論文 鉄筋腐食ひび割れ幅による鉄筋腐食量の推定に関する研究

道正 泰弘^{*1}·小島 正朗^{*2}

要旨:鉄筋コンクリート(RC)構造物の劣化は主に鉄筋の腐食に起因することから,簡便に鉄筋の腐食状態を評価することができると効果的である。本研究では,鉄筋の腐食が始まり RC 部材が劣化する過程において,コンクリート表面の外観変化,すなわち,ひび割れの発生状況から鉄筋腐食の進行程度を簡便に評価する手法の確立を目的に検討を行った。その結果,鉄筋径やかぶり厚さなどの情報があれば,腐食量を予測できる可能性があることが明らかになった。

キーワード:鉄筋腐食,ひび割れ幅,中性化,塩害,腐食量,建築物

1. はじめに

鉄筋コンクリート(RC)構造物の劣化は主に鉄筋の腐食 に起因することから,簡便に鉄筋の腐食状態を評価する ことができると効果的である。ひび割れ発生限界の鉄筋 腐食量に関する研究は,解析的な検討^{例えば1)},丸鋼や異 形鉄筋を使った電食^{例えば2)},乾湿繰り返し^{例えば3)},自然曝 露による実験^{例えば4)}など,多くの研究が行われている。 ひび割れ発生時の腐食量の予測式としては,森永の式⁵⁾, 元らの式⁶⁾が提案されている。しかし,鉄筋腐食が進行 してコンクリート表面に生じた腐食ひび割れ幅に着目し, 鉄筋腐食量を推定しようとする研究はあまりみられない。

塩害による腐食生成物と中性化によるによる鉄筋腐食 で生じる腐食生成物で錆の形態が異なると指摘されてい ることから,鉄筋腐食のひび割れ進展を予測するには, 劣化要因を考慮した試験体を用いて評価することが望ま しいと考えられる。本研究は,建築物のRC部材を対象に 鉄筋の腐食が始まり構造物が劣化する過程において,コ ンクリート表面の外観変化,すなわちひび割れの発生状 況から,鉄筋腐食の進行程度を簡便に評価する手法の確 立を目的に検討を行った。具体的には,表面ひび割れ幅 からの腐食量の推定方法,ならびに腐食量が剥離応力に 及ぼす影響を元に,劣化レベルの判定指標を検討した。

2. 実験概要

実験は、腐食量とひび割れ幅の関係についての検討(シ リーズI)と腐食ひび割れに及ぼす鉄筋ピッチの影響に 関する検討(シリーズII)の2つのシリーズで実施した。 表-1に各シリーズの実験因子および水準,表-2に 実験に用いたコンクリートの調合とフレッシュ性状を示 す。調合は、30年程度前の一般的な建築物に使用された コンクリートの設計基準強度(Fc=18~21N/mm²程度)を 得るための調合とし、水セメント比は56%と60%とした。

使用材料は、セメントには普通ポルトランドセメント、 細骨材は鹿島陸砂(粗粒率:2.65、表乾比重:2.62g/cm³、吸 水率:2.13%),粗骨材には岩舟産砂岩(粗粒率:6.64、表乾 比重:2.66g/cm³、吸水率:0.88%),混和剤には AE 減水剤標 準型を使用した。塩害と表記した試験体には、市販の人 工海水を用いて塩化物イオンを混入(Cl⁻=2.4kg/m³)した。 2.1 シリーズ I

シリーズIでは、柱や壁等の鉛直部材を想定し、ひび 割れ発生時の腐食量、およびひび割れ幅と腐食量の関係 について検討を行った。劣化因子は、中性化および塩害 とし、これらの劣化を模擬したコンクリート試験体を作 製し電食より腐食させた。通常の電食は塩水中に浸漬し た状態で実施されるが、鉄イオンが溶出してしまい膨張 圧が生じにくく腐食の進行によるひび割れの進展が小さ いと考えられることから、本研究では気中での電食試験 を行った。なお、実際の中性化や塩害ではなく電食によ

