

豊浦砂のデジタルデータを利用した透水シミュレーション

産業技術総合研究所 活断層研究センター 正会員 竿本 英貴
 筑波大学 大学院 正会員 松島 亘志
 筑波大学 大学院 正会員 山田 恭央
 筑波大学 大学院 正会員 羽田野 祐子

1. はじめに

地盤中の物質拡散は通常、移流拡散方程式で記述され、拡散係数と間隙流体の流速といった物理量が重要な役割を果たしていることは言うまでもないが、実際のフィールドで観察される巨視的で長期間にわたる移流拡散過程は複雑であり、地下水の平均流速による移流とガウス拡散という組み合わせではまったく説明できない¹⁾。本研究では、拡散係数の主な原因と考えられる流体力学的分散²⁾を念頭に置いて、透水問題を微視的な観点からシミュレートすることにより、透水中の間隙流体の挙動を正しく把握し、得られる知見を長期的な地盤中の拡散問題に応用しようとするものである。

2. 解析に用いたモデルと計算条件

まず、豊浦砂から多孔質体モデルを構築するために、兵庫県にある財団法人高輝度光科学研究センターが管理する大型放射光施設 (SPRING-8, BL20B2 ビームライン) において密づめ、ゆるづめの豊浦砂供試体を X 線撮影し、一連の X 線 CT 画像群を得た³⁾。この画像群を積層することで、三次化したものが図-1 であり、それぞれ 6 千万データから成っている。

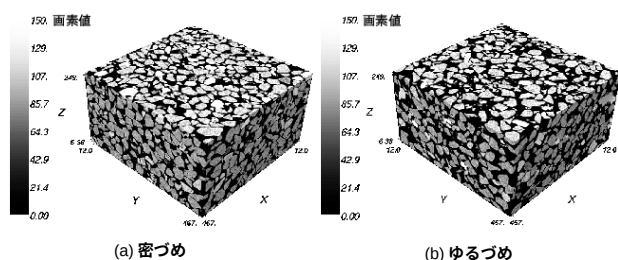


図-1 X 線 CT 画像を積層して再構成した三次元構造

計算コストの制約から、これらのモデルを用いて透水解析を行うことは現実的ではない。本研究では、可能な限り図-1 のモデルの特徴を残しつつ、計算規模を縮小した。具体的には、 480×480 pixel の画像を 60×60 pixel に解像度を落としてから、これらを積層 (61 層) し、二値化処理を経て密づめモデル、およびゆ

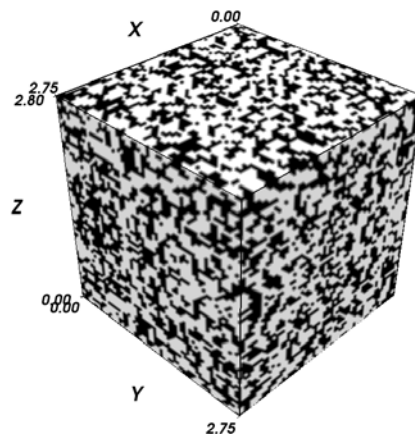


図-2 密づめモデル (間隙比:0.722, 実測値:0.725)

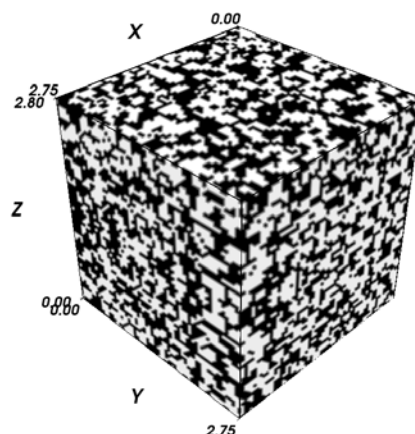


図-3 ゆるづめモデル (間隙比:0.944, 実測値:0.942)

るづめモデルをそれぞれ作成した (図-2 および図-3)。これらのモデルにおいて、白い箇所は砂粒子を、黒い箇所は間隙をそれぞれ示している。また、両モデルの寸法は x および y 方向が 2.80mm, z 方向が 2.85mm である。これらのモデルについて、粒子法的一种である SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) を用いて透水解析を行う。砂粒子部分を固定した SPH 流体粒子、間隙箇所を通常の SPH 流体粒子とそれぞれ置き換え、鉛直方向下向き (-z 方向) に一定の体積力を作用させることにより透水させ、定常状態となるまで時間を進めた。体積力は両モデルについて 1G, 5G, 10G (G は重力加速度 9.8m/s^2) と 3 種類設定し、

Key Words: 豊浦砂のデジタルデータ, SPH, 透水シミュレーション

〒305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第 7 活断層研究センター

計6ケースについての解析を実施した．両モデルの境界条件は， x, y, z の各方向について周期境界条件とした．ただし， z 方向については中央部（31層目）にて鏡面反転を施し，モデルの z 方向上下端部においてスムーズにSPH流体粒子が流入出できるように工夫している．間隙流体として水を想定し，表-1に示す物性値を与えた．

