

# 論文 乾燥により生じた含水率分布が4プローブ法により計測されるコンクリートの電気抵抗率に及ぼす影響

皆川 浩<sup>\*1</sup>・矢野貴行<sup>\*2</sup>・久田真<sup>\*3</sup>

**要旨:** コンクリートの電気抵抗率は電気化学的防食工法の設計や塩害に関する耐久性評価において重要な物性値であり、非破壊試験方法としては4プローブ法が知られている。本研究では、乾燥作用を受けて変化するコンクリート中の含水率分布が4プローブ法による電気抵抗率の計測値に及ぼす影響を検討した。その結果、含水率分布を有するコンクリートでは電気抵抗率の計測値は電極間隔によって変化すること、電気抵抗率の計測値は表面部分の電気抵抗率ではなく、ある深度領域の電気抵抗率と相関性が高くなる可能性があることを明らかにした。

**キーワード:** 電気抵抗率, 4プローブ法, 四電極法, 含水率

## 1. はじめに

電気防食工法などの電気化学的防食工法では、鉄筋に流入する防食電流をできるだけ均一に分布させるように陽極を配置する必要がある。したがって、電気化学的防食工法の設計段階において防食電流分布を予測することが望ましいとされてきた。近年、計算機の性能が著しく向上し、有限要素法などの数値解析的な手法が電気化学的防食工法の設計に取り入れられつつある。

数値解析的な手法により防食電流分布を予測する場合、入力パラメータとしてコンクリートの電気抵抗率が必要であり、予測結果の信頼性は電気抵抗率の設定値に影響を受ける可能性がある。そのため、事前調査においてコンクリートの電気抵抗率を適切に計測しておくことが望ましい。

一方、既往の委員会報告書<sup>1)</sup>によれば、電気抵抗率はコンクリートの緻密性や塩化物イオン拡散係数と相関があることが記載されており、コンクリートの電気抵抗率に関する研究は数多くなされている。このように、電気抵抗率は塩害に関する耐久性を評価する指標としても注目されている。

既設構造物のコンクリートの電気抵抗率を非破壊試験で計測する方法としては図-1に示す4プローブ法(Wennre法、四探針法などとも呼ばれる)が知られている。4プローブ法では、電気抵抗率は式(1)を用いて算出される。

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

ここに、 $\rho_{ap}$ : 4プローブ法により得られる見かけの電気抵抗率 ( $\Omega \text{m}$ )、 $a$ : 電極間隔 (m)、 $V$ : 電位差電極間の

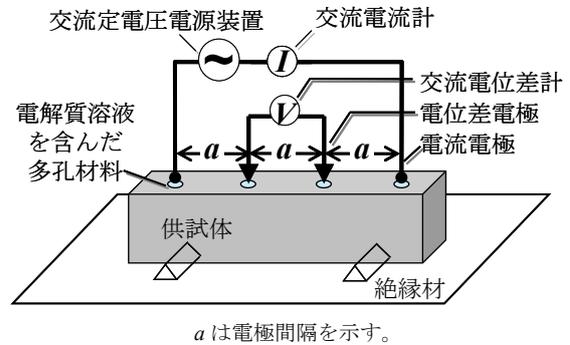


図-1 4プローブ法の概念図

電圧 ( $V$ )、 $I$ : 印可電流 ( $A$ ) である。式(1)は、一様な半無限体でかつ電極へ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たもの<sup>2)</sup>である。コンクリートの電気抵抗率は含水状態に影響を受ける<sup>3)</sup>ことを考慮すると、内部の含水状態が著しく不均一なコンクリートでは、その含水率に応じて電気抵抗率はある分布をとることになる。したがって、含水状態が著しく不均一なコンクリートの電気抵抗率を4プローブ法ならびに式(1)により計測した場合、その計測値が有する特性を理解しておくことが必要である。

既往の研究<sup>2)</sup>において、含水率分布が4プローブ法により得られる電気抵抗率の計測値に及ぼす影響は検討されてはいるが、その検討は影響の程度の評価にとどまっておき、計測値が有する特性についてまでは言及がなされていない。そこで本研究では、深さ方向の含水率分布を変化させたコンクリート供試体に対して、4プローブ法により得られる電気抵抗率、含水率分布を計測するとともに、電気抵抗率と含水率の関係からコンクリート内

\*1 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 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

