助成番号
2022-02

４プローブ電気抵抗率測定によるかぶりコンクリート内の塩化物イオン浸透深さの推定方法の開発

愛媛大学工学部
技術専門職員　川口　隆

１．はじめに

本研究は、電極を実構造物のコンクリート表面に押し付けて測定する４プローブ法において測定された電位から求めた電気抵抗率の分布より、コンクリート表面から鉄筋近傍までのコンクリート中の塩化物イオン濃度を推定する方法の開発を目的としている。

４プローブ法は**図１**のように等間隔 a の 4 つの電極(プローブ)を測定対象面に設置し、外側の電極から交流電流 I を印加し、内側の電極間の電位の測定値 V から電気抵抗率 $\rho(=2\pi a(V/I))$ を求める方法である。電極間隔を $4a$ に広げた場合には電流経路はより深い位置を流れる。材料が均一であれば、電極間隔を変化させても電気抵抗率は同じとなるが、**図１**のように表面近くの塩化物イオン濃度が高いと電気抵抗率が小さく、内部では電気抵抗率が大きい場合には電極間隔を変えて測定すると異なった電気抵抗率になる。

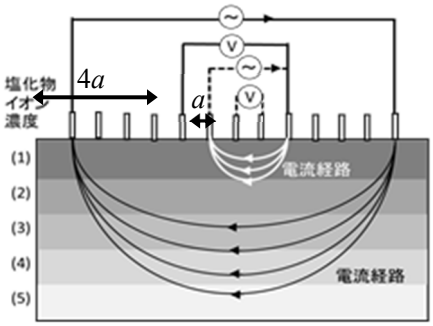

図１　４プローブ法の測定概要

そこで、昨年度の成果において不十分であった４プローブ法の測定原理に基づいて塩化物イオンの浸透深さの評価ができることを室内実験で確認した。さらに、実橋梁の測定においてプローブ間隔を変化させて測定した電気抵抗率の値およびそれらの比率の変化状況から、塩化物イオンの浸透深さを推定する方法を実測結果に基づいて提案するとともに数値解析を用いて実測結果の傾向について検討をおこなった。なお、本研究は一般社団法人四国クリエイト協会の「2023 年度建設事業に関する技術開発支援制度」による助成を受けて実施したものである。

２．室内実験による４プローブ法電気抵抗率測定に塩化物イオン浸透の評価

研究の取り掛かりとして、４プローブ法のプローブ間隔を変化させることによって、塩化物イオンの浸透を評価できるかを検討した。長さ 30cm×高さ 20cm×幅 10cm の角柱コンクリート供試体を用いて、まず、2 体の供試体を材齢 14 日まで水中養生とし、うち 1 体は水中養生を継続し、他の 1 体は 20℃の実験室内で 28 日間気中養生とした。

図２は養生方法の違いがプローブ間隔と電気抵抗率の関係に及ぼす影響を示す。４プローブ法で測定される電気抵抗率は、コンクリート内部の含水状態、鋼材分布、幾何学的要因などの影響を受けると言われている。しかしながら、**図２**に示すように、水中養生の供試体では、プローブ間隔を広くしても電気抵抗率は、ほぼ一定である。これは含水率分布が一様であったことと、供試体寸法が幾何学的影響として表れない大きさであったものと考えられる。一方、気中養生の供試体では、プローブ間隔を広げることにより、電気抵抗率が低下している。これは表面近傍では乾燥により含水率が小さいため電気抵抗率が大きく、内部では含水率が大きく電気抵抗率が小さいためである。

