

論文 分極抵抗測定電流解析モデルの設定条件が鉄筋の分極抵抗推定値に及ぼす影響

金田 尚志*1・松岡 和巳*2

要旨：コンクリート構造物中の鉄筋の分極抵抗は、一般的にコンクリート表面に設置した対極から内部の鉄筋に微弱な電流を印加した際の電位変化量を測定することにより算出している。この測定電流の分布状況は、数値シミュレーションを用いて計算されるが、その設定条件により計算結果が異なるため、最終的に推定される真の鉄筋の分極抵抗に誤差が生じてくる。実際の測定状況(配筋状況)を忠実にモデル化できれば推定精度は高くなるが、実測定ではかぶり厚さの測定誤差や鉄筋径の間違え等が発生することがあり、これらが鉄筋の分極抵抗の推定結果にどのような影響を及ぼすかの検討を行った。

キーワード：分極抵抗法, 電流分布解析, 境界要素法(BEM), コンクリート比抵抗

1. はじめに

著者らは、3次元境界要素法(以下 BEM とする)を用いたコンクリート中の鉄筋の分極抵抗を推定する方法について紹介してきた^{1), 2)}。また、吉田らは FEM による分極抵抗測定時の電流分散範囲について検討を行っている³⁾。実構造物の調査を行う際には、計測時の誤差(例えば鉄筋の直上からずれた箇所にプローブを設置)やモデルの設定条件(かぶり厚さや鉄筋径等が実際とは異なる)によって推定される鉄筋の分極抵抗に誤差が生じてくる。

具体的には、以下のような事例が発生する。分極抵抗を測定する箇所の配筋探査を事前に実施し、その情報を基に BEM モデルの構築を行うが、鉄筋探査の結果も誤差を含んでいる。実際のかぶり厚さより BEM モデルのかぶり厚さを薄く設定してシミュレーションを行うと、コンクリート比抵抗が高く算出され、最終的に鉄筋の分極抵抗は小さく推定される。

実構造物には多くの鉄筋が配筋されているが、それらを全てモデル化することは困難であり、計算量も膨大となることから、対極周辺のみをモデル化するのが一般的である。コンクリート比抵抗に対して鉄筋の分極抵抗が小さく、対極下の鉄筋に測定電流が集中して流れるケースでは、モデルの寸法の影響は小さいが、コンクリート比抵抗に対して鉄筋の分極抵抗が大きく、対極から離れたところまで測定電流が流れるケースでは、モデルの鉄筋量(全表面積)がシミュレーション結果に及ぼす。

そこで、BEM モデルの設定条件が異なった場合に、推定される鉄筋の分極抵抗にどの程度の誤差が発生するかを検証するため、かぶり厚、鉄筋径、ピッチ、モデルの形状を変化させてシミュレーションを行った。BEM シミュレーションは、文献^{1), 2)}の手法を踏襲しているので参考されたい。

2. 測定電流の分布に影響を及ぼす因子

測定電流の分布に影響を及ぼすのは、配筋状態(かぶり、鉄筋径、ピッチ)、プローブの対極の寸法と鉄筋の幾何学的配置(通常対極は鉄筋の直上に対極を設置)、コンクリート比抵抗、鉄筋と対極の分極抵抗である。測定電流が対極直下の鉄筋に集中して流れるか、対極から離れた鉄筋まで広範囲に分散するかの傾向を表-1に示す。

測定電流の集中・分散の傾向を決定する要因として、分極パラメーターがある⁴⁾。これは鉄筋の分極抵抗 $R_p(\Omega \cdot \text{cm}^2)$ とコンクリート比抵抗 $\rho(\Omega \cdot \text{cm})$ の比として式(1)で算出される。

$$L_p(\text{cm}) = R_p(\Omega \cdot \text{cm}^2) / \rho(\Omega \cdot \text{cm}) \quad (1)$$

$L_p > 1\text{cm}$, すなわちコンクリート比抵抗に対して鉄筋の分極抵抗が大きい場合は測定電流が分散し、 $1\text{cm} > L_p$ となるコンクリート比抵抗に対して鉄筋の分極抵抗が小さい場合は集中することになる。表-1の項目のかぶり、ピッチ、鉄筋径は鉄筋探査やはつり調査から情報が得られ、コンクリート比抵抗は見掛けのコンクリート抵抗 $R_s(\Omega) \div \text{セル定数}(\text{cm}^{-1})$ で算出し、対極の分極抵抗は事前に測定しておいた値を用い、鉄筋の分極抵抗は BEM シミュレーションを用いて推定する。表-2に本論文で用いる用語、記号、単位、説明の一覧を示す。

表-1 測定電流の集中・分散の傾向

	集中 ← 電流分布の傾向 →	分散
かぶり	薄い ⇔	厚い
ピッチ	広い ⇔	狭い
コンクリート比抵抗	高い ⇔	低い
鉄筋の分極抵抗	低い ⇔	高い
対極の分極抵抗	低い ⇔	高い
鉄筋径	太径 ⇔	細径

