

論文 鉄筋腐食に及ぼすコンクリートのひび割れと中性化の影響

柳 濟峻*1・大野 義照*2・飯田 隆史*3

要旨: コンクリートの中性化促進を行ったRC梁試験体を用いて、ひび割れの有無、かぶり厚さ、および水セメント比の鉄筋腐食への影響を調べた。腐食促進試験ではアノード想定丸鋼とカソード想定ステンレス棒との間を流れる腐食電流を測定し、試験後は丸鋼の腐食による重量減を測定した。試験の結果、ひび割れがある試験体はひび割れ位置を中心として引張側に激しい腐食が発生した。中性化が鉄筋位置まで進行した試験体では全面にわたって腐食が生じた。ひび割れの腐食速度への影響は、未中性化域では大きく、中性化域では少なくなった。

キーワード: 鉄筋腐食, 中性化, ひび割れ, 水セメント比, かぶり厚さ, 腐食電流, 分極抵抗

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート造の経年劣化による耐久性の低下が問題となり、その原因究明・対策技術が重要な課題となっている。コンクリート中の鉄筋腐食に関しては多数の研究が行われており、コンクリートの中性化からみた鉄筋腐食限界は、塩分を含まない場合はフェノールフタレイン法によって計測した中性化深さより6~8mm 中性化深い部分である¹⁾ことや、中性化域の腐食速度は未中性化域の2~3倍程度大きくなる²⁾ことなどが報告されている。しかし、ひび割れが生じたコンクリートの鉄筋腐食については明らかにされていない。

筆者らは既報告において中性化していないコンクリートにおいてひび割れ有無、コンクリートの水セメント比、かぶり厚さなどの鉄筋腐食に及ぼす影響を調べてきた^{3, 4)}。本報告では、ひび割れが生じた鉄筋コンクリートの中性化促進を行った後に腐食促進試験を行い、中性化深さ、ひび割れの有無、かぶり厚さ、水セメント比の鉄筋腐食への影響を調べた。本実験では、アノード部とカソード部を分離し、その間を流れる腐食電流を測定することによって直接

腐食の進行を捉えている。

2. 実験概要

2.1 試験体の形状と種類

試験体は、図-1に示すように長さ450mmの鉄筋コンクリートはり中央に露出区間38mmのφ14mmの磨き丸鋼(SS41)(アノード)と、長さ150mm、φ14mmステンレス棒(SUS304)2本(カソード)を埋設したものである(アノード/カソード表面積比=1/7)。試験開始時に丸鋼とステンレス棒はリード線で電氣的に接

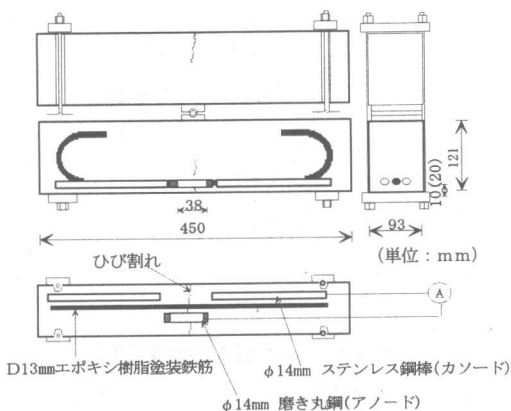


図-1 試験体詳細図

*1 大阪大学 工学研究科 建築工学専攻 (正会員)

*2 大阪大学 工学部 建築工学科 教授 (正会員)

*3 大阪大学 工学部 建築工学科

続しマクロセル電池を形成した。試験体の高さは鋼材のかぶり厚さ 10 mm と 20 mm 共に 121 mm である。試験体幅はいずれも 93 mm で側面をエポキシ樹脂で被覆し側面のかぶり厚さの影響を無くした。なお、ひび割れ試験体は図-1 に示したように載荷した状態で腐食試験に先だって中性化促進を行った。

