

# 稲田花崗岩と白浜砂岩のクリープ挙動に対する温度の影響

## EFFECTS OF TEMPERATURE ON CREEP BEHAVIOR OF INADA GRANITE AND SHIRAHAMA SANDSTONE

小玉齊明\*・藤井義明\*\*・石島洋二\*\*\*

Nariaki KODAMA, Yoshiaki FUJII and Yoji ISHIJIMA

Creep tests were carried out for Inada granite and Shirahama sandstone in pure water of between 2 °C and 72 °C. Correlation between time to failure and creep stress for Inada granite at 72°C was very low. Relationship between minimum axial / radial strain rate and creep life was represented by a straight line with a slope of approximately -1 regardless of the water temperature. Activation energy from creep tests was slightly smaller than that from uniaxial compression tests, indirect tensile tests, CB (Chevron Bend) tests and double torsion tests.

**Key Words:** creep tests, rock, temperature, activation energy, water

### 1. 緒言

岩石の変形挙動は、その他の力学的特性と同様、封圧、含水比、含有される水分の化学的性質、温度等の環境因子に少なからず影響を受けることが知られている。既報(小玉ら, 2003, Kodama et al., 2003)では、これらのうち温度に着目し、含水飽和状態の稲田花崗岩と白浜砂岩を用い、一軸圧縮試験、圧裂引張試験、最大荷重点における応力拡大係数を評価する CB 試験(ISRM, 1988)、応力腐食に起因する緩やかな亀裂進展(Subcritical Crack Growth)を観察するダブルトーション試験(以下、DT 試験)の 4 試験を 1°C から 80°C の水中で実施した。温度上昇に伴い一軸圧縮強度、圧裂引張強度、最大荷重点における応力拡大係数、ポアソン比は減少し、亀裂経路は複雑化した。また、強度に対する温度の影響は、白浜砂岩より稲田花崗岩で大きかった。これらの原因として、応力腐食、温度変化による水の粘性変化、鉱物間の熱膨張・収縮量の差異などに着目した考察を行った。本研究では、亀裂速度や粘性変形に対する温度の影響についてより深く検討し、岩盤構造物の長期安定性評価へ関連付けるため、これらと同じ岩石について、ほぼ同じ温度条件の下でクリープ試験を行った。

岩盤構造物の安定性を評価する際には長期強度や変形の時間依存性を考慮することが不可欠と思われるが、DT 試験と共に時間に依存した岩石の破壊現象に関する代表的な試験方法の 1 つであるクリープ試験においても、温度依存性に関する研究が行われている。例えば、山辺ら(2002)による田下凝灰岩のクリープ試験においては、温度増加に伴いひずみ速度が速くなり、破壊までの時間が短くなるということが確認されている。気温変化や岩盤内貯蔵物による温度変化を被る岩盤の長期安定性を評価する上で、このような、岩石のクリープに対する温度の影響を把握することは重要と考えられる。

---

\* 学生会員 修士(工学) 北海道大学大学院 工学研究科

\*\* 正会員 工博 北海道大学大学院 工学研究科

\*\*\* 工博 北海道大学大学院 工学研究科

## 2. 供試体と試験方法

本研究では、2.0℃、37.0℃、72.0℃の3通りの設定温度に制御した純水中で、含水飽和状態の稲田花崗岩（茨城県笠間市産）と白浜砂岩（和歌山県西牟婁郡白浜町産）の供試体を用いたクリープ試験を行った。本試験における設定温度は、実験装置が安定して作動する温度範囲を調べた結果より決定したものであり、例えば、Cristescu & Hunsche (1998) 等、従来の研究と比較しやや狭い。しかしながら、例えば高レベル核廃棄物の処分場の場合、地下構造物近傍における岩盤温度は概ね 80～100℃程度になると想定され、本研究の温度設定は長期安定性評価に必要な温度範囲をほぼ満たしているといえる。また、地下水面下の岩盤自由面近傍を想定し、水中で試験を行ったが、水中での試験には、湿度の統一や温度上昇に伴う脱水進行の防止等の利点もある。

