

論文 低水セメント比のコンクリートに生じた微細ひび割れが4プローブ法による電気抵抗率の測定結果に及ぼす影響

矢野 貴行^{*1}・皆川 浩^{*2}・宮本 慎太郎^{*3}・久田 真^{*4}

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電気抵抗率を非破壊で得る手法として注目されている。本研究では、乾燥の進行により表面に微細ひび割れが生じたコンクリート供試体に対して、測定の前処理方法や電極形状を変化させながら4プローブ法による電気抵抗率の測定を行った。その結果、低水セメント比のコンクリートで液状水の浸潤が極めて少ない場合には、コンクリート表面に給水することで微細ひび割れによる測定結果のばらつきを低減できることを示した。また、電流電極の形状を矩形とすることで散水を実施せずとも微細ひび割れが測定結果のばらつきに及ぼす影響を低減できることを示した。

キーワード：電気抵抗率、4プローブ法、電極形状、相対含水率、微細ひび割れ

1. はじめに

断面修復材の電気抵抗率を供試体から測定する手法として、「四電極法による断面修復材の体積抵抗率測定方法(案)」が土木学会規準として制定¹⁾された。同規準(案)には、四電極法はコンクリートに対しても適応が可能であることが記述されている。しかし、実構造物のコンクリートの電気抵抗率を四電極法により測定する場合にはコア採取の必要がある。そのため、多点にて測定を行うのが困難となっている。

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にて多点で測定する手法としては、図-1に示すように、4つの等間隔に並んだ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内側の電位差電極にて測定される電位差から評価式を用いて算出する方法(以下4プローブ法)がある。コンクリートの電気抵抗率に関して数多くの研究^{2),3),4)}が報告されている。それらの研究の中でも、表層のマイクロクラックが生じている場合、測定結果に影響を及ぼす可能性があり、その程度はコンクリートの含水状態によって変化することが考えられる、との報告⁴⁾がある。

本研究では、屋外に曝露された低水セメント比のコンクリートに生じた微細ひび割れに着目し、測定方法(測定の前処理方法や電極形状)を変えながら電気抵抗率を測定し、供試体の乾燥やひび割れの有無が電気抵抗率の測定結果の変動に及ぼす影響を検討した。

本研究で使用した供試体の配筋図を図-2に示す。測定にあたり図-3のように、鉛直方向の測定位置をA～E、水平方向の測定位置を1～6とゾーニングした。寸法および形状は300×1000×1000 mmの角柱コンクリート供試体および直径100×200 mmの円柱供試体である。早強セメントで作製したW/C=39%、最大粗骨材寸法20 mmの供試体(以下HPC)および高炉セメントB種で作製したW/C=37%、最大粗骨材寸法25 mmの供試体(以下BFS)、計2体の測定を行った。

2.2 環境条件

供試体の曝露箇所は静岡県掛川市の屋外環境下であり、気中養生28日間の後に曝露を約5年行った。測定時の気温は21℃、相対湿度は54%であった。

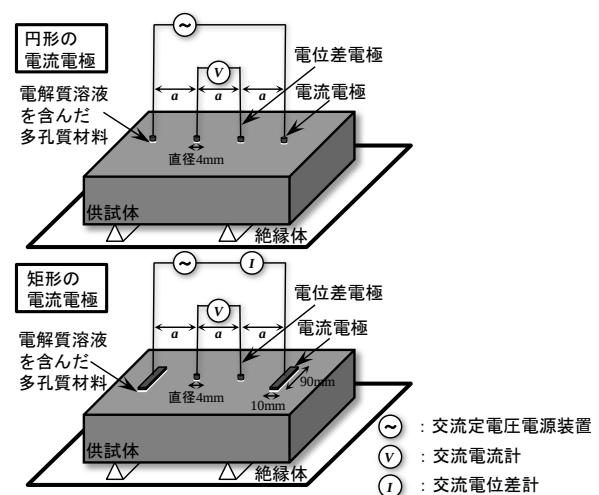


図-1 4プローブ法の測定概念図

2. 実験概要

2.1 供試体の概要

- | | | |
|---------------------------|------|--------|
| *1 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻 | 修(工) | (学生会員) |
| *2 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) |
| *3 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) |
| *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) |

