

論文 ひび割れを有する RC 棒材の塩水浸透及び鉄筋腐食に関する研究

頃安 研吾^{*1}・Phetkaysone Anongdeth^{*2}・佐藤 良一^{*3}

要旨: 本研究では、台風等の風または降雨により運ばれる塩化物が供給される RC 構造物におけるひび割れ部を想定し、0.3mm 程度の貫通ひび割れを有する鉄筋コンクリート供試体を塩水降雨-乾燥繰返しでの腐食促進環境下へ曝した。コンクリート中に埋設したステンレス製電極によるひび割れ断面における電気抵抗の測定、および分割鉄筋の埋設によるひび割れ部近傍での腐食電流密度の測定により、コンクリート中の塩水浸透特性や鉄筋腐食の進行状況を実験的に検討した。また、上面貯水の有無、かぶりの相違及び排水性の有無をパラメータとし、湿潤状況及び腐食速度の比較を行った。

キーワード: 鉄筋腐食, ひび割れ, 腐食電流速度, 電気抵抗, 上面貯水, かぶり厚さ

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物において、供用中に曲げや乾燥収縮などによるひび割れ発生が認められている。ひび割れはコンクリート内部への水分、酸素及び塩化物等の劣化因子の移動を容易にし、鉄筋の腐食原因となることが知られており、構造物の耐久性に多大な影響を与える。また、沿岸域にあるコンクリート構造物では強風、台風などにより運ばれる塩化物による鉄筋腐食が大きな問題となっており、塩化物浸入に及ぼすひび割れの影響評価は極めて重要である。

そこで本研究では、連続鉄筋コンクリート舗装(CRCP)のような、コンクリートが緻密でかぶり大きい構造物を想定し、塩化物を含む降雨と乾燥の繰返し環境において、0.3mm 程度の貫通したひび割れを有する鉄筋コンクリート角柱供試体の鉄筋腐食機構を実験的に検討した。腐食機構は、ひび割れ部の電気抵抗測定による水分浸入状況の把握とともに、既往の研究¹⁾を参考にして、異形鉄筋を分割した鉄筋(以下、分割鉄筋と称する)を埋設し、ひび割れ部およびひび割れ部近傍での腐食電流密度の経時変化を直接測定することにより検討した。また、上面貯水の有無、かぶりの相違及び排水性の有無をパラメータとして、これらの電気抵抗変化や腐食進行状況の比較を行い、環境条件の相違が及ぼす影響も併せて検討する。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

本実験ではセメントに、普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm³, 比表面積:3280cm²/g)を用いた。コンクリートの配合を表-1に示す。骨材には粗骨材として硬質砂岩 5mm~15mm(表乾密度:2.68, 吸水率:0.62%, 粗粒率:6.42), 15mm~20mm(表乾密度:2.69, 吸水率:0.58%, 粗粒率:7.00), 20mm~40mm(表乾密度:2.70, 吸水率:0.55%, 粗粒率:7.95)を、細骨材として硬質砂岩細砂(表乾密度:2.63, 吸水率:2.18%, 粗粒率:2.94), 石灰石細砂(表乾密度:2.63, 吸水率:1.44%, 粗粒率:2.84)をそれぞれ用いた。混和剤には高性能 AE 減水剤, 遅延剤を使用した。また本研究において最大骨材寸法 40mm, W/C=41.0とした。混和剤 1 の AE 減水剤は単位セメント量の 1.3%, 混和剤 2 の遅延剤は単位セメント量の 0.05%である。養生条件を図-1に示す。湿潤養生とは濡れた新聞紙で供試体を覆い、ラップで密封することにより養生したものである。

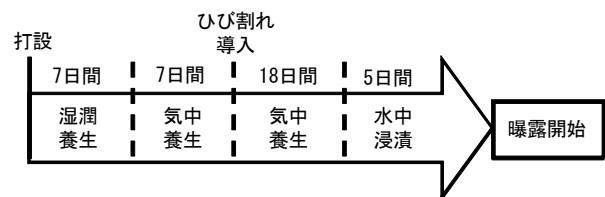


図-1 養生条件

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						混和剤1 AE減水剤	混和剤2 遅延剤
		W	C	S		G			
				硬質砂岩	石灰石				
41	36	140	378	387	260	1211	4.91 (C*1.3%)	0.189 (C*0.05%)	

