

# 論文 けい酸塩系表面含浸材の塗布が非破壊試験による電気抵抗率の測定結果に及ぼす影響

西谷朋晃\*1・矢野貴行\*2・皆川浩\*3・久田真\*4

**要旨:** けい酸塩系表面含浸材の品質管理方法として、非破壊試験による電気抵抗率の測定方法が検討されているが、含浸材の塗布が電気抵抗率の測定結果に及ぼす影響について検討した例は少ない。本研究では、4プローブ法により表面含浸材を塗布したモルタル供試体の見掛けの電気抵抗率を評価した。その結果、電極間隔が広がると見掛けの電気抵抗率が大きくなる傾向が得られ、この傾向は電極間隔に対する供試体の寸法効果と同時に、含浸材を含浸させることでモルタル内部の電気抵抗率が階層的に変化することに起因すると推察された。

**キーワード:** けい酸塩系表面含浸材, 電気抵抗率, 四電極法, 4プローブ法

## 1. はじめに

建設材料として様々な材料が使用されている中、コンクリートは欠かすことが出来ない主要な材料であり、現在に至るまで多くの土木構造物に使用されてきた。しかしながら、1980年代以降、我が国ではコンクリート構造物の早期劣化および耐久性が大きな社会問題として採り上げられ、劣化機構や耐久性向上のための研究が鋭意なされてきた。

近年、数多くの補修材料や工法が、コンクリート構造物の劣化抑制、耐久性向上の観点から提案されている。その手法の一つとして、表面含浸材を塗布することによってコンクリートの表層部を改質し、劣化因子の侵入を抑制する効果を狙った表面含浸工法がある。ここで用いられる表面含浸材は、材料が比較的安価であること、コンクリート表層部に塗布するだけの簡単な施工方法であること、無色透明の液体であるため構造物の外観保持に優れていることなどから、実構造物に数多く使用されており、今後もその適用数はさらに増加すると予想される。しかし、けい酸塩系表面含浸材（以下、含浸材と称す）の改質特性上、適切な施工管理や竣工検査は困難であり、施工現場における含浸材の品質管理方法の確立が課題となっている。

近年、含浸材を塗布することでセメント硬化体の電気抵抗率が変化することが指摘されており、この現象を利用した含浸材の品質管理方法の検討<sup>1)</sup>が進められている。これは、電気抵抗率がセメント硬化体の空隙構造を間接的に評価できる指標であるためである。特に、実構造物のコンクリートや断面修復材の電気抵抗率を非破壊かつ多点で測定する方法として、図-1に示すような4プローブ法がある。4プローブ法は測定方法が簡便かつ即時

的であるため、種々の研究<sup>2)</sup>がなされ、実務においても広く用いられている。しかし、電極間隔や供試体寸法によって構成される幾何学性および供試体表面の電解質溶液の厚さなどが測定結果に影響を及ぼす<sup>3,4)</sup>ことが指摘されており、これらの要因が含浸材を含浸させたセメント硬化体に与える影響について検討した例は少ない。

以上の背景から、本研究では、まず、板状のモルタル供試体を用いて四電極法により含浸材がモルタルの電気抵抗率に及ぼす影響について基礎的評価を実施した。そのうえで、角柱のモルタル供試体を用いて4プローブ法において電極間隔を変化させて見掛けの電気抵抗率を測定し、含浸材を含浸させたモルタルの電気抵抗率と4プローブ法による電極間隔の変化の関係を検討した。また、含浸材が含浸した際のセメント硬化体内部を水平成層構造であるとみなしたモデルを作製し、FEMを用いた数値解析により含浸材の塗布が電気抵抗率の測定結果に及ぼす影響について考察した。

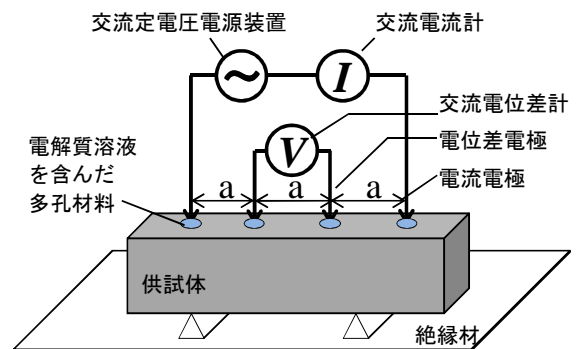


図-1 4プローブ法の概念図

\*1 東北大学 工学部土木工学科 (学生会員)

