

論文 二電極法に基づく鉄筋近傍におけるモルタルの電気抵抗率の算出に関する研究

渡邊 雅大*1・南浦 七海*2・寺澤 広基*3・鎌田 敏郎*4

要旨: 本研究では、3次元有限要素法に基づく電場解析により算出したセル定数を用いて、二電極法により鉄筋近傍におけるモルタルの電気抵抗率の算出を行った。はじめに、解析を用いて、鉄筋と電極との位置関係やモルタルの電気抵抗率が、電気抵抗値およびセル定数に与える影響を把握した。続いて、電気抵抗値の解析結果と実験結果とを比較することで解析モデルの妥当性を検討した。さらに、二電極法および四電極A法により算出した電気抵抗率を比較した結果に基づき、鉄筋軸方向に対して電極を垂直に設置し、二電極法の測定を行い、鉄筋近傍におけるモルタルの電気抵抗率を算出可能であることが示唆された。

キーワード: 二電極法, 電気抵抗率, セル定数, 鉄筋モルタル, 電場解析

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の内部鉄筋の腐食に対する抵抗性を評価する上で、かぶりコンクリート部分の電気抵抗率が指標として用いられる。この電気抵抗率を算出するにあたり、対象構造物表面に電極を設置して電流を流し、得られた電気抵抗値を電気抵抗率に換算する方法が一般的となっている。しかしながら、鉄筋近傍のコンクリート部分の電気抵抗率を評価する場合、鉄筋と電極との位置関係や鉄筋腐食に伴う分極抵抗値の変化などの影響により電流経路が変化し、算出される電気抵抗率がかぶりコンクリート部分の真の電気抵抗率と乖離してしまうことが考えられる。そのため、鉄筋の影響を考慮した電気抵抗率の算出方法が必要である。

一方、かぶりコンクリート部分の鉄筋腐食の抵抗性の評価にあたり、鉄筋の影響を無視できるほど十分に鉄筋から離れた位置でのかぶりコンクリート部分にて算出される電気抵抗率を用いる評価方法が考えられる。しかしながら、鉄筋から十分に離れた位置におけるコンクリートの電気抵抗率は、鉄筋近傍での電気抵抗率とは値が異なる可能性があり、適切な評価とならない場合がある。以上のことから、鉄筋の存在が、算出されるコンクリートの電気抵抗率に与える影響を考慮し、鉄筋近傍におけるコンクリート部分の電気抵抗率を求める必要がある。

セメント系材料の電気抵抗率を非破壊かつ容易に測定する手法として、測定対象物の表面に2つの電極を設置する二電極法(図-1 参照)がある。この二電極法に関して、無筋モルタルの電気抵抗率の算出式¹⁾についての検討が報告されている一方で、鉄筋近傍でのコンクリートの電気抵抗率の算出方法については十分に検討され

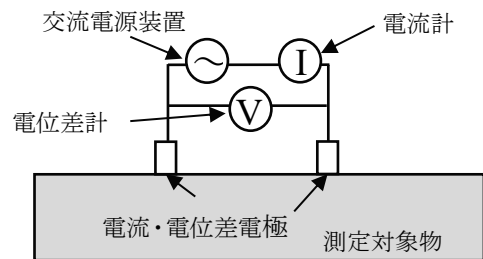


図-1 二電極法の模式図

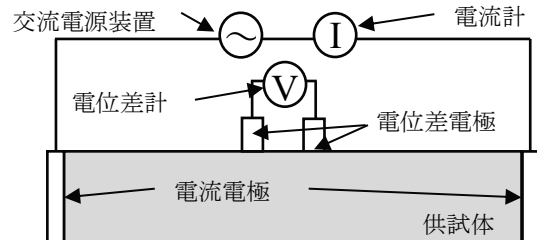


図-2 四電極A法の模式図

ていない。

そこで、本研究では、基礎的な検討として鉄筋近傍におけるモルタルの電気抵抗率の算出方法の検討を行った。また、測定される電気抵抗値を電気抵抗率に換算する係数である、セル定数に着目した。まず、解析を用いて、電極の設置方法やモルタルの電気抵抗率など種々の条件におけるセル定数を算出した。そして、解析により決定したセル定数と二電極法による実験値を用いて、モルタルの電気抵抗率を算出した。加えて、鉄筋の腐食に伴う腐食生成物により、電極から流した電流の経路が変化すると予想されるため、鉄筋腐食を模擬した供試体にて、

