

堆積軟岩を対象とした低応力レベルにおけるクリープ解析

核燃料サイクル開発機構

同上

東京大学大学院新領域創成科学研究科

正会員 高倉 望

中間 茂雄

大久保 誠介

1. はじめに

核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センターでは、岐阜県東濃地区に所有している東濃鉱山の坑道周辺に分布している堆積軟岩を対象として、長期岩盤挙動の評価手法について一連の研究を実施している。

本報では、当該研究サイトで採取した岩石試料を用いて、水平坑道周辺の応力状態を想定した低応力レベル下での一軸圧縮クリープ試験を行い、その試験結果をコンプライアンス可変型構成方程式で再現したので報告する。検討の結果、実験値と解析値はよく一致し、今回用いたコンプライアンス可変型構成方程式が、堆積軟岩を対象とした低応力レベル下での長期挙動を評価できる手法のひとつとして有効であることが分かった。

2. 低応力レベルにおけるクリープ試験

解析の対象となる坑道は、一軸圧縮強度 5 ~ 10 MPa 程度の堆積軟岩中の深度 135 m に位置している。仮に、研究サイト周辺岩盤の単位体積重量を 20 kN/m³ とした場合、土被り圧は 2.7 MPa となる。また、その岩盤の一軸圧縮強度を 8 MPa とすると、水平坑道周辺の鉛直方向の応力レベルは一軸圧縮強度の約 35 % となる。よって、本報でいう“低応力レベル”は、一軸圧縮強度の 30 ~ 40% といえる。

2.1 試験方法

岩石試料は、研究サイトの深度 130 ~ 140 m に分布する粗粒砂岩である。その試料を直径 25 mm、高さ 50 mm の円柱体に、また試験片の端面の平行度を ±0.02 mm 以内に成形した。最初、クリープ荷重とコンプライアンス可変型構成方程式の定数を決定するために一軸圧縮試験を実施し、その後にクリープ試験を実施した。

一軸圧縮試験は、低ひずみ速度と高ひずみ速度を交互に変えた定ひずみ速度試験（本報ではひずみ速度 3 μst/s と 30 μst/s をひずみ 250 μ ごとに変えた定ひずみ速度試験）である。クリープ試験では、試験片を水没させた完全湿潤状態下として、一軸状態で一軸圧縮強度の 30% の荷重を載荷した（**図 1** 参照）。載荷は、1 秒間で所定の荷重になるように試験装置を制御し、その後 1 ヶ月間クリープ試験を行った。試験は 3 試料について行った。計測項目は、試験片の変位量（カンチレバー式変位計）と、試験環境を確認するための装置周辺の温度（熱電対）とした。

2.2 実験結果と考察

載荷時間と試験片の変位量の関係を、**図 2** に

示す。**図 2** から、粗粒砂岩の低応力レベル下でのクリープでは、載荷してから約 1 ヶ月経過した時点でもひずみが増加し続けることが分かる。**図 3** にクリープひずみ速度曲線を示す。**図 3** から、粗粒砂岩のクリープひずみ速度と載荷時間を対数で整理すると、ほぼ直線的に減少していることが分かる。そこで、1 日間のクリープ試験データを基にクリープひずみ速度曲線を**図 3** に示す一次式で近似したところ、傾き b の平均値が -0.9、切片 c の平均値が -4.5 となった。クリープひずみ速度曲線の傾きについては、過去の研究結果から -0.8 ~ -0.9 程度である

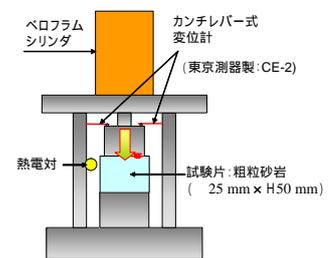


図 1 試験装置

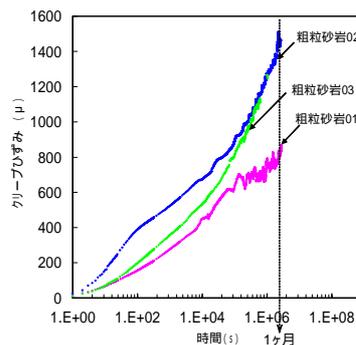


図 2 クリープひずみ曲線

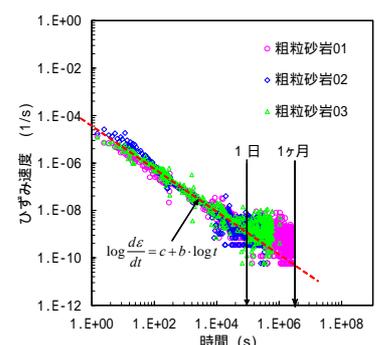


図 3 クリープひずみ速度曲線

キーワード 低応力レベル, クリープ, 堆積軟岩, コンプライアンス可変型構成方程式

連絡先 (〒509-5102 岐阜県土岐市泉町定林寺 959-31 TEL0572-53-0211)

