報告　測定条件が二電極法におけるモルタル中の電流密度分布に与える影響

眞下　裕也[*1]・工藤　正智[*2]・寺澤　広基[*3]・鎌田　敏郎[*4]

要旨：本研究では，電極寸法，電極間距離および周波数が，二電極法を適用した場合のモルタル中の電流密度分布に与える影響について電場解析により検討した。その結果，電極寸法が大きくなると電流密度は大きくなり，測定される電気抵抗に影響を与える表面からの深さは大きくなるが，電極間距離が小さい場合では，電極寸法によらず，概ね同程度となることがわかった。また，測定される電気抵抗への影響が小さい周波数領域においては，周波数が電流密度分布に与える影響は小さいことが明らかとなった。

キーワード：二電極法，電場解析，電流密度，電気抵抗，電極寸法，周波数

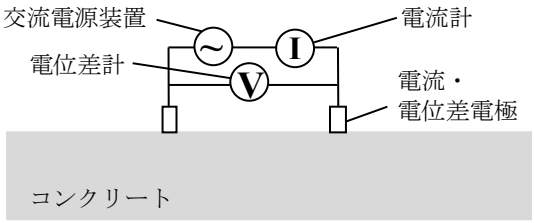
1. はじめに

コンクリートの電気抵抗は，コンクリート中の鉄筋の腐食と密接な関係がある。そのため，鉄筋コンクリート内部の鉄筋の腐食に対する抵抗性を評価することを目的として，コンクリートの電気抵抗を把握することの意義は大きい。

コンクリートの電気抵抗を測定する手法として，四電極法，4 プローブ法および二電極法がある。このうち，二電極法（**図－1** 参照）では，測定対象物の表面に電極を設置するだけで，非破壊かつ多点において電気抵抗の測定が可能である。加えて，他の手法と比べて電極の設置数が少ないため，測定も簡便である。

著者らは，この二電極法に関して，既に，電極寸法や電極間距離等の測定条件が，電気抵抗に与える影響について検討を行っている [1]。しかしながら，これらの測定条件がコンクリートやモルタル中の電流密度分布に与える影響については検討が不足していた。また，コンクリートの比誘電率と電気伝導率には周波数依存性があることが既往研究 [2]により指摘されおり，設定する周波数によってコンクリート中の電流密度分布は変化することが予想されるが，その影響を実験により把握することは難しい。

そこで本研究では，モルタルおよび電極を模擬した解析モデルを用いた 3 次元有限要素法による電場解析を行い，電極寸法および電極間距離が二電極法におけるモルタル中の電流密度分布に与える影響を調べた。また，電流密度分布が，二電極法により測定される電気抵抗に影響を与える供試体表面からの深さに関して考察した。さらに，周波数がモルタル中の電流密度分布に与える影響について検討を加えた。



図－1　二電極法の模式図

2. 電場解析の概要

2.1 解析モデルおよびその他の設定条件

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)に示すオームの法則である。

$$\nabla \cdot J + \frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot D = 0 \tag{1}$$

$$\nabla \cdot E = 0 \tag{2}$$

$$J = \sigma E \tag{3}$$

ここで，J：電流密度，D：電束密度，E：電場，σ：電気伝導率である。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する。また，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。

解析モデルを**図－2** および**図－3** に示す。電極の接触面から供試体の深さ方向の電流密度分布を検討するため，モルタル部および電極部は，Y 軸方向の 2 分の 1 のモデルとして解析した。モルタル部の寸法は，横幅（X 軸方向）を 750 mm，縦幅（Y 軸方向）を 375 mm，

*1 大阪大学　工学部地球総合工学科　(学生会員)
*2 大阪大学大学院　工学研究科地球総合工学専攻　(学生会員)
*3 大阪大学大学院　工学研究科地球総合工学専攻助教　博士(工学)　(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　博士(工学)　(正会員)