*1 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (学生会員)

*2 大阪大学 工学部地球総合工学科

*3 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 助教 (正会員)

*4 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 教授 (正会員)

二電極法および四電極 A 法 (図-2 参照) により測定を行い, 得られる電気抵抗率を比較した。さらに, それらの結果に基づき, 二電極法を用いた鉄筋近傍のモルタルの電気抵抗率の算出方法を提案した。なお本研究では, 土木学会規準²⁾で規定されている四電極 A 法により算出される電気抵抗率を真値として検討を行った。

2. 鉄筋が測定される電気抵抗値およびセル定数に与える影響に関する解析的検討

2.1 解析概要

(1) 電場解析の方法

本研究では, 電場および導体内における電流分布シミュレーションを目的とした汎用電場解析ソフトウェア (VOLT-jω) を用いた。基礎方程式は以下の式(1)および式(2)に示すマクスウェル方程式および式(3)に示す法則である。

$$\nabla \cdot J + \frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot D = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (2)$$

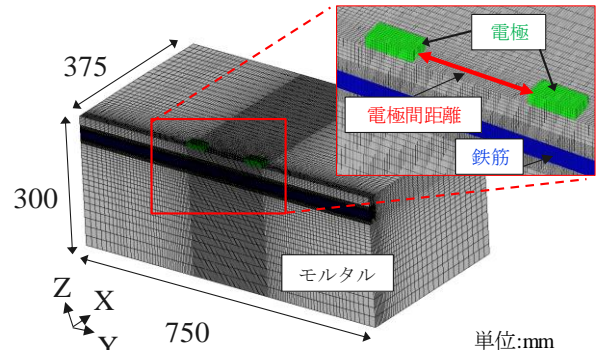
$$J = \sigma \cdot E \quad (3)$$

ただし, J : 電流密度(A/m²), D : 電束密度(C/m²), E : 電場(V/m), σ : 電気伝導率(1/Ωm)である。境界条件は, 一定の電位が設定された境界面では, 電場および電流密度は境界面に対して垂直とし, その他の境界面では, 電場および電流密度は境界面に対して平行とする。

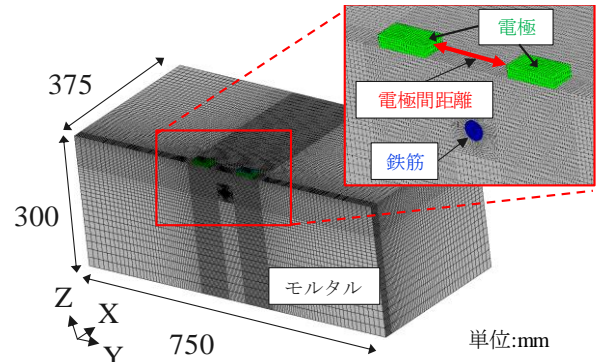
(2) 解析モデル

解析モデルを図-3 に示す。モルタル, 電極および鉄筋は計算時間短縮のため, X 軸方向の 2 分の 1 のモデルとして解析を行った。モルタルの寸法は, 375mm (X 軸方向) × 750mm (Y 軸方向) × 300mm (Z 軸方向) とした。電極の寸法は, 20mm (X 軸方向) × 40mm (Y 軸方向) × 10mm (Z 軸方向) とした。供試体寸法が電流密度分布に与える影響を小さくするため, モルタルの寸法は十分に大きく設定した。電極内側端部間の距離 (以下, 電極間距離 L と称す) は 10mm, 30mm, 50mm, 70mm および 100mm の 5 水準と設定した。また, 鉄筋 (φ16mm) の配筋状態は, かぶりを 25mm, 30mm, 50mm, 75mm および 100mm, 無筋のモデルの 6 水準とし, 鉄筋軸方向に対して電極を平行および垂直に設置した。

