

論文 温度が鉄筋のカソード分極特性に及ぼす影響の評価

佐藤 唯^{*1}・鹿島 篤志^{*2}・皆川 浩^{*3}・久田 真^{*4}

要旨：電気防食において防食電流の分布に影響を及ぼすカソード分極特性は温度によって変化する可能性があるが、それらを定量的に評価した事例は少ない。本研究では、温度が鉄筋のカソード分極特性に及ぼす影響を把握する事を目的とし、温度をパラメータとして鉄筋の腐食状況が異なる鉄筋コンクリート供試体に対してカソード分極試験を行った。その結果、温度が低くなるとカソード分極抵抗は大きくなり、所定の分極量を確保するための防食電流密度は小さくなる傾向を示した。このことから、コンクリート構造物の電気防食の運用において電流密度を決定する場合、温度の影響を考慮する必要がある事が明確となった。

キーワード：電気防食, カソード分極特性, 温度, 分極抵抗, 電流密度

1. はじめに

海水飛沫や凍結防止剤、海砂の使用などに起因する塩分により、コンクリート構造物中の鋼材が腐食し耐力が低下する劣化現象が日本各地で報告されている。社会基盤の長期安全性が重要視される今日では、環境によっては他工法と比較して再劣化のリスクが小さい電気化学的防食工法の需要が高まっている。2001年には、土木学会から「電気化学的防食工法設計・施工指針」¹⁾が発表され、本工法の施工実績も増加している。

電気防食における要求性能とは、設定された防食期間において、所定の防食電位の変化量または絶対値を満足するように、適切な量の防食電流を適切な分布で供給し続ける事である²⁾。すなわち電位変化量、防食電流およびその分布を設計段階で予測する事が望ましい。しかしながら、必要とされる防食電流は鉄筋の腐食程度、塩化物イオン濃度および含水状態などにより異なるため、実際には高精度で予測することは難しい。

その一方で、FEM解析などの数値解析モデルが開発され、電位変化量、防食電流およびその分布の予測技術は進歩している^{3) 4)}。これら解析モデルでは、陽極のアノード分極抵抗、鉄筋のカソード分極抵抗、およびコンクリートの比抵抗などを入力パラメータとするが、これらの入力パラメータの評価方法やモデル化については未だ不明確な点が多い。

既往の研究⁵⁾によると、鉄筋のカソード分極抵抗はコンクリート中の塩化物イオン濃度、鋼材腐食の有無、湿度などに影響を受けると述べられている。これら様々な要因に影響を受けるカソード分極抵抗は、防食電流密度や復極量に影響を及ぼすため、電気防食の運用における重要なファクターの一つである。しかし、コンクリート

中や鉄筋表面の環境に影響を及ぼし、鉄筋のカソード分極抵抗を変化させると考えられる温度の影響に関する研究はいまだ少ない。

以上より本研究では、温度が鉄筋のカソード分極特性に及ぼす影響を把握する事を目的とし、温度をパラメータとして鉄筋の腐食状況の異なる鉄筋コンクリート供試体に対してカソード分極試験を実施した。

2. 実験概要

2.1 実験の要因と水準

カソード分極試験を行う際、温度、鉄筋の腐食グレードおよびコンクリートの配合を実験要因とした。温度は5°C, 10°C, 20°C, 30°C, 40°Cの5水準、腐食グレードはA~Eの5水準、配合は表-1に示すようにセメント種類として、普通ポルトランドセメントおよび早強ポルトランドセメントを用いた2水準とした。また、コンクリート中の塩化物イオン量は表-2に示すように鉄筋の腐食グレードに応じて0.0, 1.2, 2.5kg/m³とした。

2.2 供試体概要

(1) 供試体の形状、寸法

供試体の形状、寸法を図-1に示す。供試体寸法は200×200×100mmとし、電食により腐食させたD13の異形鉄筋を母材コンクリート表面からのかぶりが33.5mmとなるように配筋した。また、鉄筋の両端部をコンクリート表面から30mmの位置までエポキシ樹脂で被覆した。

(2) 使用材料と配合

コンクリートの配合を表-1に示す。コンクリートの配合は港湾棧橋床版およびPC橋梁桁を模擬するために、普通ポルトランドセメントでW/C=50%, 早強ポルトラ

*1 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 住友大阪セメント(株) 建材事業部 (非会員)

