

論文 鉄筋の腐食促進条件が腐食膨張によるひび割れ発生に及ぼす影響

鈴木 三馨*1・堀口 賢一*2・福浦 尚之*3・丸屋 剛*4

要旨: 鉄筋の腐食促進条件が腐食膨張によるコンクリートのひび割れ発生に及ぼす影響を明らかにするため、電流密度をパラメータとした電食試験を行った。その結果、鉄筋の電流密度が小さく鉄筋腐食速度の遅いほど、腐食ひび割れ発生時の腐食量が少ないこと、初期ひび割れがある場合、腐食ひび割れ発生までの積算電流量が小さいことが明らかとなった。また、鉄筋径 16mm, かぶり 20, 42mm のとき、腐食ひび割れ発生時の腐食量は 1~74mg/cm²であった。

キーワード: 電食試験, 鉄筋腐食, コンクリートの表面ひずみ, 積算電流量, 腐食量, 電流密度, ひび割れ

1. はじめに

これまでに鉄筋腐食によるひび割れ発生機構に関する報告が多くなされている^{1) 2) 3)}が、電食試験の場合、比較的高い電流密度により急激に腐食生成物が生成するため、実際の腐食性状とは異なった鉄筋腐食膨張によるひび割れ発生状況になることも考えられる。

本研究では、電流密度と初期ひび割れの有無をパラメータとすることで鉄筋腐食速度を変化させ、鉄筋の腐食促進条件が腐食ひび割れに与える影響を確認する目的で実験を行った。

2. 電食による腐食ひび割れ発生実験

2.1 実験概要

実験要因を内在塩分の有無、かぶり、電流密度、および初期ひび割れの有無とした。表-1に、試験体の実験要因を示す。

2.2 コンクリートの配合および供試体

内在塩分は、コンクリート打設時に、練混ぜ水に塩化ナトリウムを塩化物イオン換算で 1.2kg/m³溶解して混入した。表-2にコンクリートの配合を示す。水セメント比は 55%で、セメントは普通ポルトランドセメントを使

表-1 実験要因と実験結果

実験要因				実験結果						
内在塩分	かぶり (mm)	電流密度 (A/m ²)	初期ひび割れの有無	腐食ひび割れ発生時			解体時			
				通電時間 (hour)	積算電流量 (A·h)	電食によるひずみ (×10 ⁻⁶)	通電時間 (hour)	積算電流量 (A·h)	腐食量 (mg/cm ²)	
有	20	10	無	27	3	106	53	5	—	
		5		49	5	119	589	59	148	
		1		78	4	107	589	29	116	
	42	10		295	3	231	381	4	1	
		5		94	9	136	117	12	—	
		1		79	8	165	589	59	111	
		0.5		140	7	176	182	9	—	
		1		132	7	99	589	29	85	
		0.5		1177	12	78	1197	12	5	
	無	20		10	1235	12	134	2762	28	165 *
				5	3221	16	87	3258	16	10
				1	3073	15	109	—	—	—
42		10	112	11	93	165	17	—		
		5	115	12	168	978	98	106		
		1	243	12	91	332	17	—		
		0.5	206	10	137	978	49	100		
		1	374	37	88	500	50	—		
		0.5	359	36	104	978	98	60		
42		10	881	44	66	349	17	—		
		5	727	36	61	978	49	40		
		1	1886	19	118	2462	25	4		
			有	1703	17	71	2069	21	6	

*腐食量が多かったため、40℃のクエン酸二アンモニウム溶液に 7.5 時間浸漬して、錆を落として測定した。

- *1 大成建設 (株) 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室土木構造チーム 工修 (正会員)
- *2 大成建設 (株) 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室土木材工チーム 工修 (正会員)
- *3 大成建設 (株) 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室土木構造チーム 博(工) (正会員)
- *4 大成建設 (株) 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室土木材工チーム 工博 (正会員)

用した。また、粗骨材は最大寸法 13mm の砕石（表乾密度 2.67g/cm³，吸水率 0.74%），細骨材は山砂（表乾密度 2.61g/cm³，吸水率 2.15%）を使用した。28 日標準養生後の圧縮強度は、塩分有りが 39.7N/mm²，塩分無が 40.4N/mm² であった。