\*3 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)

部の電気抵抗率の分布を予測し、その結果と4プローブ法により得られる電気抵抗率を比較することで、4プローブ法により得られる電気抵抗率の計測値が有する特性について議論することを目的とした。

なお、本研究では、4プローブ法により得られる電気抵抗率を見かけの電気抵抗率と称し、均質材料の電気抵抗率と区別することとした。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体の概要

#### (1) 4プローブ法計測用コンクリート供試体

4プローブ法計測用コンクリート供試体（以下、コンクリート供試体と称す）は打込み・脱型後に養生および暴露条件を変化させてコンクリート内部の含水状態を変化させたうえで、4プローブ法により見かけの電気抵抗率を計測するために用いる。また、見かけの電気抵抗率を計測後、後述の方法にて含水率状態を評価するためにも用いる。

コンクリート供試体の示方配合を表-1に示す。セメントは普通ポルトランドセメント（密度：3.15 g/cm<sup>3</sup>、比表面積3 290 cm<sup>2</sup>/g）を、練混ぜ水には仙台市水道局の水道水を使用した。細骨材および粗骨材は宮城県黒川郡の洗い砂（表乾密度：2.63 g/cm<sup>3</sup>、吸水率：1.8%、粗粒率：2.67）、宮城県伊具郡丸森町の砕石（表乾密度：2.83 g/cm<sup>3</sup>、吸水率：1.26%）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。

コンクリート供試体は材齢1日目脱型後、表-2に示すような養生および暴露を実施した。なお表-2にはコンクリート供試体の番号も記述している。コンクリート供試体の寸法は400×400×250 mmであり、400×400 mmの1面を暴露面とするために、表-2に示す養生終了後にエポキシ樹脂にて残りの5面をシールした。

表-1 コンクリートの示方配合

W/C (%)	G <sub>max</sub> (mm)	Air (%)	Slump (cm)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
				W	C	S	G	Ad
55	20	5.0	7.5	166	302	773	1090	0.943

表-2 供試体の養生及び暴露条件

供試体番号	養生条件	暴露条件
C-W-W	水中, 28日	水中, 28日
C-W-A60	水中, 28日	気中, 28日, R.H.(60±5)%
C-W-A30	水中, 28日	気中, 28日, R.H.(30±5)%
C-S-A30	封緘, 28日	気中, 28日, R.H.(30±5)%

養生・暴露ともに温度は20℃である。

#### (2) 電気抵抗率と含水率の関係把握用試験片

本研究ではコンクリートの電気抵抗率の含水率依存性を評価するために、含水率を調整した扁平な試験片を用い、四電極法によってその電気抵抗率を計測した。そして、同じ試験片を用いて後述する方法にて相対含水率を測定し、電気抵抗率と含水率の関係を把握した。

試験片はコンクリートおよびモルタルにて作製した。コンクリート試験片は表-1と同配合のφ100×200 mmの円柱供試体から採取した。採取時期は表-2の水中養生終了後であり、円柱供試体をおよそ4×8×1.5 cmに湿式コンクリートカッターにて切断して試験片を成型した。試験片は相対湿度をおおよそ30%、60%、80%、100%に調湿した箱体内、および、水中にそれぞれ2体ずつ28日間静置し、湿潤状態から乾燥状態に移行させるような環境条件（乾燥過程）にて含水率を調整した。

一方、モルタル試験片はW/C=50%、S/C=3.0の40×40×160 mmの角柱供試体から採取した。採取時期は温度20℃の91日間水中養生終了後であり、おおよそ縦横2.5×5 cm、厚さ1 cm、2 cm、3 cmに湿式コンクリートカッターにて切断して試験片を成型した。試験片は相対湿度をおおよそ35%、70%に調湿した箱体内に静置し、湿潤状態から乾燥状態に移行させるような環境条件（乾燥過程）にて含水率を調整し、適宜箱体内から試験片を取り出して試験に供した。また、試験片を40℃の恒温槽にて1日毎の質量変化が2%以下になるまで乾燥させた後、十分に湿らせた布を湿布することで、乾燥状態から湿潤状態に移行させるような環境条件（吸水過程）にて含水率を調整して試験に供する水準も設けた。