高さ（Z 軸方向）を 300 mm とした。著者らの過去の検討結果 [3]より，モルタル部の寸法は電流密度分布に影響を与えることがわかっているため，モルタル部の寸法は十分に大きく設定した。モルタル部の X 軸方向および Y 軸方向の要素分割は，電極直下と電極との間は 1 mm，それ以外は電極に近づくにつれて，要素が細かくなるように設定した（最小約 3 mm，最大約 20 mm）。Z 軸方向の要素分割は，モルタル部底面からモルタル部上面にかけて要素が細かくなるように設定した（モルタル部上面で約 1 mm，モルタル部底面で約 14 mm）。

続いて，その他の設定条件について，検討項目ごとにそれぞれ述べる。なお，解析は Y 軸方向の 2 分の 1 のモデルで行ったが，以降に示す電極部の寸法については，縦幅（Y 軸方向）を 2 倍としたフルモデルでの寸法とする。

まず，電極寸法および電極間距離に関する検討においては，電極寸法を，高さ（Z 軸方向）10 mm で一定とし，横幅（X 軸方向）は 10 mm，20 mm，30 mm，40 mm および 50 mm の 5 水準，縦幅（Y 軸方向）は 10 mm，20 mm，30 mm，40 mm および 50 mm の 5 水準の計 25 水準とした。電極部の X 軸方向および Y 軸方向の要素は 1 mm の長さで均等に分割した。Z 軸方向の要素分割は，電極部上面から電極部底面にかけて要素が細かくなるように設定した（電極部上面で約 2 mm，電極部底面で約 0.5 mm）。電極間距離は 10 mm，30 mm および 50 mm の 3 水準とした。**図－2** に示す通り，節点電位は，一方の電極上面上の節点を 30 V，もう一方の電極上面上の節点を 0 V とし，周波数は 73.3 Hz の一定とした。

また，周波数に関する検討では，電極寸法は高さ 10 mm，横幅 50 mm，縦幅 50 mm とし，電極間距離は 30 mm に設定した。節点電位は，電極寸法および電極間距離の検討と同様とした。周波数は 10^{-2} Hz, 10^{-1} Hz, 1 Hz, 10 Hz, 10^{2} Hz, 10^{3} Hz, 10^{4} Hz および 10^{5} Hz の 8 水準とした。

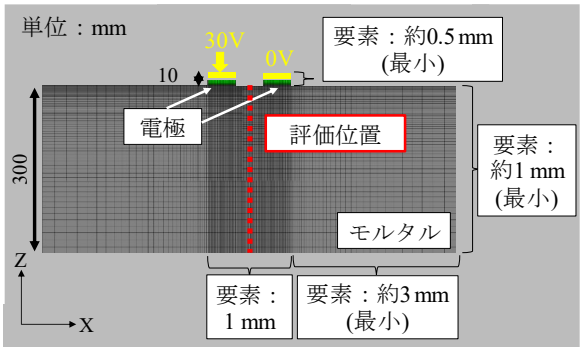
なお，二電極法による理想的な電流密度分布を求めるため，電極とモルタルとの界面に生じる接触抵抗はないものし，電極部とモルタル部との接触面は連続として解析を行った。

2.2 材料物性

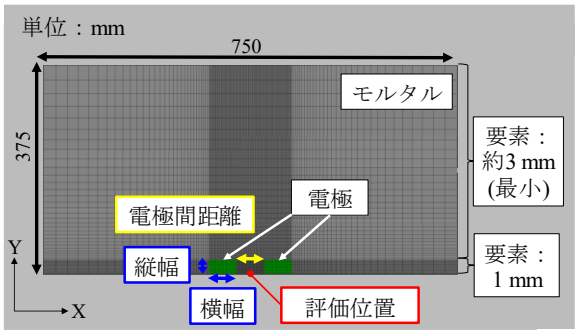
解析モデルにおけるモルタル部および電極部の物性値は，それぞれ一様に設定した。検討項目ごとの材料物性の設定内容は以下のとおりである。

