

高温下における大谷石の一軸クリープ試験 —最小ひずみ速度とクリープ挙動の関係—

UNIAXIAL CREEP TEST OF OHYA STONE AT HIGH TEMPERATURE —RELATIONSHIP BETWEEN MINIMUM STRAIN RATE AND CREEP PARAMETERS—

柴田 健弘*・谷 和夫**・岡田 哲実***

Kenko SHIBATA, Kazuo TANI, Tetsuji OKADA

Geological disposal is expected to be the most practical method for isolating high-level radioactive wastes. Since the high-level radioactive wastes generate heat due to collapse of nuclide, the rock mass around the geological disposal facility will experience high temperatures. Therefore, it is important to understand the effect of high temperatures on long-term behavior of rock masses. In this study, a series of uniaxial creep tests on tuffaceous rock were conducted under different temperatures from 24°C to 95°C. The results reveal that creep behavior is dependent on temperatures. Moreover, a constitutive model for creep behavior is proposed based on the relationship between minimum strain rate and other creep parameters.

Key words: unconfined compression test, creep, soft rock, high temperature, constitutive model, high-level radioactive wastes, minimum strain rate

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物を地層処分する周辺岩盤の候補として、一般に透水性を考慮して不連続面が未発達な堆積軟岩があげられている。このような堆積岩は一般に軟質であり、処分場の長期安定を考える上でクリープ変形を無視することができない。高レベル放射性廃棄物は核種の崩壊に伴い熱を発生し、埋設間隔によっては、周辺岩盤が百度近くに上昇する¹⁾。また、有害な放射線を放出しなくなるまで数万年以上かかると言われており²⁾、周辺岩盤の熱履歴も相当の長期にわたる。よって、高温下において長期にわたる軟岩のクリープ挙動を予測する必要がある。

軟岩のクリープ特性の温度依存性に関する実験的な研究は凝灰岩³⁾と泥岩⁴⁾について行われている。しかし、温度について変化幅が広いデータが得られておらず、変位計測や試料のばらつきなどの問題もあるため、応力比と温度を考慮した軟岩のクリープ特性を解明するにいたっていない。また、温度依存性を考慮したクリープモデルも提案されているが、実測データの信頼性が低いために妥当性の検証が不十分である。そこで、高温下における軟岩のクリープ特性を把握し、これを予測するモデルを開発することを研究の目的とした。

検討の方法として、大谷石を用いて応力比と温度を変化させた一軸クリープ試験を行い、加藤他⁴⁾によって提案されたクリープ特性値の温度依存性を調べた。また、泥岩を用いた実験データと比較することによって、岩種の影響を検討した。

* 学士(工学) 横浜国立大学大学院 工学府 社会空間システム学専攻

** Ph.D. 横浜国立大学大学院 工学研究院

*** 正会員 修士(工学) (財)電力中央研究所 地球工学研究所 バックエンド研究センター

1. 一軸クリープ試験

(1) 試験装置

重錘式の一軸クリープ試験機を使用した。てこの原理を利用して荷重（最大 50kN）を加える構造で、停電が起こっても試験が継続できるという利点がある。高温下の実験を行うため、セル水（蒸留水）の温度を制御して循環する熱源つきポンプ（設定温度の範囲：常温～100℃）を使用した。さらに、ベティングエラーの影響を受けない軸ひずみを求めるため、外部変位計の他に供試体の側面にひずみゲージを貼って計測をした。

(2) 実験条件

① 試料

流紋岩質溶結凝灰岩（大谷石）を供試体に用いた。常温（温度制御されていない実験室内）において乾燥した状態で保存されたブロックを成形して、円柱供試体（直径 $d=50\text{mm}$ 、高さ $h=100\text{mm}$ ）を 31 本作製した。保管は常に水中で行い、成形後に脱気を 2 週間、その後 1～3 ヶ月で試験を開始した。このうち実験では、代表的なもの（湿潤密度 $\rho_t=18.4\sim 18.8\text{kN/m}^3$ 、S波速度 $V_s=996\sim 1114\text{m/s}$ 、P波速度 $V_p=2371\sim 2470\text{m/s}$ ）であると判断した 15 本を用いた。

② 応力比と温度

表-1 のように常温において一軸圧縮試験を 2 本行って得られた一軸圧縮強さ（ $q_u=5.30, 6.22\text{MPa}$ ）の平均値 $q_u=5.76\text{MPa}$ でクリープ応力を正規化した応力比 q_{creep}/q_u を 0.56～0.87、温度 T を試験機の最大能力を考慮して 24℃～95℃の範囲で変化させた。高温試験（ $T\geq 40^\circ\text{C}$ ）では、セル水の昇温速度を 0.5℃/min とし、所定の温度に達した後、30 分以上経過してから試験を開始し、試験中は設定温度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ で維持した。

