

大谷石の高温三軸クリープ試験で見られた クリープ特性

三保 雄司¹・岡田 哲実²・柴田 健弘¹・谷 和夫³

¹横浜国立大学大学院 工学府 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

E-mail: d05gc122@ynu.ac.jp

²正会員(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 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

³横浜国立大学大学院 工学研究院 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

高レベル放射性廃棄物処分技術では、堆積軟岩の超長期にわたるクリープ変形が重要である。しかし、高い拘束圧、高温下の超長期クリープ挙動に関する知見は未だ少ない。そこで、本研究では常温から120℃の範囲で三軸クリープ試験を行い、Shibata et al.が提案したクリープモデルを用いるクリープパラメータの拘束圧依存性および温度依存性を検討した。その結果、クリープ開始時の軸ひずみと最小ひずみ速度において拘束圧依存性がみられた。

Key Words : Triaxial test , creep , soft rock , high temperature , creep parameter

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、不連続面が未発達で透水性が低い堆積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、周辺岩盤が100℃近くに上昇する¹⁾。また、この熱履歴も相当の長期(数万年以上)にわたる²⁾ので、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。

堆積軟岩のクリープ挙動の温度依存性に関する実験的な研究は、大谷石などの凝灰岩や泥岩について行われている³⁾⁴⁾。しかし、処分場で想定される拘束圧3MPaの下で100℃以上におけるクリープ特性を検討した例はない。そこで、地層処分場の超長期の安定において重要な、堆積軟岩の応力比、拘束圧、温度の影響を考慮したクリープ挙動を検討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、拘束圧、温度を変化させた三軸クリープ試験を行い、Shibata et al.⁵⁾によって提案されたクリープ特性値の拘束圧及び温度依存性を調べた。

2. 試験方法

(1) 試料

試料は、栃木県宇都宮市大谷町を中心に分布している流紋岩質溶結凝灰岩(大谷石)を使用した。試料の物性は、湿潤密度 $\rho = 1.84 \sim 1.85$ (g/cm³)、P波速度 $V_p = 2483 \sim 2593$ (m/s)、S波速度 $V_s = 1072 \sim 1176$ (m/s)で、 V_p と V_s から求めたヤング率 $E = 5908 \sim 6915$ (MPa)、ポアソン比 $\nu = 0.36 \sim 0.40$ である。

(2) 三軸圧縮試験装置

軸荷重の載荷は、停電が起こっても試験が継続できるという利点がある重錘式であり、円柱供試体(直径 $d = 50$ mm、高さ $h = 100$ mm)に、この原理により載せた錘の50倍の荷重(最大50kN)を加えることができる。高い拘束圧の実験を行うため、コンプレッサーの一次圧をブースター(×25)を利用して増圧した。

また、100℃以上の試験を行うため、セル内の液体はシリコンオイルを使用した。さらに、加熱器と循環ポンプによってセル内のオイルを循環させることで、長期間にわたってセル内部の温度を一定に保つことができる。

軸ひずみの計測は、ベッティングエラーの影響を受けないように、外部変位型の他に、ひずみゲージと非接触型

変位計を供試体の側面の2ヶ所の高さに取り付けて使用した。

(3) 実験条件

試験を行った6ケースの実験条件を表-1に示す。

a) 応力比

クリープ軸差応力($\sigma_1 - \sigma_3$)と $\bar{\sigma}$ 試験による最大軸差応力($\sigma_1 - \sigma_3$)の比を応力比 $R = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ とした。 $\bar{\sigma}$ 試験は温度25, 60, 120℃で行い、得られた強度定数(c' , ϕ')と温度 T の関係を図-1に示す。図中の直線は回帰直線を示す。

温度が高くなるにつれて、 c' は増加し、 ϕ' は低下する傾向がある。この回帰直線を利用してクリープ試験の設定温度における最大軸差応力($\sigma_1 - \sigma_3$)を推定した。

b) 有効拘束圧および温度

高レベル放射性廃棄物は地下300m以上に埋設されることを考慮して、基準となる有効拘束圧を3MPaとし、拘束圧依存性を見るために1MPaでも2ケース行った。

温度は、埋設される廃棄物の周辺岩盤が100℃近く達することを考慮して、温度依存性をみるために25, 80, 120℃とした。

表-1 実験条件

有効拘束圧 σ'_c (MPa)	応力比 R	温度 T (°C)
1.0	0.71	25
	0.83	
	0.93	
3.0	1.11	80
	1.07	
	1.10	120