(1) 電極寸法および電極間距離に関する検討

各部の物性値を**表－1** に示す。モルタル部の比誘電率および電気伝導率は，既往の研究 [3]を参考にしたものであり，モルタル供試体を対象とし，それぞれ二端子法および四電極法により算出した値である。また，電極部の比誘電率および電気伝導率は，SUS304 の一般的な物性値 [4]を用いた。



図－2　解析モデル(X-Z 方向)



図－3　解析モデル(X-Y 方向)

表－1　モルタルおよび電極の物性値

モデル	比誘電率	電気伝導率 (S/m)
モルタル	1.6×10^{5}	3.6×10^{-2}
電極（SUS304）	1.0	1.4×10^{6}

(2) 周波数に関する検討

各周波数におけるモルタル部の比誘電率および電気伝導率を**表－2** に示す。これらは，モルタル供試体を対象とし，二端子法により測定した実験値である。モルタル供試体の寸法は 40×40×160 mm であり，モルタルはコンクリートのウェットスクリーニングにより作製した。コンクリートの配合を**表－3** に示す。セメントは密度：3.16 g/cm³ の普通ポルトランドセメント，細骨材は表乾密度：2.62 g/cm³ の三重県宮川産，粗骨材は兵庫県赤穂産で，表乾密度：2.56 g/cm³（*G1*）と表乾密度：2.55 g/cm³（*G2*）を 1:1 の比率のものを使用した。

比誘電率を求めるため，既往の研究 [2]を参考にし，まず，二端子法により静電容量を測定した。得られた静電容量を用いて，式(4)により比誘電率を算出した。

$$\varepsilon = \frac{C_p \cdot L}{A \cdot \varepsilon_0} \tag{4}$$

ここで，ε：比誘電率，C_p：静電容量(F)，L：供試体の

表－2　各周波数におけるモルタルの物性値

周波数(Hz)	10^{-2}	10^{-1}	1	10	10^{2}	10^{3}	10^{4}	10^{5}
比誘電率	2.59×10^{9}	1.96×10^{8}	8.17×10^{6}	3.19×10^{5}	7.14×10^{4}	1.87×10^{4}	2.31×10^{3}	1.48×10^{2}
電気導電率 (S/m)	4.44×10^{-3}	5.67×10^{-3}	6.33×10^{-3}	6.58×10^{-3}	6.82×10^{-3}	7.98×10^{-3}	1.05×10^{-2}	1.18×10^{-2}

表－3　配合

W/C (%)	*s/a* (%)	単位量(kg/m³)					*C*× (%)	
		W	*C*	*S*	*G1*	*G2*	AE剤	AE減水剤
50	42	155	310	772	521	519	0.7	0.6

長さ(m)，A：供試体の断面積(m²)，ε_0：真空での空気の誘電率(=8.854×10⁻¹² F/m)である。

一方，電気伝導率は，まず，二端子法により電気抵抗を測定し，式(5)を用いて算出した。

$$\kappa = \frac{L}{R \cdot A} \tag{5}$$

ここで，κ：電気伝導率(S/m)，R：電気抵抗(1/S)，L：供試体の長さ(m)，A：供試体の断面積(m²)である。

なお，電極部の物性値は，前述の電極寸法および電極間距離に関する検討と同様に設定した。

2.3 電流密度の評価位置および電流が流れる深さに関する評価方法

著者らの過去の検討結果 [3]によれば，電極間中心位置（**図－2** および**図－3** 中の評価位置）における供試体底面付近の電流密度が，他の位置での供試体底面付近の電流密度と比較して，最も大きな値となることが確認されている。このことから本研究でも，いずれの解析ケースにおいても，電極間中心位置での電流密度に着目することとした。

