

愛媛大学大学院 学生員 ○安藤 新一郎

愛媛大学大学院 正会員 安原英明 愛媛大学大学院 正会員 木下尚樹

1. はじめに

現在、ゴミ焼却場で発生する廃熱を有効利用し、水を熱水に変え、地域暖房や給湯など多目的に利用する方法が提案されている。熱水を安定供給する為には一時的な貯蔵施設が必要であり、その施設として地山岩盤内に設けた空洞を活用する「岩盤内熱水貯蔵システム」が提案されている。実際の熱水貯蔵を想定した場合、周辺岩盤は貯蔵される熱水および、熱水に温められた地下水の影響下に長期間さらされることが予想される。

本研究では、まず、岩石に対し 80°C における一軸圧縮クリープ試験を行い、 20°C でのクリープ特性と比較し、温度による岩石のクリープ挙動への影響について検討した。更に、 80°C および 20°C での一軸圧縮クリープ試験結果を用いて、温度依存性を考慮した非線形粘弾性モデルを構築し、有限要素法に組み込むことで、空洞周辺岩盤の長期安定性を評価した。

2. 熱環境下における岩石のクリープ特性

クリープ変形を考慮した熱水貯蔵時の岩盤空洞の挙動解析を行うための基礎資料を得るために、岩石試料を雰囲気温度 80°C の高温で一軸圧縮クリープ試験を行い、 20°C におけるそれと比較し、温度依存性を有したクリープ特性の影響について検討を行った。岩石試料は花崗岩（愛媛県今治市産）、砂岩（島根県松江市産）を用い、これを $\phi 2.5 \times 5.0\text{cm}$ に成形した供試体を実験に使用した。

クリープ試験の結果、花崗岩及び砂岩のひずみ速度と時間の関係を両対数で表したものを図-1 及び図-2 に示す。 80°C 及び 20°C における両岩石のひずみ速度と時間の関係をみると、1次クリープ領域のひずみ速度の勾配に大きな差異は見られなかった。一方、ひ

ずみ速度の絶対値では、1次および2次クリープ領域では高温の方がひずみ速度が大きくなる傾向がみられた。また、花崗岩における破壊までの経過時間と任意の時刻の差と歪速度の関係を図-3 に示す。3次クリープ領域のひずみ速度においては温度による差異が見られなかった。

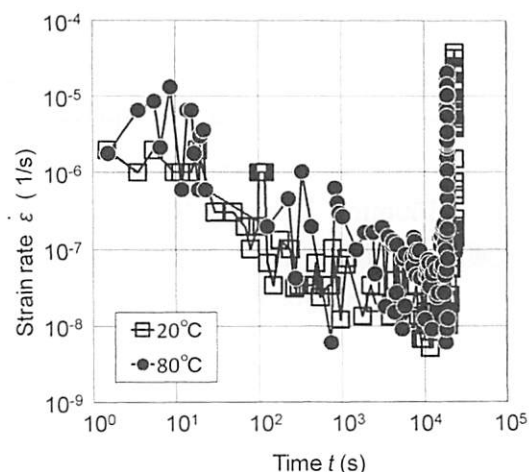


図-1 一軸圧縮クリープひずみ速度と時間の両対数関係（花崗岩）

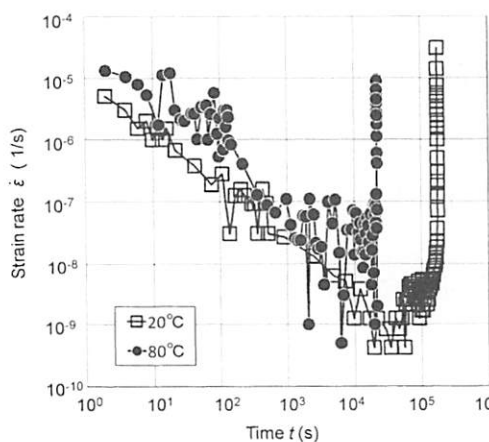


図-2 一軸圧縮クリープひずみ速度と時間の両対数関係（砂岩）

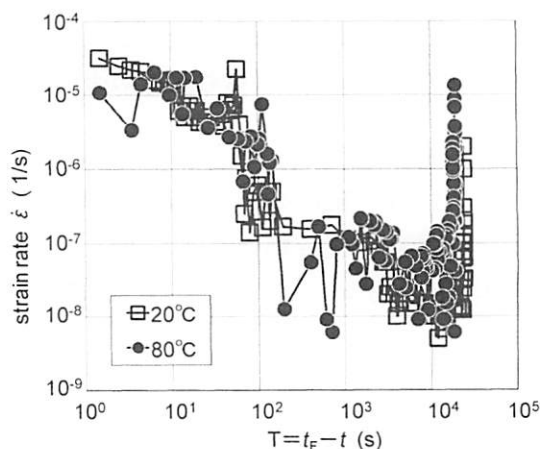


図-3 一軸圧縮クリープひずみ速度と残存寿命の両対数関係（花崗岩）

3. クリープ変形を考慮した熱水貯蔵時の空洞周辺岩盤の挙動解析

非線形粘弾性挙動を示す岩石を記述するため、本解析でコンプライアンス可変型構成方程式¹⁾を採用した。また、温度依存性を考慮した構成式に拡張し、このモデルに従う増分型の応力-ひずみ関係を組み込んだものに誘導した。式(1)に示す本解析モデルは、1次および3次クリープを再現できるヤング率の微小変化を記述する構成式を連成することにより、1次→2次→3次と遷移する一連のクリープ挙動を表現することができる。