モルタルの物性値は, 比誘電率を 1.6×10^5 , 電気抵抗率を 10.0Ωm, 27.7Ωm および 50.0Ωm の 3 水準と設定した。電極は, 比誘電率を 1.0, 電気抵抗率を 7.1×10^{-7} Ωm とし, 鉄筋は, 比誘電率を 1.0, 電気抵抗率を 1.0×10^{-6} Ωm と設定した。節点電位は, 一方の電極上端の節点を 3V, もう一方の電極上端の節点を 0V とした。なお, 高周波測定においては, 結果の安定性を考慮し印加電圧の周波数を 73.3Hz とした。また, 高周波測定においては, 分極



(a) 鉄筋軸方向に対して電極を平行に設置



(b) 鉄筋軸方向に対して電極を垂直に設置

図-3 解析モデル

抵抗をゼロ値と仮定できるため, 分極抵抗の層を設けることなく解析を行った。

(3) 解析における電気抵抗値およびセル定数の算出方法

解析における電気抵抗値は, 式(4)で示されるオームの法則を用いて算出した。

$$R_{FEM} = \frac{V_{FEM}}{I_{FEM}} \quad (4)$$

ただし, R_{FEM} : 解析により算出した電気抵抗値(Ω), V_{FEM} : 解析にて設定した電極上面の節点電位(=3V), I_{FEM} : 解析で得られた電流値を 2 倍した値(A)である。これは X 軸方向の 2 分の 1 のモデルで解析を行ったためである。

続いて, 式(4)より求めた電気抵抗値および式(5)を用いて, セル定数を算出する。

$$k = \frac{R_{FEM}}{\rho_{FEM}} \quad (5)$$

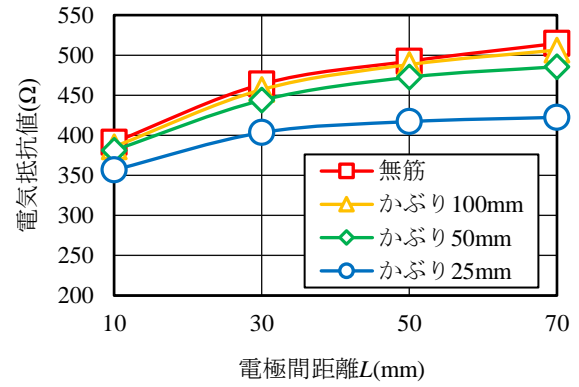
ただし, k : セル定数(1/m), R_{FEM} : 解析により算出した電気抵抗値(Ω), ρ_{FEM} : 解析にて設定したモルタルの電気抵抗率(Ωm)である。なお, セル定数は, 測定条件毎に算出される値であり, 対象物の物性値に依存しない値であるため, 設定したモルタルの電気抵抗率の影響は極めて小さいと考えられる。

2.2 解析結果および考察

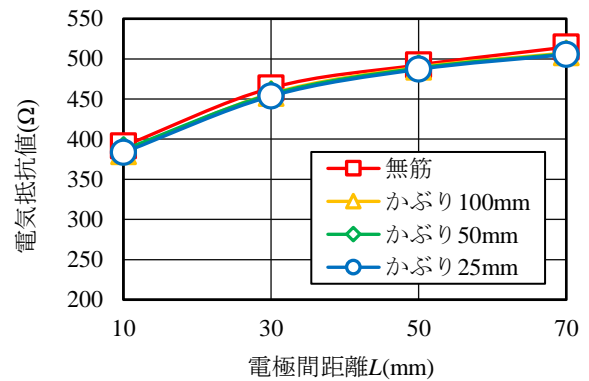
(1) かぶりや電極の設置位置および電極間距離が測定される電気抵抗値に与える影響

モルタルの電気抵抗率を $27.7\Omega\text{m}$ 、鉄筋軸方向に対して電極を平行および垂直に設置した場合において、電極間距離と電気抵抗値との関係を図-4に示す。なお、電極間距離 10mm, 30mm, 50mm および 70mm における結果より、電極間距離と電気抵抗値との関係を把握できたため電極間距離は 4 水準のみ検討を行った。図-4(a)より、鉄筋軸方向に対して平行に電極を設置した場合、かぶりが高くなるにしたがって、電気抵抗値は小さくなることがわかった。また、電極間距離が大きくなるにしたがって、電気抵抗値は、無筋モデルのそれとの差が大きくなった。つまり、かぶりが小さいほど、または電極間距離が大きいくほど、鉄筋が電気抵抗値に与える影響の程度は大きくなることがわかった。また、図-4(b)より、鉄筋軸方向に対して垂直に電極を設置した場合、いずれの測定条件においても、電気抵抗値は無筋モデルの結果と同程度となり、鉄筋が電気抵抗値に与える影響は小さいことがわかった。

