

琉球石灰岩中の物質移行解析における階層的モデリングの適用性

大成建設(株) 正会員 ○増岡 健太郎, 山本 肇

1. はじめに

我が国の南西諸島に広く分布する琉球石灰岩は、同地域の離島の主要な帯水層を形成していることが多い。これらの島における淡水資源確保技術の一つとして、フローティング型地下ダムが考案されている¹⁾。フローティング型地下ダムは、地表から涵養される淡水を地盤中の塩水を置き換えて貯留する。しかし、著者らが行った室内トレーサー試験では、琉球石灰岩の空隙内を塩水から淡水へ置換させる場合、淡水への置換に長期間を要することが分かっている²⁾。この原因として、琉球石灰岩の物質移行が、大きい空隙中の移流だけでなく、低浸透性の基質部からの緩慢な濃度拡散の寄与が想定される。この現象を均質な多孔質媒体を仮定する数値解析で再現することは難しく、幅広いサイズの空隙の不均質な分布を考慮する必要がある。著者らは、異なる解像度で撮影したX線CT画像を組み合わせることで用いることにより、大空隙から基質部内の微小空隙まで幅広いサイズを有する不均質な空隙構造を直接的にモデル化する階層的モデリング手法を提案している。本稿では、本手法を琉球石灰岩中の物質移行解析へ適用した結果を述べる。

2. 階層的モデリング

本研究で提案する階層的モデリングの概念を図-1に示す。図に示すように、本モデリングは、全体モデルと局所モデルに分けられる。全体モデルは、運動方程式にダルシー則を用い、個々の解析格子を多孔質媒体として扱うモデルである。同モデルが対象とする範囲は、解析対象とする領域の全体である。本稿では、全体モデルの計算にTOUGH2³⁾を用いた。一方、局所モデルは、運動方程式にナビエ・ストークス方程式を用いる。同モデルで対象とする計算範囲は、全体モデルの1格子分の領域(部分領域)で、その領域に含まれる空隙中の流体の流れを計算する(空隙スケール解析)。空隙スケール解析での空隙部(解析格子)は、直径数mmの小径コアを高解像度のX線CT装置を用いて撮影し、得られたCT画像を二値化処理した後、全体モデルの1格子分の大きさに切出すことで作成する。本稿での局所モデルの計算にはporeFoam⁴⁾を用いた。

局所モデルの作成を複数箇所に対して行い、それぞれに対して空隙スケール解析を実施し、全体モデルの1格子(部分領域)サイズでの空隙率と浸透率の相関を求める。一方、全体モデルにおける解析対象領域の空隙率分布を、X線CT画像のCT値(X線減衰率)を基に作成する。そして、空隙スケール解析で求めた空隙率と浸透率の相関から、空隙率に応じた浸透率を全体モデルの各格子に与える。以上の方法により、間接的に空隙構造を反映させた多孔質媒体モデルを作成する。

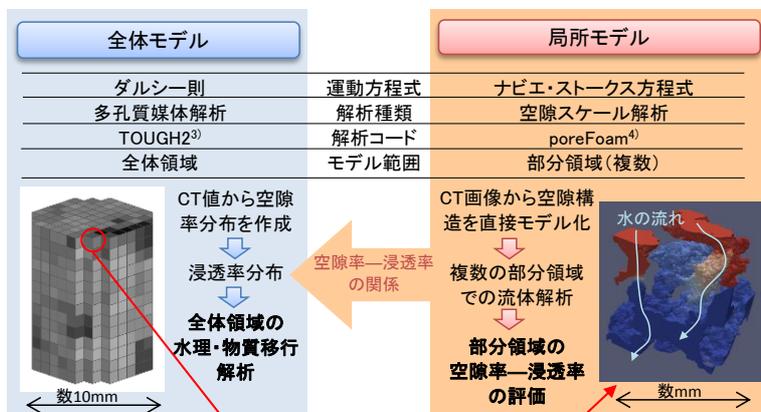


図-1 階層的モデリングの概念

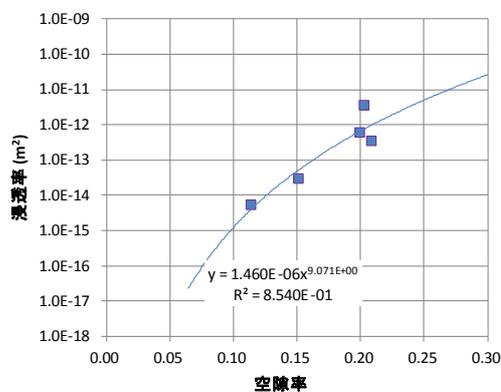


図-2 部分領域サイズの空隙率と浸透率の関係

キーワード 琉球石灰岩, テーリング, 階層的モデリング, 空隙スケール解析, アップスケールリング
 連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設(株) 技術センター TEL 045-814-7237