表-1 実験条件とクリープ破壊時間

T ℃	q_{creep}/q_u	t_{cf} min
24	0.87	547
24	0.78	483
24	0.66	170,222
41	0.87	388
41	0.76	25
40	0.66	>70,167
60	0.86	0*
60	0.76	348
60	0.66	16,593
60	0.56	159,699
80	0.87	0.442
80	0.75	0.142
79	0.66	0*
80	0.56	15,034
95	0.65	0*

③ 载荷条件と計測

衝撃力が载荷されないように軸荷重が加わり始めてから所定のクリープ応力に達するまでの時間を 10～17 秒とした。また、载荷開始から 30 分間は 0.5 秒間隔で、その後はひずみの状況を見ながら 1～5 分間隔で計測し所定のクリープ応力に達した時間をクリープ開始の原点（ $t_c=0$ ）とした。

(3) データの整理方法

载荷重の増加中に錘がゆれるため、载荷直後のクリープ応力は変動するが、 $t_c=5$ 秒後の変動は最大でも $\pm 1.2\%$ 程度と小さい。そこで、所定のクリープ応力到達時から破壊まで（ $0 < t_c < t_{\text{cf}}$ ）の応力を平均した値をクリープ応力 q_{creep} とした。なお、クリープ応力は、キャップの直上に設けたロードセルで計測した。

データの整理には、ベティングエラーの影響を受けないひずみゲージの値を使用した。ノイズ除去のため、計測データの前 5 点の計 11 点の移動平均をその時間における計測データとした。

* $t_{\text{cf}}=0$ は、所定のクリープ応力に達する前に破壊したことを意味する。

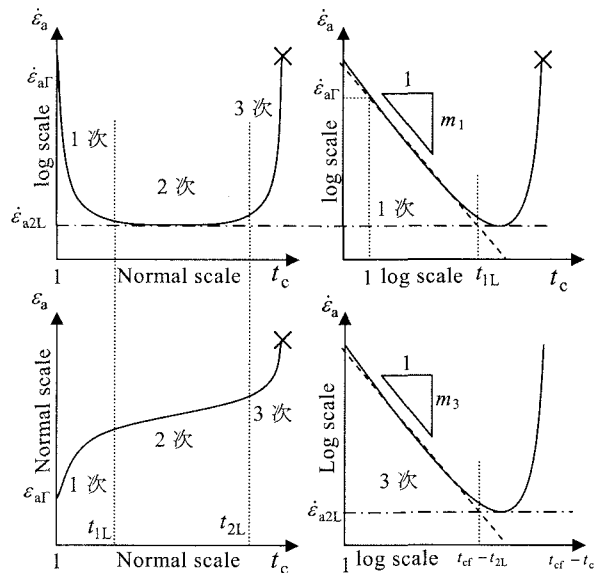


図-1 クリープ領域の概念と特性値の定義

3. クリープ特性値の定義

一般に、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_a$ の変化に基づき、クリープ挙動は3つの時間領域に区分される。加藤他⁴⁾は、この区分に従い、図-1に示す各種の特性値を定義してモデルを提案した。

- (1) 図-1左上の2次（定常）クリープにおいて、ひずみ速度が一定となる部分を最小ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{a2L}$ とした。
- (2) ひずみ速度が減少する1次（遷移）クリープにおいて、図-1右上の $\dot{\epsilon}_a$ と時間 t_c の両対数関係の直線近似した区間の傾きを m_1 とした。近似直線と $\dot{\epsilon}_a = \dot{\epsilon}_{a2L}$ の交点の t_c を1次クリープと2次クリープの境界時間 t_{1L} とした。また、クリープ開始1分後の軸ひずみを ϵ_{a1} 、軸ひずみ速度を $\dot{\epsilon}_{a1}$ とした。
- (3) ひずみ速度が増加して破壊に至る3次（加速）クリープにおいて、図-1右下の $\dot{\epsilon}_a$ とクリープ破壊有余時間 $(t_{cf} - t_c)$ の両対数関係の直線近似した区間の傾きを m_3 とした。近似直線と $\dot{\epsilon}_a = \dot{\epsilon}_{a2L}$ の交点の t_c を2次クリープと3次クリープの境界時間 t_{2L} とした。また、外部変位計のひずみが $\epsilon_a = 2\%$ となった時間をクリープ破壊時間 t_{cf} と定義した。

特性値 m_1 、 m_3 や特性値の比 t_{1L}/t_{cf} 、 t_{2L}/t_{cf} は無次元量であり、6章に示すクリープモデルにおいて、クリープ曲線の形状を決定する。一方、特性値 ϵ_{a1} 、 $\dot{\epsilon}_{a1}$ 、 $\dot{\epsilon}_{a2L}$ 、 t_{cf} は、クリープ曲線の位置や寸法を決定する。