稲田花崗岩は、石英・斜長石・カリ長石と少量の黒雲母などからなる花崗岩で、粒径は最大で 5 mm 程度であった。白浜砂岩は石英一長石質の砂岩で、基質（主に風化により生成されたと考えられるイライトで、石英粒子周辺等に厚さ 10 μm 程度で付着）の少ない細粒砂岩に分類される。供試体は、30cm 角のブロックから直径 30 mm、長さ 60 mm の円柱形に整形した後、純水中で 1 週間以上脱気した。試験時の载荷軸方向は、ブロックのP波速度が一番小さい方向とした。有効空隙率は、稲田花崗岩で 0.85%、白浜砂岩で 14.3%だった。

図-1 に試験装置の概略図を示す。供試体はステンレス製の水槽内に設置し、材料試験機（Instron 社製、5586 型、機械式）で载荷した。水温は外部の循環式水槽（東京理化工機社製、UA-10S）で制御した。2.0℃での温度制御には冷却装置（東京理化工機 ECS-0SS）も用い、他の設定温度同様、誤差を±0.1℃程度に抑えた。熱衝撃による岩石の劣化を避けるために設定温度までは 0.5℃/min 程度で加熱・冷却した。クリープ開始までの軸ひずみは供試体に貼付したひずみゲージ（共和電機、KFW-5）で計測し、クリープ時の軸ひずみは材料試験機のブラテン変位（ストローク）を軸変位とみなし供試体長さで除して評価した。ひずみゲージによる横ひずみの測定は局所的であり、破壊前にひずみが減少する場合があるので、横ひずみの測定には 2 つのリング式変位計（東京測器研究所製、RAW-30、定格 1500 μV/V、測定範囲±2 mm）を互いに直角に供試体中央部に取り付け、径ひずみを正確に測定しようと試みた。得られたひずみデータはノイズ除去のため 10 Hz のローパスフィルターをかけ、ひずみアンプで増幅してパソコンに取り込んだ。

それぞれの試験は、水温を各設定温度に保ったまま 1 時間以上静置し、計測機器からの出力の安定を確認した後実施した。クリープ応力までの载荷速度は 3.6 mm/min とした。稲田花崗岩のようなばらつきの大きい試料を用いたクリープ試験の場合、藤井ら(1997)のように、圧縮破壊の進展状況を指し示す指標として、横ひずみの値を用いることができる。本研究では稲田花崗岩における 2℃の試験と白浜砂岩の試験では、一軸圧縮強度（稲田花崗岩 162.8 MPa、白浜砂岩 27.1 MPa）を基準としたクリープ応力比を予め決定し定応力制御に移行したが、稲田花崗岩の 37℃および 72℃の試験では径ひずみの値を目安にして定荷重に移行した。

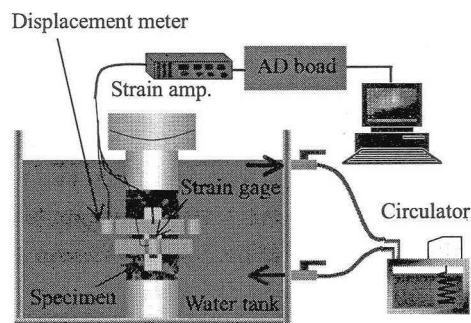


図-1 試験装置概略図

表-1 各条件下での試験数と応力・寿命の範囲

| 温度条件 |     | 試験数    | 応力範囲 (MPa) | 寿命範囲 (s) |
|------|-----|--------|------------|----------|
| 稲田   | 2℃  | 9 (0)  | 108-153    | 31-24119 |
|      | 37℃ | 12 (2) | 93.4-175   | 7-47182  |
|      | 72℃ | 10 (1) | 81.9-128   | 3-20204  |
| 白浜   | 2℃  | 5 (1)  | 19.0-28.8  | 25-6785  |
|      | 37℃ | 7 (1)  | 14.2-27.2  | 24-24350 |
|      | 72℃ | 9 (2)  | 11.3-19.2  | 29-45343 |

### 3. 試験結果

#### (1) 設定温度におけるクリープ試験

各温度条件下において実行した試験の数等を表-1 にまとめて示す。なお、試験数の項目における括弧内の数字は試験開始より 48 時間以内に破壊に至らなかった供試体数であり、以下のグラフ中には白抜きのデータで示す。

