

論文 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

青山 敏幸^{*1}・實盛 明日香^{*2}・関 博^{*3}

要旨：電気防食を適用した鋼材の防食に必要な電流密度ならびに分極特性を定量的に把握することを目的に、コンクリートの水セメント比、塩化物イオン濃度、鋼材腐食の有無、暴露環境をパラメータとした小型供試体の通電試験を実施した。通電開始から約 300 日までの間に実施した復極試験、分極試験の結果より、鋼材が腐食した供試体は、通電に伴う鋼材界面の環境変化により、通電前に比べて復極量、分極抵抗は大きくなり、防食電流密度は小さくなる傾向を示した。また鋼材が腐食していない場合は、復極量、防食電流密度の経時変化は小さい傾向を示した。

キーワード：電気防食、防食電流密度、カソード分極曲線

1. はじめに

コンクリート構造物の塩害対策工法のひとつに電気防食工法がある。本工法は、コンクリート内部あるいは表面に配置した陽極材からコンクリート中の鋼材に微弱電流を印加することにより、鋼材腐食を根本的に抑制する電気化学的手法である。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⁾（以下指針と称す）が発刊され、本工法の施工実績も増加している。

電気防食工法を適用する際に重要なことは、防食期間を通して鋼材の防食に必要な電流を流すことができるように陽極材を配置することである。すなわち陽極材の最適配置を実現するためには、設計の段階で構造物の状況に応じた防食電流密度を適切に設定する必要がある。しかし防食電流密度は、コンクリート中の鋼材量、塩化物イオン濃度、コンクリートの性状等により異なるため、指針¹⁾ではコンクリート表面積あたりで通常 1～30mA/m²程度であるとの記述に留まっている。

一方、線状陽極を用いた場合の陽極材の配置間隔の検討等、コンクリート中の電流分布を理論的に予測することを目的に、FEM 解析^{2),3),4)}を用いた数値シミュレーション技術も開発されている。本手法は、鋼材、陽極材、コンクリート断面の形状、配置に加え、コンクリートの比抵抗、鋼材、陽極材の分極特性（電流密度と電位の関係）を入力して計算を行うが、その際に使用する鋼材のカソード分極特性についても不明な点が多い。

そこで本研究は、電気防食工法を適用したコンクリート構造物を対象に、防食電流密度ならびに鋼材のカソード分極特性を定量的に把握することを目的に、コンクリートの水セメント比、コンクリート中の塩化物イオン濃度、鋼材腐食の有無、暴露環境をパラメータとした小型

供試体を作製し、約 300 日間にわたる通電試験を実施した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

(1) 形状・寸法

供試体の形状・寸法を図-1 に示す。供試体の寸法は 100×100×230mm とし、鋼材には JIS G 3123 に適合した直径 16mm のみがき丸鋼を、陽極には幅 20mm、厚さ 0.5mm の線状陽極（陽極材表面積：0.048m²/m×0.15m=0.0072m²）を、図-1 に示す位置に配置した。鋼材、陽極材の有効断面面積は、供試体中央部 150mm とし、鋼材、陽極材のそれぞれ両端部には塩ビパイプならびに絶縁テープにより、それぞれ供試体の端部から 40mm のかぶりを設けた。なおコンクリートの打設は、ブリーディング水による鋼材腐食の偏りを防ぐため、図に示す方向から打設した。

(2) 種類

供試体の種類を表-1 に示す。供試体パラメータは、コンクリートの水セメント比、コンクリート中の塩化物イオン濃度、鋼材腐食の有無（電食試験実施の有無）、暴露環境とした。

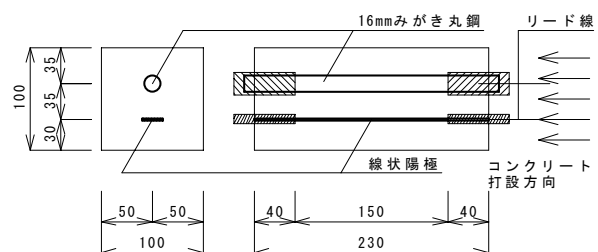


図-1 供試体の形状・寸法

*1 (株) ピーエス三菱 技術本部 開発メンテナンス部 修(工) (正会員)