初期ひび割れ有りの試験体は、3 点載荷を 3 面にそれぞれ 2 回ずつ行い、残留ひび割れ幅 0.1mm とした。

2.3 実験方法

試験体寸法は 100mm×100mm×400mm の直方体で、内部に SD295A の D16 を 1 本配置した。鉄筋の両端は、供試体に埋め込む前にエポキシ樹脂を塗布し、中心 200mm の範囲のみに腐食が発生するようにした。供試体を水槽中で縦に静置して、対極として銅板を置いて直流電源装置により通電した。また、コンクリート表面にかぶり 20mm のケースは 1 面（180° 面）に、かぶり 42mm のものは 3 面（90°，180°，270° 面）または 4 面（0°，90°，180°，270° 面）にひずみゲージを貼付した。

図-1 に実験方法を、図-2 に実験状況を示す。

測定はコンクリートの表面のひずみ、および鉄筋の腐食量について行った。表面ひずみは、実験開始から解体

表-2 コンクリートの配合

Gmax mm	スラ ンプ cm	空気量 %	W/C %	s/a %	単位量 (kg/m ³)			AE 減水剤 C×%	
					水	セメント	細骨材		
13	12.0	4.5	55	50	175	318	886	907	0.25

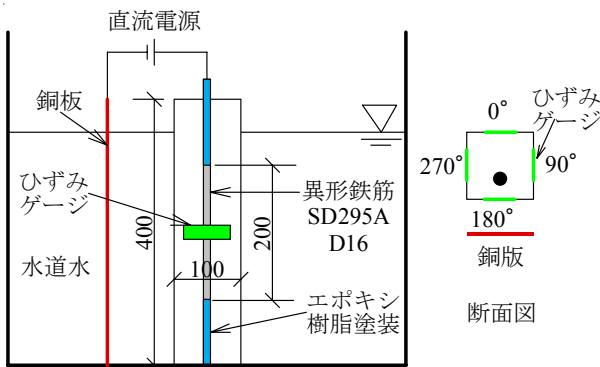


図-1 実験方法



図-2 実験状況

まで 10 分間隔で連続的に測定した。また、腐食量の測定は供試体を解体して以下のようにして行った。電流密度 0.5, 1A/m² のものは文献 4) の方法により金属製ワイヤーブラシにより発生した腐食生成物を落として測定し、電流密度 5, 10A/m² のものは、40℃ のクエン酸二アンモニウム溶液に 7.5 時間浸漬して、鏽を落として測定した。これは、解体時に電流密度 0.5, 1A/m² のものは腐食量が微量であったため直接的に腐食生成物を計測した方が計測誤差は少ないと判断したからである。また、腐食面積は鉄筋の 200mm の範囲の表面積全体（100cm²）とした。

3. 実験結果および考察

3.1 表面ひずみの経時変化

空中養生した試験体を電食試験のために水中に入れることで試験体表面に湿潤膨張ひずみが発生する^{5), 6)}。ここで示す表面ひずみはひずみゲージの値であり、長さ変化率を表している。接線勾配が一定となった以降は、湿潤膨張によるひずみは発生しないとして接線勾配が一定となる区間を一次直線で近似した。この直線の切片を湿潤膨張ひずみの最終値とした。また、表面ひずみが 400×10^{-6} のとき表面ひずみが急変後であることから 400×10^{-6} から接線を引いた。腐食ひび割れ発生時間はこの 2 直線の交点と定義した。腐食ひび割れ発生時の電食によるひずみは、腐食ひび割れ発生時間の表面ひずみから湿潤膨張ひずみの最終値を引いた値とした。腐食ひび割れ発生時間の定義を図-3 に示す。

