

論文 数種の条件の違いがモルタル中鉄筋の電気化学的測定結果に及ぼす影響

濱田 秀則*1・森川 亮太*2・佐川 康貴*3・池田 隆徳*4

要旨: コンクリート中鉄筋の不動態被膜の状態を推定する方法として、鉄筋の分極曲線を用いる方法がある。本実験では、環境条件が分極曲線の測定結果に及ぼす影響を把握するために、水セメント比、かぶり厚さの異なる供試体に対して分極曲線の測定を行った。2重対極センサーを用いて計測した分極曲線は従来の浸漬法による分極曲線と比較し、電流密度が小さくなる傾向を示した。また、大きな掃引速度で測定を行う場合、分極曲線は電流値が大きくなる方向にシフトしており、不動態被膜の状態はより破壊されている方向に判定される傾向であることが明らかとなった。

キーワード: 電気化学的手法, 分極曲線, 掃引速度, かぶり厚さ, 水セメント比

1. はじめに

コンクリート中の鉄筋の腐食状態を把握する事は極めて難しい事から、腐食によるひび割れ発生あるいは錆汁の流出によって初めて劣化が把握される事が多く、有効な補修や補強が困難な状態に陥る事がある。実構造物を合理的に維持管理していくためには、実構造物表面に鉄筋腐食による劣化損傷が顕在化する前に、鉄筋腐食の状態を把握することが重要である。実構造物の維持管理において、鉄筋腐食の状態を把握するためには、鉄筋の不動態被膜の状態に関する情報が非常に有益となる。

電気化学的手法の1つとして、鉄筋の分極曲線を求めることにより、不動態被膜の状態を推測する方法がある。分極曲線とは、金属がある環境中に存在する場合に、電位あるいは電流を、外部電源を用いて強制的に変化させることによって得られる電位電流曲線のことである。現在、分極曲線法については、大即が提案した方法¹⁾があり、発錆が起きる前に不動態被膜の状態が把握できるため、維持管理の観点から、非常に有効な手法になると考えられる。

しかし、従来の分極曲線の測定では、測定対象物を水に浸漬し、測定を行う必要がある。さらに、分極曲線の測定には自然電位の値によって変化するが、概ね40分程度必要とするため、実験室レベルでの適用に限られている。これらの現状を改良できれば、実構造物において、不動態被膜の状態を把握する非常に有効な手段になると考えられる。

したがって、本研究では、分極曲線の測定を実構造物に適用するための基礎的研究として、数種の条件(配合, かぶり厚さおよび電位の掃引速度)の違いがモルタル中

鉄筋の分極曲線に影響を及ぼす要因について実験的検討を行った。

2. 2重対極センサーを用いた測定方法の適用性の検討

本研究では、従来の分極曲線の測定方法に対し、新たな測定方法として2重対極センサーを用いた測定方法の適用性を検討した。2重対極センサーは、分極抵抗の計

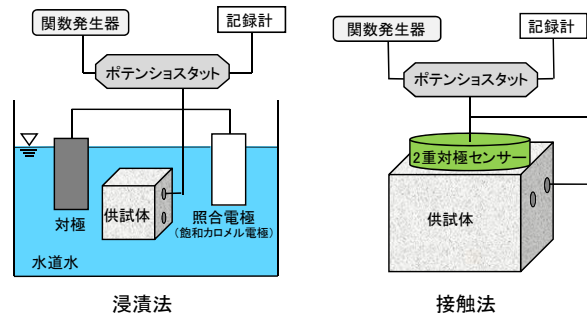


図-1 測定方法の概念図(左:浸漬法, 右:接触法)

表-1 不動態被膜のグレード判定基準¹⁾

グレード	分極曲線の値	不動態の状態
グレード0	電流密度が一度でも $100 \mu A/cm^2$ を超えるもの	全く不動態がない
グレード1	電流密度が $10 \sim 100 \mu A/cm^2$ を超えるもの	若干は不動態がある
グレード2	電流密度が一度でも $10 \mu A/cm^2$ を超え、かつグレード1またはグレード3に含まれないもの	↑ 不動態被膜の状態は悪くなる
グレード3	電流密度が $1 \sim 10 \mu A/cm^2$ にあるもの	
グレード4	電流密度が一度でも $1 \mu A/cm^2$ を超え、かつグレード1, グレード2, グレード3に含まれないもの	
グレード5	電流密度が $1 \mu A/cm^2$ を超えないもの	非常に良好な不動態がある