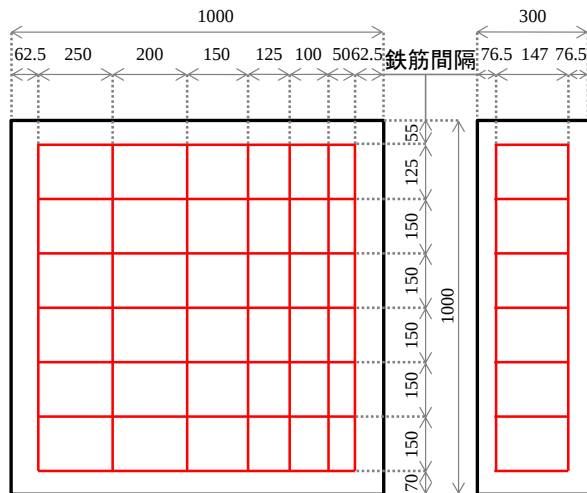


図-2 供試体の配筋図

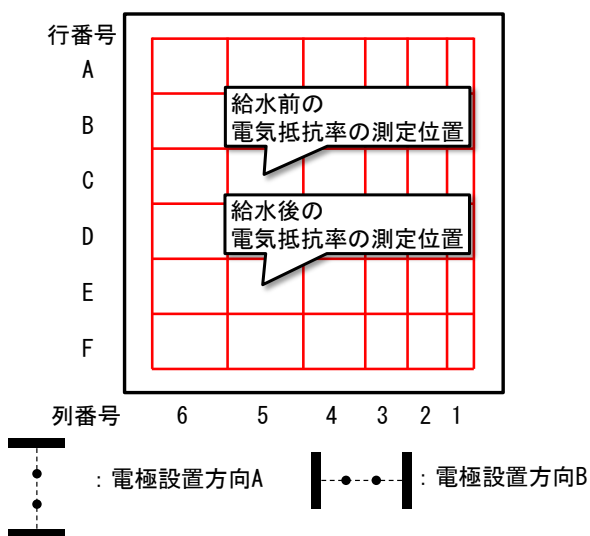


図-3 供試体の測定位置および電極設置方向

2.3 測定項目

(1) 電気抵抗率

電気抵抗率は4プローブ法により測定した。電流電極に30 V、73.3 Hzの交流電流を流し、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)を用いて電気抵抗率 ρ を評価した。

$$\rho = k \frac{V}{I} \quad (1)$$

ここに、 k ：換算係数(m)、 V ：電位差電極間の電圧(V)、 I ：印加電流(A)である。

測定対象が様な半無限体であり、電極の接触点が無限に小さいと仮定すると、理論的な換算係数($k=2\pi a$)を用いることができる。本研究において、円形の電流電極を使用した時に換算係数はこれを用いた。一方、矩形の電流電極を使用する場合は、電極寸法および電極間隔により換算係数 k が変化することから、既往の文献⁵⁾で

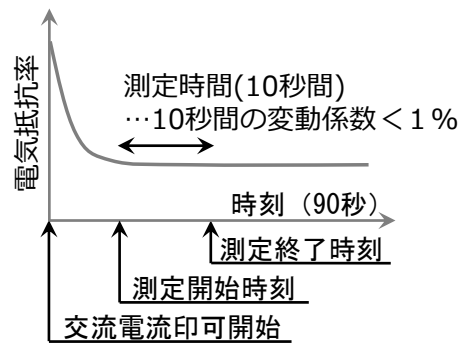


図-4 測定時間の定義

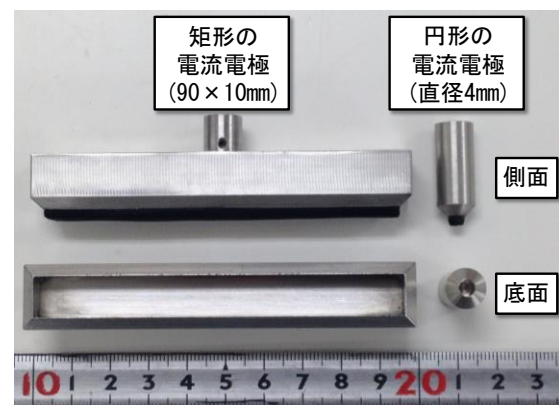


写真-1 矩形電流電極の外観

示した換算係数を用いた。

電位差電極間の電位差は1 mV単位で、供試体内部に流れる電流は1 μ A単位で計測した。

測定時間の定義を図-4に示す。交流電流印加時間を最大で90秒とし、毎秒の電気抵抗率を計測し、10秒間の電気抵抗率の変動係数が1%以下となった時刻から測定を開始した。