クリープ変位と時間の関係を図-2 に示す。白浜砂岩では各温度ともにクリープ応力が小さくなるとそれに応じて寿命が長くなる傾向が見られるが、稲田花崗岩では寿命のばらつきが大きく、必ずしもこの傾向が当てはまらず、低いクリープ応力でも寿命が短い場合がしばしばあった。また、72℃においては、特に寿命のばらつきが大きく、 $10^3$  s から  $10^5$  s で破壊に至るクリープ試験を行うことが困難だった。

続いてクリープ応力と寿命の関係を図-3 に示す。同図において、花崗岩では直線近似できそうな相関はみられないが、例えば 100 MPa 付近に注目して同じクリープ応力で比較すると、温度上昇とともにクリープ寿命が短くなる傾向が認められる。一方、白浜砂岩ではクリープ応力が小さくなると寿命の対数が増加する傾向が明瞭であり、同じ応力レベルで比較すると温度増加とともに寿命が短くなっている。

図-4 にクリープ応力と最小軸ひずみ速度の関係を、図-5 にクリープ応力と最小横ひずみ速度の関係を示す。これらの図中において载荷中の脆性的な亀裂進展等によりひずみ計測を失敗したデータは含まない(以下同)。72℃における最小ひずみ速度は他の水温のものより大きいとしかいえないが、白浜砂岩ではその他の水温で正の相関が認められる。

次に、クリープ開始時のひずみと寿命の関係を図-6 および図-7 にまとめる。データのばらつきは大きいものの、同寿命で比較すると、稲田花崗岩の軸ひずみは高温において小さく、白浜砂岩では大きい。一方、同寿命で比較した横ひずみは高温になるほど小さい。

最小ひずみ速度と寿命の関係を図-8 および図-9 に示す。最小軸ひずみ速度の対数とクリープ寿命の対数の傾きがほぼ -1 であるような負の相関関係があることが、例えば山下ら(1994)等で示されている。藤井ら(1997)、山口ら(2002)は封圧下におけるクリープ試験で、軸ひずみに加えて周ひずみにもこの傾向を確認した。多少ばらつきはあるものの、本研究の結果ではそれらに加えて、この関係が設定水温に依存しないことがみてとれる。これは、岩盤空洞の安定性をひずみ速度で評価する場合に温度を考慮しなくてよい可能性を示唆している。

