

X線 CT 画像を用いた細孔構造に基づく電気抵抗率の直接計算

愛媛大学 学生会員 田中碧 横河ブリッジ 非会員 阿部光一郎
愛媛大学大学院 正会員 河合慶有 愛媛大学大学院 正会員 氏家勲

1. はじめに

近年、コンクリート中鉄筋の腐食に起因する鉄筋コンクリート構造物の耐久性低下が社会問題となっている。コンクリートの耐久性の中で鉄筋腐食に対する抵抗性は非常に重要であり、特に沿岸部の多い我が国において、塩害に対する耐久性を評価することが、構造物の安全性や使用性を照査する上で極めて重要となっている。従来、コンクリートの遮塩性能を評価する手法として、電気泳動試験及び浸せき試験により塩化物イオンの拡散係数を測定する方法が用いられている。しかし、これらの試験方法は測定期間が長く、耐久性の評価に時間を要する。そこで、コンクリートの遮塩性能を評価する手法として 4 プローブ法を用いて測定されるコンクリートの電気抵抗率が注目されている。4 プローブ法とは、コンクリート表面に一定間隔で 4 本の電極を押し当て、両端の電極に直流または交流を印加し、内側 2 本の電極間の電圧を測定することで、電気抵抗率を算出する方法である。また、電気抵抗率を算出するためのセル定数を適切に設定することで、物性値への換算が可能となっている。4 プローブ法は、簡便かつ迅速に見かけの電気抵抗率を算定する方法であるが、実構造物材のかぶりコンクリートを対象として物性を評価するためには、部材の形状及び寸法、材料の不均一性、含水分布及びプローブ間隔などの測定条件の影響を考慮してセル定数を適切に補正する必要がある。しかしながら、実構造物材においてこれらの影響を包括的に考慮して電気抵抗率を算定することは容易ではない。そこで本研究では、セメント硬化体の細孔構造に基づく空隙モデルを作製し、数値解析を用いて電気抵抗率を直接計算する方法を構築することを目的として、実験的・解析的検討を行った。

2. 実験的・解析的検討の概要

本研究では、水セメント比を 65% とし、普通ポルトランドセメント（密度： 3.16g/cm^3 ）を使用してコンクリート供試体（ $\phi 100 \times 200\text{mm}$ ）を作製した。養生方法は、材齢 28 日まで水中養生・気中養生とした。以下、供試体を OPC-65 と称し、養生の相違をその後の W（水中養生）及び D（気中養生）で示す。実験的検討では、円柱供試体を対象として電気抵抗率の測定を行った。なお、プローブ間隔は 50mm とし、気中養生とした供試体は測定前に飽和处理を施した。試験後に、各供試体から小片試料（約 2mm）を採取し、水銀圧入法を用いて細孔径分布を測定した。また、同試料を対象として X 線 CT を用いて断層画像を取得した。

解析的検討では、画像解析ソフト Simpleware ScanIP を用いてセメント硬化体モデル内の空隙率及び連結性を考慮して、固相・空隙のしきい値を設定することで 3D 空隙モデルを作製した。次に、空隙モデルの電気抵抗率を直接計算し、物性値（実測値からセル定数を考慮して換算）と数値解析結果との比較検討を行った。数値解析には COMSOL Multiphysics ver.5.6 を用いた。図 1 に示すようなセメント硬化体モデル内でオームの法則が成り立ち、電流密度ベクトルが時間的に変化しない状態（定常電流）を仮定し、物質内の電界ベクトル、電気伝導率、及び電流密度ベクトルを考慮して、電流保存則からラプラス方程式が導出される。以上の支配方程式を用いて、相対する 2 面に電位差を設定し、ポテンシャル分布と両端面の面積分から電流密度を算定した。また、境界条件として、電位を設定した 2 面以外の面は、絶縁（ $\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = 0$, $\mathbf{n}$ は端面の外向き法線ベクトル）としてノイマン条件を設定した。以上の計算方法により、異方性の有無を確認するため、X, Y, Z 方向でそれぞれ計算を行った。なお、細孔溶液で飽和した空隙領域の電気伝導率を設定する必要があるため、本研究では参考文献²⁾のイオン種・濃度を考慮して OPC-65D の電気伝導率を設定した。

