

岩盤の飽和度を考慮したコンプライアンス可変型構成則による FEM 解析

新潟大学大学院 学生会員 ○ 山本雄輝 新潟大学 正会員 金澤伸一
新潟大学大学院 学生会員 飯田輝良 新潟大学大学院 学生会員 中島颯人

1. 研究背景・目的

現在、原子力発電の過程で発生する高レベル放射性廃棄物の処分方法として、地層処分が選定されている。地層処分研究開発第2次とりまとめ¹⁾において、地層処分の基本的な考え方として、核燃料サイクルの過程で発生する廃液をガラス固化し、それをオーバーパックや緩衝材で覆い地下 300m 以深に処分する多重バリアシステムが採用される。現在までに高レベル放射性廃棄物の地層処分を実施する場所は未定であるが、2017年7月28日、経済産業省資源エネルギー庁により、科学的特性マップが示された。これにより、処分地の選定に当たり考慮すべき科学的特性が明らかになっている。一般的に、地盤は飽和/不飽和状態であり、その性状は岩盤のような強固なものから、軟弱な条件まで様々な特性を有しているため、それによる坑道掘削時の力学挙動を明らかにする必要があるが、今日までの数値解析では、一定の飽和度のもとでの坑道掘削による影響を把握することにとどまっている。しかし、片岡ら²⁾の実験によって、水分状態が岩石や岩盤の強度・変形特性に影響をおよぼすことから、地下空洞の建設や安定性の評価において、種々の含水状態での岩石や岩盤の強度・変形特性を把握することは重要である。そこで本研究では、羽柴ら³⁾によって示された「岩石の飽和度を考慮したコンプライアンス可変型粘弾性モデル」(以下、羽柴らの飽和度を考慮したモデル)を組み込んだ有限要素解析プログラム(DACSAR-MP)を使用し、幅広い地盤特性・施工条件下での坑道掘削による影響を把握することを目的とした。本研究では、三城目安山岩を対象とした一軸圧縮試験の再現解析を行い、片岡らの実験結果との比較を行った。

2. 研究方法

2-1 コンプライアンス可変型構成式

羽柴らの飽和度を考慮したモデルは大久保ら⁴⁾によって示された「コンプライアンス可変型構成式」(以下、大久保らのモデル)を改良したモデルであ

る。よって、本研究の前段階として大久保らのモデルを組み込んだ有限要素解析プログラム DACSAR-MP を用いて数値解析を行う必要があると考えた。まず「コンプライアンス可変型構成式」は、応力-ひずみ関係において岩石特有の挙動であるひずみ軟化を再現することができる。ひずみ軟化は降伏点を超えると、塑性変形を受け始め、非線形的にひずみが増大し、応力が低下する挙動である。クリープなどの微小な変状を考慮した解析を行うことができる。大久保モデルは、ひずみと応力の比であるコンプライアンスの増加速度を、

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a \cdot (\sigma^*)^n \cdot (\lambda^*)^m \quad (1)$$

という関数で表したものである。

ここで、

a : 強度を示すパラメータ

λ^* : ひずみ ε と応力 σ の比であるコンプライアンス λ ($=\varepsilon/\sigma=1/E$)を初期値 λ_0 で基準化した値($\lambda^*=E_0/E$)。なお、初期弾性係数 E_0 は入力値。

σ^* : 破壊接近度

n : 時間依存性の程度を表す変数

dt : 時間増分

m : 破壊の進行性を表すパラメータ (入力値) である。

2-2 羽柴らの飽和度を考慮したモデル

式(1)において、飽和度変化を考慮した計算を実施する場合、 n だけでなく a と m の値も変化するため、飽和度がこれら3つの定数に及ぼす影響をあらかじめ把握しておく必要がある。しかしながら、種々の飽和度での定数値の設定、あるいは定式化したりすることは容易ではない。そのため、式(1)を用いた数値解析は一定の飽和度のもとでの計算にとどまっていた。そこで、モデル中の定数の数はそのまま、応力依存性を表す関数形を変えることで、飽和度の影響を表す定数と時間依存性の程度を表す定数とを分離した羽柴らが提案したモデルを使用することを考えた。「岩石の飽和度を考慮したコンプライ