表一1 実験因子および水準

	実験因子	シリーズ I	シリーズⅡ						
	部材モデル	鉛直部材(柱,壁)	水平部材(スラブ, 梁下)						
	劣化因子	中性化,塩害	塩害						
	鉄筋種類※	D13, D16	D16						
	かぶり厚さ	15mm, 30mm, 45mm	30mm						
	鉄筋ピッチ	150mm	50mm, 75mm, 100mm						
Ĩ	※いずれも黒皮付き異形棒鋼 SD345								

表-2 本検討に用いたコンクリートの調合およびフレッシュ性状

宝酔シ	劣化因子	試験体数 (体)	目標	目標	水セメ	塩化物	単位量(kg/m ³)				フレッシュ性状		
天歌イ			スランプ (cm)	空気量	ント比	イオン量	-	カナント	细母社	苦留さ	AE [™]	スランプ	空気量
9 ×				(%)	(%)	(kg/m^3)	八	小 ビメンド	邢田 月 111	租用羽	減水剤	(cm)	(%)
T	中性化	11	18±2.5	4.5±1.5	60	0	177	7 295	886	920	2.95	20.5	4.4
1	塩害	4				2.4						20.5	6.4
П	塩害	3	21 ± 2.5	4.5 ± 1.5	56	2.4	189	336	850	891	3.36	22.5	5.5
※リグニンスルホン酸塩・オキシカルボン酸塩系													

*1 東京電力(株)博士(工学) (正会員)

*2 (株)竹中工務店 技術研究所 工修(正会員)

る腐食であることから、本来はコンクリート中に塩化物 イオンが存在する中での電食は塩害模擬、コンクリート を鉄筋位置まで中性化した試験体の電食は中性化模擬の 試験体であるが、本研究ではこれらを便宜的に塩害、中 性化と表記した。

鉄筋には一般的な建築物に使用されているD13および D16を用い、かぶりを15mm、30mm、45mmの3水準に変 化させた。なお、鉄筋ピッチは150mm一定とした。

(1) 試験体

試験体の形状および寸法を図-1に示す。表-2に示 した水セメント比 60%のコンクリートを用い、中性化用 11体,塩害用4体の合計15体の試験体を用意し,鉄筋 に導通用コードを取り付けエポキシ樹脂でコーティング した。主筋と配力筋の交差部には、配力筋に絶縁テープ を巻いた。コンクリートを打込み脱型した後、試験面以 外の4面に樹脂モルタルを塗布した。材齢28日まで気中 養生を行い、その後中性化試験体は、高濃度の炭酸ガス 雰囲気下でかぶり深さまでコンクリートを中性化させた。

(2) 電食方法

20℃湿度 95%以上の室内にて、図-2に示すように鉄 筋に電流を流入させ電食させた。塩害試験体は材齢 50 日から電食を開始し、中性化試験体は、全ての試験体の 中性化処理が終了した後(材齢 150 日)から開始した。コ ンクリート面に配した陰極は、電食中に表面ひび割れが 目視観察できる形状とし、電極とコンクリート間の接触 抵抗を下げる目的で電解液を用いた。

(3) 試験項目および方法

200

電食時には通電量と表面のひび割れ幅の記録を行っ た。ひび割れの測定は、表面側の2本の鉄筋を対象とし、 マイクロスコープを用いて目視によりそれぞれの最大ひ び割れ幅を測定した。また、それぞれの鉄筋の中央部1 箇所と鉄筋交差部2箇所の変位を、コンタクトゲージに て測定した(以下,表面変位と称す)。電食を終了した後, 試験体から鉄筋をはつり出してクエン酸二アンモニウム 10%と 2-メルカプトベンゾチアゾール 150ppm 溶液に 1 時間浸漬後、ワイヤーブラシで除去して重量減少率を求 めた。同様に、試験に用いていない鉄筋の質量減少率を 測定し、計算により腐食区間に対する腐食量を求めた。