*1 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻 (正会員)

*2 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻 工修 (正会員)

*3 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻 工博 (正会員)

2.2 供試体の詳細

供試体概要を図-2 に示す。供試体寸法は 150mm×200mm×900mm で、D19SD345 異形鉄筋を分割し埋設した^{1),2)}。分割した各鉄筋の両端部にリード線をハンダ付けし、その後分割鉄筋要素間の絶縁と接続を行うためにエポキシ系樹脂でハンダを覆い接合した。また水分の浸入を防ぐために、鉄筋間のリード線の根元をシリコンで覆った。その両隣の鉄筋間のリード線を接合することにより、電気的には一体の鉄筋とみなせる。分割鉄筋はひび割れ部を中心として軸方向に均等に合計 5 個(各鉄筋長 25mm, 各鉄筋間隔 5mm, 図-3)を埋設し、その両端から軸方向に貫通するまで一本ずつの鉄筋を配置した。これにより、マクロセル電流¹⁾、ミクロセル電流^{3),4)}を経時的に測定した。なお、マクロセル電流は鉄筋間のリード線より直接測定を行い、ミクロセル電流は交流インピーダンス法により測定し、算出した。なお、分割鉄筋要素長さについては 25mm とした。これは、ひび割れを分割鉄筋要素内に導入し、さらにひび割れを導入する際の分割鉄筋要素長さが短くなることによる、隣接する鉄筋要素の接着破断を防ぐためである。

さらに、供試体のひび割れ断面において水平方向にステンレス製電極を高さごとに埋設し、その電極間の電気抵抗⁵⁾を測定することにより、コンクリート中の水分移動を検討する。ステンレス製電極の配置は図-4 中に示す通りである。

ひび割れの導入は室内気中養生中に行い、供試体軸方向中心部に奥行き 10mm, 幅 5mm の切り込みを予め設け、この位置にひび割れを誘発できるようにし、3 軸曲げにより載荷した。ひび割れ幅が約 0.3mm になったところで切り込み部にセメント系無収縮剤を埋め込み、無収縮剤が硬化後除荷した。残留値は無収縮材注入前と殆ど変わらず、戻りはわずかであった。ひび割れ幅の測定には JIS A 1129 に規定されるコンタクトゲージ法を用い、測定位置は供試体の上面から 20, 100, 180mm の位置である。

2.3 パラメータ

実験条件の異なる供試体を図-5 に示しており、上面からの高さごとの各ひび割れ幅も示した。全ての供試体において、上面において塩水降雨に曝露し、側面はエポキシ樹脂で被覆した。A, B の供試体はかぶり 90mm で、底面を被覆し、排水性の悪い地盤を想定している(以下、この底面被覆の条件を非排水条件と称する)。また供試体 B の上面において、凍結防止剤や塩分を含む降雨がひび割れの生じた RC 床版および舗装版に溜まる場合などを想定し、供試体上部に約 10mm の高さの塩水が溜まるようにした。さらに、C, D, E, F の供試体は、かぶりがそれぞれ 30mm, 60mm, 90mm, 120mm と異なるよう作製し、この 4 体は底面のひび割れ部を被覆せず、排水

