

# 2種類の堆積岩の多段階クリープ試験による 長期クリープ挙動の予測

羽柴公博<sup>1\*</sup>・松井裕哉<sup>2</sup>・瀬野康弘<sup>1</sup>・佐藤稔紀<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 堆積岩工学技術開発グループ  
(〒098-3207 北海道天塩郡幌延町北進432-2)

<sup>3</sup>日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 結晶質岩工学技術開発グループ  
(〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64)

\* E-mail: hashiba.kimihito@jaea.go.jp

岩盤内構造物の長期安定性を評価するためには、岩石の時間依存性挙動を把握することが重要である。本研究では、2種類の堆積岩を用いて、クリープ応力を段階的に増加させる多段階クリープ試験を行った。得られた結果を用いて、低応力レベルと高応力レベルにおけるクリープ挙動を比較した。その結果、低応力レベルから高応力レベルまでのクリープ挙動が、一軸圧縮強さの載荷速度依存性を表すパラメータ $n$ により統一的に説明できる可能性が示唆された。さらに、多段階クリープ試験結果から一軸圧縮強さと長期クリープ寿命を推定した結果、推定した一軸圧縮強さは、一軸圧縮強さ試験結果とほぼ一致することがわかった。

**Key Words :** *sedimentary rock, multistage creep test, long-term behavior, creep life time*

## 1. はじめに

岩盤内構造物の長期安定性を評価するためには、岩石の時間依存性挙動を把握することが重要である。そのため、載荷速度依存性やクリープ、応力緩和など、種々の載荷条件下での時間依存性挙動が研究されてきた。

岩石の時間依存性の程度を表すパラメータを、ここでは $n$ とすると、例えば、多くの岩石で一軸圧縮強さは載荷速度の $1/(n+1)$ 乗に比例する<sup>1) 2) 3)</sup>。また、クリープ寿命はクリープ応力の $n$ 乗に反比例する<sup>4) 5) 6)</sup>。さらに、一軸圧縮強さの載荷速度依存性から求められた $n$ とクリープ寿命から得られた $n$ が良く一致することが指摘されている<sup>7)</sup>。このように、 $n$ は岩石の時間依存性挙動を統一的に表すことができる重要なパラメータと考えられる。過去の研究では、破壊が生じるような高い応力レベルでは、破壊の進行する速度が応力の $n$ 乗に比例するとして、これらの現象が説明されている<sup>2) 6) 9)</sup>。

近年、強度破壊点付近から残留強度領域にかけて、 $n$ の値がほとんど変化しないことを示す実験結果が得られてきている<sup>9)</sup>。 $n$ がほぼ一定であるということは、強度破壊点以降で時間依存性挙動のメカニズムが変化していな

い可能性がある。

一方、強度破壊点以前の時間依存性挙動や $n$ については、未知な部分が多い。比較的強固な岩石では、ヤング率の載荷速度依存性が小さいが、これは、強度破壊点以前の $n$ が強度破壊点付近の $n$ とほぼ等しいことを示唆している<sup>10)</sup>。一方、軟質な堆積岩では、強度破壊点以前の $n$ が強度破壊点付近よりも小さい可能性<sup>11)</sup>と、ほぼ等しい可能性<sup>12)</sup>が指摘されており、明確な結論は出ていない。一般に、地下構造物の安定性に関しては、岩盤の強度破壊点以前の応力状態での議論がなされる。このため、岩石の時間依存性挙動を予測・評価するためには、強度破壊点以前の低い応力レベルでの時間依存性の程度を把握することが重要であるが、検討すべき課題が多いのが現状である。

そこで本研究では、2種類の堆積岩を用いて、クリープ応力を段階的に増加させる多段階クリープ試験を行った。得られた結果をパラメータ $n$ を用いて整理し、低応力レベルから高応力レベルまでの時間依存性の程度を比較した。さらに、それらの結果に基づき、1本の試験片による多段階クリープ試験結果から、一軸圧縮強さと長期クリープ寿命の予測を試みた。

