

# 高温環境下における堆積軟岩の一軸クリープ試験と 挙動予測モデルの提案

## Unconfined Creep Test of Soft Sedimentary Rocks at High Temperature and Proposal of Prediction Model for Creep Behavior

加藤雄介\*・谷 和夫\*\*・岡田哲実\*\*\*

Yusuke KATO, Kazuo TANI and Tetsuji OKADA

Geological disposal is expected to be the most practical method for isolating high-level radioactive wastes in deep geological formations. 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 effects of high temperature on long-term behavior of rock mass. This study the influence of high temperature on mechanical properties of mudstone by a series of unconfined creep tests conducted at 20°C and 60°C. The results reveal that creep behavior is not significantly affected by heating. Moreover, a single constitutive model for creep behavior is proposed based on the results of unconfined creep tests.

**Key words:** unconfined compression test, creep, mudstone, high temperature, high-level radioactive wastes

### 1. はじめに

我が国における高レベル放射性廃棄物の地層処分の概念は、ガラス固化体を格納容器に収め、その周りを緩衝材（ベントナイトなど）で囲んで岩盤中に埋設する多重バリアの考え方に立っている<sup>1)</sup>。ガラス固化体は核種の崩壊に伴い熱を発生するが、周辺岩盤の温度は約 1,000 年後には 40~50°C にまで低下する<sup>2)</sup>。しかし、核廃棄物を処分場に入れてから有害な放射能を放出しなくなるまで数十万年かかると言われており<sup>1)</sup>、周辺岩盤の熱履歴も相当の長期にわたる。そこで、高レベル放射性廃棄物の処分場を建設する際には、処理場周辺の高温環境下における岩盤の応力状態を予測し、長期にわたる安定性を検討する必要がある。

我が国では、核廃棄物処分場の埋設候補岩盤として、透水性が低く節理が少ない第四紀更新世～新第三紀中新世の泥岩が有望視されている。このような泥岩は一般に軟質で、高温下の長期の挙動を考える上でクリープ変形を無視することができない。岩盤のクリープ特性の温度依存性については、硬岩において数多くの研究が見られるが、堆積軟岩についての研究は凝灰岩に限られている<sup>3)</sup>。また、温度を考慮に入れたクリープモデルも、二次（定常）クリープまでを対象とした例があるが、破壊を含む三次（加速）クリープが考慮されていない<sup>3)</sup>。そこで、泥岩について、高温環境下におけるクリープ変形を破壊まで予測する方法を開発することを目的とした。

検討の方法として、常温（20°C）と高温（60°C）の下で、簡便な一軸クリープ試験を行い、クリープ特性の温度依存性を調べた。

### 2. 一軸クリープ試験の方法

- 
- \* 学生会員 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 我孫子研究所 地圏環境部

## (1) 試験装置

使用した重錘式の一軸クリープ試験機を図-1 に示す。この原理を利用して軸荷重（最大 2,500kN）を加える構造で、停電時にも載荷が継続できることが利点である。また、高温下の実験を行うため、セル水の温度を制御して循環する熱源付きのポンプ（設定温度の範囲：常温～100℃）を使用した。

## (2) 実験条件

### ① 試料

第四紀更新世～新第三紀中新世の泥岩（間隙率  $n=41\sim46\%$ ）を供試体に用いた。常温（温度制御されていない実験室内）でコア箱に乾燥した状態で保存されたボーリングコアを円柱状に成形して、供試体（直径  $d=50\text{mm}$ 、高さ  $h=100\text{mm}$ ）を 47 本作製した。湿潤密度  $\rho_t=1.88\sim1.98\text{g/cm}^3$ 、S 波速度  $V_s=630\sim810\text{m/s}$ 、P 波速度  $V_p=1680\sim1900\text{m/s}$  の値を参考に、同質で代表的なものであると判断した 13 本を実験に使用した。

超音波速度の計測値のばらつきがやや大きいことから、コア箱での保存中と側面にゲージを貼る際に乾燥履歴を受けたことによるスレーキングの影響が懸念された。そこで、個々の供試体が受けたスレーキングの程度を考慮して、S 波速度  $V_s$  に基づいて一軸圧縮強さ  $q_u$  を推定した（2 章(2)節③項に詳述）。

### ② 温度

常温（20℃）と高温（60℃）の 2 種類の温度の下で実施した。処分場の周辺岩盤において最も高温になるのはオーバーバックに隣接する部分で、約 1,000 年後には 40～50℃ となることを考慮して高温条件（60℃）を定めた<sup>2)</sup>。一方、常温（20℃）の実験は、高温の実験結果と比較する目的で行った。

### ③ クリープ応力比

一軸クリープ試験で加えた軸応力  $q_{creep}$  と一軸圧縮強さ  $q_u$  の比（ $q_{creep}/q_u$ ）をクリープ応力比と定義した。上述したように、スレーキングの影響を考慮して、各供試体の一軸圧縮強さ  $q_u$  を以下の手順で推定した。

