#### 鉄筋腐食によってひび割れが生じた RC 柱の中心圧縮性状 論文

藻川 哲平\*1·金久保 利之\*2·八十島 章\*3·大屋戸 理明\*4

要旨:鉄筋の腐食膨張によって発生したかぶりコンクリートのひび割れに着目し、電食を用いて腐食させた RC 柱の中心圧縮試験を行った。変動因子はコンクリート強度,試験区間長および電食によって試験区間に発 生させるひび割れの長さである。実験結果より、電食によって発生したひび割れの影響は、目標強度 18MPa の試験体の最大応力では確認されたが、最大応力以降の挙動においては見られず、かぶりコンクリート表面 で計測したひび割れの長さと最大応力以降の負勾配に明確な関係は確認できなかった。剥落後のかぶりコン キーワード:ひび割れ,電食,鉄筋腐食,中心圧縮, 錆汁, Popovics モデル

#### 1. はじめに

既存の鉄筋コンクリート(以下 RC と記す)造構造物 において、塩害や中性化など環境要因によって発生した 鉄筋の腐食が, RC 部材の構造性能の低下に繋がる要因 として挙げられている。現在までに,引張鉄筋の腐食が RC 部材の耐荷性能へ及ぼす影響を検討した研究は多く なされている一方で, 圧縮力を負担しているコンクリー トが劣化した際に、それが RC 部材の耐荷性能に及ぼす 影響について検討した例はほとんど見られない。

著者らはこれまで,鉄筋腐食に伴って発生したかぶり コンクリートのひび割れが RC 部材の圧縮性能に及ぼす 影響について検討を行っている。その一環としてスリッ 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 柱部材の中心圧縮試験を行い、スリットの存在が応 カー歪曲線の最大応力以降の挙動に影響を及ぼすことを 確認した 1)。また、ひび割れの長さおよび破壊の局所化 を考慮したコンクリートの構成則モデルを提案し、実験 結果を概ね表現できることを確認した。しかし、スリッ トの設置はひび割れの量や位置を意図的にコントロール できる一方で、実際の鉄筋腐食膨張に伴うひび割れとの 関連性は不明である。

本研究では、電食を用いて腐食させた RC 柱の中心圧 縮試験を行い、鉄筋の腐食およびかぶりコンクリートの ひび割れが RC 柱の中心圧縮性状へ及ぼす影響を把握す ることを目的とする。また、最大応力以降の挙動に着目 し、基準化した応力-歪曲線のモデル化を行う。

#### 2. 実験概要

#### 2.1 試験体

試験体一覧を表-1に,試験体概要を図-1に示す。試 験体は全17体である。断面は前述の研究1)と同一の

\*1 大成建設(株) (正会員) \*2 筑波大学 システム情報系教授 博士(工学) (正会員) \*3 筑波大学 システム情報系准教授 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)

150mm×235mmで、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。試験体両端 部については, 試験体 No.1~No.8 では帯鉄筋 (D6@30) を配し,試験体 No.9~17 では帯鉄筋の腐食進行を避ける ため炭素繊維シートを用いて補強している。変動因子は コンクリート強度 Fc, 試験区間長Lおよび電食によって 試験区間に発生させるひび割れの長さLcrである。

## 2.2 電食方法

電食方法を図-2に示す。試験体の腐食想定区間の外

表一1 試験体一覧							
No	試験体名	コンクリート	L	<i>L<sub>cr</sub></i> 目標值			
INO.		強度 Fc(MPa)	(mm)	(mm)			
1	S13-E0			0			
2	S13-E1		150	50			
3	S13-E2		150	100			
4	S13-E3	12.5		150			
5	L13-E0	13.5		0			
6	L13-E1		400	100			
7	L13-E2		400	200			
8	L13-E3			400			
9	S18-E0			0			
10	S18-E1		150	50			
11	S18-E2		150	100			
12	S18-E3			150			
13	L18-E0	18		0			
14	L18-E1			100			
15	L18-E2		400	200			
16	L18-E3			300			
17	L18-E4			400			