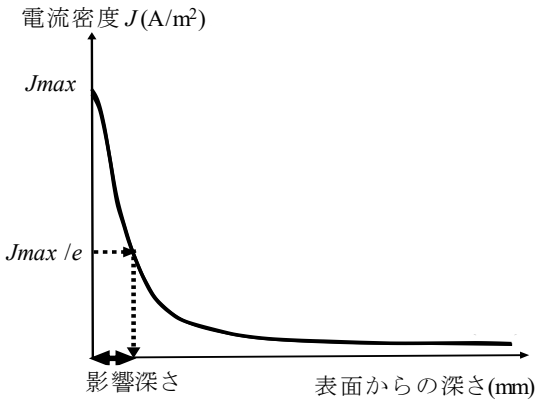
また，過去の検討成果 [3]では，電極間中心位置における電流密度は表面部が最も大きくなった。さらに，電流密度は，底面部に近づくにつれて指数関数的に減衰する傾向を示した。これらの傾向より，過去の検討 [3]では，電流密度の減衰が e^{-1} となる表面からの距離 [5]を電流が流れる深さとして整理することとした。本研究においても同様の方法によって，電気抵抗に影響を与える表面からの深さ（以下，影響深さ）を定義し（**図－4** 参照），電極寸法および電極間距離の違いが電流の流れる深さに与える影響を考察する際，この指標を用いた。

3. 電場解析の結果および考察

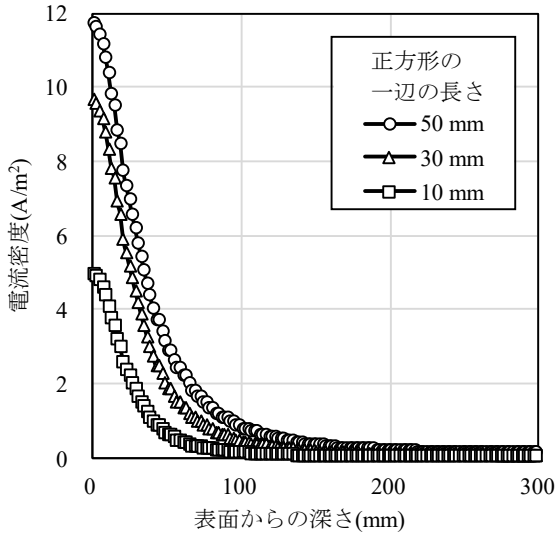
3.1 電極寸法および電極間距離に関する検討

（1）電流密度分布

電極の形状を正方形とし，電極間距離 50 mm での評価位置における電流密度分布を**図－5** に示す。図より，



図－4　影響深さの定義



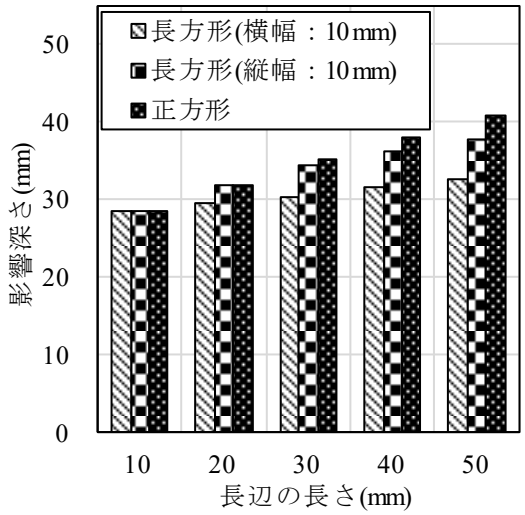
図－5　表面からの深さと電流密度との関係
(電極間距離：50 mm)

電極寸法が大きくなるにしたがって，電流密度は大きくなることがわかった。これは，既往の実験結果 [1]と同様に，電極の接触面積が増加することで，電圧を印加する面積が大きくなるためと考えられる。この傾向は，いずれの電極間距離の場合でも同様であった。また，電流密度はモルタル表面で最も大きく，底面部に近づくにつれて指数関数的に減少することが確認された。

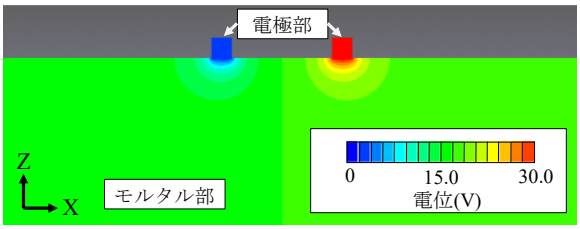
（2）影響深さ

電極の横幅を 10 mm に固定し縦幅を変化させた場合，縦幅を 10 mm に固定し横幅を変化させた場合および電極を正方形とし一辺の長さを変化させた場合の各電極寸法における影響深さを検討した。