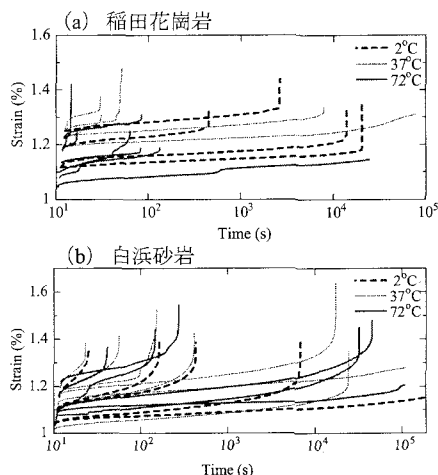


図-2 各温度のひずみと時間の関係

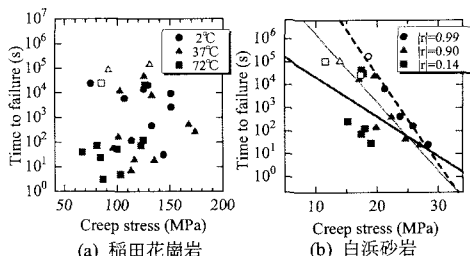


図-3 クリープ応力と寿命の関係

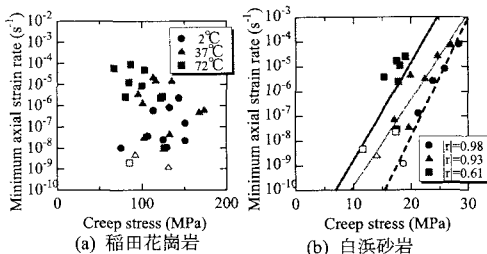


図-4 クリープ応力と最小軸ひずみ速度

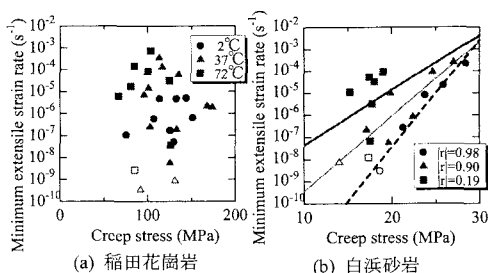


図-5 クリープ応力と最小横ひずみ速度

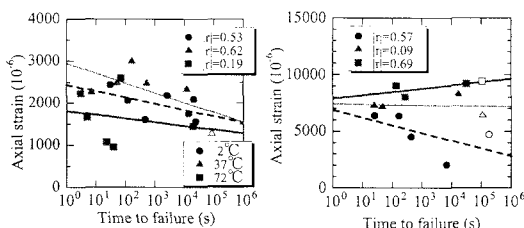


図-6 クリープ開始時の軸ひずみとクリープ寿命の関係

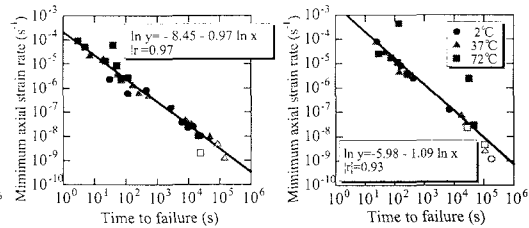


図-8 最小軸ひずみ速度とクリープ寿命の関係

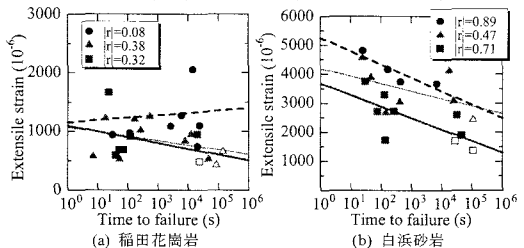


図-7 クリープ開始時の横ひずみとクリープ寿命の関係

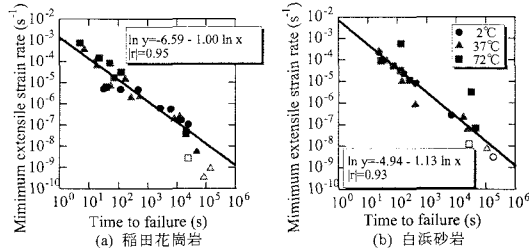


図-9 最小横ひずみ速度とクリープ寿命の関係

## (2) 水温変化時のクリープ

これまで、各設定温度下におけるクリープ試験の結果をまとめた。特に稲田花崗岩では結果のばらつきが大きく傾向を把握することが難しかった。既往の研究では、このような場合、2次クリープ中にクリープ応力比や封圧を変化させる多段階クリープ試験により、応力とクリープ寿命の関係やクリープひずみ挙動についての考察が行われる場合がある(例えば、山口ら2000)。この手法には、2次クリープにおける正確な最小ひずみ速度の評価が出来ないというデメリットがあるが、単一の供試体を用いる利便性に加え、ばらつきの少ない結果が得やすいという利点も有している。ここでは、2次クリープ中の水温変化によるひずみ速度変化について検討した。

稲田花崗岩を用い、124.8 MPaのクリープ応力で設定温度2°Cから試験を開始し、安定した2次クリープによる変形を約5時間確認した後、水温を37°C、72°Cと順次上昇させ、ストロークの経時変化を計測した(図-10)。図からわかるように温度変化開始後約3時間は岩石自体、水槽、材料試験機等の熱膨張により大きな変位が生じているが、その後、再度安定した2次クリープが観察される。ストローク値を供試体長さで除して算出したひずみ速度は高温になるほど大きく(図-11)、前節までの試験結果と調和的な結果が得られた。また、温度の影響は2°Cから37°Cの常温付近よりも、37°Cから72°Cの高温領域において大きくあらわれた。なお、試験後に10時間程度モニタリングを継続したが、この間に3次クリープは観察されず、ほぼ安定した定常クリープを記録した。