## 図-2 電食方法(左:概要図,右:上面写真)

周に固定した水槽内に 3%NaCl 水溶液を満たし,銅板を 試験体の最小かぶり面に 4 枚設置した。電流は定電流発 生装置を用いて通電するものとし,陽極を主鉄筋に,陰 極を銅板に接続した。腐食想定区間における電流密度は, 全試験体において 0.8mA/cm<sup>2</sup>で一定とした。

本実験では試験区間に対するかぶりコンクリートのひ び割れ長さを変動因子とするため,通電中は目視による ひび割れ観察を適宜行い,所定のひび割れ長さに到達し た時点で通電を終了した。実際に通電した積算電流量は 後出の表-4に示す。

## 2.3 材料試験結果

## (1) コンクリート

コンクリートには、目標強度を 13.5MPa および 18.0MPa とした普通コンクリートを用いた。粗骨材の最 大寸法は 20mm である。加力時材齢におけるコンクリー トの材料試験結果を表-2 に示す。6 体の圧縮強度試験、 3 体の割裂引張強度試験を行い、それらの平均値を示す。

表-2 コンクリート材料試験結果								
No	圧縮強度	弾性係数	割裂強度					
INO.	(MPa)	(GPa)	(MPa)					

# (MPa)(GPa)(MPa) $1 \sim 8$ 10.914.81.20 $9 \sim 17$ 23.020.02.00

## 表一3 鉄筋引張試験結果

後回	引張強度	降伏強度	弾性係数	
个里方门	(MPa)	(MPa)	(GPa)	
異形鉄筋 D10	468	346	192	



図-3 加力方法および計測方法

## (2) 鉄筋

主鉄筋に用いた異形鉄筋 D10 の引張試験結果を表-3 に示す。3体の引張試験の平均値を示している。

## 2.4 加力および計測方法

加力および計測方法を図-3に示す。加力には 2MN 万 能試験機を用いて一方向単調圧縮載荷を行った。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。変位計は全ての面に 2本ずつ等間隔に設置した。 載荷に伴う変位計設置用インサートの変形を補正できる ように,外側の変位計の計測値から内側(試験体側)の 変位計の計測値の 2 倍を差し引くことにより,試験体表 面における軸方向変形量として算出した。

## 3. 実験結果

## 3.1 通電後のひび割れ性状

ひび割れ状況の一覧を表-4 に、電食後の試験体状況 の例を図-4 に示す。腐食ひび割れ長さは、試験体各面 において発生したひび割れの長さの最大値を示し、直定 規により目視にて計測した(二捨三入)。腐食ひび割れ幅 は、長さが最大のひび割れにおける幅の最大値とし、ク ラックスケールを用いて計測した。電食を行った全ての

		コンク	リート	鉄	<b> </b>	
No.	試験体名	腐食ひび割れ幅	腐食ひび割れ長さ	質量減少率	断面減少率	(A・h)
		(mm)	(mm)	(%)	(%)	
1	S13-E0	-	-	-	-	-
2	S13-E1	0.05	50	5.6	2.4	71.5
3	S13-E2	0.10	35	10.5	24.8	87.7
4	S13-E3	0.10	20	10.7	21.4	106.6
5	L13-E0	-	-	-	-	-
6	L13-E1	0.05	330	8.8	2.8	80.3
7	L13-E2	0.10	150	21.0	56.9	233.9
8	L13-E3	0.10	200	19.0	52.4	284.2
9	S18-E0	-	-	-	-	-
10	S18-E1	0.10	35	8.5	25.3	52.0
11	S18-E2	0.20	60	15.6	46.5	89.8
12	S18-E3	0.15	70	14.4	34.1	89.8
13	L18-E0	-	-	-	-	-
14	L18-E1	0.10	290	10.7	29.7	138.6
15	L18-E2	0.10	170	10.7	25.8	138.6
16	L18-E3	0.35	400	19.3	35.3	239.6
17	L18-E4	0.40	400	26.2	41.5	239.6