*1 日鉄住金テクノロジー(株) 計測・検査事業部 計測検査技術センター 博士(工学) (正会員)

*2 日鉄住金テクノロジー(株) 富津事業所 材料ソリューション部 博士(工学)

表-2 用語の説明

用語	記号	単位	説明
鉄筋の分極抵抗	R_p	$\Omega \cdot \text{cm}^2$	測定対象となる鉄筋(鋼材)の分極抵抗
コンクリート比抵抗	ρ	$\Omega \cdot \text{cm}$	コンクリートの比抵抗、導電率の逆数
見掛けの分極抵抗	R_p'	Ω	測定器が表示する鉄筋(鋼材)の分極抵抗
見掛けのコンクリート抵抗	R_s'	Ω	測定器が表示するコンクリート抵抗
見掛けの総抵抗	R_t'	Ω	R_s' と R_p' の和で、BEMシミュレーションでは ρ 、 R_p 、 $R_{p,CE}$ を入力すると出力として得られる
セル定数	K	cm^{-1}	理想的な平板モデルの場合、電極間距離÷電極面積で求められる
等価被測定面積	EA	cm^2	鉄筋(鋼材)の測定電流密度が1様と仮定した場合の被測定面積
対極の分極抵抗	$R_{p,CE}$	$\Omega \cdot \text{cm}^2$	プローブ対極(Counter Electrode)の分極抵抗、事前に計測して求めておく
分極パラメーター	L_p	cm	電流が集中して流れるか分散するかの指標、 $R_p \div \rho$ で求められる

3. BEM シミュレーションの手順

実構造物のコンクリート比抵抗は箇所ごとにばらつきがあるが、シミュレーションでは一律とする。同様にコンクリート中の鉄筋の分極抵抗もばらつきがあるが、全表面で一律とする。コンクリート表面に設置するプローブは図-1の市販品を用いたものとし、外側と内側のリングを短絡させた単対極方式としている。

現場計測では、計測時間の短縮のために二周波数を用いた分極抵抗測定器が用いられることが多い。高周波数の測定では、鉄筋と対極の分極抵抗成分を含まないコンクリート抵抗(R_s')のみが計測される。BEMシミュレーションでは、図-2のように対極と鉄筋の分極抵抗をほぼゼロと仮定し(計算では便宜上 $1\Omega \cdot \text{cm}^2$ と設定)、抵抗を計算する。この時、見掛けの総抵抗 $R_t'(\Omega) \approx R_s'(\Omega)$ となる。

ρ は未知数であるが、例えば $10^5\Omega \cdot \text{cm}$ など適当な値を用いて計算しておく。 ρ と R_s' は比例関係となり、セル定数 $K(\text{cm}^{-1})$ はBEMで算出された R_s' と設定した ρ を用いて式(2)で算出され、実構造物の ρ は式(3)で推定される。

$$K(\text{cm}^{-1}) = R_s'(\Omega) / \rho(\Omega \cdot \text{cm}) \quad (2)$$

$$\rho(\Omega \cdot \text{cm}) = R_s'(\Omega) / K(\text{cm}^{-1}) \quad (3)$$

高周波数の測定電流は、鉄筋の分極抵抗がほぼゼロであるため、対極直下の鉄筋に集中して流れることになる。

低周波数の測定では、測定値にコンクリート抵抗成分に加えて、鉄筋の分極抵抗成分も含まれるようになるため、 $R_p'(\Omega) = R_t'(\Omega) - R_s'(\Omega)$ となる。図-3のように、 $R_{p,CE}$ は事前に計測しておいた値を用い、 ρ は高周波数測定で推

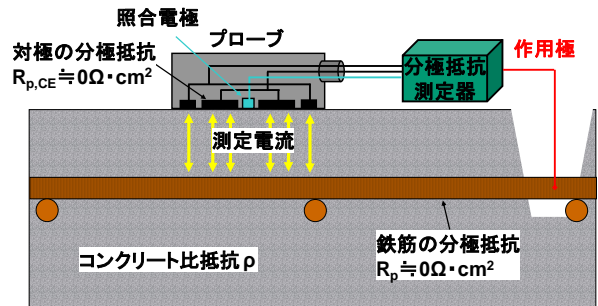


図-2 高周波数測定時のパラメーター

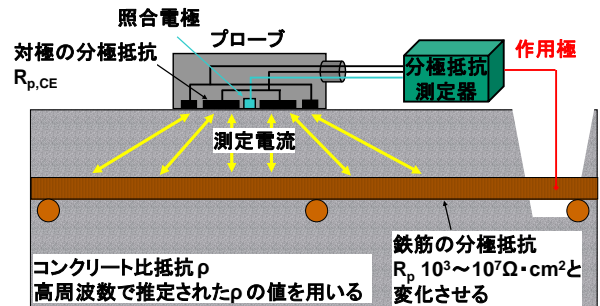


図-3 低周波数測定時のパラメーター

定された値を用いる。 R_p は未知数であるため、例えば $10^3 \sim 10^7\Omega \cdot \text{cm}^2$ と変化した際の R_p' を算出して R_p と R_p' の関係求めておく。低周波数の測定電流は、鉄筋の分極抵抗が大きくなるほど分散して流れる。