ここで、モルタルの電気抵抗率を $27.7\Omega\text{m}$ とした場合での無筋モデル、かぶり 25mm およびかぶり 100mm のモデルにおける電流密度のコンター図を図-5に示す。図-5(a), (b), (c)より、無筋およびかぶり 100mm において鉄筋軸方向に対して電極を平行に設置した場合、電流はモルタル表層部に流れることがわかる。一方、かぶりが 25mm の場合、モルタル表層部に流れる電流は小さくなり、鉄筋に流れる電流は大きくなる。一方、図-5(d), (e)より、どちらの条件においても、モルタル表層部に電流が流れ、鉄筋にはほとんど電流が流れていないことがわかる。そのため、コンター図からも、



(a) 鉄筋軸方向に対して電極を平行に設置



(b) 鉄筋軸方向に対して電極を垂直に設置

図-4 電極間距離と電気抵抗値との関係

鉄筋軸方向に対して電極を平行に設置した場合は、鉄筋の影響が大きく、一方、鉄筋軸方向に対して電極を垂直に設置した場合は、鉄筋が電気抵抗値に与える影響は小さいといえる。

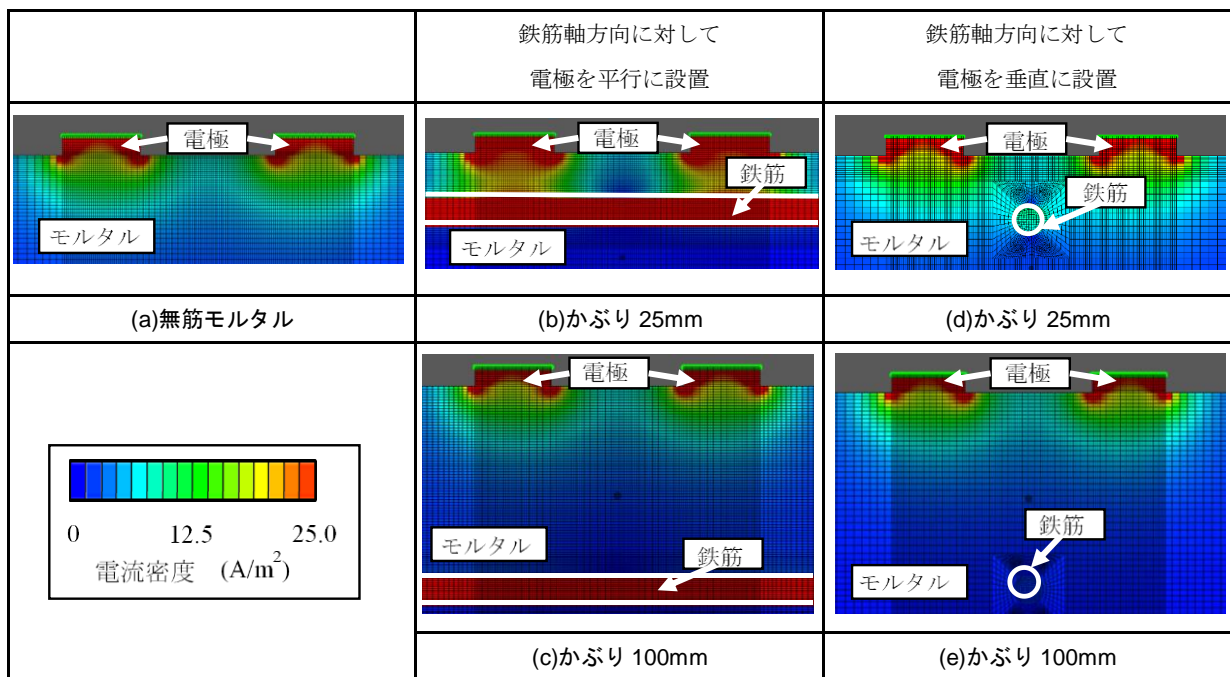


図-5 電流密度のコンター図

(2) 電極の設置位置および電極間距離がセル定数に与える影響

かぶり 30mm の鉄筋軸方向に対して、電極間距離 50mm および 100mm で電極を平行および垂直に設置した場合におけるモルタルの電気抵抗率とセル定数との関係を図-6 に示す。なお、セル定数は、理論上モルタルの電気抵抗率の影響を受けないため、ある条件下での鉄筋モルタルを対象とした測定において、鉄筋の影響を受けてモルタルの電気抵抗率毎にセル定数の値が変化した場合、その条件下でのセル定数の算出が難しいといえる。そこで、図-6 では、本検討の範囲内において鉄筋の影響が最も大きくなる電極間距離 100mm の条件に着目した。これらを踏まえ、図-6 より、モルタルの電気抵抗率によらずセル定数は同程度になったため、鉄筋の直上に電極を設置した場合において、セル定数を算出することができることがわかった。以上の結果より、鉄筋軸方向に対して電極を平行に設置すると、測定される電気抵抗値は、モルタルの電気抵抗率および鉄筋の影響を大きく受けることがわかった。一方、鉄筋軸方向に対して電極を垂直に設置した場合、鉄筋が測定される電気抵抗値に与える影響は小さくなることがわかった。加えて、測定条件毎にセル定数を求めることで、鉄筋近傍のモルタルの電気抵抗率を算出できる可能性が示唆された。