*2 早稲田大学大学院創造理工学研究科

*3 早稲田大学理工学術院社会環境工学科 工博 (正会員)

コンクリートの水セメント比は、プレテンション方式 PC 構造物を想定した $W/C=37\%$ と、コンクリートの設計基準強度 $35N/mm^2$ の RC 構造物を想定した $W/C=53\%$ の 2 種類とした。コンクリート中の塩化物イオン濃度は、 $0, 4.6, 9.1kg/m^3$ とした。塩化物イオン濃度が $4.6, 9.1kg/m^3$ の供試体は、一部の供試体を除き、通電試験前に電食試験により鋼材を腐食させた。暴露条件は、乾燥環境と湿潤環境とした。

各供試体への通電電流密度は、通電開始時に実施した分極試験により、ほぼ $100mV$ の分極量が得られる電流密度とした。但し $100mV$ の分極量が得られない場合についても鋼材表面積に対して $30mA/m^2$ を通電の最大値とし、通電期間中は同一電流密度で通電をした。

なお 37-9.1-D、37-9.1-W は約 1 ヶ月遅れて通電を開始したので、37-9.1-D、37-9.1-W は通電開始から 287 日、その他の供試体は通電開始から 321 日まで通電した。

(3) 使用材料

コンクリートの配合を表-2 に示す。 $W/C=37\%$ の供試体は早強ポルトランドセメントを、 $W/C=53\%$ の供試体は普通ポルトランドセメントを使用した。コンクリート中の塩化物イオン濃度は、所定の量になるように、練り混ぜ水に NaCl を混入することにより調整した。

また陽極には、酸化被膜を施したチタン系陽極材料を使用し、鋼材には直径 16mm のみがき丸鋼を使用した。

2.2 実験方法

(1) 腐食促進方法

鋼材腐食「有」の供試体は、電食により強制的に腐食させた。腐食の程度は、かぶりコンクリートにひび割れを発生させない範囲で腐食させるように、既往の研究⁵⁾を参考に積算電流量を $10.2mA \cdot h/cm^2$ に設定し、 $4mA$ (鋼材表面積に対しての電流密度を $0.053mA/cm^2$) で 8 日間の通電を行った。同一条件の腐食重量測定用供試体の電食終了後の腐食重量減、腐食面積率の測定結果は、表-3 に示す通りである。

(2) 通電方法

供試体の暴露方法ならびに通電方法を図-3 に示す。

乾燥環境、湿潤環境ともほぼ $20^\circ C$ の室内環境とし、乾燥環境はほぼ相対湿度 60%、湿潤環境は水を浸した容器の上に供試体を置き、密閉することにより、相対湿度 90% 以上を保持する環境とした。通電は、電食終了後から約 1 ヶ月経過した後に、同一種類の供試体 2 体を直列に接続して通電した。

(3) 通電期間中の測定項目

通電期間中は、1~2 ヶ月の頻度で復極試験ならびに分極試験を実施した。

復極試験は、鋼材のインスタントオフ電位、通電停止

表-1 供試体の種類

	供試体名	W/C (%)	Cl (kg/m^3)	鋼材腐食	暴露環境	電流密度※ (mA/m^2)	通電期間 (日)
1	37-0-D	37	0	無	乾燥 (D)	1	321
2	37-0-W				湿潤 (W)		
3	37-4.6-D		4.6	有	乾燥 (D)	10	321
4	37-4.6-W				湿潤 (W)		
5	37-9.1-D(無)		9.1	無	乾燥 (D)	10	321
6	37-9.1-W(無)				湿潤 (W)		
7	37-9.1-D			有	乾燥 (D)	30	287
8	37-9.1-W				湿潤 (W)		
9	53-0-D	53	0	無	乾燥 (D)	1	321
10	53-0-W				湿潤 (W)		
11	53-4.6-D		4.6	有	乾燥 (D)	30	321
12	53-4.6-W				湿潤 (W)		
13	53-9.1-D		9.1	有	乾燥 (D)	30	321
14	53-9.1-W				湿潤 (W)		

※鋼材表面積に対しての値

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)				
			W	C	S	G	Ad
37	4.5	48	155	419	744	1081	3.35
53	2.0	41	170	321	859	941	1.78