電極の設置間隔は20～60 mmとし、電流電極の形状は写真-1に示すように直径4 mmの円形電極と90×10 mmの矩形電極とした。また、電極の先端には電解質保持材として導電性クリームを塗布した導電性スポンジを取り付けた。

図-3に電極の設置の仕方を示す。電極の設置方向を90度ずつ変化させて4回の測定を行った。4回の電気抵抗率の測定結果において最大値と最小値の差を測定結果の変動として電気抵抗率の測定結果の安定性を評価した。

測定前処理が電気抵抗率の測定結果に及ぼす影響を検討するために、まず吸水を行わない状態で、図-3に示すC5にて測定を行った。次に、一晚(約16時間)の吸水を行った後に表面水を除去して、図-3に示すE5にて測定を行った。吸水の方法としては、供試体表面にステンレスの枠を設置し、約15 mm程度の高さまで水を注入した。

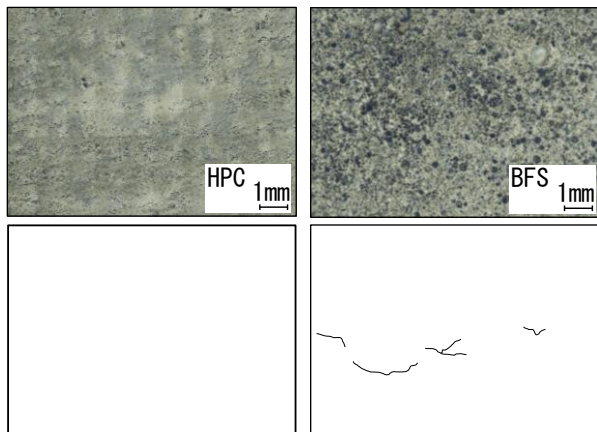


写真-2 HPC および BFS 表面の様子

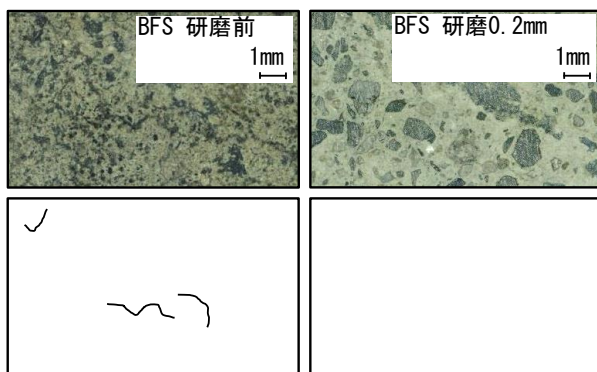


写真-3 BFS 表面の研磨前後の様子

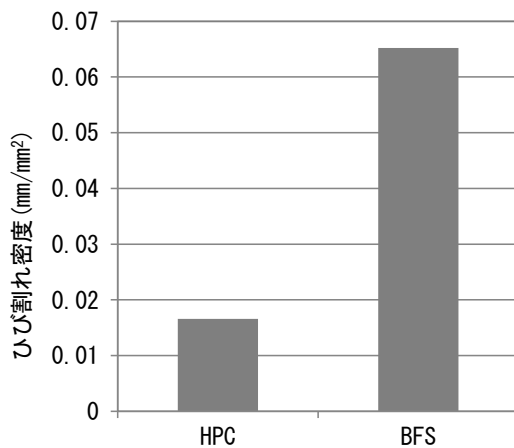


図-5 ひび割れ密度

(2) 相対含水率

角柱供試体から乾式により採取したコアを、表層から深さ方向に 10 mm 程度の間隔で乾式カッタにて切断して分析試料を成形し、式(2)を用いて相対含水率 w の分布を算出した。

