大阪大学	学生会員	三嶌	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,廃棄体処分坑道掘削時の周辺岩盤(天然バリア)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.これまでに,上記のような実岩盤での亀裂発生・進展挙動の解析的予測においては花崗岩等の結晶質岩に対するものがほとんどであり,泥岩等の堆積岩を対象とした詳細な検討は数少ないのが現状である.そこで,本研究では,損傷モデルを用いて地下350m深度における幌延泥岩を対象とした坑道掘削解析を行い,坑道掘削時の天然バリアにおける亀裂発生・進展等の力学的挙動を評価する.

2. 支配方程式

本解析で用いる損傷モデルでは、岩盤の引張また はせん断による損傷の有無を、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 で判定する¹⁾.

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

ここで、 σ_1 は最大主応力 [Pa]、 σ_3 は最小主応力 [Pa]、 f_{t0} は一軸引張強さ [Pa]、 f_{c0} は一軸圧縮強さ [Pa]、 α_B は Biot-Wills 係数 [-]、p は間隙水圧 [Pa]、 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.

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

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

$$\varepsilon_t = (\sigma_3 - \alpha_B p) / E_0 \tag{4}$$

$$\varepsilon_c = (\sigma_1 - \alpha_B p) - \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} (\sigma_3 - \alpha_B p) / E_0 \qquad (5)$$

ここで, ε_{t0}, ε_{c0}は限界引張ひずみ [-]及び限界圧縮ひ

ずみ [-], ηは定数 [-], E₀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 用いて岩盤の力学物性の不均質性を考慮する.

$$f(u) = \frac{m}{u^s} \left(\frac{u}{u^s}\right)^{m-1} exp\left(\left(\frac{u}{u^s}\right)^m\right) \tag{6}$$

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 分布の形状指 数である.弾性係数,一軸引張強さ,一軸圧縮強さ (指標値 *E*₀^s, *f*₀^s) について不均質性を考慮する. 3. 坑道掘削解析

北海道幌延地域地下 350 m 深度における坑道掘削 解析を実施した.実岩盤の力学物性を考慮するため に,本研究では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 岩を用いた室内力学試験の再現解析を実施し、実験 結果に整合するような Weibull 分布に必要な力学物 性の指標値及び形状パラメータを選定した.表1に 再現解析で選定されたパラメータ値を示す.また,ポ アソン比νは実験値を,内部摩擦角φは青柳ら(2017)²⁾ が求めた値を採用し, ν=0.126 [-], φ=24.5 [°]とした. 坑道断面は第2次取りまとめ3を参照して、横置き 方式を採用した. 図1に解析モデルを示す. 初期地 圧は Aoyagi and Ishii (2018)⁴⁾を参照し、拘束圧条件を 設定している.本解析では,坑道境界に作用する掘削 相当応力を1ステップにつき1%減少させることで、 逐次的な坑道掘削を模擬している.

表1 解析で用いるパラメータ値

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

キーワード:損傷モデル, 亀裂発生・進展, 坑道掘削, 天然バリア 連絡先:〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1 TEL&FAX:06-6879-7626



図 2 に各掘削段階における坑道周辺での損傷変数 D の進展挙動を示す. 図より, 掘削 step80 以降, 坑道 周辺で引張による無数の亀裂発生が確認できる. 図 3 に掘削終了時における坑道周辺の x 方向, y 方向の変 位分布を示す. 図 2 と比較すると, 亀裂域で変位が 増大することが確認された. これは亀裂発生に伴う 岩盤の剛性低下に起因していると考えられる. 図 4 に天端 (Point A) 及び側壁 (Point B) における坑道半 径方向の変位及び損傷変数 D と掘削段階との関係を 示す.図より,天端も側壁も step85 を起点とした損 傷変数 D の増大に伴って変位が線形から逸脱して増 大する傾向が確認された.

4. おわりに

本研究では,損傷モデルを用いて北海道幌延地域 地下 350 m 深度を対象とした坑道掘削解析を実施し た.その結果,坑道周辺において引張による亀裂発 生・進展が生じ,亀裂域における変位の増大による天 端の沈下及び内空幅の収縮が確認された.実現場で 実施された坑道掘削試験等と解析結果との比較によ って,本解析モデルの妥当性・有効性を検討すること が今後の課題である.

参考文献

- 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.
- 3) 核燃料サイクル開発機構:わが国における高レベル放射性廃棄 物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ 一分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022, p.209, 1999.
- K. Aoyagi., E. Ishii.: A method for estimating the highest potential hydraulic conductivity in the excavation damaged zone in mudstone, Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018.



図2 各掘削段階における坑道周辺での損傷変数Dの進展挙動(青色が引張損傷,赤色がせん断損傷)



図3 掘削終了時における坑道周辺のx方向,y方向の変位分布



図4 天端,側壁における掘削段階と坑道半径方向の 変位及び損傷変数 Dの関係