まず、3 本の一軸圧縮試験の結果を元に泥岩に関する既往の知見<sup>4)</sup>を参考にして、スレーキングの影響を受けていない新鮮な試料の一軸圧縮強さ  $q_{u,fr}=4.3\text{MPa}$  と S 波速  $V_{s,fr}=681\text{m/s}$  を推定した。次に、ヤング率  $E$  が S 波速度  $V_s$  の 2 乗に比例すること（ $E=2(1+\nu)\rho V_s^2$ 、 $\nu$  はポアソン比、 $\rho$  は密度）と、一軸圧縮強さ  $q_u$  がヤング率  $E$  に比例する経験則（ $q_u/E=500\sim1,000$ ）<sup>5)</sup>を利用すると、 $q_u=q_{u,fr}(V_s/V_{s,fr})^2$  を導くことができる。そして、この式を利用して各供試体の一軸圧縮強さ  $q_u$  を S 波速度  $V_s$  より推定してクリープ応力比を求める（表-1 参照）。

既往の研究より、クリープ応力比が  $q_{creep}/q_u=70\sim100\%$  の範囲であれば 1 ヶ月以内にクリープ破壊をすることが知られている<sup>6)</sup>。さらに、熱履歴によって一軸圧縮強さが変化することも考慮して<sup>7)</sup>、クリープ応力比  $q_{creep}/q_u=65\sim95\%$  を設定した（表-1 参照）。

### ④ クリープ試験が対象とする問題の設定条件

図-2 に示すように、処分場の坑道を円形の支保のない空洞（半径  $a$ ）と近似した時に、坑道の中心からの距離  $r$ 、角度  $\theta$  の位置にある要素の応力状態を考える。大深度では等方応力状態（ $K_0=1.0$ ）に近いと言われているので、等方応力を  $p$  とすると、軸差応力  $q=\sigma_r-\sigma_\theta$  は方向  $\theta$  には依存しない<sup>8)</sup>。実際に高レベル放射性廃棄物を埋める深度 500m を想定し、単位体積重量  $\gamma_t$  は試料の平均的値  $19.0\text{kN/m}^3$ 、一軸圧縮強さは  $q_u=4.3\text{MPa}$  として計算すると、図-3

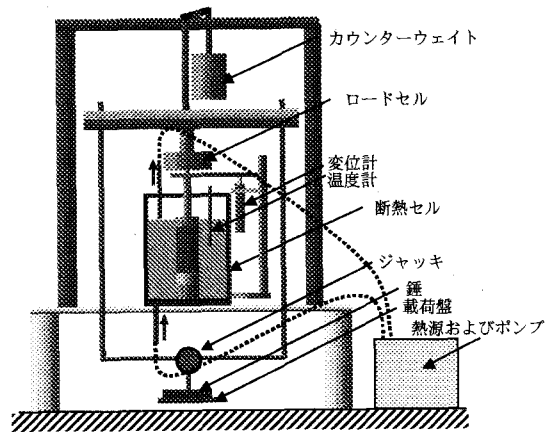


図-1 一軸クリープ試験機の構成

に示す  $q/q_u$  と  $a/r$  の関係が得られる。本研究で設定したクリープ応力比  $q_{creep}/q_u=65 \sim 95\%$  に対する地盤要素の位置は  $a/r=0.38 \sim 0.46$  である。よって、無支保状態における円形の坑道の中心から坑道の半径の2.2~2.6倍の距離にある地盤要素を想定してクリープ応力比を設定したことに相当する。なお、拘束圧の影響については、今後、三軸クリープ試験を実施して検討する予定である。

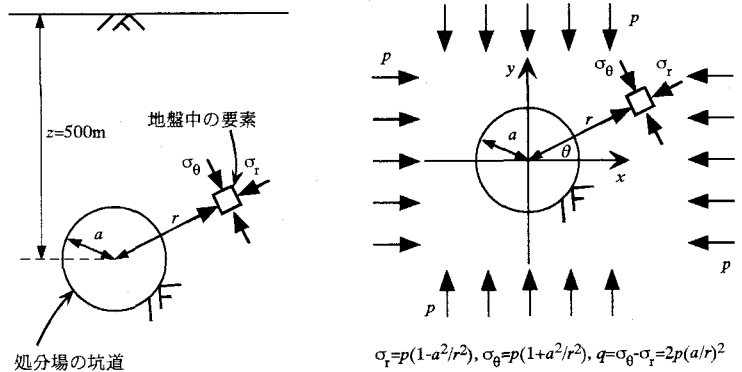


図-2 高レベル放射性廃棄物の処分場周辺の応力状態

### 3. 一軸クリープ試験の結果

#### (1) データの整理方法

合計 13 本実施した一軸クリープ試験の実験条件およびクリープ破壊時間を表-1 に示す。載荷直後は応力値がやや不安定であるので、試験開始の2分後から破壊までの軸応力の平均値をクリープ応力  $q_{creep}$  と定義した。また、軸ひずみが2%に達した時間を破壊時間  $t_{cf}$  と定義した。

