

土岐花崗岩を対象とした応力 - ひずみ構成式の時間依存性パラメータの室内試験による決定

平野 享^{1*}・瀬野 康弘¹・中間 茂雄²・大久保 誠介³

¹独立行政法人日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 結晶質岩地質環境研究グループ
(〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64)

²独立行政法人日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 ニアフィールド研究グループ
(〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4-33)

³東京大学 工学系研究科地球システム工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

*E-mail: hirano.toru@jaea.go.jp

本研究は、長期間の安定性が要求される高レベル放射性廃棄物の地層処分に関わる坑道の設計手法の確立に資するため、時間依存性を考慮した岩石の応力 - ひずみ関係の構成式を得ることを目的としている。構成式は既往の研究で提案された岩石の一次クリープと三次クリープを表現できるものであり、室内試験により求まるパラメータを含んでいる。本研究では、土岐花崗岩を対象とし、現地計測に比べて制約の少ない小型サンプルでの室内試験方法として、2種類のひずみ速度を載荷中に交互に切替える一軸圧縮試験により、三次クリープを表現するパラメータを得る方法を試行した。その結果、強度破壊点以降と三次クリープを記述する項に含まれるパラメータが得られることを確めた。

Key Words : Toki granite, time-dependent behavior, uniaxial loading test, constitutive equation

1. はじめに

一般に、岩盤を構成する岩石はクリープや応力緩和などの時間依存性挙動を示すことが知られている。それゆえ、高レベル放射性廃棄物の地層処分場の設計・建設にあたり、長期間にわたる操業時や処分坑道埋戻し後の岩盤安定性を評価するためにも、岩石の時間依存性挙動を把握し、予測することは重要な課題の一つである。

日本原子力研究開発機構では、高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発の一環として、岐阜県瑞浪市において、結晶質岩（土岐花崗岩）を対象とした調査研究プロジェクト「超深地層研究所計画」¹⁾を進めている。本計画は、深度1,000mまで達する2本の立坑と複数の水平坑道（以後、研究坑道）の建設を伴う深地層の研究施設計画であり、深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備および深地層における工学技術の基盤の整備を目標としている。

岩石の時間依存性挙動の把握は、これら基盤整備の項目の一つである地層処分場の設計・施工における空洞周辺の力学状態の解明に含まれている。これまでに、現象を確認する試験方法の開発、試験で確認された現象のモデル化等を行ってきた²⁾。その結果、岩石の時間依存性

挙動を表現可能な構成式を構築したが、そのパラメータの取得に関してはまだ改善する余地が残されている。またこの構成式に基づく岩盤挙動予測モデルを作成し、研究坑道の建設を通じてモデルの適用・検証を行う計画であり、坑道を建設する岩盤のパラメータを得る必要がある。そこで本論文は、構成式に含まれるパラメータの取得方法についてこれまでの知見を概説し、研究坑道を建設する岩盤のパラメータの取得結果について報告するものである。

2. 時間依存性を考慮した構成式

大久保ら³⁾は、一軸圧縮応力下での岩石の時間依存性挙動を説明する構成式として式(1)を提案した。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a_3 (\sigma^*)^{n_3} (\lambda^*)^{m_3} \quad (1)$$

ここで λ^* はコンプライアンス λ の初期値 λ_0 に対する比であり、 σ^* は試験における応力レベル σ の一軸圧縮強さ σ_c に対する比である。その他の a_3 、 n_3 、 m_3 等は周圧や岩石によって決まるパラメータである。

a_3 は現象の進む速度を決める定数で、この値が大きいほどクリープひずみが進行し易く、一軸圧縮試験では強度が低下する。 n_3 は岩石の粘性的性質の非線形性の度合いを表す定数で、この値が小さいほど応力 - ひずみ関係の時間依存性が大きくなる。 m_3 は応力 - ひずみ線図の形を決める定数で、この値が大きいほどピーク強度後の耐荷能力の低下が急激となる。土岐花崗岩を含め、強度破壊点以降の応力 - ひずみ線図の傾きが正である Class II の岩石⁴⁾では、 $m_3 > n_3 + 2$ の関係がある⁹⁾。

式(1)はコンプライアンスの変化率 $d\lambda^*/dt$ が λ^* の増加とともに単調増加する関係を示している。よって式(1)を用いると応力レベルを σ^* としたクリープ試験における三次クリープ現象を表現することができる。この他に、定ひずみ速度または定変位速度での一軸圧縮試験、応力緩和試験の場合の力学的挙動についても、式(1)を用いて示すことができると大久保⁹⁾は報告している。

