

論文 4 プローブ法で測定したコンクリートの交流インピーダンスに及ぼすコンクリート中の鉄筋と電極形状や電極間隔の影響

長岡 修司*1・中山 一秀*2・岩波 光保*3

要旨: 鉄筋を有するコンクリートにおいて 4 プローブ法を用いて測定されるコンクリートの電気抵抗率は、測定条件によって無筋のコンクリートに比べ小さくなることが知られている。鉄筋コンクリートにおいてこのような鉄筋の影響を考慮し、精確な完全非破壊でのコンクリートの電気抵抗率測定方法の確立を目指し、4 プローブ法を用いた交流インピーダンス測定から得たインピーダンススペクトルの特性を把握するための検討を行った。試験体を用いた測定と有限要素解析から、鉄筋と電極形状や電極間隔などの測定条件やかぶり深さが測定されるインピーダンススペクトルに及ぼす影響について明らかにした。

キーワード: 電気抵抗率, 交流インピーダンス法, 4 プローブ法, 有限要素解析

1. はじめに

交流インピーダンス法 (以下, EIS) は, インピーダンススペクトルを分析することで, 非破壊で測定対象の電気抵抗や電気容量などの電気的特性を測定する手法である¹⁾。インピーダンスの周波数特性は電気的特性によって決まるため, 電気的特性の異なる物質が連続的に接続されている物体から得られるインピーダンススペクトルを分析することでそれぞれの物質の電気的特性を推定することが可能である。鉄筋コンクリートでは腐食速度の推定や腐食判定のために EIS はしばしば用いられている。鉄筋コンクリートでは鉄筋をはつりだして測定機器と短絡し, 3 電極セルと呼ばれる方法で測定するのが一般的である。この測定では, コンクリートの電気的特性とコンクリート内部の鋼材表面で生じる電気化学的応答をそれぞれ測定可能となり, 鋼材表面の電気化学的応答から腐食に関する診断を行う。

一方で, コンクリートの電気的特性に着目し, コンクリートの電気抵抗率から含水率や遮塩性の簡易評価を行うことが可能である。コンクリートの電気抵抗率は得られたインピーダンススペクトルに対して等価回路を用いてフィッティングを行うことで推定する。等価回路は, 電気抵抗と電気容量が並列に接続されたシンプルなものや, 電流の経路を回路にあてはめたものなどがある²⁾³⁾。

コンクリートに対して非破壊で電気抵抗率を測定する方法は土木学会規準「四電極法によるコンクリートの電気抵抗率試験方法 (案) (JSCE-G 581-2018)」⁴⁾によって規定されている。この規準では, 特定の周波数の交流電流を印加した際の電気抵抗率を測定する方法について記載されている。これは EIS と原理は同じであるが, 特定の周波数のインピーダンスしか得られないため, EIS に

比べて得られる情報量が少なくなる。規準に記されている 4 プローブ法 (四電極法 B 法) は同一面上で電流の印加と電位差測定を行うため, 非破壊で電気抵抗率を測定することが可能である。一方, 電流分布が試験体形状や電極間隔に依存するため, 測定された電気抵抗に対して適切なセル定数を用いて電気抵抗率に換算する必要がある。Gowers et al.や皆川らは, 鉄筋を有するコンクリートで, 4 プローブ法を用いた電気抵抗率測定に対する鉄筋の影響に関して検討を行っている⁵⁾⁶⁾。これらの研究では, 鉄筋軸方向に電極を配置した場合, かぶりに対して電極間隔が小さいほど鉄筋の影響が小さくなることが示されている。しかし, 電極間隔が小さくなるほど, 骨材の影響や含水分布の影響を受けやすくなるため, 規準では電極間隔は骨材の最大寸法以上とされている⁴⁾。これらの影響から, 鉄筋の影響を受けずにコンクリートの電気抵抗率を測定することが困難であり, 鉄筋コンクリートにおいて非破壊でコンクリート部分の電気抵抗率を測定する方法は現在確立されていない。

そこで, 本検討では 4 プローブ法と EIS 測定を組み合わせることによって, 鉄筋の影響を除去した電気抵抗率測定方法の確立に向けた基礎的検討を行う。試みの土台として, 4 プローブ法を用いた EIS 測定結果に鉄筋が与える影響を明らかにするべく, 試験体を用いた実測定と有限要素解析から, 電極形状や電極間隔などの測定条件やかぶり深さと鉄筋の影響の関係性について検討を行う。