### 2.2 測定項目

#### (1) 4プローブ法による見かけの電気抵抗率

コンクリート供試体の見かけの電気抵抗率を図-1に示す4プローブ法により測定した。電圧30 V、周波数73.3 Hzの交流電流を印可し、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)を用いて見かけの電気抵抗率を評価した。電気抵抗率の計測は計測点を1 cm程度ずらしながら5回計測し、それらの平均値を計測値とした。電極の直径は4 mmであり、電極の先端には電解質としてゲル状物質（水：塩：カルボキシメチルセルローズ=94：3：3）を浸透させた導電性スポンジを取り付けた。電極間隔は3 cm、4 cm、5 cmである。

#### (2) 四電極法

コンクリートおよびモルタル試験片の電気抵抗率を「四電極法による断面修復材の体積抵抗率測定方法(案)」（JSCC-K562-2008）に準拠して測定した。ただし、電位差電極間の距離は30 mmである。

#### (3) 相対含水率

本研究では含水率を評価するために式(2)で定義され

る相対含水率を測定した。

$$w = \frac{(W_2 - W_1) - (W_2 - W_3)}{W_2 - W_1} \quad (2)$$

ここで、 $w$ ：相対含水率、 $W_1$ ：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)、 $W_3$ ：測定時における試料の気中質量 (g) である。試料は  $W_3$  測定後に真空脱気装置にて飽水処理を施し、ウェスにて表面に付着した水分を拭き取って  $W_2$  を測定した。その後、試料を 105 °C の恒温槽に静置して絶乾状態に調整し、 $W_1$  を測定した。

試料の採取方法は、コンクリート供試体においては、乾式ビットで採取したコア試料を深さ方向に約 10 mm 間隔で乾式マイクロカッタにて切断することで実施した。コンクリートおよびモルタル試験片については、試験片そのものを試料として用いた。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 見かけの電気抵抗率と相対含水率

図-2 に 4 プローブ法により計測した見かけの電気抵抗率と電極間隔の関係を示す。図-2 より、電極間隔が広がるほど、見かけの電気抵抗率が小さく評価されることがわかる。既往の研究<sup>2), 4)</sup>によれば、コンクリートが均質である場合、供試体の寸法に対して 4 プローブ法の電極間隔が相対的に広がると、計測される見かけの電気抵抗率は大きく評価される。しかし、本研究の供試体では真逆の傾向となり、コンクリート供試体が乾燥作用の強い環境に暴露されるほど、その傾向は顕著になった。既往の研究<sup>2), 4)</sup>の結果と本研究で使用したコンクリート供試体の寸法および電極間隔を比較すると、本研究の計測結果に供試体寸法の影響は生じ難いと判断される。従って、本研究で得られた見かけの電気抵抗率の電極間隔依存性はコンクリート供試体内部の含水状態によるものと考えられる。

ここで図-3 に、コンクリート供試体中の相対含水率の分布を示す。図-3 中において、プロット点は実測値を示しており、実線および破線は式(3)でプロット点を fitting した結果を示している。

$$w = (w_0 - w_d) \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right\} + w_d \quad (3)$$

ここで、 $w_0$ ：表面相対含水率、 $x$ ：位置、 $D$ ：相対含水率の見かけの拡散係数、乾燥期間、 $w_d$ ：表面からの距離 6 ~ 8 cm 部分で測定された相対含水率の平均値である。

図-3 より、相対含水率は乾燥作用により表層部ほど低くなっていること、また、深部における相対含水率も乾燥作用が強い養生・暴露条件ほど低くなっていることがわかる。なお、水中養生・水中暴露をした C-W-W 供試体においても含水率の分布が生じているが、これは見

