

論文 電極の設置条件が4プローブ法による体積抵抗率の測定結果に及ぼす影響についての基礎的研究

皆川 浩^{*1}・齊藤 佑貴^{*2}・榎原 彩野^{*2}・久田 真^{*3}

要旨：4プローブ法は実構造物のコンクリートや断面修復材の体積抵抗率を測定する方法として有用であるが、材料の不均一性、測定方法、測定手順および供試体の寸法の影響などは必ずしも明確ではない。本研究では、電極の設置間隔や設置位置および供試体寸法によって構成される幾何学性が測定結果に及ぼす影響について、実験的および数値解析的な検討を行った。その結果、4プローブ法により体積抵抗率を正確に測定するには電極間隔に対して十分に大きな通電断面積を確保することが重要であること、電極間隔が小さすぎると測定結果のばらつきが大きくなり、測定結果も真値と比較して大きくなることなどが明らかとなった。

キーワード：体積抵抗率、4プローブ法、四電極法

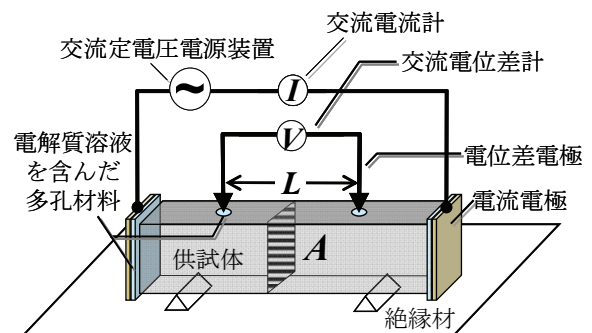
1. はじめに

断面修復材の体積抵抗率を供試体から測定する方法として、図-1に示す「四電極法による断面修復材の体積抵抗率測定方法(案)」(JSCE-K 562-2008)が土木学会規準として制定された¹⁾。同規準(案)には、四電極法はコンクリートに対しても準用できること、および、実構造物の断面修復材またはコンクリートの体積抵抗率の測定方法に関する記述もなされている。しかしながら、実構造物におけるコンクリートや断面修復材の体積抵抗率を同規準(案)により測定する場合は、試験方法の都合上コア試料を採取する必要がある、非破壊かつ多点の測定を目的とする調査には同規準(案)の適用は難しいのが現状である。

実構造物のコンクリートや断面修復材の体積抵抗率を非破壊かつ多点で測定する試験方法としては、図-2に示すように、等間隔に並んだ4つの電極を測定対象面に押し当て、外側の電流電極から交流電流を印加し、測定対象に流した交流電流と電位差電極間の電位差の測定値と評価式を用いて求める方法(以下、4プローブ法)がある。4プローブ法は測定方法が簡便であるため、種々の研究^{2), 3)}がなされ、実務においても広く使用されており、海外では測定方法に関する提言⁴⁾もなされている。しかしながら、材料の不均一性(骨材や含水率および塩化物イオンの分布状況、コンクリートや断面修復材中に存在する鋼材など)や測定方法(電極間隔など)、および測定手順(測定対象面の前処理など)が測定結果に及ぼす影響、および試験方法の検討に使用する供試体の寸法の影響などは必ずしも明確にはなっておらず、十分な信頼性を得るには至っていないのが現状である。

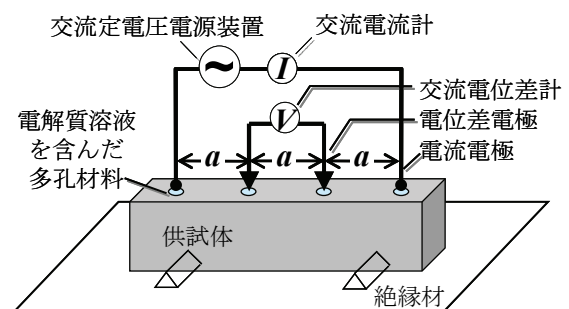
本研究では、本格的な4プローブ法に関する試験方法

の検討に先立ち、電極の設置間隔や設置位置および供試体寸法によって構成される幾何学性が測定結果に及ぼす影響について、実験的および数値解析による基礎的な検討を行った。



L: 電位差電極間の距離, A: 供試体の断面積

図-1 四電極法の概念図¹⁾



a: 電位差電極および電流電極間の距離

図-2 4プローブ法の概念図

*1 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻助教 博(工) (正会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*3 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻准教授 博(工) (正会員)