*1 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門 教授 博士 (工学) (正会員)

*2 春日市役所(元 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻) 修士(工学) (正会員)

*3 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門 助教 博士 (工学) (正会員)

*4 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 修士(工学) (正会員)

測器の一部として既に実用化されているものであることから、本研究においても使用した。本論文では、従来の分極曲線の測定方法を浸漬法、2重対極センサーを用いる方法を接触法と定義する。図-1に両測定方法の概念図を示す。

分極曲線法は、自然電位から自然電位+650mVまで電位を掃引し、その時に流出する電流と電位の関係をプロットし、その曲線から鉄筋の不動態の状態を判定することが出来る測定方法である。なお、本研究では、従来の測定方法を浸漬法、2重対極センサーを用いた方法を接触法と称する。また、本研究で用いた2重対極センサーは、携帯型腐食診断器（株）四国総合研究所製SRI-CM-IIIに付属のセンサーである。

2.1 検討項目

(1) グレード判定基準の適用性の検討

浸漬法には不動態被膜の状態を判定するグレード判定基準¹⁾が提案されている(表-1)。判定基準によると、電流密度が大きくなるほど、不動態被膜の状態は、より破壊されていると判定される。よって、本研究では、まず、接触法についても同様に判定基準が適用可能であるかを検討した。

(2) 掃引速度の影響の検討

大即が提案した分極曲線測定時の掃引速度は60mV/min.となっている¹⁾が、本実験で使用した装置の仕様上、掃引速度の基準値を50mV/min.とした。掃引速度を大きくすることによって、測定に要する時間が短縮可能であることから、掃引速度の変化が分極曲線に与える影響について検討した。本研究では、電位の掃引速度を50, 100, 200mV/min.と変化させ、測定を行った。

2.2 供試体概要

(1) 使用材料および配合

本研究では、鉄筋を埋設したモルタル供試体により検討を行った。セメントには、普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm³)を用い、細骨材には海砂(表乾密度:2.56g/cm³, 吸水率:1.56%)を使用した。鉄筋は普通丸鋼SR235φ13mmを用いた。また、表-2にモルタルの配合を示す。単位細骨材量を一定とし、水セメント比を40, 50, 60%と変化させた。

(2) 供試体形状

図-2に供試体の形状および寸法を示す。N60については、かぶり厚さ10mm、供試体寸法を150×150×50mmとし、N40, N50については、かぶり厚さ30mm、供試体寸法を150×150×100mmとした。鉄筋は、N60の供試体については1体につき2本配置し、N40, N50の供試体については1体につき3本配置した。なお、打設面に近い方から鉄筋をNo.1, No.2, No.3とした。その後、供試体内の鉄筋にリード線を接続した。

表-2 モルタルの配合

配合名	かぶり(mm)	W/C (%)	単位量(kg/m ³)		
			W	C	S
N40	30	40	229	574	1508
N50	30	50	252	503	1508
N60	10	60	269	448	1508

