

酸素低減材を断面修復部に用いたコンクリート中鉄筋の腐食性状

愛媛大学 学生会員 ○増原菜美 鹿島建設 非会員 杉谷紗理
愛媛大学大学院 正会員 河合慶有 愛媛大学大学院 正会員 氏家勲

1. はじめに

近年、コンクリート中鉄筋の腐食に伴う RC 構造物の早期劣化が社会問題となっている。従来、RC 構造物において鉄筋腐食によりかぶりコンクリートに剥離・剥落などの変状が生じた部位には、断面修復工法が行われている。断面修復工法とは、かぶりコンクリートに生じた腐食ひび割れ部分をはつり取り、そこに断面修復材を充填することによりコンクリート断面を回復する工法である。しかし、母材コンクリートに残存する腐食要因物質により、母材部をアノード、それ以外をカソードとするマクロセル腐食が発生し、早期に再劣化する可能性が指摘されている。また、近年では好気性微生物を用いた鉄筋腐食抑制技術の開発が進められている¹⁾。好気性微生物が代謝の際に酸素を消費することから、腐食反応のうちカソード反応を抑制できる可能性が示唆されている。そこで本研究では、好気性微生物を練り混ぜたコンクリートを断面修復部に適用した供試体を対象として、塩水を用いた乾湿作用下におけるマクロセル腐食抑制効果について把握することを目的とした。

2. 実験概要

(1) 供試体概要及び養生方法

本研究では、図 1 に示すように断面 100×100mm、長さ 400mm の角柱供試体を作製した。かぶりは 50mm とし、8 個の鉄筋要素を絶縁接続した分割鉄筋を埋設した。なお、供試体左側より鉄筋要素 A～H と呼称する。分割鉄筋は、異形鉄筋（D13mm、長さ 20mm）の両端にリード線をはんだで固定し、エポキシ樹脂を用いてはんだ付け部分を被覆し作製した。セメントは普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm³）とし、水セメント比は 55%とした。コンクリートの配合を表 1 に示す。配合は、基準とした OPC 及び好気性微生物を置換率 50%で混入した OPC-N である。なお、菌種は既往の研究¹⁾を参考にして納豆菌を用いた。母材部分となる両端部（それぞれ 120mm）には、予め塩化物イオン濃度 10kg/m³を混入した OPC 配合のコンクリートを打ち込んだ。24 時間後に両端部の硬化を確認後、金ブラシを用いて打継面を粗くする前処理を施した。その後、修復部となる中央（160mm）に OPC 及び OPC-N 配合のコンクリートを打ち込んだ。修復部を打ち込んでから 24 時間後に脱型し、材齢 28 日まで水中養生を行った。修復部に OPC を打ち込んだ供試体を CSR とし、OPC-N を打ち込んだ供試体を CSR-N と呼称する。また、供試体は各検討ケースについて 2 本ずつ作製した。

(2) 乾湿繰り返し実験

本検討では、初期養生が終了した供試体を対象として、質量パーセント濃度 10%の塩化ナトリウム水溶液を用いて 6 時間のサイクルで乾湿繰り返し実験を行った。材齢 28 日から 2 週間に 1 回、自然電位及び分極抵抗を測定し、腐食の判定を行った。なお、分極抵抗は AC インピーダンス法を用いて測定した。自然電位に基づく腐食の判定には、ASTM C876 を用いた。また、ミクロセル電流密度は分極抵抗値から Stern-Geary 式の K 値を 0.0209 として算出した。材齢 84 日から 91 日において、隣接する鉄筋要素間に無抵抗電流計を接続して電流を計測し、マクロセル電流密度を算出した。なお、結果は腐食電流の流入出を考慮してアノード電流を＋、カソード電流を－として表示している。また、各鉄筋要素への酸素透過量を評価するために、材齢 28 日においてカソード分極試験（掃引速度 1mV/s）を行い、限界電流を仮定することにより、酸素透過量を算出した。

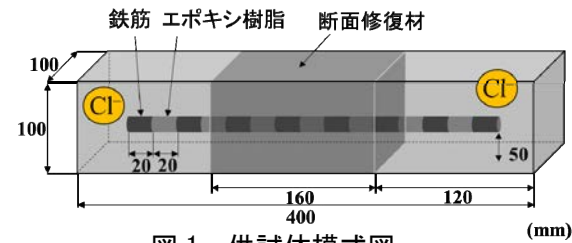


図 1 供試体模式図

表 1 コンクリート配合

配合ケース	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					(g/m ³)
			W	C	S	G	納豆菌	
OPC	55	49	165	300	877	954		3589
OPC-N	55	49	83	300	877	954	83	3589