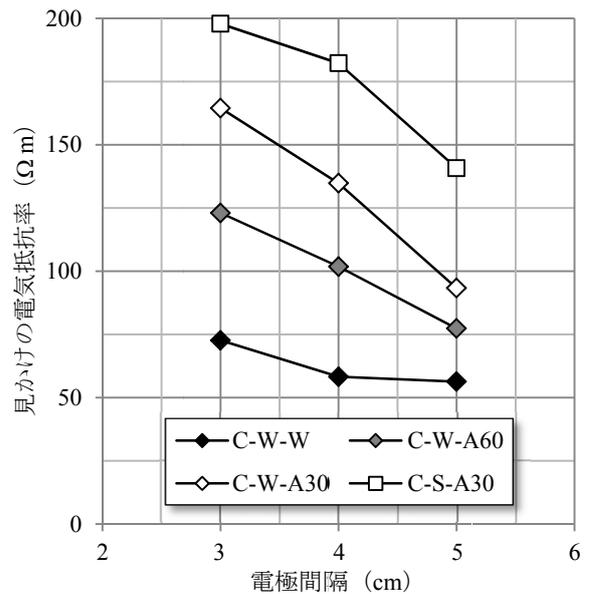


図-2 4 プローブ法により計測した見かけの電気抵抗率と電極間隔の関係

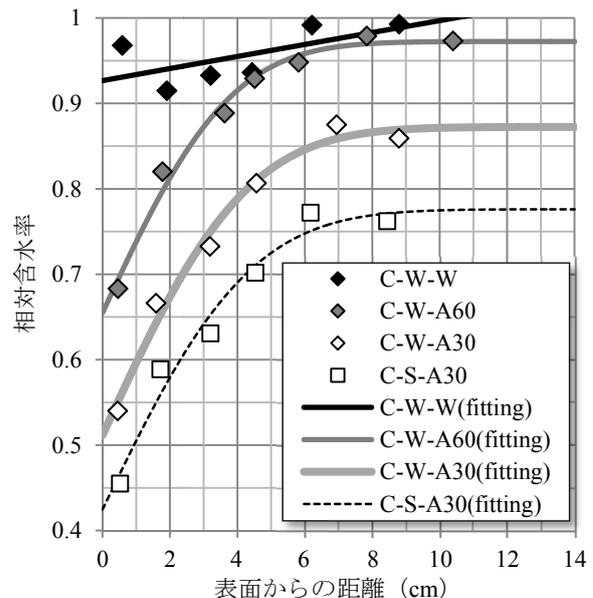


図-3 コンクリート中の相対含水率の分布

かけの電気抵抗率の計測および相対含水率測定用の試料採取の期間中に表層部の水分が逸散したために生じたものと考えられる。図-3 の相対含水率の分布傾向と図-2 の結果を比較すると、相対含水率の分布が緩やかな C-W-W 供試体では、見かけの電気抵抗率の電極間隔依存性は小さいが、乾燥作用を受けて表層部の相対含水率の分布が急こう配になると電気抵抗率の電極間隔依存性が強くなることが認められる。このことから、4 プローブ法により計測される見かけの電気抵抗率はコンクリート内部の平均的な含水率だけでなく含水率の分布にも影響

を受けることがわかる。

### 3.2 コンクリート供試体中の電気抵抗率の分布の推定

#### (1) 推定の目的

3.1 節において、4プローブ法により計測される見かけの電気抵抗率はコンクリート中の含水率分布の影響を受けることを示した。一方で、電気抵抗率は含水率に依存して変化することが既往の研究<sup>5)</sup>により指摘されている。このことは、乾燥作用を受けてコンクリート内部に含水率分布が生じると、それに伴って電気抵抗率にも分布が生じることを示唆するものである。したがって、4プローブ法により測定される見かけの電気抵抗率をコンクリートの物性値として使用する場合、その見かけの電気抵抗率がコンクリート中に生じている電気抵抗率の分布とどのような関係があるのかを明確にしておく必要がある。

そこで本研究では、図-3の相対含水率の分布から電気抵抗率の分布を推定し、その結果と見かけの電気抵抗率を比較することを試みる。本節では電気抵抗率の分布の推定方法と推定結果について述べる。

#### (2) 推定方法の概要

まず、2.1(2)において説明した試験片を用いた実験結果から電気抵抗率と相対含水率の関係式を構築する。そして、その関係式を式(3)に代入することで、電気抵抗率の分布を推定する。そのため、この関係式は相対含水率が均質である試験片にて得られる実験値を用いて構築される必要がある。

#### (3) 電気抵抗率比と相対含水率の関係式

図-4に電気抵抗率比と相対含水率の関係を示す。ここで電気抵抗率比とは、任意の相対含水率の電気抵抗率と相対含水率 $w=1$ において測定した電気抵抗率の比である。本研究で用いた試験片は種々の試験片どうしは勿論のこと、コンクリート供試体と材料・材齢・暴露条件が異ならざるを得ないことから、電気抵抗率と相対含水率の関係を正規化する目的で電気抵抗率比を評価に用いた。

