

助成番号

2022-2

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に示すように、等間隔 a に並んだ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。また、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る電気抵抗率になる。

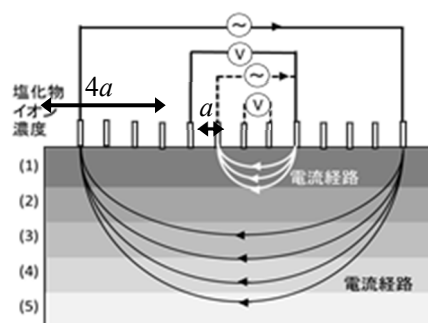


図1 4プローブ法の測定概要

そこで本研究では、2020年度建設事業に関する技術開発支援制度による助成の成果に基づき、プローブ間隔を変化させて測定した電気抵抗率の比の変化状況から、塩化物イオンの浸透深さを推定する方法を数値解析および実験により検討し、実構造物に適用できるように非破壊試験として簡便に実施できるやり方を提案し、実用化に資することを目的としている。

なお、本研究は一般社団法人四国クリエイティブ協会の「2022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. 4プローブ法電気抵抗率測定に関する数値解析

本研究ではコンクリート内部の塩化物の浸透深さを推定するために有限要素法 (Geosoftware、RES3DMOD) による数値解析を行った。図2は数値解析に用いた要素モデルの例を示す。薄い青が粗骨材を、緑がモルタル部分であり、粗骨材の電気抵抗率はモルタル部分より小さく設定している。さらに、濃い青が塩化物の侵入したモルタル部分であり、緑の部分よりさらに電気抵抗率を小さくしている。数値解析ではいくつかのモデル用いて、粗骨材の有無、プローブ間隔、水分勾配の有無の影響を検討した上で、塩化物の浸透深さの違いによるコンクリート表面で電気抵抗率の測定値を検討した。

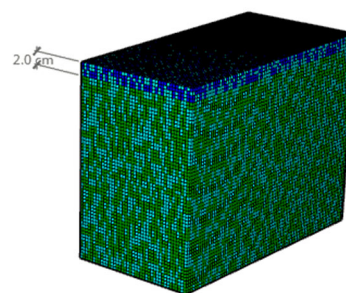


図2 解析に用いたモデル

まず粗骨材の割合は全体積の30%として、粗骨材の大きさを1cm、2cmおよび4cmとして数値計算した場合に、骨材寸法が多くなるにつれてバラツキが大きくなり、特にプローブ間隔が狭くなると粗骨材の影響が大きくなることがわかったので、ここでの数値解析では塩化物浸透深さの

影響に焦点を当てるために、骨材のサイズを解析メッシュと同じ 0.5 cm x 0.5 cm x 0.5 cm とした。また、既往の研究を参考にしてモルタル部は 16kΩ・cm、粗骨材部は 100kΩ・cm とした。さらに、塩化物が侵入したモルタル部分の電気抵抗率は

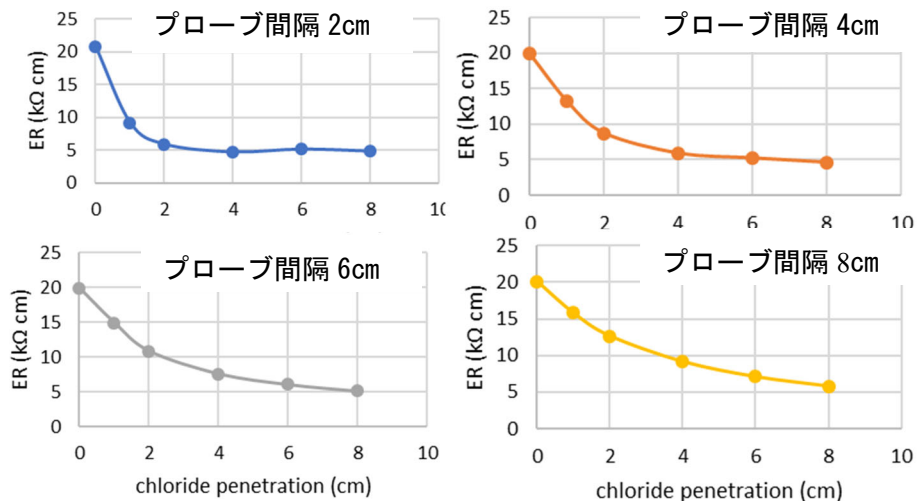


図3 異なるプローブ間隔での塩化物が浸透したモデルにおける電気抵抗率

0.1、0.2、0.4、0.5 倍として解析した場合に、倍率が小さいほど出力される電気抵抗率の値は小さくなるが、プローブ間隔の変化に対する電気抵抗率の変化の傾向は同じであったことから、塩化物を含んだ部分は 0.2 倍として解析を行った。