図２には昨年度の報告でも用いた有限要素法（Geosoftware、RES3DMOD）による数値計算結果

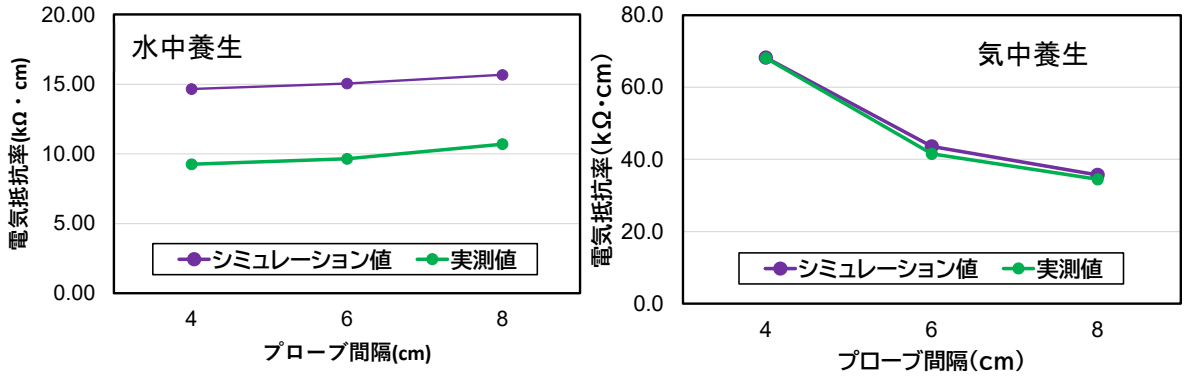

図２ 養生方法の違いがプローブ間隔と電気抵抗率の関係に及ぼす影響（実測値と数値計算）

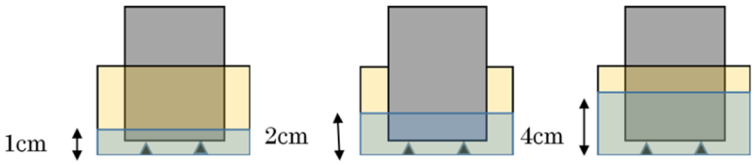

図３ 塩分浸漬繰り返し試験の概要

も示している。3 次元有限要素モデルはメッシュが 1cm 角で粗骨材部とモルタル部からなり、その比率を 7:3 とし、粗骨材部をランダムに配置し、塩化物イオンの侵入はモルタル部のみの電気抵抗率を小さくすることとした。**図２**の水中養生では、モルタル部の電気抵抗率を全て同じとしており、プローブ間隔によらず一定である。そして、気中養生では水中養生でのモルタル部の電気抵抗率を、表面からの深さごとに適宜変更して実測値と一致するようにした。その結果、設定した電気抵抗率は表面近傍 3cm の範囲で直線的に増加する分布となり、昨年度の報告書と同様となった。

そこで、角柱供試体を塩分浸漬深さ 1cm、2cm、4cm となるように供試体側面をテープで被覆し、NaCl 10%水溶液が所定の位置まで漬かるようにし（**図３**）、4 日浸漬した後、3 日乾燥させ、測定値が安定するまで、この塩分浸透を作用させる乾湿繰り返しサイクルをおこなった。

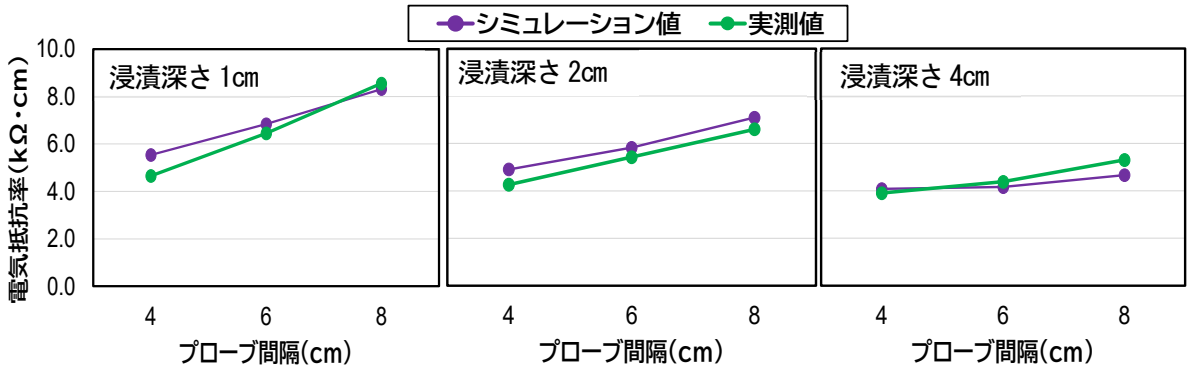

図４ 塩分浸漬繰り返し試験の供試体の電気抵抗率（実測値と数値計算値）

図４は塩分浸漬繰り返し実験供試体のプローブ間隔と電気抵抗率の関係の実測値と数値計算値を示す。実測値はどの浸漬深さにおいてもプローブ間隔が広くなるにつれて、電気抵抗率は増加し、さらに塩化物イオンの浸透深さが深いほど電気抵抗率の増加の程度が小さくなっている。これは表面近傍では塩化物イオンの浸透により電気抵抗率が小さくなったためである。試験終了後に供試体を切断し、切断面に $AgNO_3$ を噴霧し、塩化物イオンの浸透深さを測定した。浸漬深さ 1cm は約 4cm、浸漬深さ 2cm は約 5cm、浸漬深さ 4cm は約 7cm まで変色していた。そこで数値計算では、**図２**に示した気中養生で用いたモルタル部分の電気抵抗率を、浸漬深さ 1cm は 4cm ま