2. 2 シリーズⅡ

表-1に示した実験因子により、腐食ひび割れに及ぼ す鉄筋ピッチの影響およびひび割れの発生が、かぶりコ ンクリートの剥離に及ぼす影響に関する検討を行った。

(1) 試験体

試験体の形状および寸法を図-3に示す。スラブ、梁 下等の水平部材を想定し,表-2に示した W/C=56%の コンクリートを用い,鉄筋は D16,かぶり厚さは 30mm 一定とし,鉄筋ピッチを 50mm, 75mm, 100mm の 3 水 準に変化させた試験体を各1体,合計3体の試験体を用 意した。鉄筋には通電用のコードを取り付け、端部をエ ポキシ樹脂でコーティングした。厚さ 200mm のスラブ を模擬してコンクリートを打込み、下面の主筋を電食さ せた。試験体は目標とする腐食量が 40mg/cm², 60mg/cm² となるよう電食させた。なお、小口面のひび割れの観察 を目的としたため、樹脂モルタルは塗布していない。

(2) 電食方法

主筋それぞれに対して1台の直流安定化電源用いた。



200

300

材齢50日から電食を開始した。

(3) 試験項目および方法

電食時には通電量と小口面のひび割れ幅と表面のひ び割れ幅をコンタクトゲージ(鉄筋の端部,中央部,交差 部に設置)とマイクロスコープで測定した。電食終了後, ひび割れ領域を確認する目的で,小口面のひび割れから インクを染み込ませたのち,図-4に示すように配力筋 を反力台に載せ主筋を載荷して,かぶりコンクリートの 剥離荷重を測定した。取り出した鉄筋を,クエン酸二ア ンモニウム 10%と 2-メルカプトベンゾチアゾール 150ppm 溶液に1時間浸漬後,ワイヤーブラシで錆を除 去し,同様にして測定した試験に使用していない比較用 鉄筋の重量減少率を差し引いて腐食量を測定した。

3. 実験結果

3.1 シリーズ I

(1)電食試験

中性化および塩害模擬試験体のそれぞれについて,積 算電流量と実測腐食量の関係を図-5に示す。なお,図 中には,積算全電流が腐食に全て費やされたとして,フ ァラデーの法則から求めた腐食量も併せて示した。これ によると,電食の効率は約30~50%程度であったが,積 算電流量と実測腐食量はそれぞれの条件において正比例 の関係があることが確認できた。

(2) ひび割れ発生時の腐食量

電食試験時に試験面にひび割れが確認された時点での 積算電流量から、図-5中に示した各種類の関係式を用 い、ひび割れ発生時の腐食量を図-6に求めた。ひび割 れ発生時の腐食量 Q_0 は、ばらつきが大きく鉄筋径やかぶ り厚さでも異なるが、黒皮付き異形鉄筋を用いた既往の 実験ⁿの値と概ね近似している。一方、丸鋼を用いた既 往の実験⁵⁾と比較すると、腐食量自体も大きくなる。こ のことは、武若らの実験²⁾でも丸鋼を用いた場合に比べ て異形鉄筋では大きくなる結果が得られている。本実験 では、中性化と塩害模擬で有意な差は認められなかった。

(3) ひび割れ幅と腐食量の関係

中性化および塩害模擬試験体毎のひび割れ幅と腐食量

の関係を図-7および図-8に示す。図中には、図-6 におけるひび割れ発生時の腐食量の平均値をy切片とす る回帰式を示した。ばらつきが大きいものの、既往の研 究^{例えばの}の腐食量とひび割れ幅の関係式と同様に、ひび 割れ幅の増大に比例して腐食量が大きくなる傾向が認め られた。