4. BEM シミュレーション結果

4.1 高周波数の結果(単鉄筋モデル)

表-3に鉄筋径、かぶり厚さを変化させた際の高周波数で測定した場合のシミュレーション結果を示す。鉄筋径は10, 13, 16, 25, 29, 32mm、かぶり厚さは1~16cmに設定した。図-4のようにプローブは鉄筋の直上に配置し、左右上下対称のため1/4モデルとしている。 ρ は $10^5\Omega \cdot \text{cm}$ と設定しているため R_s' は $\rho = 10^5\Omega \cdot \text{cm}$ の場合の測定器が示す測定値となる。プローブを中心として50cm(1/4モデルのため全長は100cm)の範囲に鉄筋を配置した。異形鉄筋の表面形状をモデル化することは困難であるため丸棒としている。

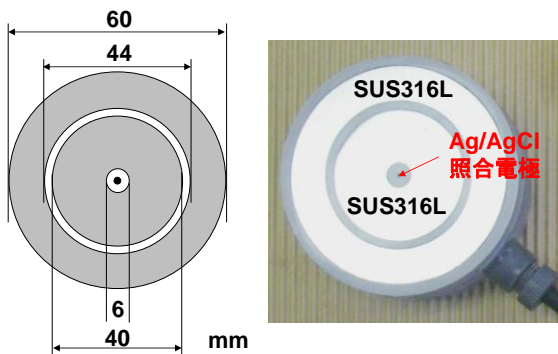


図-1 プローブの対極の寸法

表-3 高周波数測定シミュレーション結果(単鉄筋モデル)

かぶり厚さ (cm)	鉄筋径 (mm) 単鉄筋モデル、鉄筋全長100cm											
	10	13	16	25	29	32	10	13	16	25	29	32
	$R_s'(\Omega)$						$K(\text{cm}^{-1})$					
1	3466	3335	3234	3028	2964	2922	0.03466	0.03335	0.03234	0.03028	0.02964	0.02922
2	4927	4822	4742	4574	4520	4485	0.04927	0.04822	0.04742	0.04574	0.04520	0.04485
3	5753	5669	5604	5468	5424	5396	0.05753	0.05669	0.05604	0.05468	0.05424	0.05396
4	6276	6205	6150	6035	5998	5974	0.06276	0.06205	0.06150	0.06035	0.05998	0.05974
5	6630	6568	6520	6419	6387	6365	0.06630	0.06568	0.06520	0.06419	0.06387	0.06365
6	6884	6828	6784	6693	6663	6644	0.06884	0.06828	0.06784	0.06693	0.06663	0.06644
7	7073	7021	6981	6897	6869	6851	0.07073	0.07021	0.06981	0.06897	0.06869	0.06851
8	7219	7171	7133	7054	7028	7011	0.07219	0.07171	0.07133	0.07054	0.07028	0.07011
9	7336	7290	7254	7179	7154	7138	0.07336	0.07290	0.07254	0.07179	0.07154	0.07138
10	7432	7388	7353	7280	7257	7241	0.07432	0.07388	0.07353	0.07280	0.07257	0.07241
11	7512	7469	7436	7365	7342	7327	0.07512	0.07469	0.07436	0.07365	0.07342	0.07327
12	7581	7539	7506	7437	7414	7400	0.07581	0.07539	0.07506	0.07437	0.07414	0.07400
13	7640	7598	7566	7498	7476	7462	0.07640	0.07598	0.07566	0.07498	0.07476	0.07462
14	7691	7651	7619	7552	7530	7516	0.07691	0.07651	0.07619	0.07552	0.07530	0.07516
15	7737	7697	7666	7600	7578	7564	0.07737	0.07697	0.07666	0.07600	0.07578	0.07564
16	7778	7739	7707	7642	7620	7606	0.07778	0.07739	0.07707	0.07642	0.07620	0.07606