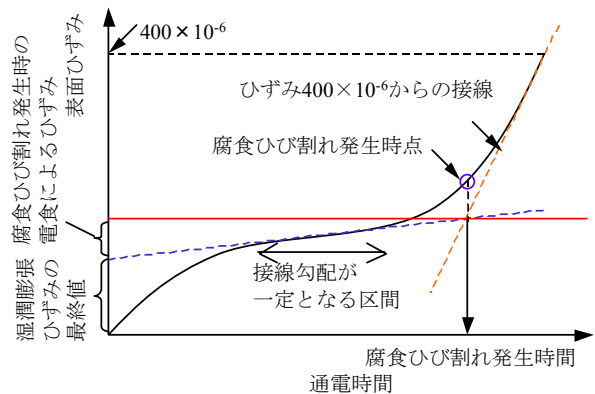
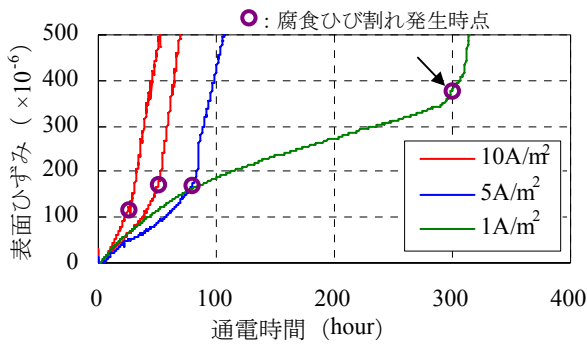


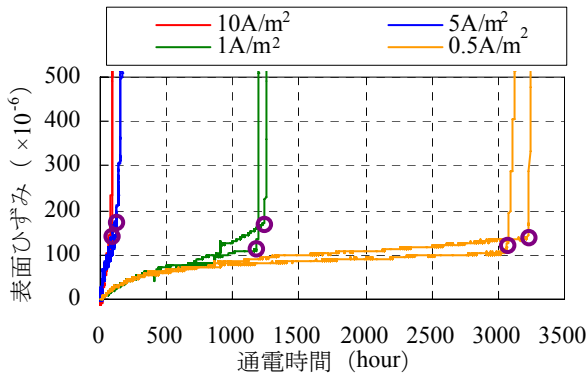
図-3 腐食ひび割れ発生時間の定義

(1) 表面ひずみの経時変化

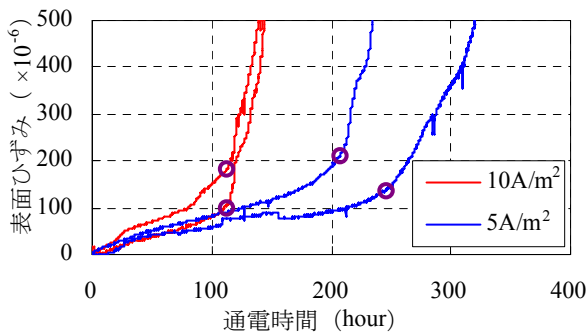
表面ひずみの経時変化を図-4 に示す。表面ひずみは各ケースの腐食ひび割れが発生した面の値を用いた。全てのケースで表面ひずみの急激な上昇点が明確に現れており、図-3 で示した腐食ひび割れ発生時の定義は妥当だと言える。



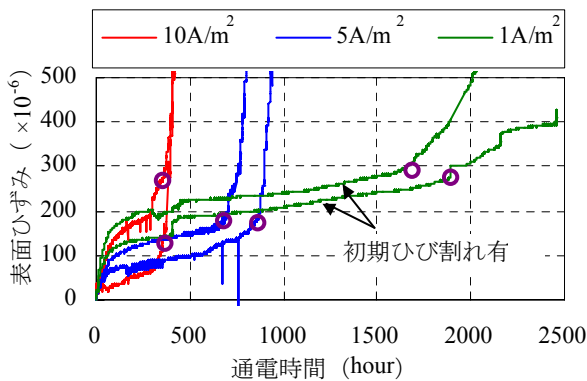
a) 内在塩分有, かぶり 20mm



b) 内在塩分有, かぶり 42mm



c) 内在塩分無, かぶり 20mm



d) 内在塩分無, かぶり 42mm

図-4 表面ひずみの経時変化

腐食ひび割れ発生時の通电時間と電食によるひずみを表-1に示す。電流密度が腐食ひび割れ発生時間に及ぼす影響を、実験要因ごとに図-5に示す。内在塩分が

あることで、腐食ひび割れ発生時間は、かぶりが 20mm のときは 1/3 倍、かぶりが 42mm は 1/5 倍になった。また、電流密度がひび割れ発生時間に大きく影響することが分かる。