2. 実験概要

2.1 使用材料および試験体概要

試験体寸法が 100×100×400 mm の角柱で, 無筋の試験体 (以下, 無筋試験体) および試験体の中心に長手方

*1 東京科学大学 環境・社会理工学院土木・環境工学系 博士課程 (学生会員)

*2 東京科学大学 環境・社会理工学院土木・環境工学系助教 工博 (正会員)

*3 東京科学大学 環境・社会理工学院土木・環境工学系教授 工博 (正会員)

表-1 配合表

W/C	s/a	Air	単位量(kg/m ³)				*AE 剤	*AE 減水剤
			W	C	S	G		
50	45	4.5	165	330	808	998	0.006%	0.3%

*セメントの質量に対する百分率

向に D16 の異形鉄筋が配置された試験体（以下、鉄筋試験体）をそれぞれ 2 体作製した。練混ぜは、普通ポルトランドセメント（密度：3.16 g/cm³），砕砂（密度：2.62 g/cm³，吸水率：1.30%），砕石 5 号（密度：2.66 g/m³，吸水率：0.55%），砕石 6 号（密度：2.64 g/m³，吸水率：0.69%）を用いて表-1 に示す配合で水道水を用いて行った。打込みの 24 時間後に脱型し、40℃の温水中で材齢 15 日まで養生を行った。養生後は材齢 20 日まで 40℃，40% R.H. の環境に静置し乾燥させた後、20℃60% R.H.環境にて約 2 年間静置した。

2.2.4 プローブ法を用いた交流インピーダンス測定

4 プローブ法は 4 つの電極を一行の状態押し当て、両端の電極から電流を印加し、中央 2 つの電極間の電位差を測定することで電気抵抗を測定する方法である⁴⁾。20℃60% R.H.環境にて約 2 年間静置した乾燥状態の無筋試験体および鉄筋試験体に対して測定を行った。その後、同一試験体を 7 日間水中に浸漬させ湿潤状態とし、再度測定した。なお、湿潤状態の測定は、水中から取り出した直後に乾いたウェスで試験体表面の水分をふき取って行った。また、電極形状の影響を検討するため、接触面が 10×10 mm，10×90 mm になる 2 種類のステンレス製電極を用いた。さらに、電極間隔の影響を検討するため、20 mm，50 mm，80 mm の電極間隔で測定を行った。すべての試験体で電極は図-1 に示す位置で、試験体中央を基準に対称となるよう接地させている。なお、接触抵抗の影響を低減するために粘性を持った電解液（水:NaCl:カルボキシメチルセルロースナトリウム=94:3:3）を介して図-1 に示す位置で電極と試験体を密着させた。また、測定中試験体は絶縁体の上に静置している。EIS 測定の測定条件は、電位制御、振幅 100 mV、測定周波数領域 500 kHz～100 mHz とした。

2.3 有限要素解析

本研究ではオープンソースコードである FreeFEM++ を用いて有限要素解析を行った⁷⁾。図-2 に本解析で用いた解析モデルの概要を示す。この解析モデルはコンクリート、鉄筋、皮膜の 3 つの要素から構成されている。コンクリート要素の電気的特性は、無筋試験体における 10×90 mm 電極かつ電極間隔 80 mm の測定結果から求めた値を用いた。また、鉄筋は直径 16 mm の円柱形で表した。鉄筋の表面には不動態皮膜や黒皮のような電気抵抗率の大きい皮膜を表した要素があり、本解析では厚さ

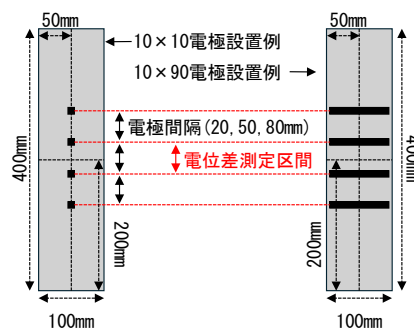


図-1 測定概要

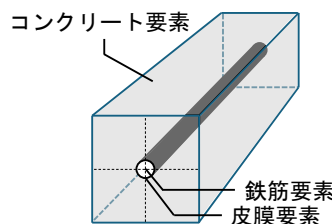


図-2 解析モデル概要

を 0.1 mm としている。実際の不動態皮膜は 10 nm 程度、黒皮は数 10 μm といわれているが、解析において極端に小さな要素を用いた場合計算が収束しない可能性があるため実際よりも厚く解析可能な厚さとした。

