# 論文 鉄筋腐食によるひび割れ発生前後の腐食進展過程とカバーコンクリ ート剥落の危険性評価

山下 海斗\*1・丸山 裕生\*2・南 正樹\*3・篠原 保二\*4

要旨:鉄筋コンクリート部材の鉄筋腐食によるひび割れ発生前後の腐食量,さらにカバーコンクリート剥落 の危険性を定量的に評価するために,小型試験体を 40 体製作し,繰り返し数 3 とする促進腐食実験を行っ た。変動因子は断面形状,かぶり厚さ及び積算電流密度であり,設定した積算電流密度に到達後,所定の割裂 引張試験により腐食鉄筋を取り出し,洗浄後腐食量を計測した。ひび割れ発生までの鉄筋腐食量は,ファラ デー則に基づく鉄筋腐食量より小さくなるが,ひび割れ発生後,通電量が増加し両者の差が小さくなった。 割裂引張強度はひび割れ発生後に大幅に低下し,腐食量 10%程度でほぼ消失する場合があることを示した。 キーワード:鉄筋腐食量,積算電流密度,腐食ひび割れ,割裂引張強度

## 1. はじめに

近年,高度経済成長期に建設された鉄筋コンクリート (以下 RC)造建物の経年劣化が顕在化し,RC 造建物の 継続使用に対する安全性が問題になってきている。RC構 造物の構造性能劣化の主な要因の一つに,内部鉄筋の腐 食が挙げられる。RC 構造物の柱・梁部材における内部鉄 筋の腐食は,腐食膨張ひび割れの進展による表面ひび割 れの発生,さらに主筋,横補強筋に沿ったひび割れが連 結することにより,カバーコンクリートの一体性が損な われ,剥落の危険性が高まるため,構造物の性能劣化の みならず,人に危害を及ぼす可能性があり,緊急性を要 する課題である。

覚張ら<sup>1</sup>は実物規模の断面 600×600 mm に主筋,横補 強筋を配した RC 柱を対象とし,横補強筋 3 組を有する 高さ 300 mm でカットオフした柱要素試験体を用いて, ひび割れ進展挙動を検討するために促進腐食実験を行っ た。ひび割れ発生時の腐食量は,実験終了後に鉄筋を取 り出し計測した鉄筋腐食量と積算電流密度に基づいて, 線形補間によって推定した。また,腐食生成物は主筋間 及び横補強筋間に大量に残留し,カバーコンクリートが コア部から容易に剥がれることを指摘した。

このように既往の研究では、実験終了後に鉄筋の質量 減少量を実測し、促進中の腐食量は積算電流密度に比例 しているとして評価している。しかし、実現象ではカバ ーコンクリートにひび割れが生じることによって、塩化 物イオンの侵入が容易になり、ひび割れ発生前後で腐食 速度が変化することが考えられる。また、既往の鉄筋腐 食に関する研究では、表面ひび割れ発生時の限界腐食量 を評価する研究が大多数<sup>2),3)</sup>であり、カバーコンクリー トの剥落の危険性について検討した研究例は少ない。

本研究では、知見が不足している表面ひび割れ発生前 後の腐食量の進展挙動を検証するため、単筋を埋め込ん だ矩形断面と円形断面の小型試験体を多数用意し、ひび 割れ発生前後に設定した同一積算電流密度に対して3体 の試験体を割当て(以下繰り返し数3とする)、腐食量の 実測を行う。さらに、鉄筋腐食ひび割れによるカバーコ ンクリート剥落の危険度を評価するため、促進腐食実験 後、所定の割裂引張試験を行い、ひび割れ発生前後の割 裂引張強度の低下傾向を定量的に検証し、RC 部材の健 全性評価を高精度化することを目的とする。

#### 2. 促進腐食実験概要

# 2.1 促進腐食実験に用いる試験体概要

実験に使用した試験体は図-1 に示す既往の RC 柱要



•1 床	「ホエ未ノ	1	<sup><sup><sup></sup></sup> <sup><sup></sup></sup> <sup><sup></sup></sup> <sup><sup></sup></sup> <sup><sup></sup> <sup><sup></sup> <sup><sup></sup> <sup><sup></sup></sup></sup></sup></sup></sup>	八千阮王	(十工云貝)	
*2 清	青水建設	(株)				