\*2 東北大学 工学部土木工学科 (非会員)

\*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)

\*4 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻教授 博(工) (正会員)

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体の作製

#### (1) 使用材料および配合

モルタルの配合は表-1に示すように、W/C=50%とし、結合材に研究用普通ポルトランドセメント（密度：3.16 g/cm<sup>3</sup>，比表面積：3310 cm<sup>2</sup>/g），細骨材に JIS R 5201 に規定されるセメント強さ試験用標準砂（密度：2.64 g/cm<sup>3</sup>，吸水率：0.42 %）を使用した。含浸材は表-2 に示す 4 種類を使用した。

#### (2) 供試体の作製および養生

作製した供試体の概要を図-2 に示す。モルタル供試体の形状は 10×40×80 mm の板状および 150×150×150 mm の角柱の 2 種類とし、JIS R 5201 に準拠して打設した。養生は、JSCE K 571 に準拠し、打設後、24 時間静置した後に脱型し、20 °C の水中で 6 日間養生した。その後、温度 23 °C，相対湿度 50 % の恒温恒湿槽で 28 日間養生し、試験用基板とした。150×150×150 mm の角柱供試体は、図-2 に示すように、試験面である切断面およびその対面を除く 4 面をエポキシでシールした。

#### (3) 含浸材塗布およびその後の養生

表-2 に試験用基板への含浸塗布方法および塗布量を示す。10×40×80 mm の板状供試体は、供試体に均一に含浸材を含浸させるため、各種含浸材を満たしたビーカーに供試体を入れ、真空ポンプとデシケータを用いて 0.1Mpa の減圧環境下にて 24 時間脱気し、供試体に含浸材を強制的に含浸させた。150×150×150 mm の角柱供試体は、メーカーの定める仕様により、含浸面を清浄にした後、いずれも 1 回あたり 120 g/m<sup>2</sup> の塗布量を 2 回に分けて刷毛塗りで行った。なお、原状供試体として、含浸材の代わりに蒸留水を含浸させた Blank 供試体も併せて作製した。含浸材を含浸させた後、板状供試体は養生湿度を R.H.90 %，封緘および R.H.50 % の 3 水準を設け、それぞれ恒温恒湿槽に静置した。角柱供試体は、相対湿度 50 % の恒温恒湿槽に 14 日間静置した。なお、養生温度はいずれも 23 °C で一定とした。

### 2.2 測定項目

#### (1) 四電極法による電気抵抗率

四電極法の測定概念図を図-3 に示す。養生が終了した 10×40×80 mm の板状供試体を用いて、均質試料の評価に適した四電極法により供試体の単位体積あたりの電気抵抗率を測定した。供試体の両端（10×40 mm の側面）に設置した電流電極に電圧 30 V，周波数 73.3 Hz の交流電流を印加し、点接触させた電位差電極間の電位差  $E_t$  を測定した。なお、電位差電極間の距離  $L_t$  は 30 mm とし、電気抵抗率  $\rho$  は式(1)を用いて算出した。

$$\rho = \frac{E_t \cdot A_t}{I_t \cdot L_t} \quad (1)$$

表-1 モルタルの配合表

結合材	W / C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )		
		W	C	S
研究用 OPC	50	256	512	1536

表-2 含浸材の組成および塗布方法

含浸材	比重	塗布方法				塗布後の散水
		板状供試体	角柱供試体			
		脱気処理による	1回あたりの塗布量 (g/m <sup>2</sup> )	塗布方法	塗布回数 (回)	
Li+K(9-1)	1.2	強制含浸	120	刷毛塗り	2	なし
Li+K(1-1)		0.1MPa				なし
Li+Na		24時間				あり
Na+K						あり

