

熱水環境下における岩盤空洞の熱挙動に関する一考察

木下 尚樹^{1*}・安原 英明¹

¹愛媛大学大学院 理工学研究科生産環境工学専攻 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町三番)

*E-mail: kino@dpc.ehime-u.ac.jp

熱水貯蔵システムにおいて、岩盤空洞は長期間熱水環境下、すなわち、熱、水、応力の影響を受け続けることとなり、空洞の長期安定性を評価するための重要な要因となる。本研究では、熱および水の影響を受けた岩石の力学特性実験を行い、熱水環境下では強度や弾性係数が低下する結果を得た。つぎに高温下において一軸圧縮クリープ試験を行い、高温下では最小ひずみ速度が増加することなどを確認した。また、実験結果から推定したクリープに関する定数を用いて、岩盤空洞の挙動を解析により求めることを試みた。その結果、熱膨張により空洞周辺岩盤が自由面である空洞内部に張り出し、内空変位は貯蔵1000日後には直径の約2%となることなどがわかった。

Key Words : openings, thermal behavior, creep, deformation characteristics

1. はじめに

ごみ焼却場などの廃熱を利用して熱湯を得、地域暖房や給湯など多目的に利用する熱水貯蔵システム¹⁾において、その一時貯蔵施設としての岩盤空洞は長期間熱水環境下、すなわち、熱、水、応力の影響を受け続けることとなり、空洞の長期安定性を評価するための重要な要因となる。本研究では、基礎的な実験としてまず、熱および水の影響を受けた岩石の力学特性実験を行い、その結果より経時変化を推定することを試みた。つぎに高温下において一軸圧縮クリープ試験を行い、岩石の力学特性におよぼす熱および応力の影響を検討した。また、クリープ試験の結果から、熱水を貯蔵した岩盤空洞の挙動について解析により検討した。

2. 熱水環境下の岩石の力学特性の経時変化

(1) 実験方法

実験に用いた岩石は、花崗岩（愛媛県今治市産）および砂岩（島根県松江市産）である。表-1に各岩石の物理的性質を示す。試料は $\phi 2.5 \times 5.0$ cmの円柱供試体に成形し、デシケーター内で蒸留水に浸し真空脱気させることで強制的に湿潤状態にした。これらを密閉ステンレス容器に入れ蒸留水で満たした。蒸留水のpHは7である。容器

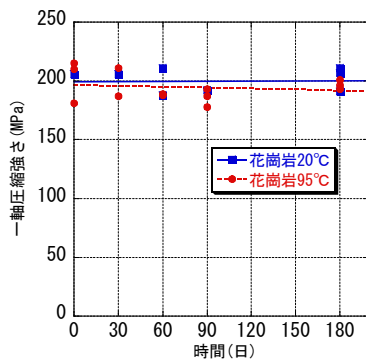
に入れる供試体は容器毎に10本とし、水と岩石の体積比を10:1とした。この容器を20℃に保った保存庫と95℃の水を循環させた水槽で間接的に容器内の水温の調整を行った。岩石の浸潤期間は最長180日とした。浸潤期間を終えた岩石供試体にて一軸圧縮試験を行った。試験はサーボ試験機に水槽を取り付け、水を循環させることで常に水で飽和させた状態で行った。供試体には1本につき2枚の2軸のひずみゲージを対角に貼り付け防水処理を行った。また、密閉ステンレス容器中の蒸留水を採取しICP発光分析を行った。

(2) 実験結果

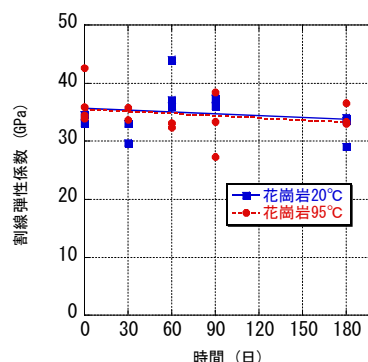
一軸圧縮強さの経時変化を図-1に示す。なお、図中の直線は得られた結果の最小二乗法による近似直線である。高温に保った花崗岩はわずかに強度が低下する傾向がみられる。砂岩は全体的に強度に若干のばらつきがあるものの常温での強度に顕著な変化の傾向はみられないのに対し高温での強度は大きく低下している。