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

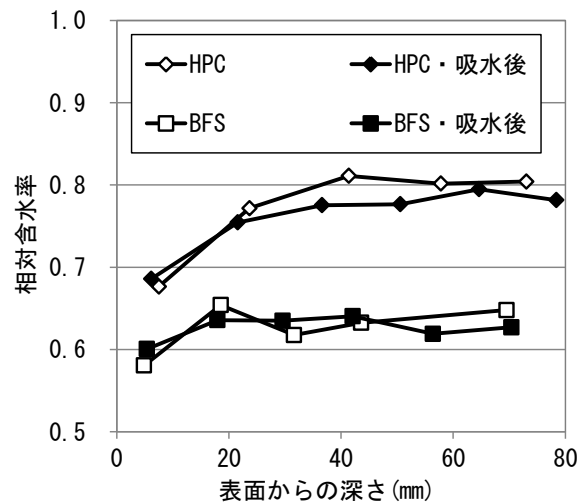


図-6 吸水前後の相対含水率

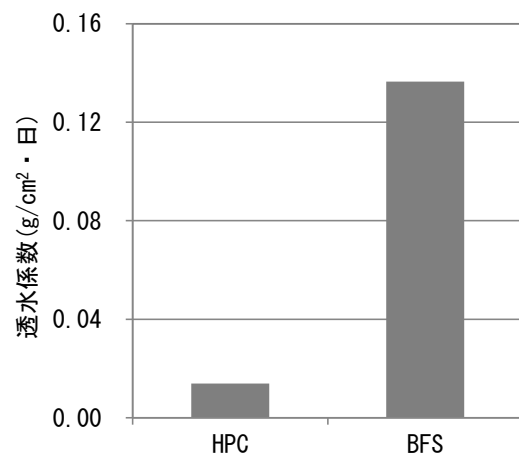


図-7 透水係数

ここに、 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。

(3) 透水係数

透水係数は JIS A 6909 の 7.13(透水試験 B 法)に基づいて測定した。なお、透水時間は 24 時間とした。

(4) ひび割れ密度

ひび割れ密度の測定には角柱供試体と同環境に曝露した円柱供試体を用いており、測定対象は円柱の側面である。マイクロスコープにより 200 倍に拡大し、 10×8 mm の領域の画像を撮影した。目視にて約 0.02 mm 幅以上と判断されるひび割れを対象としてひび割れの長さを測定し、画像解析ソフトを用いて長さの評価を行い、単位面積あたりのひび割れ長さをひび割れ密度として算出した。

また、ひび割れが存在する深さの把握を行った位置は、円柱供試体の上面である。コンクリート研磨機を用いて研磨を行い、マイクロスコープにより 40 倍に拡大し、 30×30 mm の領域の画像を取得した。

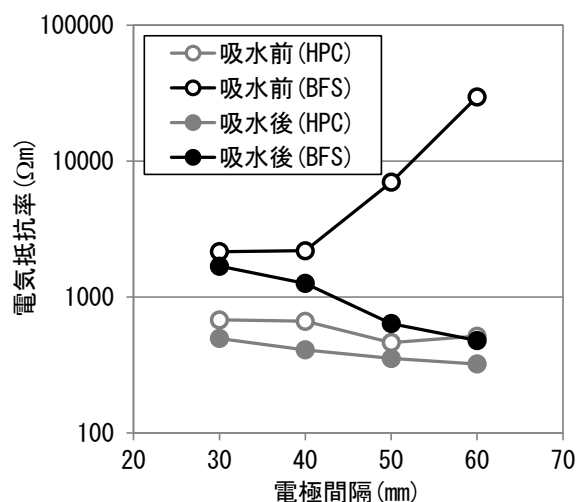


図-8 円形電極による電気抵抗率の平均値

3. 微細ひび割れおよび相対含水率

3.1 微細ひび割れ

写真-2 に、円柱供試体側面における HPC および BFS 表面の様子を示す。写真-2 より、HPC の表面において微細ひび割れは確認されなかった。また写真-2 より、BFS において約 0.02 mm 幅程度の微細ひび割れが複数はいっていることが分かる。

写真-3 に、BFS 表面の研磨前後の微細ひび割れの様子を示す。写真-3 より、研磨後において供試体表面の微細ひび割れはほとんど確認されなかった。以上より、BFS の表層約 0.2 mm 以浅の領域には、微細ひび割れが存在していたと考えられる。