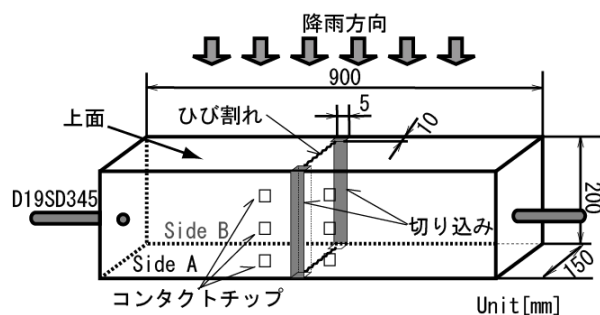


図-2 供試体概要

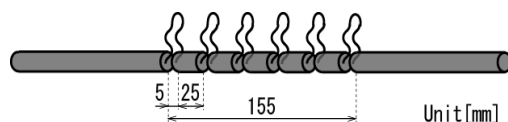
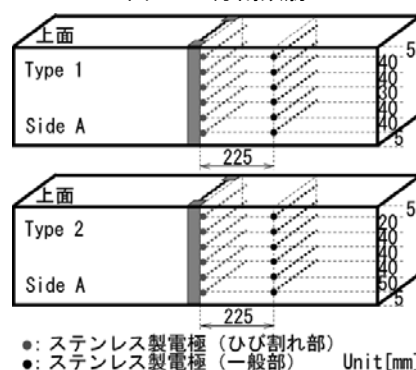


図-3 分割鉄筋



●: ステンレス製電極 (ひび割れ部)
●: ステンレス製電極 (一般部)
図-4 ステンレス製電極埋設位置

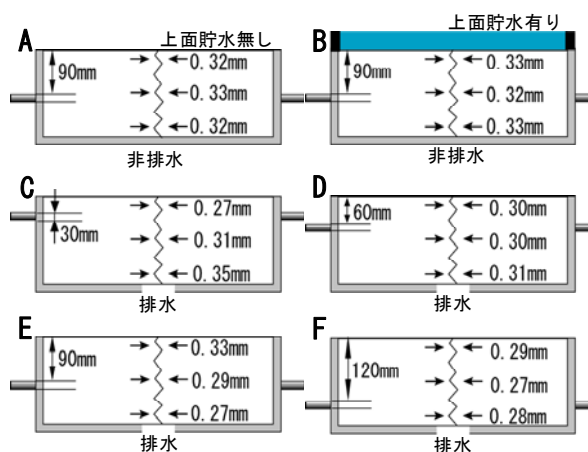


図-5 環境条件の相違

性の良い地盤を想定している(以下、排水条件と称する)。

2.4 曝露環境

曝露は材齢 37 日から開始した。台風等の風雨または降雨に曝されるひび割れ部を想定し、鉄筋腐食を促進させる過程における水分移動及び塩化物物浸入状況を検討するため、曝露環境条件は、温度 40℃下において NaCl を 3%含む降雨環境(降雨量約 55mm/hr)に 24 時間、温

度 40℃、湿度 60%の雰囲気にて 6 日間の曝露を 1 サイクルとする塩水降雨—乾燥繰り返し環境とした。本研究は 100 サイクルまでの結果の報告である。

3. 実験結果

3.1 コンクリートの強度特性

本実験で用いたコンクリートの材齢 28 日の圧縮強度、割裂引張強度、曲げ強度を表-2 に示す。養生条件は、標準養生及び湿潤養生の 2 種類である。なお、本実験においての湿潤養生は濡れた新聞紙で供試体を覆い、ラップで密封して水分を供給し続けることにより養生したものである。舗装用コンクリートを造るのに必要な標準設計基準曲げ強度が 4.5N/mm²であるが、曲げ強度において十分標準設計基準曲げ強度を満たしている。

3.2 電気抵抗の経時変化

図-6、図-7、図-8 にそれぞれ、図中に記述した供試体の 2 サイクル及び 80 サイクルにおける電気抵抗の経時変化を示す。それぞれの図の右上のひび割れ断面において色分けされた部分における電気抵抗の値であり、例として黒色は供試体の最も上面側の値で、赤色は供試体断面中央の位置の値である。また、測定した電気抵抗は電極間の距離で除すことにより、電極間の距離による誤差を補正した。なお、一般に電気抵抗が大きい値を示すほど、コンクリートの湿潤状態は乾燥に向かうことを表す。

図-6 は供試体 A (かぶり 90mm, 上面貯水無し, 非排水条件) の電気抵抗の変化である。曝露開始初期の 2 サイクル目では降雨終了後、ひび割れ断面上部及び下部で値が上昇しており、若干乾燥傾向にあることが分かる。80 サイクルでは降雨終了後、供試体上部でのみ乾燥に向かい、鉄筋位置から下では降雨前後で値は殆ど変わらず、特に下部では値が低く留まり、貯水されていることがわかる。