2. 実験概要

2.1 供試体の作製

本研究で使用した供試体は最大粗骨材寸法 20 mm、水セメント比 50 % のコンクリート供試体であり、寸法および形状は 150 x 150 x 530 mm の角柱体である。以下に供試体の作製方法を示す。

(1) 使用材料と配合

供試体の作製に使用したコンクリートの示方配合を表-1 に示す。セメントには普通ポルトランドセメントを、練混ぜ水には仙台市水道局の水道水を使用した。骨材には、細骨材として宮城県大和町産山砂（表乾密度：2.60 g/cm³，吸水率：2.05 %）を、粗骨材として宮城県丸森町産砕石（表乾密度：2.85 g/cm³，吸水率：0.98 %）を使用した。また、混和剤として AE 剤（アニオン系界面活性剤）を使用した。

表-1 コンクリートの示方配合

W/C (%)	$G_{\max}$ (mm)	Air (%)	単位量(kg/m ³)				
			W	C	S	G	Ad
50	20	4.5	175	350	699	1146	0.175

(2) コンクリートの打設および養生方法

練り上がったコンクリートを、内寸 150 x 150 x 530 mm および $\phi 100$ x 200 mm の鋼製型枠に打設した。打設の際、コンクリートは 2 層に分けて打ち込み、突き棒を用いて締め固めた。打設した供試体は、乾燥しないように濡れ簾をかけ、打設後約 1 時間で表面成形を行い、湿空中で約 24 時間保管した後に脱型した。脱型後の供試体は 20 °C 一定の恒温水槽にて水中養生を材齢 28 日まで行った。なお、150 x 150 x 530 mm の供試体は 4 プローブ法の検討に使用し、 $\phi 100$ x 200 mm の供試体は四電極法にて体積抵抗率を測定するために使用した。

2.2 体積抵抗率の測定方法

(1) 四電極法

$\phi 100$ x 200 mm の供試体の体積抵抗率は、「四電極法による断面修復材の体積抵抗率測定方法（案）」（JSCE-K 562-2008）¹⁾ に準拠して測定した。測定概念図を図-1 に示す。なお、四電極法による測定結果は供試体の寸法に依存しない⁵⁾ため、本研究ではこれを真の体積抵抗率として取り扱った。

(2) 4 プローブ法

150 x 150 x 530 mm の供試体に対しては、4 プローブ法により体積抵抗率を測定した。測定概念図を図-2 に示す。電流電極および電位差電極の設置面は供試体の側面とし、電圧 30 V、周波数 73.3 Hz の交流電流を印加し、その時に得られる電位差電極間の電圧と供試体に流れる電流を測定し、式(1)を用いて体積抵抗率を評価した。なお、式(1)は、一様な半無限体でかつ電極の接触点が無

限に小さい場合を想定して理論的に導出されるもの^{3), 4)}である。

$$\rho = 2\pi \cdot a \cdot \frac{V}{I} \quad (1)$$

ここに、 ρ ：体積抵抗率[Ω m]

a ：電極間の距離[m]

V ：電位差電極間の電位差[V]

I ：供試体に流れる電流[A]

電位差電極間の電位差は、1 mV 単位で、供試体に流れる電流は 1 μ A 単位で計測した。また、各電極の先端には電解質として 10 %NaCl 水溶液を含ませたスポンジを取り付けた。

2.3 実験の要因と水準

本研究で実施した実験の要因は、ケース I：電極の先端形状、ケース II：供試体端面から電極設置位置までの距離の比、ケース III：電極間隔と供試体高さの比、である。このうち、ケース I の水準は、Type-A： $\phi 1$ mm のステンレス管の内部にスポンジを設置、Type-B： $\phi 1$ mm のステンレス棒の先端にスポンジを設置、の 2 種類とした。また、図-3 に示すように、ケース II の水準については、電極間隔を 30 mm に固定し、供試体端面から電極設置位置までの距離を 15 水準ほど設定した。さらに、ケース III については、電極間隔を 10-80 mm に変化させることで、電極間隔について 8 水準の検討を行った。