図3は塩化物の浸透深さを 0cm から 8cm まで変化させた場合にプローブ間隔が 2cm、4cm、6cm および 8cm のそれぞれで測定される電気抵抗率の解析結果を示す。プローブ間隔が 2cm においては塩化物が 2cm まで浸透した場合に電気抵抗率が急激に低下し敏感である。しかし、それ以上に塩化物が侵入しても、電気抵抗はほとんど変化していない。一方、プローブ間隔が 8cm の場合には、2cm までの塩化物の侵入に対してその電気抵抗率の低下割合は小さくなっている。このように、プローブ間隔と塩化物の浸透深さとの関係によって測定される電気抵抗率の低下が変化することを利用すれば、塩化物の浸透深さを推定できると思われる。しかし、2020 年度の助成の成果において、電気抵抗率を用いると種々の影響で同じコンクリートであっても変化することから、2つのプローブ間隔で測定された電気抵抗率の比率を用いればよいことを報告している。

そこで、図4は異なるプローブ間隔で得られる電気抵抗率を用いて、6つの組み合わせの電気抵抗率の比率と塩化物浸透深さの関係を示す。図から 8/4 比と 4/2 比の曲線に関しては塩化物の浸透深さ約 2cm で曲線が交差しており、6/4 比と 4/2 比の曲線に関しては塩化物の浸透深さ約 3.5cm で曲線が交差し、8/6 比と 4/2 比の曲線および 8/4 比と 6/2 比の曲線に関しては塩化物の浸透深さが約 5cm でそれぞれの曲線が交差している。従って、電気抵抗率の比率の大小関係で塩化物の浸透深さを推定できると考えられる。しかしながら、この解析では塩化物が浸透していない場合のコンクリート内部の電気抵抗率は均一としているので、実際のコンクリートと異なっていることもあり、塩水浸漬実験を行った供試体における塩化物の浸透を適切に推定することは

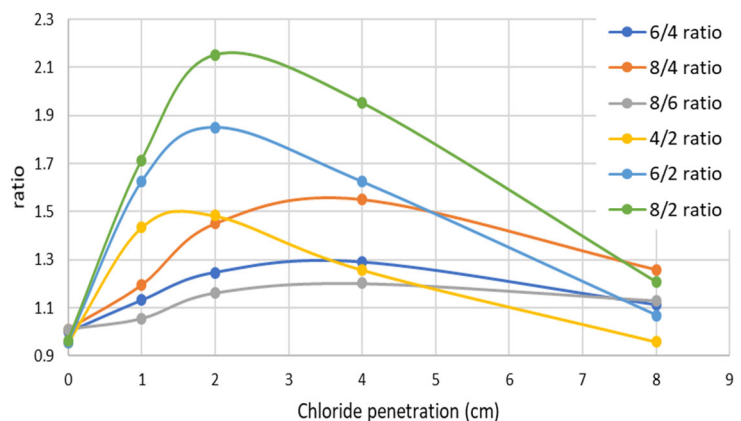


図4 電気抵抗率の比率と塩化物浸透深さの関係図

出来なかった。そこで、塩化物が侵入していない場合に既往の供試体の電気抵抗率と同じとなるように、内部の電気抵抗率分布を設定したモデルを用いて、電気抵抗率の比率と塩化物浸透深さの関係図を作成した。この概要版の報告書ではページ数の関係から実橋梁のコンクリートでの塩化物の浸透深さの推定について述べる。

3. 実橋梁における塩化物浸透深さの評価

本研究では愛媛県伊予郡松前町にある海岸近くの塩美橋の図5に示す測定位置で4プローブ法電気抵抗率の測定を行った。図5に示すように、潮風を多く受ける場所（G1、G6 外側、G6 下側）と潮風を受けにくい場所（G4、G6 内側）を選んだ。