各クリープ領域における軸ひずみ速度は、上記のクリープ特性値で表すことができる。

$$1 \text{ 次クリープ領域 } (0 < t_c \leq t_{1L}) \quad \log \dot{\epsilon}_{a1} = m_1 \log t_c + \log \dot{\epsilon}_{a1} \quad \text{式-1}$$

$$2 \text{ 次クリープ領域 } (t_{1L} \leq t_c \leq t_{2L}) \quad \dot{\epsilon}_{a2} = \dot{\epsilon}_{a2L} \quad \text{式-2}$$

$$3 \text{ 次クリープ領域 } (t_{2L} \leq t_c < t_{cf}) \quad \log \dot{\epsilon}_{a3} = m_3 \log (t_{cf} - t_c) + \log \left\{ \dot{\epsilon}_{a2L} / (t_{cf} - t_{2L})^{m_3} \right\} \quad \text{式-3}$$

4. クリープ特性値と応力比および温度の関係

前章で定義したクリープ挙動を表現する8つの特性値と応力比の関係について、温度の影響を考慮して分析した。なお、図-4～7に実線・破線で示す関係は、全体の傾向より推定したものである。

- (1) 1次クリープ及び3次クリープのひずみ速度の変化率（ m_1 および m_3 ）について（図-2）

温度や応力比に依存する傾向は見られず、 $m_1 = -0.95 \sim -0.53$ 、 $m_3 = -0.89 \sim -0.56$ の範囲にばらついている。

- (2) 1次クリープ及び2次クリープの相対的な終了時間（ t_{1L}/t_{cf} および t_{2L}/t_{cf} ）について（図-3）

データは、 $t_{1L}/t_{cf} = 0.11 \sim 0.55$ 、 $t_{2L}/t_{cf} = 0.59 \sim 0.96$ の範囲に分布する。温度に依存する傾向は見られないが、応力比が増大するとともに t_{1L}/t_{cf} は増加、 t_{2L}/t_{cf} は減少する傾向が見られる。このことは、応力比が大きく破壊時間が短いと、1次クリープと3次クリープの時間割合が増大することを意味する。

- (3) 1分後のひずみ ϵ_{a1} について（図-4）

ϵ_{a1} の値は、応力比が高いほど大きく、この傾向は40℃を越えると高温ほど著しい。白抜き印は、1分以内に破壊したデータ（ $t_{cf} < 1 \text{ min}$ ）を示し、 ϵ_{a1} は2%以上となる。

- (4) 1分後のひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{a1}$ について（図-5）

$\dot{\epsilon}_{a1}$ の値は、応力比が高いほど、また高温ほど大きい。1分以内に破壊したデータ（ $t_{cf} < 1 \text{ min}$ ）は、図-2右上の近似直線から予測した値を白印で示した。

- (5) 2次クリープのひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{a2L}$ について（図-6）

$\dot{\epsilon}_{a2L}$ の値は、応力比が高いほど、また40℃を越えると高温ほど大きい。

- (6) 破壊時間 t_{cf} について（図-7）

表-1にクリープ破壊時間 t_{cf} を示す。 $t_{cf} = 0$ は、所定のクリープ応力に達する前に外部変位計のひずみが $\epsilon_a > 2\%$ となったことを示す。 t_{cf} の値は、応力比が高いほど小さい。また、40℃を越えると、高温になるにつれて t_{cf} は減少する。泥岩については20℃と60℃で温度依存性がないという報告⁴⁾があるが、凝灰岩については-10～55℃で温度の上昇とともに破壊時間が短くなるという報告³⁾があることから、温度依存性については、岩種による影響が考えられる。

図-1 に示すクリープ曲線の形状に関する特性値 m_1 、 m_3 、 t_{1L}/t_{cf} 、 t_{2L}/t_{cf} については、温度($T=25-80^{\circ}\text{C}$)に依存する傾向は認められなかった。1 次クリープと 3 次クリープにおけるひずみ速度の変化率を示す m_1 と m_3 は、応力比にも依存しなかったが、それぞれの時間割合は応力比と共に増加する傾向が見られた。一方、クリープ曲線の寸法に関する特性値 $\dot{\epsilon}_{a1}$ 、 $\dot{\epsilon}_{a1}$ 、 $\dot{\epsilon}_{a2L}$ 、 t_{cf} については、応力比の増大だけでなく、特に 40°C を越えると温度の上昇によってもクリープ変形が加速する傾向が示された。