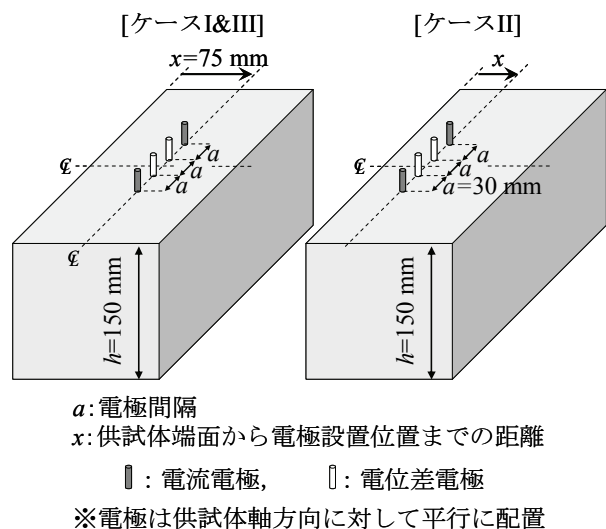


図-3 供試体寸法と電極の設置位置の関係

3. 数値解析の概要

本研究では実験的検討の他に、有限要素法を用いた数値解析による検討も併せて行った。数値解析は以下に示す条件の下、汎用 FEM ソフトウェア：COMSOL Multiphysics ver.3.4 を用いて実施した。

3.1 構成則

本研究では、以下の連続方程式を構成則として解析を行った。

$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla V - J^e) = 0 \quad (2)$$

ここに、 σ : 導電率 [$\Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$] = $1/\rho$

V : 電位

J^e : 外部で発生した電流密度

3.2 境界条件

コンクリート表面部分は絶縁壁とした。このため、コンクリート表面部分の電流密度は以下の式を満足する。

$$n \cdot J = 0 \quad (3)$$

ここに、 n : 絶縁壁の法線ベクトル

J : 電流密度

また、電流の流出入点となる電流電極の設置位置には点源を設け、式(4)に示すように、絶縁壁の法線ベクトルと同方向に任意の電流が流れることとした。

$$n \cdot J = n \cdot J_0 \quad (4)$$

ここに、 J_0 : 電流電極に入出流する電流密度

3.3 材料パラメータ

数値解析で使用する材料パラメータはコンクリートの体積抵抗率であり、本研究では全ての解析条件において $100 \Omega \text{ m}$ とした。

4. 結果と考察

4.1 電極形状による測定結果の安定性

図-4 に、電極が異なる場合の体積抵抗率比の経時変化の例を示す。図-4 中の体積抵抗率比はある時点での体積抵抗率と全測定結果の平均値との比である。

図-4 より、電極 Type-B の方が、体積抵抗率比の経時変化が大きいことがわかる。これは、Type-B では、電極先端の周囲に電解質保持材を設置したため、電極先端から供試体に電解質溶液が過剰に漏出したことや、電極先端と供試体間の接地面積が変化したことにより、経時変化が大きくなったためと考えられる。この結果より、4プローブ法により体積抵抗率を測定する際は、電極先端からの電解質溶液の漏出を局力抑え、かつ、接地面積が一定となるような電極の保持方法が必要であると考えられる。なお、以降の検討においては、電極の保持状態が測定結果に及ぼす影響を極力避けるために、Type-A の電極を使用した。

4.2 供試体端面と電極設置位置までの距離の影響

図-5 および図-6 に供試体端面と電極設置位置までの距離が体積抵抗率比に及ぼす影響について示す。なお、ここでの体積抵抗率比は、4プローブ法および四電極法により得られる体積抵抗率の比である。