表-3 腐食重量減・腐食面積率の測定結果

W/C (%)	Cl (kg/m^3)	腐食重量減 (mg/cm^2)	腐食面積率 (%)
37	4.6	7.29	66.6
	9.1	11.27	82.7
53	4.6	8.49	68.1
	9.1	14.46	98.7

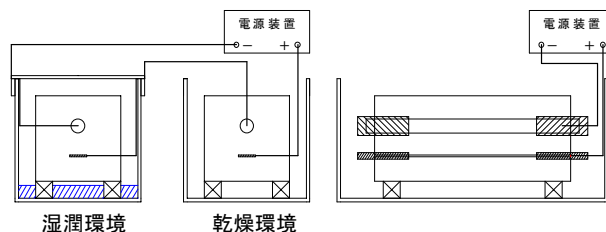


図-2 暴露環境ならびに通電方法

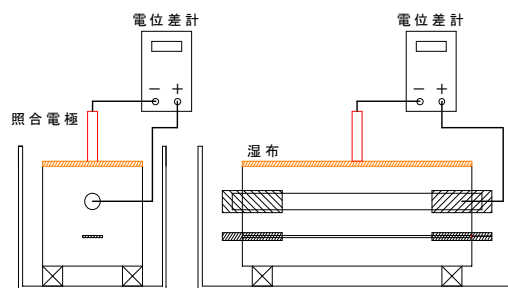


図-3 鋼材電位測定方法

から 24 時間後の電位を測定した。

分極試験は、復極試験終了後に鋼材表面積に対して 1,2,5,10,20,30,50,100 (一部供試体は 0.1,0.2,0.5 も実施)

mA/m^2 の電流密度で5分間保持した後に、インスタントオフ電位の測定と電流密度の増加を繰り返して曲線を描いた。

鋼材の電位は、図-3に示すように電位測定前に測定面を湿布した後に可搬式の照合電極を湿布にあて、電位差計にて測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 復極量の経時変化

W/C=37%, W/C=53%供試体の通電期間と復極量の関係を図-4にそれぞれ示す。

鋼材が腐食していない供試体 37-0-D, 37-0-Wは200~350mV, 37-9.1-D(無), 37-9.1-W(無)は250~400mV, 53-0-D, 53-0-Wは100~250mV程度の復極量で推移し、通電前後の復極量の変動は小さい傾向を示した。

一方、鋼材が腐食した供試体 37-4.6-D, 37-4.6-W, 37-9.1-D, 37-9.1-W, 53-4.6-D, 53-4.6-W, 53-9.1-D, 53-9.1-Wは、通電初期の復極量は小さかったが、通電期間の増加に伴い、復極量は増加する傾向を示した。この理由は、通電期間の増加に伴い、さび層中の三価鉄イオンの減少、還元反応で生じる OH^- によるpHの上昇、鋼材周辺の塩化物イオン減少等により鋼材表面の環境が改善したこと等が考えられる。

また乾燥環境と湿潤環境の違いが復極量に及ぼす影響を比較すると、塩化物イオン濃度が 4.6kg/m^3 の供試体 37-4.6-Dと37-4.6-W, 53-4.6-Dと53-4.6-Wは、ほぼ同等な挙動を示したのに対して、塩化物イオン濃度が 9.1kg/m^3 の供試体37-9.1-Dと37-9.1-W, 53-9.1-Dと53-9.1-Wは、通電期間全体を通して、湿潤環境に暴露した供試体は、乾燥環境に暴露した供試体に比べて復極量が小さい傾向を示した。その影響は、W/C=53%供試体の方が顕著に認められた。

既往の研究^{6),7),8)}によれば、鋼材の腐食は、鋼材周辺の塩化物イオン濃度、pH、酸素供給量、コンクリートの含水率等により複雑に変化すること、乾燥環境に比べて湿潤環境の腐食速度が大きい傾向にあると述べている。今回の実験でも、乾燥環境に比べて湿潤環境の方が腐食しやすい環境にあったことが、塩化物イオン濃度が 9.1kg/m^3 の供試体は、湿潤環境供試体が乾燥環境供試体に比べて復極量が小さい傾向を示した要因であるものと考えられる。