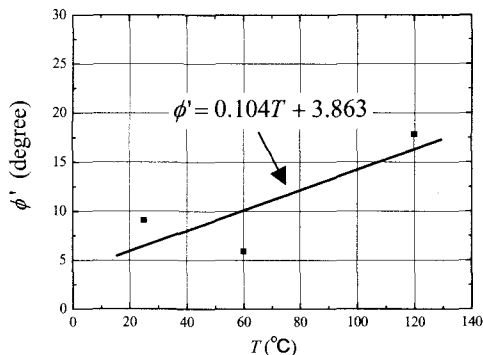
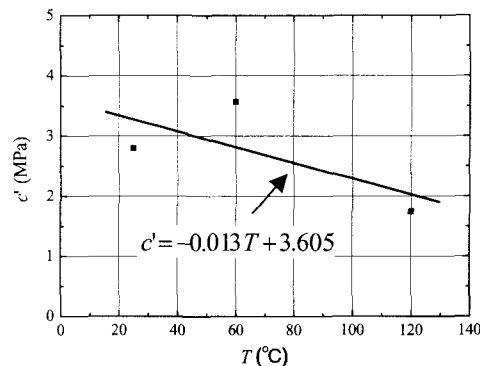


図-1 強度定数 c' & ϕ' と温度 T の関係

3. 三軸クリープ試験結果

(1) 軸ひずみ ϵ_c とクリープ時間 t_c

軸ひずみ ϵ_c とクリープ時間 t_c の関係を図-2に示す。全てのケースで一次（遷移）クリープから二次（定常）クリープに進行した挙動を示している。有効拘束圧1.0MPaの2ケースと3.0MPaの応力比0.93のケースにおいては破壊する兆候がみられなかったため、また、試験効率を優先して試験を中断した。また、有効拘束圧3.0MPa、応力比1.11のケースでは、クリープ時間 $t_c = 500\text{min}$ で錘が床に触れて荷重が低下したため試験を中断した。一方、80℃と120℃のケースでは、ともに $t_c = 4000\text{min}$ 付近でひずみゲージに計測不能になったため、外部変位の挙動も示した。この2ケースは $t_c = 50000\text{min}$ 付近で温度が低下したため試験を中断した。

図-2 (a), (b)を見ると、応力比が高いと ϵ_c が大きい傾向がある。応力比が同じケースがないので、拘束圧による影響は容易に判断できない。図-2(b), (c)を比較すると、80℃と120℃は ϵ_c が4%を越えており、高温になると変形量が大きくなるようである。

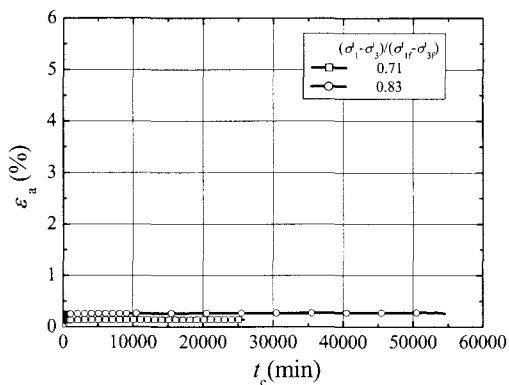
(2) 軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_c$ とクリープ時間 t_c

軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_c$ とクリープ時間 t_c の関係を図-3に示す。