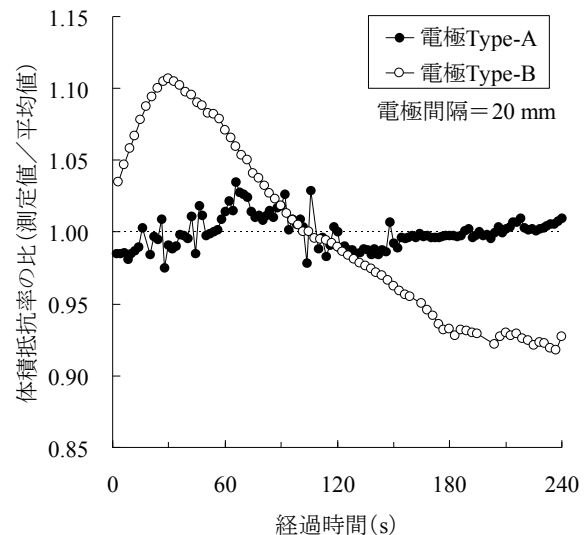


図-4 体積抵抗率比の経時変化の例

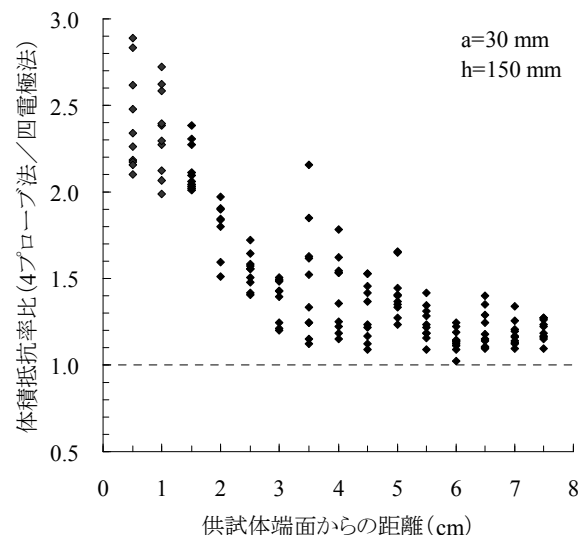


図-5 供試体端面から電極設置位置までの距離の影響 (実験値)

図-5 および図-6 より、電極の設置位置が供試体端面から離れるほど、4プローブ法による体積抵抗率の測定値が真値に近づくことがわかる。ここで、数値解析により、図-7 に示す位置で電位分布および電流密度分布を評価する。図-8 に印加電流を 0.001 A 、電極間隔を 30 mm とし、供試体端面と電極設置位置までの距離を変化させて得られた電位分布の数値解析結果を示す。図-8 より、同一電流を流すために必要となる電位差および電位差電極間の電位差が、電極の設置位置が供試体端面に近くなると大きくなることがわかる。図-9 には、図-8 の条件で通電された時の、通電電極間中央部の供試体断面を流れる電流密度の分布を示す。これより、電流が流れる領域が供試体端面によって制限され、多くの電流が供試体端面付近で流れていることがわかる。

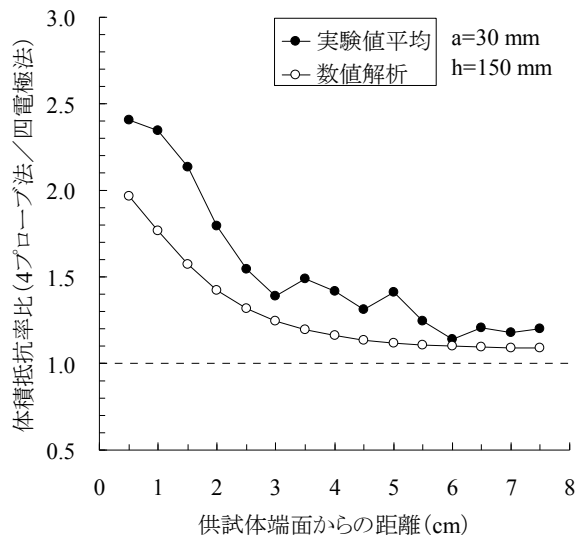


図-6 供試体端面から電極設置位置までの距離の影響
(実験値の平均値と数値解析値の比較)

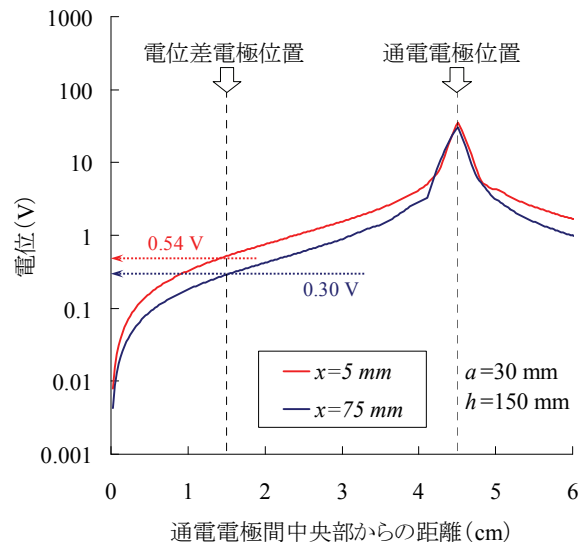


図-8 供試体端面から電極設置位置までの距離が電位分布に及ぼす影響 (数値解析値の比較)