\*1 東方工業十份 傳接冊工学創造東班 十份院开 (学开公号)

- \*3 東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所 研究員 (正会員)
- \*4 東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所 准教授(正会員)

素試験体<sup>1)</sup>の横補強筋部を切り出した部位を想定してお り, **表**-1に試験体一覧を示す。R40-0(矩形断面,かぶ り厚さ40mm,目標通電量0mA·h/cm<sup>2</sup>)の試験体は1体, それ以外のシリーズは繰り返し数3とする計40体の試 験体を製作した。試験体名のRは矩形断面の試験体(断 面150mm×150mm,高さ300mm),Cは円形断面の試験 体(直径150mm,高さ300mm)である。また,促進腐食試 験で通電するリード線を接続するために,鉄筋は試験体 上面より約50mm 突出させている。

共通因子はコンクリート圧縮強度(F.30),鉄筋径 (D16),変動要因は断面形状,かぶり厚さ及び鉄筋の積算 電流密度とした。かぶり厚さは,R 試験体は RC 規準 <sup>4)</sup>(40mm)と原子力施設 RC 規準<sup>5)</sup>(60mm)の設計かぶ り厚さを参考にした。C 試験体は JIS コンクリートの割 裂引張強度試験方法に準拠しているが,試験体中央に鉄 筋を配し,かぶり厚さが両面で均等(66mm)になるよう に設計した。R40,R60および C66 シリーズの目標積算 電流密度45,100,100 mA·h/cm<sup>2</sup>は,昨年度の RC 柱腐食 実験結果<sup>1)</sup>に基づいて,ひび割れ発生時の積算電流密度 と想定し,それらを基準にひび割れ発生前後で1ないし 2 段階の目標積算電流密度を設定した。

表-2 にコンクリートの調合,表-3 にコンクリート のフレッシュ性状及び力学特性を示す。コンクリートの 圧縮強度・ヤング係数は,4 週間の気中養生後と促進腐 食実験終了後に行った試験結果の平均値とした。

# 2.2 促進腐食実験方法

試験体は28日間の気中養生後,R試験体はカバーコン クリート面のみから塩化物イオンが侵入することを想定 し,試験体のカバーコンクリート以外の5面にはエポキ シ樹脂コーティングを施した。C試験体は横補強筋間の 腐食ひび割れの連結を想定しており,塩化物イオンの侵 入経路を限定するために,上下面と側面のひび割れを導 入する幅150×50mmの帯状2か所以外は,エポキシ樹 脂コーティングを施した。図-2に電食による促進腐食 実験方法を示す。エポキシ樹脂硬化後,試験体を3%NaCl 水溶液に24時間浸漬し,鉄筋を陽極,銅板を陰極とし て,一定の電圧10Vを通電した。

測定項目は積算電流密度と表面ひび割れ幅である。積 算電流密度は各鉄筋のリード線に 2Ωの抵抗を接続し, データロガーを用いてこの抵抗間の電圧を1時間ごとに 計測した。この電圧から各鉄筋の 2Ω 抵抗間に導入され る電流を求め,促進試験期間中(約 2.5 月間)における積 算電流密度を随時計算し,ひび割れ計測時の鉄筋腐食量 を線形補間によって評価した。表面ひび割れ幅の測定は, 腐食ひび割れの発生以降,分解能 1/100mm のデジタルマ イクロスコープを用いて,試験体を塩水より引き上げた 状態で適宜行った。

表-1 試験体一覧

シリーズ	かぶり 厚さ (mm)	目標積算 電流密度 (mA·h/cm <sup>2</sup> )	コンクリート 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	試験体 数
		0		1
P40	40	22	28.6	3
K40		45	28.0	3
		160		3
		30		3
	60	65	25.2	3
R60		100	35.5	3
		200		3
		400	30.2	3
		0		3
	66	30		3
C66		100	28.8	3
		200		3
		400		3

表-2 コンクリート調合

調合強度	W/C	セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
	(%)	(kg/m <sup>3</sup> )				
Fc30	60	314	188	729	1025	1.2