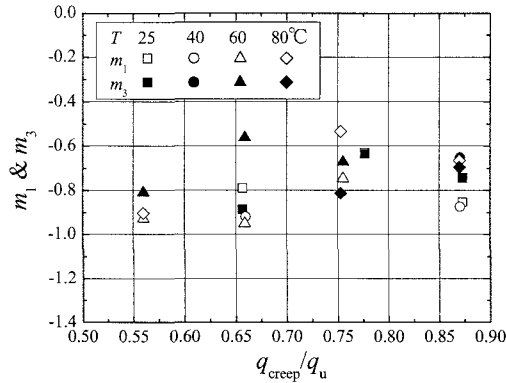


図-2 m_1 および m_3 と応力比の関係

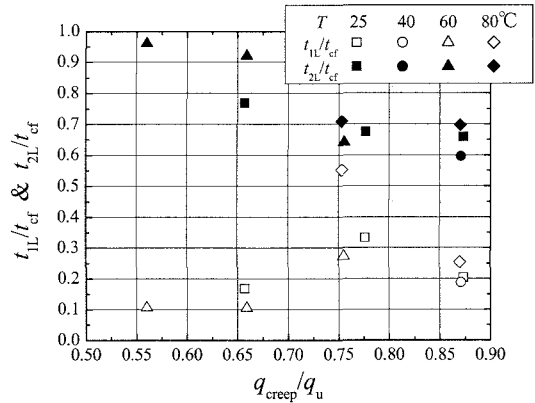


図-3 t_{1L}/t_{cf} および t_{2L}/t_{cf} と応力比の関係

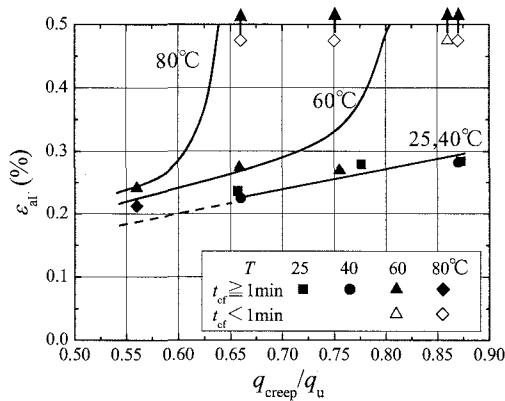


図-4 ϵ_{a1} と応力比の関係

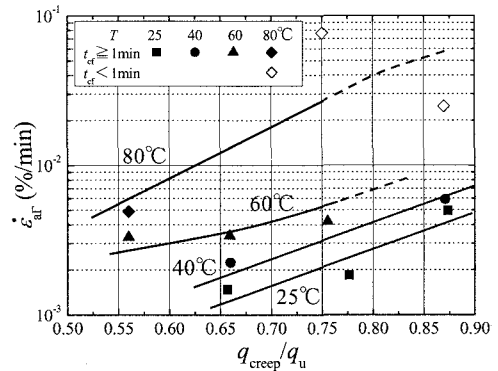


図-5 $\dot{\epsilon}_{a1}$ と応力比の関係

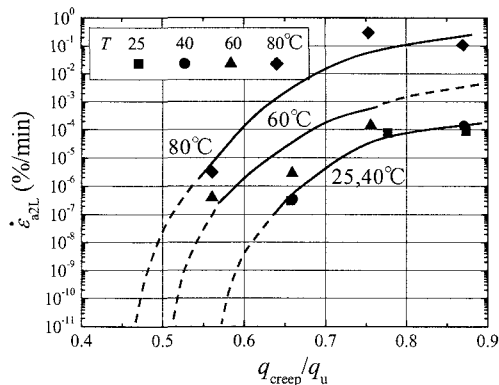


図-6 $\dot{\epsilon}_{a2L}$ と応力比の関係

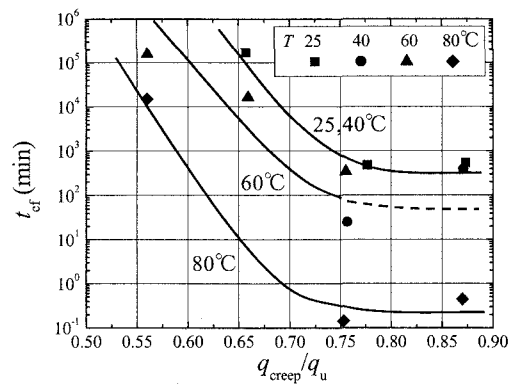


図-7 t_{cf} と応力比の関係

5. 最小ひずみ速度と他のクリープ特性値の関係

加藤他⁴⁾は、式-1～3に含まれる各特性値を応力比より決定するモデルを提案し、実測値と比較した。その結果、 t_{cf} の変動係数COVが15.3となり、フィッティングの精度が悪かった。この原因は、応力比と特性値の関係によるモデル化の精度が悪いこと、元となる実験で変位計測が外部変位計によるためにベディングエラーの影響が大きいことであると思われる。

今回の試験では、供試体の側面に貼り付けたひずみゲージで変位計測したので、ベディングエラーの影響はない。しかし、供試体のばらつきの影響は避け難く、また各特性値と応力比の関係は、温度にも依存する関係であるので、モデル化が複雑になる。そこで、特性値の中で最初に決定され、安定的に信頼したデータを得られる最小ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{a2L}$ に注目して各クリープ特性値との関係を分析した。

(1) $\dot{\epsilon}_{a2L}$ と t_{1L} 、 t_{2L} 、 t_{cf} の関係 (図-8)