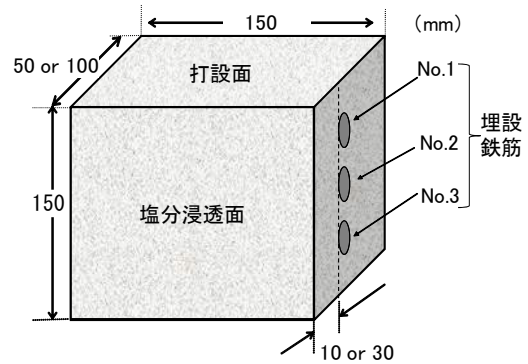


図-2 供試体の形状寸法

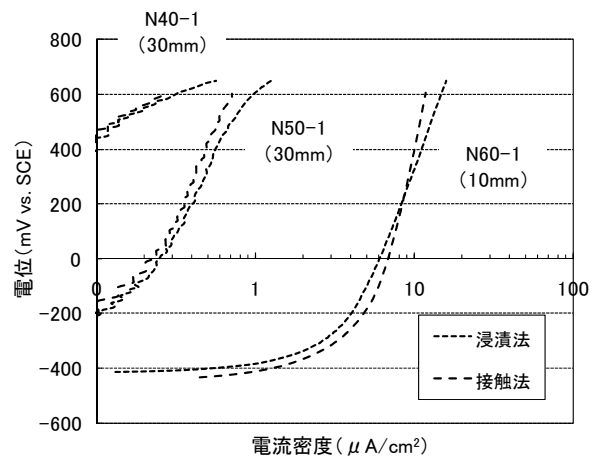


図-3 浸漬法と接触法の比較

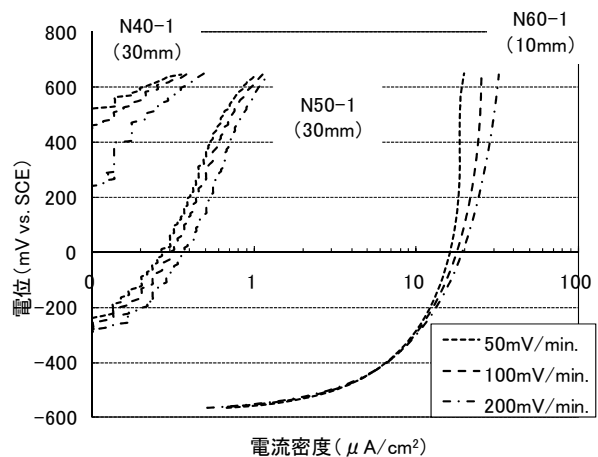


図-4 浸漬法における掃引速度の影響

(3) 養生および測定方法

供試体は、打設後 24 時間で脱型を行い、材齢 7 日まで水中養生を行った。その後材齢 21 日まで気中養生した後、塩化物イオンを一次元的に浸透させるため、打設面に直交する 1 面を除く 5 面をエポキシ樹脂により 2 層被覆した。その後、材齢 28 日より乾湿繰返しを開始し、塩分を浸透させた。

乾湿繰返しの方法は、乾燥 5 日、塩水浸漬 2 日を 1 サイクルとし、N40、N50 は 60 サイクル、N60 は 20 サイクル行った。なお、塩水の濃度は NaCl 換算で 10% とした。

分極曲線を測定した後、自然電位に戻るまでは時間を要するため、再度試験を行う際は 24 時間以上の間隔を空けて行った。なお、2 重対極センサーの照合電極は、飽和塩化銀電極であるため、SCE (飽和カロメル電極) に補正した値を実験データとして取り扱った。

2.3 実験結果および考察

本試験において、同一供試体内の鉄筋では、分極曲線の形状はすべて同様の傾向を示した。よって以下では、最も打設面に近い鉄筋 No.1 についてのみ結果を示す。

図-3 に掃引速度 50mV/min. で測定した時の浸漬法と接触法に分極曲線の比較を示す。図中の記号 N40-1 は、N40 供試体の鉄筋 No.1 の結果であることを示している。本研究の範囲内では、浸漬法と接触法とで分極曲線の形状はほぼ同じであった。したがって、従来法と同様、接触法についても表-1 の基準の適用が可能であると考えられる。

次に、各測定方法において、掃引速度を変化させた場合の分極曲線を図-4 (浸漬法) および図-5 (接触法) に示す。浸漬法および接触法ともに掃引速度が大きいほど右側にシフトしており、不動態被膜の状態は、グレードが小さい傾向、すなわち不動態被膜がより破壊されている傾向に判定される。

同一電位における電流密度の値を 50mV 毎に読み取り、掃引速度 50mV/min. の場合の電流密度と 100mV/min. および 200mV/min. の場合の電流密度の関係を検討した。

図-6 に、浸漬法により測定を行った際の、N40-1 における、50mV/min. の電流密度と 100mV/min. および 200mV/min. の電流密度の関係を示す。電流密度が大きくなると、直線関係から外れるものの、概ね直線関係となる。図より 100mV/min., 200mV/min. の電流密度は、50mV/min. に対しそれぞれ 22%, 69% 程度大きい値となった。なお、N50, N60 においても同様の傾向を示した。

