

亀裂の不均質性パラメータを用いた流体・物質移動解析評価

核燃料サイクル開発機構	正会員	○武部 篤治	核燃料サイクル開発機構	非会員	澤田 淳
核燃料サイクル開発機構	非会員	内田 雅大	日立エンジニアリング	非会員	山本 朝男
株式会社ペスコ	非会員	村岡 保	株式会社ペスコ	非会員	佐藤 成二

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分に関する「地層処分研究開発第2次取りまとめ」(1999年11月)では、花崗岩等の結晶質岩をレファレンスケースとして亀裂性岩盤を対象とした核種移行評価が実施されている¹⁾。その際、亀裂毎の透水量係数の不均質性に着目した均質一次元平行平板モデルを重ね合わせた手法が用いられているが、第2次取りまとめ以降の課題として亀裂内不均質性の検討が信頼性向上の議題として挙げられている²⁾。本研究では、亀裂開口幅の不均質性が亀裂の平均的な水理・物質移行特性に与える影響について検討することを目的として、セルオートマトン法の一つである格子ガスオートマトン法(以下LGA法)を適用した流体・物質移動解析コードを開発した³⁾。本報告では、上記の解析コードを用いて、LGA解析結果と実際の物理量とを対比検討し、亀裂開口幅の不均質性を表現可能な数学モデル/パラメータについて既存文献から整理するとともに、その中から選択したモデル/パラメータを用いて亀裂開口幅の不均質構造を作成し、流体・物質移行解析を行うことによりパラメータが与える影響について検討を行った。

2. LGA解析結果の物理量との対比検討

LGA法の計算アルゴリズムには物理量の概念が存在しないため、圧力・流量などの物理量を直接計算することができない。そのため、LGA法によって得られる解析メッシュ点での粒子の微視的状态(粒子の個数と運動方向)を「疎視化」(時間間隔や空間領域を設定して統計的なばらつきを有する粒子の微視的状态を平均化)することで、圧力・流量などの巨視的変数を得るようにした。次に、LGA解析結果から物理量へ変換する関係式をNavier-Stokes方程式や既往の研究⁴⁾などを参考にして検討・導出した。さらに、理論解に対応する物理量が既知である単純化モデルとして、二次元Poiseuille流れについて、実施したLGA解析の算出結果と既知の物理量の比較を行った。しかし、理論値と計算値の比較では物理量を精度良く表現できなかったため、精度向上を目指して検討する必要がある。

3. 亀裂内不均質性評価パラメータの選定と三次元モデルの作成

亀裂開口幅の不均質性は亀裂面の凹凸形状、開口幅のバラツキなどで表現できると考えられる。そこで、不均質性を表現するパラメータの選定のため、既往研究の調査を行った。既往研究(例えば5))によると、水理学的影響については、開口幅の分散や破面の凹凸形状が大きな影響を及ぼすこと、相関長やフラクタル次元に関しては二次的な影響に止まることが指摘されている。この結果から流体・物質移動特性に及ぼすパラメータとして、亀裂破面高さの標準偏差 σ_s (破面粗さを表現したパラメータ)、亀裂開口幅の標準偏差 σ_a (開口幅不均質性を表現したパラメータ)の2つを選定した。

また、単一亀裂形状の数値モデル作成手法には、亀裂モデルに対して使用実績のあるGloverら(1997)⁶⁾のモデルに注目した。Gloverらのモデルによって生成される亀裂は、亀裂を構成する1対の破面形状(高さ分布)を持っているので、流体・物質移動の三次元的な取り扱いや二次元分布のみ用いるReynoldsの方法にも適用可能である。よって、三次元物質移動解析の亀裂モデル生成手法としてGloverの数学モデル手法を使用した。この数学モデルに基づいて、三次元亀裂モデルを生成し、LGA解析コードに適用できるようにプログラムを改良した。Gloverの手法による再現性を確認し、このプログラムの妥当性を証明したため、このコードを用いて解析を実施することとした。