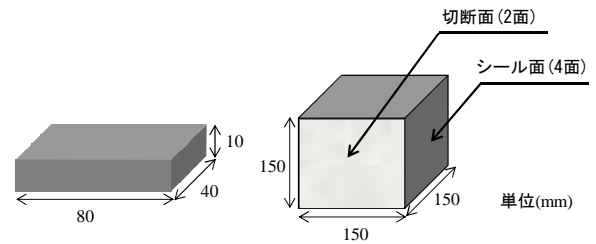


図-2 供試体の概要

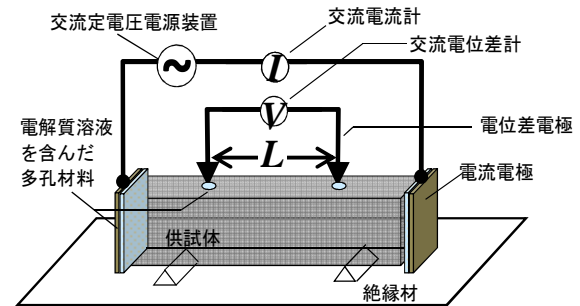


図-3 四電極法の概念図

ここで、 $\rho$ ：電気抵抗率 ( $\Omega$  m)， $E_t$ ：電位差電極間の電位差 (V)， $I_t$ ：供試体に流れる電流 (A)， $A_t$ ：供試体の断面積 ( $m^2$ )， $L_t$ ：電位差電極間の距離 (m)である。一つの供試体につき 6 点測定した値の平均値を測定値とした。また、各電極の先端には電解質として塩化ナトリウムとカルボキシメチルセルロースを水溶させたゲル状物質を含ませたスポンジを取り付けて測定を行った。電気抵抗率の測定は、各養生湿度における塗布材齢 0，7，14 日について行った。さらに、養生湿度による養生直後の含水率の影響を排除するために、電気抵抗率測定後、純水を封入したデシケータおよび真空ポンプを用いて 1 日間脱気し、供試体を飽水状態に調節した上で再度電気抵抗率を測定した。

#### (2) 4 プローブ法による電気抵抗率

4 プローブ法の測定概念図を図-1 に示す。150×150×150 mm の角柱供試体については、実構造物の非破壊試験による評価に適した 4 プローブ法により見掛けの電気抵抗率を式(2)により評価した。印加した交流電流は、四

電極法と同様である。

$$\rho_{ap} = 2\pi \cdot a \cdot \frac{V}{I} \quad (2)$$

ここで、 $\rho_{ap}$ ：見掛けの電気抵抗率( $\Omega \cdot m$ )、 $a$ ：電極間の距離(m)、 $V$ ：電位差電極間の電位差(V)、 $I$ ：電流(A)である。電極間隔を 30、40 mm と変化させて測定を行い、それぞれ 3 点で測定した値の平均値を測定値とした。また、各電極の先端には四電極法で用いたものと同様の電解質および電解質保持材を使用して測定を行った。

### (3) 空隙率および相対含水率

電気抵抗率の測定後の板状供試体を用い、重量差法によって供試体の空隙率および相対含水率を測定した。式(3)および式(4)に供試体の空隙率および相対含水率の算定式を示す。

$$\varepsilon = \frac{(W_2 - W_1) / \rho_w}{(W_2 - W_3) / \rho_w} \times 100 \quad (3)$$

$$w = \frac{(W_2 - W_1) - (W_2 - W_4)}{(W_2 - W_1)} \quad (4)$$

ここで、 $\varepsilon$ ：空隙率(%)、 $W_1$ ：絶乾状態における試料の気中質量(g)、 $W_2$ ：表乾状態における試料の気中質量(g)、 $W_3$ ：表乾状態における試料の水中質量(g)、 $\rho_w$ ：水の密度( $g/cm^3$ )、 $w$ ：容積基準質量含水率、 $W_4$ ：測定時における試料の気中質量(g)である。

## 3. 数値解析の概要

本研究では実験的検討に加え、有限要素法を用いた数値解析による検討も行った。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 を用いて行った。

### 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。

$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla V - J^e) = 0 \quad (5)$$

ここで、 $\sigma$ ：導電率[ $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ ]= $1/\rho$

$V$ ：電位

$J^e$ ：外部で発生した電流密度

### 3.2 境界条件

モルタル表面部分は絶縁壁とした。このため、モルタル表面部分の電流密度は以下の式を満足する。

$$n \cdot J = 0 \quad (6)$$

ここで、 $n$ ：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  $\phi 4$  mm の円源を設け、式(7)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。

$$n \cdot J = n \cdot J_0 \quad (7)$$

ここで、 $J_0$ ：電流電極に入出力する電流密度である。

## 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モルタルの電気抵抗率であり、以下の 4.1 で測定された値を参考に設定した。

## 4. 結果と考察

### 4.1 四電極法による電気抵抗率

#### (1) 含浸材の塗布材齢の影響

図-4 に、養生ごとの養生直後および飽水処理後の塗布材齢による電気抵抗率の経時変化を示す。全体的な傾向として、いずれの養生においても塗布材齢 0~7 日では電気抵抗率は大きく増加し、塗布材齢 7 日以降ではその増加傾向は緩やかになった。