以上より、接触法によって実構造物においても分極曲線より不動態被膜の状態を把握できる可能性が示された。

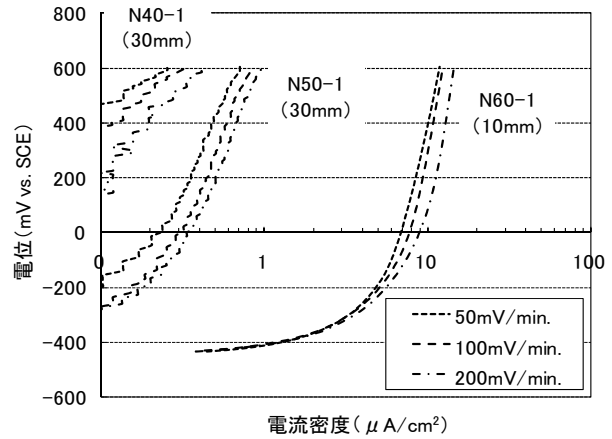


図-5 接触法における掃引速度の影響

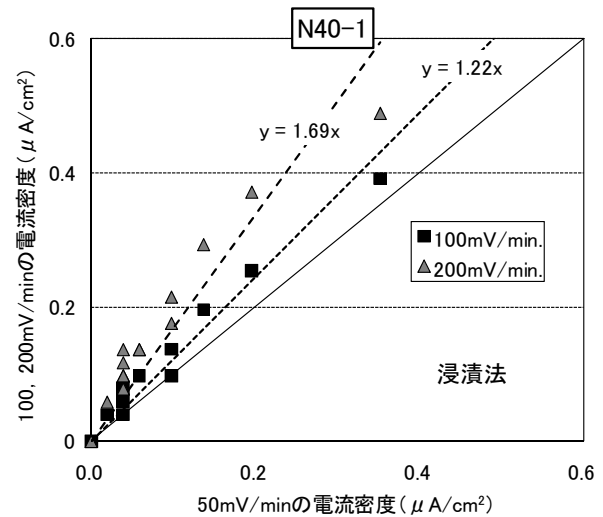


図-6 掃引速度 50mV/min. と 100mV/min., 200mV/min の比較 (浸漬法)

3. かぶり厚さが分極曲線に与える影響に関する検討

接触法は、実構造物において、不動態被膜の状態を把握できる有効な手段である可能性が示された。しかしながら、上記の検討では、かぶり厚さを 10mm または 30mm と小さく設定していたことから、実構造物への適用を考慮すると、かぶり厚さの影響について精査が必要である。そこで、かぶり厚さを変化させたモルタル供試体について同様の検討を行った。なお、ここではかぶり厚さの影響を把握することを目的としていることから、不動態被膜の状態は配合等によらず、できるだけ同じ状態が望ましいと考えられる。そこで、外来塩分の浸透ではなく、モルタルの練混ぜ時に塩分を添加することとした。

3.1 供試体概要

(1) 使用材料および配合

モルタルの配合条件は、2 章での検討と同様であり、単位細骨材量を一定(1508kg/m³)とし、水セメント比を 40, 50, 60% とした。なお、材料の都合上、本節での検討に

は、物性値の異なる海砂(表乾密度:2.57g/cm³, 吸水率:1.99%)を使用した。また、上述した理由から内在塩分を添加しており、塩化物イオン量で2.4kg/m³となるように練り混ぜ水にNaClを添加した。

(2) 供試体形状

図-7に供試体の形状を示す。供試体寸法は135×135×120mmとし、かぶり厚さは、50mm, 70mm, 100mmとした。なお、鉄筋は供試体1体につき2本配置した。その後、供試体内の鉄筋にリード線を接続し、分極曲線の測定を行った。

(3) 養生および測定方法

供試体は打設後24時間で脱型、28日間水中養生した後、測定器を接触させる1面を除く5面をエポキシ樹脂により被覆し測定を開始した。通常、電気化学的測定は測定対象物を湿潤状態にして実施されるのが望ましい。そのため、供試体は水道水中にて保管し、常時、湿潤状態が保たれるようにした。

また、2章での検討と同様に、分極曲線を測定した後、自然電位に戻るまでは時間を要するため、再度試験を行う際は24時間以上の間隔を空けて行い、接触法における測定値は、SCE(飽和カロメル電極)に補正した。なお、電位の掃引速度は、50, 100, 200, 500mV/min.に変化させて測定した。

3.2 実験結果および考察

図-8~図-10に水セメント比40%の場合での、掃引速度50mV/min.時の各かぶり厚さにおける浸漬法と接触法の分極曲線の比較を示す。図中の記号は、[水セメント比]-[かぶり厚さ]-[鉄筋A or B]の形で表記している。図-8~図-10より、自然電位からの変化が小さい時には、浸漬法と接触法の電流密度には差異がなく、上記の検討と同様であるが、電位の増加に伴い、浸漬法と接触法の電流密度の差が大きくなる傾向にあった。この原因としては、電流の分散があるために、電流密度を算定する際、表面積を小さく見積もっていることが原因と考えられる。