上述のように、最小ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{a2L}$ とクリープ破壊時間 t_{cf} は応力比や温度に依存するが、 $\dot{\epsilon}_{a2L}$ と t_{cf} の両対数関係は応力比や温度によらずユニークな直線性が認められる。加藤他⁴⁾の行った泥岩のデータについても整理したところ、同様の傾向を示した。よって、少なくとも二つの岩種において、 $\dot{\epsilon}_{a2L}$ と t_{cf} の関係は、応力比や温度に依存しない関係である。同様に、 t_{1L} 、 t_{2L} についても $\dot{\epsilon}_{a2L}$ との間にユニークな直線関係が見られており、近似直線の式を以下に示す。

$$\log \dot{\epsilon}_{a2L} = -1.07 \log t_{1L} - 1.84 \quad \text{式-4}$$

$$\log \dot{\epsilon}_{a2L} = -0.97 \log t_{2L} - 1.54 \quad \text{式-5}$$

$$\log \dot{\epsilon}_{a2L} = -0.99 \log t_{cf} - 1.36 \quad \text{式-6}$$

(2) m_1 、 m_3 と $\dot{\epsilon}_{a2L}$ の関係 (図-9)

m_1 の値は $\dot{\epsilon}_{a2L}$ と共に大きくなるが、 m_3 の値は $\dot{\epsilon}_{a2L}$ に依存しないようである。なお、図中の実線は、後述するモデルより得られる式-7に示す関係である。

$$m_1 = -\frac{1.07(\log \dot{\epsilon}_{a2L} - 1)}{\log \dot{\epsilon}_{a2L} - 2.46} \quad \text{式-7}$$

$$m_3 = -0.719 \quad \text{式-8}$$

(3) $\dot{\epsilon}_{a\Gamma}$ と $\dot{\epsilon}_{a2L}$ の関係 (図-10)

1分以内に破壊したデータ($t_{cf} < 1\text{min}$)については、図-1右上の近似直線を延長して式-1中で切片の意味を持つ $\dot{\epsilon}_a$ の値を推測し、白抜き印で示した。 $\dot{\epsilon}_{a\Gamma}$ の値は $\dot{\epsilon}_{a2L}$ と共に非線形に大きくなり、後述するモデルより得られる式-9で近似できる。

$$\dot{\epsilon}_{a\Gamma} = 10^{(1+4m_1)} \quad \text{式-9}$$

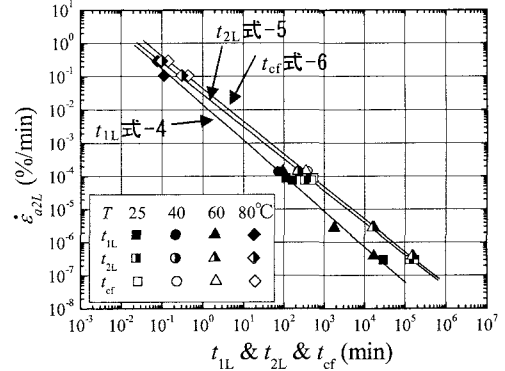


図-8 $\dot{\epsilon}_{a2L}$ と t_{1L} と t_{2L} と t_{cf} の関係

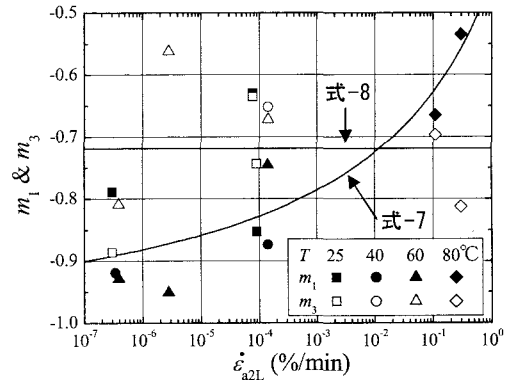


図-9 m_1 と m_3 と $\dot{\epsilon}_{a2L}$ の関係

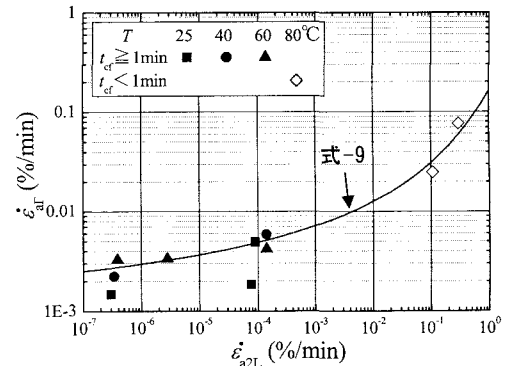


図-10 $\dot{\epsilon}_{a\Gamma}$ と $\dot{\epsilon}_{a2L}$ の関係

式-4～9 に示す各種のクリープ特性値と $\dot{\epsilon}_{a2L}$ の関係は、応力比 q_{creep}/q_u や温度 T に依存せず成り立つ関係である点が注目に値する。