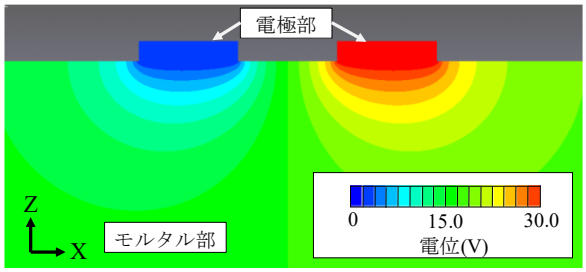
電極間距離が 50 mm の場合における各電極の長辺



図－6　電極寸法と影響深さとの関係
(電極間距離：50 mm)



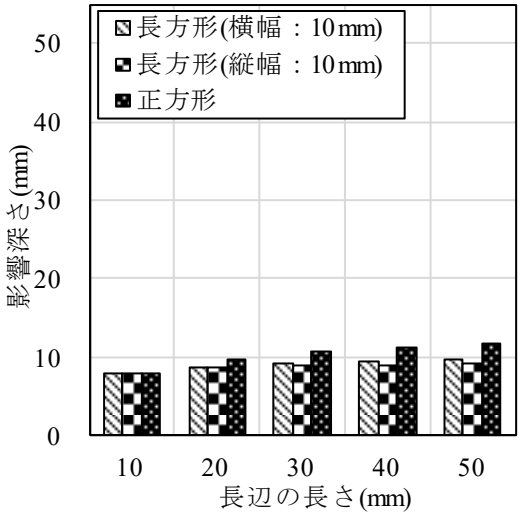
(a) 電極形状：一辺 10 mm の正方形



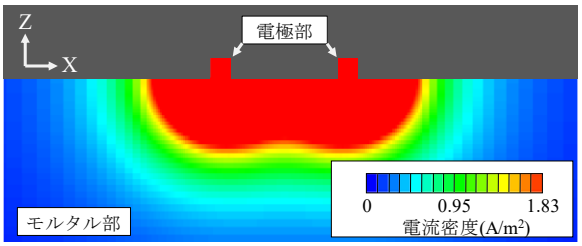
(b) 電極形状：一辺 50 mm の正方形
図－7　電極間距離 50 mm とした場合の電位分布

の長さと影響深さとの関係を図－6 に示す。図より，いずれのケースにおいても電極寸法が大きくなると影響深さは大きくなった。電極の縦幅を変化させた場合と横幅を変化させた場合に着目すると，縦幅を変化させた場合に比べて，横幅を変化させた場合が影響深さは大きくなった。この現象について，図－7 に示す電極の形状が一辺 10 mm および 50 mm の正方形の電位分布より考察する。図より，電位は電極部を中心に同心円状に分布する傾向がみられた。すなわち，電極の寸法が大きくなると等電位の円は大きくなり，より深い領域に電流が流れ，影響深さが大きくなったものと考えられる。

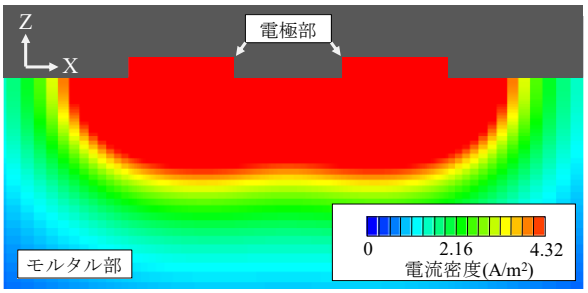
続いて，電極間距離が 10 mm の場合の各電極の長辺の長さと影響深さとの関係を図－8 に示す。図より，い



