

X線CT画像から取得した空隙構造を用いた透気性状の検討

愛媛大学大学院 正会員 氏家勲 中国地方整備局 柴田真帆  
愛媛大学大学院 正会員 河合慶有

1. はじめに

コンクリートの力学特性および耐久性はその空隙構造に大きく依存する。このため、近年空隙構造をモデル化するにあたり、X線CTを用いて得られたCT画像を使用し、コンクリートの物質移動抵抗性を評価する研究が行われている。そこで本研究では、セメント硬化体を対象に物質移動抵抗性の指標となる透気係数を算出する透気試験を実施するとともに、X線CTを用いてセメント硬化体の空隙構造を取得し3次元の解析を行うことで、水結合材比と養生条件の異なる空隙構造の特徴を把握することを目的とした。

2. 含水状態が透気係数に及ぼす影響の検討

温度・湿度の異なる曝露環境にて、φ50×10mmの円板モルタル供試体の重量変化が定常になるまで曝露し、透気試験を実施して、異なる含水状態での透気係数を測定した。図-1に体積乾燥空隙率と透気係数の関係を示す。透気試験には、28日間水中養生および1日後脱型の気中養生を施した水セメント比40%、50%、65%、70%のモルタルを使用した。曝露環境は温度20±2℃湿度60±10%の環境、20±2℃湿度40±10%の環境、40±1℃の乾燥炉、105±1℃の乾燥炉の4つの曝露環境を用いた。体積乾燥空隙率は逸散した水分を供試体の体積で除したものである。透気係数は、養生および水セメント比の相違によらず、体積乾燥空隙率が高くなるほど透気係数は大きくなる傾向が確認された。また、同一体積乾燥空隙率で比較すると、気中養生した供試体の透気係数は水中養生したものより大きくなっているが、水セメント比の違いによる差は明確ではない。

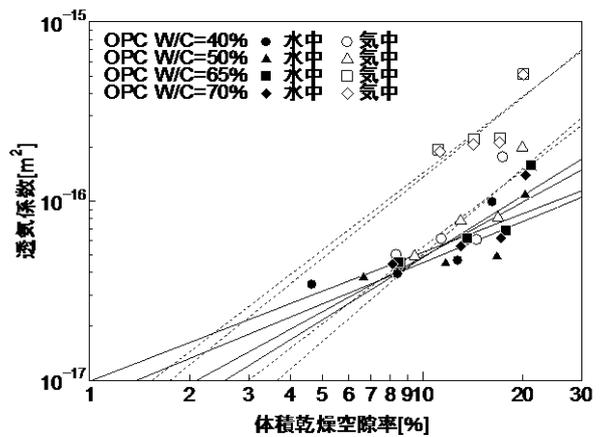


図-1 透気試験結果

表-1 水銀圧入法の測定結果

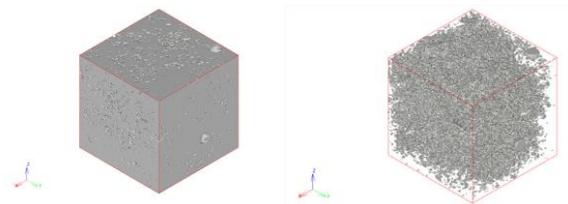
3. 水銀圧入法による空隙率の測定

水銀圧入法によって空隙構造を把握するために、細孔分布測定を行った。表-1に水銀圧入法の測定結果を示す。水中養生供試体は水セメント比が高いほど空隙率が高くなっている。また、モード径も水セメント比が高いほどモード径も大きくなる。一方、気中養生供試体は空隙率およびモード径において水セメント比40%および50%と、水セメント比65%および70%で二極化していることが認められた。

養生	水中養生				気中養生			
	W/C (%)	40	50	65	70	40	50	65
空隙率 (%)	13.453	14.111	15.447	17.114	15.415	15.596	16.992	16.059
モード径 (μm)	0.056	0.073	0.095	0.110	0.067	0.130	0.760	0.730

4. X線CT画像からの立方体モデル作成

本研究において作成した立方体構造モデルを図-2に示す。この立方体構造モデルは、水セメント比40%および65%の水中養生および気中養生を施した試料のX線CT画像から作成した。立方体構造モデルモデルの空隙部分は、画素値度数分布(ヒストグラム)を使用し、しきい値を設け画素を2値化することでモデル化した。ヒストグラムは、画像中における濃度値をもった



セメント硬化体モデル

空隙モデル

図-2 立方体構造モデル

画素値を、横軸画素値、縦軸に画素数を取ったグラフである。しきい値は、空隙とする気相部分とセメント硬化体とする固相部分の境界値であり、本研究では体積乾燥空隙率を4%、5%、6%に設定した voxel モデルおよび、水銀圧入法で測定した値に設定した絶乾状態の voxel モデルを作成した。