図-7 は供試体 B (かぶり 90mm, 上面貯水無し, 非排水条件) の電気抵抗の変化である。降雨終了後、供試体上面に塩水が貯留している様子、及び 4 サイクル以降はサイクル中乾燥が進むと供試体上面に塩化物の結晶が析出することを目視で確認した。2 サイクルでは 1.9 日程度、80 サイクルでは 2.3 日程度貯水し、サイクルが経過するに連れ貯水時間が長くなるという結果となった。貯水終了後 (供試体上面の水分が無くなった後) は、ひび割れ断面上部でのみ乾燥に向かい、ひび割れ断面下部では降雨前後での変化はあまり見られなかった。

図-8 は供試体 E (かぶり 90mm, 上面貯水有り, 排水条件) の電気抵抗の変化である。2 サイクル目では降雨終了後、ひび割れ断面上部及び下部で値が上昇し

表-2 コンクリートの強度特性 (材齢 28 日)

養生		圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
材齢 28 日	湿潤	41.56	3.42	6.49	38961.76
	標準	40.58	3.31	7.51	42047.95

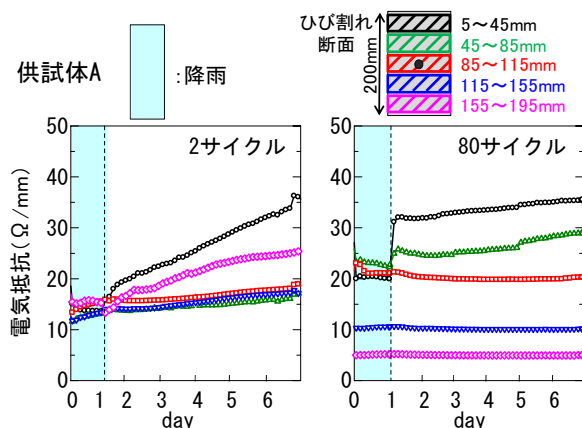


図-6 供試体 A における電気抵抗の経時変化

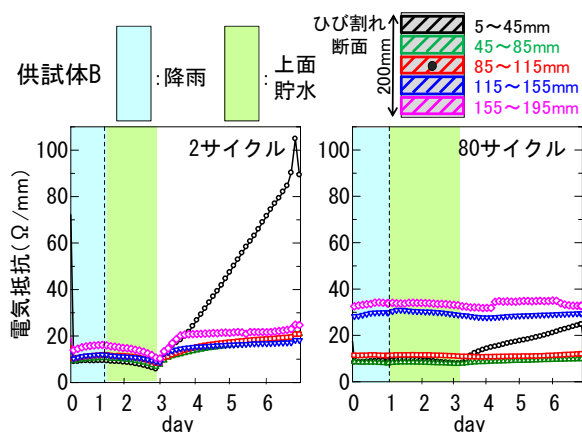


図-7 供試体 B における電気抵抗の経時変化

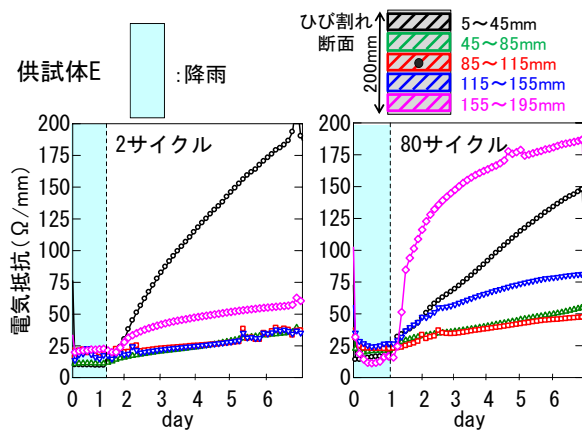


図-8 供試体 E における電気抵抗の経時変化

ており、乾燥に向かっていることがわかる。80 サイクル

経過すると降雨後、ひび割れ断面下部の値が大きく上昇し、排水条件の影響を強く受ける結果となった。なお、供試体 C, D, F の電気抵抗値の経時変化についても、これと概ね同様の結果となった。