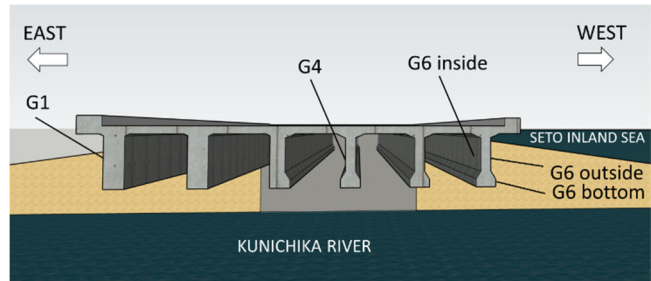


図5 測定位置

図6は各測定位置での電気抵抗率の比率を比較した結果を示す。まず、潮風に晒されやすい場所で電気抵抗率の比率が高いことがわかる。また、4/5-2.5比、6/5-2.5比、8/5-2.5比、8/6比と比較して、6/4比と8/4比のプローブ間隔は、塩化物浸透していると考えられる場合に値が大きくなっている。4/5-2.5比、6/5-2.5比、8/5-2.5比の場合、場所によつての特性や粗骨材の影響が異なるためか潮風に晒されることが多い場所と少ない場所での値に差が無く、誤った評価となる場合がある。一方、8/6比の場合には数値計算の結果とどうように、塩化物の浸透に対して最も影響を受けにくい比であることがわかる。したがって、今回の測定結果では、コンクリート中の塩化物浸透深さの推定には、6/4比、8/4比、8/6比を確認すれば十分であることが示唆された。