## 5. 均質化有限体積法による解析結果と実験結果の比較

図-3 に実験値と解析値の比較を示す。解析値は実験値より3オーダーほど大きくなっている。これは、本研究の解析モデルに用いた空隙サイズが2 $\mu\text{m}$ 以上の粗大な毛細管空隙のみを対象にしているためと考えられる。また、体積乾燥空隙率が高い場合には、それぞれのモデルで算出された透気係数は同程度となっている。一方、体積乾燥空隙率が4~6%の範囲では、養生の違いによる差が見られて、水中養生の解析モデルの方が気中養生のものより高い透気係数となっており、実験結果とは一致していない。しかしながら、いずれの養生条件においても、水セメント比の違いによる透気係数の差は小さいことが認められ、また、体積乾燥空隙率の増加に伴う透気係数の増加割合は水中養生したものの方が気中養生したものより小さく、これらの結果は、実験結果と同様の傾向を示した。次に voxel 数 50000 以上の連結空隙を抽出した空隙モデルを図-4 に示す。体積乾燥空隙率を4%から6%に増加させると、水中養生モデルの空隙は孤立した空隙が増加しているのに対し、気中養生モデルの空隙は連結性が高くなることから認められる。このことから、体積乾燥空隙率の増加が同じであっても気中養生した透気係数の増加が大きくなったことは連結性が高くなったことから説明できる。また、全空隙を対象とした乾燥体積空隙率が高い範囲での解析結果では、養生の相違に関わらず透気係数は同程度であった。これは、孤立して存在していた空隙の集合体の連結性が高くなり、全空隙を対象としたモデルでは、連結空隙体積および連結性が透過性に及ぼす効果が等価となったためと考えられる。なお、体積乾燥空隙率が4~6%の範囲における水中養生の解析モデルの方が気中養生のものより高い透気係数となった解析結果の理由は明確にできなかった。しかしながら、voxel モデルはセメント硬化体の空隙構造を、さらには空隙内での物資移動も可視化でき、このような検討においては有用である。今回は空隙率のみを水銀圧入法の結果と一致させているが、今後は実験結果をより精度よく再現するために、より微細な空隙径およびその分布を再現したモデルを用いて、また空隙の連結性を定量的に評価することなどから、セメント硬化体の物質移動特性を検討する必要がある。

## 6. おわりに

X線CT画像を用いて作成したセメント硬化体-空隙モデルにおいては、体積乾燥空隙率を4%から6%に増加させると、水中養生モデルでは、モデル中に存在する孤立した空隙が増加しているのに対し、気中養生モデルの空隙は連結性が高くなることが確認された。本研究においては、養生条件の相違による均質化有限体積法を利用した解析による透気係数の解析結果の差は、空隙の連結性および連結空隙の体積に大きく依存していることがわかった。

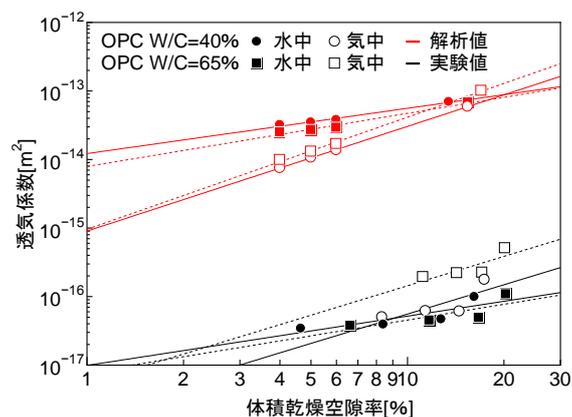


図-3 実験結果と解析結果の比較

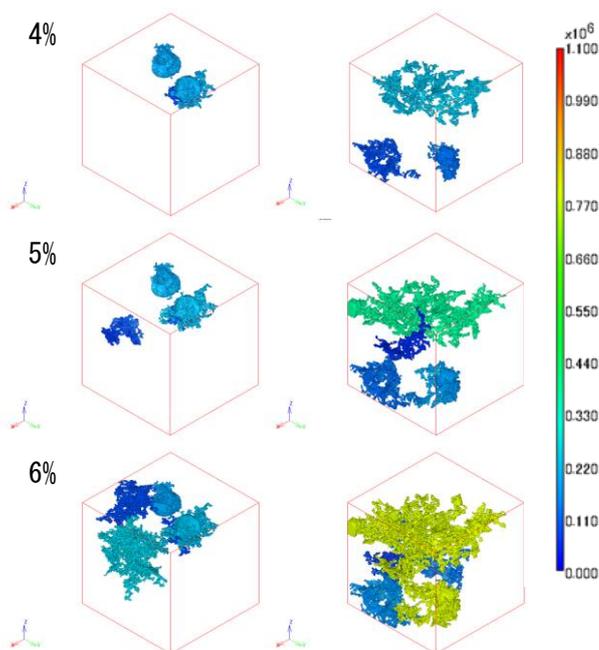


図-4 voxel 数 50000 以上の連結空隙  
OPC W/C=65% (左) 水中養生(右) 気中養生