## 2. 多段階クリープ試験

試料岩石として、北海道天塩郡幌延町において深度500 mの稚内層から採取した珪質泥岩と、過去の実験データが豊富な栃木県宇都宮市産の田下凝灰岩を用いた。2種類の堆積岩の一軸圧縮強さ試験結果を表-1に、過去の研究で一軸圧縮強さの载荷速度依存性から得られている $n$ の値<sup>9,13,14,15,16</sup>を表-2にまとめた。

クリープ試験は直径25 mm、高さ50 mmの円柱形試験片を用いた。珪質泥岩の試験片は、乾燥を防ぐため、整形後すぐにラップで覆い、真空パックに包んで水中で保存した。田下凝灰岩の試験片は、整形後、試験室内に2週間以上放置して自然乾燥させた。試験は、表-1および表-2と同じ試験条件、すなわち珪質泥岩は試験片を水没させた状態、田下凝灰岩は気乾状態で行った。

载荷装置は、図-1に示した空圧式一軸圧縮クリープ試験機を用いた。コンプレッサで圧縮された空気は、出口圧力を設定できる減圧弁により、一定の空気圧でシリンダに送られる。コンプレッサ内の圧力が任意に定めた下限以下まで低下するとモータが回転を始め、上限に達すると回転が止まる。モータの回転時間は1分程度であり、約1時間に1回動作させることで、試験片に加わる荷重をほぼ一定に保つことができる。試験片の変位は片持梁式変位計を2個用いて測定した。変位計の出力は増幅器（共和電業製、CDV-700A）を介して、デジタルマルチメータ（アドバンテスト製、R6451A）に送られる。さらに、GPIBでPCに取り込まれる。

試験では、図-2に示したように、1本の試験片でクリープ応力を段階的に増加させた。各段階では応力を一定に保ち、破壊が生じるまでクリープ応力を低応力レベルから高応力レベルまで適宜増加させた。なお、各段階間、すなわち、応力を増加させ始めてから所定の値に達するまでには約1sを要した。

図-3には珪質泥岩と田下凝灰岩の試験結果を一例ずつ示した。いずれの図でも、各段階の開始時点を実点とした。珪質泥岩では、第1段階（クリープ応力5.0 MPa）で0.0004程度のクリープ歪が生じた。第2段階（クリープ応力6.0 MPa）では0.00025程度、第3段階（クリープ応力7.0 MPa）では0.0003程度のクリープ歪が生じた。第4段階（クリープ応力8.0 MPa）の開始後、約2000 s経過した時点で破壊した。

田下凝灰岩では、第1段階（クリープ応力10.9 MPa）で0.00025程度、第2段階（クリープ応力13.0 MPa）で0.0002程度のクリープ歪が生じた。第3段階（クリープ応力15.2 MPa）では約80000 sの間に0.0004程度のクリープ歪が生じた。第4段階（クリープ応力17.4 MPa）の開始後、約5000 s経過した時点で破壊した。

1本の試験片に1回だけクリープ応力を载荷する通常の

表-1 2種類の堆積岩の一軸圧縮強さ試験結果

| 岩石    | 環境   | 歪速度<br>( $\times 10^{-6}$ ) | 一軸圧縮強さ<br>(MPa) |
|-------|------|-----------------------------|-----------------|
| 珪質泥岩  | 湿潤状態 | 50                          | 15.1            |
| 田下凝灰岩 | 気乾状態 | 10                          | 20.8            |

表-2 一軸圧縮強さの载荷速度依存性から得られている $n$

| 岩石    | $n$ | 文献                           |
|-------|-----|------------------------------|
| 珪質泥岩  | 30  | 大久保他 <sup>13)</sup>          |
|       | 38  | 大久保他 <sup>14)</sup>          |
|       | 47  | 大久保他 <sup>15)</sup>          |
| 田下凝灰岩 | 41  | 秋 <sup>16)</sup>             |
|       | 42  | 秋 <sup>16)</sup>             |
|       | 51  | Hashiba et al. <sup>9)</sup> |