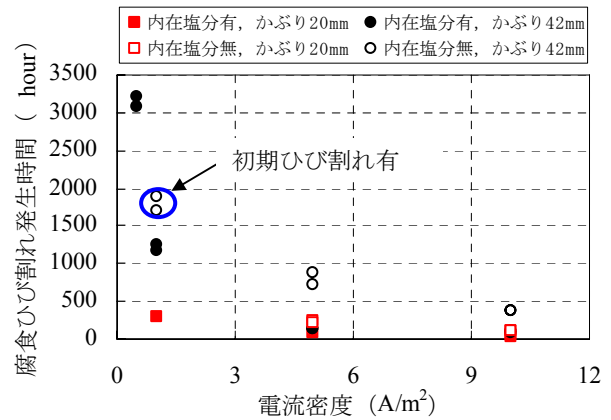


図-5 電流密度-腐食ひび割れ発生時間

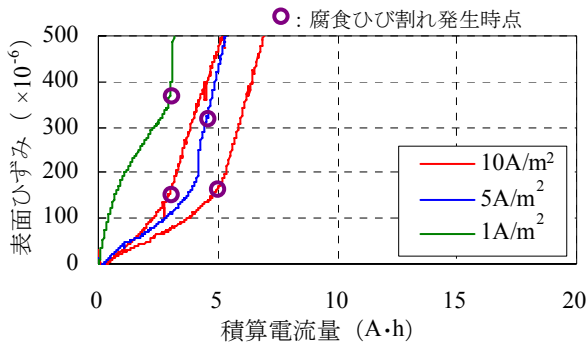
(2) 腐食ひび割れ発生時の積算電流量

積算電流量-表面ひずみ関係を図-6に示す。腐食ひび割れ発生時の積算電流量を表-1に示す。内在塩分有り、かぶり 42mm のときは、電流密度 5A/m²、10A/m² では電流密度による差は見られないが、電流密度が 1A/m² 以下になると電流密度が小さくなるほど腐食ひび割れ発生時の積算電流量が大きくなっていることがわかる(図-6b))。内在塩分有り、かぶりが 20mm のときには、電流密度によらず積算電流量が 3~5A・h の範囲で腐食ひび割れが発生している(図-6a))。内在塩分無し、かぶり 20mm のときには、電流密度によらず積算電流量が 10~12A・h の範囲で腐食ひび割れが発生している(図-6c))。初期ひび割れ有りの方が初期ひび割れ無しより腐食ひび割れ発生時の積算電流量が小さい結果が得られた。これは初期ひび割れ付近に腐食が進みやすくこの付近で腐食発生ひび割れが発生したことによると考えられる(図-6d))。

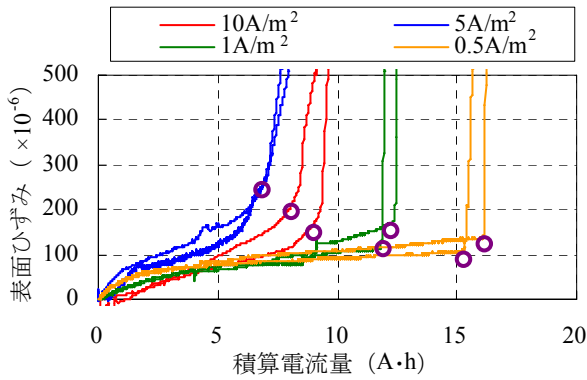
腐食ひび割れ発生時の積算電流量を図-7に示す。かぶり 42mm のときの積算電流量が電流密度 0.5, 1A/m² で大きくなっていること、初期ひび割れにより積算電流量が 0.5 倍になっていることが分かる。電流密度が腐食発生ひび割れ発生時の積算電流量に及ぼす影響はかぶりが大きくなると大きくなった。