3.2 防食基準を満たす鋼材電流密度の経時変化

指針¹⁾では、コンクリート中の鋼材に電気防食工法を適用した場合の防食基準として、防食電流を流す前後の電位変化量が100mV以上変化させることを基本とすると述べている。本実験でも、通電期間中に実施した分極

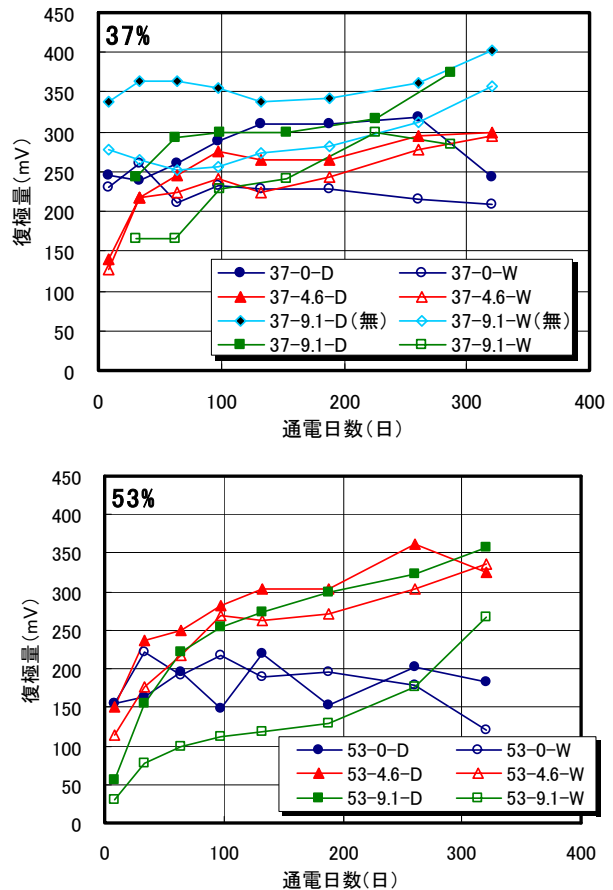


図-4 通電期間と復極量の関係

試験の関係から、100mVの分極量を得るために必要な電流密度を算出し、その値を防食電流密度とした。なお、以下で述べる電流密度は、全て鋼材表面積あたりの電流密度とする。

通電前ならびに通電後の分極試験より求めたカソード分極曲線を図-5に、カソード分極曲線の結果をもとに算出した通電期間と防食電流密度の関係を図-6に示す。

鋼材が腐食していない供試体 37-0-D, 37-0-Wの防食電流密度は、通電期間全体を通して 0.3mA/m^2 程度以下、37-9.1-D(無), 37-9.1-W(無)は $0.2\sim 2.0\text{mA/m}^2$ 程度、53-0-D, 53-0-Wは 0.5mA/m^2 程度であった。また通電期間の増加に伴う防食電流密度の変化も小さい傾向にあった。

一方、鋼材が腐食した供試体の通電前の防食電流密度は、塩化物イオン濃度が 4.6kg/m^3 の供試体 37-4.6-D, 37-4.6-Wで 10mA/m^2 程度、53-4.6-Dで 25mA/m^2 程度、53-4.6-Wで 50mA/m^2 程度であった。また塩化物イオン濃度が 9.1kg/m^3 の供試体 37-9.1-D, 37-9.1-Wで 25mA/m^2 程度、W/C=53%の53-9.1-Dで 80mA/m^2 程度であり、53-9.1-Wは 100mA/m^2 以上の大きな電流密度が必要であった。