*3 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻助教 博(工) (正会員)

*4 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻教授 博(工) (正会員)

ンドセメントで W/C=40%の 2 水準とした。細骨材には宮城県黒川郡大和町産山砂 (表乾密度 2.62 g/cm³, 吸水率 1.76%, 粗粒率 2.69), 粗骨材には宮城県丸森町産砕石 (表乾密度 2.85 g/cm³, 吸水率 0.98 %, 最大骨材寸法 20mm), 鉄筋については D13 の異形鉄筋をあらかじめ各種腐食グレードの腐食状態に調整したものを使用した。陽極材については寸法 150×150mm のチタンメッシュ陽極を用いた。

(3) 鉄筋の腐食グレード

鉄筋の腐食グレードの分類は様々であるが、本研究では、土木学会コンクリート標準示方書[維持管理編]⁶⁾、(社)日本コンクリート工学協会の腐食状況の分類⁷⁾、および西日本旅客鉄道の鉄筋腐食状態⁸⁾を参考とし、表-2 に示す腐食グレードと鋼材の腐食状況にて分類し検討を実施した。なお、分極試験終了後、鉄筋を供試体からは取り出し、鉄筋の質量減少率を測定した。鉄筋の質量減少率を表-3 に示す。

(4) 鉄筋の腐食方法

供試体打設前の鉄筋に電食を施すことで鉄筋を腐食させた。円筒容器中にチタンメッシュ、鉄筋を設置し、塩化物イオン濃度 3% の NaCl 水溶液を封入し、10A 程度の直流電流を通电させた。通电中は、エアポンプを用いて腐食要因である酸素を溶液中に供給させた。

(5) 供試体の作製方法

各腐食グレードの腐食状態にした鉄筋を所定の位置に設置し、母材コンクリートを打設した。打設翌日に、陽極の端部がコンクリートの端部から 25mm の位置になるようにプラスチック釘を用いて陽極を打設面に固定した。陽極設置後、電気防食用陽極被覆モルタル (電気抵抗率=98 Ω m) にて陽極を厚さ 20mm ほど被覆した。さらに翌日には型枠を脱型し、供試体は 20℃ 環境下にて水中養生させ、脱型からの材齢で 60 日後に試験環境へ移設した。

2.3 実験方法

(1) 温度の調整方法

各配合、各腐食グレードの供試体を 1 体ずつ恒温槽に設置し、恒温槽内の温度を表-4 の手順で変化させた。その際、より正確に供試体の内部温度を測定できるように、別途作製した熱電対を埋設した同配合、同寸法の供試体も同時に設置した。なお別途作製した供試体には鉄筋のみ設置した。測定結果を図-2 に示す。

(2) カソード分極試験方法

所定の保存期間終了後、公称直径から算出される鉄筋表面積辺りの電流密度を変化させてカソード分極試験を行い、みかけのカソード分極曲線を評価した。なお、実構造物では鉄筋径を多点で把握することが困難なこと、

表-1 コンクリートの配合

供試体	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
				W	C	S	G	AE 剤
OPC	50	4.5	43	169	338	765	1103	0.085
HPC	40	4.5	43.1	169	423	735	1055	0.106

表-2 腐食グレード、腐食状況、塩化物イオン量

腐食グレード	鋼材の腐食状況	塩化物イオン量
A	施工時の状態を保ち腐食なし	0.0kg/m ³
B	部分的に浮き錆が認められる	1.2kg/m ³
C	表面の大部分に腐食が認められる	2.5kg/m ³
D	鉄筋の全周にわたり断面欠損	2.5kg/m ³
E	鉄筋断面が 3/6~4/6 欠損している	2.5kg/m ³