表-4 通電後のひび割れ状況および鉄筋の腐食状況

試験体において主鉄筋に沿ったひび割れが生じた。通電 終了後に計測した主鉄筋に沿ったひび割れ長さと表-1 に示した目標ひび割れ長さに差異があるのは、通電中に ひび割れがある一定の長さになると進展が止まり、鉄筋 の腐食のみが進行する様子が一部の試験体で確認され、 その時点で通電を終了したためである。帯鉄筋を有して いる試験体 No.1~8 (図-4 左図参照) については、帯鉄 筋の発錆が顕著となり、試験区間の腐食進行を妨げる様 子が確認された。

## 3.2 鉄筋の腐食性状

鉄筋の腐食状況の一覧を表-4 に示す。中心圧縮試験 終了後,試験体から鉄筋をはつりだし,10%濃度クエン 酸アンモニウム水溶液に48時間浸漬させることで腐食 状況を確認した。質量減少率は除錆後に計測した質量を, 事前に計測した鉄筋長さに単位長さ当たりの質量

(0.56kg/m)を掛けた値で除すことにより算出した。腐 食後の最小断面積は、ノギスにより最小径およびそれに 対して 90 度回転させた径の計測を行い、2 つの径を用い た楕円の断面積とした。計測した断面積を公称断面積で 除すことで断面減少率を算出した。なお、表中の値は主 鉄筋4本の平均値を示している。

#### 3.3 加力後の破壊状況

中心圧縮試験終了後に剥落したかぶりコンクリート に付着している錆汁の例を図-5に示す。鉄筋腐食によ



図-4 電食後の試験体状況



図-5 剥落後のかぶりコンクリートに付着した錆汁



図-7 応力-歪曲線(Fc18.0)

って発生した錆汁が試験体表面まで到達している(図-5 上図参照)だけでなく,試験体表面まで到達していない 錆汁やかぶり表面から侵入している錆汁(図-5下図参 照)も確認された。表-4に示す腐食ひび割れ幅が約 0.30mm 以上の場合には,かぶりコンクリートに錆汁が 全面的に付着している傾向が確認された。

#### 3.4 応力-歪曲線

実験結果一覧を表-5 に,試験体の応力-歪曲線を図 -6および図-7に,最大応力以降の挙動に着目するため に各試験体の最大応力および最大応力時の歪で基準化し た曲線を図-8および図-9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。

コンクリート強度 13.5MPa の試験体において,最大応 力については S13-E3 のみが健全試験体 S13-E0 を上回っ ているが,その他の試験体では各試験区間長の健全試験 体と大きな差異は見られなかった。最大応力以降の応力 低下について,試験区間長 400mm の試験体では健全試 験体 L13-E0 が最も負勾配が大きくなるなど,かぶりコ ンクリート表面で計測した腐食ひび割れ長さと最大応力 以降の負勾配との関連は見られなかった。

コンクリート強度 18.0MPa の試験体において,最大応 力については各試験区間長において健全試験体より電食 によって劣化している試験体の方が低下する傾向が見ら れた。最大応力以降の応力低下について,試験区間長 150mmの試験体では健全試験体 S18-E0 が最も負勾配が 大きくなる結果が得られた。試験区間長 400mmの試験 体では,腐食ひび割れ長さが最も大きい L18-E3 におい て,最大応力の5割程度まで健全試験体 L18-E0 より負 勾配が大きくなる結果を示したが,その他の試験体では



図-8 基準化応力—基準化歪曲線(Fc13.5)



図-9 基準化応力—基準化歪曲線(Fc18.0)