図-4より、電気抵抗率を正規化した電気抵抗率比は相対含水率と相関性が高いことがわかる。また、その相関性は試験片が乾燥作用あるいは吸水作用を受けることによって変化していることがわかる。乾燥作用および吸水作用によって相関性が変化する理由としては、試験片内部の含水率分布の違いが考えられ、既往の研究<sup>5)</sup>でも報告されている。本研究では、試験片内部の含水率をできるだけ一様にする目的で薄片の試験片を用いたが、含水率の不均一性の影響を排除できなかったものと考えられる。

そこで本研究では、乾燥作用および吸水作用についてそれぞれ電気抵抗率比と相対含水率の回帰式を求め、それらの回帰式の中点を含水状態が一様である試験片の電気抵抗率比と仮定することで、式(4)を電気抵抗率比と相

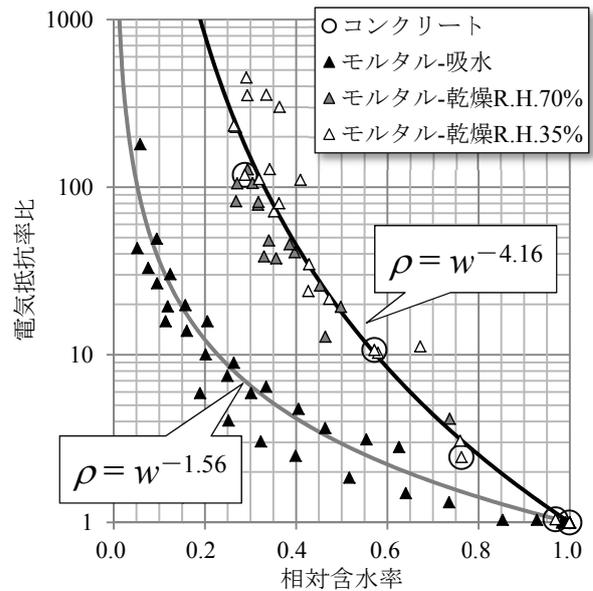


図-4 電気抵抗率比（四電極法）と相対含水率の関係

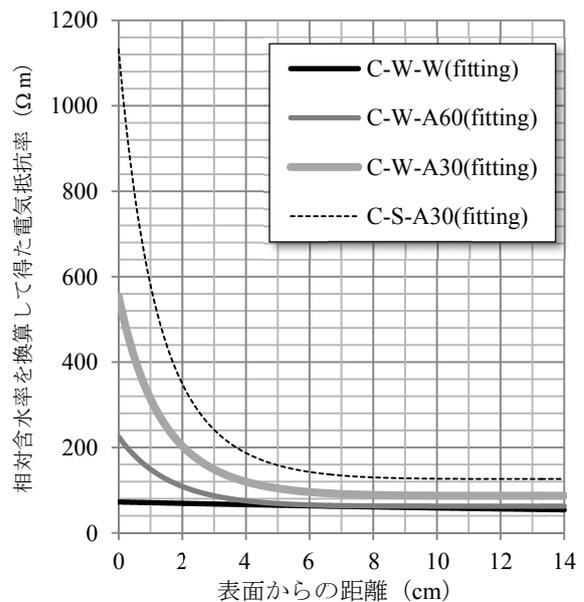


図-5 相対含水率から換算した電気抵抗率の分布

対含水率の関係式とした。

$$\alpha(w) = (w^{-1.56} + w^{-4.16}) / 2 \quad (4)$$

ここで、 $\alpha(w)$ : 相対含水率が $w$ のときの電気抵抗率比である。この電気抵抗率比 $\alpha(w)$ に相対含水率 $w=1$ の電気抵抗率 $\rho_1$ を乗じることで、任意の材料の電気抵抗率と相対含水率の関係を評価できる。

$$\rho(w) = \rho_1 \cdot \alpha(w) = \rho_1 \cdot (w^{-1.56} + w^{-4.16}) / 2 \quad (5)$$

なお、本研究では、寸法および含水率分布の影響を受けていないと考えられる C-W-W 供試体において電極間隔 4 cm および 5 cm で測定した見かけの電気抵抗率を $\rho_1$ として用いた。