供試体の側面にひずみゲージを貼り付けていたが、長期的に安定した計測データが得られなかったため、軸ひずみは外部変位計による計測データを利用して求めた。よって、ベッディング・エラーの影響が含まれていることに留意する必要がある。

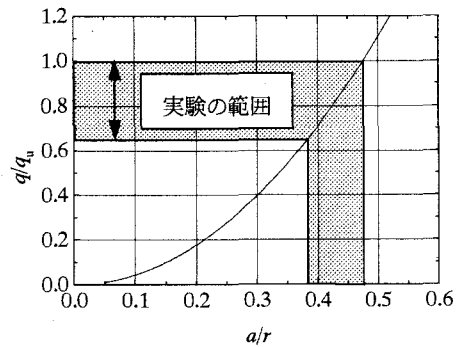


図-3 支保がない時の  $a/r$ - $q_{creep}/q_u$

#### (2) ひずみ速度とクリープ時間ないし破壊有余時間の関係

全実験ケースについて、軸ひずみとクリープ時間の片対数関係を  $20^\circ\text{C}$  と  $60^\circ\text{C}$  に分けて図-4 に示す。 $60^\circ\text{C}$  で行われた実験では、クリープ応力比が高いほど初期の軸ひずみが大きく、短い時間で破壊に至る傾向が明瞭である。 $20^\circ\text{C}$  で行われた実験でも同様の傾向が認められるが、ばらつきが大きく、やや不明瞭である。

クリープ応力比  $q_{creep}/q_u \doteq 0.7 \& 0.8$  の場合について、軸ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{a,ext}$  とクリープ時間  $t_c$  の両対数関係を図-5 に示す。岡本ら (1981) は泥岩を用いた一軸クリープ試験を実施し、一次（遷移）クリープにおいて軸ひずみ速度とクリープ時間の両対数関係は線形で、その傾き  $m_1 \doteq -1$  であることを指摘している<sup>9)</sup>。

$$m_1 = \frac{\Delta(\log \dot{\epsilon}_{a,ext})}{\Delta(\log t_c)} \quad \text{式-1}$$

本研究の実験においても、 $20^\circ\text{C}$  と  $60^\circ\text{C}$  で同様の結果 ( $m_1 \doteq -1$ ) が得られており、この傾向は試料（泥岩）や温度 ( $20^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ ) には依存しないようである。

軸ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{a,ext}$  と破壊有余時間 ( $t_{cf} - t_c$ ) の両対数関係を図-6 に示す。一次（遷移）クリープと同じように、

表-1 実験条件とクリープ破壊時間

| $T$<br>( $^\circ\text{C}$ ) | $q_{creep}$<br>(MPa) | $V_s$<br>(m/s) | $q_{creep}/q_u$ | $t_{cf}$<br>(min) |
|-----------------------------|----------------------|----------------|-----------------|-------------------|
| 20                          | 2.54                 | 649            | 0.65            | 9,130             |
| 22                          | 2.96                 | 610            | 0.86            | 6,480             |
| 22                          | 3.59                 | 697            | 0.80            | >24,000           |
| 22                          | 3.60                 | 697            | 0.80            | 54                |
| 21                          | 4.03                 | 778            | 0.72            | 8,850             |
| 21                          | 4.07                 | 680            | 0.95            | 6                 |
| 60                          | 1.19                 | 404            | 0.79            | 14,400            |
| 60                          | 2.56                 | 632            | 0.69            | >30,000           |
| 63                          | 2.81                 | 712            | 0.60            | 1,260             |
| 63                          | 3.56                 | 735            | 0.71            | 5,950             |
| 61                          | 3.77                 | 721            | 0.78            | >14,600           |
| 62                          | 4.08                 | 725            | 0.84            | 1                 |
| 60                          | 4.19                 | 749            | 0.81            | 80                |

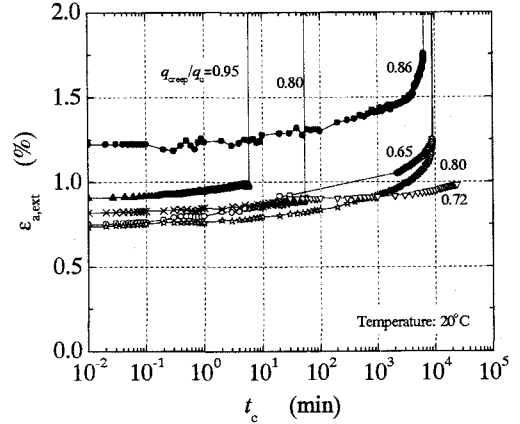
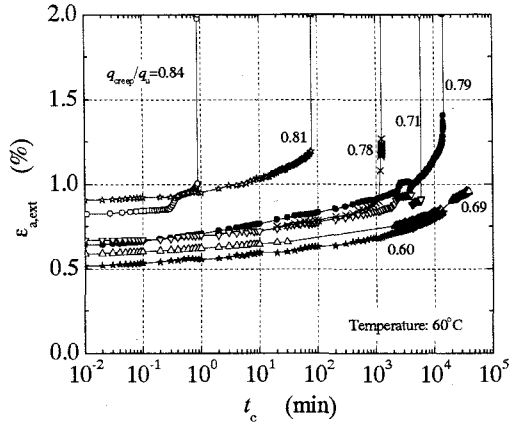