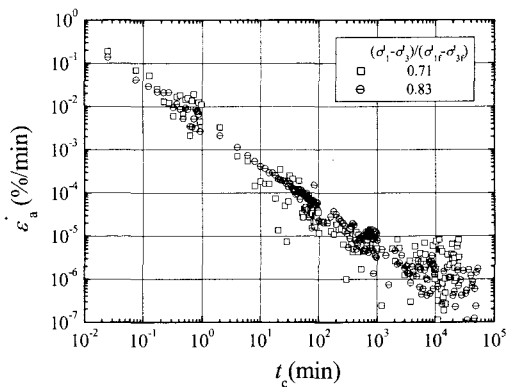
図-3(b)に示す有効拘束圧3.0MPa、応力比0.93のケースでは、 $t_c = 300\text{min}$ で $\dot{\epsilon}_c$ が増加していることからクリープが三次クリープ領域に入ったことがわかる。

また、高温 $T = 80^\circ\text{C}$, 120°C のケースでは、外部変位の挙動をみると、2000min付近からひずみ速度が大きく減少している。原因については、今後検討しなければならない。

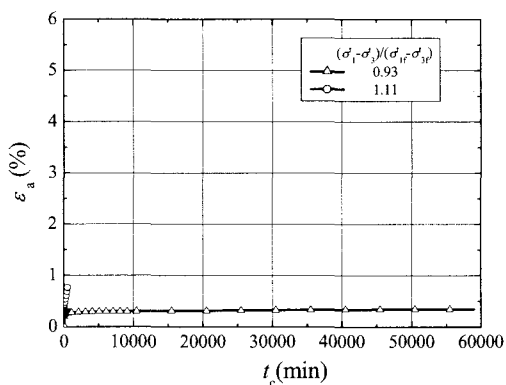
図-3 (a), (b)を見ると、一次クリープに関して応力比の影響は余り大きくないようである。拘束圧の影響に関しては、応力比が同じケースがないので、容易には判断できない。図-3(b)と(c)のひずみゲージのデータを比較すると、温度の影響は見られないようである。



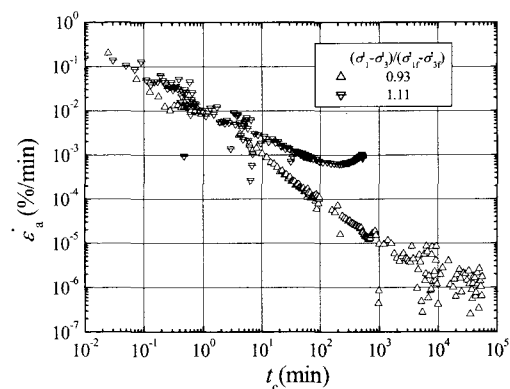
(a) $\sigma_c = 1.0 \text{ MPa}$, $T = 25^\circ \text{C}$



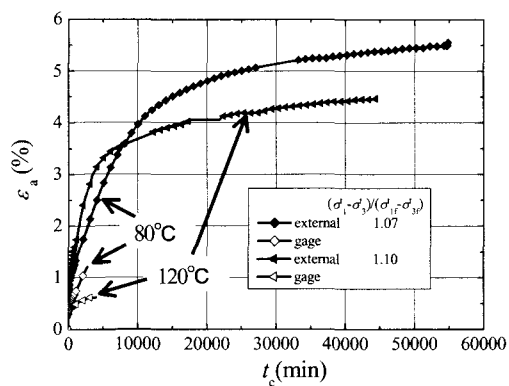
(a) $\sigma_c = 1.0 \text{ MPa}$, $T = 25^\circ \text{C}$



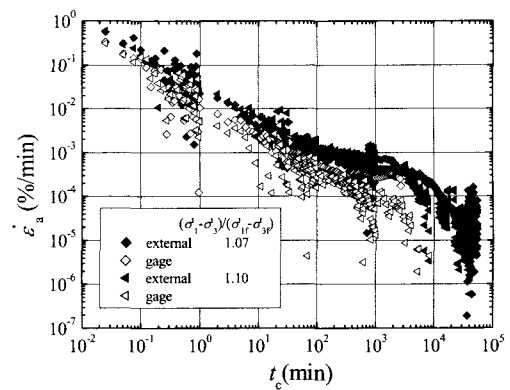
(b) $\sigma_c = 3.0 \text{ MPa}$, $T = 25^\circ \text{C}$