計驗休夕	腐食ひび割れ	最大応力	最大応力時	
时间大学生	長さ(mm)	(MPa)	の歪(%)	
S13-E0	0	12.3	0.43	
S13-E1	50	11.8	0.38	
S13-E2	35	12.3	0.47	
S13-E3	20	13.8	0.59	
L13-E0	0	11.6	0.39	
L13-E1	330	10.9	0.32	
L13-E2	150	11.1	0.34	
L13-E3	200	11.4	0.27	
S18-E0	0	23.4	0.50	
S18-E1	35	20.5	0.40	
S18-E2	60	19.5	0.30	
S18-E3	70	19.1	0.40	
L18-E0	0	24.4	0.25	
L18-E1	290	23.0	0.19	
L18-E2	170	21.4	0.19	
L18-E3	400	22.8	0.18	
L18-E4	400	21.8	0.19	

表-5 実験結果一覧

腐食ひび割れ長さと最大応力以降の負勾配との関連は見 られなかった。

#### 4. 応カー歪曲線のモデル化

#### 4.1 鉄筋のモデル

鉄筋のモデルには,既往の研究<sup>2,3</sup>)で提案されている式 (1)~(3)を用いる。断面減少率αは表-4 に示した断面減 少率を適用し,試験区間長 400mm の試験体における座 屈長さLおよび実験定数βは、既往の研究<sup>1)</sup>と同一の値を 適用した。モデル化で用いた各変数の値を**表-6**に示す。

$$\sigma/\sigma_s = (\varepsilon_s/\varepsilon)^{\beta\sqrt{1-\alpha/100}}$$
(1)

$$\beta = 0.049(L/D) \tag{2}$$

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

ここで, σ<sub>s</sub>:最大応力(MPa), ε<sub>s</sub>:最大応力時の歪 α:断面減少率(%), L:座屈長さ(mm) D:鉄筋径(mm), ε<sub>y</sub>: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<sup>4)</sup>を用い,応力-歪曲線の形状を決定する係数*n*は著者らが提案<sup>1)</sup>した式(5)により算出する。

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

$$n = \frac{0.13(L_{cr}/L) + 1.81}{(L_f/L)^{0.84}}$$
(5)

ここで, σ<sub>c</sub>:最大応力(MPa), ε<sub>c</sub>:最大応力時の歪 n:曲線形状係数, L<sub>cr</sub>:腐食ひび割れ長さ(mm) L:試験区間長(mm), L<sub>f</sub>:破壊域長さ(mm)

表-6 鉄筋モデルの変数一覧								
試験区間長 <i>L</i> (mm)	破壊域(座屈) 長さ <i>L<sub>f</sub></i> (mm)	σ <sub>s</sub> (MPa)	ε <sub>s</sub> (%)	β				
150	150	346	0.85	0.74				
400	260	307	0.42	1.40				



L18-E3



	実験	I	(A)表面の腐食ひび割れ長さ			(B)錆汁範囲の長さ				
試験体名	結果 n	L (mm)	L <sub>A</sub> (mm)	$L_A/L$	$n_A$	n <sub>A</sub> とnの 誤差(%)	L <sub>B</sub> (mm)	$L_B/L$	n <sub>B</sub>	n <sub>B</sub> とnの 誤差(%)
S13-E0	1.83		0	0.00	1.81	1.1	0	0.00	1.81	1.1
S13-E1	1.93	150	50	0.33	1.85	4.0	40	0.25	1.84	4.7
S13-E2	2.05	150	35	0.23	1.84	10.2	100	0.67	1.90	8.1
S13-E3	2.11		20	0.13	1.83	13.4	105	0.69	1.90	11.0
L13-E0	2.32		0	0.00	2.60	12.0	0	0.00	2.60	10.7
L13-E1	2.11	400	330	0.83	2.75	30.5	120	0.30	2.66	21.6
L13-E2	2.43	400	150	0.38	2.67	9.8	75	0.50	2.69	11.4
L13-E3	2.2		200	0.50	2.69	22.4	245	0.76	2.74	17.1
S18-E0	1.82	150	0	0.00	1.81	0.5	0	0.00	1.81	0.6
S18-E1	1.6		35	0.23	1.84	15.0	175	1.17	1.96	16.7
S18-E2	1.91	130	60	0.40	1.86	2.5	130	0.85	1.92	0.4
S18-E3	2.07		70	0.47	1.87	9.6	125	0.83	1.92	5.5
L18-E0	2.19		0	0.00	2.60	18.7	0	0.00	2.60	15.7
L18-E1	2.65		290	0.73	2.73	3.2	325	0.81	2.75	3.7
L18-E2	2.77	400	170	0.43	2.68	3.3	235	0.59	2.71	2.3
L18-E3	2.7		400	1.00	2.79	3.2	520	1.30	2.84	5.0
L18-E4	2.05		400	1.00	2.79	35.9	555	1.39	2.86	28.3
			平均		11.5		平均		9.6	

