

き裂ネットワークモデルを用いたき裂性岩盤における物質移動シミュレーション

琉球大学大学院	学生会員	○広瀬 孝三郎
琉球大学	正会員	松原 仁
琉球大学大学院	学生会員	江戸 孝昭
琉球大学	正会員	原 久夫

1. はじめに

岩盤中のき裂や断層といった不連続面の分布特性や形状は、岩盤の力学的特性及び水理学的特性を支配している。そのため、地下施設や岩盤構造物を建設する際には、き裂の存在が斜面の崩壊を招き、さらには構造物内における突発湧水の原因にもなることから、き裂の有無を事前調査に基づいて客観的かつ精度よく推定することはメンテナンス上極めて重要である。しかしながら、岩盤内部のき裂分布を考慮した浸透流問題に対する高性能な解析手法については、未だ確立されたとは言えず、より信頼性のある手法の開発が望まれている。

本研究ではき裂性岩盤中における物質移動現象を数値モデル化するために、き裂ネットワークモデルと浸透理論を併用し、岩盤中における物質の流れメカニズムを定量的に評価することができる手法を開発した。本モデルにより、地盤改良された実地盤の安定性やその内部を流れる物質の動きをモニタリングすることが可能になる。本論文では、遮蔽性地盤改良工法を模擬した数値解析にて、本手法の妥当性を検討する。

2. き裂ネットワークモデル

2.1 き裂セット

き裂ネットワークモデルは、実際のき裂の分布を考慮した浸透解析が可能なモデルであり、連続体解析では得られない局所的な流れの発生等、非常に不均質な流れの状況を詳細に把握することができる。本研究では、Ankesh^[2]らが用いた、6つの異なったき裂の方向分布を示すき裂セット(表-1)を用いた。表-1を使用して得られたき裂セットを図-1に示す。

表-1 き裂セット

Summary	Mean	Variance	Deviation
Set1	47.47	60.74	7.793
Set2	102.75	57.16	7.56
Set3	162.83	57.48	7.58
Set4	226.58	59.5	7.71
Set5	284.67	59.06	7.68
Set6	339.12	727.79	26.977



図-1 き裂セットによるき裂の方向分布

2.2 き裂分布

本研究では、き裂長さは式(1)のべき乗を使用することで長さ5~25間のき裂を発生させモデル生成を行った。

$$N = mL^{-n} \quad (1)$$

ここで、 L :き裂長さ、 N : L より大きな長さのき裂累積数、 m :比例定数、 n :べき乗定数である。本研究では、べき乗定数は3.1を使用した。解析では式(1)から得られた値により、き裂長さの累積頻度分布を作成し、き裂長さの生成頻度に対する重みとして用いた。次に、き裂の走向角の求め方として、個々のき裂の方向は、走向角と傾斜角によって示されるが、岩盤中の各き裂の方向は一定でなく、ばらつきを有しているため、何らかの確率分布により表現する必要がある。そこで、本研究では、このばらつきを正規分布にて仮定し、正規分布を持つような乱数を生成するために、ボックス・ミュラー法 (Box-Muller transform)を使用した。本手法により、正規分布をする独立な乱数 η_1 、 η_2 は、 $[0, 1]$ 間の独立な一様乱数 α 、 β を用いて以下のように表わされる。

$$\eta_1 = \mu + \left(\sqrt{-2 \log \alpha} \cos 2\pi\beta \right) \cdot \sigma \quad (2)$$

$$\eta_2 = \mu + \left(\sqrt{-2 \log \alpha} \sin 2\pi\beta \right) \cdot \sigma \quad (3)$$

本研究では式(1)および式(2)に、表1のき裂セットの値を代入し走向角を求めた。き裂数は、検討対象領域内の単位体積あたりのき裂の面積の総和(prop)により決定した。

3. 浸透理論

3.1 浸透理論の概要

浸透理論とは、多数のき裂を含んだ岩盤内部における物質の移動現象を、確率論を用いて推測し、その浸透過程を解析するための手法である。岩盤中におけるき裂の有無と浸透可能性の関係を定量的に求めることができることから、地下水の流れ解析や地滑り面形成メカニズムの解析に有効であると考えられる。

3.2 ランダムウォーク

き裂を拡散する粒子を考えると、一定時間ごとに、その最近接格子の中の1つをランダムに選ぶとする。ここで、時刻 $t=0$ で原点 $i=0$ にいた粒子が、時刻 t で原点 i にいる確率を $P_i(t)$ とする。この確率が時間とともにどのように広がっていくかを調べる。一般的に、 $P_i(t)$ は次の方程式に従う。

$$P_i(t+1) - P_i(t) = \sum_j [\sigma_j P_j(t) - \sigma_i P_i(t)] \quad (4)$$

σ_j は、1ステップ後に粒子が点 j から最近接格子点の点

i にジャンプする確率を表わす．式(1)の右辺第 1 項は、点 i に入ってくるジャンプを表し、第 2 項は点 i から外へ抜けていくジャンプを表している．このように、確率的な事象をモデル化するために、本研究では、コンピュータ上で擬似乱数を発生させることでモデルに反映した．以上のように、ランダムウォークは、極めて単純なアルゴリズムで自然の複雑現象を表現できる手法である．本研究では岩盤内を流れる物質の移動法として、本手法を適用した．