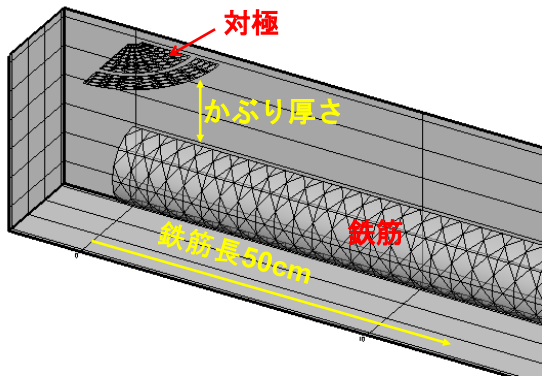


図-4 シミュレーションモデル(単鉄筋) 1/4 モデル

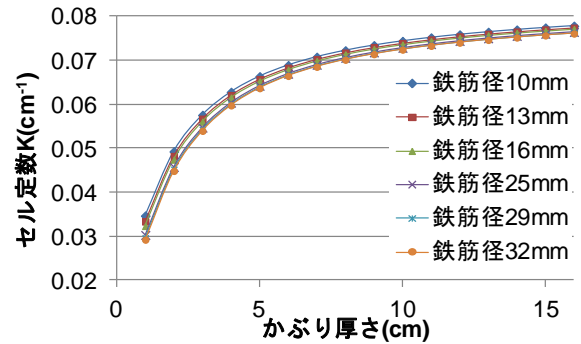


図-5 かぶり厚さとセル定数の関係(単鉄筋)

図-5にかぶり厚さとセル定数の関係を示す。セル定数は、電極間距離が大きくなると大きくなり、電極面積が大きくなると小さくなることから、かぶり厚さが厚くなるとセル定数が大きくなり、鉄筋径が大きくなると小さくなる傾向が確認できる。単鉄筋モデルの場合、鉄筋径の変化によるセル定数の変化は小さい。かぶり厚さが薄い場合はセル定数の変化が大きいため、かぶり厚さに誤差が生じると $R_s'(\Omega)/K(\text{cm}^{-1})$ で算出される ρ も誤差が生じる。

4.2 高周波数の結果(格子配筋モデルとの比較)

単鉄筋モデルと格子配筋モデルの比較を行った。実構造物のほとんどが格子配筋であるが、そのかぶり厚さ、鉄筋径、ピッチの組合せは無数となる。単鉄筋モデルのシミュレーション結果が格子配筋にも適用できれば、測定対象ごとにモデルを構築する必要がなくなり、省力化が可能になるため、検討することにした。今回は鉄筋径 25mm の単鉄筋モデル(鉄筋全長 100cm と 200cm の 2 モデル)、ピッチが 15cm と 20cm の格子配筋モデルの 4 モデルについて検討を行った。図-6 に示すように格子配筋モデルの場合は、かぶり厚さが薄いと対極直下の鉄筋に

電流が流れるが、かぶり厚くなるにつれて他の鉄筋にも電流が流れるようになる(電流密度は鉄筋を自然電位から 10mV シフトさせた場合を示している)。単鉄筋モデルと比較すると格子配筋モデルの方が鉄筋表面積が大きくなるため、格子配筋モデルの方がセル定数が若干小さくなる。またピッチ 15cm と 20cm を比較すると、ピッチ 15cm の方が対極近傍の鉄筋量が増加するためセル定数が小さくなっている。単鉄筋モデルの鉄筋全長 100cm と 200cm のセル定数はほとんど変わらない。鉄筋長を長く設定するとモデルの節点数が増加してシミュレーション時間も増加するため、100cm で十分である。単鉄筋 100cm モデルのセル定数を 1 とした場合の格子配筋モデルのセル定数の比率は、かぶり厚さが厚くなるにつれて誤差が増加していくが、かぶり厚さ 16cm で 3.5% であり、単鉄筋モデルのセル定数を用いて格子配筋の ρ を推定しても誤差は小さい。現場計測の計測誤差の方がセル定数の誤差よりも大きいため、図-5 のような単鉄筋モデルのセル定数のグラフを事前に準備しておき、現場でおおよその ρ を把握することは可能と考えられる。

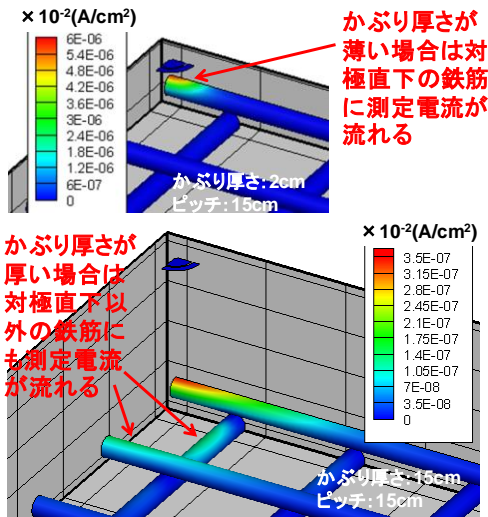


図-6 かぶり厚さによる電流密度分布の変化

表-4 シミュレーション結果(配筋状態による違い)