養生直後の電気抵抗率を見ると、R.H.90%養生と封緘養生では含浸材を用いない Blank 供試体よりも含浸材を塗布した方が電気抵抗率は増加する傾向になった。しかし、比較的乾燥環境下での養生条件となる R.H.50%養生では、必ずしも前述のような傾向は見取れなかった。

一方、飽水処理後の電気抵抗率を見ると、R.H.90%養生では Blank 供試体よりも含浸材を塗布した方が電気抵抗率は高くなったが、封緘養生や R.H.50%養生ではそのような傾向は見出だし難かった。

以上より、含浸材の塗布によるモルタルの電気抵抗率の変化傾向は養生条件によって異なると考えられる。

#### (2) 塗布後の養生湿度の影響

図-5 に塗布材齢 14 日における電気抵抗率と相対含水率の関係を示す。含水率と電気抵抗率の値には高い相関性が見られ、含水率が低い供試体ほど電気抵抗率は大きい値を示している。この結果は、既往の知見<sup>5)</sup>とも一致し、含浸材を含浸させたセメント硬化体においても電気抵抗率は母材の含水状態に強く支配される可能性が高いと考えられる。

#### (3) 含浸材の種類による影響の評価

図-6 に塗布材齢 14 日における電気抵抗率比の関係を示す。ここで、電気抵抗率比は各種含浸材を含浸させた供試体の電気抵抗率を Blank 供試体の電気抵抗率で除した値である。R.H.90%および封緘養生の供試体については、電気抵抗率比は大きい傾向が見られた。これは、湿潤環境下では乾燥による含水率の低下の影響よりも、含浸材によって形成される C-S-H ゲルによる緻密化の影響<sup>6)</sup>によって電気抵抗率が大きくなったと考えられる。一方、R.H.50%養生の供試体については、電気抵抗率比が小さい傾向が見られた。これは、乾燥環境下では含浸材によって形成された多孔質のゲル間隙によって供試体内部の自由水が保持され、Blank 供試体と比較して水分の逸散が抑制されたためと考えられる。