図-9にかぶり厚さの逆数と、図-7,図-8の回帰 式の傾きaとしてひび割れ幅が1mm広がるときの腐食量 の関係を示す。中性化試験体では、かぶり厚さの逆数と 回帰式の傾きaは比例関係にあることがわかる。かぶり 厚さが小さいほどひび割れ幅が広がるときの腐食量が大 きく、細径鉄筋のほうが腐食量は大きくなっている。一 方、塩害の場合には、中性化の場合より少ない腐食量で ひび割れが開く傾向で、かぶり厚さや鉄筋径の影響は不 明確であった。全体的にばらつきの大きな実験であり、 精度向上の課題はあるが、概ね傾向を捉えていると考え られる。塩害についても中性化の場合と同じ傾きaの値 を用いれば、精度は低くなるが安全側に腐食量を推定で きるため、簡易診断としては有効と考えられる。











以上から,腐食量の推定式をひび割れ発生時の腐食量 とひび割れ幅を広げる際の腐食量の合計値として求める 式(1)の形で表し,実験データから各係数を求めた。

ひび割れ発生時の腐食量 Q_0 は,厳密には様々な条件で 異なるが、ここでは、中性化の場合は 15mg/cm^2 ,塩害に よる場合は 20mg/cm^2 とした。

$$\Delta \mathbf{Q} = \mathbf{Q}_0 + \mathbf{a} \cdot \mathbf{w} / \mathbf{C}$$

C:かぶり厚さ(mm) w:ひび割れ幅(mm)

Q₀: ひび割れ発生時の腐食量

ここに、 ΔQ: 現在の腐食量 (mg/cm²)

中性化による腐食の場合: $Q_0=15 mg/cm^2$

塩害による腐食の場合 : Q₀=20mg/cm²

a:鉄筋径によって決まる定数(有効数字2桁に丸めた) ひび割れ幅の場合, D13では6900, D16では6000

図-10は、D13 ピッチ 150mm の試験体の鉄筋 1 本毎にマイクロスコープによるひび割れ幅と表面変位 の平均値の関係を示したものである。両者はかぶり厚 さ15mm では 0.2~0.3mm 程度,かぶり厚さ 30mm では 0.6mm 程度まで、いずれの試験体も良く対応している。 表面変位が平均的なひび割れ幅を示すのに対し、マイ クロスコープによるひび割れ幅は最大値を測定している ため、ひび割れが進展すると両者の差が大きくなる。平 均的なひび割れ幅を用いて評価する場合いは表面変位に よるひび割れ幅のほうが適切であり、図-7~図-9の 横軸を表面変位で表すと、式(1)における a の値は、D13 では 11300、D16 では 5300 が得られた。



3. 2 シリーズⅡ

(1) 腐食量とひび割れの経時変化

腐食量とひび割れ幅の進展の関係を図-11に示す。 電食終了後のひび割れ状況を図-12に示す。主筋の平 均腐食量はひび割れ計測時の積算電流量に,実測した腐 食量と最終の積算電流量の比率を乗じて計算により求め た。また,ひび割れ幅は主筋のそれぞれの小口と表面に 生じた最大ひび割れ幅を抽出し,その平均値で示した。 ①ピッチ 50mm の場合:腐食量 9mg/cm²で小口面にひび 割れが発生し,腐食の進行とともに小口面のひび割れ幅 は最大 0.7mm まで広がったが,表面にはひび割れが生じ なかった。

②ピッチ 75mm の場合: 腐食量 19mg/cm² で小口面にひ び割れが発生し,最大幅 1.1mm のひび割れが生じた。腐 食が進展すると表面にも4本中2本の鉄筋に最大0.7mm のひび割れが生じた。

③ピッチ 100mm の場合:腐食量 22mg/cm²のときに小口 面と表面でほぼ同時にひび割れが生じ,その後のひび割 れは表面のひび割れの方が卓越し,最大 1.2mm となった。