表-3 フレッシュ性状と力学特性

試験体名	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm²)	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
R40 17.8		3.8	28.6	23.8
D CO	10.0	2.7	35.3	26.0
R60	11.6	2.9	30.2	24.6
C66	12.0	3.5	28.8	24.6



図-2 促進腐食実験概要



図-3 割裂引張試験概要

## 2.3 腐食試験体割裂引張試験

図-3 に促進腐食実験を終了した試験体を用いた割裂 引張試験の概要を示す。割裂引張試験は,試験体の寸法 と同じ長さ 300mm の耐圧板を取り付けた万能試験機を 使用した。カバーコンクリート表面から鉄筋までの腐食 ひび割れ面での割裂引張強度を検討するため,R 試験体 は図-3 のようにカバーコンクリート表面の腐食ひび割 れ発生位置と対面に径 23mm のPC 鋼棒を設置し,C 試 験体は,腐食ひび割れ面が割裂面となるように耐圧板に 直接設置し,割裂引張試験を行った。

# 2.4 腐食鉄筋の質量実測方法

割裂引張試験終了後, 試験体から鉄筋を取り出し, 10% クエン酸アンモニウム水溶液中に 24 時間浸漬させた。 その後, ワイヤーブラシで腐食生成物を完全に除去した 鉄筋腐食後の質量を計測し, 健全時の質量と比較するこ とによって各鉄筋の質量減少量を実測した。

# 3. 実験結果·考察

#### 3.1 腐食鉄筋の質量減少量

表-4 に各シリーズ試験体 3 体の腐食鉄筋の実測によ る単位面積当たりの質量減少量 W<sub>loss</sub> (mg/cm<sup>2</sup>),及び健全 鉄筋からの質量減少率(%)の平均値を示す。さらに表-4 には,積算電流密度からファラデー則を用いて算出し た単位面積当たりの質量減少量 W<sub>cal</sub> (mg/cm<sup>2</sup>)及び質量 減少率(%)を示している。

各シリーズで腐食ひび割れ発生時に鉄筋腐食量を実 測した試験体は, 表-4に赤文字で示している R40-45, R60-100, C66-100 であり,最も促進腐食させた試験体は R40-160, R60-400, C66-400 である。ひび割れ発生前の試 験体,特に R40-22 の実測値 Wloss は理論値 Wcal の値を超 えているが,これは目標積算電流密度に到達後も試験体 をプールに浸していたため,通電期間外に腐食が進行し たことに起因していると思われる。腐食ひび割れ発生時 とひび割れ発生後の Wloss/Wcal を比較すると,いずれのシ リーズにおいても,ひび割れ発生時よりも発生後の方が

#### 表-4 鉄筋質量減少量の比較(平均値)

試験体名						
シリーズ	積算 電流密度	W <sub>loss</sub>	W <sub>cal</sub>	W <sub>loss</sub>	W <sub>cal</sub>	$W_{ m loss}$ / $W_{ m cal}$
	(mA·h/cm <sup>2</sup> )	(%)	(%)	(mg/cm <sup>2</sup> )	(mg/cm <sup>2</sup> )	
	22	0.84	0.75	25	23	1.12
R40	45	1.00	1.59	30	48	0.63
	160	4.33	5.62	130	169	0.77
	30	0.61	1.04	18	31	0.59
	65	0.63	2.25	19	68	0.28
R60	100	1.69	3.49	51	105	0.49
	200	3.88	7.11	117	214	0.55
	400	9.58	13.8	288	417	0.69
	30	0.66	1.04	20	31	0.63
C66	100	1.68	3.46	51	104	0.49
	200	3.97	6.94	119	209	0.57
	400	10.2	13.8	307	417	0.74

\* ひび割れ発生時の試験体は赤文字で示している。

大きくなる傾向がある。図-4 には各シリーズの全ての 試験体の積算電流密度と鉄筋腐食量の関係を示しており, ◇はひび割れ発生前,□はひび割れ発生時,○はひび割 れ発生後のマーカーである。縦軸は黒文字が鉄筋の単位 面積当たりの質量減少量(mg/cm<sup>2</sup>),赤文字が質量減少率 (%)を示す。点線は腐食ひび割れ発生時の鉄筋腐食量, 実線は R40-160, R60-400, C66-400 の平均腐食量と原点 を直線で結んでいる。