かぶり厚さ (cm)	単鉄筋 100cm	単鉄筋 200cm	格子配筋 20cm ピッチ	格子配筋 15cm ピッチ	単鉄筋 200cm	格子配筋 20cm ピッチ	格子配筋 15cm ピッチ
	K(cm-1)				単鉄筋100cmを1とした比率		
1	0.03028	0.03029	0.03009	0.03010	1.000	0.994	0.994
2	0.04574	0.04573	0.04536	0.04519	1.000	0.992	0.988
3	0.05468	0.05465	0.05409	0.05385	0.999	0.989	0.985
4	0.06035	0.06030	0.05955	0.05924	0.999	0.987	0.982
5	0.06419	0.06411	0.06317	0.06281	0.999	0.984	0.979
6	0.06693	0.06681	0.06571	0.06532	0.998	0.982	0.976
7	0.06897	0.06881	0.06756	0.06716	0.998	0.980	0.974
8	0.07054	0.07034	0.06896	0.06856	0.997	0.978	0.972
9	0.07179	0.07155	0.07007	0.06967	0.997	0.976	0.970
10	0.07280	0.07253	0.07095	0.07056	0.996	0.975	0.969
11	0.07365	0.07333	0.07168	0.07131	0.996	0.973	0.968
12	0.07437	0.07400	0.07229	0.07194	0.995	0.972	0.967
13	0.07498	0.07458	0.07281	0.07248	0.995	0.971	0.967
14	0.07552	0.07507	0.07333	0.07295	0.994	0.971	0.966
15	0.07600	0.07550	0.07372	0.07336	0.993	0.970	0.965
16	0.07642	0.07587	0.07406	0.07373	0.993	0.969	0.965

4.3 高周波数の結果(鉄筋とプローブ位置のずれ)

実構造物の調査では事前に鉄筋探査を行い、鉄筋位置をマーキングし、そのマーキングを目印にプローブを設置する。この際、プローブが必ずしも鉄筋直上に設置されているとは限らず、多少のずれが生じる。図-7のようにプローブ中心と鉄筋の位置をずらした単鉄筋モデルを構築してセル定数の比較を行った。鉄筋径は 25mm、鉄筋長は 50cm(全長は 100cm)とし、上下対称のため 1/2 モデルとしている。表-5 にプローブ設置位置と鉄筋のずれ量のセル定数の一覧を示す。ずれ量が大きくなると、対極からの測定電流が鉄筋に向かって斜めに流れて距離が増加するため、鉄筋直上の場合と比較してセル定数が増加するが、かぶり厚さが厚くなると差は小さくなる。かぶり厚さが薄い場合は鉄筋探査で鉄筋位置を正確に検出し、プローブの対極を鉄筋直上に設置する必要がある。

4.4 低周波数の結果(単鉄筋モデル)

低周波数のシミュレーションでは、 $R_{p,CE}$ を実測値である $1.74 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 、鉄筋長は 50cm(全長 100cm)と設定し、

$\rho=10^4, 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ 、 R_p を $10^3 \sim 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$ まで変化させた場合の R_p' を算出した。 R_p' と R_p の関係を図-8 に示す。 L_p が 1cm より大きく、測定電流が分散する範囲では、かぶり厚さが厚くなると R_p' が小さくなる。これは、かぶり厚さが厚くなるにつれて電流の分散範囲(面積)である EA が大きくなり、 $R_p'(\Omega \cdot \text{cm})=R_p'(\Omega) \times EA(\text{cm}^2)$ の関係から R_p' が一定の場合 EA が大きくなるとは R_p' は小さくなるためである。 L_p が 1cm より小さく、測定電流が集中する範囲では、かぶり厚さが薄い方が R_p' が小さくなる。これはかぶり厚さが薄いと鉄筋の側面にも測定電流が流れる (EA 大)のに対し、かぶり厚さが厚くなるにつれ鉄筋の上側に集中して流れるようになる (EA 小)ためである。表-1 では一般的な傾向としてかぶり厚さが厚くなると電流が分散するとしているが、 L_p が 1cm より小さくなる稀な条件では集中することがある。 $\rho=10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ と $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ を比較するとコンクリート比抵抗が低い方が測定電流は分散 (EA 大)するため、 R_p' が小さくなる。

