

京都大学大学院工学研究科 学生会員 ○伊澤 正悟, 緒方 奨
 愛媛大学大学院理工学研究科 正会員 安原 英明, 木下 尚樹
 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の地層処分システムの健全性評価において、廃棄体処分空洞掘削時の岩盤中でのき裂発生・進展挙動の予測は重要である。一般的に岩石は鉱物分布・組成のばらつきや微小潜在き裂に起因する不均質性を有しており、これらは岩石の力学物性に影響を及ぼすことが知られている¹⁾。以上の背景より、岩石の不均質性を考慮したき裂発生・進展解析手法の確立が求められている。既往研究²⁾では多くの場合、Weibull分布等の確率分布を用いて不均質性を記述しているが、実験的観察に基づいておらず物理的根拠が不明確であるという問題点がある。よって本研究では岩石の不均質性として岩石内の鉱物分布に着目し、観察した鉱物分布の情報から不均質性をモデル化するき裂発生・進展解析手法を提案した。また、直径50 mm×長さ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、提案手法による再現解析との比較によって、モデルの妥当性を検証した。

2. き裂発生・進展解析モデルの概要

2-1. 構成則

本研究では損傷理論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。損傷理論とは、き裂を連続体の剛性低下でモデル化する理論である²⁾。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もとに、式(1)を用いて対象とする岩石に損傷が生じるかどうかを判定する。ここでは引張応力を負、圧縮応力を正とする。

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

ここで、 F_1 は引張損傷条件、 F_2 はせん断損傷条件、 σ_1 は最大主応力[N/m²]、 σ_3 は最小主応力[N/m²]、 f_{t0} は一軸引張強さ[N/m²]、 f_{c0} は一軸圧縮強さ[N/m²]、 θ は内部摩擦角[°]である。等方性損傷理論では、損傷した岩盤の弾性係数 E は次式に従い減少する。

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

ここで、 E_0 は損傷の無い状態の岩盤の弾性係数[N/m²]、 D は損傷変数[-]である。損傷変数 D は、 $0 \leq D \leq 1$ の値をとるスカラー変数であり、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。本モデルでは、 $D > 0$ をき裂発生とする。式(1)の破壊判定式と次式に従い、損傷変数 D を算定する。

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

ここで、 ε_{t0} は限界引張ひずみ[-]、 ε_{c0} は限界圧縮ひずみ[-]、 n は定数[-]である。

2-2. 不均質性のモデル化

岩石の不均質性の表現にあたり、鉱物分布を考慮したモデルの作成を行った。具体的な方法を以下に示す。

- 1) 圧裂引張試験に用いた花崗岩供試体の断面の画像(図-1(a))を画像編集ソフトに取り込む。
- 2) 花崗岩の主な構成鉱物である石英、長石、黒雲母の色の違いから境界を検出、分布を明確化する。
- 3) 境界を明確化した二次元断面モデルに各鉱物の力学物性を割り当て、き裂発生・進展解析を行う。

本研究ではこの手法を Modeling based on Mineral Distribution method: MMD 法とし、本手法で作成した花崗岩供試体のモデルを MMD モデル(図-1(b))とした。

2-3. 解析条件

解析条件を表-1、図-2に示す。各鉱物の物性値は一軸圧縮試験結果と既往の実験的研究^{3),4)}を参照した。

3. 解析結果と考察

実験より得られた引張応力-縦ひずみ曲線と解析結果との比較を図-3(a)に示す。図より、解析結果は実験結果とよく一致しており、本解析モデルは圧裂引張試

験における岩石の力学的応答を精度よく再現できていることが確認できる。つぎに、圧裂引張試験において供試体に生じたき裂と、MMD を用いたき裂発生・進展解析から得られたき裂の最終形状を図-3(b)に示す。

図より、解析結果は実験より観察されたき裂の発生・進展挙動を概ね再現できているが、供試体上下端部付近で発生するき裂に関しては再現できていないことが確認できる。つぎに、き裂発生・進展挙動(損傷変数 D の分布の進展)を図-4 に示す。図-4 (a)~(c)は、図-3(a)中の解析で得られた引張応力-縦ひずみ曲線中の3点(a)~(c)における各損傷変数分布を示している。図中のコンター分布における赤色の領域が引張による損傷領域、青色の領域がせん断による損傷領域を表している。

図より、本解析において供試体中央に引張破壊によるき裂が発生していることが確認できる。また、一般的に圧裂引張試験では、供試体上下端部は圧縮応力場となることから、本研究で再現出来ていないき裂は圧縮応力場でのせん断破壊によるものであると考えられる。

