

若材齢時における断面修復材と鉄筋の電気化学的特性に及ぼす結合材と環境作用の影響

東北大学 学生会員 ○渡邊 義久

東北大学 正会員 皆川 浩 宮本 慎太郎 久田 真

(株)住友大阪セメント 鹿島 篤志

1. 研究の背景と目的

補修設計段階でコンクリート構造物の電気防食工法の防食効果を予測する場合、コンクリート中鋼材に流入する防食電流や鋼材の分極量を三次元 FEM で計算する手法が用いられている。しかし、一般的に実施されている手法では、コンクリート、断面修復材および鋼材の表面の状態が変化しない定常状態を想定しているため、防食効果の経時変化を予測するものにはなっていない。これは、これらの物性変化に関する基礎的な情報が不足していることに起因する。本研究では、これらを踏まえ、結合材の水和反応や環境作用による断面修復材の電気抵抗率と断面修復材中の鋼材のカソード分極抵抗の経時変化を実験的に評価した。

2. 実験概要

適切な防食効果を得るためには設計段階で正しく防食電流分布を予測する必要がある。防食電流分布は分極抵抗とコンクリートの電気抵抗率の比である分極パラメータに影響を受ける¹⁾ので、本研究では、供試体の電気抵抗率 ρ を測定する実験（実験 A）と、供試体中の鉄筋のカソード分極抵抗 R_c を測定する実験（実験 B）をそれぞれ実施した。

2.1 使用材料と配合

本研究で使用したモルタル供試体の配合を表-1 に示す。本研究では結合材として超速硬セメント（S）、早強ポルトランドセメント（H）の2種類を使用し、ポリマーを添加する水準では、アクリル酸ビニルの粉末ポリマー（AVA）を使用した。ポリマー有り、無しの水準はそれぞれ供試体名に AVA、NON で表記する。

細骨材は標準砂を使用した。また、目標空気量を得るために、全水準で結合材の 1.5 mass% の空気量調整剤を単位水量に対して置換して使用した。

2.2 供試体概要

供試体の形状と寸法を図-1 に示す。実験 B の供試体にはチタンリボンメッシュ陽極と、あらかじめ塩水を噴霧して腐食させた鉄筋を埋設した。表-2 に、実験 A、B の環境条件を示す。乾湿繰返しの条件は「1 日間 3 %NaCl 水溶液に浸せきし、6 日間 R.H.60 %で乾燥」を 1 サイクルとする水準（乾湿 6-1）と「3 日間 3 %NaCl 水溶液に浸せきし、4 日間 R.H.60 %で乾燥」を 1 サイクルとする水準（乾湿 4-3）の 2 水準とし、測定材齢までこのサイクルを繰り返した。ただし、実験 B における乾湿繰返しの水準では図-1 の上面のみ浸せきした。

2.3 測定項目と方法

2.3.1 実験 A

JSCE-G 581-2018 の四電極法 A 法により電気抵抗率 ρ を測定した。また、容積基準容積含水率を JIS A 1476:2016

表-1 配合

供試体	W/C	S/C	P/C (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m3)				
					W	C	S	P	空気量調整剤
S-NON	0.50	3.07	0.0	4.4	233	479	1473	0	7
S-AVA-3.7	0.50	3.34	3.7	6.2	213	441	1473	16	7
S-AVA-7.4	0.50	3.45	7.4	5.9	207	426	1473	32	6
S-AVA-11.1	0.50	3.58	11.1	5.8	200	411	1473	46	6
H-NON	0.50	3.00	0.0	4.2	238	491	1473	0	7
H-AVA-7.4	0.50	3.41	7.4	5.9	210	432	1473	38	6

表-2 養生概要

		環境条件							材齡
実験 A	練混ぜ・打ち込み	20℃							～1 日
	脱型・養生	20℃, R.H.90 %気中	20℃, R.H.60 %気中	20℃, 乾湿 6-1	20℃, 乾湿 4-3	20℃, 封緘	20℃, 水中	1 日 ～28 日	
実験 B	練混ぜ・打ち込み	20℃							～1 日
	脱型・初期養生	20℃, 封緘							1 日 ～12 日
	エポキシ樹脂塗布・硬化	20℃, R.H.30%気中							12 日 ～14 日
	養生	20℃, R.H.90%気中	20℃, R.H.60%気中	20℃, 乾湿 6-1	20℃, 乾湿 4-3	14 日 ～28 日			