塩水降雨—乾燥繰り返し環境下のひび割れ断面において、上面付近の電気抵抗の変化は降雨の影響であると考えられる。非排水条件においては、底面付近は降雨による抵抗変化がほとんどないほど多湿になると考えられる。排水条件では、ひび割れ断面下部の湿潤状態に大きく影響し、供試体上面からの蒸発よりも多量の水分が排水されることがわかる。上面貯水供試体の貯水時間が長くなるのは、ひび割れ断面中の塩分が凝固し、水道を封鎖するヒーリング効果の影響を示唆している。

3.3 マクロセル腐食電流の経時変化

図-9、図-10、図-11 にそれぞれ、図中に記述した供試体の 2 サイクル及び 80 サイクルにおけるマクロセル電流密度の経時変化を示す。マクロセル電流密度はそれぞれの図の右上の分割鉄筋の図において色分けされた鉄筋要素中に流れるマクロセル電流を鉄筋の表面積で除した値であり、例として黒色はひび割れ部である真ん中の鉄筋要素に流れる電流密度である。本研究において、鉄筋内に流れる電流のアノード部を正、カソード部を負としている。なお、腐食電流密度の絶対値が大きい値を示すほど、腐食速度が大きいことを表す。

まず全体的な傾向として、2 サイクルといった曝露開始からの早い段階でマクロセル腐食が開始していることがわかる。また、曝露開始から 80 サイクルに至ってもひび割れ部の鉄筋要素でアノード域、他の要素でカソード域となっている。これは鉄筋の下部にブリーディング水が少ないと同様に、W/C=0.41 の緻密なコンクリート舗装の使用によるものであると思われる、局部腐食の可能性もある。

図-9 は供試体 A (かぶり 90mm, 上面貯水無し, 非排水条件) のマクロセル電流密度の変化である。サイクルを通して殆ど変化が見られなかった。図-6 と比較すると電気抵抗値の変化が降雨前後であまり見られず概ね安定しており、同様にマクロセル電流密度も安定していることが確認できる。

図-10 は供試体 B (かぶり 90mm, 上面貯水有り, 非排水条件) のマクロセル電流密度の変化である。2 サイクルでは降雨後値が減少し、貯水が約 1 日経過後上昇していることがわかる。80 サイクルでは降雨中及び貯水中値が上昇し、その後若干減少している。この違いは、貯水時間が長くなったこと、及び供試体上面に溜まる塩化物の結晶が降雨により溶け出し、塩水が高濃度となって再び供試体中に浸入することが、貯水環境における腐食を促進している要因として考えられる。よって塩水が供