「アンズ可変型粘弾性モデル」とはコンプライアンス λ の増加速度を式(2)のように表したモデルである。

$$\frac{d\lambda}{dt} = a_1(\lambda)^m \exp[b\{\sigma - h(w)\}] \quad (2)$$

ここで、

a_1 : 飽和度 1 の時の a

b : 飽和度によらない定数

$h(w)$: 飽和度の関数 (飽和度 w と 1 での強度の差) である。

この式であらかじめ求めておく必要があるのは、 $h(w)$ と λ の初期値 λ_0 、および飽和度によらない a_1 、 b 、 m の 3 つの定数である。飽和度 w が減少、すなわち、 $h(w)$ が増加すると破壊の進行速度が遅くなり、強度やクリープ寿命が増加することになる。

3. 一軸圧縮試験の再現解析

羽柴らの飽和度を考慮したモデルを組み込んだ DACSAR-MP で一軸圧縮試験の再現解析を行い、片岡らによる飽和度を変化させた岩盤の一軸圧縮試験との比較を行った。飽和度は実験条件と同様に、 $w=0.00040, 0.013, 0.031, 0.20, 0.30, 1$ の 6 パターンとした。また解析対象は三城目安山岩とし、図 1 に解析モデル、表 1 に材料定数を示す。

4. 解析結果

図 2 に解析結果、図 3 に片岡ら²⁾によって行われた実験結果を示す。解析結果から応力-ひずみ関係において岩石特有の挙動であるひずみ軟化の傾向を再現することができた。また飽和度が高いほど、一軸圧縮強度が小さくなり、強度破壊点に達するまでのひずみも小さくなった。これらの結果は実験結果と定性的な一致が確認された。

5. まとめと展望

本研究では、羽柴らの飽和度を考慮したモデルを組み込んだ DACSAR-MP を用いて一軸圧縮試験の再現解析を行った。片岡らの実験結果と定性的な一致が確認され、岩石の飽和度の影響を把握することができた。今後は、幌延深地層研究センターを対象とした実規模で解析を行い、先行研究⁵⁾との比較を行う。

6. 参考文献

- 1) 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-,pp.i-ix,1999.

- 2) 片岡みなみ, 包添書, 羽柴公博, 福井勝則: 水飽和度が岩石の一軸圧縮下での応力-歪曲線に与える影響, Journal of MMIJ, Vol.133, No.6, 2017.
- 3) 羽柴公博, 福井勝則, 包添書: 岩石の飽和度を考慮したコンプライアンス可変型粘弾性モデルに関する考察, 日本材料学会, Vol.71, No.2, pp.181-188, 2022.
- 4) 大久保誠介, 何昌榮, 西松裕一: 一軸圧縮応力下における時間依存性挙動, 日本鉱業会誌, 103, pp.177-181,1987.
- 5) 松本優花, 金澤伸一: コンプライアンス可変型構成方程式による坑道周辺岩盤の掘削時における力学挙動解析, 令和 2 年度土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会, 2020.

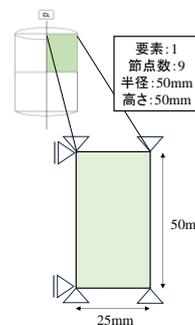


図 1 解析モデル

表 1 材料定数

E_0 (MPa)	8000
ν	0.2
γ_s (Mg/m ³)	2.6
m	40
b (MPa ⁻¹)	0.48
a_1 (MPa ^{m-1} s ⁻¹)	10^{135}
$h(w)$	$\ln(w^{-3.6})$

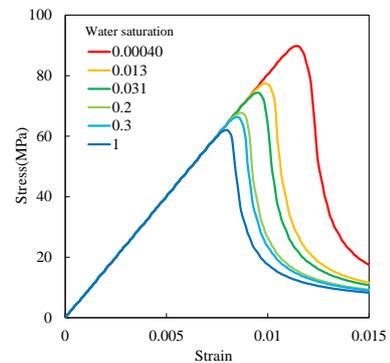


図 2 解析結果

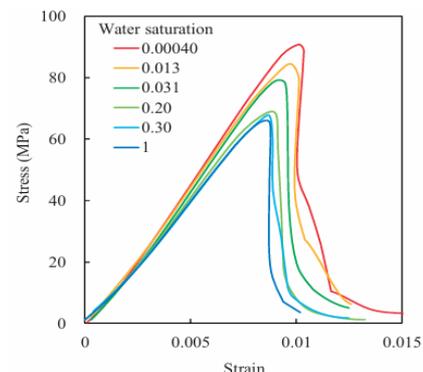


図 3 片岡ら²⁾の実験結果