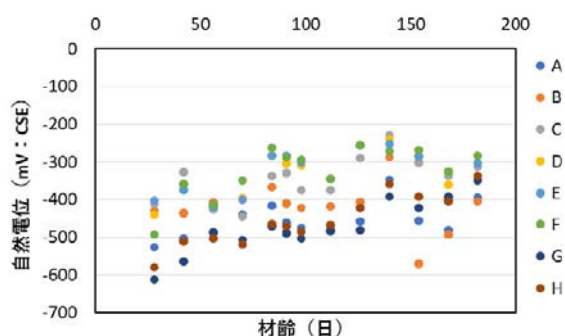


図3 CSRの自然電位の経時変化

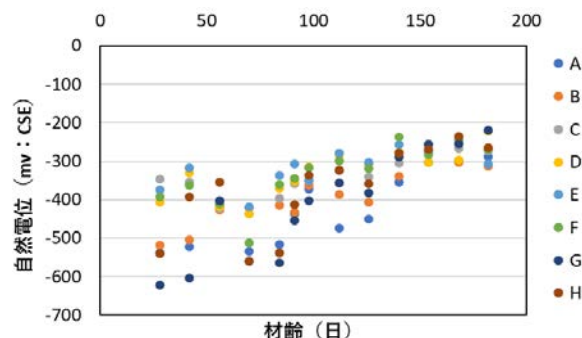


図4 CSR-Nの自然電位の経時変化

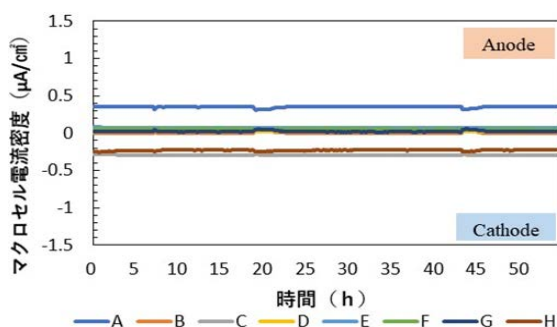


図5 CSRのマクロセル電流密度

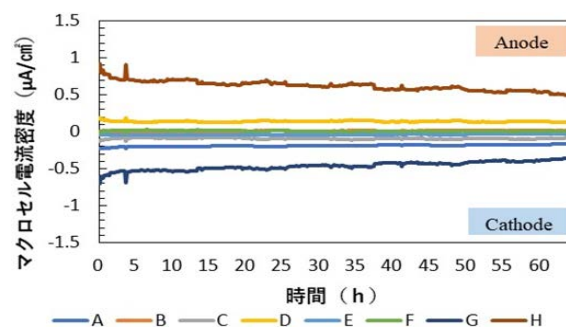


図6 CSR-Nのマクロセル電流密度

3. 納豆菌を用いた断面修復材中の鉄筋腐食性状

図3及び図4に材齢28日から182日の間で2週間ごとに測定されたCSR及びCSR-Nの各鉄筋要素の自然電位の測定結果をそれぞれ示す。なお、検討ケースごとに作製した2体の供試体の自然電位が同程度の値を示したため、2体の供試体のうち1体の結果を示す。図3より、CSR修復部では、材齢126日まで自然電位が-350mVより卑な値であった。修復部には、塩分は含まれておらず、腐食は発生し難い環境であるが、-500mVを下回った鉄筋要素も確認された。母材部のミクロセル電流密度は、鉄筋要素Bを除いて $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$ を上回っており、母材部の自然電位が修復部の自然電位に影響し、卑化した可能性が考えられる。一方CSR-N修復部では、図4に示すように材齢91日まで-350mVより卑な値となった鉄筋が確認されたが、その後徐々に貴化し母材部を含めて材齢182日には腐食不確定の判定区分に自然電位が推移している。加えて、CSR-N母材部ではミクロセル電流密度が $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$ を下回っており、CSR母材部と比較してミクロセル腐食が抑制されているようであった。

次に材齢91日までに測定されたCSR及びCSR-N供試体のマクロセル電流密度の結果を図5及び図6にそれぞれ示す。CSR及びCSR-N供試体は、いずれの供試体においてもマクロセル電流密度が $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ を上回るため、マクロセル腐食の発生が明確に確認された。図5よりCSRでは、母材部（要素A）をアノード部、修復部（要素C及びH）をカソード部としたマクロセル腐食が形成されていることがわかる。一方CSR-Nでは、図6に示すように母材部（要素H）をアノード部、母材部（要素G）をカソード部としてマクロセルが形成されている。以上から、CSR-Nでは母材部内でマクロセル腐食の発生が確認されたものの、母材部と修復部間のマクロセル腐食形成は確認されていない。これは、納豆菌の代謝により修復部のカソード反応が抑制されたためと推察される。特に、材齢28日に測定されたCSR-N修復部における酸素透過量は、CSR修復部と比較して、50.9%減少していることが確認された。以上の結果より、材齢91日までにCSR-N修復部における自然電位が卑な値となった現象は、腐食の発生に伴う変動ではなく納豆菌の代謝に伴う鉄筋周囲の酸素量の低減に起因した可能性が示唆される。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費（19H02216）により実施いたしました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) K. Kawaai, T. Nishida, A. Saito, I. Ujike, and S. Fujioka : Corrosion resistance of steel bars in mortar mixtures mixed with organic matter, microbial or other, Cement and Concrete Research, Vol.124, 105822, 2019.10.