図-4 軸ひずみとクリープ時間の片対数関係 (左: 60°C、 右: 20°C)

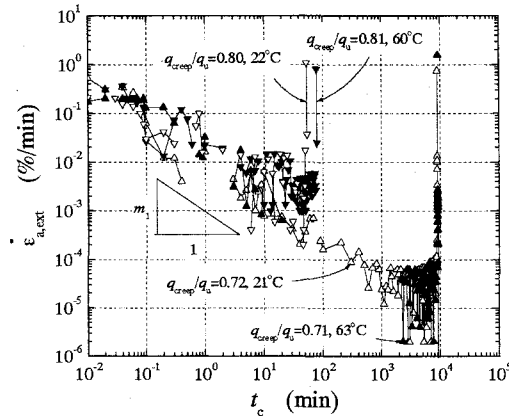


図-5 軸ひずみ速度とクリープ時間の両対数関係

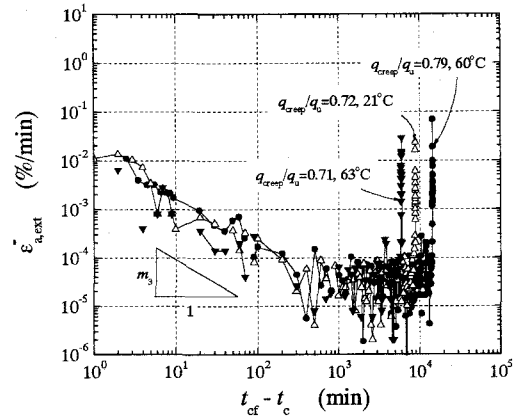


図-6 軸ひずみ速度と破壊有余時間の両対数関係

クリープ破壊前の三次 (加速) クリープにおいて軸ひずみ速度と破壊有余時間の両対数関係は線形で、その傾き  $m_3$  は-1であることが分かる。

$$m_3 = \frac{\Delta(\log \dot{\epsilon}_{a,ext})}{\Delta\{\log(t_{cf} - t_c)\}}$$

式-2

### (3) クリープ挙動の区分

クリープ挙動は、一般にひずみ速度の変化に基づいて3つの時間領域に区分される。図-7に示すように、初期にひずみ速度が減少する一次 (遷移) クリープ、ひずみ速度が一定の二次 (定常) クリープ、ひずみ速度が急増して破壊に至る三次 (加速) クリープである。このモデルの考え方を適用するために、計測データを以下の手順に従って3領域に区分し、各クリープ領域内で適用される構成関係を記述する特性値を定めた。

- ① 二次 (定常) クリープの領域を、軸ひずみ速度が最小で一定となる区間として適当に定め、区間内の軸ひずみ速度の平均値を二次 (定常) クリープの軸ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{2L}$  とする。
- ② 一次 (遷移) クリープに領域において、軸ひずみ速度と経過時間の両対数関係を線形近似して、軸ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_1$  が二次 (定常) クリープの軸ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{2L}$  と等しくなる時間と軸ひずみを一次 (遷移) クリープの終了時間  $t_{1L}$  と限界ひずみ  $\epsilon_{1L}$  とする。
- ③ 最後に三次 (加速) クリープの領域において、軸ひずみ速度と破壊有余時間の両対数関係を線形近似して、軸