(b) $\sigma_c = 3.0 \text{ MPa}$, $T = 25^\circ \text{C}$



(c) $\sigma_c = 3.0 \text{ MPa}$, $T = 80, 120^\circ \text{C}$



(c) $\sigma_c = 3.0 \text{ MPa}$, $T = 80, 120^\circ \text{C}$

図-2 軸ひずみ ε_a とクリープ時間 t_c の関係

図-3 軸ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_a$ とクリープ時間 t_c の関係

4. 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。Shibata et al.⁶⁾は、この区分に従い、図-4に示す8個($m_1, m_3, t_{c1}, t_{c2}, \dot{\epsilon}_{a0}, \dot{\epsilon}_{ar}, \dot{\epsilon}_{amin}, t_d$)の特性値を定義してモデルを提案した。本研究では、破壊に至らなかったため、一次クリープと二次クリープに関わる4個の特性値 $m_1, \dot{\epsilon}_{a0}, \dot{\epsilon}_{ar}, \dot{\epsilon}_{amin}$ について検討した。

図-4左上の二次(定常)クリープにおいて、ひずみ速度が一定となる部分で最小ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{amin}$ を求める。さらに、ひずみ速度が減少する一次(遷移)クリープにおいて、図-4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(一次クリープにおけるひずみ速度の変化率) m_1 を求める。そして、クリープ開始時の軸ひずみを ϵ_{a0} 、クリープ開始時である $t_c=1.0 \times 10^4$ minの軸ひずみ速度を $\dot{\epsilon}_{ar}$ が求まる。

一次クリープ領域

$$\log \dot{\epsilon}_{a1} = m_1 \log \left(\frac{t_c}{1.0 \times 10^{-4}} \right) + \log \dot{\epsilon}_{ar} \quad (1)$$

二次クリープ領域

$$\dot{\epsilon}_{a2} = \dot{\epsilon}_{amin} \quad (2)$$

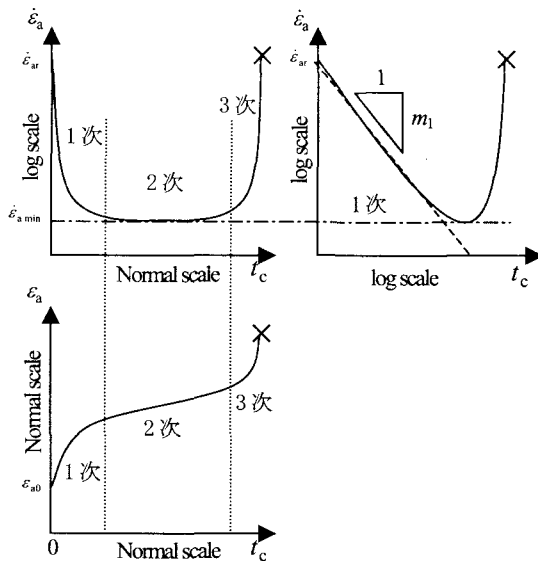


図-4 クリープモデルの概念

5. 拘束圧依存性と温度依存性

三軸クリープ試験の結果から一次クリープと二次クリープに関する特性値 $m_1, \epsilon_{a0}, \dot{\epsilon}_{ar}, \dot{\epsilon}_{amin}$ を算出し、拘束圧と温度に対する依存性を検討した。この比較には、Shibata et al.が示した一軸クリープ試験の結果⁶⁾も用いた。

(1) m_1 と応力比の関係

m_1 と応力比の関係を図-5に示す。図中には、 $\sigma_c=0$ MPaに対する平均的な関係⁶⁾を実線で示した。

a) 応力比の影響

実線で示したように応力比が高くなるほど m_1 が大きくなる。

b) 拘束圧の影響

$\sigma_c > 0$ MPaのデータも $\sigma_c = 0$ MPaに対する関係付近にばらついている。従って、拘束圧の影響はみられない。

c) 温度の影響

同様に、温度の影響も認められない。これは、Shibata et al.の知見⁶⁾と一致している。

(2) クリープ開始時のひずみ ϵ_{a0} と応力比の関係

ϵ_{a0} と応力比の関係を図-6に示す。図中には $\sigma_c=0$ MPaに対する平均的な関係⁶⁾を実線で、本研究で得られた $\sigma_c > 0$ MPaに対する関係を破線で示した。

a) 応力比の影響

応力比が高くなるほど ϵ_{a0} が線形に大きくなる傾向がみられる。

b) 拘束圧の影響

図中の実線と破線を比較すると、同じ応力比下において、拘束圧が大きくなると ϵ_{a0} が小さくなる傾向がある。また、応力比に対する特性値の増加率はどの拘束圧もほぼ同じである。