$$\Delta E = -(a_1 f(T))(\sigma^*)^n \left(\frac{E}{E_0} - 1 \right)^{m_1} \frac{E^2}{E_0} \Delta t - (a_3 f(T))(\sigma^*)^{n_3} E_0^{m_3-1} E^{2-m_3} \Delta t \tag{1}$$

ここで、 a ：強度を表すパラメータ、 n ：延性の程度を決めるパラメータ、 m ：応力依存性を表すパラメータ

$f(T)$ ： $f(T) = \alpha \cdot \exp\left(-\frac{a}{T}\right)$ 、 a ：温度のパラメータ、 α ：温度のパラメータである。

上述の構成式を組み込んだ数値解析モデルを用い、花崗岩の実験結果から決定した解析パラメータ(表-1)より熱水貯蔵時の空洞周辺岩盤の挙動予測解析を実施した。本解析では、花崗岩内に空洞を掘削することを想定し、想定深度として100mと1000mを設定し、解析を行った。また、熱水貯蔵時の温度を100℃とし解析を実施したが、比較のため20℃の温度条件でも評価を行った。図-4より20℃の温度条件における天端では、想定深度100mおよび1000mともに掘削後50年が経過しても、クリープ変形はほとんど発生しないことが確認された。一方、図-5より100℃では時間の経過とともに、空洞周辺の変位が大きくなり、想定深度100mのとき、50年後に最大で10mm程度の空洞変位が発生することが確認された。ところが、クリープの応力レベルが高い想定深度1000mの場合でも、それほど変位の発生傾向が変化しないことが確認された。これは、温度の影響によるクリープの変形はそれほど影響がなく、熱膨張の影響が卓越したためであると考えられる。つまり、花崗岩等の硬岩では、クリープの影響よりも熱膨張の影響を考慮することが重要であると考えられ、今後は、実際の岩盤の性状を考慮した解析が必要であると考えられる。

4. おわりに

本研究では、温度依存性を有する岩盤のクリープ挙動を把握し、熱水貯蔵時の掘削空洞周辺岩盤の長期安定性を数値解析モデルにより評価することを試みた。実験的検討として、花崗岩及び砂岩共に、1次及び2次クリープのひずみ速度は80℃の方が速くなることが確認された。解析的検討として、亀裂等の弱面が存在しない無垢な硬岩では、掘削想定深度が100mの場合でも、クリープの影響は非常に小さいことが確認され、熱膨張に着目した安全管理が必要であることが判明した。

6. 参考文献

1) 大久保誠介, 福井勝則: 岩石のコンプライアンス可変型構成方程式とそのパラメータの取得法, 資源と素材, Vol.117, pp.13-20, 2001.

表-1 解析で用いたパラメータ

花崗岩			
1次クリープの式の a_1	10^{-11} (1/s)	密度	2650 kg/m ³
1次クリープの式の m_1	13	ポアソン比	0.25
1次クリープの式の n_1	38	弾性係数	60 GPa
3次クリープの式の a_3	0.025	定圧比熱	0.997 kJ/kgK
3次クリープの式の m_3	22	熱伝導率	3.25 W/mK
3次クリープの式の n_3	38	線膨張係数	7.7×10^{-6} (1/℃)
温度のパラメータ a	1273		
温度のパラメータ α	120		

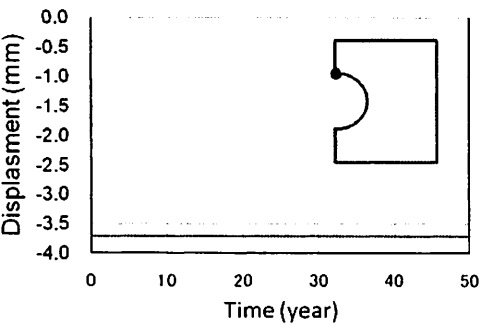


図-4 空洞天端部の変位の経時変化 (熱水貯蔵をしていない場合)

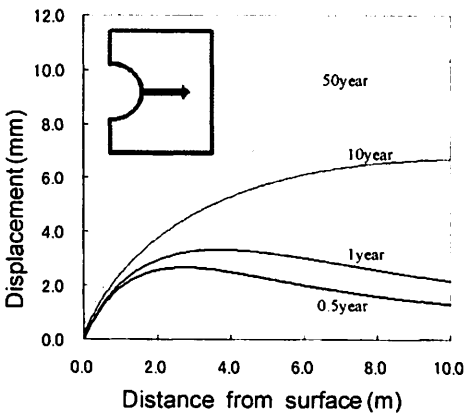


図-5 空洞の水平軸に沿った水平変位の経時変化 (熱水貯蔵時)