表-3 鉄筋の質量減少率

腐食グレード		A	B	C	D	E
質量減少率	OPC (%)	0.1	1.3	8.9	11	73
	HPC (%)	0.1	1.4	6.1	8.8	73

表-4 温度変化

温度 (°C)	20	5	10	30	40
湿度 (%)	90	90	90	90	90
期間 (日)	61	14	14	14	14

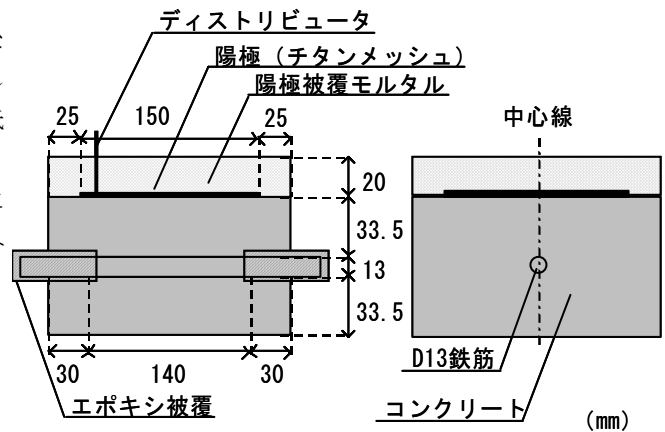


図-1 供試体の形状、寸法

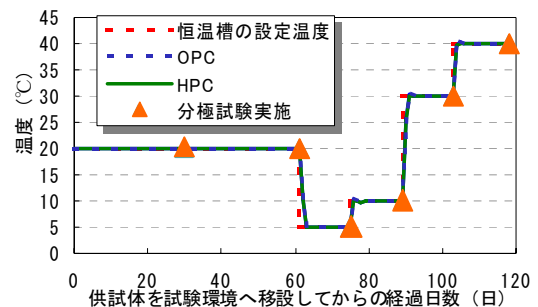


図-2 供試体内部温度

および、FEMによる電流分布の数値解析予測では、公称直径を用いて配筋の幾何学モデルを構築することが一般的であることから、本研究でのカソード分極抵抗に関する検討は、鋼材の公称直径を用いたみかけの値について行った。供試体に設置した陽極材と鉄筋に直流電源を接続し、所定の電流量を鋼材のオン電位が安定するまで印加、通電時の鋼材電位および通電遮断直後の鋼材電位を測定した。鋼材の電位は図-3に示す位置に鉛照合電極をコンクリート表面に設置し、分極量100mVを達成するまでに約4回、分極量250mV近傍を達成するまでに約4回の測定を実施した。

また測定時の室温は、供試体を保管した恒温槽内の温度と同一に調整し、その温度を保持したままカソード分極試験を実施した。

3. 実験結果と考察

3.1 温度がみかけのカソード分極曲線に及ぼす影響

OPC, HPC 供試体のカソード分極試験結果を図-4に示す。なお、図-4の凡例は、OPC-A-5°Cであれば、OPC 供試体で腐食グレードAかつ温度5°Cの結果を表す。

図-4より、一般的な傾向として、腐食グレードが同一であれば、みかけのカソード分極曲線は温度によって変化することがわかる。なお、この傾向は腐食グレード、配合によらず認められた。

また、腐食グレード毎にみかけのカソード分極曲線を比較すると、温度によらず腐食量が多いほど分極しにくいという結果が得られた。これは、電食による腐食と塩化物イオンの混入により不動態被膜の破壊程度が腐食グレードによって異なっているためと考えられる。なお、腐食グレードEに関しては、必ずしもこの傾向に従わなかった。この理由としては、表-3に示すように腐食グレードEでは断面欠損量が他のグレードと比較して著しく多く、実際の鉄筋表面積が公称直径より算出される表面積よりも小さくなり、結果として、実際の鉄筋表面積あたりの電流密度がみかけのものよりも大きくなったため、分極量が過大に評価されたと考えられる。

3.2 温度がみかけのカソード分極抵抗に及ぼす影響

FEMによる電流分布や鋼材電位の予測では、鋼材のカソード分極特性などをモデル化し、それを境界条件としてLaplace方程式を数値的に解く手法が一般的に用いられる。このとき、カソード分極特性はカソード分極曲線を数学モデルに置き換えることによりキャラクター化される。しかし、カソード分極曲線は非線形であるため、計算負荷を避ける目的で線形近似することがあるが、近似式が不適切であると解析結果が真値から乖離することが、既往の研究⁴⁾より指摘されている。