しかし各供試体とも通電期間が増加するにしたがい

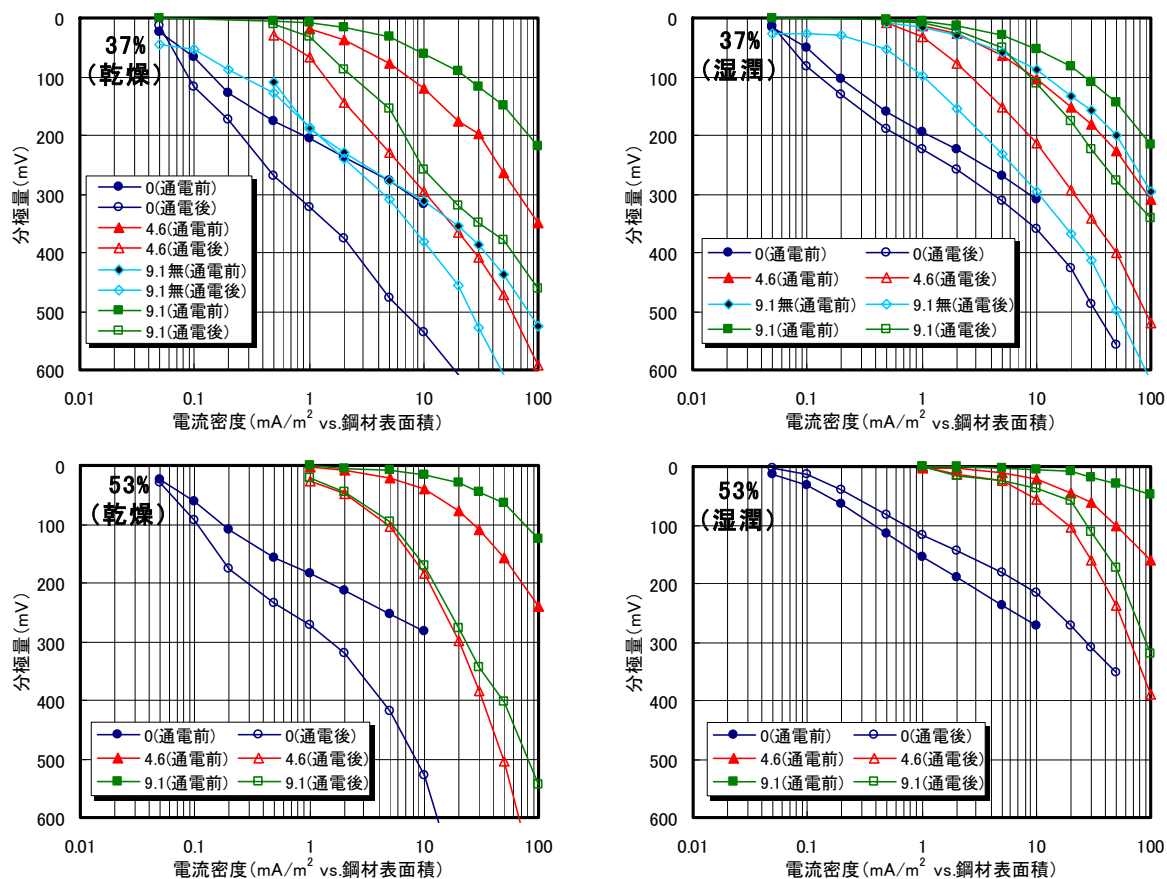


図-5 鋼材のカソード分極試験

防食電流密度も小さくなり、通電から約 300 日経過後の防食電流密度は、塩化物イオン濃度が 4.6kg/m^3 の供試体 37-4.6-D, 37-4.6-W で 3mA/m^2 程度、53-4.6-D で 4mA/m^2 程度、53-4.6-W で 16mA/m^2 程度であった。また塩化物イオン濃度が 9.1kg/m^3 の供試体 37-9.1-D は 3mA/m^2 程度、37-9.1-W で 10mA/m^2 程度、53-9.1-D で 4mA/m^2 程度、53-9.1-W で 30mA/m^2 程度となった。

なお、W/C=53%で塩化物イオン濃度が 4.6kg/m^3 の 53-4.6-D と 53-4.6-W は、通電期間と復極量の関係はほぼ同等な挙動を示したにもかかわらず、防食電流密度が異なった。この理由として、分極速度の影響が考えられる。

図-7 は、分極速度の影響を確認するため、分極試験により、通電時に設定した電流密度に相当する時の分極量を、復極量で除した値で示したものである。この値が小さいほど分極速度も遅いことを意味する。

図-7 に示す分極量と復極量の比率の関係より、乾燥環境にある供試体は、塩化物イオン濃度、鋼材腐食の有無によらず、分極量と復極量の比率は 0.8 を超えているのに対して、53-4.6-W, 53-9.1-W は、分極量と復極量の比率が 0.4 程度と小さく、今回の分極試験で設定した 5 分間保持では十分に分極しなかったことが、53-4.6-D と 53-9.1-W で防食電流密度が異なった要因であると考えられる。