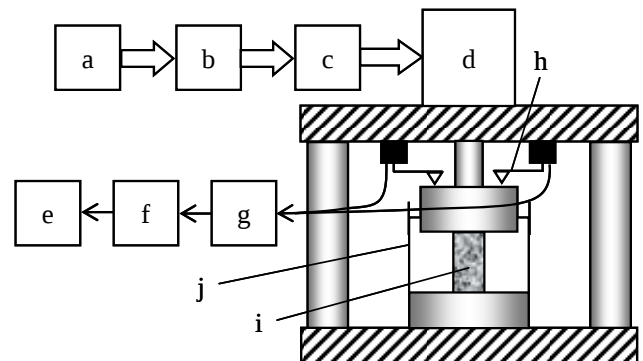


図-1 空圧式一軸圧縮クリープ試験機の概略

a: コンプレッサ, b: 減圧弁, c: 開閉弁, d: シリンダ, e: PC, f: デジタルマルチメータ, g: 増幅器, h: 片持梁式変位計, i: 試験片, j: 水槽

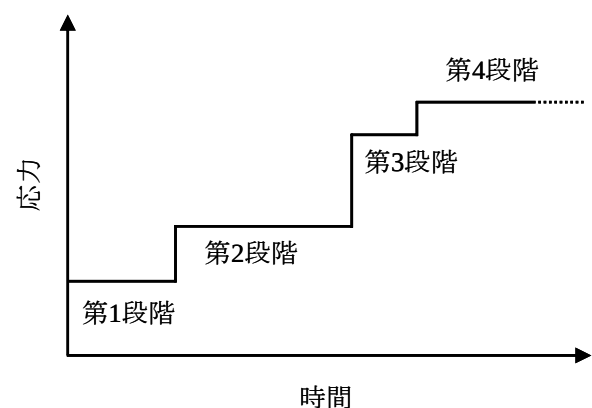
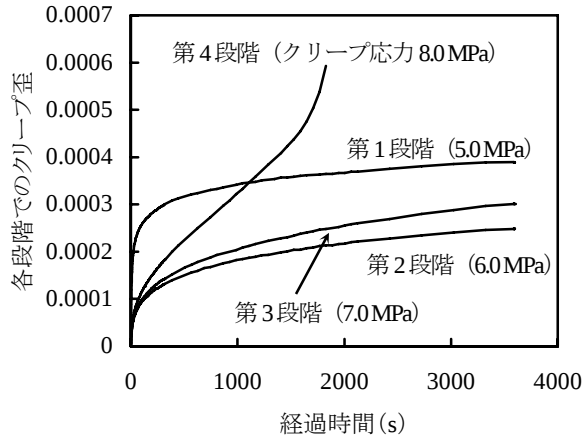
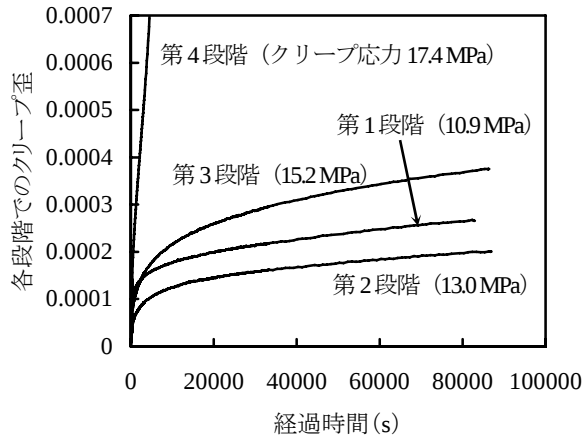


図-2 多段階クリープ試験の概略



(a) 珪質泥岩



(b) 田下凝灰岩

図-3 多段階クリープ試験結果

クリープ試験では、クリープ応力が大きいほどクリープ歪も大きくなる。しかし、多段階クリープ試験では、ある段階のクリープ挙動はそれ以前の履歴の影響を受け、通常のクリープ試験に比べて複雑な挙動を示すことが確認された。