図-5 に、ひび割れ密度の測定結果を示す。図-5 より、HPC に比べて BFS におけるひび割れ密度が多くなっていることが分かる。ここで、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、養生温度および湿潤養生の期間を十分にとらないと、所定の強度が得られない場合や硬化体組織が粗となり、中性化速度の増加やひび割れ抵抗性が低下する等のおそれがある、とされている⁶⁾。本研究において、供試体は 28 日間の気中養生であったため、供試体表層の組織が粗となり、微細ひび割れが生じたと考えられる。

3.2 相対含水率分布の影響

図-6 に、相対含水率の分布を示す。図-6 より、HPC に比べて BFS の相対含水率が低くなっている。また、吸水の前後での相対含水率の分布にあまり変化は生じなかった。この結果より、本研究で使用した供試体においては、15 mm 程度の水頭差では、液状水の浸透はごく表層部のみにとどまり、コンクリート深部までは浸透しないものと考えられる。

図-7 に透水試験 B 法による透水係数の測定結果を示す。図-7 より、HPC に比べて BFS の透水係数が高くな

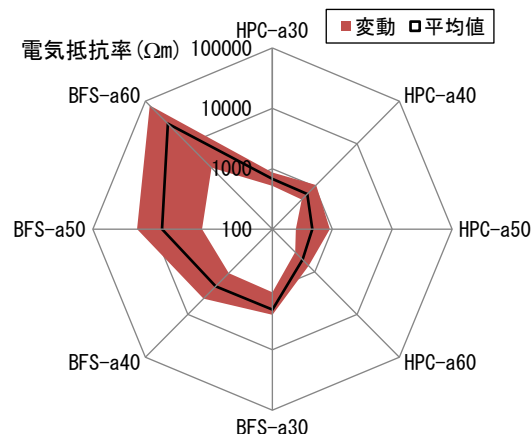


図-9 円形電極による測定結果の変動

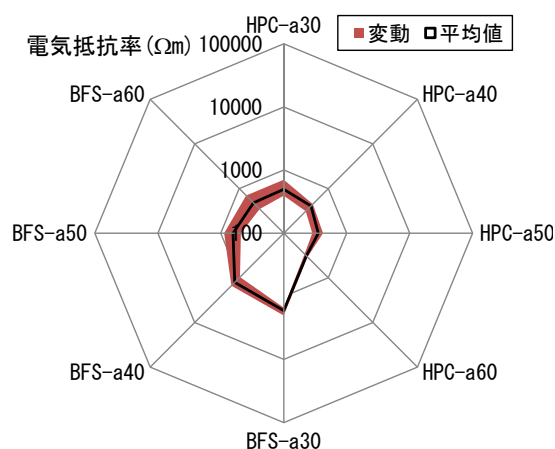


図-10 吸水後の円形電極による測定結果の変動

っていることがわかる。これは、BFS は HPC に比べて相対含水率が低く、また、ごく表層部に微細ひび割れが多く存在するため、水が進入しやすかったことが理由として考えられる。

4. 円形電極を用いたときの電気抵抗率の測定結果に及ぼす微細ひび割れの影響

4.1 測定結果の平均値

図-8 に、円形電極を用いたときの電気抵抗率の平均値を示す。図-8 より、吸水後の電気抵抗率の平均値は、電極間隔を小さくするにつれて大きくなっている。一方、吸水前の BFS における電気抵抗率の平均値は、電極間隔が大きくなるにつれて大きくなっており、BFS の吸水前後における電気抵抗率の平均値の傾向が異なる。そこで、電気抵抗率の平均値の妥当性を評価するために、電気抵抗率の測定結果の変動を検討した。

4.2 測定結果の変動

図-9 に、円形電極による電気抵抗率の測定結果と変動の関係を示す。図-9 中において、a30, a40, a50, a60 はそれぞれ電極間隔を 30, 40, 50, 60 mm とした電気抵抗