表-1 解析に用いたパラメータ

間隙流体の密度	1000 kg/m ³
間隙流体の粘度	1.0×10 ⁻³ Pa・s
カーネルの影響半径 (3h)	0.135 mm
状態方程式中のパラメータ c	1.50 m/s
時間刻み	2.5×10 ⁻⁵ s

3. 解析結果と考察

図-4は，解析結果から得られた平均流速と動水勾配の関係を示しており，これらの間にはあきらかな線形関係 (Darcy 則) が成り立っていることがわかる．透水係数は，密づめモデル，ゆるづめモデルについてそれぞれ $1.54 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$ ， $2.25 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$ となる．これらは実測されているもの^{4),5)}と比べて，想定可能な範囲内であり，SPHシミュレーションは，従来の透水実験で得られている巨視的な透水特性を再現していると考えられる．

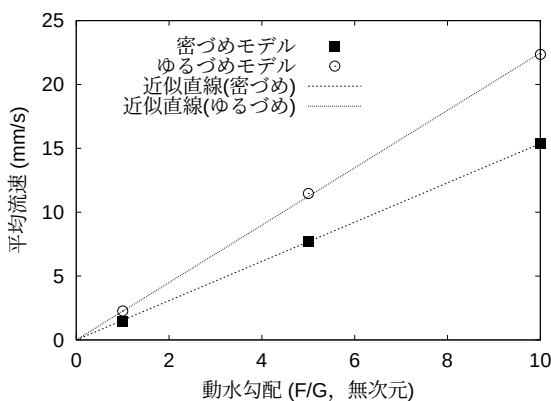


図-4 平均流速と動水勾配の関係

図-5は，体積力が1Gの場合におけるモデル内部（中央部付近の $y-z$ 平面）の流体速度分布を示したものであり，複雑な流路が形成されていることがわかる．図-6は，図-5中の黒線枠を拡大表示したものであり，砂粒子部分を避けて流れる流体の様子が見て取れる．また， z 方向流速の大きさに関する頻度分布は，透水試験中に試験体の内部を可視化計測し，求められた流速

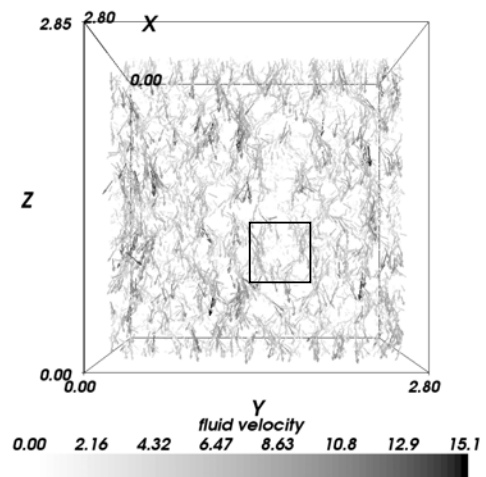


図-5 モデル中央付近 $y-z$ 断面での流速分布 (mm/s)

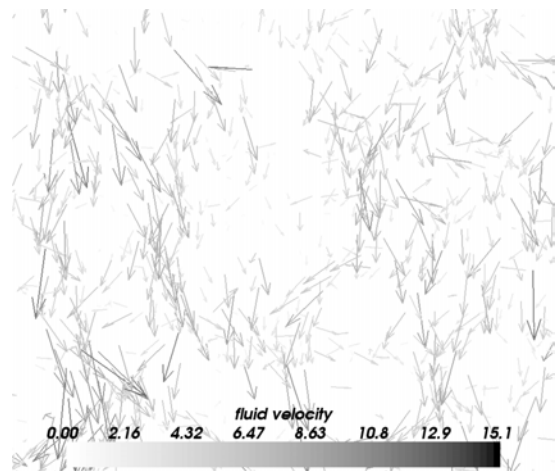


図-6 図-5中の黒線枠内を拡大したもの

の頻度分布結果⁶⁾と整合的である．

4. まとめ

豊浦砂のデジタルデータを利用した三次元多孔質体モデルを構築し，透水シミュレーションを行った．結果，透水係数などの巨視的な透水特性のみならず，局所的な流速場までを定量的に求めることができ，流速の頻度分布などに関する知見を得た．

参考文献

- 1) Adams, E. E., and L. W. Gelhar: Field study of dispersion in a heterogeneous aquifer. 2. Spatial moment analysis, Water Resources Research 28(12), pp.3293-3308, 1992.
- 2) C.W. Fetter: Applied Hydrogeology, Prentice Hall, ISBN: 0131226878, p.402, 2001.
- 3) T.Matsushima et al.: Detection of 3-D irregular grain shape of Toyoura sand at Spring-8, International Workshop on X-ray CT for Geomaterials -GeoX2003-, pp.107-112, 2003.
- 4) 岡 二三生: 土質力学, p.78, 朝倉書店, 2003.
- 5) 地盤工学会: 土質試験 基本と手引, p.91, 丸善, 2001.
- 6) 竿本ら: LAT - PIV 可視化実験手法の開発と粒子一流体系への応用, 土木学会応用力学論文集, Vol.8, pp.601-608, 2005.