(3) 腐食ひび割れ発生時の電食によるひずみ

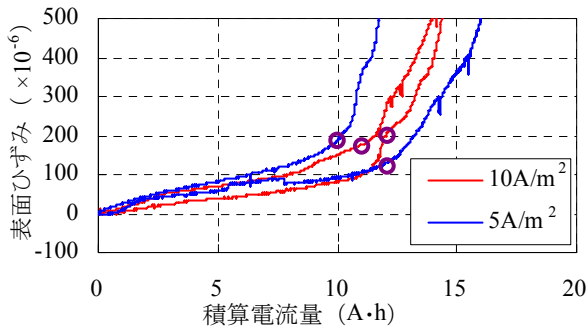
図-8に電食による腐食ひび割れ発生ひずみを示す。コンクリート標準示方書⁷⁾を参照して、圧縮強度 40N/mm² のときの引張強度を 2.69N/mm²、ヤング係数を 31kN/mm² とすると、引張強度時のひずみは 86×10⁻⁶ となる。実験の結果は 50~250×10⁻⁶ の間にあり、腐食促進条件による違いは見られなかった。電食による腐食ひび



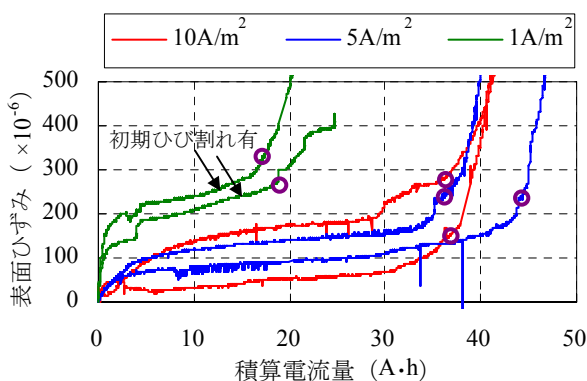
a) 内在塩分有, かぶり 20mm



b) 内在塩分有, かぶり 42mm



c) 内在塩分無, かぶり 20mm



d) 内在塩分無, かぶり 42mm

図-6 積算電流量-表面ひずみ

割れ発生ひずみは、内在塩分の有無、かぶり、電流密度によらず強度試験における引張強度時のひずみと同程度の範囲にあると考えられる。

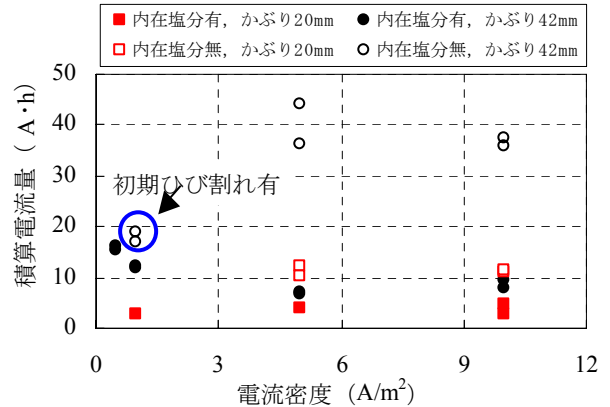


図-7 腐食ひび割れ発生時の積算電流量

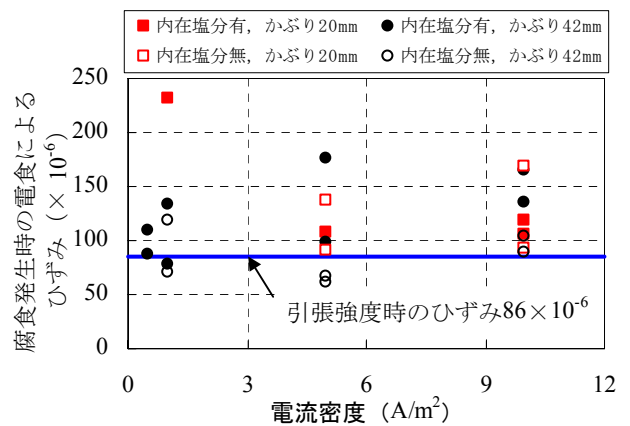


図-8 電食による腐食ひび割れ発生ひずみ

3.2 電食試験による腐食特性

鉄筋の腐食状況を図-9に示す。なお、写真は鉄筋の180°の面側を撮影したものである。ふしの下側で腐食が顕著であった。これは、供試体打設方向が縦打ちであったのでふしの下側でブリーディング水があることによりその箇所に腐食反応が集中したと考えられる(図-10a)。