で、浸漬深さ 2cm は 6cm まで、浸漬深さ 4cm は 8cm まで塩分濃度に応じて適宜低下させた。数値計算結果は実測値と同様な傾向を示しており、実験結果および数値解析から、４プローブ法の測定原理に基づいてプローブ間隔を変えることによって、塩化物イオンの侵入を評価できることを室内実験供試体で確認することができた。

３．実橋梁における４プローブ法電気抵抗率測定に塩化物イオン浸透の評価

測定対象の橋梁を検討するにあたり、本研究では国土交通省が全国の橋梁点検結果を公開している「全国道路施設点検データベース」より変化が少ないとみなし、四国地方において 2018 年度以降に塩害特定点検を実施され塩化物イオン量分布が得られている橋梁を対象とした。

各橋梁を塩化物イオン量の多い橋梁と塩化物イオン量の少ない橋梁に分類した。ここでは、コンクリート表面からの深さ 1cm～5cm が 0.5kg/m³以下を塩化物イオンが侵入していないとみなした。一方、塩化物イオン量が多く侵入している橋梁では、プローブ間隔 8cm は測定面から約 4cm 辺りまでを測定するので、測定面からの深さ 1cm～5cm の塩化物イオン量の分布に着目した。

計測した実橋梁はコンクリートの材料、材齢、環境条件が異なるため、プローブ間隔ごとの電気抵抗率の絶対値ではなく、それぞれのプローブ間隔の比率（＝広いプローブ間隔の電気抵抗率/狭いプローブ間隔の抵抗率）で検討する。昨年度の研究と同様にプローブ間隔 4cm と 6cm の電気抵抗率の比率を 6/4 比と表す。同様に 8/4 比、8/6 比の比率も用いた。室内実験結果では電気抵抗率の比率が 1.0 以上であれば塩化物イオンが侵入している、1.0 以下であれば塩化物イオンが侵入していないと評価できた。しかし、実橋梁においてはほとんどの橋梁において塩化物イオンの浸透の有無にかかわらず、電気抵抗率の比率は 1.0 以下の値となった。これは実構造物では長期にわたり外部環境に晒され、コンクリート表面近傍は乾燥や微細なひび割れの発生など電気抵抗率が大きく増加する要因の変質が生じ、そこに塩化物イオンが侵入しても電気抵抗率が低下しなかったものと考えられる。したがって、本来、別の方法で塩化物イオンの有無を判別しなければならないが、本研究では簡易的な測定を基本としているので、他の測定方法は追加せず、電気抵抗率の実測値そのもので塩化物イオン侵入の有無を判別できるかどうかを再検討した。

図５に各橋梁においてプローブ間隔 4cm、6cm、8cm で測定した電気抵抗率を示す。横軸の数字は値でなく、橋梁名の代わりのものである。塩化物イオンが侵入していないとみなした橋梁と塩化物イオンが侵入している橋梁の電気抵抗率には大まかではあるが差があった。そこで、判別の目安として、プローブ間隔 4cm は 200kΩ・cm、プローブ間隔 6cm は 100kΩ・cm、プローブ間隔 8cm は 50kΩ・cm を設定した。各プローブ間隔で 1 つ以上をここで設定している値以下であれ

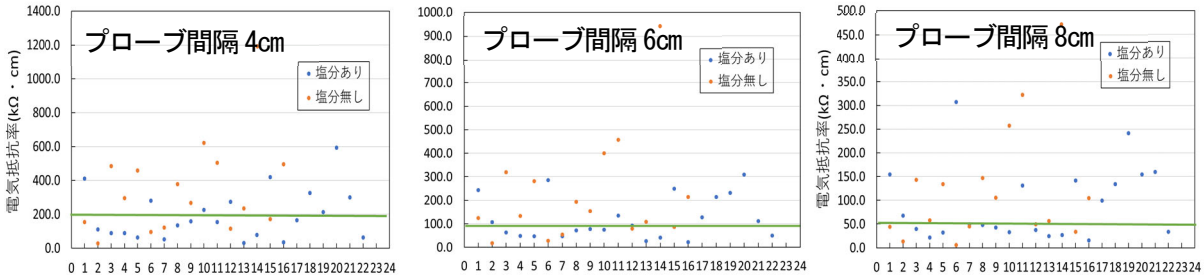

図５ 各橋梁で測定された電気抵抗率

ば塩化物イオンが侵入していると判別する。塩化物イオンの多い橋梁は 22 橋中 15 橋、塩化物イ

オンの少ない橋梁は 16 橋中 14 橋であった。全ての橋梁を正確には判別することはできないが、4 プローブ法で電気抵抗率を測定するだけで、大まかな判別ができる可能性がある。