表-7 コンクリートモデルの変数一覧



図-11 モデルと実験結果の比較(上:Fc13.5,下:Fc18.0)

式(5)における腐食ひび割れ長さLcrには電食によって 発生したひび割れ長さを適用するにあたり、(A)電食後に かぶりコンクリート表面で計測したひび割れ長さの最大 値LA,(B)かぶりコンクリートに付着した錆汁範囲の長さ L<sub>B</sub>,を算入することで評価を行った。錆汁範囲の長さは、 剥落したかぶりコンクリート片を用いて直定規により目 視で計測した (二捨三入)。 錆汁範囲の長さの計測例を図 -10に示す。試験体内部の鉄筋から表面まで到達してい ない錆汁は、試験体表面のひび割れとして目視で確認で きず,かぶり内部にひび割れが生じている点を考慮して, 錆汁範囲の長さ $L_B$ を腐食ひび割れ長さ $L_{cr}$ とした。また、 コンクリート片の一部に錆汁が見られる領域および数ヶ 所に錆汁が見られる領域も錆汁範囲の長さとして合算し た。コンクリートモデルの変数一覧を表-7に示す。nは 各試験体の実験結果から鉄筋モデルを差し引き、コンク リート負担分の応力を算出し,最小二乗法による近似に よって算出した曲線形状係数, n<sub>A</sub>およびn<sub>B</sub>はL<sub>cr</sub>にそれ ぞれL<sub>A</sub>およびL<sub>B</sub>を用いて式(5)によって算出した曲線形 状係数である。実験結果から算出したnとn<sub>A</sub>およびn<sub>B</sub>の 誤差について比較すると、若干の差異ではあるが、(B) を用いた評価によって,実験結果をより良く評価できる。 4.3 モデルと実験結果の比較

4.1 節に示した鉄筋のモデルと、4.2 節に示したかぶり コンクリートに付着した錆汁範囲の長さL<sub>B</sub>を考慮した コンクリートのモデルを、平面保持の仮定に基づいて足 し合わせ、中心圧縮を受ける RC 柱部材の応力-歪曲線 をモデル化した。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-歪曲線のモデルと実験結果の比 較を図-11 に示す。かぶりコンクリートに付着した錆汁 範囲の長さを用いることで、提案したモデルと最大応力 以降の曲線形状は概ね一致している。

### 5. まとめ

電食によって腐食させた RC 柱の中心圧縮試験を行い, 鉄筋の腐食およびかぶりコンクリートのひび割れが RC 柱の圧縮性能へ及ぼす影響を検討するとともに,既往の 研究で提案したコンクリートの圧縮モデルの適応性につ いて検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 最大応力はコンクリート強度 13.5MPa の試験体で は腐食による明確な影響は確認できなかったが、コ ンクリート強度 18.0MPa の試験体では健全試験体 に比べて低下する傾向が見られた。
- (2) かぶりコンクリート表面で計測した腐食ひび割れの長さと最大応力以降の応力低下について、明確な関係は確認できなかった。
- (3) 剥落後のかぶりコンクリートに付着した錆汁範囲の長さを用いて、コンクリートの応力-歪曲線をモデル化し、実験結果を概ね表現できた。

#### 参考文献

- 藻川哲平,八十島章,金久保利之,大屋戸理明: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,コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.151-156, 2016.7
- 2) 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
- 3) 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
- Popovics, S : A Numerical Approach to the Complete Stress - Strain Curve of Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.3, pp.583-599, 1973