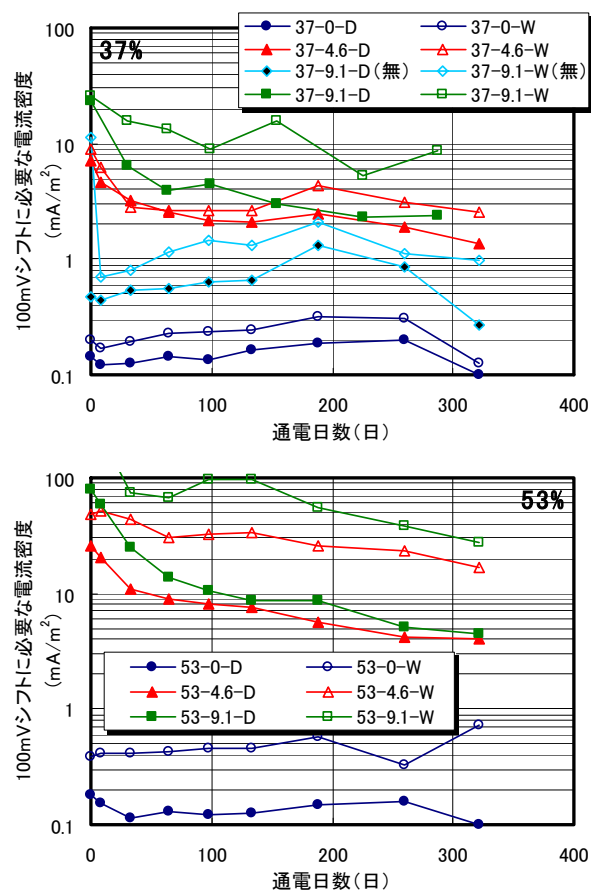


図-6 通電期間と防食電流密度の関係

3.3 カソード分極特性

図-5 に示すカソード分極曲線からもわかるように、鋼材の分極量と電流密度の対数は、直線的に変化する傾向を示すことから、報告書²⁾では、鋼材電位と電流密度の対数の関係から電位勾配を算出している。本手法は、幅広い電流密度の範囲において適用できるため、計算精度は向上するものと考えられるが、計算に多くの時間を要すること、収束性等に課題がある。

そこで本研究では、図-8 に示すように、各電流密度における分極量と電流密度の関係から、直線の傾きを算出し、電流密度に応じた分極抵抗を算出した。分極抵抗の算出式を以下に示す。

$$R_{pi} = E_i / i \quad (1)$$

ここで、 R_{pi} : 電流密度 i (mA/m^2) における分極抵抗 ($\Omega \cdot \text{m}^2$)、 E_i : 電流密度 i (mA/m^2) における分極量 (mV)、 i : 電流密度 (mA/m^2) である。

通電前、通電後の分極試験の結果をもとに、電流密度毎の分極抵抗を算出した結果を図-9 に示す。図中に示す太線は、各電流密度に対して 100mV の電位変化を示す分極抵抗を示したものであり、各電流密度に対して太線より分極抵抗が大きい場合は、防食基準を満足してい