ついで大久保、福井⁹⁾は、比較的低い応力レベルでの長期クリープ試験で認められた一次クリープを表現する構成式として式(2)を提案した。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a_1 (\sigma^*)^{n_1} (\lambda^* - 1)^{-m_1} \quad (2)$$

ここで、変数とパラメータの使い方は式(1)と同様である。式(2)は、式(1)とは逆に、コンプライアンスの変化率 $d\lambda^*/dt$ が λ^* の増加とともに単調減少する関係を示している。よって式(2)を用いると応力レベル σ^* 一定でクリープひずみ速度が次第に減少することを表現できる。

これを受けて大久保ら⁹⁾は、一次クリープから三次クリープまでの現象を連続的に表現できる構成式として、 $d\lambda^*/dt$ が式(1)と式(2)の右辺の和に等しいとした構成式を考えた。また、その検証として、ある応力レベルでの一軸圧縮クリープ試験結果から式(1)と式(2)のパラメータを取得し、そのパラメータでの構成式が応力レベルの異なる一軸圧縮クリープ試験結果だけでなく一軸引張クリープ試験結果をも表現できることを示している。

ある岩石について、式(1)および(2)を用いる際のパラメータは a_1 , n_1 , m_1 , a_3 , n_3 および m_3 の6つであり、これらはクリープ試験等の適切な実験を行って取得する必要がある。ここでパラメータにつけた添字1と3は、それぞれ一次クリープと三次クリープに係わるパラメータであることを示す。これらパラメータの概略の取得方法は以下のようなものである⁷⁾。

a_1 , m_1 はクリープ試験の初期に観察されるクリープひずみ速度 - 経過時間曲線の両対数グラフ上における傾きと式(2)の解析解を用いることで得られる。また n_1 は応力レベルを変えたクリープ試験によって得られる。ただし、これらには比較的低い応力レベルでクリープ試験

を行う必要があり、クリープひずみを弾性ひずみから分離できる精度が必要であって実験の難易度がかなり高い。一方、 a_3 , m_3 および n_3 は、三次クリープを観察して求めることもできるが、式(1)の解析解より導かれる関係を使うと、クリープ試験より実施しやすい一軸圧縮試験を行って、その応力 - ひずみ関係に観察されるひずみ速度依存性から取得することができる。

以上のことをふまえて、土岐花崗岩の構成式パラメータを求める本研究においては、 a_1 , m_1 , n_1 の取得は、精度良い試験方法の目処がついてから今後取組むものとし、今回は a_3 , m_3 , n_3 について取得するものとした。

3. 三次クリープを表現するパラメータの取得方法

(1) パラメータの決定方法

大久保⁹⁾によると、式(1)を解いて定ひずみ速度による一軸圧縮試験での強度 σ_c の解析解を求めると、(3)式の関係を得ることができる。

$$\sigma_c \propto c^{\frac{1}{n_3+1}} \quad (3)$$

ここで c は一軸圧縮試験で設定したひずみ速度である。式(3)により、同種岩石について異なるひずみ速度 c_1 , c_2 で試験を行ったとき、得られる強度比 σ_2/σ_1 は(4)式のとおりとなる。

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{c_2}{c_1} \right)^{\frac{1}{n_3+1}} \quad (4)$$

したがって、異なるひずみ速度で試験を行ってそれぞれの強度が得られると、式(4)より n_3 を求めることができる。本研究においては3. (2) で後述する一軸圧縮試験と式(4)により n_3 を取得するものとした。

つぎに m_3 を求める。クリープ試験によらず、一軸圧縮試験から m_3 を得る方法として、強度破壊点以降での応力 - ひずみ線図にフィットするよう m_3 を数値実験的に決める方法があるが、それには応力 - ひずみ線図を強度破壊点以降も安定的に得る必要がある。定ひずみ速度制御ではそれが安定して得られないことから、3. (3) で述べるような制御方法が要求される。

最後の a_3 は、 m_3 , n_3 が既知となれば、式(1)の解析解から導かれる(5)式により求めることできる⁸⁾。

$$a_3 = \frac{\left(\frac{m_3}{n_3 + 1} \right)^{\frac{m_3}{n_3 - m_3 + 1}}}{t_0} \quad (5)$$