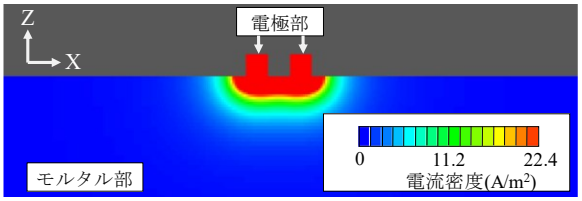
図－8　電極寸法と影響深さとの関係
(電極間距離：10 mm)



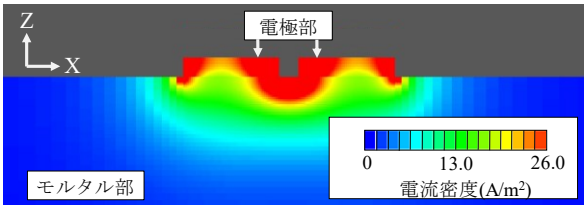
(a) 電極形状：一辺 10 mm の正方形



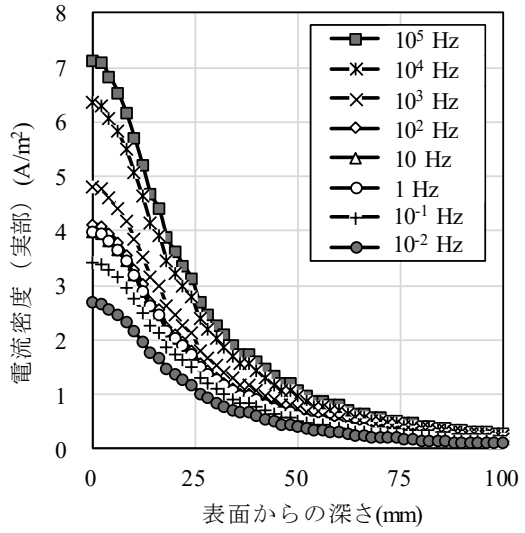
(b) 電極形状：一辺 50 mm の正方形
図－9　電極間距離 50 mm とした場合の電流密度分布