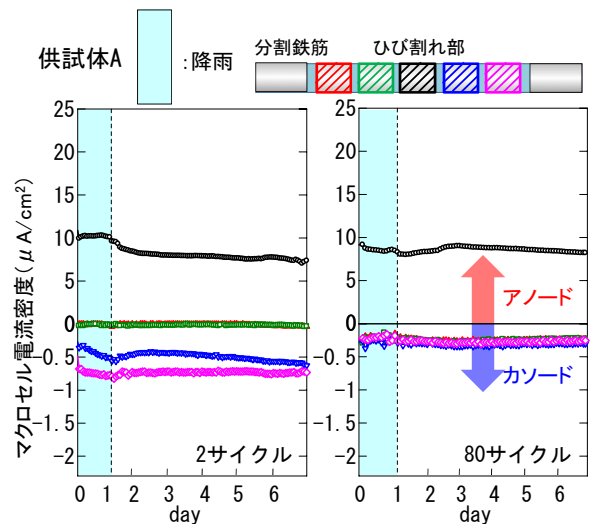


図-9 供試体 A におけるマクロセル電流密度の経時変化

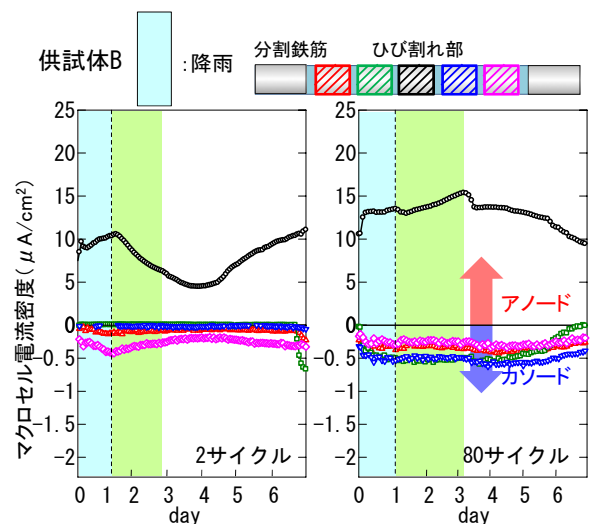


図-10 供試体 B におけるマクロセル電流密度の経時変化

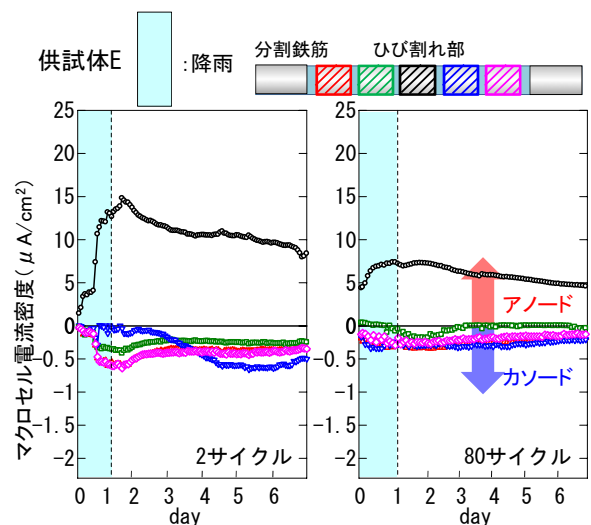


図-11 供試体 E におけるマクロセル電流密度の経時変化

試体上面に貯水すると、腐食を促進させることが確認できた。

図-11 は供試体 E (かぶり 90mm, 上面貯水無し, 非排水条件) のマクロセル電流密度の変化である。降雨中は値が上昇し、降雨終了後は減少傾向にあることがわかる。電気抵抗の経時変化と比較すると、降雨によりコンクリート中のひび割れ断面が湿潤状態になると腐食速度が大きくなり、乾燥に向かうと小さくなることがわかる。降雨が終了すると同時に上面および底面から乾燥に向かうため、底面非排水より乾燥する速度が早いためと考えられる。また、サイクルが経過するとひび割れ断面、特に底面付近が乾燥し、マクロセル電流密度が低下していることがわかる。一方、供試体 C, D, F では供試体 E と概ね同様の結果となり、かぶりが異なっても値の大小に一貫した傾向は見られなかった。このことから、ひび割れ幅が 0.3mm と大きいとかぶりの相違がマクロセル腐食の進行に及ぼす影響は少ないと考えられる。

非排水条件では底面付近で貯水され、一定の速度で腐食が進行すると考えられる。また、排水条件では、供試体底面から塩水が排水し、ひび割れ部の湿潤状態が低くなっていくためと考えられ、鉄筋コンクリートの排水性が良いと、マクロセル腐食の進行を低減させる可能性がある。

3.4 ミクロセル腐食電流の経時変化

図-12, 図-13, 図-14 にそれぞれ、図中に記述した供試体の曝露開始初期, 40 サイクル及び 80 サイクルにおけるミクロセル電流密度の経時変化を示す。ミクロセル電流密度は 5 サイクル毎に測定し、測定日時は降雨の 1 日前である。マクロセル電流密度と同様に、供試体中心のひび割れ部の鉄筋要素でミクロセル電流密度の値が卓越し、早い段階からミクロセル腐食が開始しており、ひび割れによる影響が大きいと考えられる。

供試体 B (かぶり 90mm, 上面貯水有り, 非排水条件)

$$W(g/cm^2) = \frac{a}{c} \int I_{corr} dt = \frac{a}{c} \int K(1/R_p) dt \quad (1)$$

$$\text{腐食減量率(\%)} = WS/W_1 \quad (2)$$

の腐食速度が著しく卓越しており、貯水により腐食の進行が速くなったと考えられる。また、供試体 A (かぶり 90mm, 上面貯水無し, 非排水条件) 及び供試体 B に比べ、供試体 E (かぶり 90mm, 上面貯水無し, 排水条件) ではミクロセル電流密度の値が小さくなっている。これも、マクロセル電流密度と同様、供試体底面から塩水が排水され、ひび割れ部の湿潤状態が低くなっていくためと考えられる。