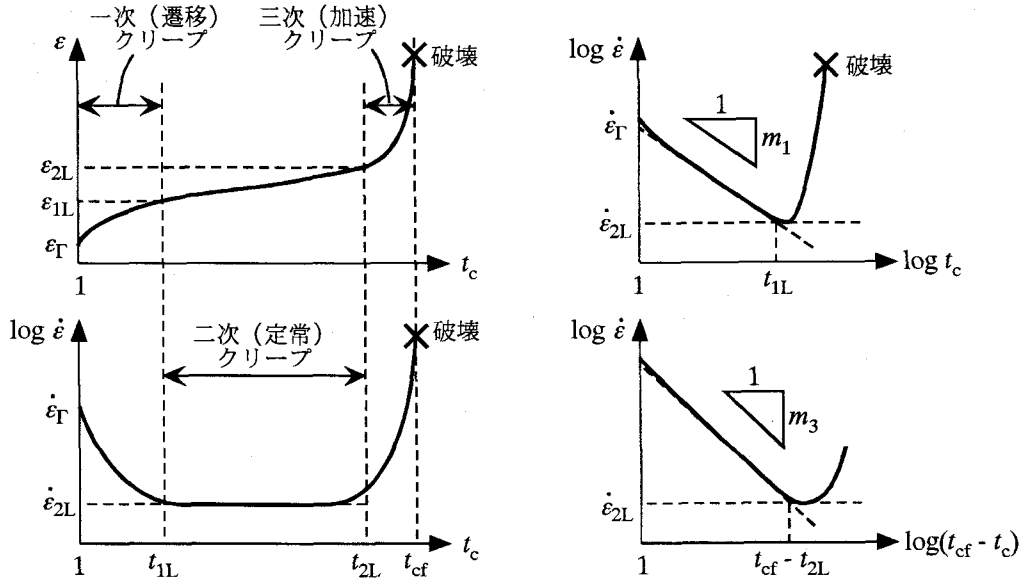


図-7 クリープモデルの概要

ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_3$  が二次（定常）クリープの軸ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{2L}$  と等しくなる時間と軸ひずみを二次（定常）クリープの終了時間  $t_{2L}$  と限界ひずみ  $\epsilon_{2L}$  とする。

以上より、各クリープ領域のひずみ速度を表すモデルは式-3～5 のように記すことができる。

$$\text{一次（遷移）クリープ領域} \quad (0 < t_c \leq t_{2L}) \quad \log \dot{\epsilon}_1 = \log \dot{\epsilon}_\Gamma + m_1 \log t_c \quad \text{式-3}$$

$$\text{二次（定常）クリープ領域} \quad (t_{1L} \leq t_c \leq t_{2L}) \quad \dot{\epsilon}_2 = \dot{\epsilon}_{2L} \quad \text{式-4}$$

$$\text{三次（加速）クリープ領域} \quad (t_{2L} \leq t_c \leq t_{cf}) \quad \dot{\epsilon}_3 = \dot{\epsilon}_{2L} \times \left( \frac{t_{cf} - t_c}{t_{cf} - t_{2L}} \right)^{m_3} \quad \text{式-5}$$

ただし、 $\dot{\epsilon}_1$ 、 $\dot{\epsilon}_2$ 、 $\dot{\epsilon}_3$  はそれぞれ一次（遷移）、二次（定常）、三次（加速）クリープ領域の軸ひずみ速度、 $\epsilon_\Gamma$  と  $\dot{\epsilon}_\Gamma$  はクリープ開始から 1 分後の軸ひずみおよび軸ひずみ速度を表し、 $m_1$  と  $m_3$  は式-1 と式-2 で定義される。

#### (4) クリープ挙動の温度依存性

3つのクリープ領域の境界を表す時間  $t_{1L}$  と  $t_{2L}$  をクリープ破壊時間  $t_{cf}$  で正規化した値  $t_{1L}/t_{cf}$  と  $t_{2L}/t_{cf}$  さらにクリープ挙動モデルを記述する 6 つの特性値  $m_1$ 、 $m_3$ 、 $\epsilon_\Gamma$ 、 $\dot{\epsilon}_\Gamma$ 、 $\dot{\epsilon}_{2L}$ 、 $t_{cf}$  について、クリープ応力比を横軸に取ってプロットしたものを図-8 に示す。常温（20℃）と高温（60℃）で得られたデータは、それぞれ白印と黒印で表示する。

実験データのばらつきが大きいものの、クリープ領域の境界を表す時間についても、クリープ挙動モデルを記述する特性値についても、常温（20℃）と高温（60℃）に有意な差は認められないようである。しかし、凝灰岩を用いて 100℃までの温度範囲で行った実験で温度依存性がある事例が報告されているので<sup>3)</sup>、今後、岩種の影響や設定する温度範囲に留意してクリープ特性の温度依存性をさらに検討する必要がある。

クリープ領域の境界を表す時間やクリープ挙動モデルを記述する特性値に対するクリープ応力比の影響を見ると、クリープ応力比に依存しない場合と、線形に依存する場合に大別できそうである。図-8 の上段左を見ると、 $t_{1L}/t_{cf}$  と  $t_{2L}/t_{cf}$  は、温度にもクリープ応力比にも依存せず、ほぼ一定値を示す。