以上のように,鉄筋ピッチによってひび割れの発生パ ターンが異なり,腐食の進展に伴うひび割れ幅の広がり も変化する。このことを考慮すれば,表面にひび割れの 生じる鉄筋ピッチが75mm程度以上であれば表面のひび 割れ幅の情報から劣化状態を推定できる可能性がある。

(2) 剥離荷重

図-13に主筋の平均腐食量と剥離応力の関係を示す。 剥離応力は健全なものでも 0.5~0.6N/mm² 程度であり, 母材であるコンクリートの割裂引張り強度の試験値 2.6 N/mm²に対し,約1/4 程度と小さかった。これは,鉄筋 面が欠陥となっていること,試験時の応力状態が一様で なかったことなどが理由として考えられる。なお、シリ ーズIIでは,電食の効率を考慮して塩化物イオンを混入 した鉄筋径 D16 の試験体としている。鉄筋径の影響は確 認できていないが,既往の研究によれば,鉄筋径が大き いほうがひび割れ発生腐食量は小さい傾向ⁿや,かぶり 厚さが同じであればひび割れ幅が広がる際の腐食量は鉄 筋径が太いほど大きくなる式が提案されている^の。

剥離応力は、ひび割れの進展とともに低下すると考え られることから、D16よりも太径の鉄筋は同じ腐食量で はひび割れが進展せずに剥離応力が低下しない傾向とな るため、D16で得られた試験結果で判断しても安全側で あると考えられる。本実験結果の範囲では、健全なもの に対し、腐食量が 40mg/cm²程度までであれば、剥離応 力の低下は僅に低下する程度である。さらに腐食が進行 して 50mg/cm² 程度になると急激に低下し, 健全なもの の 1/2 程度になり, 60 mg/cm² 程度では健全なものの 1/3 程度まで低下する。健全なものの 1/2 を使用性に問題あ りの閾値とし, 1/3 を使用性の寿命の閾値と想定すれば, 鉄筋径 D16, かぶり厚さ 30mm の条件では, 腐食量 40~60mg/cm²が使用性の注意域, 60mg/cm²以上が使用性 の寿命と判断される。

4. 腐食量推定と劣化レベルの判定

4.1 ひび割れ幅からの腐食量推定

図-14は,鉄筋ピッチと表面変位の関係を一定の腐 食量(平均値で10,20,30,40,50 mg/cm²)ごとに示したも のである。これによると,腐食量が20~50mg/cm²と大き くなるのに伴い,それぞれの腐食量において,鉄筋ピッ チに比例して表面変位は大きくなる。今回の実験におけ





図-12 ひび割れ発生状況

るひび割れ発生時の平均表面変位が0.046mmであったこ とから,鉄筋ピッチ55mm以下では,腐食量が大きくな ってもひび割れは生じないと判断され,これは,図-1 2に示した表面にひび割れが生じていない結果と整合す る。鉄筋ピッチ150mmでのひび割れ幅を1とすると,図 -14の関係を用いると鉄筋ピッチを@とすると,係数 (@-50)/100を乗じることでひび割れ幅に鉄筋ピッチの影 響を考慮することができる。これ用いて,式(1)から導い た式(2)により,現在の腐食量 \angle Qを求めることができる。 \angle Q = Q₀+a・w・(@-50)/D/100 式(2)

ここに、 △Q:現在の腐食量 (mg/cm²) D:かぶり厚さ (mm) w:ひび割れ幅 (mm)

- Q₀:ひび割れ発生時の腐食量

中性化による腐食の場合:15mg/cm² 塩害による腐食の場合:20mg/cm²

④:鉄筋のピッチ(適用範囲:50~150mm)

a:鉄筋径によって決まる定数(有効数字2桁に丸めた) ひび割れ幅の場合:D13では6900,D16では6000 表面変位の場合:D13では11300,D16では5300