表-1 実験に用いた岩石の物理的性質

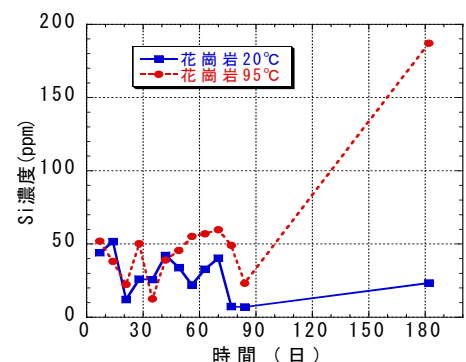
	間隙率 (%)	含水率 (%)	飽和度 (%)	かさ 比重	真 比重
花崗岩	0.80	0.24	81.32	2.65	2.67
砂 岩	20.3	10.75	98.82	2.21	2.55



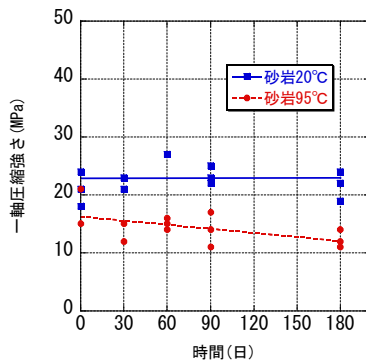
(a) 花崗岩



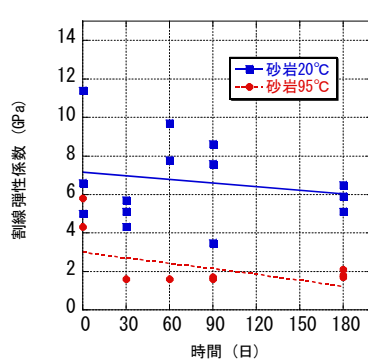
(a) 花崗岩



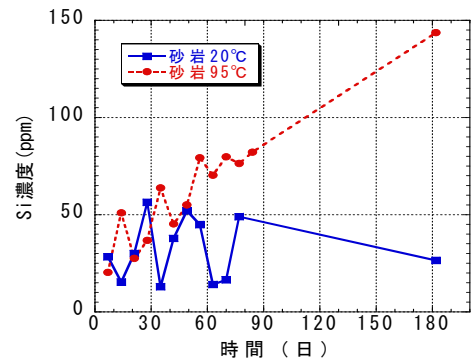
(a) 花崗岩



(b) 砂岩



(b) 砂岩



(b) 砂岩

図-1 一軸圧縮強さの経時変化

図-2 弾性係数の経時変化

図-3 Si濃度の経時変化

つぎに、岩石の弾性係数の経時変化を図-2に示す。弾性係数は各岩石の一軸圧縮強さの30%の点と原点を結んだ割線弾性係数とした。花崗岩では常温、高温共に同程度の低下の傾向がみられる。砂岩では値のばらつきが大きい、常温より高温の弾性係数が大きく低下している。なお、高温に保った試料は強度、弾性係数ともに常温試料よりも小さい値を示しているが、これは0日においても常温 - 高温 - 常温の温度履歴を与えた後、試験を行ったためであり、温度履歴が及ぼす影響も大きいことを示している。ICP発光分析の結果から特に顕著な傾向がみられた元素Siの濃度の経時変化を図-3に示す。花崗岩、砂岩共に高温のSi濃度が常温のそれより卓越して大きい。花崗岩は80日までは常温とそれほど違いがなかったのに対し、砂岩はばらつきがあるものの一定して増え続けていることがわかる。またSiの他に溶出した元素でSiの次に多く検出された元素はCaで約10ppm含まれていた。

一軸圧縮強さと弾性係数の結果から花崗岩、砂岩共に低下の傾向がみられ、特に砂岩は顕著な結果が出た。岩石の大半を構成するSiが溶出していることから、高温の影響により化学作用である溶解現象が力学特性に影響を及ぼしているものと考えられる。しかし、花崗岩と砂岩を比較すると溶出量と力学特性の定量変化に違いがあるなど、溶解現象のみでは説明できない部分もある。拡散、沈澱現象なども含めた化学作用が及ぼすメカニズムの解明が今後の課題である。

(3) 力学特性の経時変化の推定

岩石の一軸圧縮強さの長期経時変化の推定を、最小二乗法にて式(1)を回帰式として行った。

$$\sigma_c(t) = \sigma_c(0)[1 - \alpha(1 - \exp(-\beta t))] \quad (1)$$

ただし、 $\alpha(t)$: 時間 t における一軸圧縮強さ、 $\alpha(0)$: 初期強さ（実験結果からの平均値）、 $\alpha > 0$ 、 $\beta > 0$ 。