$$t_{1L}/t_{cf} \div 0.11, \quad t_{2L}/t_{cf} \div 0.95$$

式-6

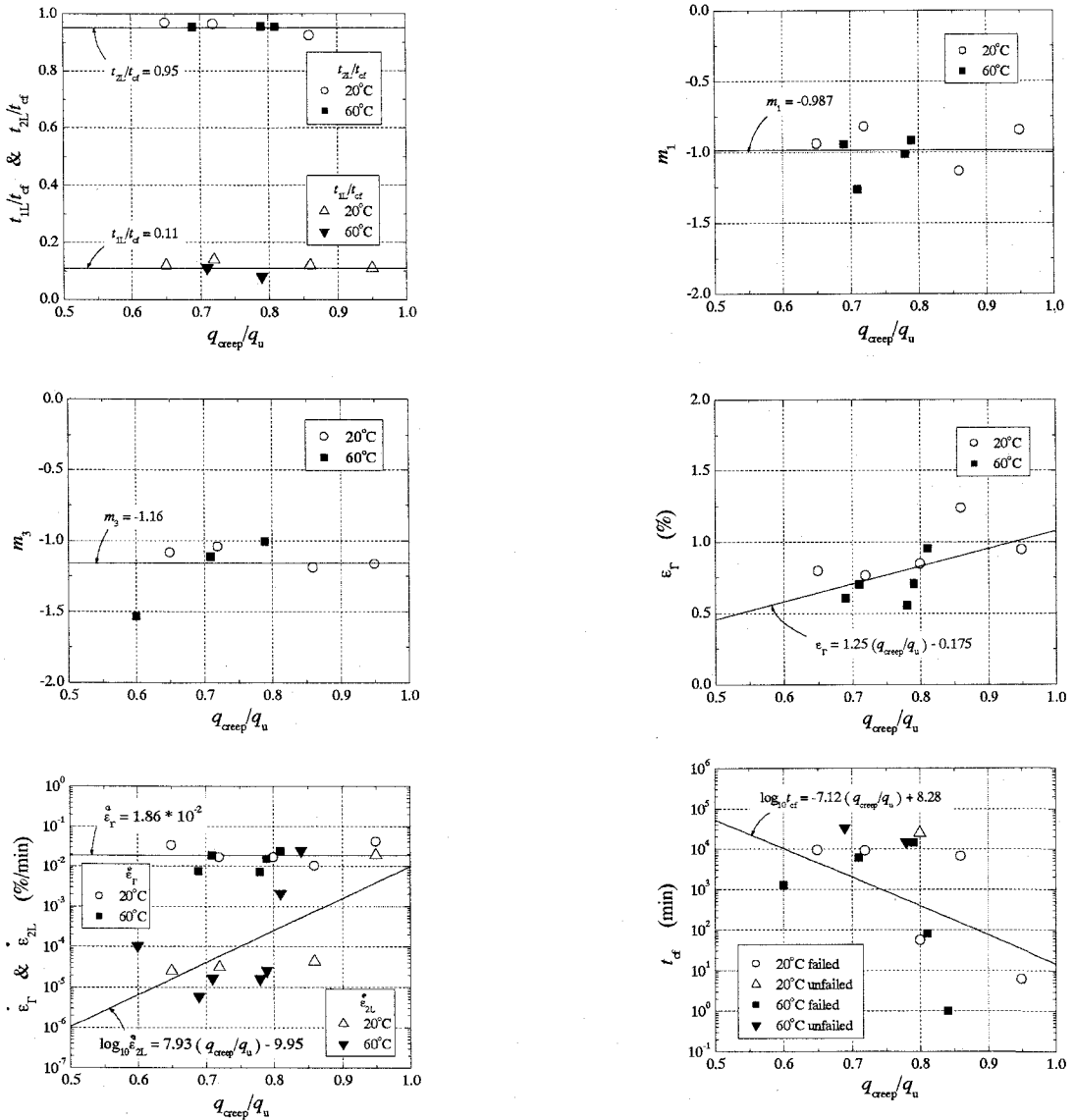


図-8 クリープ領域の境界を表す時間およびクリープ挙動モデルを記述する特性値とクリープ応力比の関係

したがって、クリープ破壊に至る場合に、初期の10%が一次（遷移）クリープ領域、最後の5%が三次（加速）クリープ領域で、中盤の84%が二次（定常）クリープ領域に相当することになる。

図-8 の上段右と中段左を見ると、一次（遷移）クリープにおける軸ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{a,\text{ext}}$  とクリープ時間  $t_c$  の両対数関係に対する線形近似の傾き  $m_1$  (式-1) も、三次（加速）クリープにおける軸ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{a,\text{ext}}$  と破壊有余時間 ( $t_{\text{cf}} - t_c$ ) の両対数関係に対する線形近似の傾き  $m_3$  (式-2) も、温度にもクリープ応力比にも依存せず、ほぼ-1に近い（3章(2)節参照）。

$$m_1 \doteq -0.987, \quad m_3 \doteq -1.16 \quad \text{式-7}$$

図-8 の中段右を見ると、クリープ開始から1分後の軸ひずみ  $\epsilon_r$  は、温度には依存しないがクリープ応力比の増加に伴いほぼ線形に増加しており、直線近似することができる。

$$\epsilon_r = 1.25 (q_{\text{creep}}/q_u) - 0.175 \quad \text{式-8}$$

一方、図-8 の下段左を見ると、クリープ開始から 1 分後の軸ひずみ速度  $\dot{\varepsilon}_\Gamma$  は、温度にもクリープ応力比にも依存せず、ほぼ一定値である。しかし、二次（定常）クリープ領域の片対数表示の軸ひずみ速度  $\dot{\varepsilon}_{2L}$  は、ばらつきが大きく判断しにくい、温度には依存しないがクリープ応力比の増加に伴いほぼ線形に増加する傾向が認められる。

$$\dot{\varepsilon}_\Gamma \doteq 1.86 \times 10^{-2} \quad \text{式-9}$$

$$\log \dot{\varepsilon}_{2L} = 7.93 (q_{\text{creep}}/q_u) - 9.95 \quad \text{式-10}$$