4. 2 次元浸透流解析

4.1 ダルシー則と本手法の関係

一般に、岩盤中の水の浸透問題はマクロモデルのひとつであるダルシー則が適用される．ダルシー則を連続の式に適用すると式(5)になり、流量と断面積が比例関係となる．

$$Q = vA = kiA \quad (5)$$

ここで、 Q :流量、 A :断面積、 v :流速、 k :透水係数、 i :動水勾配を示している．

一方、図-2 は縦軸は流量の代わりに浸透した粒子の割合、横軸は動水勾配の代わりにき裂数をとったものである．したがってその傾きは、透水係数を意味する．このことから、き裂数と流量は比例関係であり、ダルシー則と一致していることが分かる．

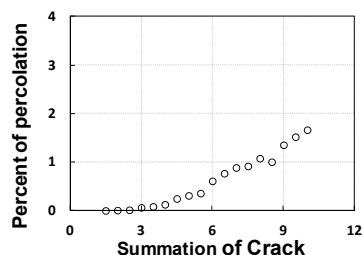
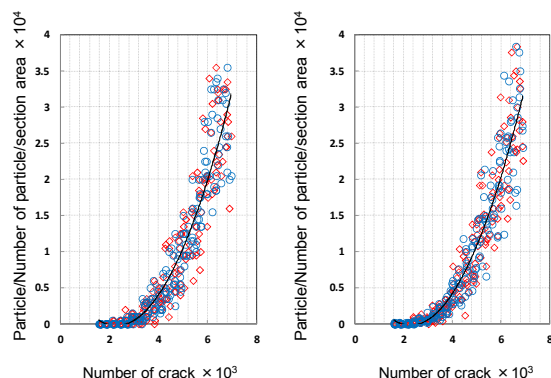


図-2 き裂数の増加に伴う浸透の変化



(a) 粒子数：2000 (b) 粒子数：5000
図-3 x 方向および y 方向の透水係数

4.2 透水係数

図-3 の縦軸は浸透した粒子の割合、横軸はき裂数を示している．図-3(a)は粒子数が 2000、図-3(b)は粒子数が 5000 の場合を示した．◇は x 方向、○は y 方向に粒子を流した場合の解析結果である．図-3(a)より領域対

する x 方向の透水係数は $k=0.2910(R^2:0.8833)$ 、y 方向は $k=0.2946(R^2:0.8988)$ であった．同様に図-3(b)より、領域に対する x 方向の透水係数は $k=0.2984(R^2:0.9028)$ 、y 方向は $k=0.2962(R^2:0.9035)$ であった．これらの値と実験値とをフィッティングすることで真の透水係数を設定することが可能である．この結果より、き裂数が増えるにつれ浸透する粒子が多くなっていることが分かる．また、粒子数を増やし解析を行うと、接触しているき裂に対して十分に粒子が浸透するため、粒子数が少ない時に比べて、き裂数が少ない箇所から浸透が始まることがわかる．また、き裂数が 4000 を超えるとき急激に浸透が始まり、また、き裂数が 7000 付近になると、ほぼ領域が浸透状態になっていることが分かる．

4.3 修復箇所を設けた場合の解析結果

図-4(a)から図-4 (d)の解析結果は、粒子数 500, prop4.0 のとき領域の x 方向 30 と 60 の箇所に幅 20、長さが 20, 50, 70 の修復を行った場合の解析結果となっている．ここで、修復とは遮蔽性地盤改良工法などを模擬したものである．図-4 (e)から図-4 (h)は、粒子の浸透の様子を見るために、粒子が通るき裂の中心座標をプロットしたものである．粒子は左上から流すことにより解析を行った．この解析結果より、小規模の修復を行うことで、粒子の右方向への浸透を防げることが分かる．さらに規模の大きい修復を行うことで横方向の浸透の進展が進んでいないことが分かる．

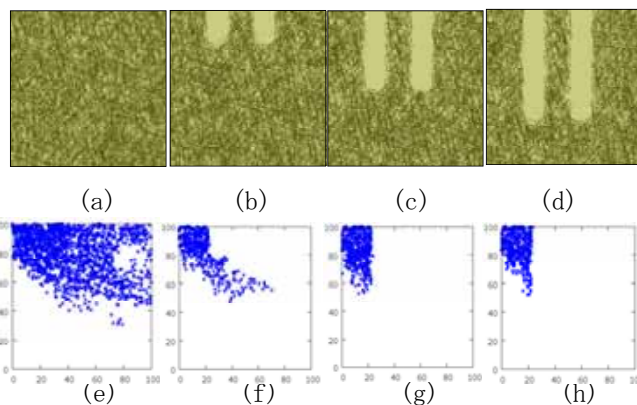


図-4 修復箇所を設けた場合の解析結果

5. おわりに

本研究では基礎的な解析に留まっている．今後、実問題に適用することが必要である．

謝辞

本研究は科学研究費補助金(23760428)の助成を受けた．ここに記して感謝の意を示す．

参考文献

- 1) D.スタウファー：パーコレーションの基本原理,2011.
- 2) Ankesh Anupam:Effective properties of multiscale fracture network,2010.