第Ⅲ部門

異なる鉱物分布条件による岩石のき裂進展シミュレーション

京都大学大学院工学研究科 学生会員 〇池本 龍平, 伊澤 正悟 大阪大学大学院工学研究科 正会員 緒方 奨 愛媛大学大学院理工学研究科 正会員 安原 英明 京都大学大学院工学研究科 正会員 岸田 潔

# 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分施設の健全性を評価するためには、処分空洞掘削時に生じる岩盤中のき 裂発生・進展挙動の予測が重要である.一般的に鉱物 分布・組成等に起因する岩石の不均質性は岩石内の局 所的な力学的特性に影響を及ぼすことが知られており、 それらを考慮してき裂発生・進展解析を行うことが必 要である.岩石の鉱物分布・組成を考慮したき裂発生・ 進展解析を実施した既往研究<sup>1)</sup>では、岩石の剛性につ いては妥当な解析結果が得られたが、鉱物分布の違い によるき裂進展挙動への影響の検証が不十分であった.

そこで本研究では,岩石の鉱物分布・組成を考慮したき裂発生・進展解析を行い,鉱物分布がき裂進展挙動へ及ぼす影響を検討した.具体的には,直径 50 mm × 奥行き 50 mm の花崗岩円柱供試体を用いて圧裂引張試験を実施し,ランダムな種々の鉱物分布を仮定し上記実験に対する再現解析を実施した.

#### 2. き裂発生・進展解析モデルの概要

### 2-1. 損傷モデル

本研究では、き裂を連続体の剛性低下でモデル化す る損傷モデルを用いた有限要素解析により、き裂発生・ 進展挙動を計算した.本解析では、応力解析により得 られた岩石内の応力分布を基に、式(1)を用いて要素の 損傷の有無を判定する.ここでは引張応力を負、圧縮 応力を正とする.

$$\begin{cases} F_1 \equiv \sigma_3 + f_{t0} = 0\\ F_2 \equiv \sigma_1 - \frac{1 + \sin\theta}{1 - \sin\theta} \sigma_3 - f_{c0} = 0 \end{cases}$$
(1)

ここで、 $F_1$ は引張損傷条件、 $F_2$ はせん断損傷条件、 $\sigma_1$ は最大主応力 $[N/m^2]$ 、 $\sigma_3$ は最小主応力 $[N/m^2]$ 、 $f_{00}$ は一軸引張強さ $[N/m^2]$ 、 $f_{c0}$ は一軸圧縮強さ $[N/m^2]$ 、 $\theta$ は内部摩擦角 $[^o]$ である.損傷モデルでは、損傷の進展に伴い弾性係数Eを減少させる.

$$E = (1 - D)E_0$$
 (2)

ここで, $E_0$ は損傷の無い状態の弾性係数 [N/m<sup>2</sup>],Dは 損傷変数 [-]である.損傷変数 D は物体の損傷度合い を表す.損傷がなければ 0,完全に破壊すれば 1 とな る.式(1)と次式に従い,損傷変数 Dを算定する.

$$D = \begin{cases} 0 & F_1 < 0 \text{ and } F_2 < 0\\ 1 - \left|\frac{\varepsilon_{t0}}{\varepsilon_t}\right|^n & F_1 = 0 \text{ and } \Delta F_1 > 0\\ 1 - \left|\frac{\varepsilon_{c0}}{\varepsilon_c}\right|^n & F_2 = 0 \text{ and } \Delta F_2 > 0 \end{cases}$$
(3)

ここで, ε<sub>to</sub>は限界引張ひずみ [-], ε<sub>co</sub>は限界圧縮ひず み [-], n は定数 [-]である.

### 2-2. 解析モデル

岩石の鉱物分布を考慮したモデルを作成した.まず, 実験に用いた花崗岩供試体の断面画像を分析し鉱物組 成を求めたところ,石英32%,長石63%,黒雲母5% となった.そして,直径50mmの円形断面を1mm四 方の正方形グリッドに分割した後,各グリッドに対し て求めた鉱物組成と一致するように鉱物をランダムに 配置して円形断面モデルを作成した.本研究ではこの 手法を MMC 法(Modeling based on Mineral Composition method)とし,本研究では,鉱物分布の異なる MMC-1~MMC-5の5つのモデルを作成した (図-1).

#### 2-3. 解析条件

解析条件を図-2 に示す.解析に用いた各鉱物の物性 値(表-1)は既往の実験的研究<sup>1)-5)</sup>を参照した.

#### 3. 解析結果と考察

図-3 に引張応力 - 縦ひずみ曲線の実験結果と解析 結果の比較を示す.図-3より MMC-1~MMC-5の解析 結果を比較すると、モデル間での鉱物分布のばらつき に起因する,引張強度と剛性のばらつきが確認できた. また,MMC-1と MMC-3の解析結果から実験結果と類 似した剛性がみられた.つぎに、図-4にき裂進展完了

Ryuhei IKEMOTO, Shogo IZAWA, Sho OGATA, Hideaki YASUHARA, Kiyoshi KISHIDA ikemoto.ryuhei.33e@st.kyoto-u.ac.jp



図-1 MMC 法により作成した円形断面モデル

	石英	長石	黒雲母		$\downarrow\downarrow\downarrow\downarrow$		
ヤング率 E <sub>0</sub> (GN/m <sup>2</sup> )	76.9	39.6	33.9		8.9 mm		
引張強さf <sub>t0</sub> (MN/m <sup>2</sup> )	10.3	10.5	7.3	49.2 mm	50 mm		
圧縮強さf <sub>c0</sub> (MN/m <sup>2</sup> )	82.5	83.6	58.6	.,	8.9 mm		
内部摩擦角θ (°)	50	50	50				
ポアソン比γ (-)	0.19	0.19	0.19	<b>t</b>			
					(a) 解析ンオメトリ	(D) 所称 / / /	ツンユ

時の損傷変数Dの分布と実験時に撮影したき裂の画像 を示す.図より,実験結果と類似した直線的なき裂形 状が解析より得られたが,モデル間でき裂形状に若干 のばらつきが確認できる.これは,鉱物分布に対応し た強度分布のばらつきと剛性分布のばらつきによる応 力分布のばらつきに起因していると考えられる.

表-1 解析に用いた各鉱物の物性値

# 4. まとめ

鉱物分布の異なる複数のモデルを用いて,岩石の鉱 物分布を考慮したき裂発生・進展解析を行ったところ, 鉱物分布が岩石の力学特性及びき裂発生・進展挙動に 影響を及ぼすことが確認できた.また,鉱物をランダ ムに分布させたモデルでも,実験結果と類似した変形 特性の算出が可能であることが確かめられた.

# 参考文献

- 伊澤ら:鉱物分布・組成を考慮した数値解析モデルによる花崗岩の引張破壊挙動の予測,第47回岩盤力学に関するシンポジウム講演集,No.23,2020.
- Zhang L., Engineering Properties of Rocks (Second Edition), 2017.
- 3) Savanick G. A. and Johnson D. I.: Measurements of the Strength of Grain Boundaries in Rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abs.*, Vol.11, Issue 5, pp.173-180, 1974.
- 4) Mavko, et al.: The Rock Physics Handbook, 2009.
- Mahabadi, et al.: New Combined Finite-Discrete Element Numerical Code for Geomechanical Applications, *Int. J. Geomech.*, Vol.12, pp.676-688, 2012.

**図-2** 解析概要



図-3 引張応力 - 縦ひずみ曲線