図より、本解析において供試体中央に引張破壊によるき裂が発生していることが確認できる。また、一般的に圧裂引張試験では、供試体上下端部は圧縮応力場となることから、本研究で再現出来ていないき裂は圧縮応力場でのせん断破壊によるものであると考えられる。

図より、本解析において供試体中央に引張破壊によるき裂が発生していることが確認できる。また、一般的に圧裂引張試験では、供試体上下端部は圧縮応力場となることから、本研究で再現出来ていないき裂は圧縮応力場でのせん断破壊によるものであると考えられる。

4. まとめ

岩石の鉱物分布を考慮した提案手法によって、岩石の力学的応答および引張破壊によるき裂発生・進展挙動を概ね再現できた。しかしながら、せん断破壊を適切に考慮できておらず、各鉱物の一軸圧縮強さなどのより適切な物性値の設定が必要である。

参考文献

- 1) Cowie, S. and Walton G.: The effect of mineralogical parameters on the mechanical properties of granitic rocks, *Eng. Geol.*, Vol.240, pp.204-225, 2018.
- 2) Zhu, W.C. and Tang, C.A.: Numerical simulation of Brazilian disk rock failure under static and dynamic loading, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.43, pp.236-252, 2006.
- 3) Mavko, G., Mukerji, T. and Dvorkin, J.: *The Rock Physics Handbook*, 2009.
- 4) 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, pp.173-180, 1974.

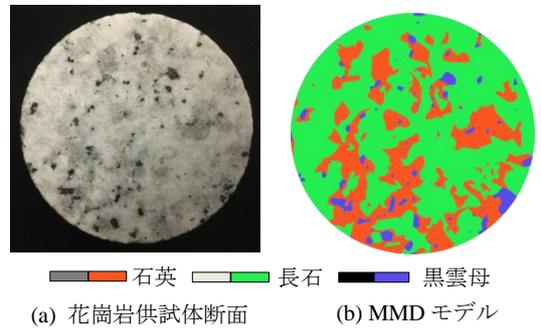


図-1 鉱物分布に基づくモデル

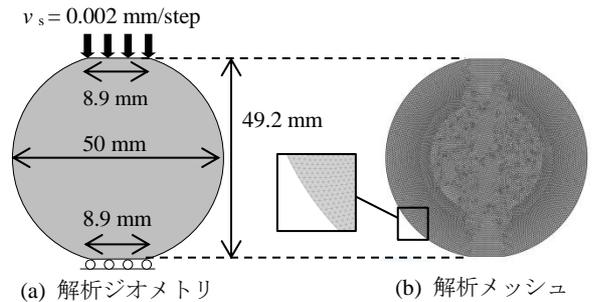


図-2 解析概要

表-1 解析条件 (各鉱物の物性値)

Parameter	石英	長石	黒雲母
ヤング率 E_0 [GN/m ²]	77.2	40.5	34.5
引張強さ f_0 [MN/m ²]	10.4	10.5	7.4
圧縮強さ f_{c0} [MN/m ²]	333	336	237
内部摩擦角 θ [°]	50	50	50
ポアソン比 γ [-]	0.19	0.19	0.19

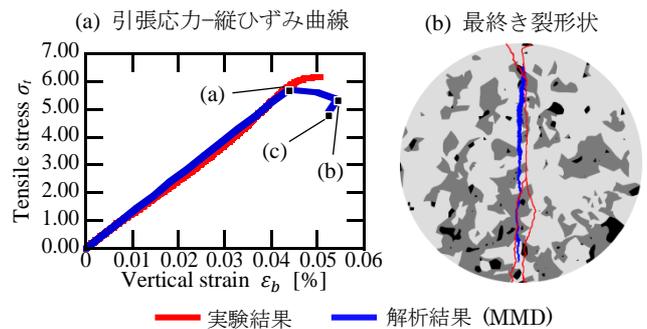


図-3 実験結果と解析結果(MMD)の比較

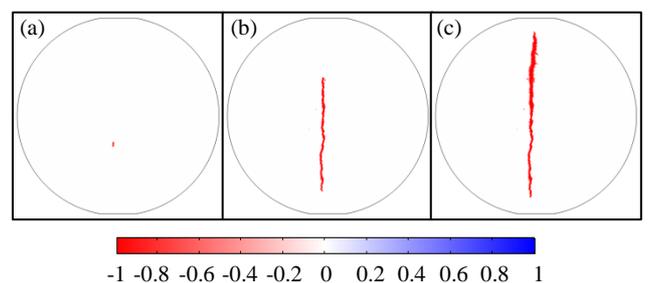


図-4 き裂発生・進展挙動 (MMD)