#### (4) 電気抵抗率の分布の推定結果

図-5 に式(3)で fitting した相対含水率の分布と式(5)を用いて推定した電気抵抗率の分布を示す。図-5 より、乾燥作用を受けたコンクリートでは、表面近傍の電気抵抗率は見かけの電気抵抗率よりもはるかに大きい値をとり得るという推定結果になった。また、見かけの電気抵抗率と同等の電気抵抗率となる表面からの深さは1~7 cm 程度の領域にあることもわかる。

#### 3.3 見かけの電気抵抗率の特性に関する考察

##### (1) 考察の目的と評価方法

3.2 節において推定した電気抵抗率の分布（図-5）と4プローブ法により計測される見かけの電気抵抗率（図-2）を比較すると、表面近傍の電気抵抗率は見かけの電気抵抗率よりもはるかに大きくなること、見かけの電気抵抗率と同等の電気抵抗率は深さ1~7 cm 程度に存在することがわかる。本節では見かけの電気抵抗率とコンクリート内部の含水率分布に起因する電気抵抗率の分布の関係について考察することとした。

考察のために用いた評価指標は次に定義される「一致深度」および「相加平均との一致深度」であり、これらの評価指標と電極間隔の関係を考察した。

##### 一致深度：

図-5 中の電気抵抗率が4プローブ法により計測される見かけの電気抵抗率と等しい位置のコンクリート表面からの深さ。

##### 相加平均との一致深度：

図-5 中の電気抵抗率の分布 $\rho(x)$ から任意位置 $x_a$ での電気抵抗率の相加平均 $\rho_{ave}(x_a)$ を算出し、4プローブ法により計測される見かけの電気抵抗率と $\rho_{ave}(x_a)$ が等しくなる位置のコンクリート表面からの深さ。 $\rho_{ave}(x_a)$ は式(6)から算出される。

$$\rho_{ave}(x_a) = \frac{\int_0^{x_a} \rho(x) dx}{x_a} \quad (6)$$

##### (2) 4プローブ法の測定領域に関する考察

図-6 に一致深度と電極間隔の関係を、図-7 に相加平均との一致深度と電極間隔の関係をそれぞれ示す。なお、C-W-W 供試体については、相対含水率がほぼ一様であると見なせたため、これらの図に計算結果は記載していない。理論的には電気抵抗率が一様であれば、電極間隔に関わらず、一致深度と相加平均との一致深度は0 cm となる。

図-6 より、一致深度は概ね電極間隔 $a \pm 1.5$  cm 付近に存在することがわかる。また、一致深度は乾燥作用を強く受けたコンクリートほど大きくなることわかる。このことは、4プローブ法により計測した見かけの電気抵抗率の特性を解釈する上での目安になると考えられる