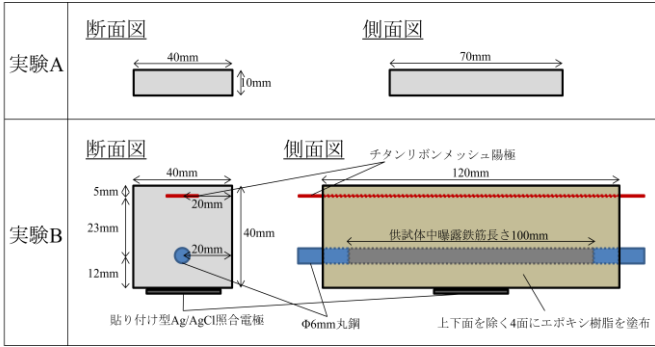


図-1 供試体概要

によって測定した。

2.3.2 実験 B

鉄筋表面積あたりの電流密度を変化させて E-logi 試験を行い、およそ 200 mV までの分極量と電流密度の実験結果を 2 次式で近似した。そして、その近似曲線の分極量 100 mV での接線の傾きをカソード分極抵抗 R_c として算出した。

3. 実験結果と考察

図-2 に、電気抵抗率の経時変化に及ぼす環境条件の影響を示す。供試体は S-NON である。乾湿繰返しの水準では、塩水から NaCl が供給され、液相中のイオン濃度が上昇することにより、電気抵抗率は他水準より低く