ここで t_0 は、定ひずみ速度試験を行って一軸圧縮強さが σ_c のとき、 $\Delta\varepsilon = \sigma_c \lambda_0$ で得られるひずみ $\Delta\varepsilon$ に達するまでの載荷時間 $(\Delta\varepsilon/c)$ である。

(2) n_3 を得るための二種類のひずみ速度を交互に切換えた一軸圧縮試験

岩石を用いた一軸圧縮試験はサンプル毎のばらつきが比較的大きいので試験条件ごとに複数の試験体が必要である。 n_3 を得るための載荷速度を4~5通り設定する場合、合計20本程度の試験体が必要となり、これは実務的に負担が大きい。

大久保³⁾は、試験体数を削減する工夫として、ひとつの試験体に二種類の載荷状態を順次与えて各々を分析することを提案した。すなわち、強度破壊点直前でひずみ速度を10倍にすると、1本の試験体から式(4)を用いた評価が行えるとしている(図-3.1)。しかしながらこの方法は難易度が高く習熟が要り、誰でも行えるようにするには問題があった。

この問題を解決するために羽柴⁹⁾は、試験開始から終了まで、所定のひずみ量 $\Delta\varepsilon$ だけ増加するごとに、緩急二種類のひずみ速度を交互に切換えて載荷試験を行う方法を考案した。そこでは、各ひずみ速度で描かれる部分をなめらかにつなぐ二つの曲線をあてはめて、緩急二種類のひずみ速度に対応する応力-ひずみ線図であるとし(図-3.2)、式(4)による評価を行っている。本研究で

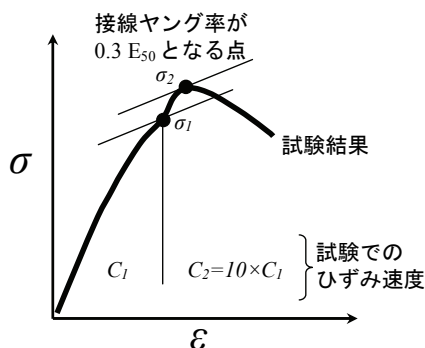


図-3.1 破壊点直前でひずみ速度を増加させる方法

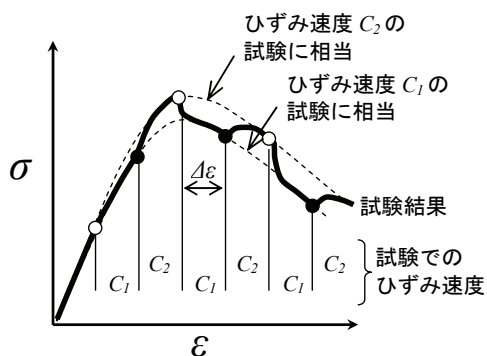


図-3.2 ひずみ速度を交互に切換える方法
(図-3.1, 3.2は大久保³⁾, 羽柴⁹⁾から引用加筆)

はこの方法を用いて、土岐花崗岩の n_3 を求めるものとした。

(3) 一軸圧縮試験における試験機の制御方法

土岐花崗岩を含め、Class IIの岩石⁴⁾に対して定ひずみ速度試験を行うと、強度破壊点以降で破壊が加速かつ急激に進み、強度破壊点以降の応力-ひずみ線図を安定して得ることができない。これは、強度破壊点以降の応力-ひずみ線図により m_3 を取得するにあたり、とくに不都合である。

強度破壊点以降の試験が安定しない理由として大久保¹⁰⁾は、定ひずみ速度制御された試験機が、 C をひずみ速度(定数)、 t を時間として $\varepsilon = Ct$ による制御を用いているため(図-3.3)、Class IIの岩石に対して、強度破壊点以降で制御不能となる点を指摘した。またその解決方法として、 $\varepsilon - (\sigma/E') = Ct$ による制御(図-3.4)を用いると安定して試験が行えることを示した。

そこで、本研究ではこの制御方法で一軸圧縮試験を行うものとし、 E' の値は予備試験をふまえて $E_{pre}/0.3$ とした。ここで E_{pre} は土岐花崗岩のヤング率(34GPa)である。なお、試験機はMTS社製のサーボ試験機(容量1,500kN)を用いた。