以上より、かぶり厚さが50mm以上では、接触法により得られた測定値を、浸漬法における値に補正を行う必要があるものと考えられる。しかし、浸漬法と接触法の電流密度の差とかぶり厚さには明確な相関関係は認められず、本研究の範囲内では、かぶり厚さの影響を十分に把握することができなかつた。今後、さらに詳細な検討を加えたいと考えている。

次に、浸漬法における掃引速度の影響を図-11に示す。図-5と同様に掃引速度が大きいほど右側にシフトしている。図-6と同様に、50mV/min.の電流密度に対する各掃引速度での電流密度の関係を図-12に示す。掃引速度100, 200, 500mV/min.では、50mV/min.時に対して、1.22

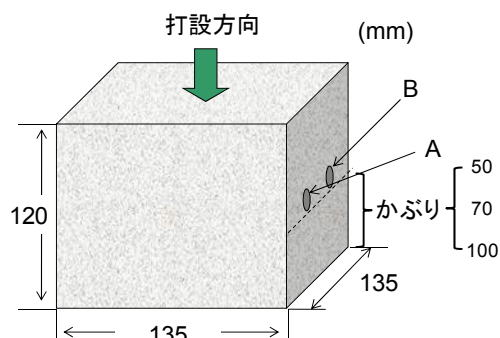


図-7 供試体の形状寸法

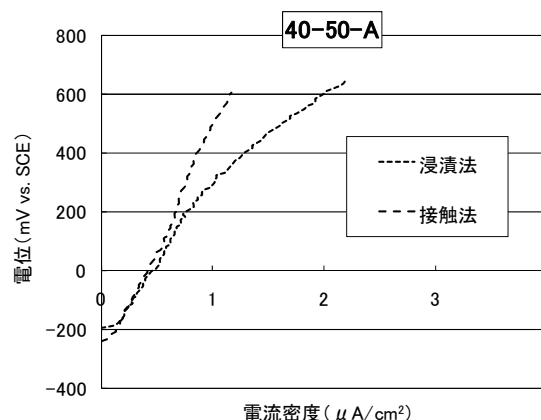


図-8 浸漬法と接触法の比較(40-50-A)

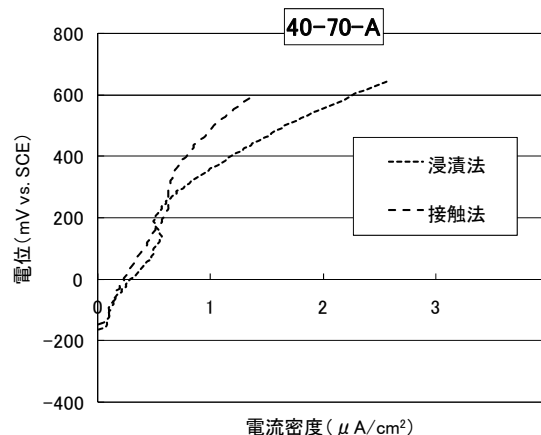


図-9 浸漬法と接触法の比較(40-70-A)

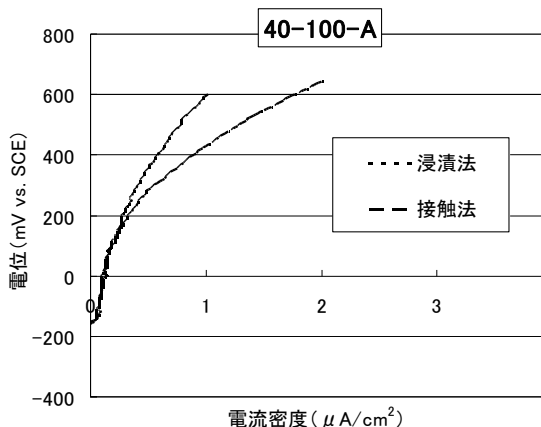


図-10 浸漬法と接触法の比較(40-100-A)

