

第III部門

幌延泥岩を用いた力学試験における亀裂発生・進展挙動の再現解析

大阪大学工学部 学生会員 ○三寫 星輝
 大阪大学 正会員 緒方 奨
 大阪大学 正会員 乾 徹

1 はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分施設の堅牢性を評価する上で、処分坑道掘削時の廃棄体周辺岩盤内における亀裂発生・進展挙動の数値解析的予測が必須である。上記のような実岩盤での亀裂発生・進展予測を実現するためには、まず室内力学試験等で観察された岩石の亀裂発生・進展挙動を精緻に再現できなければならない。これまでに、花崗岩等の結晶質岩を用いた力学試験に対する再現解析は数多く実施されてきたが、泥岩等の堆積岩に対する再現解析は少なく、解析の再現性が確認された事例もほとんどない。そこで本研究では、損傷モデルを用いて幌延深地層研究センターの地下 350 m 坑道で採取された幌延泥岩を用いた力学試験の解析を実施し、亀裂発生・進展等に対する再現性を検証した。

2 支配方程式

亀裂発生・進展解析で用いる損傷モデルでは、岩盤の損傷が引張またはせん断によって生じるか否かを、それぞれ以下の引張破壊判定式 F_1 、せん断破壊判定式 F_2 を用いて判定する¹⁾。

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

ここで、 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]、 φ は内部摩擦角 [°] である。損傷した要素について損傷変数 D ($0 \leq D \leq 1$) が計算され、弾性係数 E が損傷進展に伴い減少する。本研究では、 $D > 0$ の領域を亀裂とする。

$$D = \begin{cases} 0 & F_1 < 0 \text{ and } F_2 < 0 \\ 1 - \left| \frac{\varepsilon_{t0}}{\varepsilon_t} \right|^\eta & F_1 = 0 \text{ and } \Delta F_1 > 0 \\ 1 - \left| \frac{\varepsilon_{c0}}{\varepsilon_c} \right|^\eta & F_2 = 0 \text{ and } \Delta F_2 > 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$E = (1 - D)E_0 \quad (3)$$

ここで、 ε_{t0} は限界引張ひずみ [-]、 ε_{c0} は限界圧縮ひずみ [-]、 η は定数 [-]、 E_0 は損傷のない状態の岩盤の弾性係数 [N/m²] である。

本研究では、Weibull 分布を用いて岩石の力学物性の不均質性を統計的に考慮する。

$$f(u) = \frac{m}{u^s} \left(\frac{u}{u^s} \right)^{m-1} \exp \left(- \left(\frac{u}{u^s} \right)^m \right) \quad (4)$$

ここで、 u は各計算要素の力学物性、 u^s は各計算要素の力学物性分布の指標値、 m は Weibull 分布の形状パラメータである。本解析では、弾性係数、一軸引張強さ、一軸圧縮強さ（各指標値 $E_0^s, f_{t0}^s, f_{c0}^s$ ）についてのみ不均質性を考慮する。

3 室内力学試験の再現解析

日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センターの地下 350 m 坑道で採取された幌延泥岩を用いた一軸圧縮試験と圧裂引張試験の再現解析を実施した。

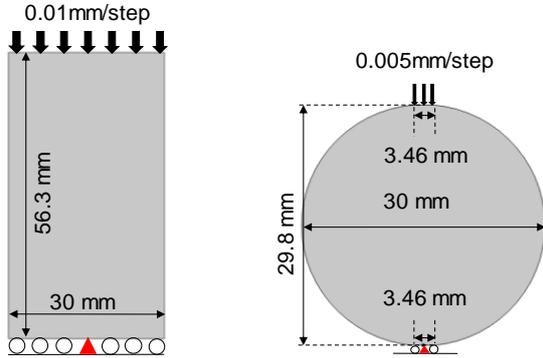
表 1、表 2 にそれぞれ実験より得られた力学物性と解析で用いるパラメータを示す。ポアソン比は実験値を、内部摩擦角は青柳ら(2017)²⁾が求めた値を採用した。また、Zhu and Tang(2004)¹⁾により、岩石の亀裂発生・進展挙動を精度良く再現するために Weibull 分布の形状パラメータ m は 1.2~5.0 である必要があること、各力学物性の指標値を実験値より大きく設定する必要があることが報告されている。これらをふまえて本解析では、剛性・強度について実験値と解析値が同程度の値をとるように、Weibull 分布に用いる力学物性の指標値と形状パラメータ m を設定した。

表 1 実験より得られた力学物性

Parameter	Value
ポアソン比 ν [-]	0.126
内部摩擦角 φ [°]	24.5
弾性係数 E_0 [GPa]	1.587
圧裂引張強さ f_{t0} [MPa]	2.393
一軸圧縮強さ f_{c0} [MPa]	16.69