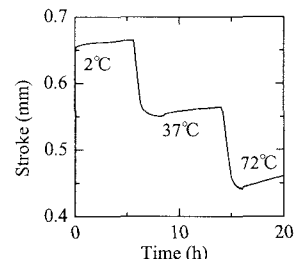


図-10 ストロークの経時変化

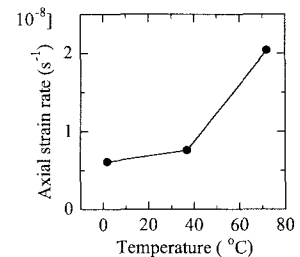


図-11 ひずみ速度と温度の関係

## 4. 考察

### (1) ひずみについて

クリープ制御開始時の軸ひずみは、稲田花崗岩では同寿命と比較すると温度が高いほど小さくなった。この原因は定かではないが、高温の稲田花崗岩で、供試体内部に生じると考えられる、荷重前の設定温度への温度変化による大きな熱応力の影響が指摘できる。一方、白浜砂岩では、同寿命を与えるクリープ開始時の軸ひずみは温度上昇とともに増加した。これは白浜砂岩中の粘土鉱物が熱応力の発生を抑制し、代わって高温において粘性変形が卓越したためかもしれない。一軸圧縮試験のヤング率(小玉ら、2003)も高温では小さくなる傾向を示した。

## (2) 活性化エネルギーの評価

既往の研究の多くでは、定常クリープでのひずみ速度とクリープ応力の関係として、Dorm-Weertman の実験式(大久保, 1991)が用いられる。

$$\dot{\epsilon} = A \sigma^n \exp\left(\frac{-E_{\text{act}}}{RT}\right) \quad (1)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}$  ( $\text{s}^{-1}$ ) はひずみ速度、 $A$  ( $\text{s}^{-1}$ ) は定数、 $\sigma$  は無次元化されたクリープ応力、 $E_{\text{act}}$  (J/mol) は分子 1 mol あたりの活性化エネルギー、 $R$  は気体定数 ( $8.3144 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ )、 $T$  は絶対温度 (K) である。一方、既報(小玉ら, 2003, Kodama et al., 2002)における前述の各試験については Freimen (1984) による亀裂進展速度  $V$  とモード I の応力拡大係数  $K_I$  ( $\text{Pa} \cdot \text{m}^{0.5}$ ) の関係式を用いて考察を行った。

$$V = V_0 \cdot a(\text{H}_2\text{O}) \exp\left\{\frac{(-E_{\text{act}} + \alpha K_I)}{RT}\right\} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{2V^*}{\sqrt{\pi} r_c}$$

ここで、 $V_0$  (m/s) は物質や環境により決まる定数、 $a(\text{H}_2\text{O})$  は水の活量(相対湿度にほぼ等しい)、 $V^*$  ( $\text{m}^3$ ) は活性化体積(原系から活性錯合体の状態へ移るときの体積変化)、 $r_c$  (m) は亀裂先端の曲率半径である。Lockner (1993) は、クリープ試験において、これと類似の(3)式を用いて非弾性体積ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{vi}$  と亀裂速度の関係を表した。

$$\dot{\epsilon}_{vi} = \dot{\epsilon}_0 \cdot a(\text{H}_2\text{O}) \exp\left(\frac{-E_{\text{act}} + B\sigma}{RT}\right) \quad (3)$$

ここで、 $B$  (J/mol $\cdot$ Pa) は定数である。これら式中的変数のうち、 $n$  と  $E_{\text{act}}$  について既往の研究より次のような知見が得られている。Cristescu & Hunsche (1998) は定数  $n$  について、非常に低い応力レベルで拡散クリープが卓越している場合に 1、転位クリープが支配的な場合では、高温(融点の 1/2 以上)において 3、低温(室温～融点の 1/2)において 6～7(実験では 6～9 の例が多い)としている。 $E_{\text{act}}$  に関しては、石英の活性化エネルギーとして 46 kJ/mol～99 kJ/mol が知られている(Kronenberg, 1994)。岩石については Jaoul et al. (1984) による 700℃ から 1100℃ までの高温高封圧下でのクリープ試験において Heavitree quartzite の  $E_{\text{act}}$  が高温真空乾燥した供試体で 184 kJ/mol、高温気中乾燥したもので 171 kJ/mol、人為的に水分を加えたもので 146 kJ/mol とそれぞれ評価されている。