初期のひずみは、弾性的な剛性に強く依存すると思われるので、拘束圧が大きくなるほど剛性は大きくなり、初期のひずみが小さくなったと推察される。

c) 温度の影響

$\sigma_c=0$ MPaと3.0MPaにおいて、温度に対する一定の傾向は認められないことから温度の影響はみられない。

(3) クリープ開始時のひずみ速度 $\dot{\epsilon}_a$ と応力比の関係

$\dot{\epsilon}_a$ と応力比の関係を図-7に示す。 $\sigma_c=0$ MPaに対する平均的な関係⁶⁾を実線で示した。

a) 応力比の影響

$\dot{\epsilon}_a=5.5\sim 36.2$ (%/min)にばらついており、応力比に依存する傾向はみられない。

b) 拘束圧の影響

$\sigma_c > 0$ MPaのデータも $\sigma_c=0$ MPaの結果と同じ傾向を示し

ているので、拘束圧の影響はない。

c) 温度の影響

同様に、温度の影響もみられない。これはShibata et al.の知見⁹⁾とも一致している。

(4) 最小ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{a\min}$ と応力比の関係

$\dot{\epsilon}_{a\min}$ と応力比の関係を図-8に示す。 $\sigma_c=0\text{MPa}$ に対する平均的な関係⁹⁾を実線で、本研究で得られた $\sigma_c>0\text{MPa}$ に対する関係を破線で示した。

a) 応力比の影響

応力比が高くなるほど $\dot{\epsilon}_{a\min}$ が大きくなる。

b) 拘束圧の影響

同じ温度、同じ応力比下で比較すると拘束圧が大きいほど $\dot{\epsilon}_{a\min}$ が小さくなり、 $\sigma_c=0\text{MPa}$ と 3.0MPa はほぼ同じ傾きを示している。しかし、 $\sigma_c=0\text{MPa}$ と 1.0MPa の $T=25^\circ\text{C}$ のケースを比べるとあまり違いがない。

c) 温度の影響

$\sigma_c=0\text{MPa}$ では、温度が高くなるにつれて $\dot{\epsilon}_{a\min}$ が大きくなる傾向を示す。応力比に対する特性値の増加率はどの温度も同じである。また、本研究ではひずみゲージの不具合により $\sigma_c=3.0\text{MPa}$ 、 $T=80^\circ\text{C}$ 、 120°C の試験の $\dot{\epsilon}_{a\min}$ を得ることができなかったのでデータが欠落しており比較ができなかった。

