

領域分割法による割れ目ネットワーク浸透流解析手法の大規模化・高速化

鹿島建設(株) 正会員 ○並川 正 羽根幸司 田部井和人 升元一彦
鹿島建設(株) フェロー会員 森川誠司

1. はじめに

放射性廃棄物地層処分施設の建設予定地の調査、設計の際には、事前に地層構成、断層、岩盤の割れ目特性などの情報をできる限り取得し、天然バリアとしての地下水流動特性および物質移行特性などの情報を把握する必要がある。地下数 100m 深度の岩盤中に定置される廃棄物からの放射性物質の移行経路を的確に評価するには、広範囲な領域の岩盤をモデル化し、安全評価のための物質移行解析を行う必要がある。これまで筆者らは、割れ目ネットワーク浸透流解析プログラム（以下、LT-FLOW）を用いて岩盤の地下水流動特性および物質移行特性を把握する解析を行ってきたが、割れ目数が非常に多くなる大規模な岩盤モデルに対しては、計算容量や計算時間が膨大になり、実務上の適用が困難となるため、LT-FLOW の大規模化・高速化が望まれていた。そこで今回、LT-FLOW に領域分割法による並列計算を適用し、大規模化・高速化に対応するための改良を行った。本報文ではその概要と検討結果の一部について報告する。

2. LT-FLOW と領域分割法による大規模化

LT-FLOW が用いる割れ目ネットワークモデルは図-1 のように割れ目を格子状の管路（パイプ）網でモデル化するとともに、割れ目同士の交線にもパイプを追加し、上流側から下流側への流路形成をパイプのネットワークとしてモデル化するものである^{1),2)}。

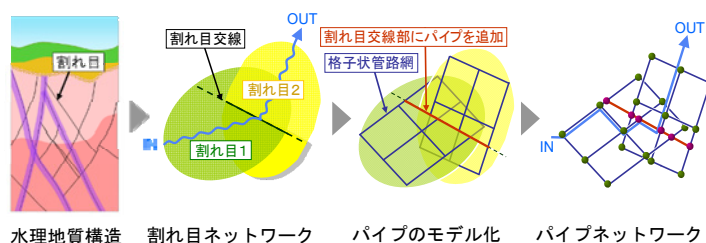


図-1 パイプネットワークのモデル化のイメージ

領域分割法は大規模な解析領域をいくつかの小領域に分割し、それぞれの小領域の境界部分で隣合う領域と情報交換を行い整合させることで、全体領域を解く手法である。LT-FLOW ではこの領域分割法と、PC クラスタ上で複数ノード並列が可能となるように分散メモリ型の MPI（Message Passing Interface）による並列化を導入した。なお、従来の LT-FLOW では 15 万個程度の割れ目ネットワークモデルの適用が限界であった。図-2 に 200m 立方領域を XYZ 方向にそれぞれ 2 分割し、合計 8 個の領域に分割したイメージを示す。

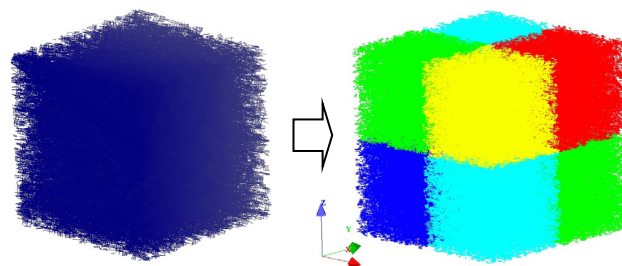


図-2 領域分割する前のモデルを領域分割する場合のイメージ（色は領域区分を示す）

3. 検討結果

3.1. 簡易計算検討

100m 立方領域に 10 万個の割れ目を発生させた仮想的な割れ目モデルに対して、領域分割法による 8 分割の並列計算をした場合としない場合のそれぞれのケースについて LT-FLOW による浸透流解析を行った。マシンは Intel Core i3、4CPU、メモリ 32GB を 2 台使用している。図-3 は並列計算によって得られた全水頭分布である。並列計算した場合の計算時間と、しない場合の計算時間の比を高速化率と定義し、表-1 には今回のプログラム改良による高速化率の一覧を示す。領域分割法による並列計算を行うことで、10 万個の亀裂数の場合の高速化率は、改良する前の約 4 倍となった。さらに割れ目数

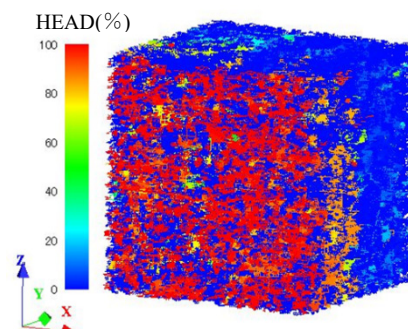


図-3 仮想的な割れ目モデル（割れ目数 10 万個）での全水頭分布

キーワード：岩盤、割れ目ネットワークモデル、領域分割法、並列計算、浸透流

連絡先 〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30 KI ビル 鹿島土木設計本部 TEL 03-6229-6793

の大きいモデルで検討したところ、約 26 万個および約 51 万個のモデルについては、領域分割しない場合は解析不能であったが、領域分割して並列計算した場合は、計算時間については二次関数的に増加するものの概ね実用に耐える時間で解析ができる結果が得られた。