表-5 対極設置位置が鉄筋直上からずれた場合のセル定数の変化

かぶり厚さ (cm)	鉄筋直上	0.5cm ずれ	1cm ずれ	2cm ずれ	3cm ずれ	0.5cm ずれ	1cm ずれ	2cm ずれ	3cm ずれ
	K(cm-1)					鉄筋直上を1とした比率			
1	0.03028	0.03091	0.03258	0.03804	0.04596	1.021	1.076	1.256	1.518
2	0.04574	0.04603	0.04687	0.04998	0.05436	1.006	1.025	1.093	1.189
3	0.05468	0.05484	0.05532	0.05711	0.05968	1.003	1.012	1.044	1.091
4	0.06035	0.06045	0.06074	0.06182	0.06341	1.002	1.006	1.024	1.051
5	0.06419	0.06425	0.06443	0.06512	0.06615	1.001	1.004	1.014	1.031
6	0.06693	0.06697	0.06709	0.06755	0.06825	1.001	1.002	1.009	1.020
7	0.06897	0.06899	0.06908	0.06940	0.06989	1.000	1.002	1.006	1.013
8	0.07054	0.07056	0.07062	0.07085	0.07121	1.000	1.001	1.004	1.010
9	0.07179	0.07180	0.07185	0.07202	0.07229	1.000	1.001	1.003	1.007
10	0.07280	0.07282	0.07285	0.07298	0.07319	1.000	1.001	1.002	1.005
11	0.07365	0.07366	0.07369	0.07379	0.07396	1.000	1.000	1.002	1.004
12	0.07437	0.07438	0.07440	0.07448	0.07461	1.000	1.000	1.001	1.003
13	0.07498	0.07499	0.07501	0.07507	0.07518	1.000	1.000	1.001	1.003
14	0.07552	0.07553	0.07554	0.07560	0.07569	1.000	1.000	1.001	1.002
15	0.07600	0.07600	0.07601	0.07606	0.07613	1.000	1.000	1.001	1.002
16	0.07642	0.07642	0.07643	0.07647	0.07654	1.000	1.000	1.001	1.002

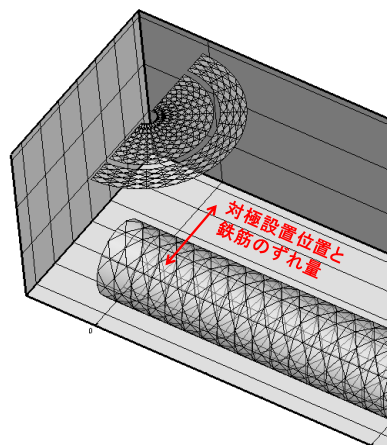


図-7 対極設置位置がずれたモデル (1/2 モデル)

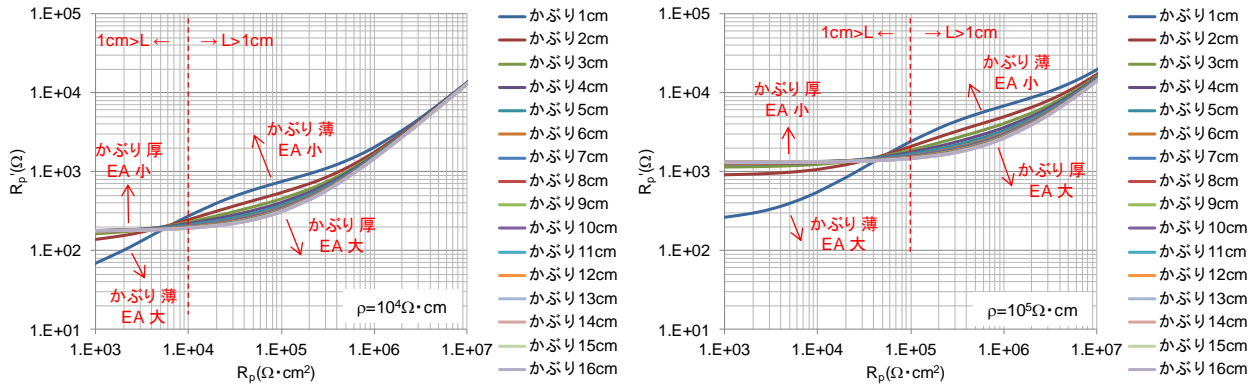


図-8 R_p' と R_p の関係 (単鉄筋モデル 鉄筋径 25mm)

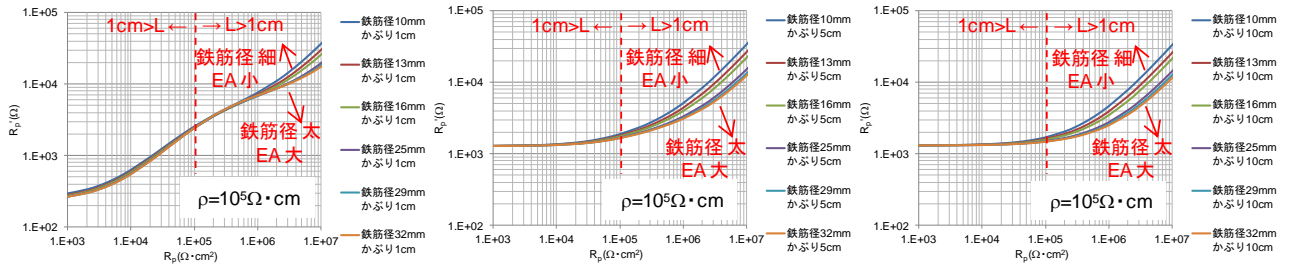


図-9 鉄筋径が異なる場合の R_p' と R_p の関係 (単鉄筋モデル)