6. クリープモデル

(1) モデルの構成式

5 章に示す最小ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{a2L}$ と他の特性値の関係が強い相関を示すことに注目して全ての実験ケースの軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_a$ とクリープ時間 t_c の関係をよく観察した結果、次に示す特徴に気がついた。すなわち、クリープ挙動は図-11 に示すように、応力比や温度によらず $\dot{\epsilon}_a - t_c$ のある一点 I より始まり、最小ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{a2L}$ のより低いケースほど m_1 は小さくなる (図-9)。それによって、 $\dot{\epsilon}_{aF}$ の値も必然的に最小ひずみ速度のより低いケースほど小さくなる (図-10)。この図-11 を元にしたクリープモデルを以下に説明する。

まず、図-8 より求めた近似直線 (式-4、5、6) によって図-11 中のクリープが三領域に区分できる。ここで、応力比や温度によらない点 I の座標を全ての実験ケースを参考に $t_c = 10^{-4} \text{ min}$ 、 $\dot{\epsilon}_a = 10\%/ \text{min}$ と仮定し、仮に初期点と呼ぶことにする。そして、式-1 に $(t_c, \dot{\epsilon}_a) = (10^{-4}, 10)$ と $(t_{1L}, \dot{\epsilon}_{a2L})$ を代入して連立方程式を解くことによって、式-7、9 の関係式が得られる。 $(t_{1L}$ は式-4 より $\dot{\epsilon}_{a2L}$ で表されることに注意。) 初期点 I を通過することを仮定しない場合には、図-9 と図-10 の実験データに基づいて m_1 及び $\dot{\epsilon}_{aF}$ を推定すれば良い。

ある初期点 I より始まったクリープは、クリープ時間の進行とともに軸ひずみ速度が両対数関係で直線的に減少し、 $\dot{\epsilon}_{a2L}$ と t_{1L} の直線 (式-4) に交わるまで減少する。直線 (式-4、5) に挟まれた二次クリープ領域において、ひずみ速度は最小値をとり一定となる。 $\dot{\epsilon}_{a2L}$ と t_{2L} の直線 (式-5) に交わると、クリープ時間の進行とともに軸ひずみ速度が急激に増加し破壊に至る。

このモデルの特徴は、最小ひずみ速度以外の特性値は、最小ひずみ速度との関係で表されるため、実験条件である応力比や温度のパラメーターが $\dot{\epsilon}_{a2L}$ の推定関係以外には一切入ってこない点である。最小ひずみ速度の値は、実験結果より最も安定的に求められ、図-6 より推定される。

(2) モデルの精度

応力比や温度をパラメーターにした既往のモデル⁴⁾ と今回提案する最小ひずみ速度をパラメーターにしたモデルの精度を比較するため、実験データと各モデルによる推定値の偏差を取り、その変動係数 COV を求めた。

今回行った大谷石の実験データについて、図-12 に示した。どの特性値に関しても、フィッティング精度の向上が見て取れる。特に、課題であった破壊時間 t_{cf} に関しては、大幅に改善された。また、加藤他⁴⁾ の泥岩の実験データを最小ひずみ速度と他の特性値の関係について再整理後に、今回のモデルを適用した。すべての特性値に関して精度の向上が見て取れる。このことから、凝灰岩のみでなく、泥岩についても適用できるモデルであることがわかった。

今回提案するモデルは最小ひずみ速度に基づいて構成されているので、応力比や温度の実験条件が最小ひずみ速

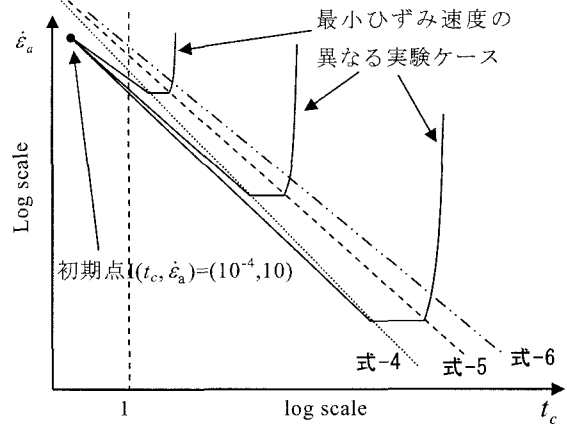


図-11 クリープモデルの概念

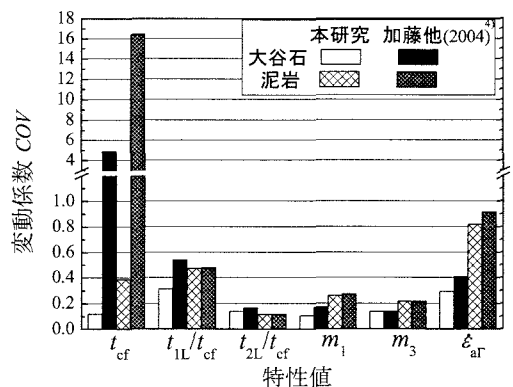


図-12 モデルによる COV 値の比較

度の推定を通じて間接的にしか入ってこない。それにもかかわらず、応力比と温度が直接入るモデルより精度がよいことが特徴である。今後は、他の岩種や、拘束圧の影響についても検討し、クリープ挙動における最小ひずみ速度の位置付けをさらに明らかにする必要がある。