← 電位分布図の横軸 (図-8, 図-12)
 ▨ 電流密度分布の評価断面 (図-9, 図-13)

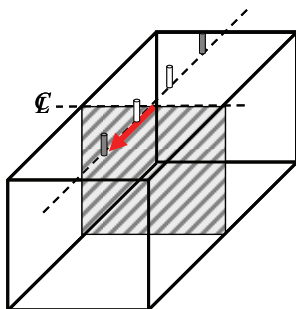


図-7 数値解析による電位および電流密度分布の評価位置

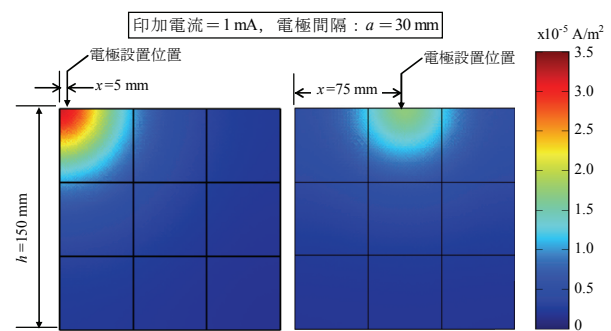


図-9 通電電極間中央部の供試体断面の電流密度分布
(数値解析値)

以上より、供試体端面に電極を設置すると、電流が流れる断面積が制限され、同一電流を流すために必要となる電位差が大きくなり、結果として4プローブ法により測定される体積抵抗率が大きくなると考えられる。このため、実構造物において4プローブ法により部材端部の体積抵抗率を測定する場合には、部材端部から電極を設置する位置までの距離について注意しなければならないと考えられる。

なお、図-6において、実験値と数値解析値との間にかい離が見られるが、これは骨材の有無による影響と考えられる。この骨材の影響については、4.3にて考察する。

4.3 電極間隔の影響

図-10 および図-11 に電極間隔が体積抵抗率比に及ぼす影響について示す。なお、ここでの体積抵抗率比は、4プローブ法および四電極法により得られる体積抵抗率の比である。

図-10 および図-11 より、電極間隔が 20 mm 以上の

範囲において、電極間隔が小さくなるにつれて体積抵抗率比は小さくなり、4プローブ法による体積抵抗率の測定値が真値に近づくことがわかる。一方、図-11 に示されるように、電極間隔が最も小さい $a=10$ mm では、実験値の体積抵抗率は真値よりも大きくなり、数値解析値はより真値に近づく結果となった。

ここで、図-10 を見ると、各電極間隔において4プローブ法により測定される体積抵抗率は、電極間隔が小さくなるほど、測定値のばらつきが大きくなる傾向をとることがわかる。また、図-11 より、電極間隔が小さくなるほど、体積抵抗率比は実験値の方が数値解析値よりも大きくなる傾向をとることがわかる。実験と数値解析の違いは、材料の不均一性の有無であり、特に骨材の存在が実験値のばらつきや実験値と数値解析値の違いを発生させたものと考えられる。4プローブ法では、電位は通電点を中心として同心円状に分布するという前提のもとに体積抵抗率を算出する。従って、コンクリート中

