

# X線CTによる毛細管空隙構造の取得と数値流体解析による流れの可視化

愛媛大学 学生会員 ○柴田真帆 正会員 岡崎慎一郎 氏家勲

## 1. はじめに

コンクリート中の物質移動は、主として空隙を介して行われる。そこで、近年 X 線 CT 画像を使用し、空隙構造を 3 次元のボクセルモデルとして作成することが、近年注目されている。水セメント比(W/C)の異なる、セメントペーストを作製し、X 線 CT 画像を撮影する。CT 画像から、全体の特徴を表している代表的な領域として Voxel を抽出する。これを使用し、ナビエ=ストークス式と連続式を基にした、数値流体解析を行い、空隙内の流体の流れを可視化することを本研究の目的とする。

## 2. 供試体の作製と実験概要

供試体の配合は表 - 1 に示す。直径 50mm, 高さ 100mm のモールド管で、普通セメント(OPC)を使用し、W/C=40%と W/C=65%の供試体を作製する。この供試体をダイヤモンドカッターで、厚さ 5mm×2 枚, 10mm, にカットする。前者の一方を、約 1~2mm の立方体にカットし、アセトン処理を実施後、X 線 CT 画像を撮影する。もう一方を、アルキメデス法による空隙率測定に使用する。後者は、アセトン処理を実施後、定常湿度環境に置き、重量の変化率が 24 時間で 0.02% 以下になった時点で、透気試験を実施した。

実験による空隙率は、表 - 2 に示す。この空隙率は、以下に示す、解析モデルの作成の際に使用する。

表 - 1 供試体配合

No	W/C (%)	単体量(1kg/m <sup>3</sup> )	
		W	OPC
1	40	527	1396
2	65	649	1035

表 - 2 空隙率

No	W/C (%)	全空隙率
		(%)
1	40	32.17
2	65	45.10

## 3. Voxel モデルの作成

X 線 CT 画像の中から、立方体領域で、外部の空気を含まず、均質化浸透流解析において、適切な解析時間と全体の均質性を確保した Voxel モデルを抽出する必要がある。均質性の確保として、X 線 CT 画像から最大限抽出可能であった、1 辺 512 サイズでの空隙率を基準とし、Voxel モデルのサイズを検討した。空隙率は、画素値度数分布において、しきい値を設定し、2 値化を行い、Voxel 化すると、ボクセル数から算出される。検討を行った結果、1 辺 128 サイズでは、均質化浸透流解析時間 0.5~1 時間、空隙率のバラつき 2.43 程度とバラつきが小さく、解析時間も適切であったため、以後このサイズを Voxel モデルとして採用し、均質化浸透流解析を行う。空隙率のバラつきは図 - 1 に示す。

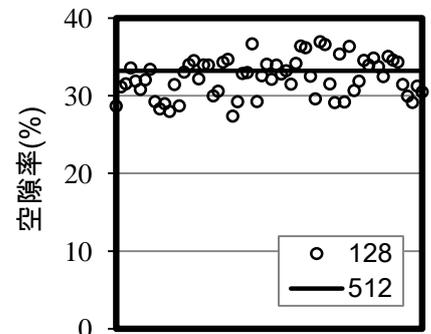


図 - 1 空隙率のバラつき

## 4. 均質化浸透流解析と、透気試験結果の比較

図 - 2 に、解析の結果を灰色で、実験の結果を黒で示す。解析結果が実験結果に比べ、W/C=40%の方は、2.7 倍、W/C=65%の方は、4.7 倍大きい結果となった。これは、X 線 CT 画像の画像寸法、断層間隔ともに 2.136 $\mu$ m のものを利用した。したがって、この解析で評価できたのは 2.136 $\mu$ m 以上の空隙ということになる。流体流れについては、空隙径の 4 乗に比例して流量が決定されるため、数  $\mu$ m オ

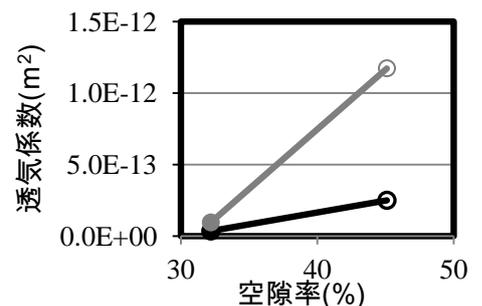
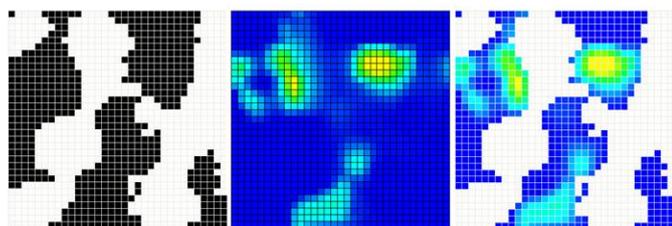


