

鉱物分布・組成を考慮した岩石のき裂発生・進展解析手法の提案

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施設の堅牢性を評価する上で、廃棄体処分空洞掘削時の岩盤内でのき裂発生・進展挙動の予測は重要である。一般的に岩石は鉱物分布・組成のばらつきや異方性などに起因する不均質性を有している。また、それらは岩石の力学物性及び破壊挙動に大きな影響を与えることが知られており、き裂発生・進展挙動の予測には、岩石の不均質性を考慮した合理的な解析手法の確立が必須である¹⁾。既往研究²⁾では多くの場合、岩石の不均質性の記述に Weibull 分布等の統計的手法を用いているが、それらは実験的観察に基づいておらず、物理的根拠が不明瞭である。そこで本研究では、岩石の不均質性として岩石内の鉱物分布・組成に着目し、観察した鉱物組成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、花崗岩供試体を用いた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手法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. 損傷理論

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³⁾。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)の破壊判定式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 $[\text{N/m}^2]$ 、 σ_3 は最小主応力 $[\text{N/m}^2]$ 、 f_{t0} は一軸引張強さ $[\text{N/m}^2]$ 、 f_{c0} は一軸圧縮強さ $[\text{N/m}^2]$ 、 θ は内部摩擦角 $[\circ]$ 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 $[\text{N/m}^2]$ 、 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。

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

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 $[-]$ ($n = 2$) 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・組成を考慮してモデルを作成した(図 1)。以下に手法を示す。

- 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))に占める主な構成鉱物の面積比から、石英、長石、黒雲母の含有割合を算出する。
- 2) 直径 50mm の断面モデルを 1mm 四方のグリッドで分割(図 2)、各グリッドに対し構成鉱物を含有割合に従って配置させる。配置は鉱物分布の不均質性を考慮し、乱数を発生させランダムに行う。
- 3) 鉱物が割り当てられた各グリッドに対し、該当する鉱物の力学物性を与える。

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

2-3. 解析条件

解析条件を図 3、表 1 に示す。各鉱物の物性値は花崗岩を用いた一軸圧縮試験の結果と既往実験^{3), 4)}を参照した。

キーワード 花崗岩, 鉱物分布・組成, 圧裂引張試験, 損傷理論, き裂発生・進展挙動, 引張破壊

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-2-338 TEL 075-383-3231

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4(a)に示す。図より、解析結果は実験結果と概ね一致しており、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内に生じたき裂と、MMC法を用いたき裂発生・進展解析から得られたき裂の最終形状を図4(b)に示す。図より、解析結果は実験によって観察されたき裂の形状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つい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5に示す。図5(i)~(iii)は、図4(a)中の解析で得られた引張応力-縦ひずみ曲線中の3点(i)~(iii)における各損傷変数の分布を示している。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。

4. まとめ

岩石の鉱物分布および組成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物性値のより適切な設定が必要である。

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.

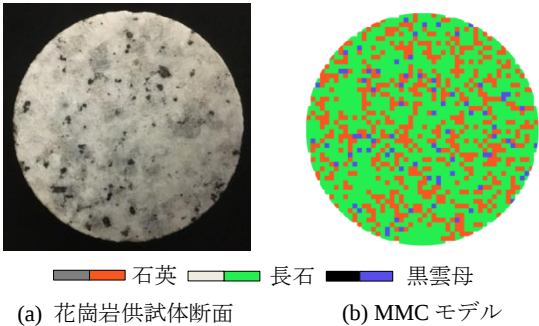


図1 鉱物組成に基づくモデル

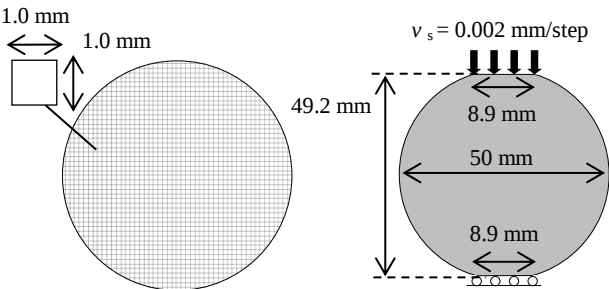


図2 モデルのグリッド分割 図3 解析ジオメトリ

表1 解析条件 (各鉱物の物性値)

Parameter	石英	長石	黒雲母
弾性係数 E_0 [GN/m ²]	77.2	40.5	34.5
一軸引張強さ f_0 [MN/m ²]	10.4	10.5	7.4
一軸圧縮強さ 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

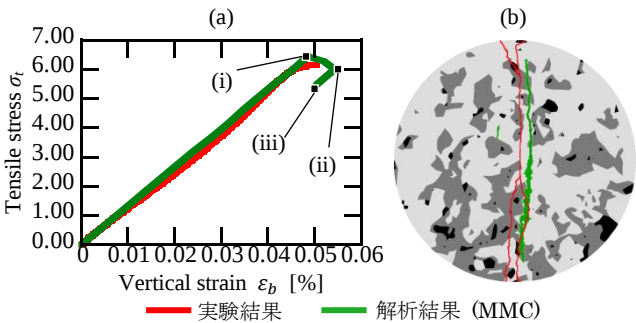


図4 実験結果と解析結果(MMC)の比較 ((a) 引張応力-縦ひずみ曲線, (b) 最終き裂形状)

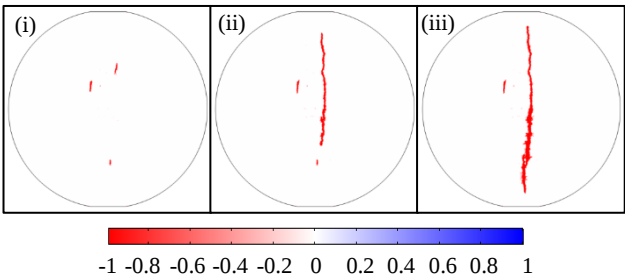


図5 き裂発生・進展挙動 (MMC)