3. 鉄筋が電気抵抗に与える影響に関する実験的検討

3.1 実験概要

(1) 供試体の概要

本研究では、 $\phi 16\text{mm}$ の鉄筋を使用し、幅：350mm、長さ：350mm、高さ：250mm の鉄筋モルタル供試体を作製した。鉄筋の有無および鉄筋の腐食が測定される電気抵抗値に与える影響を把握するために、かぶり 25mm、50mm および 100mm に配筋した供試体 1 体ずつに加えて、かぶり 30mm に配筋し、塩分含有量を 0kg/m^3 、 2kg/m^3 および 10kg/m^3 とした供試体を 1 体ずつ、計 7 体を作製した。また、四電極 A 法により、二電極法による測定の妥当性を検証するため、かぶり 30mm の供試体において、塩分含有量の条件毎に、幅：40mm、長さ：160mm、高さ：40mm のモルタル供試体を 1 体ずつ作製した。

供試体の配合を表-1 に示す。配合は 2 パターンとし、塩分含有量 0kg/m^3 かつ、かぶり 25mm、50mm、75mm および無筋の供試体を配合パターン①、かぶり 30mm かつ、塩分含有量 0kg/m^3 、 2kg/m^3 、 10kg/m^3 の供試体を配合パターン②とした。材料には、密度が 3.16g/cm^3 の早強ポルトランドセメントを使用し、細骨材は表乾密度が 2.63g/cm^3 の岐阜県安八郡神戸町新屋敷産の陸砂を用いた。また、塩化物イオンの混入は練混ぜ時に行い、塩化物イオンが所定の含有量となるように食塩を練混ぜ水に

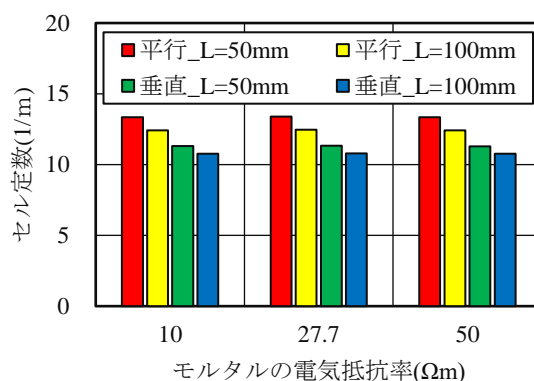


図-6 モルタルの電気抵抗率とセル定数との関係

表-1 供試体の配合

(a) 配合パターン①

W/C(%)	W(kg/m ³)	C(kg/m ³)	S(kg/m ³)
55	274	498	1495

(b) 配合パターン②

W/C(%)	W(kg/m ³)	C(kg/m ³)	S(kg/m ³)
50	255	510	1533

添加し、モルタルの練混ぜを行った。いずれの供試体も、型枠にモルタルを打ち込んで 24 時間後に脱型し、脱型後、濡れたウエスで供試体を覆い、養生袋に入れて封かん養生を行った。また、配合パターン①のものは材齢 108 日、配合パターン②のものは材齢 90 日で測定を行い、測定時には、噴霧散水をすることで、供試体を湿潤状態とした。