試験の要因と水準を表-1 に示す。コンクリートの水セメント比は 70%, 55% および 40% で、コンクリートの調合と 28 日強度を表-2 に示す。コンクリートには、普通ポルトランドセメント、水道水、川砂および最大径 15 mm の砕石を用いた。鉄筋のかぶり厚さは 10 mm と 20 mm である。ひび割れ幅は、目標ひび割れ幅が 0 (無載荷状態), 0.1 mm (鉄筋応力 150N/mm²) の 2 水準でそれぞれ N, S の記号で示す。ひび割れ試験体は、同種 2 体の試験体を 1 組として曲げ載荷を行い、ひび割れ幅を持続して中性化促進を行い、その後腐食試験に供した。コンタクトストレインゲージを用いて測定した梁側面鉄筋位置におけるひび割れ幅は、0.03~0.1 mm であ

った。

中性化促進による中性化深さはかぶり厚さの 1/2 とかぶり厚さを目標にした。ただし W/C=40% の場合、かぶり厚さまで中性化させるのが困難で中性化促進期間 t を W/C=55% と同じとし、かぶり厚さ 10mm の場合 2 mm (t=27 日), かぶり厚さ 20mm の場合は 5 mm (t=125 日) になった。また、かぶり 20mm の W/C=70% 場合、目標の 20mm より大きく、35mm になった。

2.2 腐食促進試験法および測定項目

中性化促進は、温度 20℃、湿度 60%、CO₂ 濃度 10% の条件で行った。中性化深さの測定はフェノールフタレイン 1% 溶液の噴霧によった。

腐食促進試験は 65±3℃ の NaCl 3.2% の海水相当塩水中に 24 時間浸漬し、24 時間自然放置乾燥するサイクルを 1 サイクルとする浸漬乾燥試験を行った。試験期間は 35 サイクル (70 日間) である。

測定項目は、アノード想定丸鋼とカソード想定ステンレス棒との間を流れる腐食電流と、引張縁中央部における電気化学的特性値である。腐食電流は無抵抗の電流計、スキヤナおよびコンピューターからなる自動計測システム⁵⁾を用いて 20 分間隔で測定した。電気化学的特性値は 2 極プローブ (Ag/AgCl 照合電極, Pt 対極) と分極抵抗計より構成された非破壊腐食探査装置を用いて、3~5 サイクル毎に測定した。試験終了後には丸鋼をとり出し腐食状況を調べ、アノードの腐食面積、腐食重量減少量を測定した。腐食面積は腐食部分をセロファンに写しとりプランメーターで測定し、腐食重量減少量は 10% クエン酸 2 アンモニウム溶液に浸漬し除錆した後、腐食重量減少量を求めた⁶⁾。なお試験はかぶり厚さ 10mm の試験体と、20mm の試験体に分けて実施した。

3. 試験結果および考察

3.1 腐食状況

表-1 試験の要因と水準

かぶり厚さ(mm)	水セメント比(%)	中性化深さ(mm)
10	40	0, 2
	55	0, 5, 10
	70	0, 5, 10
20	40	0, 5
	55	0, 10, 20
	70	0, 20, 35

試験体名の記号は下の通りである。

(例) N10-40-C10

N : ひび割れ無 (ひび割れ有 : S)

10 : かぶり厚さ 10

40 : 水セメント比 40%

C10 : 中性深さ 10mm

表-2 コンクリートの調合と 28 日強度 F_c

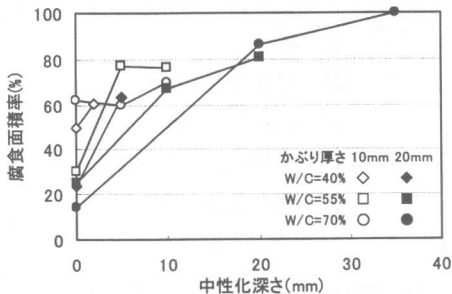
W/C (%)	調合(kg/m ³)				F _c (N/mm ²)
	水	セメント	細骨材	粗骨材	
40	170	425	673	1053	50.8
55	180	327	782	997	37.3
70	190	271	844	953	23.0

