細径丸鋼)

$b_2 = 0.415$ $b_4 = 0.256$ (一面・二面切削)

$\alpha = (\text{降伏比}) - (1 - (\text{腐食量})/100)$ ($\alpha \geq 0$)

$\alpha = 0$ (切削 20%) $\alpha = 0.09$ (切削 40%)

$\alpha = 0.29$ (切削 60%) $\alpha = 0.49$ (切削 80%)

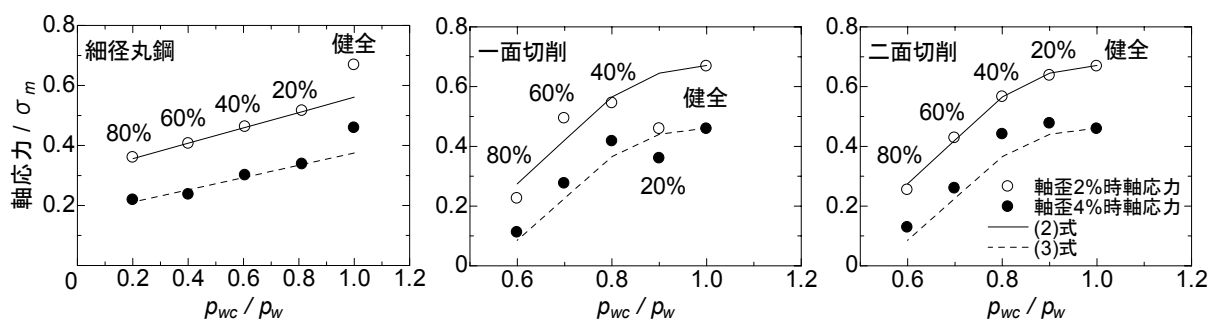


図-7 帯鉄筋比と軸歪2%および4%時の軸応力との関係

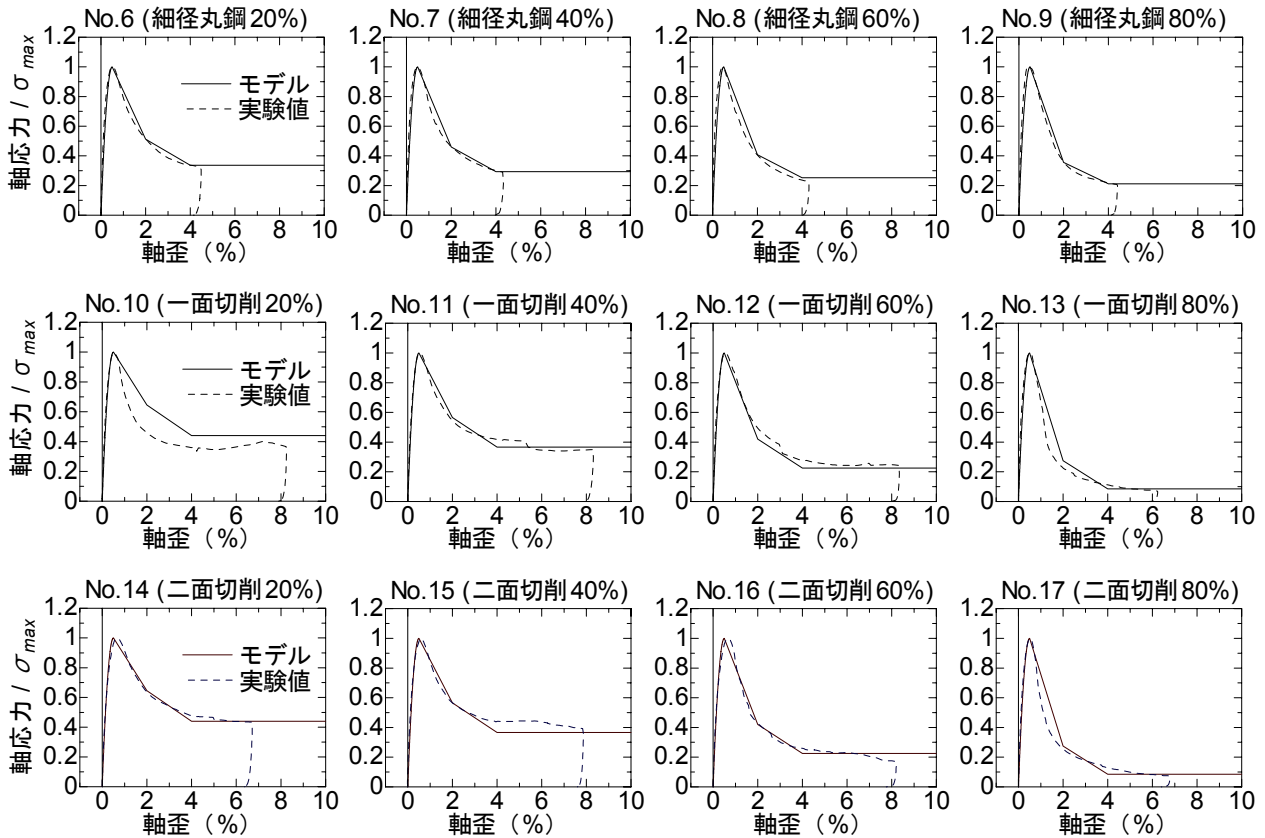


図-8 実験結果とモデルの比較

$$\sigma_m / \sigma_B = 0.24 p_{wc} + 0.99 \quad (\text{細径丸鋼}) \quad (4)$$

$$\sigma_m / \sigma_B = 0.12 p_{wc} + 1.15 \quad (\text{一面切削}) \quad (5)$$

$$\sigma_m / \sigma_B = 0.12 p_{wc} + 0.99 \quad (\text{二面切削}) \quad (6)$$

ここで

σ_B : コンクリートの圧縮強度 (MPa)

今後、実際の腐食したコンクリート構造物と本実験で使用した模擬鉄筋の性状との関連性を精査し、提案モデルの適応性について検討する予定である。

7. まとめ

鉄筋の腐食を模擬した RC 柱の中心圧縮実験を実施し、以下の知見を得た。

- 1) 主鉄筋の腐食は、最大軸応力の低下に大きく影響する。
- 2) 帯鉄筋の腐食は、最大軸応力以降の応力軟化域に大きく影響する。
- 3) 帯鉄筋の腐食量の増加に伴う最大軸応力以降の荷重低下の度合いを考慮した拘束コン

クリートの応力-歪関係のモデルは実験値を精度良く評価できた。

参考文献

- 1) 加藤絵万ほか：繰返し荷重を受ける RC 柱の構造性能に及ぼす鉄筋腐食の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，pp1489-1494，2005
- 2) 齋藤祐哉ほか：鉄筋の腐食を模擬した RC 柱の構造性能に関する研究，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.61，5-261，pp531-532，2006.9
- 3) 大屋戸理明ほか：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，部門 E，Vol.62，No.3，2006.
- 4) 金久保利之，園部泰寿：高強度人工軽量骨材コンクリートを用いた鉄筋コンクリート部材の耐震性能に関する研究，建築学会構造系論文報告集，441，pp63-72，1992