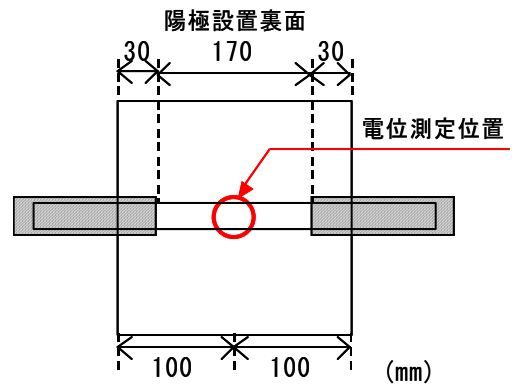


図-3 電位測定位置

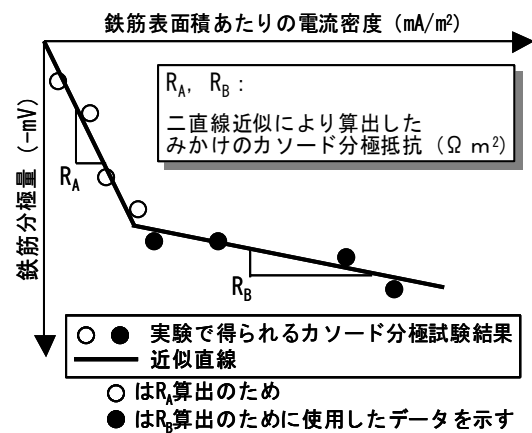


図-5 みかけのカソード分極抵抗算出方法

そこで、本研究では図-5に示すようにカソード分極曲線を二直線近似することで二つのみかけのカソード分極抵抗を算出した。定量的に曲線を直線近似するために、各直線における相関係数Rの二乗値の和が最大となるように近似直線を決定した。

図-4のみかけのカソード分極曲線から算出したみかけのカソード分極抵抗と温度の関係を図-6に示す。

図-6より、一般的に、みかけのカソード分極抵抗は温度の上昇とともに減少し、その変化の程度は20°C以上の高温の領域において収束するような挙動を示した。これは、鉄筋の分極に影響を及ぼすカソード反応の活性およびカソード反応に必要な酸素の拡散が温度とともに上昇するためと考えられる。供試体が5°C、10°C（以下低温と称す）環境下にあると鉄筋のみかけの分極抵抗は、20°C（以下常温と称す）および30°C、40°C（以下高温と称す）環境下と比較して約2~8倍大きくなる傾向が認められた。

断面欠損の少ない腐食グレードA~Dで腐食グレード毎にカソード分極抵抗を比較すると、腐食が進行している腐食グレードDの供試体が、みかけのカソード分極抵抗の温度による変化量が最も小さかった。