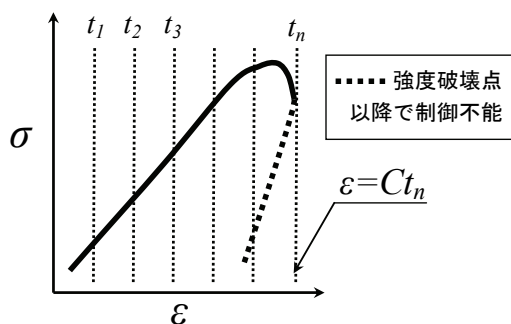


図-3.3 定ひずみ速度制御の一軸圧縮試験

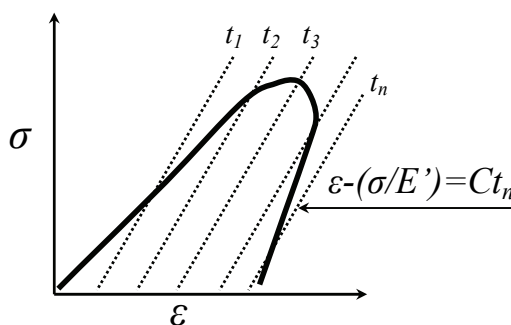


図-3.4 本研究で用いた一軸圧縮試験の制御方法
(図-3.3, 3.4は大久保¹⁰⁾から引用加筆)

4. 土岐花崗岩のパラメータ取得

(1) 土岐花崗岩の採取場所

研究坑道が建設される瑞浪超深地層研究所周辺の地質は、表層から新第三紀鮮新世の瀬戸層群、新第三紀中新世の瑞浪層群、後期白亜紀の土岐花崗岩となっている。

本研究で用いた土岐花崗岩のサンプル採取場所を、施設建設前に行われたボーリング調査にもとづく地下施設周辺の岩盤力学モデル¹¹⁾に重ねて、図-4.1に示す。採取場所は図中MIZ-1号孔と記されたボーリング孔のおよそ深度500m付近である。

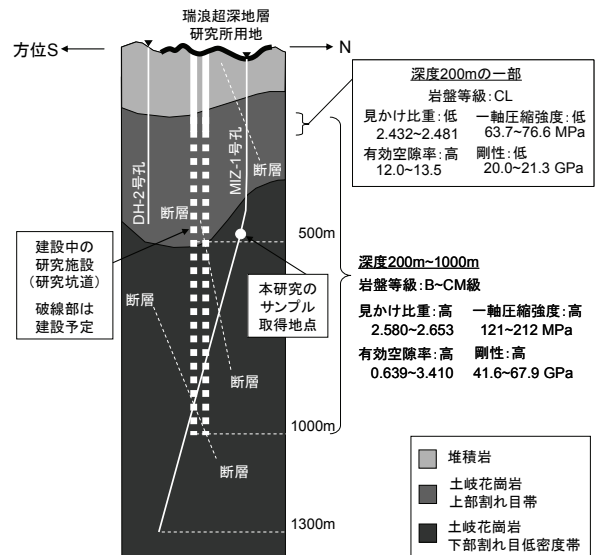


図-4.1 土岐花崗岩の採取場所

表-4.1 二種類のひずみ速度を交互に切換えた一軸圧縮試験結果（土岐花崗岩）

試験体番号	直径(mm)	高さ(mm)	比重	σ_1 (MPa) $c = c_1$	σ_2 (MPa) $c = c_2$	n_3	備考
2	24.96	50.02	2.6	146	154	44	$c_1 = 10\mu/s$ で 200s, $c_2 = 100\mu/s$ で 3s を交互
3	24.96	50.02	2.6	151	158	48	
1	24.92	50.02	2.6	155	162	53	$c_1 = 10\mu/s, c_2 = 100\mu/s \Delta\varepsilon = 300$
4	24.97	50.03	2.6	151	157	62	
5	24.98	50.02	2.6	150	156	63	
6	24.97	50.02	2.6	157	165	47	
7	24.98	50.03	2.6	141	148	47	
平均値	24.96	50.02	2.6	150	156	52	