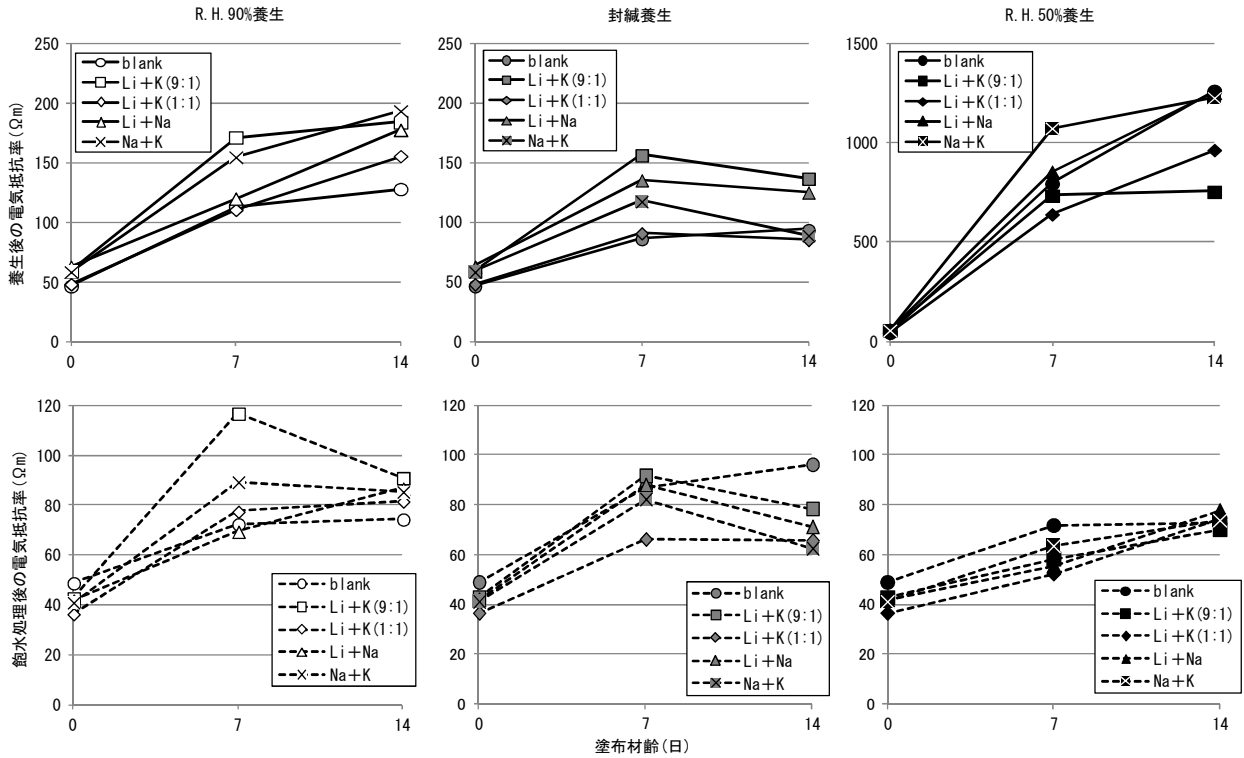


図-4 電気抵抗率の経時変化

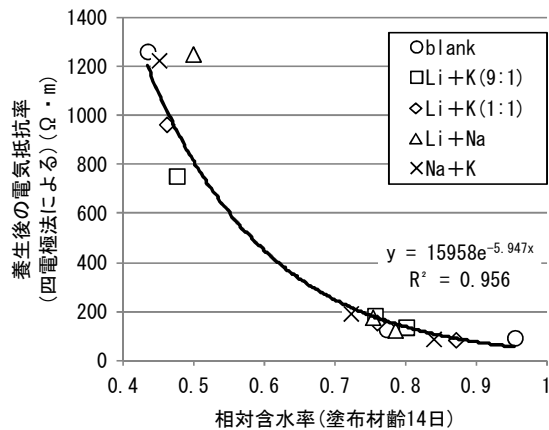


図-5 電気抵抗率と相対含水率の関係

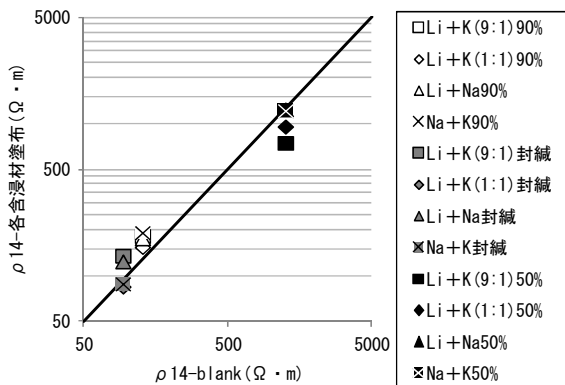


図-6 電気抵抗率比

#### 4. 2. 4 プローブ法による電気抵抗率

##### (1) 電極間隔による影響

図-7 に電極間隔を変化させて測定した場合の電気抵抗率を示す。いずれも電極間隔を大きくすると電気抵抗率の値は大きくなるが、その変化程度は特に Li 系および Li+K 系で顕著に現れる。ここで、4 プローブ法において電極間隔と供試体の寸法の相対比が電気抵抗率の値に影響を与えることが知られており<sup>3)</sup>、電極間隔を大きくしたことで供試体断面を流れる電流が制限され、測定値に影響を与えたと考えられる。この影響程度を確認するため、測定に用いた供試体と同様の 150 × 150 × 150 mm のモデルを作製し、電極間隔を 30 mm および 40 mm としたときの電気抵抗率の値を FEM 数値解析によってそれぞれ比較した。ここで、材料パラメータとしてモルタルの電気抵抗率を 100 Ω m とした。表-3 に得られた解析の結果を示す。電気抵抗率に及ぼす電極間隔の変化による供試体寸法の影響程度を算出した結果、電極間隔を 30 mm から 40 mm に変化することで電気抵抗率の値は 1.23 倍大きく測定される結果となった。

