

亀裂内浸透流における数値解析技術に関する研究

香川大学 賛助会員 ○金山友美, フェロー会員 吉田秀典
富山大学 瀬田 剛

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分における処分施設の安全性の評価には、亀裂内の透水性を把握しておくことが重要である。亀裂内浸透流を把握するには、実験的手法では亀裂内の透水特性を正確に計測するのは困難であるため、数値解析的手法を用いて調べるのが重要であるとされている。亀裂内の浸透解析を行うに際して重要となるのが、境界条件の設定、物性値の設定、そして解析メッシュの細かさなどが挙げられる。近年、数値解析手法は向上され、例えば格子ボルツマン法（以降、LBM と称する）などは、境界条件の設定が容易であるだけでなく、解析メッシュ上の開口幅で流れが規定されるので透水係数などの入力をする必要がない。一方で、解析メッシュについては、その細かさなどが解析結果に与える影響が大きいことから、本研究では、LBM をベースに、特に解析メッシュに主眼を置いて数値解析技術に関して検討することとした。

2. 格子ボルツマン法

LBM とは流体を微小な仮想粒子の集合体として近似した領域に均一な格子を配置し、その格子に沿って衝突・並進といった粒子運動を追跡することで連続体としての流体の運動を計算する手法である。本研究では、格子形状として、図1に示すような2次元9速度モデルを適用することとする。このモデルでは、格子点ごとに、ある方向の速度成分を持つ仮想粒子が存在すると考え、各粒子はタイムステップが1つ進むと隣接した格子点に移動し、同じ格子点に移動してきた粒子はお互いに衝突する。仮想粒子の衝突および並進が繰り返されることで計算が進行する。

3. 障害物ユニット座標の自動抽出化

LBM では基本的に二次元平行平板間の流れ解析を行うが、流れ場にいくつかの格子を一つにまとめた正方形の障害物（以下、障害物ユニットと称する）を配置することが可能であり、この障害物ユニットの配置位置を工夫することで亀裂形状を表現し流動解析を行うことができる。障害物ユニットはx方向、y方向の格子数を設定することで大きさを決め、配置座標を入力することで複数配置することができるが、手動による障害物ユニットの座標の入力は多くの時間を要する。そこで本研究では、自動で障害物ユニット座標を求められる解析プログラムを作成することにした。

供試体の亀裂データの一部を基にして障害物配置座標を手動入力したものと、自動で求めたものとの結果を図2に示す。なお、自動抽出プログラムは、図2のような正方形グリッド線を配置したとき、亀裂上端より上、亀裂下端より下の正方形をすべて障害物ユニットとみなし、境界部分においては亀裂の値が正方形の重心より上にあるか下にあるかで障害物ユニットとみなすかどうかを判断する。両者の座標を比べると、手動入力と大きな差がなく自動抽出できていることが分かる。データを自動抽出することで、大量のデータが素早く作成できるため、長きにわたる亀裂データについて扱いが容易となる。

4. 岩盤亀裂内を対象とした流動解析

障害物ユニットの大きさを 10×10 にしたものと、 2×2 にしたもの2通りで実際に行われた透水試験（参考文献）の供試体の亀裂データの一部を用いて流動解析を行い、得られた結果より障害物ユニットの大きさの違いによる流動の変化について検討し、さらに、解析結果と透水試験の実験結果を比較し考察を加える。

障害物ユニットの大きさを 10×10 および 2×2 で解析した場合の正規化平均流速のx軸方向分布図を図3に示す。 10×10 において極端に流速が大きくなっている箇所があるが、これは障害物ユニットが大きいため流路が急縮になるからである。本来、急縮ではエネルギー損失が生じるが、LBM では考慮されていないため、解析結果が部分的に極端に大きくなる。 2×2 では、障害物ユニットが小さく、急拡・急縮の程度が軽減されるため、

10×10 のように流速が極端に大きくなる現象は見られなかった．このように，LBM のような手法に対しては障害物ユニットの大きさを十分に小さくする必要があると言える．一方で，2×2 では流入部の流速に対して流出部の流速が 14 倍程となっており，10×10 と比べかなり大きくなっている．これは，図5に示すように，開口幅が狭い箇所を小さな障害物ユニットで表現しようとする時，実際の開口幅よりさらに狭くなる場合があることが原因と考えられる．そこで，開口幅が 0.15mm 以下となっている特に狭い箇所のみ，障害物ユニット 2×2 の方の亀裂上下の障害物を一つ分取り除いて解析を行った．この結果を pattern1 として図3に併せて示したところ，2×2 と比べ pattern1 は大幅に値が下がって 10×10 の結果に近いものとなり，かつ，局所的に速度が大きくなることもなかった．