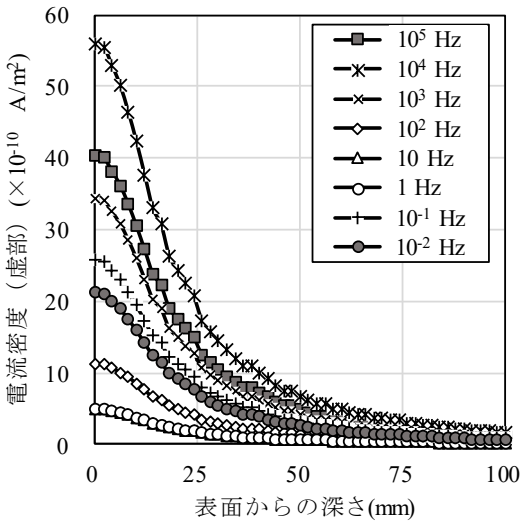
(a) 電極形状：一辺 10 mm の正方形



(b) 電極形状：一辺 50 mm の正方形
図－10　電極間距離 10 mm とした場合の電流密度分布

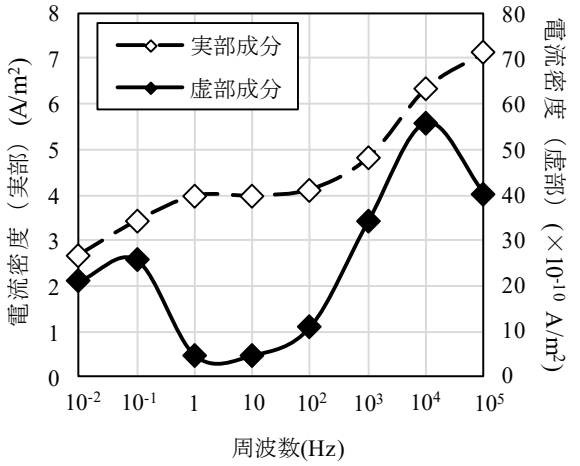


(a) 実部成分

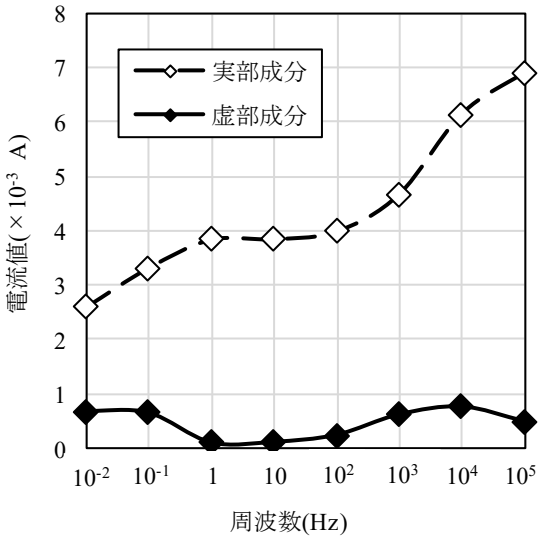


(b) 虚部成分

図－11　表面からの深さと電流密度との関係



図－12　モルタル表面での電流密度と周波数との関係



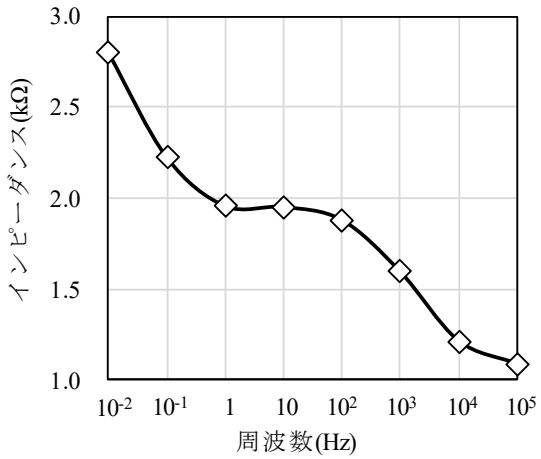
図－13　電極部を流れる電流値と周波数との関係

ずれの電極寸法においても，影響深さは概ね 10 mm であった。ここで，電極の形状を一辺 10 mm および 50 mm の正方形とし，電極の電極間距離を 50 mm とした場合の電流密度のコンター図を**図－9**, 電極の電極間距離を 10 mm とした場合の電流密度のコンター図を**図－10** に示す。なお，これらのコンターレベルは着目要素のモルタル表面における電流密度を自然対数の底で除した値を最大値とした。**図－9** より，電極間距離が 50 mm と大きい場合は, いずれの電極形状においても, 電流は電極の外側端部から内側端部にかけて電極部全体を流れている。**図－10** より，電極間距離が 10 mm と小さい場合は, 電極形状が一辺 10 mm の正方形であると，電流は電極部全体を流れている。一方，電極形状が一辺 50 mm の正方形であると，電流は電極の内側端部に偏って流れた。

以上より，電極間距離が小さい場合，電極寸法によらず電極の内側端部付近のモルタル部の領域に電流の大部分が流れるため，電極寸法が影響深さに与える影響が小さくなったと考えられる。さらに, **図－6** と**図－7** を比較すると, 電極間距離が小さい場合, 影響深さは小さくなった。すなわち，二電極法では，電極間距離が小さい場合，電極寸法によらず，表層部分の品質評価を行うことが出来る可能性が示唆された。

3.2 周波数に関する検討

周波数の検討にあたり，電流密度の実部成分と虚部成分を求めた。実部成分は入力された電圧と同じ位相で流れる電流である。一方，虚部成分は入力された電圧から-90°の位相のずれを持つ電流である。評価位置における各周波数での実部成分の電流密度分布と虚部成分の電流密度分布を**図－11** に示す。併せて，評価位置におけるモルタル表面での電流密度の実部成分および虚部成分を**図－12** に示す。**図－11** および**図－12** より，実部成分は低周波域から高周波域にかけて大きく