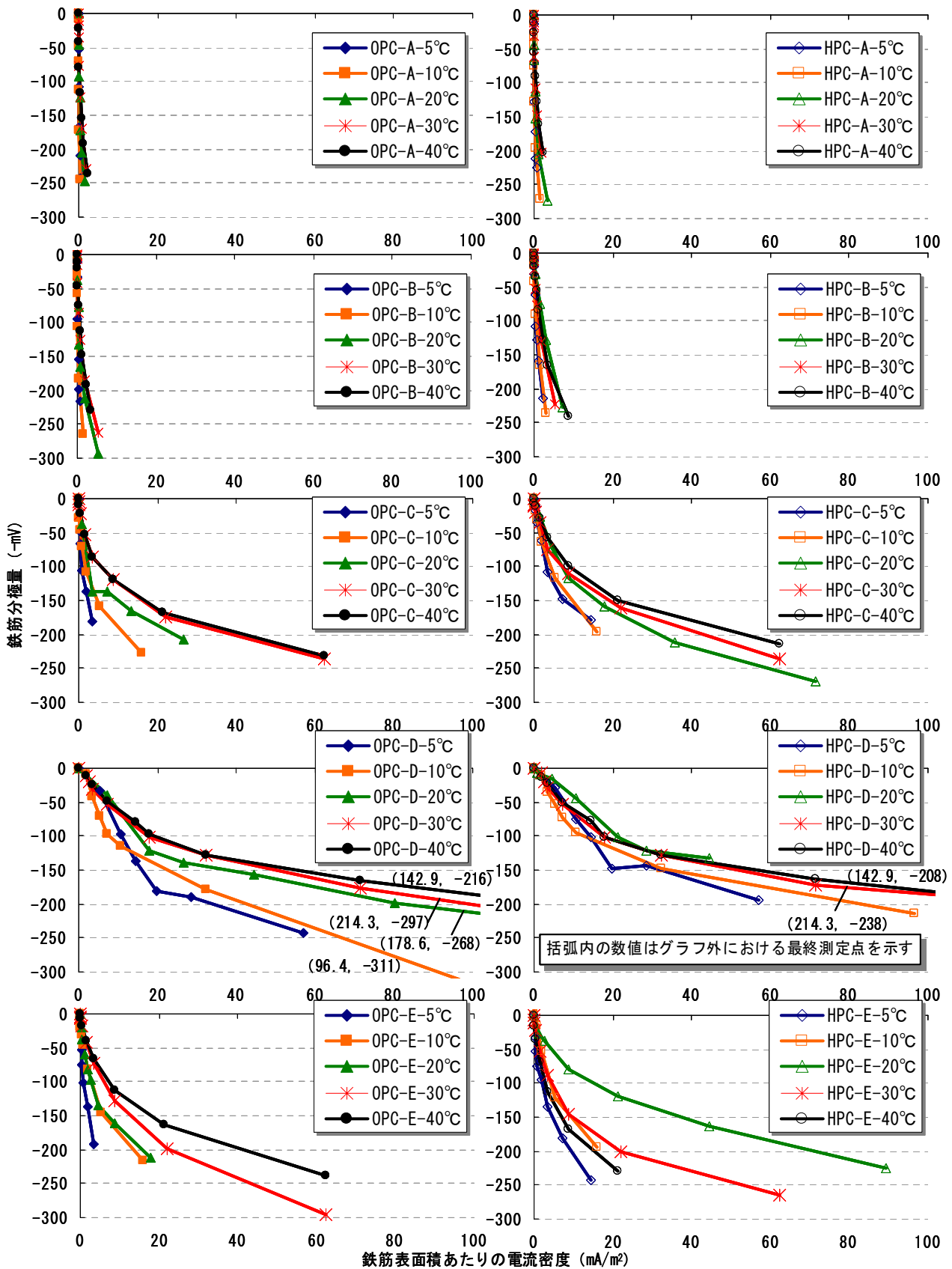


図-4 みかけのカソード分極曲線

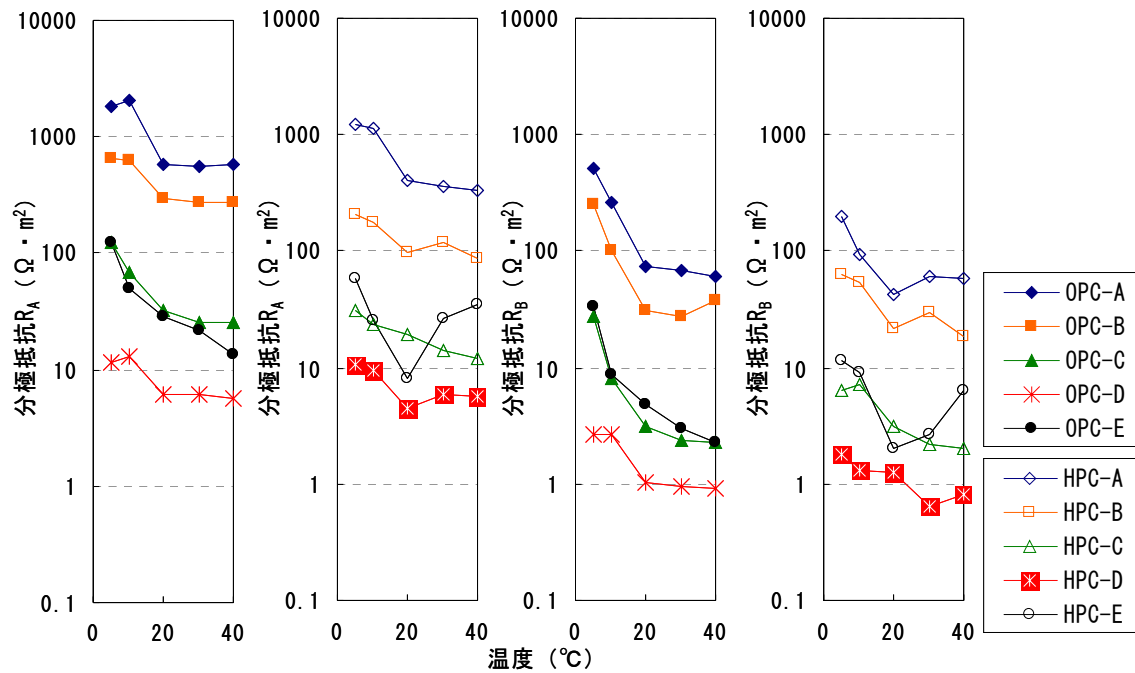


図-6 みかけのカソード分極抵抗と温度の関係

OPC 供試体と HPC 供試体のカソード分極抵抗の比より、配合の違いがカソード分極抵抗と温度の関係へ及ぼす影響を図-7 に示す。図-7 より、配合別に比較すると、腐食グレード、温度によらず OPC 供試体の方が分極抵抗が大きいという傾向が認められた。なお、OPC 供試体の方が最大で約 4 倍、平均して 2 倍ほど HPC 供試体と比較して大きいという結果が得られた。

3.3 温度が所要の分極に必要な電流密度に及ぼす影響

鉄筋が 100mV および 150mV の分極量を達成した際の電流密度と温度の関係を図-8 に示す。

図-8 より、配合によらず温度が増加するほど、鉄筋が 100mV および 150mV の分極量を達成した際の電流密度が大きくなる傾向が認められた。特に鉄筋が 30℃以上の環境で 100mV の分極量を達成するための電流密度は、10℃以下の環境と比較して約 2~8 倍大きく、また、同様に 150mV の分極量を達成するための電流密度は、約 1.5~8 倍大きいという結果が得られた。この理由としては、3.1、3.2 節で述べたように、温度が増加したことによってみかけの分極抵抗が低下したためと考えられる。