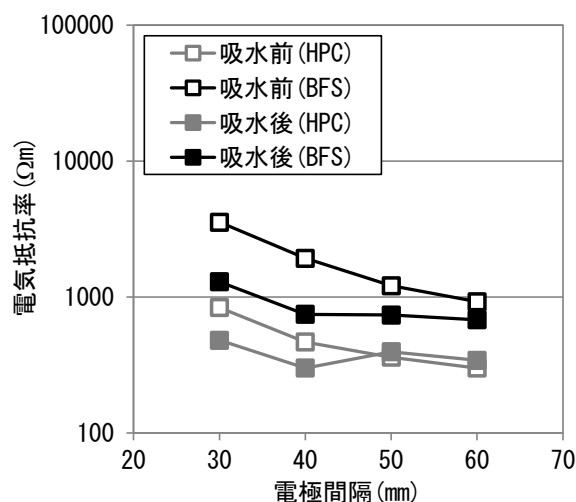


図-11 矩形電極による電気抵抗率の平均値

率の測定結果を示している。図-9 より、BFS における電気抵抗率の測定結果の変動が大きく、電極間隔が広いほど変動が大きくなることが分かる。また図-5 より、BFS の表面には微細ひび割れが存在することが分かる。ここから、BFS の供試体表層の微細ひび割れが測定結果の変動に影響を及ぼしていると考えられる。

既往の研究⁷⁾より、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、とされている。微細ひび割れが存在する部分では電位分布が局所的に屈曲し、理想的な分布から乖離すると考えられる。電極形状が広くなると、電極間に存在するひび割れ数が大きくなり、測定対称表面に生じる電位分布も理想的な状態から大きく乖離すると推察される。また、測定対称表面の電位分布の変化はひび割れの発生状況によって変化することが推察される。4プローブ法による電気抵抗率は測定対象表面に生じる電位差を測定することで評価されるので、上記の要因により、微細ひび割れの影響を受けて様々に屈曲した測定対象表面の電位分布が形成されると、電気抵抗率の測定結果にもばらつきが生じると推察される。

図-10 に、吸水後の電気抵抗率の測定結果と変動の様子を示す。図-10 より、吸水後の電気抵抗率の測定結果の変動は小さくなっていることが分かる。これは、吸水を施すことで供試体表層の微細ひび割れに対して水が進入し、吸水前よりも相対的に微細ひび割れが電気抵抗率の測定結果に及ぼす影響が小さくなり、供試体表面の電位分布が理想状態に近づいたためと考えられる。