(3) モデルと実験値の比較

各特性値を式-1～3 に代入すれば、一軸クリープ挙動における、軸ひずみ速度とクリープ時間の関係を表すモデル式になる。また、軸ひずみとクリープ時間の関係を表すモデル式は、式-1～3 を積分することによって求められる。ここで、境界条件としてクリープ開始時の初期ひずみが必要となるが、載荷時間にばらつきがあるために、実験から安定的に求めることができない。そこで、クリープ開始 1 分後のひずみ ε_{a1} を境界条件として用いたところ、以下の式で示される。

$$1 \text{ 次クリープ領域 } (0 < t_c \leq t_{1L}) \quad \varepsilon_{a1} = \frac{\dot{\varepsilon}_{a1}}{(m_1 + 1)} (t_c^{m_1 + 1} - 1) + \varepsilon_{a1} \quad \text{式-10}$$

$$2 \text{ 次クリープ領域 } (t_{1L} \leq t_c \leq t_{2L}) \quad \varepsilon_{a2} = \dot{\varepsilon}_{a2L} (t_c - t_{1L}) + \varepsilon_{a1L} \quad \text{式-11}$$

$$3 \text{ 次クリープ領域 } (t_{2L} \leq t_c < t_{cf}) \quad \varepsilon_{a3} = \frac{\dot{\varepsilon}_{a2L}}{(m_3 + 1)} (t_{cf} - t_{2L}) \left\{ 1 - \left(\frac{t_{cf} - t_c}{t_{cf} - t_{2L}} \right)^{m_3 + 1} \right\} + \varepsilon_{a2L} \quad \text{式-12}$$

式-10～12 の内、 ε_{a1} 以外の特性値については、式-4～9 より $\dot{\varepsilon}_{a2L}$ の関係式で表すことができ、 ε_{a1} については $\dot{\varepsilon}_{a2L}$ の関係式で表すことができない。よって、 ε_{a1} と $\dot{\varepsilon}_{a2L}$ を図-4、6 より読み取ることによって $\dot{\varepsilon}_a$ と t_c の関係がモデルで表される。なお、 $\dot{\varepsilon}_a$ と t_c の関係では ε_{a1} が必要ないため、 $\dot{\varepsilon}_{a2L}$ のみを読み取ることによってモデルで表される。そこで、モデル

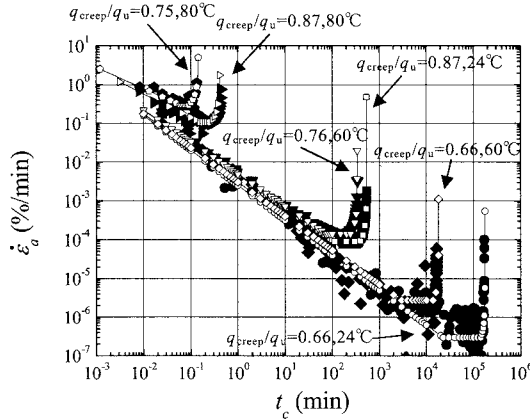


図-13 $\dot{\varepsilon}_a$ と t_c の両対数関係 (大谷石)

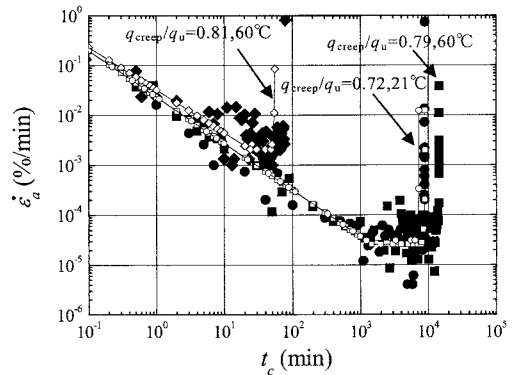


図-14 $\dot{\varepsilon}_a$ と t_c の両対数関係 (泥岩)

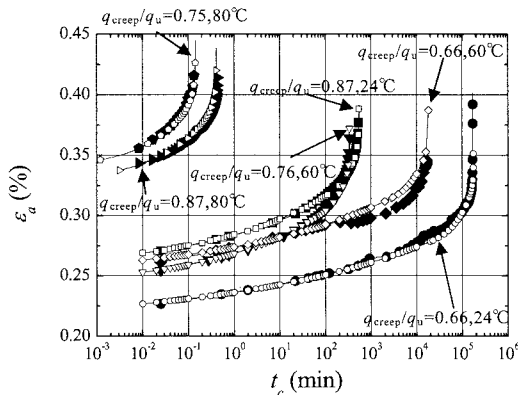


図-15 ε_a と t_c の関係 (大谷石)