また、同一温度において 100mV および 150mV の分極量を達成したときの電流密度を鉄筋の腐食グレードについて比較すると、腐食程度が進行するほど大きくなった。この要因としては、電流密度、電位変化量および分極抵抗の関係より、電流密度がカソード分極抵抗に反比例するため、腐食程度が進行して、みかけのカソード分極抵抗の絶対値が小さい鉄筋ほど所定の分極量に必要な防食電流密度が大きく変化することが考えられる。腐食グレード A、B については、温度が増加しても所要の分極に必要な電

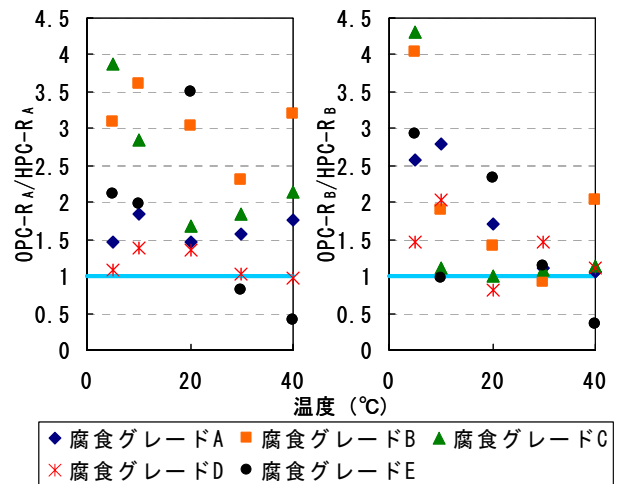


図-7 配合がみかけのカソード分極抵抗と温度の関係に及ぼす影響

流密度は $1\text{mA}/\text{m}^2$ 以内の変化であった。

しかし、腐食グレード C、E では所要の分極に必要な電流密度は約 $5\sim 15\text{mA}/\text{m}^2$ 変化し、腐食グレード D では約 $10\sim 40\text{mA}/\text{m}^2$ 変化した。これらの結果より、電気防食適用時に温度の影響を考慮して電流密度を設定する場合は、コンクリート中の鉄筋の腐食性状をはつり調査時の目視観察などで把握する必要があると考えられる。

4. まとめ

温度が鉄筋のカソード分極特性に及ぼす影響を把握する事を目的とし、5℃~40℃の温度をパラメータとして鉄筋の腐食状況の異なる鉄筋コンクリート供試体に対してカソード分極試験を行った。以下に本研究で得られた知見をまとめる。