4. LGA法による流体・物質移動解析と結果

前項の手法により構築した亀裂モデルについて、LGA解析コードを使用して、流体・物質移動解析を実施した。亀裂内流体・物質移動特性に及ぼすパラメータ(上記3項)は10ケースを設定し、またそれぞれの亀裂モデルに対して正方向、その逆方向、亀裂面と平行に90度回転方向、その逆方向の計4方向を各ケースで検討し、計40ケースの解析を実施した。ここでは、開口幅の平均値を比較的大きな値に設定したため、実際の亀裂と違い閉塞部分は存在しない。解析結果の代表例として、基本ケースであるCase01($\sigma_s=0.6$, $\sigma_a=0.2$)の結果を図1~3に示す。亀裂開口幅分布を図1に、+x方向流れの流速ベクトル分布を図2に、+x方向流れのトレーサ濃度分布(注入濃度50%到達時)を図3に示す。以上の解析から、物質移動解析結果に与える亀裂内不均質性パラメータの影響について、以下の結論を得ることができた。

- ・流体解析について、亀裂破面高さの標準偏差 σ_s の増加とともに、透水量係数が減少する。これは3次元流路長の増加と亀裂破面の凹凸が大きくなったことによる鉛直方向速度成分の増加によるものと考えられる。一方、亀裂開口幅の標準偏

キーワード：地層処分、格子ガスオートマトン法、亀裂開口幅、不均質性パラメータ

連絡先 〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33 電話 029-287-1111 fax029-282-9295

差 σ_a が増加すると水平方向流線の偏りが大きくなりチャンネルが発生するが、透水量係数への影響は小さい。ただ、閉塞部が存在しないように、開口幅の平均値を大きな値に設定しているため、実現象とは異なる可能性がある。

・物質移動解析について、 σ_s はトレーサの濃度分布への影響は小さいが流速に大きく影響し、 σ_s の増大とともにトレーサ流速が減少する。これは亀裂破面の凹凸が大きくなり 3 次元的な流路長が増加するためと考えられる。また、 σ_a が増加するとチャンネルに沿ってトレーサが速く進み、大きな偏りをもつ分布となるが、トレーサ流速への影響は小さい。ただし、これも上記と同じく、実現象とは異なる可能性がある。

・異方性のある亀裂では、流れの方向によってトレーサ流速が変わるが、その大きさは亀裂の各方向の σ_s の大きさによって決まると考えられる。

・図 4 に各解析ケースの各開口幅（水理学的開口幅 b_h 、物質移行開口幅 b_t 、マスバランス開口幅 b_m ）と σ_s の関係を、図 5 には各開口幅と σ_a の関係を示す。Sillman(1989)⁷⁾ の分類による各開口幅の大小関係「 $b_t < b_h < b_m$ 」は $\sigma_s \cdot \sigma_a$ に関係なく成立している。また図 4 では σ_s の増加により $b_h \cdot b_t$ が減少しているが、図 5 では σ_a に関係なく各開口幅はほぼ一定値を保っている。つまり、亀裂破面の粗さが大きく影響することがわかった。

5. おわりに

LGA 解析結果の物理量の対比においては、LGA 解析結果から物理量を推定できる見通しを得たものの、推定できる物理量の精度が十分でないという課題が明らかとなった。また今後、実際の岩体を用いた透水トレーサ試験、及び研削による開口幅評価⁸⁾から得られるデータを本手法に適用することにより、一次元平行平板モデルに簡略化した場合のパラメータ推定方法などを検討する予定である。

【参考文献】1)核燃料サイクル開発機構(1999)：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分技術の信頼性”，-地層処分研究開発第2次取りまとめ- 分冊3 地層処分システムの安全評価”，JNC TN1400 99-023. 2)核燃料サイクル開発機構(2002)：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発—平成13年度報告—，JNC TN1400 2002-003, pp.2-1～2-5. 3)吉野ら(2003)：セルオートマトン法による流体・物質移動解析手法の開発，第58回土木学会年次学術講演会, CS7, pp.403～404. 4)J.A.Somers, P.C.Rem(1992)：“Obtaining Numerical Results from the 3D FCHC-Lattice Gas”，Lecture Notes in Physics, Vol.398, pp.59～78. 5)L.Moreno, et al. (1990)：“Some Anomalous Features of Flow and Solute Transport Arising from Fracture Aperture Variability”，Water Resources Research, vol. 26, No.10, pp.2377～2391. 6)P.W.J.Glover, et al. (1997)：“Fluid flow in fractally rough synthetic fractures”，Geophys.Res.Lett., Vol.24, pp.1803～1806. 7)S.E.Silliman(1989)：“An Interpretation of the Difference Between Aperture Estimates Driven from Hydraulic and Tracer Tests in a Single Fracture”，Water Resources Research, vol. 25, No.10, pp.2275～2283. 8)澤田ら(2004)：NETBLOCK 研削装置による亀裂開口幅評価，第59回土木学会年次学術講演会投稿中。

