

## セメント硬化体の細孔構造に基づく電気抵抗率の物性評価に関する数値解析

愛媛大学 賛助会員 竹下諒 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 東海旅客鉄道 非会員 立松佳祐

### 1. はじめに

近年、高度経済成長期に一斉に整備されたコンクリート構造物の供用年数が50年を経過し、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。近年、コンクリートの遮塩性能を評価する方法として、4プローブ法による電気抵抗率が注目されている<sup>1)</sup>。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。4プローブ法は、簡便かつ迅速に電気抵抗率を測定する方法であるが、実構造部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り、測定結果は見掛けの電気抵抗率となっている。そこで本研究では、コンクリート部材から採取したセメント硬化体を対象として、細孔構造に基づく3D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<sup>3</sup>）を使用してコンクリート供試体（φ100×200mm）を作製した。表1にコンクリートの配合を示す。養生方法は、材齢28日まで気中養生とした。以下、コンクリート供試体をOPC-65Dと称す。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、供試体は測定前に飽和处理を施した。測定後に、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及び空隙率を測定した。また、同試料を対象としてX線CTを用いて断層画像（解像度1.9μm）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中の空隙率及び連結性を考慮して、固相・液相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、一辺200μmの空隙モデルを対象としてFEMを用いて電気抵抗率を直接計算し、物性値（実測値からセル定数の補正を考慮）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表面積分から断面を通過した平均的な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（ $n \cdot J = 0$ ,  $n$ 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。以上の計算条件のもと、等方性を確認するため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液相の電気伝導率はイオン種・濃度を考慮して5.23 S/mとし、固相領域は $1.0 \times 10^{-12}$  S/mとした。

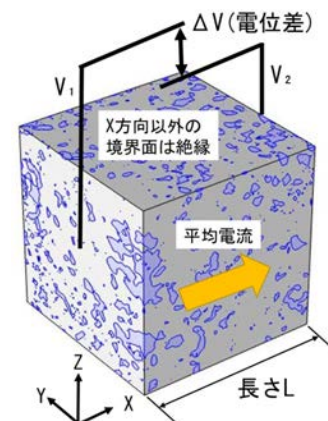


図1 FEM解析モデル

表1 配合表

配合	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				単位量 (g/m <sup>3</sup> )	
		W	C	S	G	混和剤	
						高性能AE減水剤	AE剤
OPC-65	65	165	254	913	954	2538	1.015

### 3. 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（材齢28日）は、セル定数の補正を考慮すると  $30.2\Omega \cdot m$  であった。また、別途作製した水セメント比65%のモルタルの電気抵抗率は  $15.7\Omega \cdot m$  であり、コンクリートの約52.0%であった。

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3D空隙モデルを作製した。本研究では、水銀圧入法より得られた材齢28日の空隙率に合わせるように、空隙モデルの固相と液相を区別するためのしきい値を設定した。なお、図中にはアルキメデス法で測定した空隙率も掲載している。また、約2mmの小片試料の3Dボクセルモデルから一辺200 $\mu m$ の空隙モデルを8か所抽出することで、しきい値のばらつきを検討した。図2に全空隙率としきい値の関係を示す。電気抵抗率の直接計算に用いる3D空隙モデルは、水銀圧入法及びアルキメデス法の結果を考慮してしきい値を13570として作製した。なお、作製した3D空隙モデルの全空隙に占める連続空隙の割合は80~90%となっている。図3に全空隙に占める連続空隙が88.89%のモデルの空隙領域を抽出した図を示す。

次に、4面体テトラ要素によりFEモデルを作製し、電気抵抗率を計算した。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、本検討では等方性を確認するために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算定した。図5に3ケースのモデルを用いて計算した電気抵抗率を示す。なお、計算に用いた空隙モデルをPERM-1、PERM-2、PERM-3と称する。また、本検討では全空隙に占める連続空隙が電気伝導性に与える影響を検討するために、それぞれの空隙モデルの計算結果を示している。図より、セメント硬化体中の空隙が電気伝導性に与える影響のほとんどが連続空隙によるものと考えられる。なお、X、Y、Z方向に対する電気抵抗率の計算結果は特にPERM-1では同程度になっていることから、異方性はないことが確認できる。また、3ケースのモデルの電気抵抗率の平均値は  $11.71\Omega \cdot m$  であり、モルタルの実験値 ( $15.7\Omega \cdot m$ ) より25.4%、OPC-65D ( $30.2\Omega \cdot m$ ) より61.2%低い値となった。これは、本研究で作製した空隙モデルでは硬化したセメントペーストを対象としており、絶縁体である骨材の影響が考慮されていないためと推察される。したがって、FEM解析を用いたセメント硬化体の物性評価としては妥当な結果が得られたと考えている。

### 4. まとめ

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対象として、FEM解析を用いて電気抵抗率を計算する方法を構築した。なお、セメント硬化体中の空隙が電気伝導性に与える影響のほとんどが連続空隙によるものと考えられる。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費（19H02216）の助成を受けたものである。

### 参考文献

1) JCI-TC162A：電気化学的手法を活用した実効的維持管理手法の確立に関する研究委員会報告書，2018

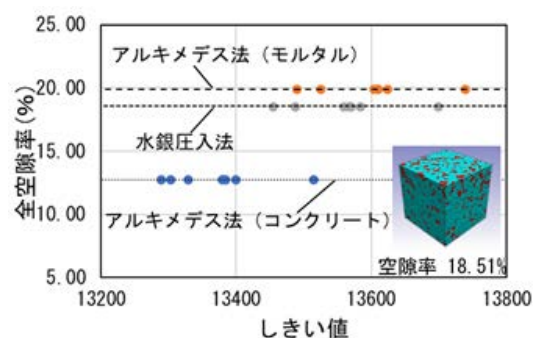


図2 しきい値のばらつき

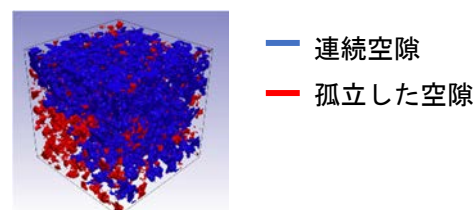


図3 全空隙及び連続空隙モデル

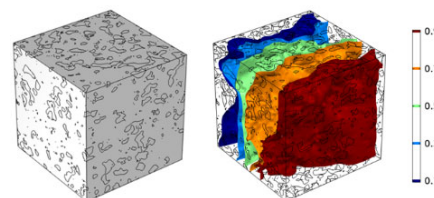


図4 FEMモデルとポテンシャル分布の解析結果

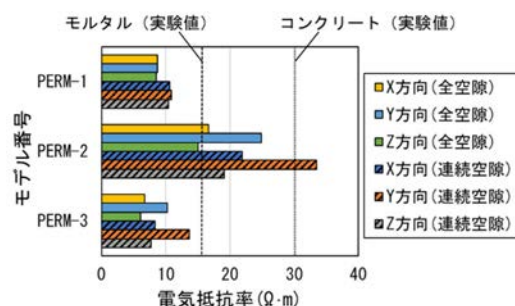


図5 電気抵抗率の計算結果  
(全空隙，連続空隙)