図 - 2 解析値と実験値の比較

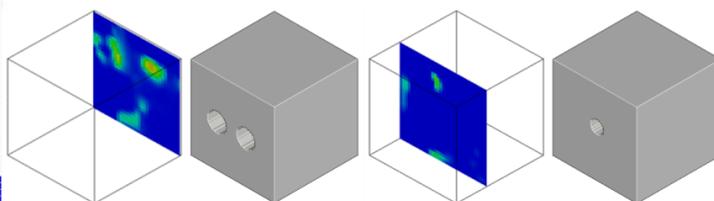
一ダムの比較的粗大な毛細管空隙が存在する時点で、nm スケールの微小空隙での流れは、流量の観点から無視でき、X線CTで取得されたイメージは、流体流れを検討するには、十分な解像度を有しているものと当初は考えていた。しかし、2.136 $\mu\text{m}$ 以上では、詳細に空隙構造を把握するのは困難であり、微小空隙の考慮は必要であるといえる。また、本研究では、アルキメデス法によって、数nm～数mmの空隙範囲で求めた空隙率を、解析では2.136 $\mu\text{m}$ 以上の空隙率で評価したために、過大に空隙を考慮したことも、誤差が生じた原因であると考えられる。

### 5. 局所化解析による、流れの可視化



左：Voxel図，中：流速コンター，右：重ね合せ  
(黒：空隙部分)

図 - 3 断面図



左：太径2本モデル，右：細径1本モデル

図 - 4 円管の貫通モデル

128サイズのVoxelモデルで、流れを把握するには200万個以上のボクセル要素を考慮する必要がある。容易に流れを可視化するため、32サイズのモデルで検討する。図-3に、解析モデルから、ある1断面を切り出し、解析の元であるVoxelモデルの図と、解析を実施後の流速が色で表現された流速コンター図、両者を重ね合せた図を示す。空隙部分が全て流路パスとして利用されるとはいえず、流れは断面的では評価できず、3次元的に評価する必要性を示唆するものであった。

また、空隙の中でも、太径と細径のどちらの影響を強く受けるかを判断するため、断面図から計算して求めた、太径および細径の径と、同程度の大きさを再現した円管を貫通させたモデルを作成し、均質化浸透流解析を行った。モデルは図-4に示す。その結果を図-5に示す。図-5の点線は、32サイズのX線CTから作成した、Voxelモデルの解析結果である。また、一番右は、太径2本と、細径1本の調和平均である。この結果から、分岐や連結する複雑な流路パスの平均的な流れは、細径の影響が強く反映される流れといえる。

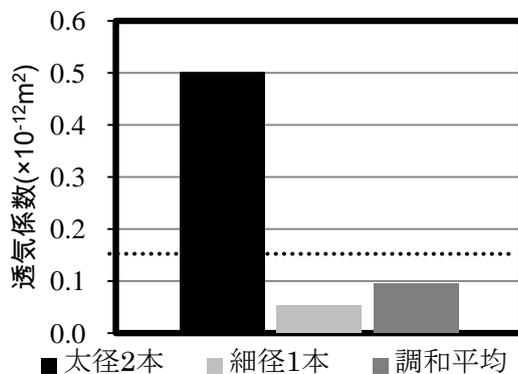


図 - 5 太径と細径の影響

### 6. まとめ

空隙内部の流体の流れは、断面では判断できず、3次元的に考える必要性を示唆する結果となった。空隙構造の中でも、太径と細径では、細径の影響を強く受ける流れとなるといえる。その流れは、太径と細径の流量の調和平均的で表現されうると考えられる。

### 参考文献

- 1) 人見 尚, 竹田 宣典, 入矢 桂史郎: セメント硬化体の空隙構造に基づいたカルシウム拡散係数の算出, 大林組技術研究所報, No.73, 2009
- 2) 寺田 賢二郎, 菊池 昇編: 均質化法入門, 丸善株式会社, 2003