### 3. 低応力レベルから高応力レベルまでのクリープ挙動の比較

多段階クリープ試験での、低応力レベルから高応力レベルまでのクリープ挙動を比較してみる。まず、破壊の進行する速度が応力  $\sigma$  の  $n$  乗に比例すると仮定すると、試験片に蓄積される損傷の程度は次式の  $\tau$  で表される<sup>9)</sup>。

$$\tau = \sum_i \sigma_i^{n_i} t_i \quad (1)$$

ここで、多段階クリープ試験の第  $i$  段階のクリープ応力を  $\sigma_i$ 、継続時間を  $t_i$ 、時間依存性の程度を表すパラメータを  $n_i$  とした。式 (1) で表される損傷の影響は、試験片の非弾性歪  $\varepsilon_c$  の増加やコンプライアンス  $\lambda$  ( $=$  歪  $\varepsilon$  / 応力  $\sigma$ ) の増加などに表れるであろう。実際は両者が同時に起こっている可能性が高い<sup>17)</sup>が、以下では単純化して、その一方だけを考える。すなわち、

$$\varepsilon_c = f(\tau) \quad (2)$$

もしくは、

$$\lambda = g(\tau) \quad (3)$$

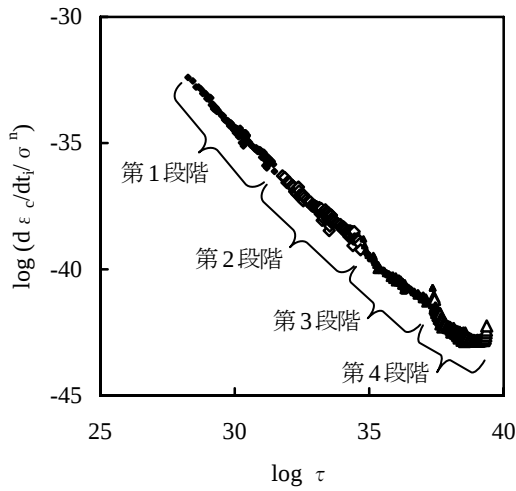
とする。なお、岩石の時間依存性挙動の多くは、式 (2) と式 (3) のどちらでもある程度説明できることがわかっている<sup>18), 19)</sup>。式 (1) を式 (2) と式 (3) に代入して整理すると次式となる。

$$\frac{d\varepsilon_c}{dt_i} / \sigma_i^{n_i} = \frac{df(\tau)}{d\tau} = F(\tau) \quad (4)$$

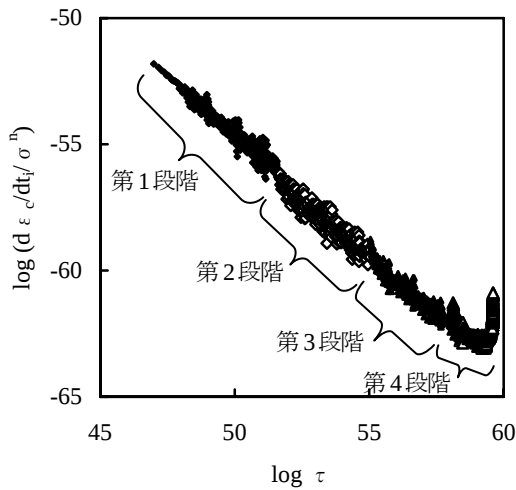
$$\frac{d\varepsilon}{dt_i} / \sigma_i^{n_i+1} = \frac{dg(\tau)}{d\tau} = G(\tau) \quad (5)$$

ここで、 $n_i$  が応力レベルによらずに一定 ( $=n$ ) とみなせるかどうかを、式 (4) を用いて検証してみる。すなわち、 $n_i = n$  とした場合の式 (4) の左辺  $d\varepsilon_c / dt_i / \sigma_i^n$  を縦軸に、式 (1) を用いて計算した  $\tau$  を横軸にして、図-3 の珪質泥岩と田下凝灰岩の結果を再整理したものを図-4 に示した。なお  $n$  は、表-2 に示した一軸圧縮強さの载荷速度依存性から得られた平均的な値として、珪質泥岩については  $n = 40$ 、田下凝灰岩は  $n = 45$  とした。これらは、破壊が生じるような高い応力レベルで得られた  $n$  と考えられる。つまり、高応力レベルで得られた  $n$  を用いて整理して、低応力レベルから高応力レベルまでの試験結果に、矛盾が見られないかどうかを検討する。なお、各段階間では応力が瞬間的に増加すると仮定した。