目標積算電流密度に対する各試験体の腐食量のばら つきは大きくなく,積算電流密度に基づいて腐食量を推 定するのは妥当であると思われる。ただし,R40シリー ズのひび割れ発生前の腐食量は,前述の理由により実線 より大きくなっているが,R60とC66シリーズでは,実 線より下側になっている。これは既往の研究<sup>10</sup>のように, 腐食量が積算電流密度に比例するとして,最終腐食量か らひび割れ発生時の腐食量を線形補完すると,過大評価 になる。本実験の場合,最終積算電流密度160mA·h/cm<sup>2</sup> で約2割,400mA·h/cm<sup>2</sup>で約3割,ひび割れ発生時の腐 食量を過大評価することになり,注意が必要である。

# 3.2 ひび割れ発生時の鉄筋腐食量



腐食ひび割れがコンクリート表面に到達する鉄筋腐食

量 W<sub>cr</sub>(mg/cm<sup>2</sup>)に関しては、かぶり厚さ(c)と鉄筋径(d) の比に依存する(1)式が提案のされている。

$$W_{cr} = 10 \times c/d \tag{1}$$

図-5 には、本実験で腐食ひび割れ発生時に鉄筋を取 り出した試験体 R40-45, R60-100, C66-100 の鉄筋腐食量 を■マーカーで,既往の研究 <sup>1), 2), 3)</sup>で示されているひび 割れ発生時の鉄筋腐食量を白抜きで併せてプロットして いる。実線は(1)式,破線は(1)式の3倍の腐食量を示し ている。既往の研究心では、ひび割れ発生時の鉄筋腐食 量を,促進腐食実験終了後に鉄筋の質量減少量を計測し, 線形補間によって算出している。本実験のデータはひび 割れ発生時に鉄筋を取り出し, 質量減少量を実測したも のであるため,既往の研究と比較して(1)式に近い値を示 している。3.1節で述べたように、ひび割れ発生前後で腐 食速度が異なることと,既往の研究では主筋と横補強筋 間でマクロセルが形成されたことが原因と思われる。

橘高ら<sup>2)</sup>は試験体の全面を NaCl 水溶液に浸漬させ,鉄 筋に 30V の高電圧を与えた促進腐食実験,本間ら<sup>3)</sup>は乾 湿繰り返しによる暴露実験の結果であり、両者ともひび 割れ発生時に腐食量を測定しているが、実験条件もひび 割れ発生時の腐食量に影響を及ぼすことがわかる。

#### 3.3 通電時間-積算電流密度関係

図-6 には各シリーズの中で最も促進腐食させた試験 体 R40-160, R60-400, C66-400 のデータロガーで計測し た積算電流密度と通電時間の関係を示している。□マー カーは腐食生成物出現時であり、表-4のひび割れ発生 を想定した積算電流密度より若干小さい。積算電流密度 は腐食量と関係しており,図の勾配は腐食速度を意味し ている。カバーコンクリートが 40mm と薄い R40 試験体 は、最も腐食速度が速く、C66はR60と比較してカバー コンクリートは厚いが、塩化物イオン・水分が両面から 侵入しているため,腐食速度が速くなっている。ひび割 れ発生前の腐食速度はほぼ一定であるが、ひび割れ発生 後,塩化物イオンや水分が鉄筋位置まで浸透するため, 通電量が徐々に上昇し、腐食速度が加速している。した がって、表 - 4の  $W_{loss}/W_{cal}$  はひび割れ発生後大きくなり、 ひび割れ後の増分に対しては、1に近づいている。

# 3.4 腐食ひび割れ挙動

図-7 に各シリーズの最長促進腐食試験体 R40-160, R60-400, C66-400の最終腐食ひび割れ性状を示す。ひび 割れ幅の計測位置は、各試験体表面を上・中・下部と3 分割し、その3区間の中で最大ひび割れ幅を記録した区 間を赤丸で示している。図-8には,鉄筋腐食量(線形補 間)とコンクリート表面の最大ひび割れ幅の関係を示し ている。C66シリーズ試験体は両面でかぶり厚さは同等 であるが、どちらか一方の表面に腐食ひび割れが生じる と,その部位へ腐食生成物が集中し流出するため,対面