本解析では、式(1)のラプラス方程式を用いて電位差測定区間のインピーダンススペクトルを得た。

$$\gamma \cdot \Delta \phi = 0 \quad (1)$$

$$\gamma = \sigma + j\omega\varepsilon = \frac{1}{\rho} + j\omega\varepsilon \quad (2)$$

ここで、 ϕ ：電位、 γ ：複素導電率、 σ ：導電率、 j ：虚数単位、 ω ：角周波数、 ε ：誘電率、 ρ ：電気抵抗率とした。

3. 結果と考察

3.1.4 プローブ法を用いた交流インピーダンス測定

(1) 乾燥状態

20℃，60% R.H.環境下の乾燥状態で、高周波式水分計で 4～5%の含水率を示した鉄筋試験体および無筋試験体で 4 プローブ法を用いた EIS 測定を行った。電極は接触面が 10×90 mm のものを用いて、電極間隔 20 mm と 80 mm で測定を実施した。測定結果を図-3 のナイキスト線図に示す。なお、各パラメーターで用いた試験体は 2 体あり、それぞれを区別するために凡例（●，×）を用いている。以降の図においてもこの凡例を用いて区別している。

無筋試験体において、電極間隔が 80 mm では 3500 Ω 程度の電気抵抗の容量性半円が示された。電極間隔が 20 mm では、3000 Ω と 4500 Ω の電気抵抗の容量性半円が示された。電極間隔 80 mm では 2 試験体共に同程度の値を示したのに対し、20 mm では 1500 Ω 程度の差が生じた。これは、電極間隔が小さくなることで電極直下の骨材の影響が大きくなったためと考えられる⁴⁾。