ここで、含水飽和状態であることから  $a(\text{H}_2\text{O})$  は 1 とし、(1) 式と(3) 式の両辺の対数を取り(1)' 式および(3)' 式を得る。

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A + n \ln \sigma - \frac{E_{\text{act}}}{RT} \quad (1)'$$

$$\ln \dot{\epsilon}_{vi} = \ln \dot{\epsilon}_0 - \frac{E_{\text{act}}}{RT} + \frac{B}{RT} \sigma \quad (3)'$$

(1)' 式と(3)' 式(非弾性体積ひずみに代わり軸ひずみを使用)に本研究で得られた最小ひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  を  $T$ 、 $\sigma$  とともに代入し、重みなし最小二乗法により未知数の最確値と標準偏差を求めた(表-3 および表-4)。算出された各未知数の標準偏差はいずれも大きく、これらを用いた議論はオーダーレベルに留めざるを得ないが、得られた  $E_{\text{act}}$  は、CB 試験を除く各種力学試験による値、Jaoul et al. による結果、石英の活性化エネルギーと同程度もしくはやや小さい。評価される  $n$  についても、上述よりやや小さい値だった。なお、これら未知数は、最小横ひずみ速度を用いた場合も同程度の値に評価された。

ここで、これら 2 つの式を用いる妥当性について検討する。(1) 式は粘性変形を表す。最小ひずみ速度の対数とクリープ応力の対数との関係を表す直線の傾き  $n$  は変形のメカニズムにより左右され、低温クリープ～高温クリープで 9～3 程度まで変化する。一方、(3) 式は亀裂のサブクリティカルな成長による変形を表し、最小ひずみ速度の対数とクリープ応力(対数ではない)の関係を表す直線の傾きは絶対温度の逆数に比例する。実際のクリープ変形は、粘性変形と

表-3 (1)式より評価された物理量

| Physical quantities       | Inada granite             | Shirahama sandstone    |
|---------------------------|---------------------------|------------------------|
| $A$ ( $\text{s}^{-1}$ )   | $e^{9.00 \pm 38.18}$      | $e^{-54.42 \pm 66.31}$ |
| $n$                       | $-1.68e^{-1} \pm 2.16e^0$ | $3.03e^0 \pm 4.39e^0$  |
| $E_{\text{act}}$ (kJ/mol) | $50.55 \pm 14.91$         | $23.23 \pm 29.51$      |

表-4 (3)式より評価された物理量

| Physical quantities                    | Inada granite               | Shirahama sandstone         |
|----------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| $\dot{\epsilon}_0$ ( $\text{s}^{-1}$ ) | $e^{6.15 \pm 5.80}$         | $e^{3.32 \pm 10.99}$        |
| $B$ (J/mol $\cdot$ Pa)                 | $2.28e^{-6} \pm 4.76e^{-5}$ | $8.69e^{-4} \pm 5.55e^{-4}$ |
| $E_{\text{act}}$ (kJ/mol)              | $51.49 \pm 17.37$           | $59.01 \pm 37.58$           |

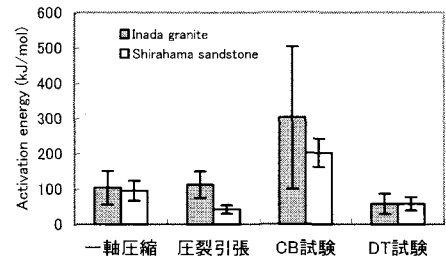


図-12 各試験より得た活性化エネルギー

亀裂のサブクリティカルな成長が入り混じったものであると思われるし、また、上述のように、 $E_{act}$  の評価に(1)式と(3)式とでさほど大きな差異は認められない。仮に非常にばらつきの小さいデータが得られれば(1)式、(3)式それぞれの寄与の割合を推定できる可能性はあるが、一軸圧縮下ではかなり困難といわざるを得ない。