とされている。今回の試験結果もこの範囲に収まっていることが分かった。

3. 低応力レベルを再現できるコンプライアンス可変型構成方程式

大久保らは、3次クリープなどの破壊現象に適用できるコンプライアンス可変型構成方程式の提案に引き続き、1次クリープに適用できるコンプライアンス可変型構成方程式(式1)を提案¹⁾し、弾性ひずみを差し引いたクリープひずみ λ^* とクリープひずみ速度 $d\lambda^*/dt$ の算定式(それぞれ、式2および式3)を導きだしている。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a_1 \cdot \sigma^{*n_1} \cdot (\lambda^* - 1)^{-m_1} \cdot \dots (1)$$

$$\varepsilon^* = a_1^{1/(m_1+1)} \cdot (m_1 + 1)^{1/(m_1+1)} \cdot (\sigma^*)^{1+n_1/(m_1+1)} \cdot t^{1/(m_1+1)} \cdot \dots (2)$$

$$\frac{d\varepsilon^*}{dt} = a_1^{1/(m_1+1)} \cdot (m_1 + 1)^{-m_1/(m_1+1)} \cdot (\sigma^*)^{1+n_1/(m_1+1)} \cdot t^{-m_1/(m_1+1)} \cdot \dots (3)$$

ここに、 λ^* :コンプライアンスを初期コンプライアンス λ_0 で正規化した値、 σ^* : 載荷応力を一軸圧縮強度 q_u で正規化した値

n_1, m_1, a_1 : コンプライアンス可変型構成方程式特有の定数

表1 入力定数一覧

	単位	値
λ_0	(/MPa)	3.3×10^{-4}
q_u	(MPa)	6.12
c	(MPa)	1.76
a_1	%	28.8
m_1	—	9
n_1	—	35
a_2	(1/sec)	3.1×10^{-12}

4. コンプライアンス可変型構成方程式を解くために必要なパラメータの算出

式1を一軸応力下で解く場合、 $\lambda^*, \lambda^*, n_1, m_1, a_1$ の値が必要となる。これらの値の中で n_1 は時間依存性の程度を示す定数、 m_1 はピーク強度前のコンプライアンスの変化特性を示す定数、 a_1 は強度を決める正値の定数である。次にパラメータの算出方法について述べる。 λ^* と λ^* は、それぞれ、今回実施した一軸圧縮試験のひずみ速度 $30 \mu\text{st/s}$ における一軸圧縮強度 q_u と、応力 - ひずみ曲線から得られた接線弾性係数 E_{50} の逆数を用いた。 n_1 は、ピーク強度付近の2種類の応力値(ひずみ速度を上げる直前の応力、ひずみ速度を10倍とした後、接線弾性係数がひずみ速度を上げる直前と一致したときの応力)から求めた。 m_1 と a_1 は、図3に示す近似式の傾き b と切片 c が式3を変形すると次式となることから求めた¹⁾。

$$b = \frac{-m_1}{m_1 + 1}, \quad c = \log(a_1^{1/(m_1+1)} \cdot (m_1 + 1)^{-m_1/(m_1+1)} \cdot (\sigma^*)^{1+n_1/(m_1+1)}) \cdot \dots (4)$$

以上の方法で求めた定数を表1に示す。次に、求めた定数がクリープ曲線をどの程度再現しているのか確認するため、式2に表1の値を代入して図化したクリープひずみ曲線を示す(図4参照)。図4から今回求めた定数はクリープ曲線をかなり良く再現できていることが分かった。

5. 解析結果と考察

検討対象とした、低応力レベルでのクリープを再現できるコンプライアンス可変型構成方程式では、時間の経過にともなってクリープひずみ速度は減少し、コンプライアンスは増加する。そこで、解析から得られた載荷後100日間のコンプライアンス変化を図5に示す。ここで、図中のコンプライアンスは式2で得られたクリープひずみを λ_0 で除して求めた。図5に示すとおり、コンプライアンスは100日間で0.45%増加する結果となった。

6. おわりに

サイクル機構が所有する東濃鉱山を研究サイトとし、大久保らが提案しているコンプライアンス可変型構成方程式を使って低応力レベル下でのクリープ解析手法を検討した。その結果、今回用いた構成方程式が堆積軟岩を対象とした低応力レベル下での長期挙動を評価できる手法のひとつとして有効であることが分かった。

謝辞：東京大学福井勝則助教授には貴重なご助言を頂いた。また、試験や試験片の成形に際して東京大学助手秋山政雄氏、技官畠山正樹氏、および博士課程羽柴公博氏に多大なご協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献：1) 大久保, 福井, 羽柴(2002)：コンプライアンス可変型構成方程式の拡張とクリープ試験結果による検討, 資源と素材, Vol 118, p.737-744.

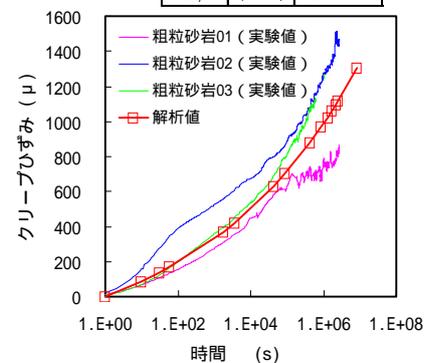


図4 実験値と解析値の比較

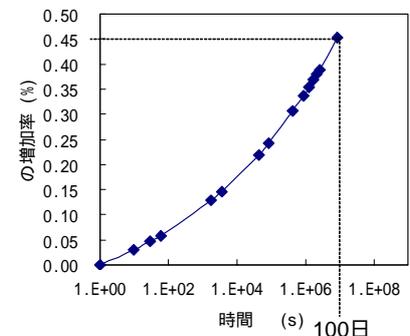


図5 の増加率