図－14　インピーダンスと周波数との関係

なった。一方，虚数成分は，1 Hz～10^2 Hz の周波数域においては小さく，その他の周波数域では大きくなり，実部成分とは異なる挙動を示した。ここで，1 Hz～10^2 Hz の周波数域に着目すると，実部成分および虚部成分において，周波数が電流密度に与える影響は，その他の周波数に比べ小さくなった。

ここで，**図－13** に電極部を流れる電流値と周波数との関係を示す。この図から，実部成分および虚部成分とも，値の変動傾向は**図－12** と概ね同様になることが確認された。また，**図－12** においてはモルタル中の電流密度の虚部成分は実部成分と比べてきわめて小さいものの，一方では，**図－13** からわかるように，電極部に流れる電流値の虚部成分と実部成分とは同じオーダーの値となっている。これらより，電流密度の虚部成分は二電極法により測定されるインピーダンスに影響を与えるものと考えられる。そこで，解析より得られたインピーダンスに着目し，インピーダンスと周波数との関係を**図－14** に示す。インピーダンスは，式(6)より算出した。

$$Z = \frac{V}{\sqrt{{I_{real}}^2 + {I_{im}}^2}} \tag{6}$$

ここで，Z : インピーダンス(Ω)，V : 電極上面上の節点電位(=30 V)，I_{real} : 電極部を流れる電流値（実部）を 2 倍した値(A)，I_{im} : 電極部を流れる電流値（虚部）を 2 倍した値(A)である。**図－14** より，インピーダンスは周波数が大きくなるにしたがって減少する傾向を示した。既往の研究[6]において，コンクリートのインピーダンスを測定する際，印加する周波数が 10 Hz～10^4 Hz の範囲でインピーダンスが安定することが確認されている。本解析でも，1 Hz～10^2 Hz の範囲では，インピーダンスは概ね同じ値を示していることから，既往の研究[6]と同様にインピーダンスが安定する周波数域が確認された。

以上より，実際の測定において，インピーダンスが安定する周波数領域では，周波数が電流値および電流密度分布に影響を与える影響は小さいと考えられる。

4. まとめ

本解析条件の範囲で得られた結論を以下にまとめる。

(1) 電極間距離が同じであれば，電極寸法が大きいほど，モルタル中の電流密度は大きくなる。

(2) 測定される電気抵抗に影響を与える表面からの深さは，電極間距離が 50 mm と大きい場合，電極寸法が大きくなるにしたがって深くなる。一方，電極間距離が 10 mm と小さい場合は，電極寸法によらず，影響深さは 10 mm 程度となる。

(3) 二電極法により測定されるインピーダンスに与える影響が小さいとされている周波数領域において，周波数が電流密度分布に与える影響は小さい。

謝辞

本研究を取りまとめるにあたり，大阪大学の服部晋一特任研究員および立命館大学の内田慎哉講師にご協力いただいた。また，電場解析（VOLT-jω）実施にあたり，小林篤史氏をはじめとする株式会社フォトンの方々に貴重な助言をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

1) 福上大貴，内田慎哉，鎌田敏郎，大橋正弥 : 二電極法により得られるモルタル供試体の電気抵抗に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，pp.1699-1704，2015.7

2) 野田一弘，河野広隆，久田　真，森濱和正 : 交流作用時の硬化コンクリートの電気的性質に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.575-580，2003.7

3) 福上大貴，内田慎哉，鎌田敏郎，服部晋一，工藤正智 : 二電極法におけるモルタル中の電流密度に関する解析的検討，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 16 巻，pp.329-334，2016.10

4) 橋本政哲 : 現場で生かす金属材料シリーズ ステンレス，丸善出版株式会社，pp.161-162，2011.5

5) 轟章 : CFRP 積層板の交流電流の表皮効果，日本複合材料学会誌，Vol.39，No.1，pp.10-15，2013.3

6) 川俣孝治，守屋進，内藤英晴，皆川　浩 : セメント系材料の電気抵抗率測定方法に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1107-1112，2004.7