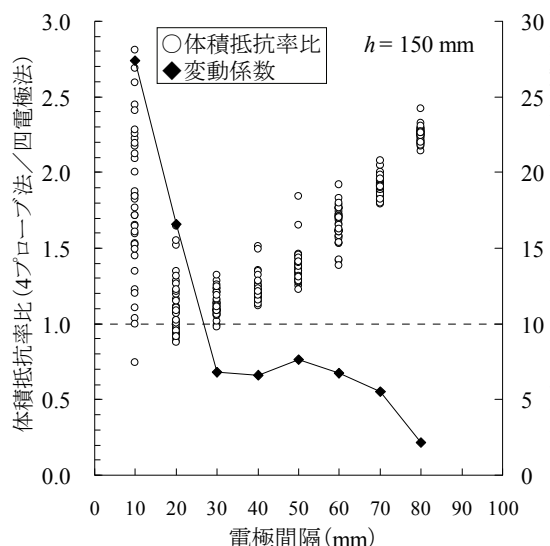


図-10 電極間隔の影響（実験値）

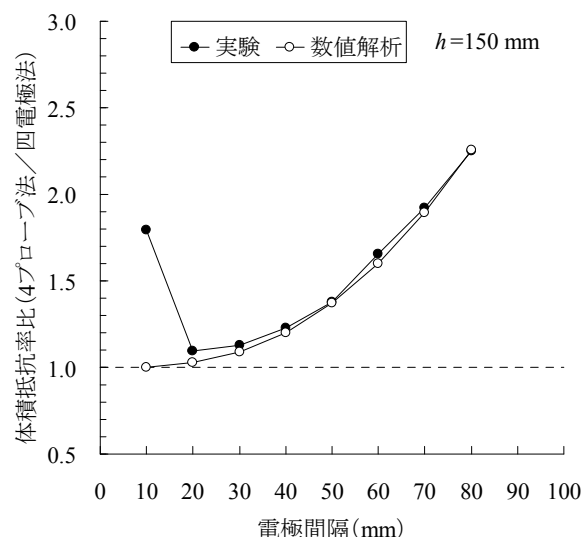


図-11 電極間隔の影響（実験値と数値解析値の比較）

の実際の電位分布の形状が理想的な電位分布の形状に近づくほど、測定値は最確値に近づくと考えられる。骨材が存在する部分では電流および電位分布が局所的に屈曲し、理想的な分布からかい離する。骨材寸法と比較して電極間隔が狭くなると、この局所的に屈曲した電位分布を評価してしまい、測定結果にばらつきが生じたり、体積抵抗率が過大評価されるといった現象が発生するものと考えられる。

このような骨材の影響を無視して考えると、一般的には電極間隔が小さいほど、4プローブ法による測定結果は真値に近づくものと考えられる。このような傾向は、電極間隔による影響というよりは、電極間隔と供試体の寸法の相対比によるもの^{2),3)}と考えられる。

ここで、4プローブ法による通電電流を0.001 A、電極間隔を20 mmとし、供試体の高さを変化させて得られた、電位分布の数値解析結果を図-12に示す。なお、この数値解析においては、供試体の高さの影響のみを検討する目的で、供試体の幅と軸方向長さは、それぞれ150 mmと500 mmに固定した。図-12より、同一電流を流すために必要となる電位差および電位差電極間の電位差は、供試体高さが小さくなると大きくなることがわかる。図-13には、図-12の条件で通電された時の、通電電極間中央部の供試体断面を流れる電流の分布を示す。これより、電流が流れる領域が、供試体断面積の減少により制限され、分布形状も断面の影響を受けて歪んでいることがわかる。

以上より、電極間隔と比較して供試体の高さが小さいと、電流が流れる断面積が制限され、同一電流を流すために必要となる電位差が大きくなり、結果として4プローブ法により測定される体積抵抗率が大きくなると考えられる。このため、実構造物において4プローブ法に