さらに、図-8 の下段右を見ると、片対数表示のクリープ破壊時間  $t_{cf}$  は、温度には依存しないが、クリープ応力比の増加に伴いほぼ線形に減少している。そこで、破壊に至った実験データについて直線近似した。

$$\log t_{cf} = -7.12 (q_{\text{creep}}/q_u) + 8.28 \quad \text{式-11}$$

#### 4. 一軸クリープ挙動のモデル

前記の一軸クリープ試験の結果に基づいて、一軸クリープ挙動のモデルを作成した。3 つのクリープ領域における軸ひずみ  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 、 $\varepsilon_3$  を与える式-12～13 は、軸ひずみ速度を表す式-3～5 を積分して得られる。

$$\text{一次（遷移）クリープ領域} \quad (0 < t_c \leq t_{2L}) \quad \varepsilon_1 = \frac{1}{m_1 + 1} t_c^{m_1 + 1} \times \dot{\varepsilon}_\Gamma + \varepsilon_\Gamma - \frac{\dot{\varepsilon}_\Gamma}{m_1 + 1} \quad \text{式-12}$$

$$\text{二次（定常）クリープ領域} \quad (t_{1L} \leq t_c \leq t_{2L}) \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_{1L} + \dot{\varepsilon}_{2L} (t_c - t_{1L}) \quad \text{式-13}$$

$$\text{三次（加速）クリープ領域} \quad (t_{2L} \leq t_c \leq t_{cf}) \quad \varepsilon_3 = \frac{\dot{\varepsilon}_{2L}}{m_3 + 1} \times \left( \frac{t_{cf} - t_c}{t_{cf} - t_{2L}} \right)^{m_3 + 1} + \varepsilon_{2L} - \frac{\dot{\varepsilon}_{2L}}{m_3 + 1} \quad \text{式-14}$$

ここで、図-8 に示す実験結果より、 $t_{1L}$  と  $t_{2L}$  は  $t_{cf}$  の関数（式-6）として、 $m_1$  と  $m_3$  および  $\dot{\varepsilon}_\Gamma$  は定数（式-7 および式-9）として温度にもクリープ応力比にも依存しない。一方、残りの特性値である  $\varepsilon_\Gamma$ 、 $\dot{\varepsilon}_{2L}$ 、 $t_{cf}$  も温度には依存しないが、それぞれクリープ応力比  $q_{\text{creep}}/q_u$  の関数として式-8、式-10、式-11 の形で与えられる。

表-2 に示すように、式-6～11 に示すフィッティングの精度を、実験データとフィッティングした値の比に関する変動係数で評価した。 $t_{1L}/t_{cf}$ 、 $t_{2L}/t_{cf}$ 、 $m_1$ 、 $m_3$ 、 $\varepsilon_\Gamma$  に関する変動係数は全て 0.2 より小さく、フィッティングの精度は高い。しかし、 $\dot{\varepsilon}_\Gamma$  に関する変動係数は 0.5 以上、 $\dot{\varepsilon}_{2L}$  と  $t_{cf}$  に関する変動係数に至っては 1.0 を大幅に超えており、フィッティングの精度は非常に悪い。いずれも対数軸にプロットしたグラフ上で簡単な関数形により回帰関係を求めているので、やむを得ない面があるが、今後改善する余地が大きい。実験データのばらつきを極力小さくするために、同質の試料を用いること、拘束圧を掛けた三軸クリープ試験とすること、ベッティングエラーの影響を含まない内部変位計測のデータで整理することなどが要諦であろう。

図-9 は、軸ひずみの時間経過について、上記のモデルの結果と実験結果を比較したものである。軸ひずみが時間経過に伴い変化する傾向は概ねモデルに反映されていることが分かる。しかし、軸ひずみの絶対値や破壊時間については相当の差異が認められる。表-2 に示すように、軸ひずみについては  $\dot{\varepsilon}_\Gamma$  や  $\dot{\varepsilon}_{2L}$  の変動係数が効いており、破壊時間  $t_{cf}$  についても実験データ自体のばらつきが非常に大きいことが問題となっている。

表-2 各特性値の変動係数

|                            |      |
|----------------------------|------|
| $t_{1L}/t_{cf}$            | 0.17 |
| $t_{2L}/t_{cf}$            | 0.02 |
| $m_1$                      | 0.15 |
| $m_3$                      | 0.17 |
| $\varepsilon_\Gamma$       | 0.20 |
| $\dot{\varepsilon}_\Gamma$ | 0.58 |
| $\dot{\varepsilon}_{2L}$   | 12.4 |
| $t_{cf}$                   | 15.3 |