次に，実験値と解析値を比較するため，水頭差と透水量の関係を図4に示す．図4の cubic law(overall average) と cubic law はそれぞれ供試体全体の平均開口幅と本研究で LBM 解析を実施した範囲のみの平均開口幅を用いて開口幅の三乗則による計算を行ったものである．また，LCL (Local Cubic Law) は局所的に三乗則が成立することを仮定した 2 次元浸透流解析を行った結果である．そして，experiment は実験による透水量の計測結果を，LBM(pattern1)，LBM(2×2)，LBM(10×10)は LBM による解析結果を示す．LBM は，エネルギー損失が考慮されていないものの，三乗則や LCL よりも実際の透水量に近い値を求められることが確認できた．また，LBM の中でも pattern1 の結果が実験値と非常に近い値となり，解析で用意するメッシュや格子が実際の亀裂形状に近ければ，実験値と近い透水量が得られることが分かった．

5. まとめ

本研究では，亀裂内浸透流の数値解析技術について考察することを目的として，LBM を対象として，その解析条件を変えて解析を行い，さらには解析結果と実験結果の比較を行った．LBM は他の解析手法と比べて精度のよい解が得られるが，その前提として，解析メッシュが現実のものと近いということが挙げられる．当然ではあるが，解析メッシュについても，それが細かいほど精度がよく，こうした亀裂内浸透流の解析を行う際には，目的と計算機のパフォーマンスに応じて，より適切な解析手法を選択することが望まれよう．

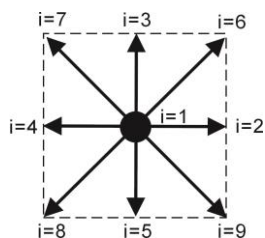


図 1 2次元9速度モデル

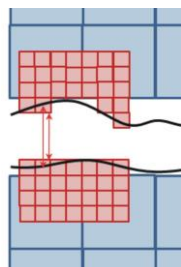


図 5 開口幅が狭くなる例

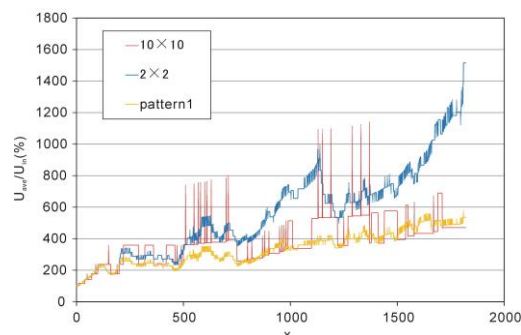


図 3 正規化平均流速の x 軸方向分布

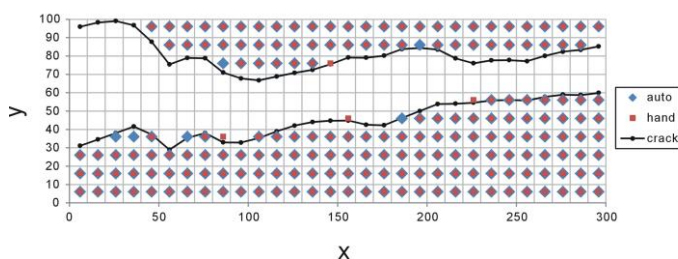


図 2 実際の亀裂と障害物ユニット

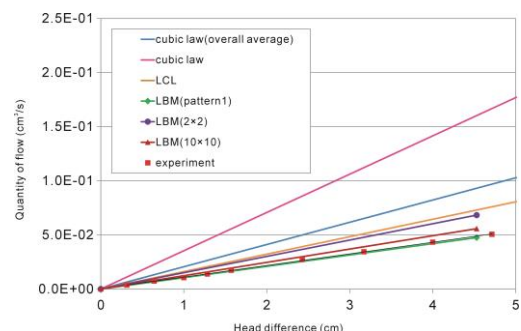


図 4 水頭差と透水量の関係