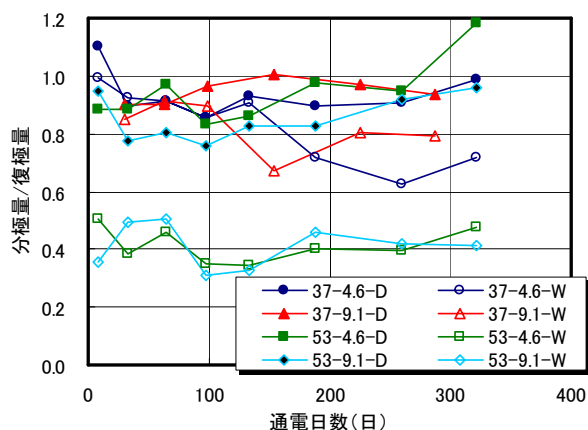


図-7 通電期間と分極量/復極量の関係

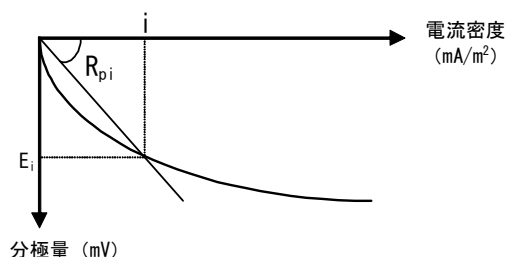


図-8 分極抵抗の算出方法

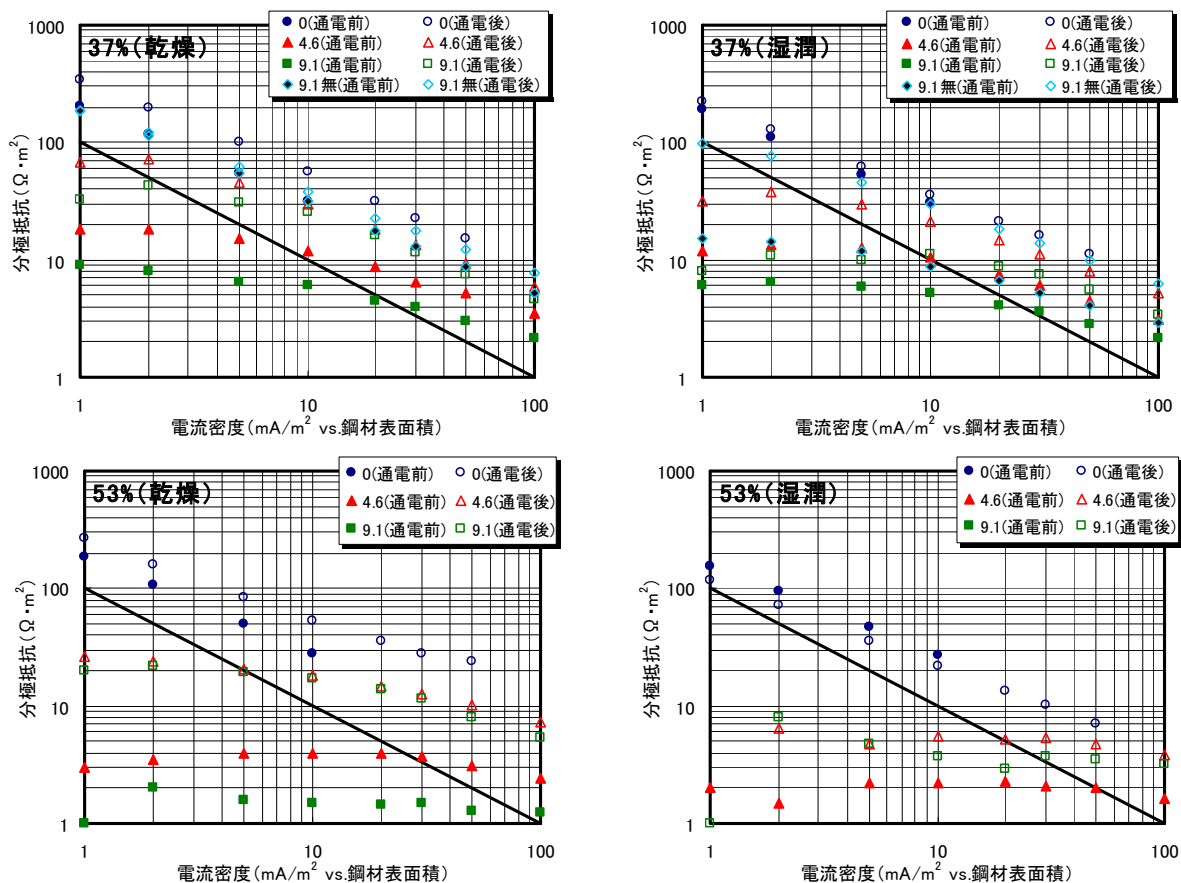


図-9 電流密度と分極抵抗の関係

ることを意味する。

図-9 に示す電流密度と分極抵抗の関係より、全体的には、電流密度が大きくなるにしたがい、分極抵抗が小さくなる傾向が認められた。

鋼材が腐食していない供試体 37-0-D, 37-0-W, 37-9.1-D(無), 37-9.1-W(無), 53-0-D, 53-0-W は、通電前、通電後ともに電流密度の対数と分極抵抗の対数には線形関係が認められた。またコンクリートの水セメント比、環境条件によらず、同一電流密度では、腐食していない供試体ほど分極抵抗は大きくなる傾向にあった。