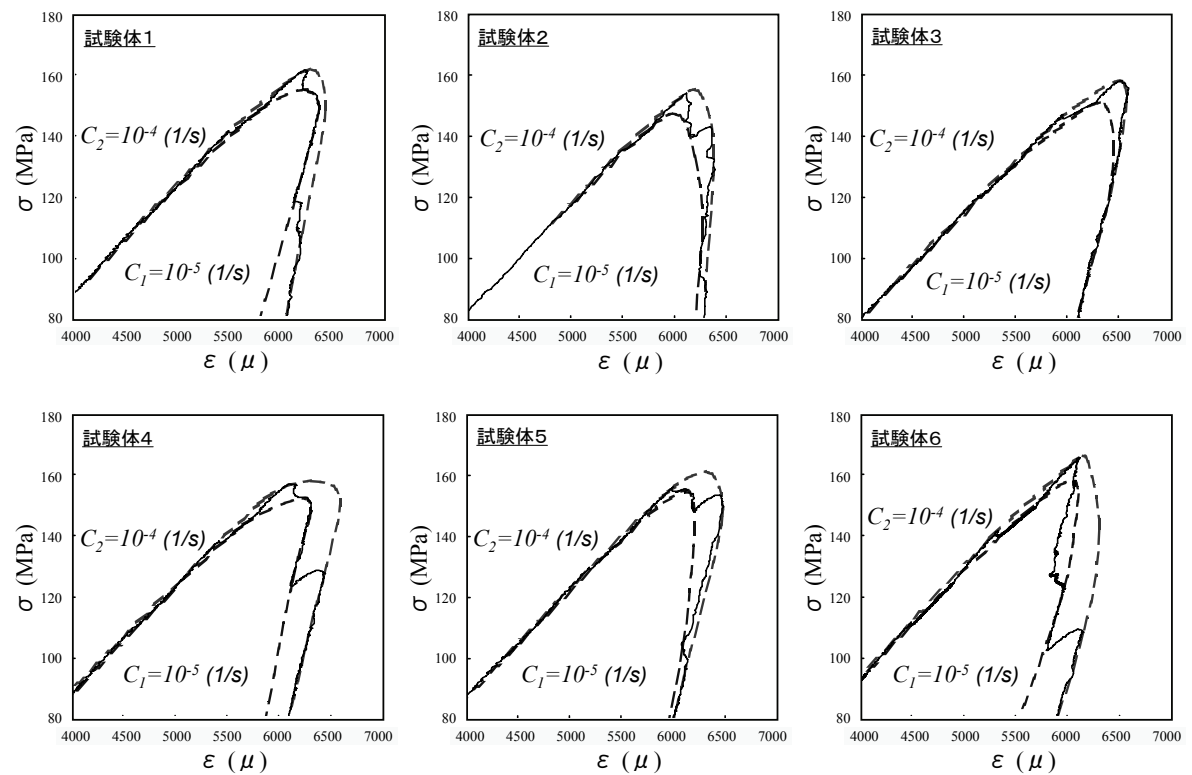


図-4.2 二種類のひずみ速度に対応する応力 - ひずみ線図（土岐花崗岩）

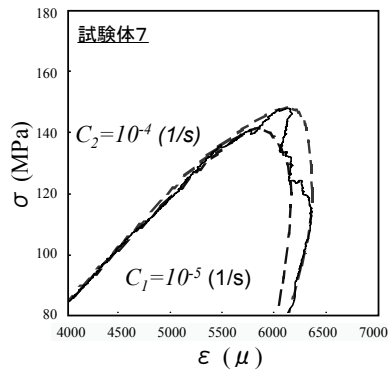


図-4.2 のつづき

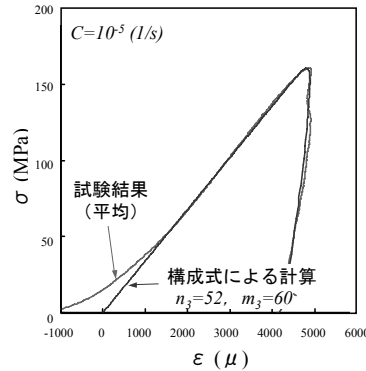


図-4.3 試験結果と計算値

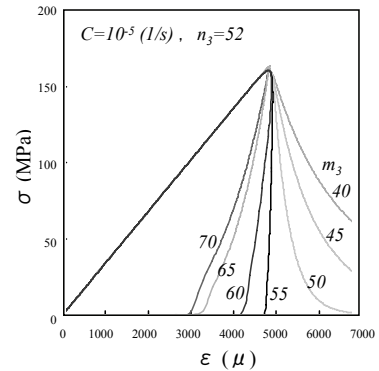


図-4.4 m_3 を得るための数値実験

(2) n_3 の取得

土岐花崗岩を対象として、3. (2) で述べた二種類のひずみ速度を交互に切替えた一軸圧縮試験を7本の試験体について行った。表-4.1に試験結果を示す。この表の備考欄に二種類のひずみ速度の切替え方を記載した。なお、羽柴⁹⁾は、ひずみ速度の切替え方に一義性はなく、 $\Delta \varepsilon$ は二種類のひずみ速度の比に応じて適宜調整する必要があると述べている。つぎに、図-4.2に、試験で得られた応力 - ひずみ線図から、ピーク強度がよくわかるよう、その部分を拡大したものを示す。破線は二種類のひずみ速度に対応する部分をなめらかにつないだ曲線である。この図-4.2に示された二つのピーク強度を入力値とし、式(4)を用いて計算した n_3 の値を表-4.1にあわせて示す。

(3) m_3 および a_3 の取得

つぎに、強度破壊点以降の応力 - ひずみ線図から m_3 を求める。図-4.3にひずみ速度 $C = 10^5$ /sとしたときの実験で得られた平均的な応力 - ひずみ線図を示す。一方、4. (2) で求めた $n_3 = 52$ を式(1)に入れて計算で求めた一軸圧縮試験の応力 - ひずみ線図を、 m_3 について40～70の範囲で変化させて描くと図-4.4のようになる。図-4.4のうち強度破壊点以降の応力 - ひずみ関係が図-4.3のそれと最も似たものを探すと $m_3 = 60$ であった。

検証として、 $n_3 = 52$ 、 $m_3 = 60$ での計算で求めた一軸圧縮試験の応力 - ひずみ線図を、図-4.3の実験で得たそれに重ねてみると、载荷初期の曲線が下に凸となる部分を除いて良好に一致した。载荷初期の下に凸になる部分は、試験体端面の変形等、これまでの議論で無視した要素による現象であることから、その部分では実験と計算が一致しないものと考えられる。