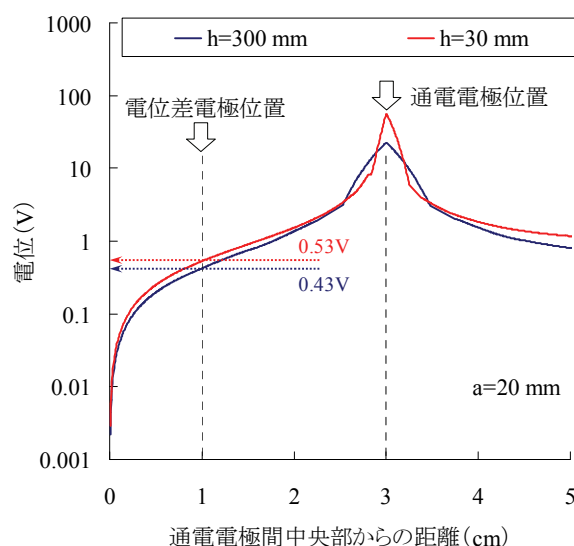


図-12 供試体高さが電位分布に及ぼす影響（数値解析結果）

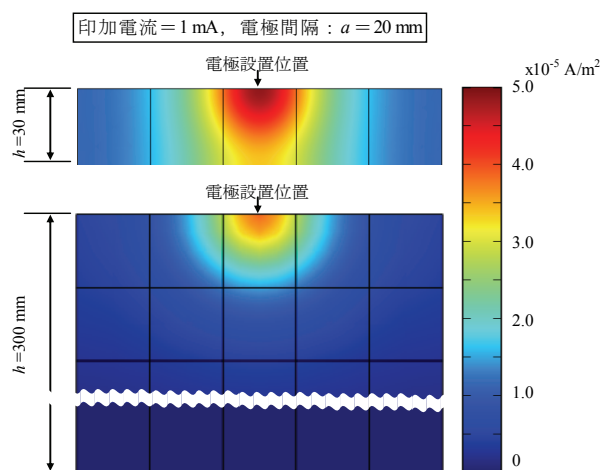


図-13 通電電極間中央部の供試体断面間を流れる電流の分布（数値解析値）

より体積抵抗率を測定する場合には、部材厚さに応じて電極間隔を適切に選定するか、測定値に対して補正をする必要があると考えられる。また、4プローブ法によりコンクリート供試体の体積抵抗率を評価する場合は、電極間隔と供試体寸法を考慮して、適切な補正係数を導入することが必要であると考えられる。

5. 結論

本研究では、4プローブ法の電極の設置間隔や設置位置および供試体寸法によって構成される幾何学性が体積抵抗率の測定結果に及ぼす影響について、実験的および数値解析的な検討を行った。本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 供試体端面付近に電極を設置すると、電流が流れる断面積が制限され、同一電流を流すために必要となる電位差が大きくなり、結果として4プローブ法により測定される体積抵抗率が大きくなる。このため、実構造物において4プローブ法により部材端部の体積抵抗率を測定する場合には、部材端部から電極を設置する位置までの距離について注意しなければならない。
- (2) 電極間隔と比較して供試体の高さが小さいと、電流が流れる断面積が制限され、同一電流を流すために必要となる電位差が大きくなり、結果として4プローブ法により測定される体積抵抗率が大きくなる。このため、実構造物において4プローブ法により体積抵抗率を測定する場合には、部材厚さに応じて電極間隔を適切に選定するか、測定値に対して補正をする必要がある。また、4プローブ法によりコンクリート供試体の体積抵抗率を評価する場合は、電極間隔と供試体寸法を考慮して、適切な補正係数を導入することが必要である。
- (3) 4プローブ法により測定される体積抵抗率は、電極間隔が小さくなるほど、測定値のばらつきが大きくなり、測定値の平均値は数値解析結果からかい離する。これは、骨材が存在する部分では電流および電位分布が局所的に理想的な分布からかい離し、骨材寸法と比較して電極間隔が狭くなると、この局所的な分布を計測してしまうためと考えられる。

- (4) 4プローブ法に使用する電極は、電極先端からの電解質溶液の漏出を局力抑え、かつ、接地面積が一定となるような電極形状および保持方法が必要である。なお、本研究では、部材端部からの距離や部材厚さといった幾何学形状が測定値に及ぼす影響の原因について実験的および数値解析的な検討を行った。今後は本研究の成果を発展させ、補正係数や幾何学形状の影響を回避する測定方法についての検討を行う予定である。

謝辞

本研究の遂行にあたり、三井造船(株) 井上浩男氏、江澤一明氏、酒井正和氏、ドーピー建設工業(株) 市川聖芳氏、および元ドーピー建設工業(株) 安森浩氏、濱田譲氏にご協力を賜りました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会・規準関連小委員会：土木学会規準「四電極法による断面修復材の体積抵抗率測定方法(案)(JSCE-K 562-2008)」の制定，土木学会論文集 E，Vol.64 No.3，pp.427-434，2008
- 2) 古賀裕久，河野広隆，渡辺博志，田中良樹：コンクリートの電気抵抗による耐久性評価に関する基礎的研究，鉄筋コンクリート構造物の計測と表面探傷シンポジウム講演論文集，pp.89-94，2001.1
- 3) K. R. Gowers and S. G. Millard: Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion Severity of Steel Using Wenner Technique, ACI Materials Journal/ Sep.-Oct. 1999, Title no. 96-M66, pp.536-541, 1999
- 4) R. Polder, C. Andrade, B. Elsener, Ø. Vennesland, J. Gulikers, R. Weidert and M. Raupach: RILEM TC 154-EMC: Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion, 'Test methods for on site measurement of resistivity of concrete', Materials and Structures, Vol. 33, pp. 603-611, 2000. 12
- 5) 守屋進，川俣孝治，内藤英晴，皆川浩：セメント系断面修復材の電気抵抗率測定方法に関する検討，土木技術資料，Vol. 49, No. 7, pp. 64-69, 2007.7.