### (3) クリープ応力と寿命

温度上昇とともに、特に稲田花崗岩におけるクリープ応力と寿命の関係で、ばらつきが大きくなった。これに関して、粘性係数の低減による、透水係数の低い花崗岩の円柱形供試体内部への水の供給速度の増加を原因の 1 つとして指摘したい。DT 試験において応力腐食の生じる応力拡大係数の幅が温度上昇により拡大したことも合致するが、岩石内部に生じた空隙(亀裂面)への容易となった水の浸入が、亀裂先端の熱活性化とともに、低応力下における変形を促し得る。逆に高い応力レベルでは、DT 試験でも見られた亀裂速度の速い領域における水の供給不足(小玉ら, 2004)が、供試体内部の各亀裂における亀裂速度の応力レベルに応じた増加を妨げる可能性がある。これらは、透水性の高い砂岩よりも透水性の低い花崗岩で、また薄い平板状供試体の DT 試験よりも円柱形供試体の圧縮試験で、より顕著にあらわれ、クリープ応力と寿命の対数との間の相関が低くなったのではないだろうか。

## 5. 結言

純水中でクリープ試験を実施し、含水飽和させた花崗岩と砂岩の時間依存性破壊に対する温度の影響を調べた。その結果、温度上昇に伴いひずみ速度が増加することが確認され、稲田花崗岩では高温下で応力と寿命の間の相関が低くなった。最小ひずみ速度－寿命線図は軸・横ともに温度に関わらずほぼ-1 の傾きを示した。実験結果から評価された活性化エネルギーは、従来知られている値とほぼ同じかやや小さい値を示した。

### 参考文献

- Cristescu, N. D. and Hunsche, U. (1998): Time Effects in Rock Mechanics, John Wiley & Sons, Chisester.
- Freiman, S. W. (1984): Effects of Chemical Environments on Slow Crack Growth in Glasses and Ceramics, *Journal of Geophysical Research*, Vol.89, No.B6, pp.4072-4076.
- ISRM (1988): Suggested methods for determining the fracture toughness of Rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 25.
- Jaoul, O., Tullis, J. and Kronenberg, A. (1984): The Effect of Varying Water Contents on the creep behavior of Heavitree Quartzite, *Journal of Geophysical Research*, Vol.89, No.B6, 4298-4312.
- Kodama, N., Fujii, Y., Ishijima, Y. (2003): The effect of temperature on the mechanical properties of Inada granite and Shirahama sandstone, *Environmental Rock Engineering, Proceedings of the first Kyoto International Symposium on Underground*, pp. 187-195, A.A. Balkema publishers.
- Kronenberg, A. (1994): Hydrogen Speciation and Chemical Weakening of Quartz, Silica, Physical Behavior, *Geochemistry and Materials Applications, Rev. Mineralogy*, No.29, pp.123-176, pp.71-96.
- Lockner, D. (1993): Room Temperature Creep in Saturated Granite, *Journal of Geophysical Research*, Vol.98, No.B1, pp.475-487.
- 大久保誠介 (1991): 岩石のクリープ, 資源・素材学会誌, Vol. 107, No.5, pp. 245-252.
- 小玉齊明, 藤井義明, 藤田泰之, 石島洋二 (2003): 水中における稲田花崗岩と白浜砂岩の変形・破壊挙動に関する温度の影響, 資源と素材, Vol. 119, pp. 461-468.
- 小玉齊明, 藤井義明, 石島洋二 (2004): 稲田花崗岩と白浜砂岩の水中における緩やかな亀裂進展現象に対する温度の影響, 土木学会論文集, 2004 年 12 月号掲載予定.
- 藤井義明, 木山保, 大森瑞穂, 石島洋二 (1997): 岩石のクリープ試験における周ひずみの挙動に関する研究, 資源と素材, Vol.113, pp.162-168.
- 山口勉, 大久保誠介, エンリコマラニーニ, 成田孝 (2000): 稲田花崗岩の周圧下の多段階クリープ試験と長期寿命予測, 資源と素材, Vol.116, pp. 91-96.
- 山下秀, 杉本文男, 山内優, 川辺金光 (1994): 軟岩の圧縮クリープ過程と微視的構造の変化, 資源と素材, Vol 110, pp. 875-882.
- 山辺正, 宮本綾子, 青木智幸, 小川豊和 (2002): 環境条件を考慮した軟岩の時間依存性挙動とその変形予測に関する実験的研究, 土木学会第 57 回年次講演会要旨集, III-448, pp. 885-886.