(2) 二電極法による測定方法

二電極法の模式図を図-1 に示す。測定には、LCR メータ(交流電圧:10mV~5V、周波数範囲:1mHz~5.5MHz、出力インピーダンス:5~100Ω)を使用し、測定結果の安定性および安全性を配慮し、印加電圧を 3V、周波数を 73.3Hz と設定した。電極は供試体との接触面積(縦幅×奥行き)を 40mm×40mm とし、電極の材質は SUS304 を使用した。電極の設置位置は、鉄筋軸方向に対して平行および垂直とし、電極間距離は 10mm、30mm、50mm、70mm および 100mm とした。

ここで、二電極法の測定では、電流電極が電位差電極を兼ねているため、電極と供試体との界面に生じる接触抵抗が測定結果に影響を及ぼすと考えられる。そこで、既往の研究³⁾より、供試体表面の研磨に加えて、接触媒質および接触圧力を導入し、接触抵抗の低減を図った。まず、測定面の凹凸を均一にするために、粗さ #400 の研磨紙を使用し、供試体の測定表面を約 0.1mm 程度研磨した。次に、接触媒質として、ケラチンクリーム(主原料:塩化ナトリウム、プロピレングリコール)を使用した。また、電極に 5 枚の板上の錘(0.83kg/枚)を載せる

表-2 各測定条件のセル定数 k

かぶり (mm)	電極間距離(mm)									
	10	30	50	70	100	10	30	50	70	100
	電極設置方向：鉄筋軸方向に対して平行					電極設置方向：鉄筋軸方向に対して垂直				
無筋	9.99	11.83	12.57	13.13	13.41	9.99	11.84	12.57	13.14	13.42
25	9.11	10.30	10.65	10.78	—	9.79	11.58	12.43	12.90	—
30	—	—	10.79	—	11.33	—	—	12.46	—	13.39
50	9.73	11.33	12.06	12.40	—	9.81	11.64	12.47	12.93	—
100	9.85	11.67	12.47	12.93	—	9.88	11.66	12.50	18.95	—

セル定数の単位：1/m

ことで、接触圧力を導入した。加えて、既往の研究⁴⁾を参考にし、印加電圧の周波数が73.3Hzにおける、接触抵抗のインピーダンスの実数値および虚数値をそれぞれ74.5(Ω)、-2.05(Ω)とし、この2つの値を、条件毎の測定値に減じて補正した値を二電極法における実験値とした。

なお、セル定数 k は、解析にて実験と同一の供試体寸法および測定条件のモデルを用いて算出した。本検討における各測定条件のセル定数を表-2に示す。これらのセル定数および式(6)を用いて、二電極法における電気抵抗率を算出した。

$$\rho_2 = \frac{1}{k} \cdot R_2 \quad (6)$$

ただし、 ρ_2 ：二電極法により算出したモルタルの電気抵抗率(Ωm)、 R_2 ：二電極法による電気抵抗値(Ω)である。

(3) 四電極 A 法における測定方法

四電極 A 法の模式図を図-2に示す。電流電極は40mm×40mm×10mmを、電位差電極は8mm×30mm×8mmを使用した。また、電位差電極間の距離は40mmとした。電気抵抗率は、測定される電気抵抗値を用いて、土木学会規準に従い²⁾、式(7)より算出した。

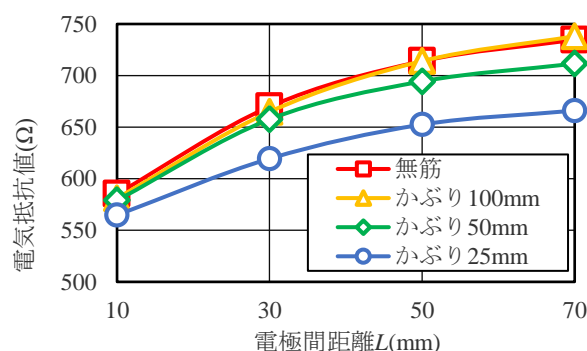
$$\rho_4 = \frac{A}{L} \cdot R_4 \quad (7)$$