腐食試験終了後試験体を割製し、アノード丸鋼の腐食状況を観察した。腐食はひび割れ試験体ではひび割れ位置を中心として引張側に激しい腐食が発生していた。ひび割れがない試験体にもブリージングの影響でコンクリート打込み面の裏側を中心に腐食が生じ、腐食形態は局部腐食型である。しかし W/C=70% の 35mm まで中性化した試験体はコンクリート打込み側まで腐食が生じ、全面に腐食が生じていた。

(1) 腐食面積率⁶⁾

図-2 に中性化深さと腐食面積率との関係を示す。腐食面積率は中性化促進を行っていない試験体より中性化した試験体の方が大きく、また中性化深さが大きくなると腐食面積率も大きくなった。

(a) 図において水セメント比とかぶり厚さとの関係を見ると、かぶり厚さ 10mm, 20mm ともに鉄筋位置まで中性化が進行すると W/C=55% と W/C=70% 試験体の腐食面積率の



(a) かぶり厚さとの関係(ひび割れ有)

差がなくなっている。(b) 図においてひび割れの影響についてみると、W/C=55%, W/C=70% 試験体では中性化がかぶり厚さまで進行してもひび割れ試験体の方が大きい。しかし、35mm まで中性化が進行した W/C=70% 試験体ではひび割れの有無に関係がなく 100% 腐食した。

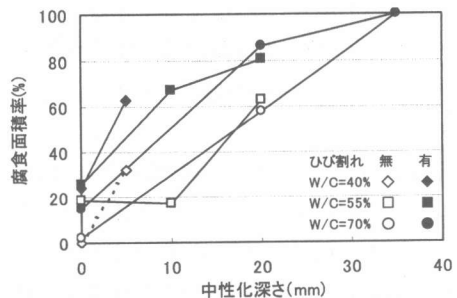
(2) 腐食速度 (mdd)

腐食速度は腐食による重量減少量をアノード鉄筋表面積と試験日数との積で除して式(1)により求めた⁶⁾。

腐食速度 (mdd)

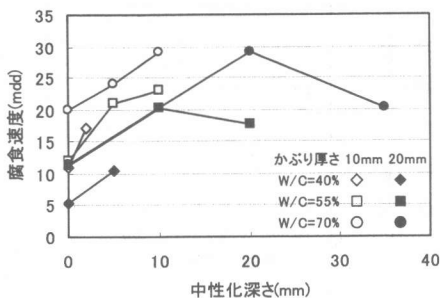
$$= \frac{\text{当初の重量} - \text{腐食生成物除去後の重量}}{\text{鉄筋全表面積} \times \text{試験日数}} \quad (1)$$

図-3 に中性化深さと腐食速度との関係を示す。腐食速度は中性化促進を行っていない試験体の場合より中性化した試験体の方が大きく、また中性化深さが大きくなると腐食速度が大きくなる傾向がある。ただし、W/C=70% 試験体の中性化深さ 35mm 場合は 20mm の場合より腐食

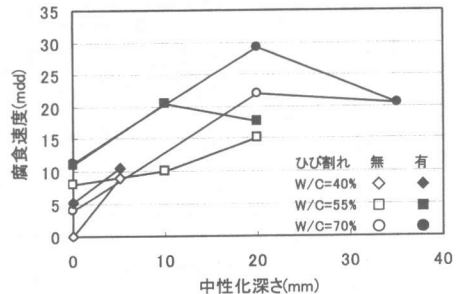


(b) ひび割れ有無との関係(かぶり厚さ 20mm)

図-2 中性化深さと腐食面積率との関係



(a) かぶり厚さとの関係(ひび割れ有)



(b) ひび割れ有無との関係(かぶり厚さ 20mm)

図-3 中性化深さと腐食速度との関係

速度が小さくなった。これは、腐食外力（中性化など）のある部分とそうではない部分との間に構成されたアクティブパッシブセルが出发点となり、マクロアノード内におけるマイクロセル腐食が進展するためである⁷⁾と考えられる。