図7は塩美橋での塩化物の浸透深さの推定に用いた電気抵抗率の比率と塩化物浸透深さの関係

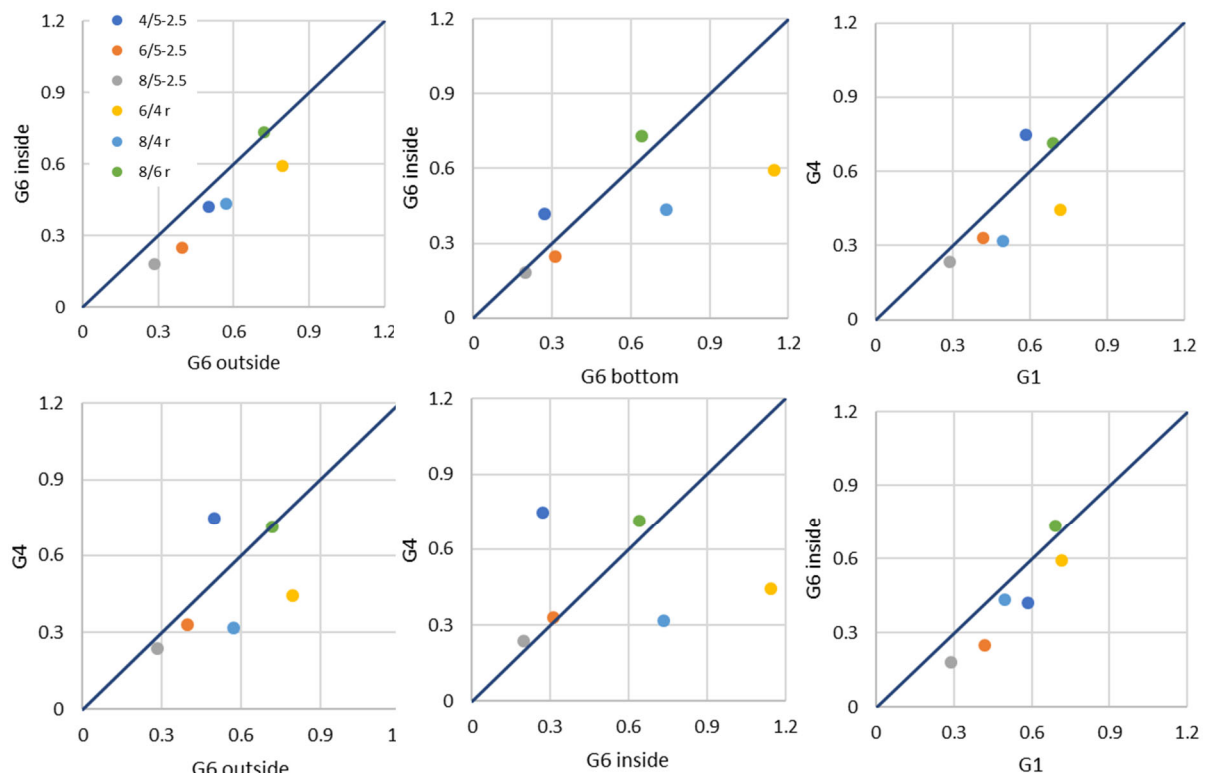


図6 各測定位置での電気抵抗率の比率の比較

を示す。図4からの修正は内部の電気抵抗率分布を設定したモデルを用いて、さらに塩化物が浸透した場合には初期値（塩化物を含まないケース）で除している。塩化物を含まないケースで除す理由は電気抵抗率勾配の影響を除去するためであり、塩美橋では潮風から比較的保護されている内部のG4とG6内側の平均値を塩化物が無いコンクリートと仮定して用いた。なお、図ではそれぞれの曲線が交差する位置において色を塗り分けている。

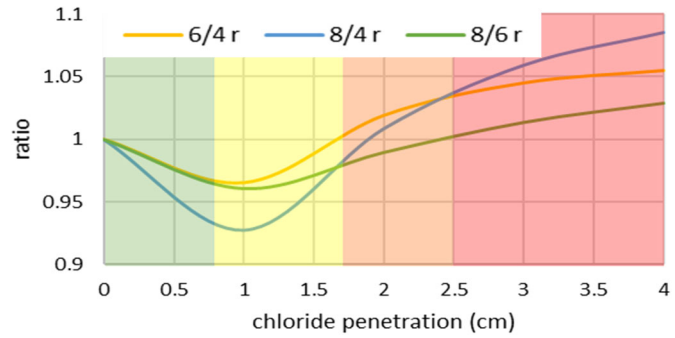


図9 塩化物浸透深さと電気抵抗率の比率の関係

次に各測定位置での電気抵抗率の比率をG4あるいはG6内側の電気抵抗率の比率で除した結果を表1に示す。なお、表中の色付きは電気抵抗率の比率の差を取り、その差がマイナスの場合である。G1に関しては、G6内側およびG4どちらの基準でも、図9に当てはめ

表1 各プローブ間隔での電気抵抗率の比率

Note	Ratio difference between probe spacings	Location				
		G1	G4	G6 outside	G6 inside	G6 bottom
G6 inside as the basis	8/4-8/6	0.196	-0.247	0.332		0.815
	8/4-6/4	-0.070	-0.019	-0.027		-0.243
	6/4-8/6	0.267	-0.229	0.359		1.058
G4 as the basis	8/4-8/6	0.598		0.798	0.349	1.425
	8/4-6/4	-0.055		0.009	0.034	-0.268
	6/4-8/6	0.653		0.789	0.314	1.692

ると、6/4比>8/4比なので塩化物浸透深さは2.4cm以下、8/4比>8/6比なので塩化物浸透深さは1.7cm以上、6/4比>8/6比なので塩化物浸透深さは0.7cm以上であるので、まとめると塩分浸透深さは1.7cm以上2.4cmまでであると推定できる。

同様な方法で推定すると、それぞれの桁での塩化物浸透深さはG4では2.4cm~0.7cm以下、G6外側では約2.4cm、G6内側では2.4cm以上、G6下部では1.7cm以上2.4cm以下となる。塩美橋において塩化物イオン濃度分布の実測値はないが、コンクリート標準示方書の設計式により実測された表面塩化物量を用いて、鉄筋腐食開始塩化物量である1.2kg/m³となる位置を求めると、G6で4.2cm、G4で1.9cm程度である。上記の塩化物浸透深さの推定結果から、G4ではやや広い範囲をもっているが比較的近い値となったが、G6の桁に関しては過小評価する結果となった。

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. 4プローブ法による電気抵抗率の測定において、狭いプローブ間隔の電気抵抗率に対する広い電気抵抗率の比率を用いれば、その電気抵抗率の比率の値が大きくなることで、塩化物の存在を示すことができる。
2. 塩化物の浸透深さを評価するために、塩化物の浸透深さと異なるプローブ間隔の電気抵抗率の比率の関係図を提案した。この関係図およびコンクリート供試体と実橋梁のコンクリートで異なるプローブ間隔で実測された電気抵抗率の比率の大小関係から、塩化物の浸透深さをある程度の精度で推定することができた。ただし、精度と信頼性を高めるため、塩化物濃度分布が既知である実橋梁での計測を多く行い、データを蓄積する必要がある。