ここまでの手順で $n_3 = 52$ 、 $m_3 = 60$ が求まっているので、最後に式(5)を用いて a_3 を計算すると $a_3 = 0.0029$ が得られた。ただし t_0 は7本の試験体の平均値である120sとした。以上でパラメータの取得が完了する。

5. 考察

土岐花崗岩について、二種類のひずみ速度を交互に切替えた一軸圧縮試験から得た n_3 の平均値は52であった。これは、式(4)から計算されるように、土岐花崗岩がひずみ速度10倍に対して、強度は $10^{1/53}$ 倍となって約4.5%の強度増加をすることを意味している。

表-5.1に、本研究とほぼ同じ方法によって得られた、従来の研究による n_3 を示す。土岐花崗岩の n_3 は表に挙げた6種類の岩石の中で、最も類似した岩石である稲田花崗岩と比較して近い値であった。また、その他の表中の岩石と比較して、土岐花崗岩の n_3 は大きな値の部類である。式(4)でわかるとおり、 n_3 が大きくなるとひずみ速度変化に対する強度増加は小さくなることから、土岐花崗岩の応力 - ひずみ関係における時間依存性は、6種類の岩石のなかでは、秋吉大理石に次いで小さいものといえる。

応力 - ひずみ関係における時間依存性を示す n_3 が得られると、クリープ寿命を考慮した岩盤構造物の許容応力を以下のように計算することができる。

大久保⁹⁾によると、式(1)を解くことで、クリープ応力とクリープ寿命の間に式(6)の関係が得られる。

$$(\text{クリープ応力}) \propto 1 / (\text{クリープ寿命})^{1/n_3} \quad (6)$$

ここで、クリープ応力を許容応力、クリープ寿命を岩

表-5.1 土岐花崗岩および従来の研究で求められた n_3

論文	岩石名	試験方法	n_3
本論文	土岐花崗岩	一軸試験 ひずみ速度交互切替 (図-3.2の方法)	52
羽柴 ⁹⁾	秋吉大理石		67
	田下凝灰岩		51
	三城目安山岩		39
	来待砂岩		42
	幌延泥岩		28
大久保 ⁹⁾	秋吉大理石	一軸試験、破壊点直前 ひずみ速度10倍 (図-3.1の方法)	73
	稲田花崗岩		49
	三城目安山岩		38