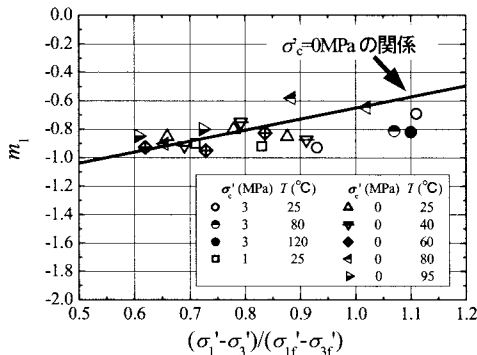


図-5 m_1 と応力比の関係

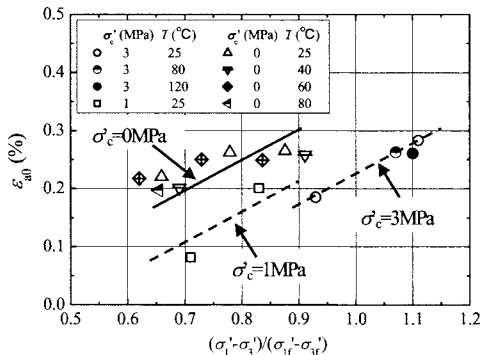


図-6 ϵ_{a0} と応力比の関係

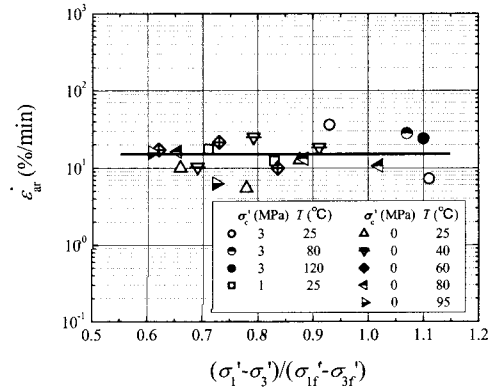


図-7 $\dot{\epsilon}_a$ と応力比の関係

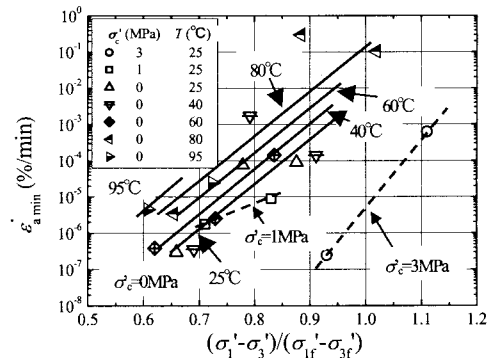


図-8 $\dot{\epsilon}_{a\min}$ と応力比の関係

6. まとめ

大谷石を用いて、高温三軸クリープ試験を実施し、Shibata et al.⁹⁾が定義したクリープ特性値を算出し、一次クリープにおけるひずみ速度の変化率 m_1 、クリープ開始時における軸ひずみ ϵ_{a0} 、クリープ開始時における軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{a0}$ 、最小ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{a\min}$ について、拘束圧依存性と温度依存性を検討した。その結果、応力比の影響を受ける特性値は m_1 、 ϵ_{a0} 、 $\dot{\epsilon}_{a\min}$ であり、それぞれ応力比が高くなるほど線形に増加する傾向を示した。拘束圧の影響を受ける特性値は ϵ_{a0} 、 $\dot{\epsilon}_{a\min}$ であり、拘束圧が大きいほど小さい値を示す。また、応力比に対する特性値の増加率はどの拘束圧もほぼ同じである。温度の影響を受ける特性値は $\dot{\epsilon}_{a\min}$ であり、温度が高くなるほど大きくなる。また、応力比に対する特性値の増加率はどの温度も同じである。 $\dot{\epsilon}_{a0}$ は応力比、拘束圧、温度において依存性をもたないことがわかった。

今後の課題として、より多くの高温三軸クリープ試験のデータを得ることと、破壊に至るデータを得ることが挙げられる。また、Shibata et al.⁶⁾によるクリープモデルに拘束圧の影響を適用させることが挙げられる。

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—（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) 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.
- 4) 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.
- 5) 城まゆみ・青木智幸・小川豊和・山辺 正：熱の影響による珪藻泥岩の力学特性変化，第34回岩盤力学に関するシンポジウム，pp.177-182，2005.
- 6) SHIBATA, K. , TANI, K. and OKADA , T. : Creep Behavior Of Tuffaceous Rock At High Temperture Observed In Unconfined Compression Test, *Soils and Foundations* (査読中) .

THE CREEP CHARACTERISTICS ON TRIAXIAL CREEP TEST AT HIGH TEMPERTURE OF OHYA STONE

Yuji MIHO, Tetsuji OKADA, Kenko SHIBATA, Kazuo TANI

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 and confining pressure on long-term behavior of rock masses.

In this study, a series of triaxial creep tests on tuffaceous rock were conducted under high temperatures, and the influenced temperature and confining on the creep parameter proposed by Shibata et al.(2005) were examined. The results reveal that the strain at the creep time of a start and the minimum strain rate are dependent on confining pressures.