R40-160-No.2

R40-160-No.3







R60-400-No.2







C66-400-No.1 C66-400-No.2 図-7 試験体腐食ひび割れ最終状況

C66-400-No.3



にひび割れは検出できなかった。図-6よりひび割れ発 生後、鉄筋の腐食速度は上昇し続けるため、各シリーズ 促進腐食実験が完了するまで、ひび割れ幅が拡幅し続け ていることが確認できる。ひび割れ幅特有のばらつきが 見られるものの、全体的な傾向として、ひび割れ幅が 0.4mm を超えると、ひび割れ幅の上昇が緩やかになる。 これは、ひび割れ幅が大きくなると、腐食生成物がひび 割れを通して試験体の外へ流出する量も多くなり、拡幅 する圧力が減少したためと思われる。また, R40, R60 及 び C66 シリーズ試験体の鉄筋腐食量 120 mg/cm<sup>2</sup> 時にお けるひび割れ幅を比較すると,それぞれ 0.35~0.65 mm, 0.30~0.51 mm 及び 0.45~0.75 mm となり, 各試験体で± 0.1~0.15 mm 程度の差異がある。R60 が R40 より小さい のは、カバーコンクリート部へ侵入する腐食生成物が多 くなるため, また, C66 シリーズのひび割れ幅が最も成 長するのは、円形断面のためカバーコンクリート部の容 量が小さく、セメントペーストの細孔部へ進入できない 腐食生成物が,ひび割れ面に集中するためと考えられる。 鉄筋腐食量と共にひび割れ幅は拡大する傾向はあるが, 表面の腐食ひび割れ幅から内部鉄筋の腐食量を推定する 場合、かぶり厚さ・形状の影響も考慮すべきである。

# 3.5 腐食試験体割裂引張試験

表-5 に各シリーズの割裂引張強度の平均値を示す。 図-9には、腐食ひび割れ発生前後のR40, R60, C66 試 験体について、割裂引張試験後の割裂面の写真を示す。 図-9の▼は、塩水に浸した面、あるいは腐食ひび割れ が進展した面(以下割裂面外側とする)を示している。割 裂引張強度の算出は、以下の(2)式を用いた。

$$\sigma_t = 2P/\pi \, dl$$

ここに, σ<sub>t</sub>は割裂引張強度(N/mm<sup>2</sup>), P は最大荷重(kN), dは試験体の高さ(Rシリーズ)・直径(Cシリーズ)(mm) であるが、本試験体では鉄筋最外径を除いた 132mm と した。1は試験体長さ 300mm である。図-10 に(2)式に よる鉄筋腐食量と割裂引張強度をプロットしている。

図-9に示すように、R60-400-No.1 は腐食ひび割れが 塩化物イオン侵入側のみに進展し、反対側はほとんど進

表-5 割裂引張試験結果(平均値)

試調	験体名	Р	σ <sub>t</sub>	$\sigma_{t}$ (corr.)			
シリーズ	積算電流密度 (mA·h/cm²)	(kN)	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )			
	0	86.0	1.38	甘油			
D 40	22	98.3	1.58	▲ 単 → 融休			
K40	45	94.2	1.51	武 澳 冲			
	160	67.8	1.09	0.24			
	30	91.6	1.47	基準			
	65	102	1.64	試験体			
R60	100	86.0	0.95	0.95			
	200	53.3	0.86	0.11			
	400	43.9	0.71	0.00			
	0	110	1.77	甘油			
	30	115	1.85	本 毕 封 殿 休			
C66	100	115	1.85	武 澳 冲			
	200	84.2	1.35	0.88			
	400	71.1	1.14	0.46			





R40-45-No.1

R40-160-No.3

R40-22-No.2





R60-100-No.2



R60-30-No.1





C66-100-No.2 C66-400-No.3 ▼ は腐食ひび割れ進展側

図-9 各シリーズの代表的な割裂ひび割れ面

(2)