ここで、図-8 に電極間隔が見掛けの電気抵抗率に及ぼす影響について示す。図中の斜線は横軸の値に 1.23 を乗じた値の集合を示す。blank, Li+Na 系および Na+K 系については図中の斜線付近に分布しているため、実測値において電極間隔を大きくしたときの電気抵抗率が電極間隔が小さいときの電気抵抗率に比べて大きいのは供試

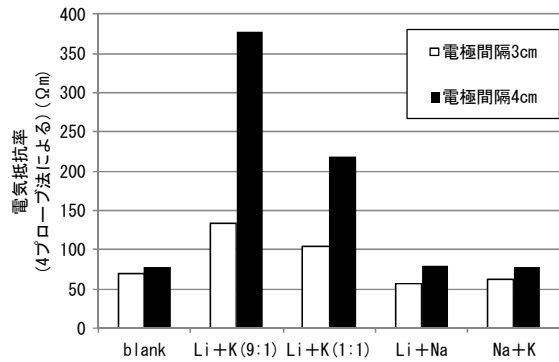


図-7 4プローブ法による電気抵抗率

表-3 解析結果

電極間隔	電流	電極間電圧	電気抵抗率
m	A	V	Ωm
0.03	1.23E-03	7.59E-01	1.16E+02
0.04	1.21E-03	6.87E-01	1.42E+02

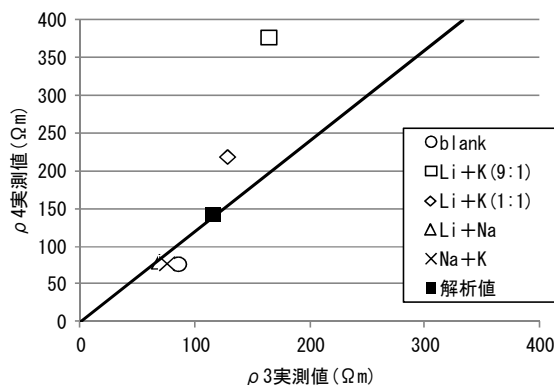


図-8 電極間隔が見掛けの電気抵抗率に及ぼす影響

体の寸法による影響が主因であると考えられる。一方で、Li系およびLi+K系に関しては図中の斜線からかい離しており、供試体の寸法による影響のみで見掛けの電気抵抗率の変化を説明することは困難である。そこで、含浸材が含浸した際のセメント硬化体内部を水平成層構造であるとみなした階層モデルを作製し、FEMを用いた数値解析によって、この現象に関して以下に示すような考察を行った。

### (2) 階層モデルを用いた考察

以下では、供試体寸法による影響を除くため、600×600×400 mmのモデルにて数値解析を行った。本研究では、モデルの作製にあたりいくつかの仮定を設けた。「表面含浸材の試験方法(案) (JSCE-K571)によると、けい酸塩系表面含浸材はその改質特性上、含浸深さを測定する手法が確立されていない。ここで、含浸材の浸透深さは塗布するセメント硬化体のW/Cや含浸材の種類によって異

表-4 各層における電気抵抗率の設定値

	層厚 (m)	電気抵抗率(Ωm)	
1層目	0.015	blank	93.9
		Li+K(9:1)	137
		Li+K(1:1)	85.6
		Li+Na	125
		Na+K	89.2
2層目	0.035	1260	
3層目	0.35	93.9	

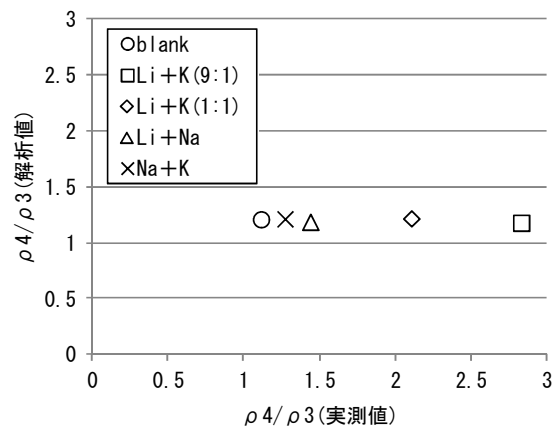


図-9 電気抵抗率比(解析値と実測値)