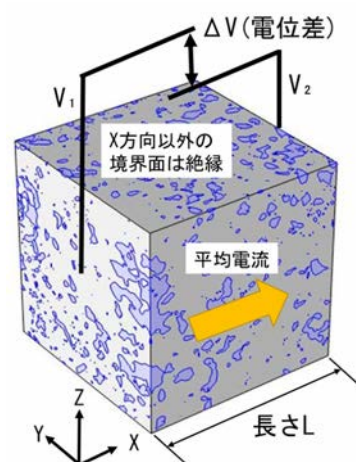


図 1 解析モデル

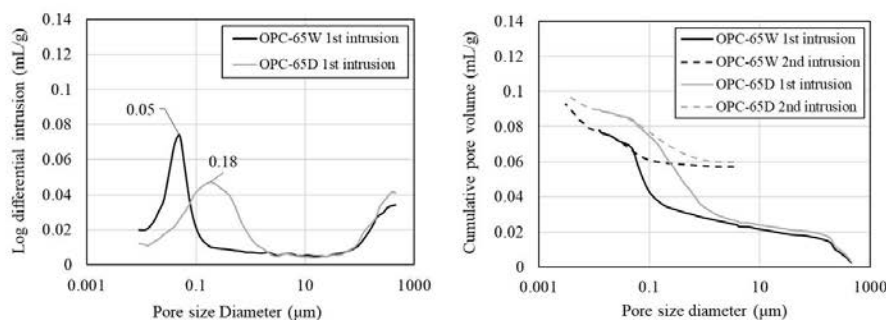


図 2 細孔径分布の測定結果

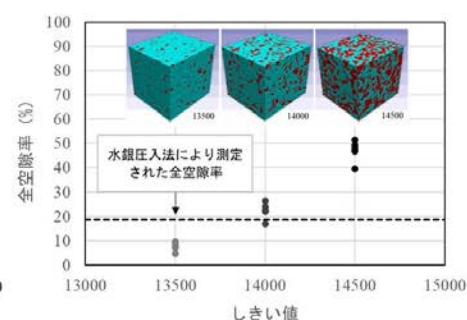


図 3 全空隙率としきい値の関係

3. 実験結果及び考察

4 プローブ法を用いて測定された電気抵抗率は、それぞれ OPC-65W ($104.1\Omega \cdot m$), OPC-65D ($79.8\Omega \cdot m$) であった。この結果より、セル定数の補正を考慮すると各供試体における電気抵抗率（真値）は、それぞれ OPC-65W ($39.4\Omega \cdot m$), OPC-65D ($30.18\Omega \cdot m$) と算定される。次に、水銀圧入法を用いて測定された細孔径分布の結果を図 2 に示す。図より、OPC-65W に比べ OPC-65D は、ピークを示す空隙径が大きくなっており、また全空隙率が増加していることから相対的に多孔質な細孔構造が形成されていることが確認できる。

次に、OPC-65D のセメント硬化体を対象として、X 線 CT を用いて撮影された断層画像から空隙モデルを作製した。本研究では、図 3 に示すように画素値を用いたしきい値を変化させ、固相・空隙のボクセルの割合が水銀圧入法により得られた全空隙率と合うように調整した。なお、全空隙に占める連続空隙の割合は 94.8% となっており、X、Y、Z 方向に連続空隙は貫通しているモデルとなっている。以上の検討結果に基づき、しきい値を 14,000 として作製した空隙モデルを用いて、4 面体テトラ要素により FEM モデルを作製し、電気抵抗率（物性値）を評価した。また、電気抵抗率の直接計算では、細孔溶液で飽和した空隙の電気伝導率を設定する必要があるが、本検討では $5.23 S/m$ とし、固相領域は $1 \times 10^{-7} S/m$ とした。図 4 に定常電流場におけるポテンシャル分布の解析結果を示す。なお、本検討では異方性の有無を確認するために X、Y、Z 方向についてそれぞれ解析を行い、得られた電流密度からセル定数を考慮してセメント硬化体の電気抵抗率を計算した。図より、X、Y、Z 方向に対する電気抵抗率の計算結果は同程度となっていることから、異方性はないことが確認できる。次に、計算値とセル定数補正後の電気抵抗率（真値）をみると、FEM の計算値は過小評価していることがわかる。これは、コンクリートの電気抵抗率（真値）には、絶縁体である骨材の影響が含まれているためと考えられる。加えて、本研究で作製した空隙モデルでは、 $2.0\mu m$ 以下の空隙は精緻にモデルされておらず、空隙の連結性が実際よりも過大評価されているためと考えられる。以上の議論により、セメント硬化体では、細孔構造に基づく空隙モデルを用いて細孔溶液中の電気伝導率を適宜設定することで、FEM 解析を用いてセメント硬化体の電気抵抗率を計算することは可能であると考えられる。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費（19H02216）により実施いたしました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 四電極法によるコンクリートの電気抵抗率試験方法（案）：土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造）Vol.74, No.4, pp.260-274, 2018
- 2) 菊地道生，金沢貴良，斎藤豪，佐伯竜彦：セメント系硬化体の電気抵抗率とその影響因子に関する検討，セメント・コンクリート論文集，Vol.66, No.1, pp.189-196, 2012

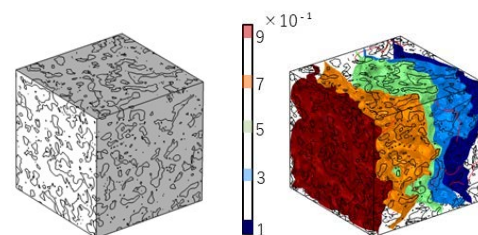


図 4 空隙モデルとポテンシャル分布の解析結果（OPC-65D）

図 5 電気抵抗率
(FEM 計算値及び真値)