ひび割れがない場合、中性化域の腐食速度は未中性化域のその平均の2～3倍大きくなるという報告²⁾があるが、本実験では平均3.4倍大きくなった。ひび割れがある試験体は1.5～2.5倍程度大きくなった。水セメント比と中性化深さとの関係をW/C=55%とW/C=70%試験体でみると、かぶり厚さ位置まで中性化した場合、腐食速度は、腐食面積率とは異なり水セメント比の影響を受けた。これは腐食速度にはアノード部鉄筋に影響するひび割れと中性化だけではなくカソード部ステンレス棒周辺のコンクリートの水セメント比も腐食に大きく影響する⁴⁾ためと考えられる。

(a) 図よりかぶり厚さの影響は、中性化していない試験体は既往の研究³⁾と同様にかぶり厚さ大きくなると小さくなるのがわかる。ただしW/C=55%、W/C=70%試験体は鉄筋位置まで中性化進行するとかぶり厚さの影響は少なくなった。

(b) 図においてひび割れの影響をみると、W/C=70%試験体の場合、ひび割れ試験体の腐食速度は、中性化していない場合にはひび割れがない試験体の2倍程度大きいですが、鉄筋位置まで中性化すると1.2倍程度になる。さらに完全

に中性化した場合はひび割れ有無は関係しなくなった。このことから中性化深さが大きくなるとひび割れの影響が少なくなるといえる。

腐食面積率と腐食速度との関係を図-4示す。全般に腐食面積率が增加すると腐食速度も増加していることがわかる。

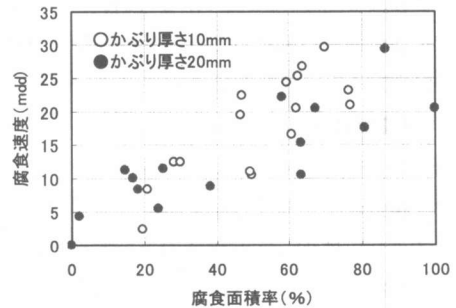


図-4 腐食面積率と腐食速度との関係

(3) 腐食深さ

鉄筋の腐食傾向をみるために、腐食による重量減少が発錆部分で平均して起こると仮定し、腐食深さを求めた⁸⁾。

$$\Delta d = \frac{d \times \Delta W}{4S} \quad (2)$$

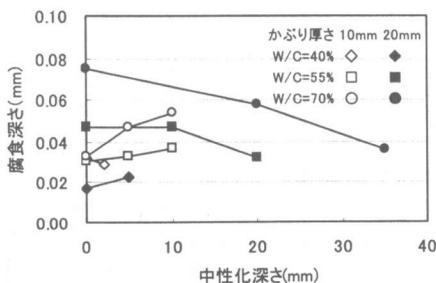
ここで、 Δd ：腐食深さ (mm)，

d ：公直径 (mm)

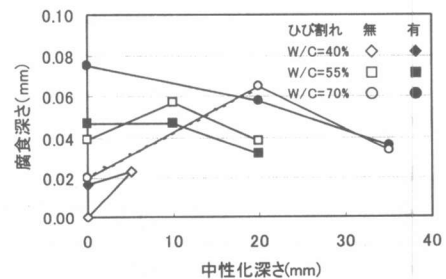
ΔW ：腐食重量減少率 (%)

S ：腐食面積率 (%)

図-5に中性化深さと腐食深さとの関係を示す。ひび割れがある試験体の腐食深さは、中性化していない場合、ひび割れの無い試験体の2



(a) かぶり厚さとの関係 (ひび割れ有)



(b) ひび割れ有無との関係 (かぶり厚さ20mm)