図-4 からわかるように、いずれの岩石でも、両対数グラフ上で、 $d\varepsilon_c / dt_i / \sigma_i^n$  は  $\tau$  に対してほぼ直線的に減少していき、最小値をとった後に増加に転じ、破壊に至っている。すなわち、低応力レベルから高応力レベルまでのクリープ挙動が、 $\tau$  の一価関数である 1 本のマスターカーブ  $F(\tau)$  で表される。この結果は、式 (1) で  $n_i = n$  (一定) としたことが妥当であること、ひいては、



(a) 珪質泥岩



(b) 田下凝灰岩

図-4 多段階クリープ試験での正規化した歪速度と  $\tau$  の関係

低応力レベルから高応力レベルまで、時間依存性の程度がほぼ一定であることを示唆していると考えられる。

ここでは式 (4) を用いて検討したが、表-2 に示したように  $n$  は 1 よりも十分大きいので、式 (4) と式 (5) との差はわずかである。すなわち、式 (5) の左辺と  $\tau$  との関係も図-4 とほとんど変わらない。つまり、応力履歴の影響を考慮した構成方程式である式 (2) と式 (3) のいずれを用いても、高い応力レベルで得られた試験結果から、低い応力レベルでのクリープ挙動を予測できる可能性がある。

表-3 多段階クリープ試験結果から推定した2種類の堆積岩の一軸圧縮強さ  $\sigma_f$

| 岩石    | 試験数 | $\sigma_f$ の平均値 (MPa) |
|-------|-----|-----------------------|
| 珪質泥岩  | 6   | 12.0                  |
| 田下凝灰岩 | 11  | 20.4                  |

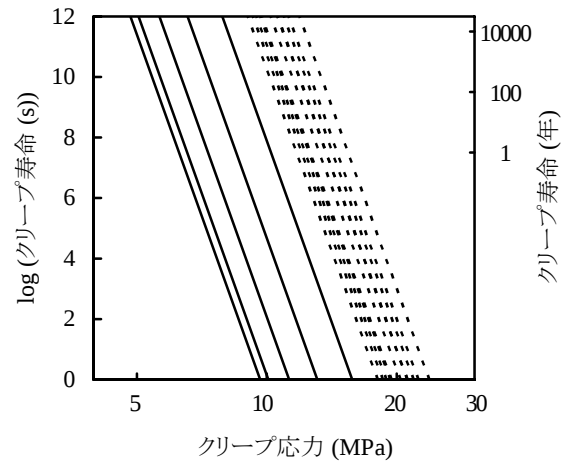


図-5 多段階クリープ試験から推定したクリープ寿命  
実線：珪質泥岩，破線：田下凝灰岩

#### 4. 長期クリープ寿命の予測

前章での検討により、多段階クリープ試験における損傷の程度は、 $n_i = n$  (一定) とした式 (1) の  $\tau$  で表せることがわかった。そこで、この知見をもとにして、長期クリープ寿命の予測を試みる。まず、 $\tau$  が一定値  $T$  になったときに破壊が生じると仮定する。今回行ったような多段階クリープ試験では次式が導かれる。