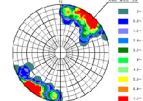
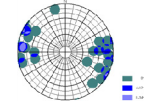
3.2. 実際の岩盤を模擬したモデルの検討

Äspö 地下研究所周辺岩盤のボーリングデータから取得した岩盤の割れ目特性を持つデータセットを用いて、上記で示した領域分割法による並列計算を使って解析した結果を示す。表-2 に割れ目セット毎の走向傾斜、割れ目半径分布のフィッシャー係数、べき乗数、割れ目最小半径、割れ目密度 P_{32} のデータを示す^{3),4)}。この割れ目セットを使って、200m 立方の領域に 27 万個の割れ目を発生させたイメージを図-4(a)に示す。この割れ目分布から作成した割れ目ネットワークモデルを使って浸透流解析を行い、求められた全水頭分布を図-4(b)に示す。全水頭分布の図からは上流側から下流側への全水頭が領域分割部分でのステップが発生することなくスムーズに計算できていることが確認できる。また、図-4(c)に上流側の一か所から 100 個のパーティクルを発生させた場合の経路を示している。下流側に進行するにつれて粒子が拡散している様子が確認できる。

表-1 プログラム改良による高速化率

モデル		model1	model2	model3
計算時間	亀裂数	100, 000	256, 000	512, 000
	改良前	3. 7hr	解析不能	解析不能
	改良後(領域分割法)	0. 9hr	2. 5hr	13. 2hr
	高速化率	4. 2	—	—

表-2 割れ目データセット

割れ目のセット	①	②
卓越方向の走向傾斜	N54. 9W 86. 9S	N16. 3E 89. 2S
Fisher 定数	13. 6	12. 7
べき乗数	3. 7	3. 7
割れ目の最小半径(m)	2. 5	2. 5
$P_{32}(m^2/m^3)$	0. 59	0. 18
割れ目の分布 (色は割れ目頻度)		

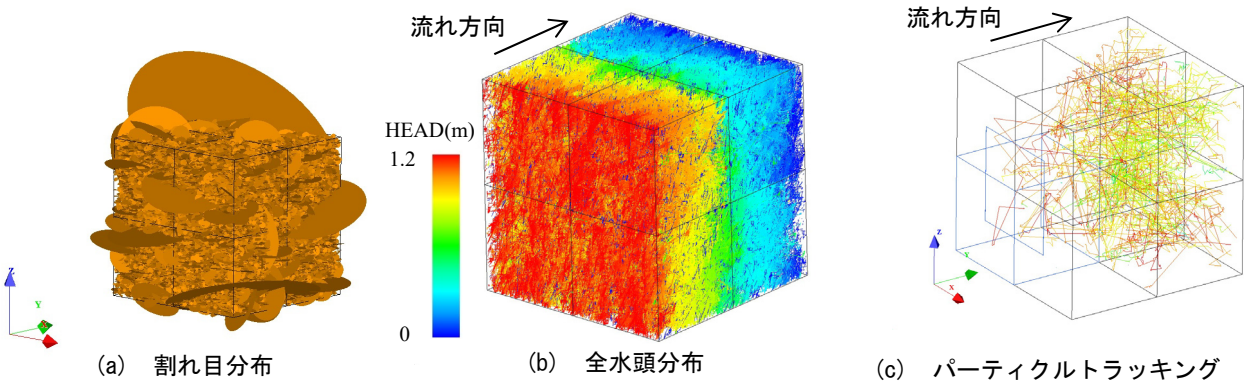


図-4 Äspö 地下実験施設の亀裂特性に基づく割れ目モデル (割れ目数約 27 万個)

4. まとめ

将来予測される地層処分施設建設地の選定プロセスには、数 km スケールの解析領域での割れ目ネットワーク浸透流解析を実務的な時間や労力で可能とする超大規模化・高速化が必要となってくる。今回はその一端として、割れ目ネットワーク浸透流解析プログラム (LT-FLOW) の領域分割法を用いた並列計算の試みを紹介した。本検討の結果、LT-FLOW の領域分割法による並列計算の改良効果が明らかとなったが、計算速度の面などで未だ課題が残る。これらの課題を解決することで、より広範囲な領域で地質構造をモデル化できるようになり、地層毎の割れ目特性の違いや不均質性を十分表現できる可能性があるため、安全評価に向けてさらに有効な手法になり得ると考えられる。なお、割れ目データセットの設定に際して SKB およびダイヤコンサルサント(株)に協力いただいた。謝意を表す。

参考文献

1)中畠ほか: 割れ目ネットワークモデルによる地下水流動および物質移動解析 (その 1 ～ 2), 第 68 回土木学会年講 CS1-040,041, 2013.9 2)升元ほか: 割れ目ネットワークモデルを用いた物質移動に関する研究(その 2 ～ 3), 第 69 回土木学会年講 CS9-046,047, 2014.9 3)田部井ほか: 坑道周辺のボーリング調査に基づく割れ目情報が物質移行時間に与える影響に関する検討, 第 74 回土木学会年講 VII-160, 2019.9 4) SKB : Application of the Observational Method in the Äspö Expansion Project, SKB R13-44, 2014