図-5 中性化深さと腐食深さ

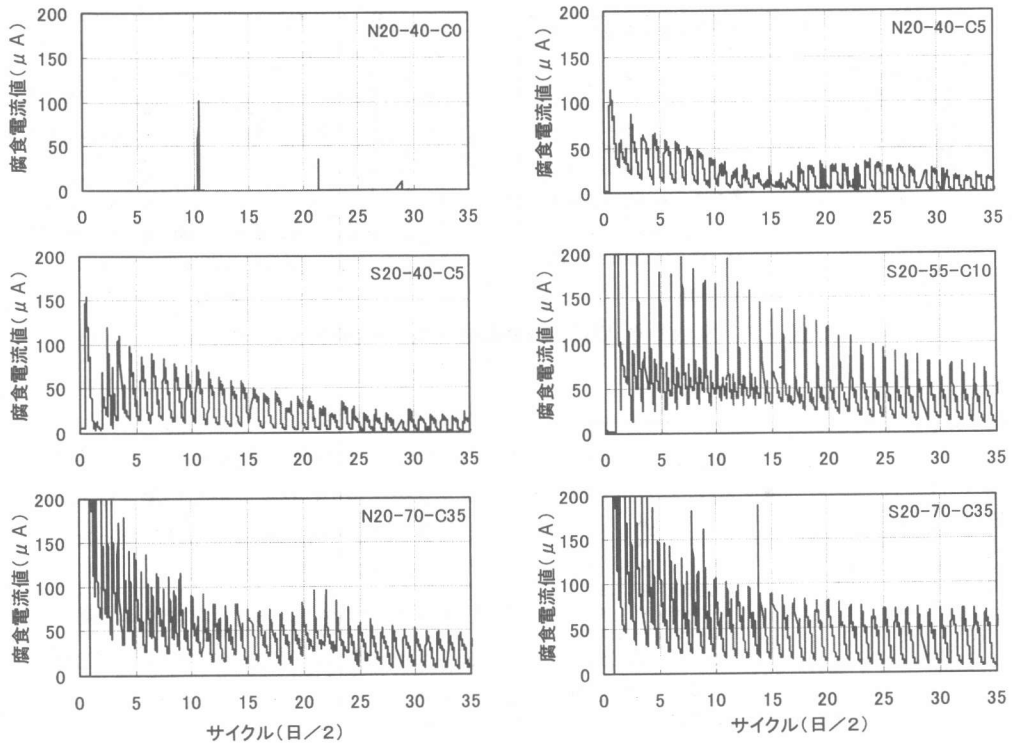


図-6 腐食電流の経時変化の一例

倍程度大きくなる。しかし中性化するとひび割れ影響は少なくなる。

3.2 腐食電流

腐食電流の経時変化の一例を図-6に示す。同図において山の部分が浸漬時、谷の部分が乾燥時に対応しており、浸漬すると急速に腐食電流が流れ初め、浸漬が終わった直後の試験体は65℃と高温であるため急速に乾燥し、腐食電流が小さくなることが示されている。腐食電流は試験開始時に大きな電流が流れ、その後徐々に減少していく傾向がある。これは鉄筋表面に生じた腐食生成物によって腐食の進行が抑制される⁹⁾ためであると考えられる。

W/C=40%で、中性化していないN10-40-C0とN20-40-C0の試験体はいずれも腐食電流が流れなかった。しかし、中性化促進を行った試験体N20-40-C5は腐食試験開始時点から腐食電流が流れた。

ひび割れがあるS20-40-C5とS20-55-C10試験体を比較するとひび割れがあっても水セメ

ント比が小さいと腐食電流は小さくなった。これは鉄筋腐食にはアノード反応とカソード反応が同時に起こるによって発生するが、水セメント比が小さいとひび割れがあってもカソード反応が制御されるためである。

W/C=70%のN20-70-C35とS20-70-C35を比較すると腐食電流の変化にあまり差がなく、前述のように中性化が鉄筋の周辺まで進行するとひび割れの影響が小さくなっている。

3.3 電気化学的特性値

自然電位 (E_c)と分極抵抗 (R_p)の経時変化の一例を図-7に示す。腐食電流が殆ど流れなかったひび割れのないN20-40-C0試験体は E_c , R_p ともに変化せず、S20-55-C10, S20-70-C35のように腐食電流が大きく流れた試験体の E_c , R_p は小さいなど、電気化学的特性値の経時変化は腐食電流の経時変化とよく一致している。