3.5 腐食減量率

図-15 及び図-16 に各供試体における 100 サイクル経過時までのマクロセル腐食, ミクロセル腐食による腐

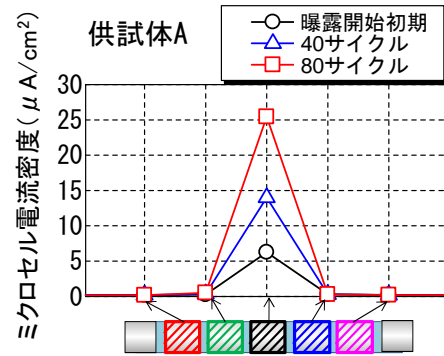


図-12 ミクロセル電流密度の経時変化 (供試体 A)

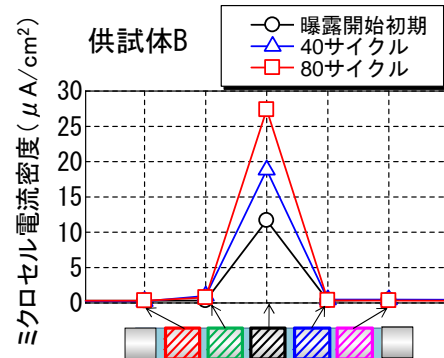


図-13 ミクロセル電流密度の経時変化 (供試体 B)

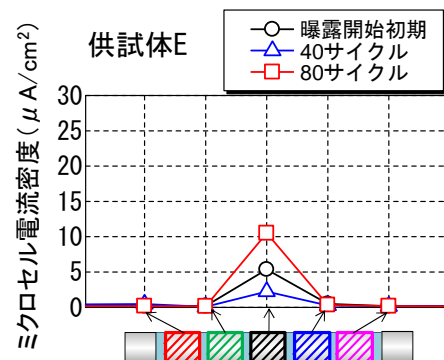


図-14 ミクロセル電流密度の経時変化 (供試体 E)

食減量率を示す。腐食減量率は腐食により鉄筋要素の重量が減少する割合のことで、以下に示すようにファラデーの法則を用いて 2 式により算出した。

ここで、 W : 腐食量 (g/cm^2), I_{corr} : 腐食電流密度 (A/cm^2), c : ファラデー定数 (C), a : 鉄を 2 価とし原子量を価数で除した値 (27.9g), K : 比例定数 (V), R_p : 分極抵抗 ($\Omega \cdot cm^2$) である。この腐食量を用いて以下の式により腐食減量率を算出する。 S : 鉄筋表面積 (cm^2), W_1 : 曝露 (打設) 前の鉄筋要素重量 (g) である。

ここでは、換算した腐食減量率により、上面貯水の有無 (図-15) 及びかぶりの相違 (図-16) の環境条件の相違が腐食減量率に及ぼす影響を比較、検討する。

まず、上面貯水の有無 (図-15) について述べる。両供試体ともマクロセル腐食よりミクロセル腐食のほう

が卓越している。また、供試体 A より供試体 B の腐食減量率が大きくなっている。本研究において、塩水が供試体上面に貯水すると、腐食を促進させることが確認できた。

図-16 では、供試体 C, D, E, F (それぞれかぶりが 30, 60, 90, 120mm) のかぶりの異なる排水条件の 4 体について述べる。マクロセル腐食による腐食減量率はかぶりが 120mm の供試体の値の低下が著しい。これはマクロセル腐食の進行は底面の排水条件が影響しているためと考えられる。120mm の供試体では鉄筋位置が底面に最も近く、底面排水の影響を大きく受けたと考えられる。さらに、かぶりが 30mm から 90mm では、マクロセル腐食にかぶりが影響しているとは言い難い。これにより、かぶりを大きくして、排水性を良くすればマクロセル腐食が低減できることを示唆している。また、かぶりが小さくなるほどマイクロセル腐食による腐食減量率は卓越することが確認できる。これによりマイクロセル腐食については、かぶりの相違が及ぼす影響が大きく、かぶりが小さいとマイクロセル腐食は卓越すると考えられる。