ただし、 ρ_4 ：四電極法により算出した電気抵抗率(Ωm)、 R_4 ：四電極法による電気抵抗値(Ω)、 A ：供試体の断面積(=0.0016m²)、 L ：電位差電極間の距離(=0.04m)である。

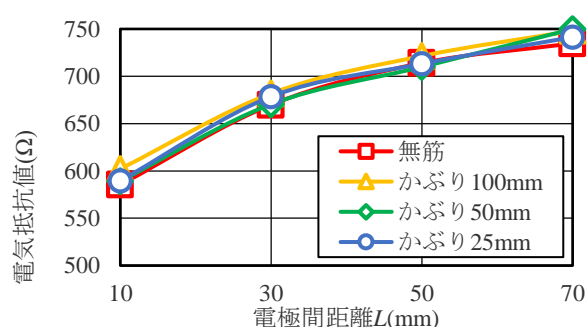
3.2 実験結果および考察

(1) 鉄筋と電極の位置関係が測定される電気抵抗値および電気抵抗率に与える影響

電極間距離と電気抵抗値との関係を図-7に示す。なお、電極間距離10mm、30mm、50mmおよび70mmにおける結果より、電極間距離と電気抵抗値との関係を把握できたため電極間距離は4水準のみ検討を行った。図-7(a)より、かぶりが小さくなるにしたがって、電気抵抗値は小さくなった。また、電極間距離が大きくなるにし



(a) 鉄筋軸方向に対して電極を平行に設置



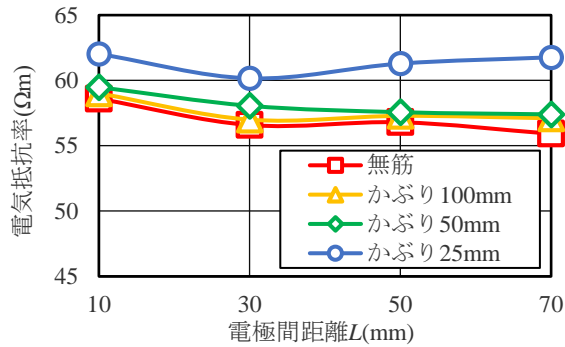
(b) 鉄筋軸方向に対して電極を垂直に設置

図-7 電極間距離と電気抵抗値との関係

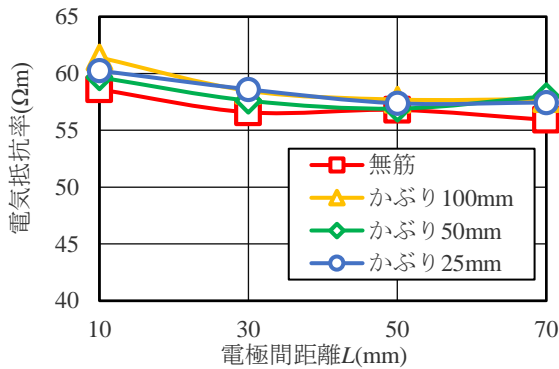
たが、鉄筋が電気抵抗値に与える影響の程度は大きくなった。また、図-7(b)より、いずれのかぶりにおいても、電気抵抗値は無筋モルタルの結果と同程度となった。したがって、実験値と解析値は強い相関があり、解析モデルおよび結果の妥当性が確認された。

続いて、電極間距離と電気抵抗率との関係を図-8に示す。図より、内部鉄筋の腐食がほとんどないと考えられる場合、かぶりが25mmの条件を除いて、電極を鉄筋軸方向に対して平行および垂直に設置した場合において、算出した電気抵抗率は概ね58Ωmとなり、電極の設置方向によらず同程度の値となった。ここで、既往の研究より、無筋モルタルを対象とし同様の方法で算出した電気抵抗率は、電極間距離によらず同程度になることが報告されている¹⁾。したがって、電極の設置位置が鉄筋の直