図-8分極抵抗の逆数の時間積分値と鉄筋腐食量との関係を示す。分極抵抗の逆数の時間積分値と鉄筋腐食量は比例関係にあり、腐食量を

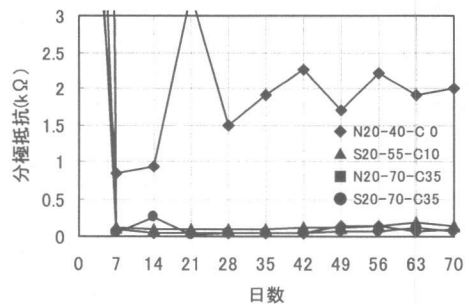
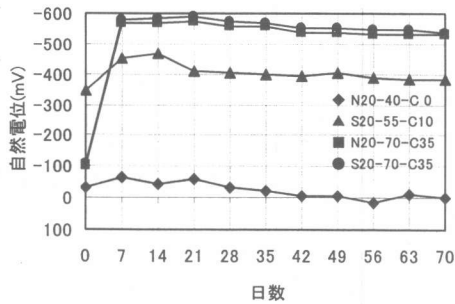


図-7 自然電位 (Ec)と分極抵抗 (Rp)の経時変化の一例

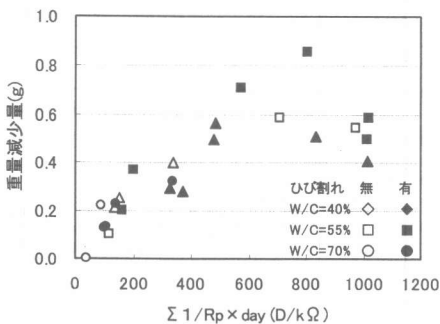


図-8 分極抵抗の逆数の時間積分値と腐食重量減率の関係

判断することができるといわれている⁷⁾。今回の実験結果においてもほぼ比例関係にあるが、分極抵抗の逆数の時間積分値が 800 (D/kΩ) 以上になると低い値を示している。これらは鉄筋位置まで中性化が進行した試験体である。分極抵抗で腐食量の推定を行う場合は鉄筋周りのコンクリートの中酸化程度を考慮しなければならないと言える。

4. まとめ

実験から得られた結果をまとめ次のようになる。

- (1) ひび割れがある試験体はひび割れ位置を中心として鉄筋引張側に激しい腐食が発生している。
- (2) 中性化が完全に進行した試験体では鉄筋表面の全面にわたって腐食が生じた。
- (3) ひび割れ試験体の鉄筋の腐食速度は、コンクリートが中性化している場合、未中性化の

1.5~2.5 倍程度大きくなる。

(4) ひび割れの鉄筋の腐食速度への影響は、コンクリートが中性化していない場合は大きく、中性化が進行するに従って小さくなった。

本研究は平成 10 年,11 年度の科学研究補助金 (基盤研究 (C) (2)) の交付を受けた研究の一部である。

参考文献:

- 1) 岸谷孝一, 樫野紀元: コンクリート中の腐食に関する研究, 日本建築学会構造論文報告集, 第 283 号, pp. 11-15, 昭和 54. 9
- 2) 梶田佳寛, 掛川 勝, 花榮 浩: コンクリート中の鉄筋腐食速度に及ぼす各種要因の影響に関する実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14. No. 1, pp. 781-786, 1992
- 3) 大野義照, 鈴木計夫: コンクリートのかぶり厚さとひび割れの鉄筋腐食への影響, セメント・コンクリート論文集, No. 46, pp. 642-647, 1992
- 4) 大野義照, 鈴木計夫: ひび割れが生じた高強度コンクリート中の中性化の影響, セメント・コンクリート論文集, No. 48, pp. 536-541, 1994
- 5) 大野義照, 柳濟峻: 鉄筋腐食に及ぼすコンクリート中の, セメント・コンクリート論文集, No. 52, pp. 974-979, 1998
- 6) 日本コンクリート工学協会, 海洋コンクリート構造物の防食指針 (案), pp. 103-106, 1983. 2
- 7) 樫野紀元: 建築研究報告, No. 90, March, 1980, 建設省建築研究所
- 8) 吉瀬健二, 梶田佳寛, 中村成春: 高強度コンクリートの塩害効果に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21. No. 2, 1999
- 9) P. Schiel and M. Raupach: Laboratory Studies and Calculations on the Influence of Crack Width on Chloride-Induced Corrosion of Steel in Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 94, No. 1, pp. 56-62(1997)