$$\sum_i \sigma_i^n t_i = T \quad (6)$$

1本の試験片に1回だけクリープ応力を載荷する通常のクリープ試験では、クリープ応力  $\sigma_c$  とクリープ寿命  $t_c$  の関係は次式となる。

$$\sigma_c^n t_c = T \quad (7)$$

クリープ寿命が 1 s となるクリープ応力を  $\sigma_f$  とすると次式が成り立つ。

$$\sigma_f^n = T \quad (8)$$

田下凝灰岩では、 $\sigma_f$ が歪速度  $10^5$  /s での一軸圧縮強さとほぼ一致することがわかっている<sup>20)</sup>。珪質泥岩を対象とした検討は行われていないが、田下凝灰岩と同様に、 $\sigma_f$ を歪速度  $10^5$  /s での一軸圧縮強さと仮定すると、式(6)と式(8)を用いることで、多段階クリープ試験結果から、その試験片の一軸圧縮強さを推定することができる。そこで表-3には、多段階クリープ試験結果から推定した珪質泥岩と田下凝灰岩の一軸圧縮強さ $\sigma_f$ を示した。田下凝灰岩については、推定した一軸圧縮強さと、表-1に示した一軸圧縮強さ試験結果とはよく一致している。珪質泥岩では歪速度の違いや試験片ごとのばらつきがあるが、推定した一軸圧縮強さと一軸圧縮強さ試験結果との差はそれほど大きくない。この結果は、評価が難しい多段階クリープ試験結果の妥当性を、一軸圧縮強さ試験結果を用いて検討できる可能性を示している。

さらに、式(7)を用いることで、1本の多段階クリープ試験結果から、任意のクリープ応力でのクリープ寿命を推定することができる。図-5には、珪質泥岩の5本(実線)と田下凝灰岩の11本(破線)の多段階クリープ試験結果から推定したクリープ応力とクリープ寿命の関係を示した。式(7)からわかるように、クリープ応力とクリープ寿命の関係は、両対数グラフ上で直線となる。ただし、試験片ごとに一軸圧縮強さがばらつくため、試験片と同数の直線が平行に並ぶことになる。例えば、推定した一軸圧縮強さが最も小さかった試験片でも、珪質泥岩では4.9 MPa、田下凝灰岩では9.3 MPaよりもクリープ応力が小さければ、クリープ寿命が10000年以上となることが図より予想される。ただし、珪質泥岩は一軸圧縮強さのばらつきが大きく、推定したクリープ寿命のばらつきもかなり大きい。田下凝灰岩では、ばらつきは比較的小さいものの、同じクリープ応力でのクリープ寿命は、最大で4桁程度変化している。これらの結果は、実際の地下構造物を対象とした岩盤の時間依存性挙動の評価において、岩石の粘弾性的性質のばらつきの影響を十分考慮する必要があることを示すものと考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、まず、2種類の堆積岩を用いて、クリープ応力を段階的に増加させる多段階クリープ試験を行った。得られた結果を用いて、低応力レベルから高応力レベルまでの時間依存性の程度を比較検討した。その結

果、破壊が進行する速度は応力の  $n$  乗に比例することがわかり、 $n$  は応力レベルによらずほぼ一定である可能性が認められた。すなわち、一軸圧縮強さの载荷速度依存性やクリープ寿命の応力依存性などから、低い応力レベルにおける長期間のクリープ挙動を予測できる可能性を示した。なお、本研究では巨視的な観点から検討したが、破壊の進行する速度が応力の  $n$  乗に比例するという考え方は、速度過程論<sup>20)</sup>や応力腐食によるき裂進展の考え方<sup>20)</sup>とも矛盾しない。

さらに、1本の試験片による多段階クリープ試験結果から、一軸圧縮強さと長期クリープ寿命を推定した。推定した一軸圧縮強さは、一軸圧縮強さ試験結果とほぼ一致することがわかった。推定したクリープ寿命によると、今回得られた試験結果からは、珪質泥岩では 4.9 MPa、田下凝灰岩では 9.3 MPa よりもクリープ応力が小さければ、クリープ寿命が 10000 年以上となることが予想された。ただし、推定したクリープ寿命は試験片ごとにばらつくため、長期クリープ寿命や長期安定性を評価するためには、ばらつきの影響の程度を評価する必要があることを指摘した。一軸圧縮強さ試験結果と多段階クリープ試験から推定した一軸圧縮強さのばらつきの比較や、推定したクリープ寿命のばらつきの評価が、今後の検討課題である。