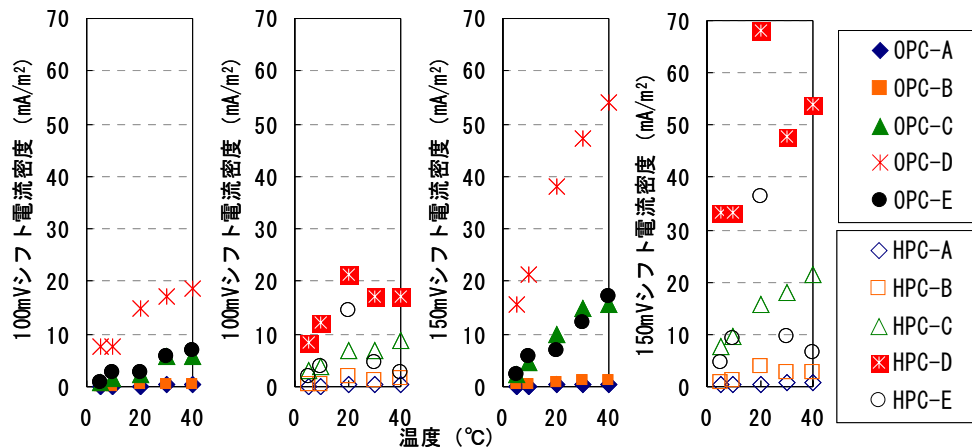


図-8 所要の分極量を達成した際の鉄筋表面積あたりの電流密度と温度の関係

- (1) 一般的な傾向として腐食グレードが同一であれば、みかけのカソード分極曲線は温度によって変化する。また、腐食量が多いほど分極はし難くなる。しかし、鉄筋断面が半分以上欠損している場合は必ずしもこの傾向に従わなかった。
- (2) みかけのカソード分極抵抗は温度の上昇とともに減少し、その変化の程度は 20°C以上の高温の領域において収束するような挙動を示した。10°C以下の環境におけるみかけのカソード分極抵抗は 20°C以上の環境と比較して約 2~8 倍大きいという結果が得られた。
- (3) みかけのカソード分極抵抗は、同一の腐食グレード、温度で比較した場合では OPC 供試体の方が最大で約 4 倍、平均して約 2 倍ほど HPC 供試体と比較して大きいという傾向が認められた。
- (4) 100mV および 150mV の分極量を満足するための電流密度は温度の上昇に伴い増加し、その温度依存性は、鉄筋腐食が進行するほど大きくなるという傾向が認められた。

以上より、本研究において温度とカソード分極特性の基礎的な関係が明らかとなった。実験結果より、温度変化によって鉄筋のカソード分極特性は変化することが認められた。鉄筋のカソード分極特性は電気防食を運用する際の電流密度に影響を及ぼすため、夏期と冬期で気温差が大きい地域は注意が必要である。夏期に設定した電流密度で冬期に運用すると過防食が発生する可能性が考えられる。しかし、実環境では温度のみが変化するという条件は少ない。今後、湿度変化や塩化物イオン濃度分布などと複合的に実験を実施し、温度とカソード分極特性の更なる関係を明らかにする必要があると考えられる。

謝辞

本研究の遂行にあたりご助力を賜りました住友大阪セメント（株）山本誠氏、若杉三紀夫氏をはじめ関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー107 電気防食設計施工指針（案），2001.11
- 2) 土木学会：コンクリート委員会 コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会（338 委員会）委員会報告書，p.315，2009
- 3) 増田正孝，有田誠，LEE En Ju，花田賢志，川俣孝治，皆川浩：コンクリート中の鉄筋に対するカソード電気防食の FEM による評価，土木学会論文誌，No.791，pp.59-67，2005
- 4) 皆川浩，増田正孝，川俣孝治：有限要素法による鉄筋コンクリートの電気防食の電流分布に関する検討，「コンクリート構造物の長期性能照査支援モデル」に関するシンポジウム，Vol.JCI-C64，pp.351-356，日本コンクリート協会，2004
- 5) 青山敏幸，實盛明日香，関博：電気防食を適用した鋼材のカソード分極挙動に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1363-1368，2009
- 6) 土木学会：（社）土木学会コンクリート標準示方書[維持管理編]，p.109，2007
- 7) 日本コンクリート工学協会：（社）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），p.136，1990
- 8) 西日本旅客鉄道株式会社：鉄道本部施設部，コンクリート構造物補修の手引き[第四版]，p.7