

熱の影響を受ける岩盤空洞の挙動について

愛媛大学大学院

正会員 木下尚樹 フェロー会員 稲田善紀 学生会員 ○津吉靖得

大成建設(株)

正会員 友永翔太

(株)芙蓉コンサルタント

正会員 谷光生 正会員 山田公雄

1. はじめに

数十年単位で熱水を地山岩盤内に貯蔵することを想定した際、貯蔵した熱水を熱源とした熱応力が発生し空洞の安定性に影響を及ぼすことがわかっている。また、空洞内の岩盤は長期間熱水の影響を受けることから、熱応力を考慮に入れた挙動解析を行う必要がある。

そこで、本研究では熱水の影響を受けた岩石の一軸圧縮クリープ試験を行い、岩石のクリープ特性を求めた後、岩石の時間依存性であるクリープ挙動を考慮に入れた空洞周辺岩盤の挙動解析を行い検討した。

2. 実験方法

本実験では花崗岩（愛媛県今治市産）を用いた。

一軸圧縮クリープ試験に使用する供試体は $\Phi 2.5 \times 5.0 \text{ cm}$ に成形し、端面の平行度は精度を $5/100 \text{ mm}$ 以内とした。成形された供試体は真空脱気することで蒸留水を浸潤させ湿潤状態とした。本実験に用いた試験機は定格荷重 150 kN の油圧サーボ試験機である。断熱セル内に供試体を取り付け、ポンプで水を循環させながら水の温度を所定の温度まで 1°C/min. 以下で加熱した。所定の温度に達した後 60 分間保温した後実験を行った。所定の温度は 20°C と 90°C の 2 種類とした。

クリープ荷重は事前に岩石の一軸圧縮破壊試験からダイレタンシーの起こる点を推定し、今回は一軸圧縮強度の 70% とした。荷重は瞬時に載荷することは不可能であり、強度に影響を及ぼさないであろうとされる荷重速度として 0.4 MPa/s を設定した。

荷重は試験機本体に設置されたロードセルにて測定した。ひずみは供試体に貼り付けた 2 枚の 2 軸ひずみゲージから測定した。セル内温度センサー、ロードセル、ひずみゲージの出力を AD 変換器を通して Personal Computer に記録した。

3. 実験結果

実験結果から縦ひずみと時間の

関係を図 1 に示す。初期ひずみは高温の方が大きいことがわかる。

つぎにひずみ速度と時間の両対数関係を図 2 に示す。この図では時間軸を対数でとっているのでひずみ速度が減少していく 1 次クリープ領域の特徴がみてとれる。勾配がほぼ -1 をとるが、ひずみ速度の傾きに特に違いは見られない。

グラフ中の最小のひずみ速度の違いに注目すると、高温下のひずみ

速度のほうが常温下のそれより大きいことがわかる。このことから 2 次クリープ領域が熱水の影響を受けていると考えられる。また、全体を通して温度が高い方がひずみが大きくなる傾向がみられた。

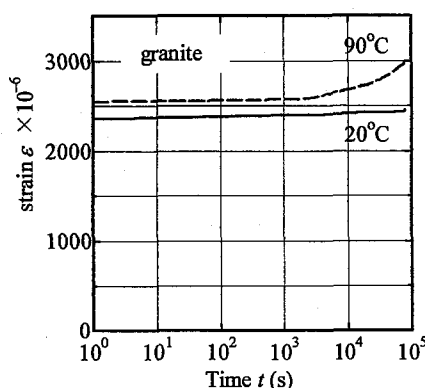


図 1 縦ひずみと時間の関係

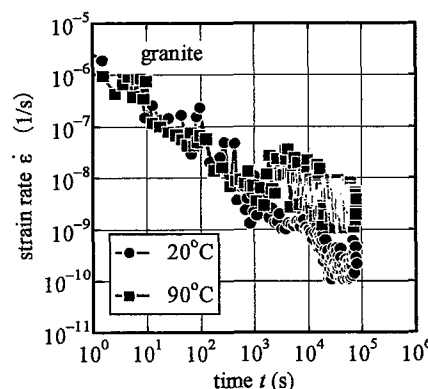


図 2 縦ひずみ速度と時間の両対数関係

4. Burgers model を用いた諸定数の推定

次に、岩石のクリープ現象を表現するのに用いられる力学模型の Burgers model を用いて諸定数の推定を試みた。下に Burgers model の式を示す。

$$\varepsilon = \sigma_0 \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{\mu_1} t + \frac{1}{E_2} \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{E_2}{\mu_2} t \right) \right\} \right] \quad (1)$$