マクロセル腐食は大きい回路を形成する腐食のことで、ひび割れ部の鉄筋要素以外の鉄筋要素における劣化因子量も影響する。一方、マイクロセル腐食は極小の回路を形成する腐食である。降雨環境にあるにおいてひび割れ部の鉄筋要素に容易に劣化因子が侵入し、かつ、かぶりが小さい場合はおいては、マイクロセル腐食が促進する環境になると考えられる。

4. まとめ

本研究の範囲で得られた結論を以下に述べる。

- (1) 塩水降雨-乾燥繰り返し環境下のひび割れ断面において、上面付近の電気抵抗の変化は降雨の影響であると考えられる。
- (2) 非排水条件においては、底面付近は降雨による抵抗変化がほとんどないほど多湿になると考えられる。排水条件では、ひび割れ断面下部の湿潤状態に大きく影響し、供試体上面からの蒸発よりも多量の水分が排水されることがわかる。
- (3) ひび割れを有する供試体を塩水降雨-乾燥繰り返し環境に曝露させると、直ちに、ひび割れ部の鉄筋要素がアノード反応、他の要素でカソード反応を示すマクロセル腐食が開始することがわかった。
- (4) 貯水により湿潤状態が長く保たれること、また供試体上面に溜まる塩化物の結晶が降雨により溶け出し、塩水が高濃度となって再び供試体中に浸入することは、腐食を促進させる要因として考えられる。
- (5) 排水条件では、供試体底面から塩水が排水し、ひび

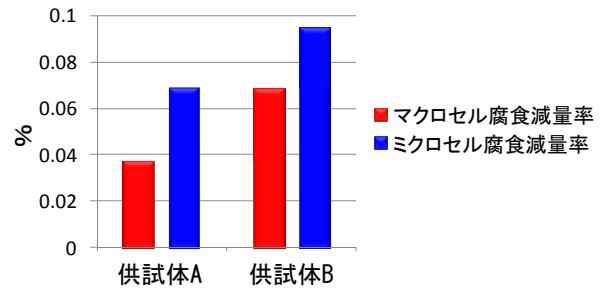


図-15 腐食減量率 (上面貯水の有無)

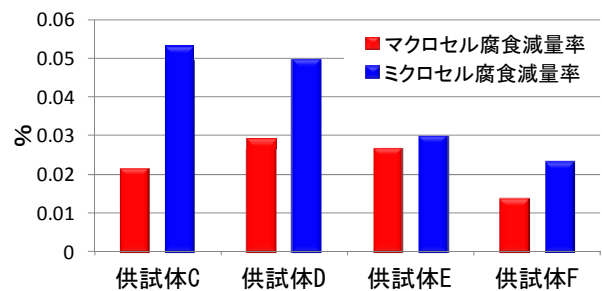


図-16 腐食減量率 (かぶりの相違)

割れ部の湿潤状態が低くなっていくためと考えられ、鉄筋コンクリートの排水性が良いと、マクロセル腐食の進行を低減させる可能性がある。

- (6) かぶりを大きくして、排水性を良くすればマクロセル腐食が低減できる可能性がある。
- (7) マイクロセル腐食については、かぶりの相違が及ぼす影響が大きく、かぶりが小さいとマイクロセル腐食は卓越することがわかった。

参考文献

- 1) 宮里心一・大即信明・小長井彰祐：分割鉄筋を用いたマクロセル電流測定方法の実験的・理論的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.547-552，2001
- 2) 腐食防食協会編：腐食・防食ハンドブック，丸善，2000
- 3) 水流徹・前田龍・春山志郎：交流法腐食モニターの局部腐食への適用，No.28，pp.638-644，1979
- 4) Stern, M. and Geary, A.L. : Electrochemical Polarization, I.A Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves, Journal of the Electrochemical Society, Vol.104, No.1, pp.56-63, 1957
- 5) 田中良樹ら：硬化コンクリートの比抵抗と含水率の関係，土木学会第 55 回年次学術講演概要集，V-226，2000