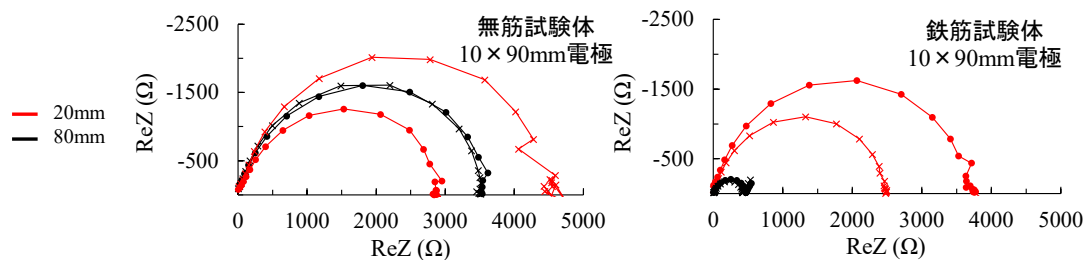


図-3 乾燥状態の測定結果（左図：無筋試験体，右図：鉄筋試験体）

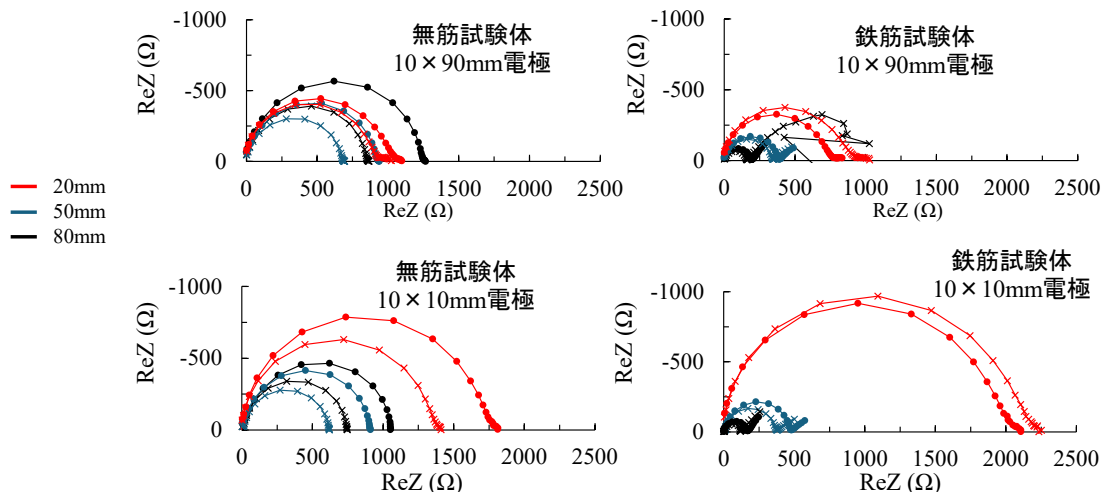


図-4 湿潤状態の測定結果（左図：無筋試験体，右図：鉄筋試験体）

一方、鉄筋試験体では電極間隔 20 mm は無筋試験体と同様に 1 つの容量性半円を示したのに対して、80 mm では 430 Ω 程度の電気抵抗を持つ容量性半円が高周波数帯（左側の半円）で示され、低周波数帯ではさらにもう一つの容量性半円（右側の半円）があるような挙動が示された。これは、鉄筋の影響を受けてこのような挙動が示されたと考えられる。

(2) 湿潤状態

7 日間水中浸漬させた湿潤状態においても、鉄筋試験体および無筋試験体で 4 プローブ法を用いた EIS 測定を行った。測定は接触面が 10×90 mm、10×10 mm の電極を用いて、電極間隔 20 mm、50 mm、80 mm で実施した。測定結果を図-4 のナイキスト線図に示す。また、鉄筋試験体で 10×90 mm 電極、電極間隔 80 mm の一部の測定（図-4：黒色×）では低周波数域でのインピーダンススペクトルを確認するために測定周波数領域を 500 kHz～0.25 mHz とした。

無筋試験体の 10×90 mm 電極を用いた測定結果で湿潤状態と乾燥状態での電気抵抗を比較すると、全ての試験体において、乾燥状態に比べて小さな電気抵抗が示された。これは、含水状態が多くなったことで試験体の電気抵抗率が小さくなったためである。

湿潤状態の鉄筋試験体でも乾燥状態と同様に電極間隔 20 mm では鉄筋の影響が小さく、80 mm では鉄筋の影響を受けていることが分かる。また、電極間隔 50 mm の

測定でも鉄筋の影響を受けていることが分かる。さらに、電極間隔 80 mm の測定で 0.25 mHz まで測定した結果（図-4：黒色×）では、高周波数域の容量性半円（左側）に加えて、低周波数域に 2 つめの容量性半円（右側）があることが分かる。金光らは⁸⁾、4 プローブ法を用いた EIS 測定から鉄筋の分極抵抗を求める試みを行っており、ナイキスト線図の右側の容量性半円は鉄筋の分極抵抗に相関する指標であり、鋼材表面の電気化学的応答であることを示している。よって、本研究で示された右側の容量性半円も鉄筋表面の電気化学的応答によるものであると考えられる。また、左側の容量性半円はコンクリート部分の電気抵抗を示していると考えられ、鉄筋の影響で測定されるコンクリートの電気抵抗が 1/10 程度小さくなったことが分かる。皆川らの研究ではかぶり深さに対して電極間隔が一定以上大きくなると鉄筋の影響で電気抵抗率が小さくなることが示されており⁶⁾、本検討の結果も同じ傾向を示した。

続いて 10×90 mm と 10×10 mm 電極を用いた測定結果で比較を行う。無筋試験体で電極間隔 20 mm の測定では、10×90 mm 電極に比べて 10×10 mm 電極で測定した電気抵抗が大きくなる傾向が得られ、電極間隔 50 mm、80 mm では反対に 10×10 mm 電極に比べて 10×90 mm 電極で測定した電気抵抗がわずかに大きくなる傾向が得られた。また、鉄筋試験体においても同様の傾向が見られた。これは、電極の接触面の形状によって電位分布が