(1) 内在塩分有無の影響

内在塩分有りの場合、ふしの部分の腐食がもっとも多いが、はらの部分にも点錆が見られる。これは、塩分の影響によるものと推察できる。内在塩分無しの場合、ふしの部分に腐食がありはらには腐食は少ない。

(2) かぶりの影響

かぶりが20mmの場合、42mmと比べ、180°面に腐食が集中していた(図-10b)。これは、かぶりが小さいと銅版との距離が短いため、180°面に腐食が集中したことが考えられる。

(3) 電流密度の影響

電流密度が小さいほど、腐食発生時の腐食面積は小さくなっている。腐食ひび割れ発生時と解体した時間差があると、電流密度が大きいほうが腐食が進むことも一因

である。電流密度が小さい場合、セメント水和物の鉄筋への付着が多くなる。腐食生成物が電流密度によって異なることも考えられる⁸⁾。

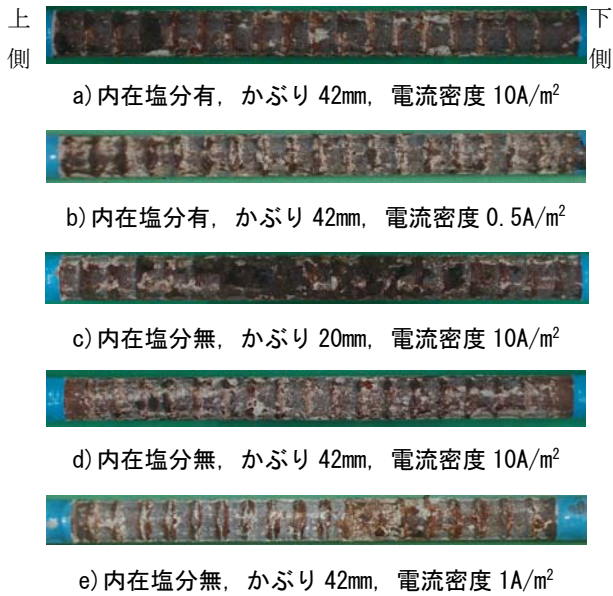


図-9 鉄筋の腐食状況

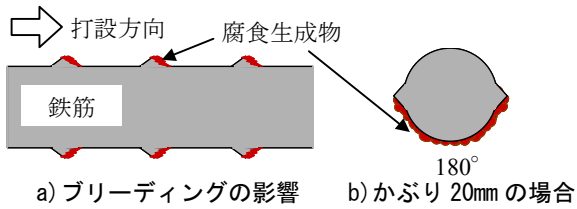


図-10 鉄筋の腐食状況

(4) 初期ひび割れ有無の影響

初期ひび割れ有の試験体の電食実験後の試験体状況を図-11に示す。軸直角方向のひび割れが初期ひび割れ、軸方向ひび割れが腐食ひび割れである。これから、腐食ひび割れ発生位置は初期ひび割れ位置を起点として伸びていることが分かる。さらに、初期ひび割れがある場合、腐食ひび割れ発生位置が初期ひび割れ付近に集中することが考えられ、これにより実際の腐食ひび割れ発生時間はより早いと考えられる。内部の鉄筋の腐食状況を見てもひび割れ位置で腐食が発生しており、腐食はひび割れ位置周り4cmほど範囲に広がっている状況が分かる。

(5) コンクリートの状況

解体後の試験体を図-12に示す。試験体はひび割れ発生面に沿って割った。a)は腐食ひび割れ発生後、積算電流量 6A・h をかけたのち解体したもの、b) 腐食ひび割れ発生後、16A・h をかけたのち解体したものである。ひび割れ発生時から積算電流量 6A・h をかけたものでは鉄筋周り以外に錆汁は見られず、ひび割れ発生後にひび割れ面への錆汁の流出が見られた。かぶり 20mm のものも同