キーワード 電気防食 電気抵抗率 カソード分極抵抗 分極パラメータ 断面修復材

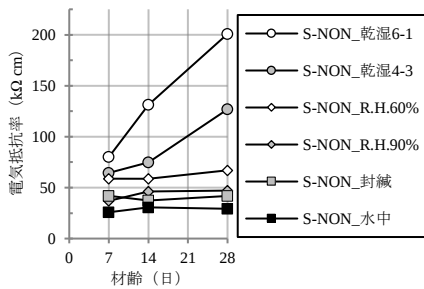


図-2 電気抵抗率の経時変化に及ぼす環境条件の影響

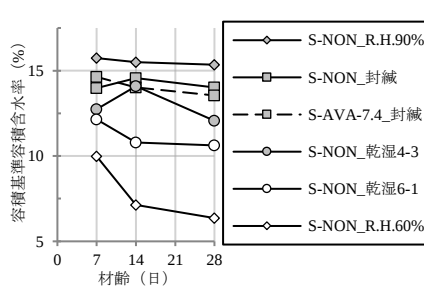


図-3 容積基準容積含水率の経時変化に及ぼす環境条件とポリマーの有無の影響

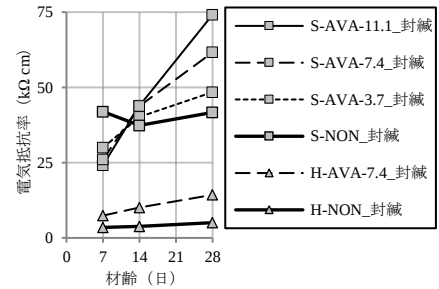


図-4 電気抵抗率の経時変化に及ぼす結合材種類と P/C の影響

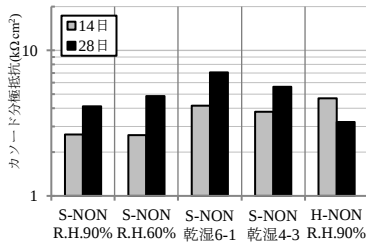


図-5 環境条件と結合材が Rc に及ぼす影響

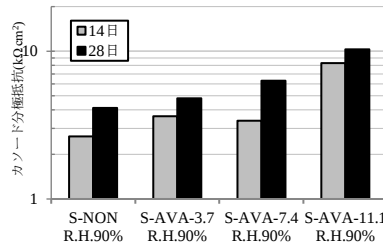


図-6 P/C が Rc に及ぼす影響

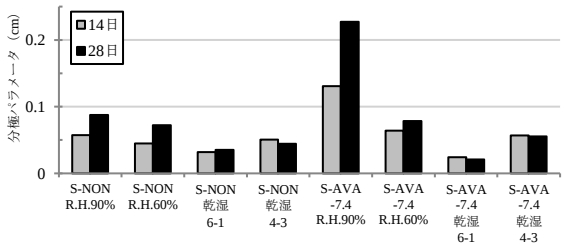


図-7 分極パラメータの算定結果

なることが予想された。しかし、実際の実験結果では、他水準と比較して経時的に ρ が大きく増加する傾向が確認できた。既報²⁾において、海水を練混ぜ水として用いた場合、海水中の NaCl によって C_3S の初期水和反応が促進され、空隙構造が緻密化されることが報告されている。本研究で使用した超速硬セメントにも C_3S が含まれている。そのため、作用した塩水から供試体中に NaCl が侵入し、未水和の C_3S の反応を促進して硬化体の空隙構造を緻密化し、この影響が液相中のイオン濃度の増加による影響を上回ったため、乾湿繰返しのケースでは経時的に ρ が大きく増加したと考えられる。ここで、図-3 に示すように、乾湿繰返しの水準は、R.H.60% 気中の水準よりも容積基準容積含水率が高くなることが確認できる。このことから、NaCl の供給に伴う空隙構造の緻密化が電気抵抗率に及ぼす影響は、供試体中の自由水量の影響よりも大きいと考えられる。ただし、塩水の作用回数の多い乾湿 4-3 の方が乾湿 6-1 よりも電気抵抗率が小さくなったのは、図-3 に示すように含水率が比較的高いことと空隙水中のイオン量が増加したことにより起因すると考えられる。このように、材齢初期に海水が断続的に作用する環境下では、NaCl の侵入に伴う空隙構造の緻密化、含水率の変化、空隙水中のイオン濃度の変化が電気抵抗率の経時変化に相互に影響を及ぼすと考えられる。

図-4 に結合材の種類と P/C が電気抵抗率の経時変化に及ぼす影響を示す。結合材種類によらず、ポリマーの添加により電気抵抗率が上昇することが確認できた。また、同じ種類の結合材で比較すると、材齢の長期化に伴い、P/C が高い水準ほど電気抵抗率がより増加する傾向が見られた。加えて、図-3 に示すように、S-AVA-7.4_封緘の容積基準容積含水率は、経時的に減少した。既報³⁾において、乾燥が進行するとポリマーが造膜しやすくなり、このポリマーの被膜充填効果により空隙構造が緻密化することが示唆されている。本研究においても、水和反応に伴う自己乾燥により供試体中の自由水量が減少することによってポリマーの造膜が進行し、その結果、電気抵抗率が上昇したと考えられる。

図-5、図-6 に供試体中鉄筋のカソード分極抵抗の経時変化を示す。図-5 より、S-NON の配合で環境条件の影響を比較すると、材齢の経過とともに R.H.60 % と R.H.90 % の気中の水準よりも、乾湿繰返しの条件の方がカソード分極抵抗は高くなった。これは、前述のような NaCl の供給が引き起こす空隙構造の緻密化により、鉄筋への酸素供給量が低下したことにより起因すると推察される。また、図-6 から P/C が高い水準ほどカソード分極抵抗が高くなる傾向が確認できた。これは、ポリマーの被膜充填に伴う空隙構造の緻密化により鉄筋表面への酸素の供給速度が低下したためと考えられる。

図-7 に、実験 A、B から得られた供試体の電気抵抗率と供試体中鉄筋のカソード分極抵抗から算出した分極パラメータ (R_c/ρ) を示す。図-7 において、ポリマーの有無によらず、R.H.90% 気中の水準が他水準より分極パラメータが大きい値を取った。このことから、より湿潤な環境では、電気抵抗率が低下する影響が強く、その結果、分極パラメータが増大すると考えられる。

4. 結論

- (1) 若材齢におけるモルタル供試体の電気抵抗率およびカソード分極抵抗の経時変化は、結合材種類や環境条件、P/C の影響を受ける。
- (2) 弱材齢における分極パラメータは、NaCl が供給されない湿潤な環境ほど、大きい値をとる傾向が得られた。本研究の範囲では、カソード分極抵抗よりも電気抵抗率の方が分極パラメータに強く影響すると思われる。

謝辞

本研究は、上田記念財団第 9 期助成対象研究として実施したものである。ここに記して深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 1) 吉田秀典ほか：電流分散範囲を考慮した分極抵抗評価に関する数値解析的研究，土木学会論文集 A2，Vol.69，pp.1-677-1-687，2013
- 2) 酒井貴洋ほか：海水および海砂を用いた自己充填型コンクリートの実用化に関する基礎的研究，土木学会論文集 E2，Vol.72，No.3，pp.196-213，2016
- 3) 伊藤正憲ほか：環境条件を考慮したポリマーセメント系断面修復材の性能評価，コンクリート工学論文集，Vol.19，No.3，pp.1-10，2008