表2 解析で用いたパラメータ

Parameter	Value
Weibull分布の形状パラメータ m [-]	3.3
弾性係数の指標値 E_0^s [GPa]	1.8
一軸引張強さの指標値 f_{t0}^s [MPa]	6.2
一軸圧縮強さの指標値 f_{c0}^s [MPa]	62



(a) Uniaxial compression test (UCT) (b) Brazilian test

図1 各力学試験の解析モデル: (a) 一軸圧縮試験, (b) 圧裂引張試験

図1に一軸圧縮試験及び圧裂引張試験の解析モデルを示す。各実験で用いた供試体を模擬した二次元モデルを設定した。図2に一軸圧縮試験及び圧裂引張試験の応力-ひずみ関係について実験値と解析値の比較を示す。圧裂引張試験については、引張強度のみの比較を行う。図より、両実験に対して、解析より得られた剛性・強度等の力学的応答が実験値とよく一致していることが確認できる。図3、図4にそれぞれ一軸圧縮試験及び圧裂引張試験での亀裂形状について解析と実験の比較を示す。図より、両実験について解析結果は実験の亀裂形状を概ね再現していることがわかる。以上より、本研究で実施した幌延泥岩を用いた一軸圧縮試験及び圧裂引張試験に対する再現解析は実験結果との整合性が高いといえる。

4 おわりに

本研究では、損傷モデルを用いて幌延泥岩を用いた力学試験の再現解析を実施した。その結果、両実験における剛性・強度等の力学的応答と亀裂発生・進展挙動を共に精度よく再現することに成功した。本研究で用いた解析パラメータを用いて、幌延泥岩を対象とした坑道掘削時の亀裂発生・進展解析を実施することが今後の課題である。

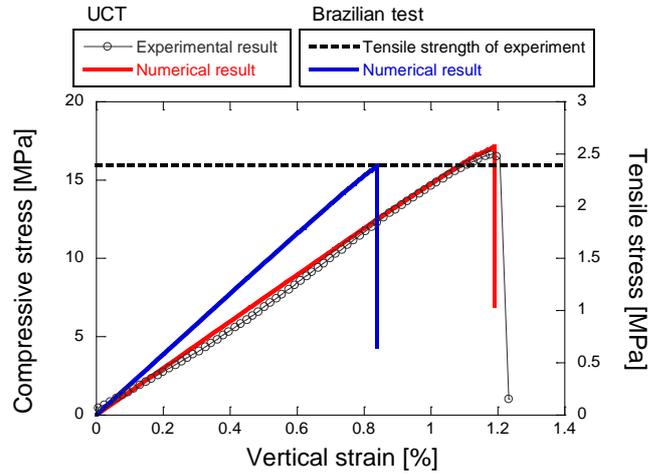


図2 各力学試験の応力-ひずみ関係における実験値と解析値の比較

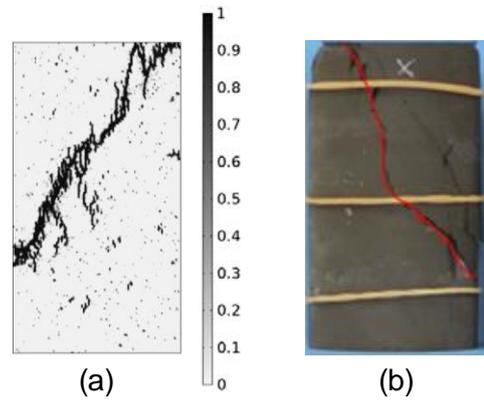


図3 一軸圧縮試験の(a) 解析より得られた亀裂形状 (損傷変数の分布), (b) 実験より得られた亀裂形状

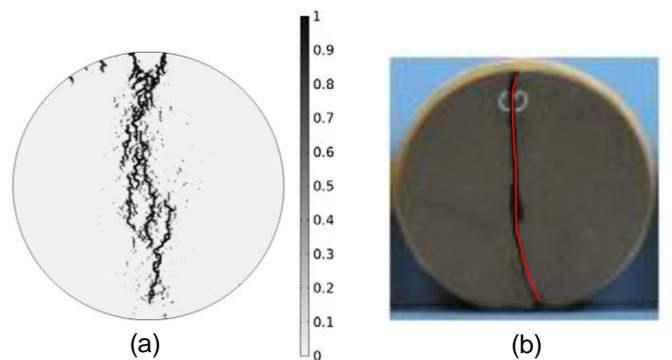


図4 圧裂引張試験の(a) 解析より得られた亀裂形状 (損傷変数の分布), (b) 実験より得られた亀裂形状

参考文献

- 1) W. C. Zhu., C. A. Tang.: Micromechanical Model for Simulating the Fracture Process of Rock, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol.37, pp.25-56, 2004.
- 2) 青柳和平, 石井英一, 石田毅: 幌延深地層研究センターの350m調査坑道における掘削損傷領域の破壊様式の検討, Journal of MMIJ, Vol.133, pp.25-33, 2017.