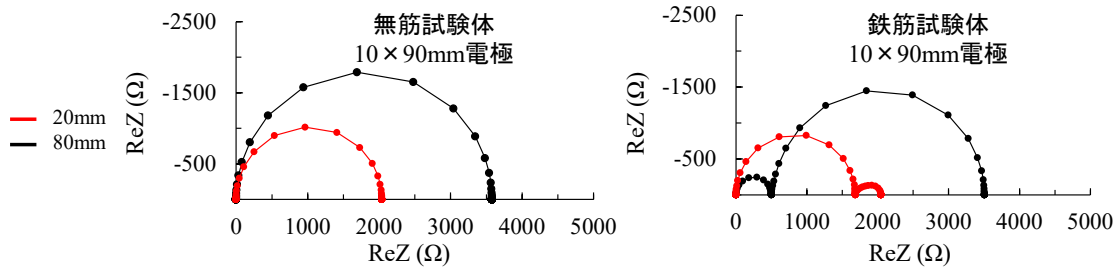


図-5 乾燥状態の解析結果 (左図：無筋試験体, 右図：鉄筋試験体)

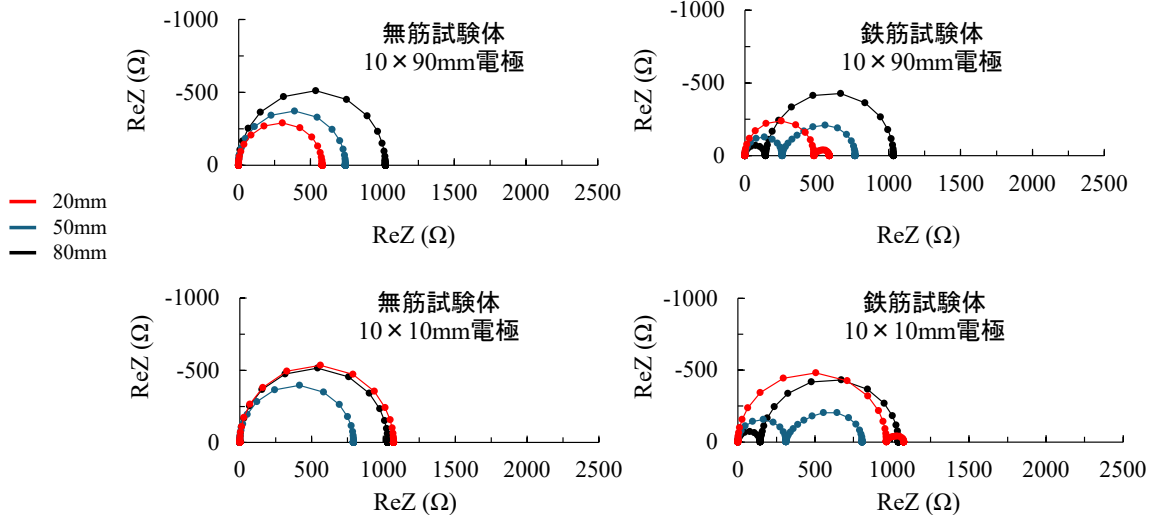


図-6 湿潤状態の解析結果 (左図：無筋試験体, 右図：鉄筋試験体)

表-2 入力値 (乾燥状態)

	コンクリート	皮膜	鉄筋
電気抵抗率 $\Omega \cdot \text{cm}$	42000	5000000000	0.0001
誘電率 F/cm	0.000000004	0.00005	0

表-3 入力値 (湿潤状態)

	コンクリート	皮膜	鉄筋
電気抵抗率 $\Omega \cdot \text{cm}$	12000	5000000000	0.0001
誘電率 F/cm	0.000000002	0.00005	0

変化することによると推察される。試験体の幅が 100 mm であることから、10×90 mm 電極を用いた場合、試験体長手方向にのみ電位分布が生じたと考えられる。一方で、10×10 mm 電極を用いた場合は、試験体長手方向に加えて短手方向にも電位分布が生じる。そのため、短手方向の電位降下の影響が加わり電位差測定電極間の電位差が 10×90 mm 電極に比べて大きくなり、電気抵抗が大きくなったと推察される。

3.2 有限要素解析

(1) 再現解析 (乾燥状態)