#### 5. まとめ

泥岩を用いて常温（20℃）と高温（60℃）において一軸クリープ試験を実施した。その結果、クリープ特性について温度の影響はほとんど認められなかった。凝灰岩については温度依存性があるとの報告<sup>3)</sup>もあることから、岩種や設定する温度の範囲などを広げて検討する必要がある。また、実験結果に基づいてクリープ挙動モ

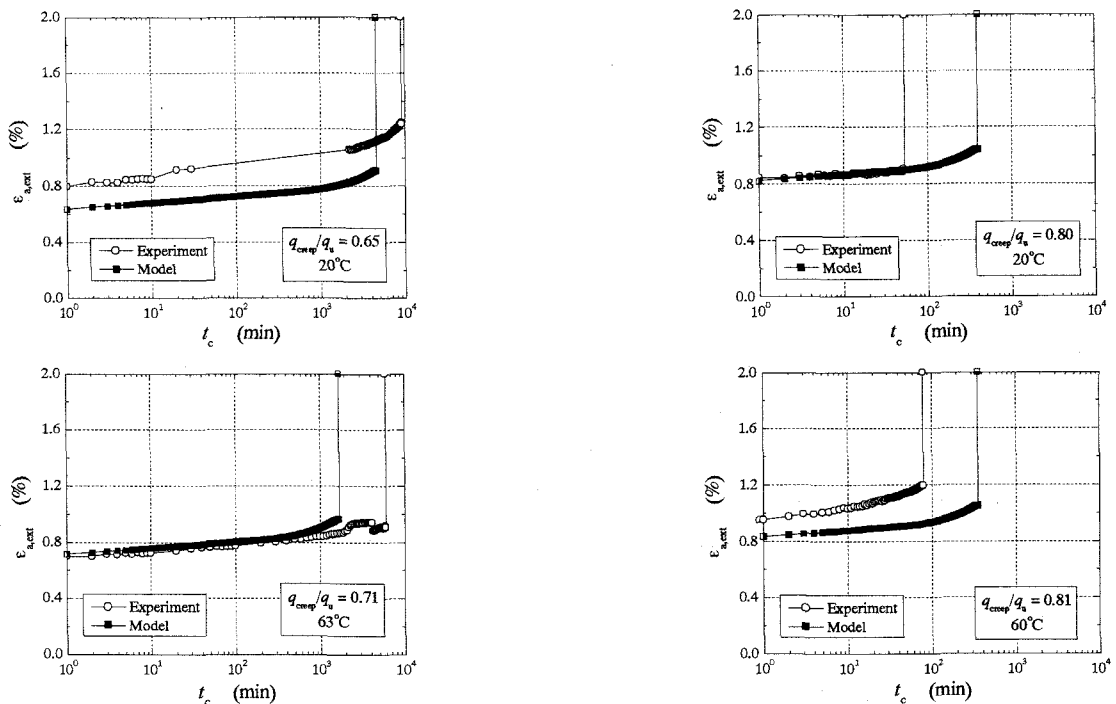


図-9 実験結果とクリープ挙動モデルの比較

(上段：20°C、下段：60°C、左：高いクリープ応力比、右：低いクリープ応力比)

デルを作成した。実験結果のばらつきが大きかったため、フィッティングの精度に問題は残るものの、破壊までのクリープ特性について定性的な特徴を反映させることができる。今後は、実験の精度を上げるために、試料の同質性に留意し、拘束圧を掛けた三軸クリープ試験で内部変位のデータを利用する検討が望まれる。

#### 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の技術的信頼性—地層処分研究開発（第2次取りまとめ）—、pp.76、2001.
- 2) 核燃料サイクル機構：第2次とりまとめ報告書（分冊2：地層処分の工学技術）、pp.76、1999.
- 3) 山辺 正・宮本綾子・青木智幸・小川豊和：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回年次学術講演会、pp.885-886、2002.
- 4) 堆積軟岩の工学的性質とその応用編集委員会：堆積軟岩の工学的性質とその応用、地盤工学会、pp.54-59、1987.
- 5) Tatsuoka, F. and Shibuya, S.: Deformation characteristics of soils and rocks from field and laboratory tests, *Proc. of 9<sup>th</sup> Asian Regional Conf. on SMFE*, Bangkok, Vol.2, pp.101-170, 1991.
- 6) 山内 優・山崎貴博・山下 秀・杉本文夫：軟岩の圧縮クリープ過程と一軸圧縮破壊過程の関連性—岩石のクリープ破壊機構に関する研究（その2）—、資源と素材、Vol.113、pp.163-168、1998.
- 7) 藤沼晋也：高温環境における堆積軟岩の力学特性に関する研究、東京工業大学修士論文、pp.78、2003.
- 8) 稲田善紀：岩盤工学、森北出版株式会社、pp.36-37、1998.
- 9) 岡本敏郎・西 好一・松井家孝：泥岩の力学特性に関する研究（その2）クリープ特性、電力中央研究所報告、No.382012、1983.