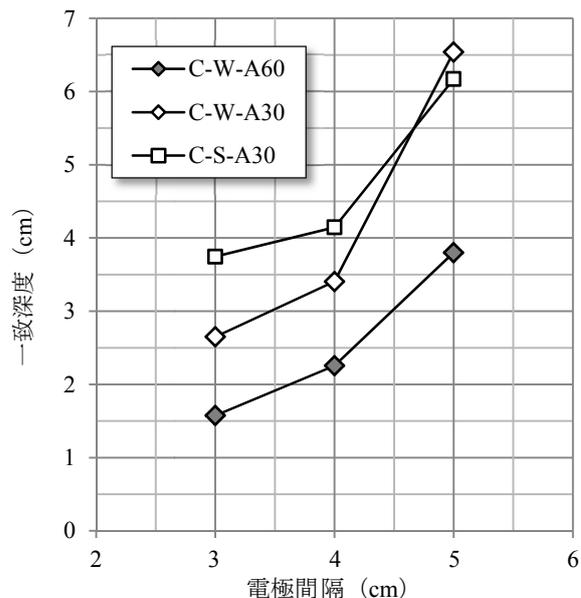


図-6 一致深度と電極間隔の関係

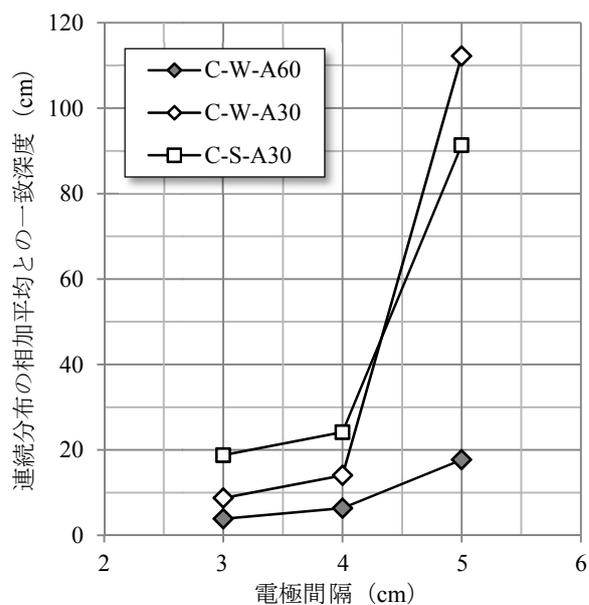


図-7 相加平均との一致深度と電極間隔の関係

が、含水率分布は常に表面部分が低くなっているとは限らない。したがって、一致深度の具体的な数値については、引き続き様々な含水率分布を設定して検討する必要がある。

一方、図-7 より、相加平均の一致深度は前述の一致深度と同様に、電極間隔が広がるほど、乾燥作用を強く受けるほど大きくなることわかる。しかし、相加平均の一致深度は一致深度と比較して非常に大きく、電極間隔5 cm においてはコンクリート供試体の寸法より大きくなることわかる。これは、コンクリート表面近傍の電気抵抗率が深部よりも極めて大きくなっているため

であり、4プローブ法により得られる見かけの電気抵抗率の値は表面からある深さまでの電気抵抗率を相加平均的に平準化したものではないことを示唆するものである。

一般に、電流は電気抵抗率の低い領域に多く流れる。乾燥作用を受けたコンクリートの場合、4プローブ法によるコンクリートへの電流・電圧の印加方法、ならびに、含水率・電気抵抗率の分布を考慮すると、電流は主として乾燥して電気抵抗率が高くなっているごく表面よりもある程度の深度を流れていると見なせる。したがって、4プローブ法により計測される乾燥作用を受けたコンクリートの見かけの電気抵抗率の値は、表面近傍の電気抵抗率や表面からある深度までの電気抵抗率の平均値ではなく、ある深度領域の電気抵抗率と相関性が高い数値と見なせると考えられる。

## 5. 結論

本研究にて得られた結論を以下に示す。

- (1) 乾燥作用を受けて深さ方向に含水率分布が生じたコンクリートにおいて、4プローブ法により計測した見かけの電気抵抗率は電極間隔によって変化する。これは含水率が不均一になることによって電気抵抗率に空間的分布が発生することに起因する。
- (2) 本研究の範囲では、コンクリート中に分布する電気抵抗率の値が4プローブ法により計測した見かけの電気抵抗率と一致する深さは電極間隔 $a \pm 1.5$  cm付近に存在した。また、この深さは乾燥作用を強く受けたコンクリートほど大きくなる。
- (3) 乾燥作用を受けたコンクリートにおいて、4プローブ法により計測される見かけの電気抵抗率の値は、表面近傍の電気抵抗率や表面からある深度までの

電気抵抗率の平均値ではなく、ある深度領域の電気抵抗率と相関性が高い数値と見なせる。

## 謝辞

本研究は科学研究費補助金・基盤研究(C) (課題番号: 22560459) の助成を受けて実施したものです。実験の遂行に際しては三井造船(株)ならびにドーピー建設工業(株)にご助力いただきました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 土木学会: 構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会 (JSCE335 委員会) 第二期成果報告書およびシンポジウム講演概要集, コンクリート技術シリーズ, No.97, 2012.7
- 2) K.R.Gowers and S.G.Millard: Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion Severity of Steel using Wenner Technique, ACI Material Journal/ Sep.-Oct. 1999, Title no. 96-M66, pp. 536-541, 1999.
- 3) M. Saleem, M. Shameem, S. E. Hussain and M. Maslehuddin: Effect of moisture, chloride and sulphate contamination on the electrical resistivity of Poltland cement concrete, Construction and Building Materials, Vol. 10, No.3, pp.209-214, 1996.
- 4) 皆川浩, 齊藤佑貴, 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, 2009.7
- 5) 細田喜子, 村田康一, 菊池順, 関博: コンクリートの比抵抗と含水量に関する実験的研究, セメント技術大会講演要旨, Vol.60, pp.312-313, 2006.5