上であっても、鉄筋軸方向に対して電極を垂直に設置し、解析より求めたセル定数を用いることで、モルタルの電

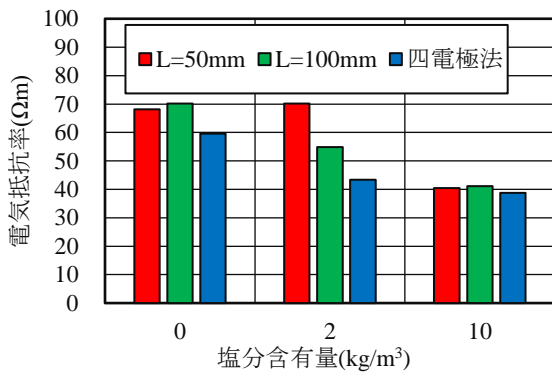


(a) 鉄筋軸方向に対して電極を平行に設置

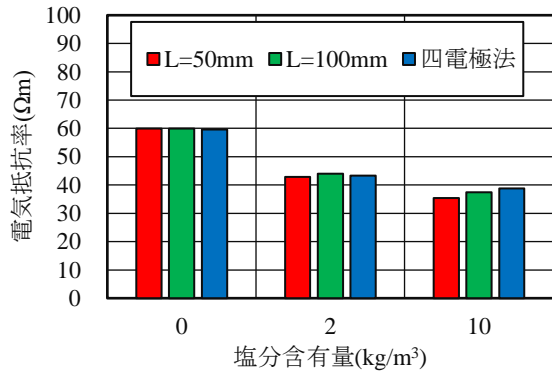


(b) 鉄筋軸方向に対して電極を垂直に設置

図-8 電極間距離と電気抵抗率との関係



(a) 鉄筋軸方向に対して電極を平行に設置



(b) 鉄筋軸方向に対して電極を垂直に設置

図-9 二電極法および四電極 A 法により得られた電気抵抗率の比較

気抵抗率を算出できることがわかった。

(2) 鉄筋の腐食が算出される電気抵抗率に与える影響

続いて、電極間距離と電気抵抗率との関係を図-9に示す。図-9(a)より、鉄筋軸方向に対して電極を平行に設置すると、塩分含有量毎の供試体において、二電極法および四電極 A 法による電気抵抗率には差異がみられた。この原因としては、モルタル中の塩分含有量により鉄筋の分極抵抗値が変化し³⁾、解析で想定した電流経路と異なっているためだと考えられる。一方で、図-9(b)より、鉄筋軸方向に対して電極を垂直に設置すると、塩分含有量毎の供試体において、二電極法および四電極 A 法による電気抵抗率は同程度となった。

これらの結果より、鉄筋の腐食による分極抵抗値の変化に関わらず、鉄筋軸方向に対して電極を垂直に設置し、解析より求めたセル定数を用いることで、鉄筋近傍のモルタルの電気抵抗率を算出できることがわかった。

4.まとめ

- (1) 電場解析を用いて、二電極法の測定における鉄筋近傍でのモルタルのセル定数を算出した。
- (2) 鉄筋軸方向に対して電極を平行に設置し、二電極法の測定を行うと、得られる電気抵抗率は鉄筋の腐食による影響を大きく受けることがわかった。
- (3) 鉄筋軸方向に対して電極を垂直に設置し、二電極法の測定を行うことで、鉄筋近傍のモルタルの電気抵抗率を算出できることが示唆された。

5.参考文献

- 1) 渡邊雅大, 眞下裕也, 服部晋一, 寺澤広基, 鎌田敏郎: 二電極法に基づくセル定数を用いたモルタルの電気抵抗率の算定方法, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 18 巻, pp.629-634, 2018
- 2) コンクリート委員会・規準関連小委員会: 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-G581-2018)」の制定, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.74, No.4, pp.260-274, 2018
- 3) 工藤正智, 眞下裕也, 寺澤広基, 鎌田敏郎: コンクリート供試体を対象とした測定条件の違いが二電極法により得られる電気抵抗率に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, pp. 1819-1824, 2017
- 4) 眞下裕也, 渡邊雅大, 服部晋一, 寺澤広基, 鎌田敏郎: 二電極法によるモルタル中の鉄筋の分極抵抗の推定, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 19 巻, pp.211-216, 2019