次に、塩化物イオンが侵入している橋梁を大きく 4 つのパターンに分類した。

① 塩化物イオン量が内部に行くほど多くなる。

② コンクリート表面の塩化物イオン量が最も多く、内部に行くほど少なくなる。

③ 塩化物イオン量がほぼ一定である。

④ 塩化物イオン量が表面近傍よりすこし内部に入った位置で最も多くなる。

以上の分類に基づけば、本研究では塩化物イオンが侵入していないとみなした橋梁は 16 橋、塩化物イオンが侵入しているとみなした橋梁で、パターン①は 7 橋、パターン②は 8 橋、パターン③は 6 橋、パターン④は 2 橋であった。なお、パターン④の橋梁は測定が困難であったこととサンプル数が少ないことから、今回は評価対象から除外した。パターン①、②、③に関して、電気抵抗率の比率の大小関係はほぼ**図６**に示すようになった。どのパターンにおいても 8/4 比が最も小さく、8/4 比<6/4 比<8/6 比の関係が一般的な拡散により塩化物イオンが侵入した分布である。**図６**に示す電気抵抗の比率の大小関係は、数値計算において確認することができた。塩化物イオンが侵入していない橋梁の測定結果と一致するように有限要素モデルのモルタル部の電気抵抗率を設定し、そのモデルに対し、パターン①では内部の 5cm～7cm の範囲の電気抵抗率を、パターン②では表面から 4cm までの電気抵抗率を、パターン③では全ての範囲の電気抵抗率を、塩化物イオンが侵入していない場合より小さく設定した。塩化物イオンが侵入していない橋梁では 8/4 比<6/4 比<8/6 比や 8/4 比<8/6 比<6/4 比どちらの場合も再現できたが、どちらの場合も、例えば 8/4 比<8/6 比<6/4 比であっても、表面近傍の電気抵抗率を低くすることで、8/4 比<6/4 比<8/6 比となり、数値計算においても**図６**の分類は確認でき、その数値計算でもプローブ間隔 4cm での電気抵抗率は 200kΩ・cm 以下となった。

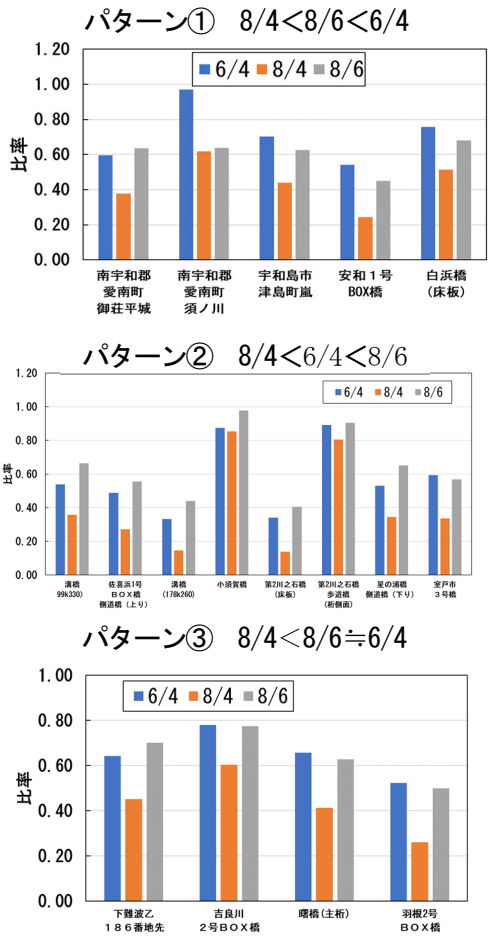

図６ 各橋梁で測定された電気抵抗率の比率の分類

４．おわりに

本研究で得られた知見をまとめると以下のとおりである。

１．室内実験において、４プローブ法の測定原理によりプローブ間隔を変えて電気抵抗率を測定することにより、塩化物イオンの浸透深さを推定することが可能であることを確認できた。

２．実橋梁の測定結果に基づいて、塩化物イオンの侵入の有無を判別する電気抵抗率の値を提案した。そして、塩化物イオンが侵入していると判別した橋梁において、４プローブ電気抵抗率測定におけるプローブ間隔を変えて得られる電気抵抗率の比率の大小関係から、塩化物イオン分布を大まかに分類できることを示した。