様の傾向であった。

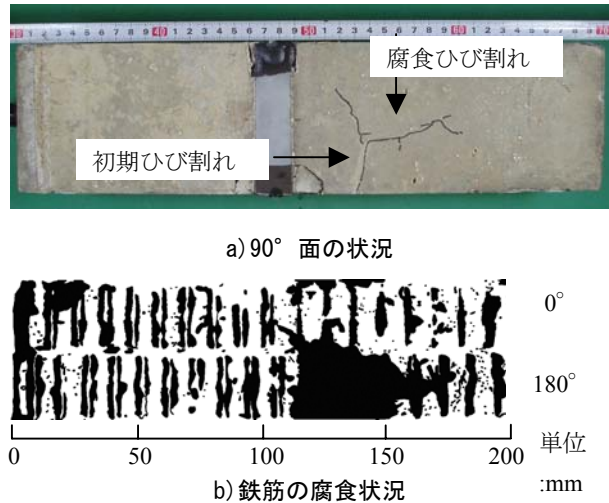


図-11 内在塩分無, かぶり 42mm, 電流密度 1A/m², 初期ひび割れ有の電食後の試験体状況

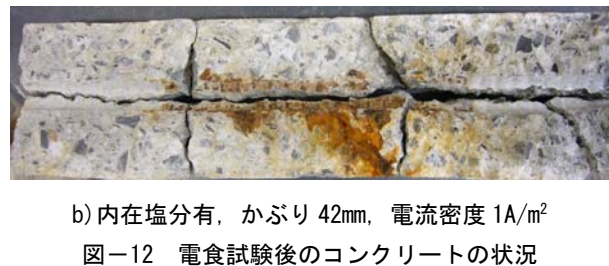


図-12 電食試験後のコンクリートの状況

3.3 鉄筋の腐食量

解体時の積算電流量-腐食量関係を図-13に示す。鉄筋の腐食量は、式(1)に示すファラデーの法則より得られる。

$$m = \frac{I \cdot t \cdot a}{n \cdot F} \quad (1)$$

ここに、 m : 腐食量 (mg/cm²)

I : 腐食電流密度 (mA/cm²)

t : 時間(s)

a : 鉄の原子量 55.845 (g)

n : 溶解した鉄イオンの当量 2 (mol eq.)

F : ファラデー定数, 96500 (C/mol eq.)

既往の研究¹⁾では、ひび割れ発生後には式(1)に近くなるとされているが、今回の試験結果では腐食量が少

なかった。アノード反応としては主として次の2通りの反応が考えられる。



式(3)は酸素発生反応であり、電食試験では式(3)の反応の影響が大きい場合が多く、その場合の腐食量は式(1)で求められる腐食量より少なくなるといわれている。また、鉄筋付近に Cl^- が存在すると鉄の腐食反応が起こりやすくなる¹⁾。実験結果でも内在塩分が有るときに、腐食量が多くなる傾向があった。

積算電流量と腐食量の関係は原点を通る直線と仮定して、ひび割れ発生時の積算電流量と腐食ひび割れ時の腐食量との関係を図-14に示す。腐食ひび割れ発生時の腐食量は、試験結果では1~74 mg/cm^2 となった。電流密度が小さいほどひび割れ発生時の腐食量は少ない傾向にある。しかし、電流密度が小さいほどひび割れ発生時の積算電流量が大きいことから、電流密度が小さいほど式(3)の反応の影響が大きくなることが明らかとなった。また、かぶり小さいほど、腐食量が小さい傾向にあるが、これは腐食分布が 180° 面に集中しており、それが今回の腐食量の算定では、鉄筋の全表面積で割っている