なることが指摘されており<sup>7)</sup>、本研究では本実験で作製した供試体と同様のW/C=50%のモルタルの含浸深さをイオンクロマトグラフにより測定した論文<sup>8)</sup>を参考に、含浸深さを1.5 cmとした。また、乾燥環境下でのセメント硬化体内部における含水率の分布については、乾燥開始とともに乾燥面に近い部分から含水率が低下し、おおむね乾燥面から5cm程度が水分状態の変化に影響を受けやすく、逆にそれ以上深部での含水状態は変化し難いとされている<sup>9)</sup>。これらの知見をもとに、含浸材が含浸したモルタルを階層構造とみなしたモデルを作製した。

設定した各層の電気抵抗率を表-4に示す。ここでの電気抵抗率は、4.1で測定された値を参考に各層の乾燥状態を仮定して設定した。すなわち、1層目の含浸層は封緘、塗布材齢14日における各含浸材を含浸させた値、2層目の乾燥層はR.H.50%、塗布材齢14日におけるBlank供試体の値、3層目の湿潤層は封緘、塗布材齢14日におけるBlank供試体の値をそれぞれ用いた。

図-9に解析値と実測値の電気抵抗率比の関係を示す。解析の結果、電極間隔を30 mmから40 mmに変化させた場合、電気抵抗率の値は1.2倍程度大きくなることが明らかとなった。これは、含浸材を含浸させたセメント硬化体を階層構造とみなしてモデル化することで、含浸材の塗布が電気抵抗率の測定結果に与える影響を推察す

ることができる可能性があることを示唆している。しかし、得られた解析値と実測値には乖離が見られ、含浸材の種類による違いの説明も困難である。そのため、今後は含浸深さおよび深さ方向の含水率分布を明確にしたいうえで、詳細に考察を進める必要がある。

## 5. まとめ

本研究では、薄型のモルタル供試体を用いて四電極法により含浸材がモルタルの電気抵抗率に及ぼす影響に関する基礎的評価、含浸材を含ませたモルタルの電気抵抗率が電気抵抗率の非破壊試験方法である4プローブ法による見掛けの電気抵抗率の測定結果に及ぼす影響について検討した。以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

- (1) 含浸材の塗布によるモルタルの電気抵抗率の変化傾向は含浸材塗布後の供試体の養生条件によって異なる。すなわち、R.H.90%および封緘養生のような比較的湿潤環境下での養生であると電気抵抗率は無塗布の場合よりも大きくなり、R.H.50%養生のような乾燥環境下の養生では無塗布の場合と比較して明確な電気抵抗率の違いは確認されなかった。
- (2) 含浸材を含ませたモルタル供試体の電気抵抗率は供試体中の含水状態に強く支配される。
- (3) 4プローブ法により表面含浸材を塗布したモルタル供試体の見掛けの電気抵抗率を評価した結果、電極間隔30mmよりも40mmの方が見掛けの電気抵抗率が大きくなった。これは、電極間隔に対する供試体の寸法効果と同時に、含浸材を含ませることでモルタル内部の電気抵抗率が階層的に変化するためと推察された。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、(株)エバープロテクト高島達行氏に試験材料を提供して頂きました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 阿川清隆, 宮里心一, 伊藤哲男, 出口宗浩: 表面含浸材の遮塩性・遮水性評価に対する電気抵抗試験方法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 2011
- 2) 榎原彩野: 電気抵抗率に基づくコンクリートの物質透過性評価に及ぼすイオン濃度と含水状態の影響, 東北大学修士論文, 2010,2
- 3) 皆川浩, 斎藤佑貴, 榎原彩野, 久田真: 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, コンクリート工学年次論文集 Vol.31, No.1, pp. 1087-1092, 2009
- 4) Gowers, K., R., and Millard, S., G.: 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
- 5) 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研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp. 1107-1112, 2004.7
- 6) 土木学会: コンクリートライブラリ「けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針(案)」, 2012
- 7) 櫛原弘貴, 武若耕司, 松元淳一, 前田聡: ケイ酸質系表面含浸材の浸透深さと浸透域でのコンクリート品質改善に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, 2007
- 8) 白澤直, 櫛原弘貴, 武若耕司, 山口明伸: ケイ酸質系表面含浸材の浸透特性に関する検討, 土木学会第63回年次学術講演会, pp. 711-712, 2008.9
- 9) 大即信明, 久田真, 大谷隆之, 丸山俊夫: 電気泳動実験によるモルタル中の塩化物イオン拡散係数計, 土木学会論文集, V-39, No.592, pp. 97-105, 1998.5