以上より、吸水を施すことで供試体表面の微細ひび割れに水が進入し、円形の電流電極による電気抵抗率の測定結果は安定すると考えられる。しかし、図-8 に示され

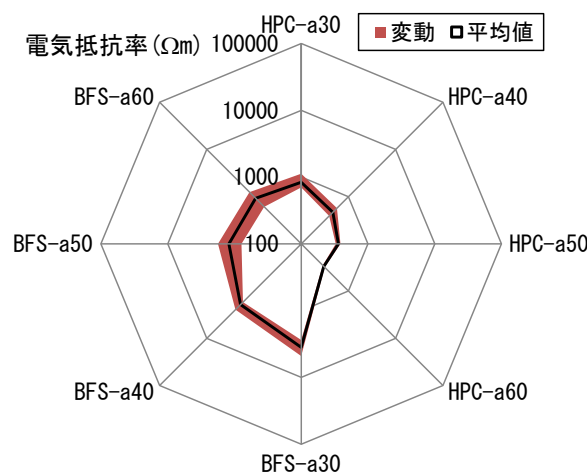


図-12 矩形電極による測定結果と変動の関係

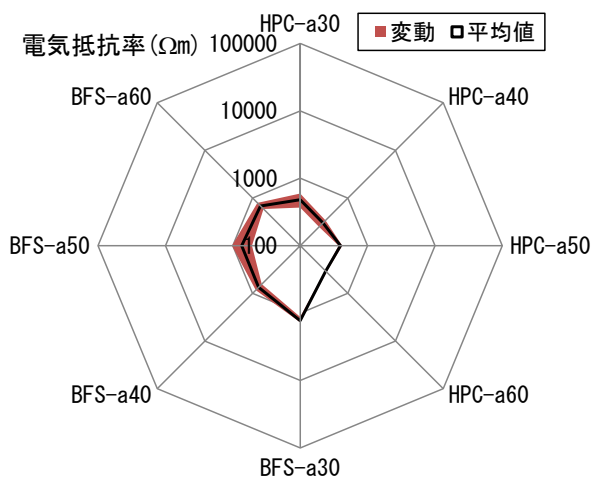


図-13 吸水後の矩形電極による測定結果と変動の関係

るように表層部が高含水率になることで、電気抵抗率が吸水前よりも若干小さくなってしまいうことに注意する必要がある。

5. 矩形電極を用いたときの電気抵抗率の測定結果に及ぼす微細ひび割れの影響

5.1 測定結果の平均値

図-11 に、矩形電極による電気抵抗率の平均値を示す。図-11 より、矩形電極による電気抵抗率の平均値は、電極間隔を小さくするにつれて大きくなっている。ここで既往の研究⁸⁾より、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、とされている。ここから、供試体の乾燥作用による表層のコンクリートの電気抵抗率の上昇が、電極間隔を小さくした場合の電気抵抗率の平均値に影響を及ぼしていると考えられる。

5.2 測定結果の変動

図-12 に、矩形電極による電気抵抗率の測定結果と変

動の関係を示す。図-12 より、矩形電極を用いた電気抵抗率の測定結果の変動は円形電極を使用した時と比較して小さくなっている。これは、電流電極を矩形とした場合、電位差電極周辺の等電位線が電極配列方向に対して垂直に分布するために、微細ひび割れによる電位分布の屈曲の影響が相対的に小さくなるためと推察される。つまり、矩形の電流電極を使用すると、電極配列方向に沿う電流が流れる範囲が広くなり、微細ひび割れによる電位分布の屈曲が生じにくくなって、電気抵抗率の測定結果が安定したと推察される。

図-13 に、吸水後の矩形電極による電気抵抗率の測定結果と変動の関係を示す。図-13 より、吸水後の電気抵抗率の測定結果の変動はさらに小さくなっている。これは、電極形状が矩形であるうえに吸水をおこなったため、電気抵抗率の測定結果に及ぼす微細ひび割れの影響が小さくなったためと考えられる。しかし、図-11 に示されるように、表層部が高含水率になることで、電極間隔が狭いケースにおいて、測定される電気抵抗率が吸水前よりも若干小さくなってしまうことに注意する必要がある。

6. 結論

本研究では、実構造物における電気抵抗率によるコンクリートの品質評価に向けて屋外環境に曝露した大型コンクリート供試体を用いた検討を行った。以下に、本研究で得られた知見をまとめる。なお、本研究で得られた知見は水セメント比が 37～39%であり、以下に示される結論は散水程度の吸水処理では内部の含水状態がほとんど変化しない場合を想定して導いたものである。

- (1) 円形の電流電極 ($\phi 4$ mm) を使用して 4 プローブ法により電気抵抗率を測定する場合、電極間隔が広くなると、より多くの微細ひび割れの影響を受けて電気抵抗率の測定結果にばらつきが生じやすくなる。
- (2) 一方、矩形の電流電極 (10×90 mm) を使用して 4 プローブ法により電気抵抗率を測定すると、供試体表面の微細ひび割れの影響を軽減でき、電気抵抗率の測定結果は安定する。
- (3) 吸水を施すことで、供試体表面に存在する微細ひび割れに水が進入し、4 プローブ法による電気抵抗率の測定結果は安定する。ただし、表層部が高含水率になることで、電気抵抗率が吸水前よりも小さく評

価されてしまう可能性がある。

謝辞

本研究の遂行にあたり、三井造船(株)の皆田龍一氏および石原修二氏、ドーピー建設工業(株)の立神久雄氏および長谷川剛氏にご協力を賜りました。ここに謝意を表します。

7. 参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会・規関連小委員会：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(案)(JSCE-K 562-2008)」の制定，土木学会論文集 E，Vol.64，No.3，pp.427-434，2008.3
- 2) 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
- 3) 齊藤佑貴，植村翔太，皆川浩，久田真：海洋干満帯に暴露したコンクリート大型試験体の電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数の関係，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.875-880，2011
- 4) 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，pp.174-182，2012
- 5) 矢野貴行，皆川浩，久田真，石原修二，長谷川剛：電流電極の先端の形状が 4 プローブ法による電気抵抗率の測定値に及ぼす影響，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.68，pp.741-742，2013
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書 [施工編]，pp.53-55，2012
- 7) 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
- 8) 皆川浩，矢野貴行，久田真：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1111-1116，2012