図-9 に鉄筋径が異なる場合の R_p' と R_p の関係を示す。 R_p が小さい範囲では、鉄筋径による差は小さいが R_p が大きい範囲では差が生じる。これは、 R_p が大きくなると鉄筋表面全体に測定電流が流れるようになり、鉄筋径が大きくなると表面積(EA)が大きくなり、 R_p' が小さくなるためである。

4.5 低周波数の結果(格子配筋モデルとの比較)

図-10 に鉄筋径 25mm, 鉄筋全長 100cm, ピッチ 15cm の格子配筋モデルの R_p' と R_p の関係を示す。図-8 の単鉄筋モデルと比較すると、 R_p が小さい範囲では単鉄筋モデルとの差は小さいが、 R_p が大きくなるにつれて格子配筋モデルの R_p' が小さくなり差が大きくなる。図-11 に単鉄筋(鉄筋全長 100cm, 200cm), 格子配筋(ピッチ 15cm, 20cm) の R_p' と R_p の関係を示す。 R_p が大きくなると広範囲の鉄筋に測定電流が流れるようになるため、鉄筋の表面積が大きい格子配筋モデルの方が EA が大きくなり、 R_p' が小さくなることを確認できる。単鉄筋モデルの鉄筋全長を長くすると格子配筋の値に近づく。鉄筋の分極抵抗が大きい範囲では、モデル全体の鉄筋量が支配的となる。

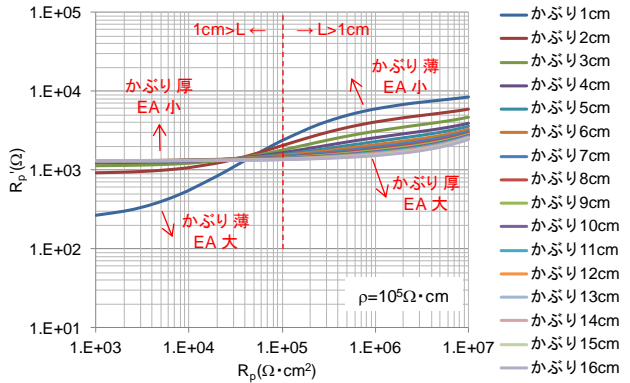


図-10 R_p' と R_p の関係 (格子配筋モデル 鉄筋径 25mm)

4.6 推定される分極抵抗の誤差の算出例

ここでは、かぶり厚さの設定で 1cm の誤差が生じた場合に推定される鉄筋の分極抵抗にどの程度の誤差が生じるかを算出してみる。鉄筋径 25mm, ピッチ 15cm の格子配筋, かぶり厚さ 3cm, $\rho = 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$, $R_p = 1.5 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ を正值とする。表-4 のセル定数を用いて R_s' を算出すると 5385Ω となり、図-10 のグラフから R_p' を算出すると 1969Ω となる。計測データとして $R_s' = 5385\Omega$, $R_p' = 1969\Omega$

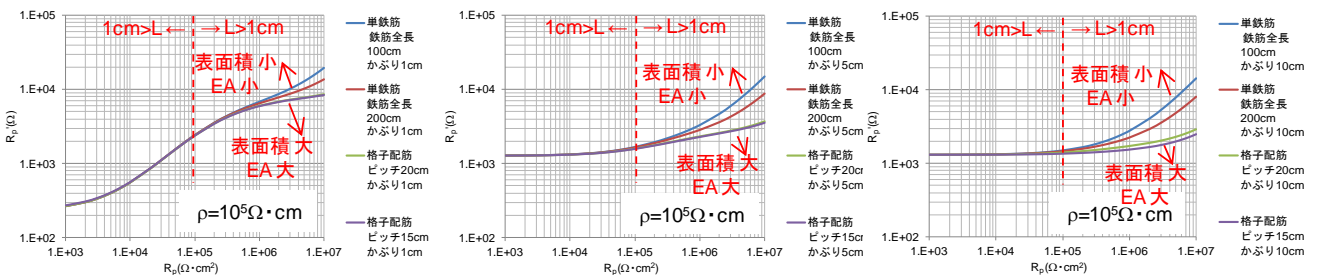


図-11 R_p' と R_p の関係 (単鉄筋モデルと格子配筋モデルの比較 鉄筋径 25mm)