推定の結果を図-4に示す。強度の低下の割合は花崗岩が10%、砂岩が22%であり強度は砂岩がより低下する傾向にある。ほぼ定常状態（定常状態の99.7%）となる時間は花崗岩が134日、砂岩は31日であった。

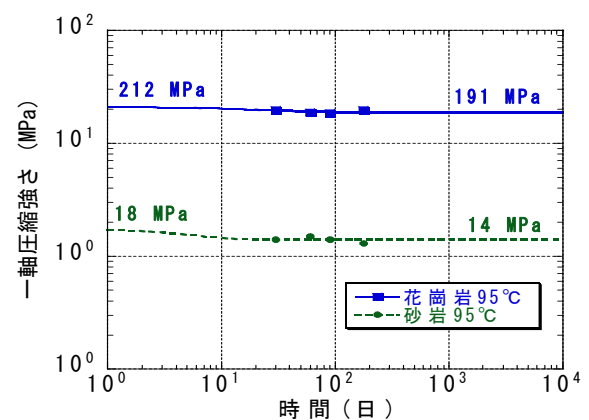


図-4 一軸圧縮強さの推定結果

3. 熱水環境下の岩石のクリープ特性

(1) 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 $\phi 2.5 \times 5.0$ cmに成形し、湿潤状態に保った。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。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、今回は一軸圧縮強さの90 %とした。荷重は瞬時に載荷することは不可能であり、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、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変換器にてPersonal Computerに記録した。

(2) 実験結果

実験結果からひずみと時間の関係を図-5に、ひずみ速度と時間の両対数関係を図-6に示す。時間軸を対数に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。勾配はほぼ-1で、ひずみ速度の傾きに特に違いはみられない。

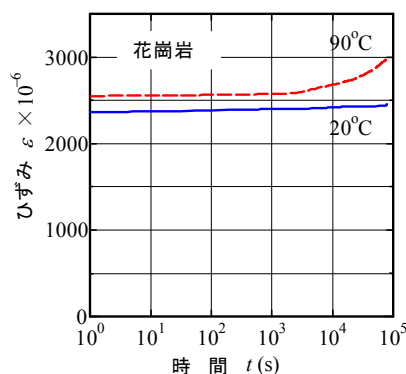


図-5 ひずみの経時変化

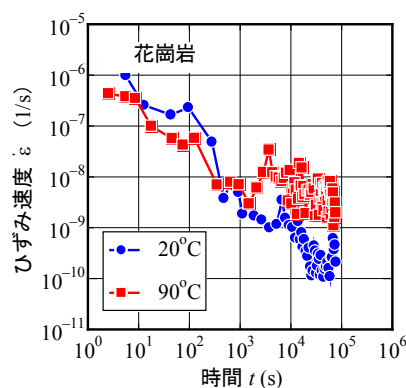


図-6 ひずみ速度の経時変化

図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方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、温度が高い方がひずみは大きくなる傾向がみられた。

4. 岩盤空洞の熱挙動に関する解析

(1) 解析方法

前述の一軸圧縮クリープ試験の結果を用いて、熱水を貯蔵した岩盤空洞の挙動について解析により検討した。

本解析では問題を単純化するために1次クリープ部分には取り扱わず、2次クリープ部分のみに着目しており、2次クリープのひずみ速度の構成式としてよく知られているNorton型方程式を採用し²⁾、これを多軸応力状態に拡張した式を用いた。また、解析上全ひずみ増分は弾性ひずみ、クリープひずみ、熱ひずみのそれぞれの増分の和とした。解析は2次元平面ひずみ問題とし、土被り100 mの位置に直径10 mの円形空洞を想定している。熱水を貯蔵した岩盤空洞表面には常に100 °Cの熱水が接しているとして、熱ひずみおよびクリープひずみの温度項に温度分布解析結果を用いた場合と、クリープを考慮しないと仮定した場合を行い比較した。物性値は、密度を2650 kg/m³、ポアソン比を0.25、弾性係数を35 GPa、定圧比熱を0.997 kJ/(kgK)、熱伝導率を3.25 W/(mK)、線膨張係数を 7.7×10^{-6} (1/K)とした。空洞表面から水平、鉛直下にそれぞれ100 m、50 mに境界をとり、地表は自由端とし、左右の境界は水平方向固定、下方の境界は上下方向固定とした。空洞周辺岩盤の側圧係数は0.5とした。

(2) 解析結果および考察

まず、空洞に熱水を貯蔵した場合の空洞表面からの水平軸上の温度の経時変化を図-7に示す。初期においては急激な温度勾配を示しているが、時間の経過とともに緩慢になる様子がうかがえる。また、熱は時間の経過とともにほぼ同心円状に周辺岩盤へ伝わっていた。