有限要素解析の入力値として、20℃、60% R.H.環境下で乾燥した無筋試験体に対して 10×90 mm 電極を用いて電極間隔 80 mm で実施した測定で得られた電気的特性を用いた。これは、電極間隔 20 mm に比べ骨材の影響が少なく安定した測定であったと考えたためである。解析モデルは実験で用いた試験体寸法と同じ値で、解析に用いた電気的特性を表-2 に、解析結果を図-5 に示す。

無筋試験体では電極間隔 80 mm に比べて 20 mm の電気抵抗が小さな値になり、測定結果とは異なる傾向が見られた。一方、鉄筋試験体の電極間隔 80 mm では測定結

果と同様に 2 つの容量性半円がプロットされた。また、左側の容量性半円の電気抵抗が約 500 Ω と測定結果と同程度の値となった。電極間隔 20 mm では、測定結果とは異なり右側に 2 つ目の容量性半円がプロットされた。しかし、20 mm では左側の容量性半円が大きく、右側の容量性半円が小さいため、80 mm に比べて鉄筋の影響は小さかったものと考えられる。ただし、電気抵抗は測定結果に比べて小さな値であった。試験体を用いた測定では、骨材や含水分布などの影響で電気抵抗率が一樣ではないため、測定と解析で差が生じたと考えられる。一方で、電極間隔 80 mm の解析では無筋試験体の電気的特性から鉄筋試験体のインピーダンススペクトルを模擬することができた。このことから、この解析で用いた鉄筋試験体モデルを用いて、測定から得られた値と一致するような入力値を逆解析的に求めることで、無筋試験体で得られる電気抵抗率を推定が可能になると考えられる。

(2) 再現解析 (湿潤状態)

有限要素解析の入力値として、7 日間水中浸漬させた湿潤状態で 10×90 mm 電極を用いて電極間隔 80 mm で実施した測定で得られた電気的特性を用いた。解析モデ

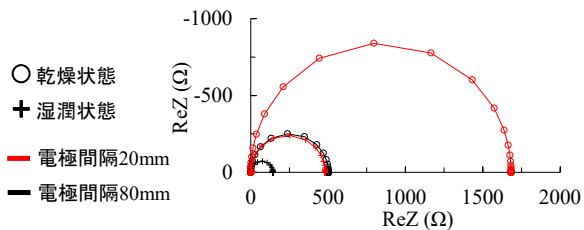


図-7 皮膜なし解析結果

ルは実験で用いた試験体寸法と同じ値で、解析に用いた電気的特性を表-3に、解析結果を図-6に示す。

無筋試験体の10×90mm電極による測定を再現した解析では電極間隔80mmに比べて50mm、20mmでの電気抵抗が小さな値になり、乾燥状態の解析と同様の傾向が得られた。一方で、10×10mm電極を用いた場合の解析では、10×90mm電極の解析と異なり電極間隔80mmに比べ、50mmは電気抵抗が小さく、20mmは同程度の電気抵抗となった。このことから、解析においても得られる電気抵抗は電極形状の影響を受けることが分かる。

土木学会規準JSCE-G 581-2018では、使用する電極を棒状と定めており、この付属書記載のセル定数は、20mmで8.67、50mmで6.58、80mmで8.54とされている⁴⁾。これらのセル定数を用いて10×10mm電極の解析で得られた電気抵抗から電気抵抗率を計算すると、20mmで12341Ω・cm、50mmで12110Ω・cm、80mmで12061Ω・cmとなり概ね入力値の電気抵抗率と一致した。このことから電極間隔50mmで測定される電気抵抗が小さくなることは妥当な結果であると言える。

また、鉄筋試験体の10×90mm電極の解析では測定結果と同様に2つの容量性半円がプロットされ、乾燥状態の解析とも同様の傾向が得られた。しかし、右の容量性半円の電気抵抗は乾燥状態に比べて小さな値であることが分かり、右側の容量性半円の電気抵抗がコンクリートの電気抵抗率の影響を受けることが分かる。さらに、鉄筋試験体の10×10mm電極の解析では電極間隔50mmと80mmは10×90mm電極の解析と同じインピーダンススペクトルを示したが、20mmは左側の半円の電気抵抗が10×90mm電極の解析に比べて2倍程度大きな値となった。このことから、鉄筋試験体においても電極寸法の影響を受けることが分かる。また、測定結果と比較を行うと、解析では電極間隔50mmと20mmの左側の容量性半円の電気抵抗は測定結果に比べて小さな値となった。これらの傾向も上記の通り、実試験体の不均一性の影響によるものと考えられる。