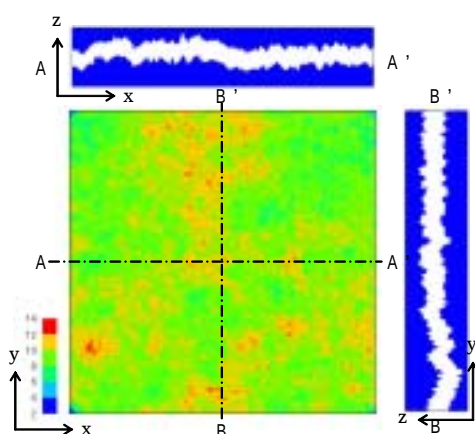


図1 亀裂開口幅分布 (Case01)

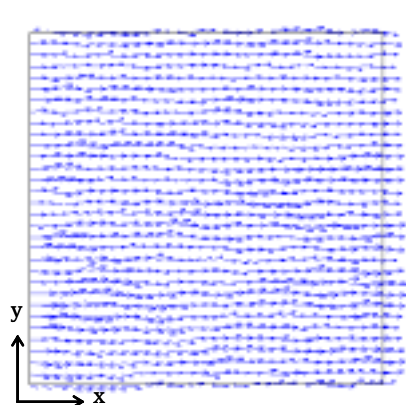


図2 +x方向の流速ベクトル分布

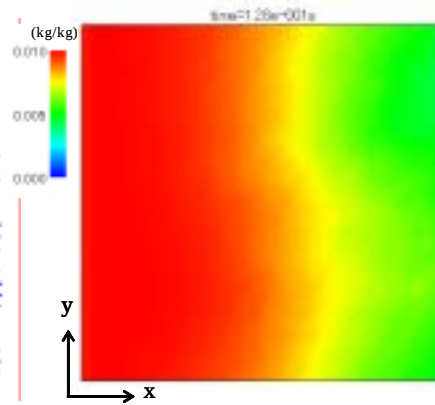


図3 +x方向のトレーサ濃度分布
(注入濃度50%到達時)(Case01)

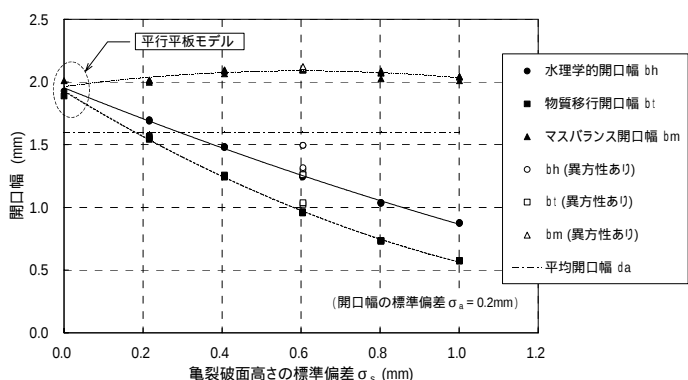


図4 各開口幅($b_h \cdot b_t \cdot b_m$)と亀裂破面高さ標準偏差 σ_s の関係

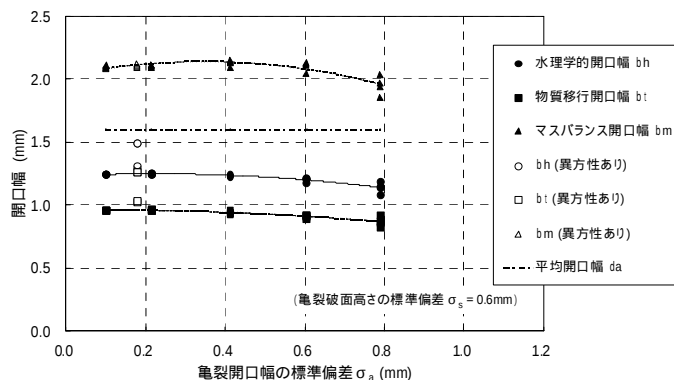


図5 各開口幅($b_h \cdot b_t \cdot b_m$)と亀裂開口幅標準偏差 σ_a の関係