3. 局所モデルによる空隙スケール解析結果

図-2 に、本研究で対象とする琉球石灰岩の部分領域 (3mm×3mm×3mm, 解像度 3 μm) に対する空隙率と浸透率の関係を示す。図のように、空隙率と浸透率の間には一定の相関傾向が見られる。ただし、図中のプロットは、上下端面間を貫通する空隙の連結性がモデル上で得られた場合のみの結果を示している。今回、解像度 3 μm で部分領域の作成を行ったが、空隙率が約 0.2 より小さい部分領域では十分な数のプロットが得られていない。すなわち、空隙率が 0.2 未満となる部分領域では、空隙の連結性が乏しく、浸透率が極めて小さい可能性が示唆される。以上より、次章の全体モデルの作成において、空隙率が 0.2 より小さい格子の浸透率には、実質不透水となる $1.0 \times 10^{-17} \text{m}^2$ を与えることを基本にする。

4. 全体モデルによる物質移行解析結果

3 で得た空隙率と浸透率の関係をを用い、コアスケールの琉球石灰岩のモデルを作成した。そして、著者らが過去に実施した室内トレーサー試験²⁾の濃度変化の再現解析を行った。解析コードには、TOUGH2 (EOS7) をを用い、塩水の移流と拡散を考慮した。解析では、塩水飽和した状態を初期状態とし、上方から淡水を注入し下方から排水する。

解析結果と試験結果の比較を図-3 に示す。同図の横軸は積算流出量を供試体の空隙体積で除したポアボリューム (PV), 縦軸は下方排水位置での初期濃度に対する相対濃度である。D100 は、直径 100mm, 長さ 100mm の供試体を用い、比重 1.03 の塩化ナトリウム水溶液で満たした試料に淡水をダルシー流速 $1.6 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ で注入した場合の結果である。D50 は、直径 50mm, 長さ 50mm の供試体を用い、比重 1.53 のヨウ化カリウム水溶液で満たした試料に淡水をダルシー流速 $2.9 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ で注入した場合の結果である。実験結果を見ると、同一の PV で見た場合、D100 の方が D50 より高い濃度を維持しているが、時間ともに両者の濃度は漸近していることが分かる。一方、解析結果は、全体的な濃度は実験値より低いものの、上記の濃度変化の特徴をとらえている。図-4 に PV が約 7 の時点での解析モデル内の相対濃度分布を示す。図中のピンク色で囲った領域は、浸透率が実質不透水の部分であり、その周辺との物質移行は移流ではなく拡散が支配する。流速の速いケース (D50) では不透水部分に高濃度の溶液が残留しているのに対して、流速の遅いケース (D100) では不透水部と周辺の濃度が均一化していることが分かる。すなわち、図-3 において D100 の濃度が D50 より高い理由は、拡散による濃度の均一化により、不透水部における高濃度溶液の残留効果によるテーリングが比較的小さく見えているためと考えられる。上記から、階層的モデリング手法は、流速条件等により変化する不均質な岩石中の移流と拡散の相互作用を再現する上でも有用であることが分かった。

4. まとめ

異なる解像度で撮影した X線 CT 画像を用いた階層的モデリングを琉球石灰岩に対して適用した。解析結果より、階層的モデリング手法は、琉球石灰岩などの非常に複雑な空隙構造を有する岩石の物質移行の予測やメカニズムの解明に有効であり、解析結果より、基質部などの低浸透率部分からの濃度拡散が全体の濃度変化に大きく影響することが分かった。今後の課題として、空隙率の低い部分の浸透率評価や、実スケールへのアップスケールが考えられる。

参考文献 1) 農林水産省農村振興局企画部資源課, 内閣府沖縄総合事務局農林水産部土地改良課: 淡水レンズを活用した水源開発を目指して、「淡水レンズ開発調査」「淡水レンズ強化技術実証調査」調査成果の概要, 2008. 2) 増岡健太郎, 山本肇, 青木智幸: 浮き型地下ダムにおける効率的淡水取水方法と塩淡境界挙動に関する研究, 大成建設技術センター報, Vol. 43, pp. 307-312, 2010. 3) Pruess, K., Oldenburg, C. and Moridis, G.: TOUGH2 user's guide. Version 2.0, Report, LBNL-43134, 1999. 4) Bijeljic B., Raeni, A., Mostaghimi P. and Blunt, M. J.: Predictions of non Fickian solute transport in different classes of porous media using direct simulation on porescale images, Physical Review E. 87, 2013.

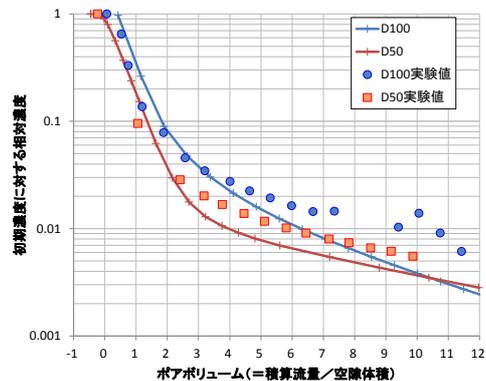


図-3 下流側での濃度変化

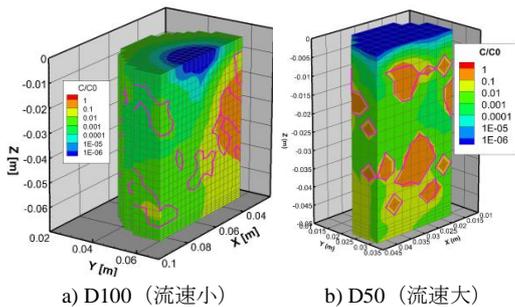


図-4 モデル内相対濃度分布 (PV≒7)