(3) 皮膜の影響

(1)、(2)で用いた有限要素解析において、10×90mm電極かつ電極間隔20mmと80mmの解析について、皮膜の電気的特性をコンクリートと同じ値にして、皮膜の

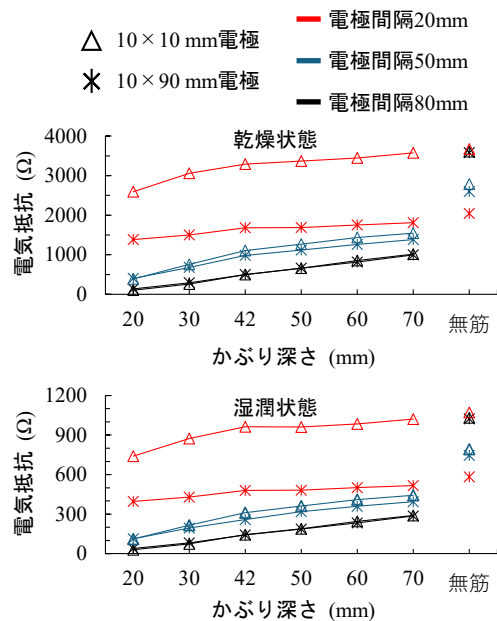


図-8 かぶり深さの影響

ない鉄筋を模擬した解析を行った。その結果を図-7に示す。解析結果は1つの容量性半円を示し、電気抵抗は皮膜がある解析結果の左側の容量性半円の電気抵抗と一致した。このことから、コンクリート部分の電気抵抗は皮膜の電気的特性の影響を受けないと考えられる。そのため、腐食のような鉄筋表面の皮膜の状態の変化が測定に与える影響は少ないと推察される。また、この解析では右側に半円がプロットされなかったことから、右側の容量性半円は鉄筋の皮膜要素によるものであったことが解析的に確認された。

(4) かぶり深さの影響

これまでの検討から、鉄筋試験体で得られたインピーダンススペクトルにおいて左側の容量性半円がコンクリート部分の電気抵抗を示していることを明らかにした。この結果を用いて、左側の容量性半円の直径部分(コンクリート部分の電気抵抗)とかぶり深さの関係性を解析的に検討した。乾燥状態と湿潤状態の電気的特性を用いて解析を行い、得られたコンクリート部分の電気抵抗とかぶり深さの関係を図-8に示す。なお、本解析ではかぶり深さによってモデルの高さが変化する。(1)、(2)で用いたモデルで、高さ部分を「かぶり深さ×2+鉄筋要素直径」として、中央に鉄筋要素を配置した。かぶり深さは、20mmから70mmまで原則10mm間隔で解析を行った。100×100×400mm試験体を模擬した解析ではかぶり深さが42mmであるため40mmではなく42mmの値を示している。さらに、比較として、無筋試験体の解析で得られた電気抵抗も示している。

図-8から乾燥状態、湿潤状態においてもかぶり深さが大きくなるほど電気抵抗が大きくなる傾向が得られた。これは、かぶり深さが小さいほど電気抵抗率の小さい鉄

筋を通過する電流が多くなり、鉄筋の影響で測定されるコンクリート部分の電気抵抗が小さくなったと考えられる。ただ、留意点として本検討ではかぶり深さが小さくなるほど試験体の高さが小さくなるため、鉄筋下のコンクリートの厚さの影響も含まれている可能性がある。一方で、鉄筋の電気抵抗はコンクリートに比べて著しく小さいため、鉄筋の下のコンクリートの厚さの影響に比べ鉄筋の影響の方が大きいと考えられる。無筋試験体の解析結果と比較を行うと、電極間隔 20 mm は鉄筋の影響が小さいのに対して、50 mm と 80 mm はかぶり深さ 20~70 mm の範囲では電気抵抗が 1/2 以下になっており鉄筋の影響が大きいことが分かる。Gowers et al. や皆川らの検討でも同様の傾向が示されており^{5),6)}、特にかぶり深さに対して 2/3 以上の電極間隔では鉄筋の影響が大きくなるとされている点と一致する。また、電極形状の影響は電極間隔が小さくなるほど大きくなる傾向が得られた。これは、前述の通り電極形状による電位分布の違いの影響が大きいと考えられる。