4.2 劣化レベルの判定指標

本検討から得られた腐食量の閾値を用いた劣化レベ ルの判定指標を表-3に示す。なお、参考として既往の 鉄筋腐食確率の参考値⁸⁾を示す。使用性は、かぶりの剥 離のみを対象としている。これは、本研究で設定した使 用性の注意域は、剥離・剥落による公衆災害への影響の リスクとし、一方、使用性の寿命は、剥離による部材断 面の欠損により構造性能として問題があるものとした。

5 まとめ

建築物の RC 部材を対象に,表面ひび割れから鉄筋腐 食量を簡便に評価する手法の確立を目的に検討を行った。 (1)コンクリート表面に生じる鉄筋腐食に起因するひび 割れの幅はばらつきが大きいが,鉄筋径やかぶり厚さ

- などの情報があれば,腐食量を予測できる可能性があ ることが明らかになった。
- (2)鉄筋ピッチの異なる試験体の腐食量とひび割れ発生 パターンを検討した。その結果,鉄筋ピッチが既知で かつ75mm以上であれば,表面ひび割れが生じるため, そのひび割れ幅から劣化状態を評価できる可能性が あることが確認された。
- (3)鉄筋ピッチによって表面に生じるひび割れ幅と腐食量の関係が異なるため、この影響を考慮すれば、表面のひび割れ幅から鉄筋の劣化状況を評価できる可能性がある。今後は、実構造物での検証が必要となる。
- (4)鉄筋の腐食量が剥離応力に及ぼす影響から,劣化レベルの判定指標として使用性の注意域,使用性の寿命の 腐食量の判定値(閾値)を提案した。



表一3	劣化レベルの判定指標
10 0	

ダル		判定値			
ショーレー	劣化状態	腐食量	腐食確率※		
V)V		(mg/cm^2)	(%)		
А	微小なひび割れ程度で問題なし	0~20 未満	7 未満		
В	各所にひび割れが発生する	20~40 未満	7~15 未満		
C	浮きが生じ各所に剥落があり、使	40- (0 土)进	15-20 土港		
C	用性に問題あり(使用性の注意域)	40~60 木両	15~50木油		
D	鉄筋の断面が欠損し、部材性能に		20 121 1-		
D	問題あり(使用性の寿命)	60 以上	30 以上		
\•/ bi		・河の主体い	山云陸市		

※鉄筋腐食確率の参考値⁸⁾のうち,「柱・梁の主筋以外で障害 を与える可能性が有る」鉄筋の閾値から引用。

参考文献

- 須田 久美子, MISRA Sudir, 本橋 賢一: 腐食ひび 割れ発生限界量に関する解析的検討, コンクリート 工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.751-756, 1992
- 武若 耕司,松本 進:コンクリート中の鉄筋腐食が RC 部材の力学的性状に及ぼす影響,第6回コンク リート工学年次論文講演会報告集,pp.177-180,1984
- 伊澤 純平,松島 学,横田 優:腐食ひび割れ発生 限界腐食減量に関する一考察,土木学会第 59 回年 次学術講演会, pp.515-516, 2004.9
- 4) 横田 優, 佐々木 孝彦, 飯島 亨, 松島 学: 塩害に より鉄筋が腐食したコンクリートの劣化予測, コン クリート工学年次論文集, Vol.26,No.1, pp.1041-1046, 2004
- 5) 森永 繁:鉄筋腐食速度に基づいた鉄筋コンクリー ト建築物の寿命予測に関する研究,東京大学学位論 文,昭和61年
- 6) 元 路寛,関博:鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ発生状況及びひび割れ幅に関する研究,土木学会論文集,No.669/V-50, pp.161-171, 2001
- 橘高 義典, LE PHONG NGUYEN, 塚越 雅幸, 松沢 晃一: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 集, Vol.33, No.1, pp.1145-1150, 2011
- 8) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建築物の耐久設 計施工指針(案)・同解説,2004