ただし、 ε : ひずみ、 σ_0 : クリープ荷重、 t : 時間とする。

算出した結果を表 1 に示す。諸定数はいずれの値も高温の方が小さくなる傾向を示している。クリープ試験の時間の大部分を占める 2 次クリープを表すパラメータは μ_1 であり、これが小さくなっていることから高温のクリープ試験が常温よりも早く破壊に至ることが説明できる。

表 1 Burgers model の諸定数の値

Rock	Temp (°C)	E1 (GPa)	μ_1 (GPa·s)	E2 (GPa)	μ_2 (GPa·s)
Granite	20	49.9	1.9×10^5	2.9×10^3	1.7×10^7
	90	40.4	1.9×10^4	9.7×10^2	3.4×10^6

4. クリープ変形を考慮した空洞周辺岩盤の有限要素解析

本解析では簡便化するため 2 次クリープ部分のみを扱い、ひずみ速度の構成式として Norton 型の式を採用した。また、クリープひずみを有限要素法に用いるため、クリープ変形は体積変化を伴わないことと材料は等方的であるという条件をつけて Norton 式を多軸応力状態に拡張した。全ひずみ増分を表す式を下に示す。

$$\{\Delta \varepsilon\} = \{\Delta \varepsilon^e\} + \{\Delta \varepsilon^c\} + \{\Delta \varepsilon^t\} \quad (2)$$

ただし、 $\{\Delta \varepsilon^e\}$ は弾性ひずみ増分ベクトル、 $\{\Delta \varepsilon^c\}$ はクリープ増分ベクトル、 $\{\Delta \varepsilon^t\}$ は熱ひずみ増分ベクトルを示す。

解析モデルは平面ひずみ状態と仮定し、今回の解析では、亀裂のない新鮮な岩盤を想定した。土被り 100m の位置に直径 10m の単一円形空洞を掘削し、これに熱水(100°C一定)を貯蔵した場合と熱水を貯蔵しない場合について挙動解析を行った。解析領域は空洞表面から水平、鉛直下に 50m、100m とした。

花崗岩の物性値は表 2 に示す。

解析結果を図 3 に示す。熱水を貯蔵した場合の 1000 日後の空洞の水平変位が空洞の中心方向に大きくなり、空洞が収縮していることがわかる。この内空変位量はトンネル直径の約 1.97% になった。熱水を貯蔵していない場合の 1000 日後の空洞はわずかに鉛直方向に変位していることがわかる。

5. おわりに

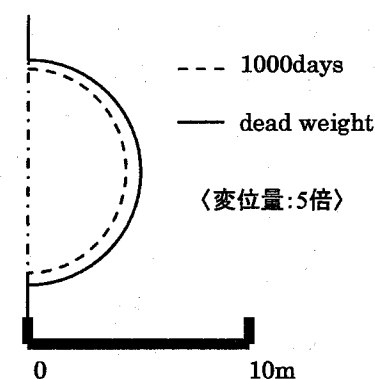
内空変位量がトンネル直径の 2% を超えると、それ以後の変形は急激に大きくなることが分かっている。また、内空変位量が 2% を超えるとトンネルが不安定状態になることから、空洞周辺に断熱材等を施し、熱応力を軽減させる必要がある。

<参考文献>

- 岡林信行, 永井隆吉, 塩釜幸弘: NATM 支保設計の考察, 鹿島建設技術研究所年報, Vol.32, pp.43-52, 1984.

表 2 花崗岩の物性値

密度 (kg/m³)	2650
ポアソン比	0.25
弾性係数 (GPa)	55.0
熱伝導率 (W/mK)	3.25
線膨張係数 (1/K) × 10 ⁻⁶	7.70
定圧比熱 (KJ/kgK)	0.997



空洞の変形状態 (熱水貯蔵時)

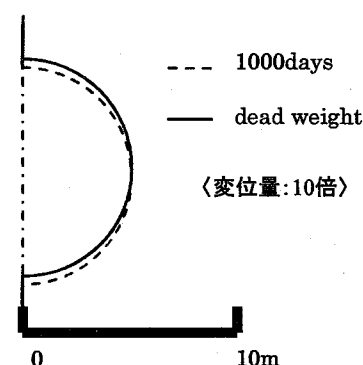


図 3 空洞の変形状態 (熱水貯蔵なし)