かぶり深さに対する電気抵抗の変化は乾燥状態と湿潤状態で同様の傾向が示されている。そのため、かぶり深さと得られる電気抵抗の関係性はコンクリート部分の電気抵抗率の大小に影響されないと考えられる。よって、鉄筋コンクリートで測定したコンクリートの電気抵抗から電気抵抗率に換算する際に、コンクリートの含水状態を考慮せずに、セル定数のような補正定数での換算が可能になると推察される。本検討では鉄筋径が D16 のみである点や、試験体形状の影響を考慮していない点で補正定数の提案には情報が十分ではない。今後は、鉄筋種類、実構造物の形状等の検討を行い、鉄筋の影響を考慮したコンクリート部分の電気抵抗率測定方法の確立を行う。

4. まとめ

本研究では、鉄筋コンクリートにおいて鉄筋の影響を考慮したコンクリート部分の電気抵抗率測定方法の確立を目指し、4プローブ法を用いた EIS 測定方法の検討を行った。検討では鉄筋が与える影響について明らかにすべく、試験体を用いた実測定と有限要素解析から、電極形状や電極間隔などの測定条件やかぶり深さと鉄筋の影響の関係性について明らかにした。以下に本検討で得られた知見をまとめる。

- (1) 鉄筋を有する試験体での測定では、ナイキスト線図上に 2 つの容量性半円がプロットされた。左側の高周波数域の容量性半円がコンクリート部分の電気抵抗、右側の低周波数域の容量性半円が鉄筋表面の電気化学的応答によるものであると考えられる。
- (2) 鉄筋を有する試験体では、電極間隔 20 mm の測定

だと、鉄筋の影響が小さく、50 mm, 80 mm の測定では容量性半円が 2 つプロットされコンクリート部分の電気抵抗が無筋の試験体に比べ著しく小さくなった。

- (3) 測定結果を再現した有限要素解析では、実験と同様の傾向が得られた。鉄筋皮膜のない鉄筋試験体モデルでは容量性半円が 1 つだけプロットされ、その容量性半円の電気抵抗は皮膜のある鉄筋試験体モデルの左側の容量性半円と一致し、解析で得られるコンクリート部分の電気抵抗は鉄筋表面の皮膜の影響を受けないことが示された。
- (4) かぶり深さが大きくなるほど解析で得られるコンクリート部分の電気抵抗が大きくなる傾向が得られた。また、電極形状によっては同じ電極間隔でも異なる電気抵抗を示した。

謝辞

本研究は JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2180 の支援を受けたものです。

参考文献

- 1) 板垣昌幸：電気化学インピーダンス法 原理・測定・解析 第3版，丸善出版，2022
- 2) McCarter, W. J. and Brousseau, R.: The A.C. response of hardened cement paste, *Cement and Concrete*, Vol.20, No.6, pp.891-900, Nov.1990
- 3) Song, G.: Equivalent circuit model for AC electrochemical impedance spectroscopy of concrete, *Cement and Concrete*, Vol.30, No.11, pp.1723-1730, Nov.2000
- 4) 土木学会：四電極法によるコンクリートの電気抵抗率試験方法 (案)(JSCE-G 581-2018), コンクリート標準示方書 [規準編], 2018
- 5) Gowers, K. R. and Millard, S. G.: Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion Severity of Steel Using Wenner Technique, *ACI Materials Journal*, Vol.96, No.5, pp.536-541, Sep.1999
- 6) 皆川 浩ほか：鉄筋が 4 プローブ法による電気抵抗率の測定値に及ぼす影響，土木学会第 64 回年次学術講演会，V-206，2009.9
- 7) Hecht, F.: New development in freefem++, *Journal of Numerical Mathematics*, Vol.20, No.3-4, pp.251-266, Dec.2012
- 8) 金光俊徳，小野新平：完全非破壊によるコンクリート内部鉄筋の腐食速度評価法の提案，土木学会論文集 E2, Vol.76, No.4, pp.315-331, 2020.10