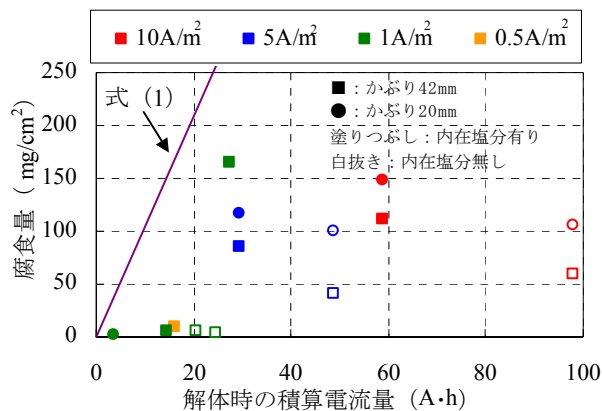


図-13 積算電流量と腐食質量の関係

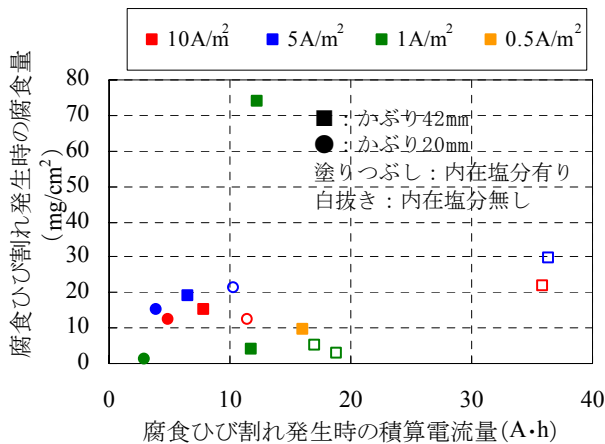


図-14 積算電流量と腐食ひび割れ発生時の腐食量の関係

ことも影響していると考えられる。

4. まとめ

本研究によって得られた知見は、以下の通りである。

- (1) 腐食ひび割れ発生時の電食によるひずみは、内在塩分の有無、かぶり、電流密度および初期ひび割れの有無の影響は受けず $56 \sim 231 \times 10^{-6}$ の範囲にある。
- (2) 鉄筋径 16mm、かぶり 42mm の場合、電流密度が小さく鉄筋の腐食速度の遅いほど、腐食ひび割れ発生時の腐食量が少ないことが明らかとなった。よって、ひび割れない実構造物の腐食速度は電食試験より遅いと考えられるので、ひび割れない実構造物電流密度 $10\text{A}/\text{m}^2$ の電食試験と比べて腐食膨張によるひび割れ発生時の腐食量は少ない可能性がある。
- (3) 鉄筋径 16mm、かぶり 42mm の場合、初期ひび割れにより、腐食ひび割れ発生までの積算電流量が 0.5 倍になることが明らかとなった。
- (4) 鉄筋径 16mm、かぶり 20, 42mm のとき、腐食ひび割れ発生時の腐食量は、1~74 mg/cm^2 となった。

参考文献

- 1) 森川雅行, 関博, 奥村隆: 鉄筋の腐食膨張によるひびわれの発生機構に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第 378 号, V-6, 1987.2
- 2) 松島学, 横田優, 関博: 鉄筋腐食膨張によるひび割れ発生時の腐食量, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1669-1674, 2004
- 3) 堀口賢一, 武田均, 丸屋剛: 電食による腐食量に及ぼすかぶりの影響について, 土木学会第 61 回年次学術講演会, pp.509-510, 2006.9
- 4) 堀口賢一, 丸屋剛, 武若耕司: 塩害環境下における鉄筋コンクリートの腐食ひび割れ発生時期の推定, 土木学会第 62 回年次学術講演会, pp.1065-1066, 2007.9
- 5) 小柳朋宏, 大下英吉: 乾湿変化に伴うセメントペーストの体積変化に及ぼすアルカリ含有量の影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.477-482, 2008
- 6) 浅本晋吾, 石田哲也: 温度履歴に依存するセメント硬化体の細孔内水分状態と体積変化機構の連関, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.451-456, 2005
- 7) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書 設計編, pp.34-44.
- 8) 須田久美子, Misra Sudhir, 本橋賢一: 腐食ひびわれ発生限界腐食量に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.14, No.1, pp.751-756, 1992