鋼材が腐食した W/C=37%の供試体の通電前の分極抵抗は、鋼材がカソード分極しにくいため、電流密度が増加してもほぼ同一の値を示したが、電流密度が大きくなるにしたがい、電流密度の対数と分極抵抗の対数に線形関係が認められた。また通電約 300 日経過後には、通電前に対してより小さい電流密度で、同様な傾向が認められた。

鋼材が腐食した W/C=53%の供試体の通電前の分極抵抗は、W/C=37%と同様に、鋼材がカソード分極しにくいため、電流密度が増加してもほぼ同一の値を示した。

通電約 300 日経過後の乾燥環境では、電流密度が大きくなるにつれて、分極抵抗の対数と電流密度の対数に線形関係となる傾向を示した。しかし湿潤環境では、電流密度によらず線形関係が認められなかった。この理由は、先述したように湿潤環境の方が乾燥環境に比べて腐食しやすい環境にあったこと、湿潤環境の供試体は、分極速度が遅く、所定の電流密度に対して十分に鋼材が分極しなかったこと等の要因が考えられる。

今回、鋼材の分極特性（電流密度と電位の関係）の一般的な傾向がある程度明らかとなったので、今後はこれらの値を含めてより精度の高い解析が可能になると思われる。

4. まとめ

電気防食を適用した鋼材の防食に必要な電流密度ならびに鋼材の分極特性を定量的に把握することを目的に、水セメント比、コンクリート中の塩化物イオン濃度、鋼材腐食の有無、暴露環境をパラメータとした小型供試体の通電試験を実施した。

以下に、本研究の範囲内で得られた結論を示す。

- (1) 復極試験の結果より、腐食していない供試体は、通電期間中の復極量の変動は小さい傾向を示した。一方、鋼材が腐食した供試体は、通電により鋼材界面の環境が改善されるため、通電期間の増加に伴い復極量も増加する傾向を示した。
- (2) 分極試験の結果に基づき算出した防食電流密度の経時変化の結果より、鋼材が腐食していない供試体は、

通電前後で防食電流密度の変化は小さい傾向にあった。一方、鋼材が腐食した供試体は、水セメント比が高く、塩化物イオン濃度が高い供試体ほど通電前は大きな防食電流密度となったが、通電期間の増加に伴い防食電流密度は小さくなる傾向にあった。

- (3) 分極試験の結果から求めた電流密度毎の分極抵抗の結果より、分極抵抗は電流密度が大きくなるにしたがい小さくなる傾向にあること、低電流密度の範囲ほど、鋼材が腐食していない供試体と腐食した供試体で差が生じる傾向にあった。

謝辞：本実験の遂行にあたり、ご尽力を頂きました早稲田大学学部生の高桑敬太氏、岩国佐和氏をはじめ関係各位に感謝を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー107 電気防食工法設計施工指針（案），2001.11
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の電気的防食法 研究委員会報告書，1994.10
- 3) 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，pp.351-356，2004.10
- 4) 菊池 順，青山敏幸，関 博：塩化物濃度分布のあるコンクリート床版への電気防食の適用性に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.29，No.1，pp.913-918，2007.7
- 5) 細田喜子，石井浩司，田代賢吉，関 博：設置環境を考慮したコンクリート部材の電気防食基準に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.30，No.1，pp.1155-918，2008.7
- 6) 日本コンクリート工学協会：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，2004.10
- 7) 宮里心一，大即信明，木村勇人，水流徹：モルタルの欠陥部に生じる塩害あるいは中性化による鉄筋腐食の形態と速度，土木学会論文集，No.690/V-53，pp.83-93，2001.11
- 8) 大住道生，魚本健人：酸素拡散理論に基づくコンクリート中の鉄筋の腐食速度予測法，土木学会論文集，No.648/V-47，pp.1-8，2000.5