つぎに空洞中心からの水平軸上の側壁中央部の半径方向の変位（空洞中心方向の変位を正）を図-8に示す。比較のため、Burgers model での変位計算式とクリープを考慮しない場合の解析結果も示している。熱水を貯蔵した場合、熱水を熱源として空洞周辺岩盤に非定常の温度分布が生じ、熱膨張により空洞周辺岩盤が自由面である空洞内部に張り出すため、時間の経過に伴い空洞の水平軸上の水平変位が空洞に向かう方向に大きくなり、空洞が収縮している様子がうかがえる。これから内空変位量を計算すると、貯蔵1000日後には空洞内径の1.97 %となる。土屋ら³⁾の実験的研究によると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わかっている。また、岡林ら⁴⁾の既設トンネルの調査研究によると内空変位量（計測変位量）がトンネル直径の2 %を超えるとトンネルが不安定状態になることが多いとの結果が出ている。クリープ変形を含めた場合の熱水貯蔵時の岩盤空洞の変位は大きく、変位を抑える対策が必要であるものと考えられる。

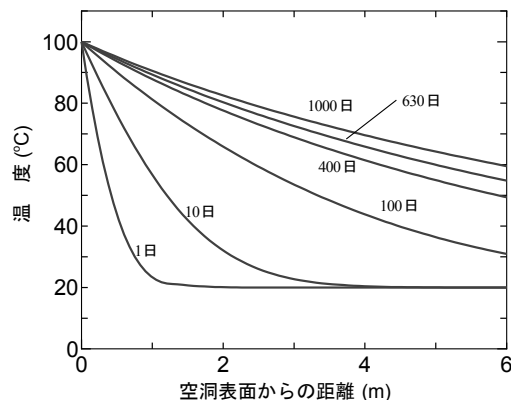


図-7 空洞表面からの水平軸上の温度の経時変化

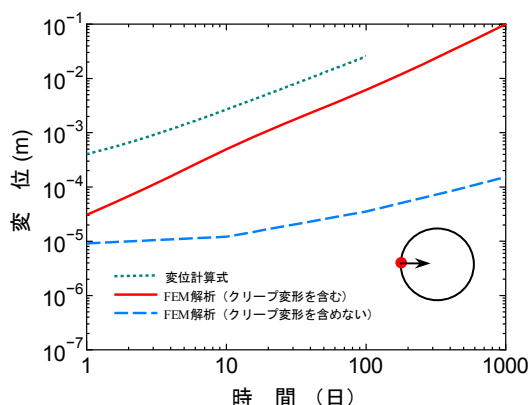


図-8 側壁中央部の半径方向の変位

5. まとめ

本研究で得られた結果を要約すると以下の通りである。

- (1)熱水環境下におかれた岩石の一軸圧縮強さおよび弾性係数は時間の経過に伴い低下することを示した。
- (2)熱水環境下における岩石の一軸圧縮クリープ試験を行い、最小ひずみ速度等が温度の影響を受けることを確認した。
- (3)実験結果から推定したクリープに関する定数を用いて、岩盤空洞の挙動を解析により求めることを試み、熱膨張により空洞周辺岩盤が自由面である空洞内部に張り出し、内空変位は貯蔵1000日後には直径の約2 %となることがわかった。

謝辞：本研究の一部は、平成19年度愛媛大学研究開発支援経費の補助により遂行された。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会編：熱環境下の地下岩盤施設の開発をめざして、pp.167-174, 丸善, 2006.
- 2) 矢川元基, 宮崎則幸：有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析, pp.59-198, サイエンス社, 1991.
- 3) 土屋 敬, 安田憲彰, 田沢雄二郎, 須藤英明：大型トンネル模型実験によるロックボルトの補強効果の検討, 第15回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.31-34, 1983.
- 4) 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.

STUDY OF THERMALLY INDUCED BEHAVIOR OF UNDERGROUND OPENING IN ROCK MASS

Naoki KINOSHITA and Hideaki YASUHARA

In heated water storage system, the opening keeps being received the effect of stress, water and heat, and they become important factors for evaluating the long term stability of the opening. In this study, it was confirmed that minimum strain rate increases under the high temperature by uniaxial compression creep test of rocks under the high temperature. The behavior of the opening was required by the analysis using creep constant estimated from the experimental result. It was found that, rock mass projected into inside of the opening by the thermal expansion, and that the displacement became about 2% of the diameter after one thousand days.