展しなかった。さらに、C66シリーズ試験体に生じた表 面ひび割れは、3.4節で述べたように両面ではなく一方 の面のみ腐食ひび割れが拡幅し続け、特に C66-400-No.3 は、割裂面外側に大量の腐食生成物が確認できるが、割 裂面内側は割裂面外側と比較して腐食生成物の残留量が 少ない。そのため、(2)式で算出した割裂引張強度は、健 全部分の割裂引張強度と腐食ひび割れ面の割裂引張強度 を平均化して評価している。そこで、図-9に示すよう に試験体内部の損傷が少ないことから、(2)式による割裂 引張強度がほとんど変わらなかった腐食ひび割れ発生前 の試験体(図-10の黄色の囲み)の平均を健全ひび割れ 面の割裂引張強度とし, 健全ひび割れ面が負担する荷重 分を差し引いて,腐食ひび割れ面のみに対する割裂引張 強度  $\sigma_t$  (corr.)を推定した。表-5 に  $\sigma_t$  (corr.)として, また 図-10に白抜きマーカーで示す。ただし、割裂引張試験 に潜在する誤差や健全部鉄筋周りの多少の損傷の影響で 負となる場合はゼロとしている。R シリーズ・C シリー ズ両試験体共に、腐食ひび割れ面の割裂引張強度は、ひ び割れ発生後、著しく低下し、ほぼ消失する試験体もあ り、わずかな衝撃で剥落する可能性があると思われる。

#### 4. まとめ

矩形,円形断面を有する RC 試験体を用いて,促進腐 食実験及び腐食試験体の割裂引張試験を行った。ひび割 れ発生前後における鉄筋の質量減少挙動の相違及び鉄筋 腐食によるカバーコンクリート剥落の危険性を検討し, 以下の結論を得た。

- (1) 設定した積算電流密度に対する各試験体の腐食量の変動は大きくなく、積算電流密度に基づいて腐食量を推定するのは適当であるといえる。
- (2) コンクリート表面の腐食ひび割れ幅から内部鉄筋の腐食量を推定する場合,かぶり厚さ及び断面形状の影響も考慮する必要がある。
- (3) 腐食ひび割れ発生後,腐食速度が加速するため,ひ び割れ発生時の腐食量を積算電流密度に対する線

形補間により求める際は、最終積算電流密度に応じて 2~3 割減ずる必要がある。

(4) 鉄筋腐食した試験体の割裂引張強度は、ひび割れ発生前から直後は、内部の損傷量が少ないため健全試験体との差は確認できなかった。ひび割れ発生後、鉄筋腐食量の増加に伴ってひび割れ幅が拡幅すると、ひび割れ損傷部に腐食生成物が堆積する量も増加し、割裂引張強度は大幅に低下した。

# 謝辞

本研究で使用した鉄筋は東京鉄鋼(株)からご提供い ただきました。また、本研究の一部は原子力規制庁の高 経年化技術評価高度化事業ならびに東京工業大学応用セ ラミックス研究所の全国共同利用によりました。ここに 関係各位に厚く御礼申し上げます。

# 参考文献

- 1) 覚張雄一郎,山本発,福井響,篠原保二,大村哲矢: RC 柱における鉄筋腐食による腐食ひび割れおよび 横補強筋挙動,日本建築学会大会学術講演梗概集(関 東), No.23031~23033, pp.61-66, 2015.9
- 橘高義典, LE PHONG NGUYEN, 塚越雅幸, 松沢幸 ー:鉄筋コンクリート表面のひび割れ発生時の鉄筋 腐食量に関する検討, コンクリート工学年次論文報 告集, Vol.33, No1, pp.1145-1150, 2011.7
- 本間大輔,米沢敏男,押田文雄,山口善弘,岡本博 史,中尾正純:鉄筋の腐食ひび割れ発生限界腐食量 に関する研究,日本建築学会構造系論文報告集, No.701, pp.867-876, 2014.7
- 4) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準・同 解説,2010
- 5) 日本建築学会:原子力施設鉄筋コンクリート構造計 算規準・同解説,2013
- 6) 土木学会:鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向(その2),コンクリート技術シ リーズ40, pp185-193,2000.1