**謝辞：**実験に際して、核燃料サイクル開発機構（当時）の高倉望氏（現 東急建設株式会社）にご助力いただいた。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) Sano, O., Ito, I. and Terada, M.: Influence of strain rate on dilatancy and strength of Oshima granite under uniaxial compression, *J. Geophys. Res.*, 86, B10, pp.9299-9311, 1981.
- 2) Lankford, J.: The role of tensile microfracture in the strain rate dependence of compressive strength of fine-grained limestone – analogy with strong ceramics, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 18, pp.173-175, 1981.
- 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—岩石のPost-failure Regionでの挙動(第1報), 日本鉱業会誌, 103, pp.177-181, 1987.
- 4) Cruden, D. M.: The static fatigue of brittle rock under uniaxial compression, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 11, pp.67-73, 1974.
- 5) Schmidtke, R. H. and Lajtai, E. Z.: The long-term strength of Lac du Bonnet granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 22, pp.461-465, 1985.
- 6) 大久保誠介: 岩石のクリープ, 資源と素材, 107, pp.245-252, 1991.
- 7) Fukui, K., Okubo, S. and Ogawa, A.: Some aspects of loading rate dependency of Sanjome andesite strengths, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 41, pp.1215-1219, 2004.
- 8) Lajtai, E. Z., Schmidtke, R. H. and Bielus, L. P.: The effect of water on the time-dependent deformation and fracture of

- a granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 24, pp.247-255, 1987.
- 9) Hashiba, K., Okubo, S. and Fukui, K.: A new testing method for investigating the loading rate dependency of peak and residual rock strength, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 43, pp.894-904, 2006.
  - 10) 大久保誠介, 福井勝則, 許江: 岩石のヤング率の載荷速度依存性, 資源と素材, 117, pp.29-35, 2001.
  - 11) 大久保誠介, 高秀君, 福井勝則: 気乾と湿潤状態における多孔質岩石の変形特性と力学模型, 資源と素材, 121, pp.583-589, 2005.
  - 12) 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, 118, pp.36-42, 2002.
  - 13) 大久保誠介: 軟岩の長期挙動に関する研究, 核燃料サイクル開発機構技術資料, JNC TJ8400 2002-062, 2003.
  - 14) 大久保誠介: ニアフィールド岩盤の長期安定性評価手法の検討, 核燃料サイクル開発機構技術資料, JNC TJ8400 2003-081, 2004.
  - 15) 大久保誠介: ニアフィールド岩盤の長期安定性評価手法に関する研究, 核燃料サイクル開発機構技術資料, JNC TJ8400 2004-018, 2005.
  - 16) 秋哲淵: 岩石の湿潤状態における時間依存性, 東京大学博士論文, 1995.
  - 17) He, C., Okubo, S. and Fukui, K.: A study on the class II behaviour of rock, *Rock Mech. Rock. Engng.*, 23, pp.261-273, 1989.
  - 18) 山口勉, 大久保誠介, 西松裕一: 三城目安山岩の非線形レオロジーモデルー岩石の破壊および変形における時間依存性の研究 (第3報), 日本鉱業会誌, 100, pp.631-635, 1984.
  - 19) 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, 資源と素材, 108, pp.601-606, 1992.
  - 20) 大久保誠介, 秋哲淵: 気乾状態と湿潤状態での田下凝灰岩ならびに大谷凝灰岩の一軸圧縮クリープ, 材料, 43, pp.819-825, 1994.
  - 21) 横堀武夫: 材料強度学, 第9章, 岩波書店, 1974.
  - 22) Atkinson, B. K.: Subcritical crack growth in geological materials, *J. Geophys. Res.*, 89, B6, pp.4077-4114, 1984.

## MULTISTAGE CREEP TESTS WITH TWO TYPES OF SEDIMENTARY ROCK AND ESTIMATION OF LONG-TERM CREEP BEHAVIOR

Kimihiro HASHIBA, Hiroya MATSUI, Yasuhiro SENO and Toshinori SATO

It is important for long-term stability of underground cavern to estimate the time dependent behavior of surrounding rock mass. In this study, multistage creep tests were conducted with two types of sedimentary rock. Creep behavior under low stress level was compared to high stress level with the aid of experimental data. It was probable that creep behavior under both low and high stress level was well explained with the parameter  $n$  obtained from the loading-rate dependency of strength. Then, strength and creep life time under various creep stress level were estimated from the results of multistage creep tests. Estimated strength well coincided with the results of uniaxial compression tests.