盤構造物の使用期間と読みかえると、使用期間に応じた許容応力が計算できる。例えば、高レベル放射性廃棄物の地層処分場の安全性評価は、処分場の閉鎖後から数千年ないし数万年に対して必要である¹²⁾。そこで、土岐花崗岩と同様なクリープ特性を有する岩盤における地下構造物の使用期間を10万年に想定した場合、これを1年を想定した場合と比較すると、 $1 / 10^{52} = 0.8$ となって許容応力を2割ほど減らす必要があることが示される。ただしこの計算は、実験で得た関係がそのような実験不可能な長期においても成立すると仮定しており、何らかの方法で仮定の検証が必要である。

6. まとめ

岩石の応力 - ひずみ関係における時間依存性はコンプライアンスを可変とする構成式で示すことができる。この構成式の三次クリープ現象を表現するパラメータ a_3 , m_3 , n_3 は、ひずみ速度を交互に切替えた一軸圧縮試験から取得される。なお、パラメータ n_3 は応力 - ひずみ関係における時間依存性を示すパラメータである。今回の試験によって得られた土岐花崗岩の n_3 は52であった。これは比較した岩石の中では大きな値であり、土岐花崗岩の時間依存性挙動（粘弾性的性質における時間依存性）は比較的小さなものである。

今後は、一次クリープ現象を表現する構成式のパラメータ a_1 , m_1 , n_1 を取得するために、精度良い試験方法を検討するとともに、土岐花崗岩のパラメータを取得する。また、提案された一次クリープから三次クリープまでを表現できる構成式を用いて、研究坑道の長期挙動を予測し、現地計測を通じて構成式の検証を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：超深地層研究所地層科学研究基本計画，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-018，2002.
- 2) 核燃料サイクル開発機構：長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究，サイクル機構技術資料，JNC TJ7400 2004-002，2004.
- 3) 大久保誠介，何 昌栄，西松裕一：一軸圧縮応力下における時間依存性挙動，日本鉱業会誌，Vol.103，No.1189，pp.177-181，1987.
- 4) Wawersik, W.R. and Fairhurst, C.: A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments, Int. J. Rock Mech. And Min. Sci., No.7, pp.561-575, 1970.
- 5) 大久保誠介：コンプライアンス可変型構成方程式の解析的検討，資源・素材学会誌，Vol.108，No.8，pp.601-606，1992.
- 6) 大久保誠介，福井勝則：田下凝灰岩の長期クリープ試験と構成方程式，資源と素材，Vol.118，No.1，pp.36-42，2002.
- 7) 大久保誠介，福井勝則，羽柴公博：コンプライアンス可変型構成方程式の拡張とクリープ試験結果による検討，資源と素材，Vol.118，No.12，pp.737-744，2002.
- 8) 大久保誠介，金豊年：非線形粘弾性モデルによる円形坑道周辺岩盤挙動のシミュレーション，資源と素材，Vol.109，No.3，pp.209-214，1993.
- 9) 羽柴公博，大久保誠介，福井勝則：岩石のピーク強度および残留強度の載荷速度依存性，資源と素材，Vol.121，No.1，pp.11-18，2005.
- 10) 大久保誠介，西松裕一：応力速度の Negative Feed Back を用いた岩石の一軸圧縮試験，日本鉱業会誌，Vol.100，No.1161，pp.1052-1056，1984.
- 11) 日本原子力研究開発機構：超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階（第1段階）研究成果報告書，JAEA-Research 2007-043，2007.
- 12) 核燃料サイクル開発機構：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，サイクル機構技術資料，JNC TN1400 99-020，1999.

DETERMINATION OF PARAMETERS FOR A STRESS-STRAIN CONSTITUTIVE EQUATION CONSIDERING TIME-DEPENDENT BEHAVIOR OF TOKI GRANITE

Toru HIRANO, Yasuhiro SENO, Shigeo NAKAMA and Seisuke OKUBO

Toki granite was tested to obtain parameters for the constitutive equation. The testing method was uniaxial compressive loading at the moderate a constant strain rate that is decreased after yielding to obtain the complete stress-strain curve. In addition, two kinds of the strain rate were alternately switched to obtain the parameter n from one specimen. The n represents the strength time-dependence in the constitutive equation. The second parameter m can be obtained by fitting the experimental stress-strain curve to the calculated curve. The m accounts for the behavior after yielding. According to the results, Toki granite has $n=52$ and $m=60$, showing relatively weak time-dependence of creep failure.