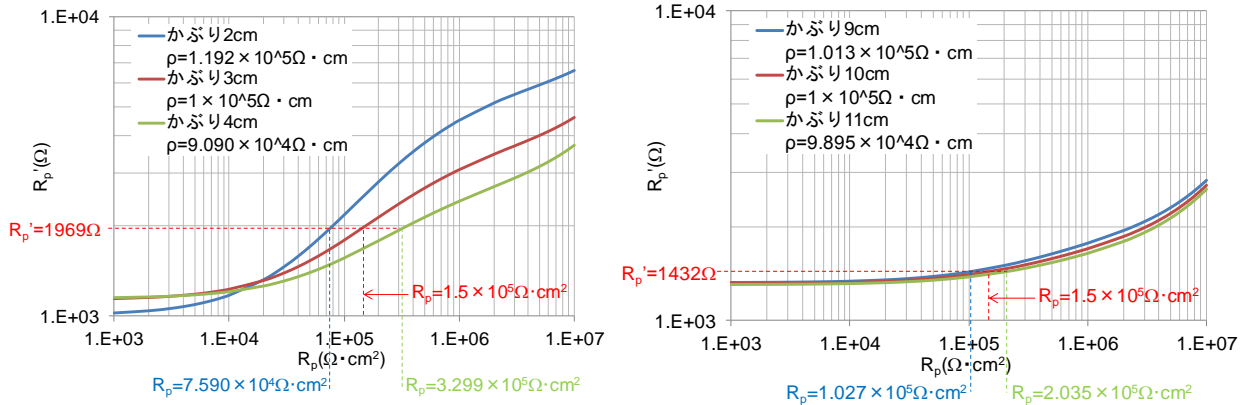


図-12 R_p' と R_p の関係 (かぶり厚さ±1cm 誤差の影響)

が得られたと仮定し、かぶり厚さ2cm, 4cm のモデルを用いて R_p の算出を試みる。 ρ は式(3)を用い、表-4 のセル定数を代入すると、かぶり厚さ2cm の場合が $\rho = 1.192 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ 、4cm の場合が $9.090 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ となり、かぶり厚さ2cm では ρ を約 20% 大きく算出し、かぶり厚さ4cm では約 10% 小さく算出することになる。算出された ρ を用いてかぶり厚さ2cm と4cm のモデルで R_p' と R_p の関係を算出すると、図-12(左)が得られる。この曲線に $R_p' = 19699 \Omega$ を代入して R_p を算出するとかぶり厚さ2cm が $7.590 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 、4cm が $3.299 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ となり、鉄筋径を1cm 薄く設定すると R_p は正值に対して約 51% に、1cm 厚く設定すると約 2.2 倍の値として算出される。同様にかぶり厚さ10cm を正值としてかぶり厚さに±1cm の誤差が生じた場合は図-12(右)のようになり、かぶり厚さが厚くなるにつれ、推定される R_p の誤差は小さくなる傾向となる。正值である $R_p = 1.5 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ は、CEB の判定基準にあてはめると $R_p > 130 \text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ の不活性に分類されるのに対し、かぶり厚さを1cm 薄く設定した場合には $R_p = 7.590 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 、 $1.027 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ と推定され、 $52 < R_p \leq 130 \text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ の低～中程度の腐食環境に分類され、1ランク下に分類される。かぶり厚さに1cm の誤差が生じると、腐食判定の分類にも影響を及ぼす。

5. まとめ

各種条件を変化させたモデルを構築して分極抵抗測定時の測定電流分布のシミュレーションを実施した結果、以下の知見が得られた。

(1)鉄筋のかぶり厚さは、セル定数、 ρ の算出、 R_p の算出に大きく影響を及ぼすため、実構造物の調査の際には、鉄筋探査を高精度で実施してかぶり厚さを正確に把握する必要がある。特にかぶり厚さが薄い場合は誤差が大きくなる。

- (2)鉄筋径に±3mm 程度の誤差が生じてセル定数、 ρ の算出時の誤差は小さいが、 R_p を算出する際に R_p が大きい範囲では誤差が大きくなる。
- (3)セル定数、 ρ を算出する際は、単鉄筋モデルと格子配筋モデルの誤差は小さいが、 R_p を算出する際に R_p が大きい範囲では誤差が大きくなる。
- (4)かぶり厚さが薄い場合、プローブの対極の設置位置の鉄筋直上からのずれ量が大きくなると誤差が大きくなる。
- (5)実構造物中の鉄筋の分極抵抗の測定を行う場合、対極周辺の配筋状況を忠実にモデル化することによって推定精度を向上させることができる。
- (6)かぶり厚さに1cm の誤差が生じた際の算出例のように、推定される鉄筋の分極抵抗が半分～2 倍程度異なる場合もある。

参考文献

- 1) 金田尚志, 松岡和巳: BEM による電流分布シミュレーションと鉄筋の分極抵抗値の推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1715-1720, 2011.6
- 2) 金田尚志, 松岡和巳: セル定数を用いたコンクリート比抵抗と等価被測定面積を用いたコンクリート中の鉄筋の分極抵抗の推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1834-1839, 2012.6
- 3) 吉田秀典, 川上純, 荒木志帆, 横田優: 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 (応用力学), Vol. 69 (2013) No. 2 p. I-677-I-687
- 4) James T. Waber and Bertha Fagan: IV. Influence of Electrolyte Thickness on Potential and Current Distributions over Coplanar Electrodes Using Polarization Parameters, J. of The Electrochemical Society, Vol.103, No1, pp.64-72, 1956