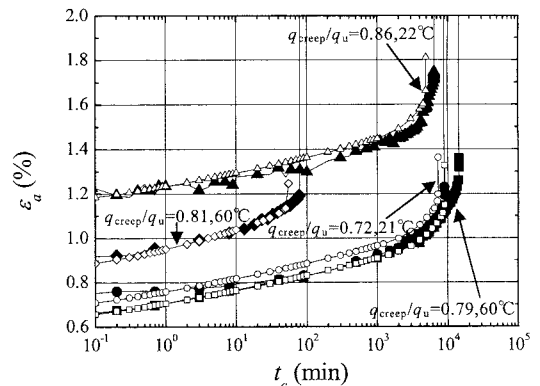


図-16 ε_a と t_c の関係 (泥岩)

と実験データを $\dot{\epsilon}_a$ および ϵ_a と t_c の関係について比較を行った。

図-13と図-14に大谷石と泥岩の $\dot{\epsilon}_a$ と t_c の関係について、図-15と図-16に大谷石と泥岩の ϵ_a と t_c の関係について、実験データとモデルの比較をした。図中の黒印は実験データを表し、白抜き印はモデルを表している。実験データとモデルの一致度が高いことより、大谷石と泥岩について、応力比、温度に依存しない関係(式-4~9)を利用してモデル化できたことがわかる。泥岩のフィッティングが多少悪いのは、変位計測が外部変位計であるために、ベディングエラーの影響を受けて実験データのばらつきが大きいことが主たる理由であろう。

(4) モデルを外挿して推定される非破壊条件

クリープ挙動を考える上で、長時間経過後に破壊に至るか否かは難しい問題である。今回提案するクリープモデルにおいて、永久的に非破壊で終了する場合は、式-1で表される1次クリープにおける直線と式-4で表される1次と2次クリープの境界を示す直線が交わらない時である。つまり、式-1と式-4の傾きが同じとなる $m_1=1.07$ の時である。その時の最小ひずみ速度は、無限に小さい値をとる。図-6より各温度における実線から推定される点線の曲線より、無限に小さい最小ひずみ速度がどの程度の応力比を取るか推定したところ、

図-17のような結果を得た。各温度における点を結んだ実線によって、破壊と非破壊の領域を区切ることができ、40度を越えると低いクリープ応力でも破壊しやすくなる傾向が示された。

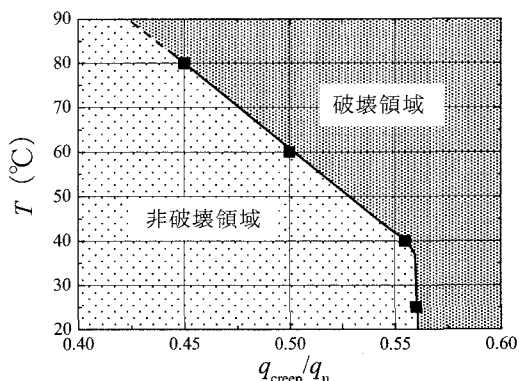


図-17 モデルより推定される破壊区分

7. まとめ

大谷石を用いて高温一軸クリープ試験を実施し、加藤他⁴⁾が定義したクリープ挙動を構成する特性値を算出して、高温下でのクリープ特性を調べた。その結果、各特性値を実験条件である応力比や温度によって整理すると、ばらついており、少ない実験ケースから精度良くクリープ挙動を表現するには難しいことがわかった。そこで、特性値の中で最初に決定され、安定的に信頼したデータを得られる最小ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{a2L}$ に注目して各クリープ特性値との関係を分析したところ、応力比や温度によらずユニークな関係であることがわかった。そこで、最小ひずみ速度に注目したクリープモデルを作成し、大谷石および泥岩それぞれにおいて精度の向上を確認することができた。このモデルの特徴は、最小ひずみ速度以外の特性値は、最小ひずみ速度との関係で表されるため、実験条件である応力比や温度のパラメーターが一切入ってこない点である。今後は、他の岩種や、拘束圧の影響についても検討し、クリープ挙動における最小ひずみ速度の位置付けをさらに明らかにする必要がある。なお、今回は常温で得られた一軸圧縮強さでクリープ応力を正規化した但、本来はクリープ試験と同じ温度で得られた一軸圧縮強さを用いるべきであり、現在試験の準備をしている。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分技術的信頼性一地層処分研究開発第2次取りまとめー(分冊2：地層処分の工学技術)、4.2 処分施設の設計、1999.
- 2) 原子力発電環境整備機構：地層処分 その安全性、2003.
- 3) 山辺 正・宮本綾子・伊藤文雄・谷 卓也：温度場を考慮した軟岩のクリープ挙動と数値解析への適用、第31回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.231-235、2001.
- 4) 加藤雄介・谷 和夫・岡田哲実：高温環境下における堆積軟岩の一軸クリープ試験と予測モデルの提案、第33回岩盤力学に関するシンポジウム、pp.25-32、2004.