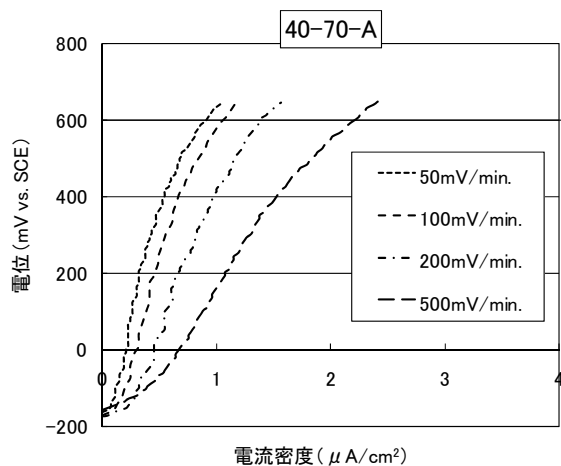


図-11 掃引速度の影響

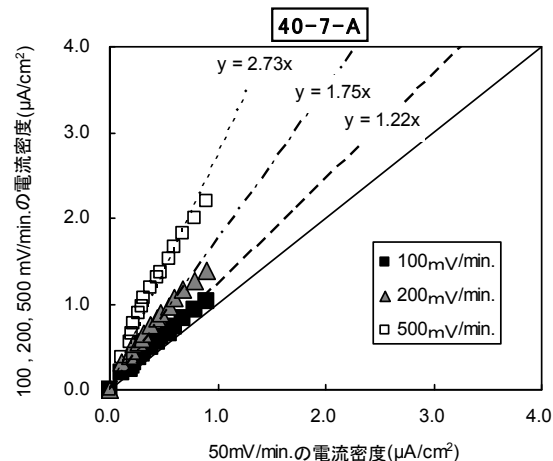


図-12 掃引速度 50mV/min. と 100, 200, 500mV/min. の比較(浸漬法)

倍, 1.75 倍, 2.73 倍となった。

図-13 に掃引速度 50mV/min. における繰返し測定を行った際の浸漬法による分極曲線を示す。測定間隔は 14 日とし, 3 回繰返し測定を行った。分極曲線は強制的に電位を上昇させるため, 不動態の状態が変化することが懸念される。しかし, 本研究の結果では, 繰返しにより分極曲線が大きく変化する傾向は示されなかった。

4. 結論

本実験では, 測定時のいくつかの条件が分極曲線の測定結果に及ぼす影響を把握するために, 水セメント比, かぶり厚さの異なる供試体を用い分極曲線の測定を行った。本研究で得られた結果を以下に総括する。

- (1) かぶり厚さが 30mm 以下の場合, 2 重対極センサーを用いた測定方法によって得られる分極曲線は, 従来の浸漬法によって得られる分極曲線に概ね一致していた。
- (2) 掃引速度を大きくすることで, 電流密度は大きくなり, 基準掃引速度 50mV/min. の場合の電流密度に対して一次的に比例して大きくなる傾向であった。また, その比例定数は掃引速度だけでなく, かぶり厚さの影響も受けていた。
- (3) 2 重対極センサーを用いた測定方法は, 補正を行うことによって, 実構造物に適用でき, かつ短時間で測定を行う可能性を有することが分かった。
- (4) 分極曲線の測定を 3 回繰返し行った結果では, 分極曲線はほぼ同等であり, 不動態被膜の状態に大きな変化は生じていないという結果となった。

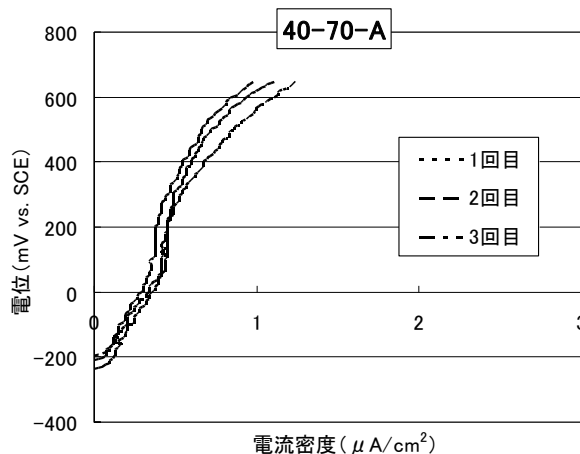


図-13 繰返し測定による影響(浸漬法)

謝辞

本研究は, 科学研究費補助金 基盤研究(B) 「コンクリート構造物の予防保全のためのモニタリング技術の開発」(研究代表 濱田秀則, 課題番号 19360197, 平成 19 年~20 年)を受けて実施したものである。ここに感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 大即信明: コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究, 港湾技術研究所報告, Vol.24, No.3, pp.194-195, 1985

