論文 自然乾燥状態および湿潤状態における登別溶結凝灰岩の クリープ変形とクリープ寿命*

児 玉 淳 一¹ 後 藤 龍 彦² 藤 井 義 明³
吉 田 豊⁴ 板 倉 賢 一⁵

Creep Deformation and Creep Life of Noboribetsu Welded Tuff under Air-dried and Water-saturated Conditions

by Jun-ichi KODAMA^a, Tatsuhiko GOTO^a, Yoshiaki FUJII^b, Yutaka YOSHIDA^a

and Ken-ichi ITAKURA^a

a. Muroran Institute of Technology, Mizumoto-cho, Muroran, 050-8585, Japan

b. Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Kita-ku, Sapporo 060-8628, Japan

Not only axial strain but also lateral strain were measured during creep tests on Noboribetsu welded tuff under air-dried and water-saturated conditions in which the water contents of specimens were regulated about 0.3% and 17%, respectively. Creep rupture strength under water-saturated condition was smaller than that under air-dried condition. The difference in them was comparable to that in uniaxial compressive strength under both conditions. The axial and lateral strain rates decreased linearly with time in a log-log plot in the primary stage. They increased until a rupture occurs after the strain rates had reached the minimum magnitude. Creep failure time tended to increase as the "decrease rates of the strain rates" in the primary stage increased. Creep failure time and the life after the minimum strain rate increased as the minimum magnitude in the strain rates decreased. In the tertiary stage, the strain rates were inversely proportional to residual life. These relationships were represented by the same curves regardless of the water content. Therefore, the creep failure time would be successfully estimated from the behaviors of either axial or lateral strain rate regardless of the water content by using the experimental results. Thin sections of the specimens that had experienced various levels of the creep deformation were prepared and observed under a microscope. Nucleation of cracks and pores that distributed along the loading axis in the matrix were observed for specimens that had been just before the rupture.

KEY WORDS : Welded Tuff, Water-saturated Condition, Creep Life, Strain Rate, Creep Deformation, Creep Damage

1. は じ め に

一般に、含水比が高くなると岩石の強度は低下することが知られており（例えば、Vutukuri et al., 1989; 大久保ら, 1993 a), 砂岩や頁岩では乾燥状態の 50% 近くになる場合があることが報告されている (Colback et al., 1965; 佐々木ら, 1997)。また、粘土鉱物を含む泥質岩類は吸水による膨張が著しく (佐々木, 1980), この膨張が坑道の盤膨れにつながる危険性が指摘されている。したがって、岩盤斜面や地下空洞の安定性の評価には、岩石の力学的性質に与える水分の影響を把握することが重要となるが、長期的な強度・変形特性までを対象とした研究は少なく、不明な点が多い。

大久保ら (1993 b) は、三城目安山岩を用い、気乾状態と湿潤状態で多数のクリープ試験を行っている。そして、クリープ寿命は圧縮強度とクリープ応力との差で決定できることを見出すとともに、破壊に到るまでの軸ひずみの挙動を詳しく調べ、両状態における軸

ひずみの形状は極めてよく一致することを明らかにしている。これらの知見は注目に値するが、横方向の変形挙動については報告されていない。藤井ら (1997) は、上砂川砂岩を対象としたクリープ試験を行い、周ひずみの測定を行っている。そして、気乾状態と湿潤状態における周ひずみの挙動を比較し、両者の類似点と相違点を指摘している。しかしながら、湿潤状態における含水比の維持に問題があり、試験結果の信頼性に欠けると言わざるを得ない。

このように、湿潤状態におけるクリープ試験下の横ひずみの挙動については明確にされておらず、横ひずみとクリープ寿命の関係は不明である。クリープ寿命の予測には、軸ひずみに加え、岩石内の微小破壊に敏感な横ひずみの挙動も明らかにしておく必要があると考える。本研究では、溶結凝灰岩を対象に、自然乾燥状態と湿潤状態においた供試体を用い、一軸圧縮試験とクリープ試験を実施し、軸ひずみと横ひずみの測定を行う。そして、両状態における強度・変形特性を明らかにした上、軸ひずみと横ひずみの挙動からクリープ寿命を予測する方法に関する考察を行うとともに、クリープ試験で発達する損傷の観察を試みる。

2. 試 験 方 法

2・1 供試岩石

岩石は、北海道登別産の溶結凝灰岩であり（以下、単に溶結凝灰岩と呼ぶ）、20cm×20cm×30cmの直方体ブロックとして入手し

* 2001 年 4 月 2 日受付 8 月 7 日受理

1. 正会員 工博 室蘭工業大学助教授 工学部材料物性工学科
2. 正会員 工博 室蘭工業大学教授 工学部材料物性工学科
3. 正会員 工博 北海道大学大学院助教授 工学研究科社会基盤工学専攻
4. 正会員 工博 室蘭工業大学教授 工学部応用化学科
5. 正会員 工博 室蘭工業大学助教授 工学部情報工学科
〔著者連絡先〕 FAX 0143-46-5601 (室蘭工大・材料物性)
キーワード: 溶結凝灰岩, 湿潤状態, クリープ寿命, ひずみ速度, クリープ変形, クリープ損傷

図1 登別溶結凝灰岩から製作した薄片の顕微鏡写真

図2 供試体の含水比の経時変化

た。真比重と見掛け比重は、それぞれ、2.37、1.80 であり、両者より評価した空隙率は約 24% である。

本岩石から製作した薄片の鏡下観察の一例を図 1 に示す。なお、孔隙等の判別を容易にするため、岩石試料に青色顔料を混合した樹脂（ブルーレジン）を注入した後、薄片を製作した。本溶結凝灰岩は、斜長石（長径 0.13 ～ 1.35mm 程度）、輝石（長径 0.15 ～ 1.15mm 程度）等の鉱物のほか、軽石（長径 1.0 ～ 2.5mm 程度）を含み、ガラス質の基質部分には流理構造が認められる。孔隙は、軽石中の発泡孔隙と、岩片や鉱物片の周囲に分布する粒間孔隙が主である。クラックは、斜長石と輝石中の粒内クラックが主であり、基質部分には認められない。なお、基質部分には粘土鉱物であるスメクタイトが見られるが、量的には無視できるほど少ない。

2・2 供試体の作製方法と含水条件

岩石ブロックの流理面に対してほぼ垂直にボーリングを行った後、コアの両端面を整形し、直径約 26mm、長さ約 52mm の円柱形供試体を作製した。

整形後の供試体を約 10 日間ずつ、次の環境下に順に置き、含水比の測定を行ってみた。①実験室内、②蒸留水中、③実験室内。なお、実験室内の温度と相対湿度は、それぞれ $18 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 、 $60 \pm 15\%$ であった。含水比の測定結果を図 2 に示す。図中、経過時間 0h の値は、整形直後のものであるが、供試体の作製作業を湿式で行ったため、含水比は約 12% と比較的高くなっている。

整形後の供試体を実験室に置くと、約 60h まで、含水比は大きく減少するが、その後、240h (10 日) までの変化は極めて小さくなる。次に、供試体を蒸留水中に置くと、含水比は 100s 間で約 14% まで急増した後、対数関数的に増加し、時間の経過につれ、含水比の増加割合は次第に小さくなる。これらの結果を踏まえ、本研

表 1 供試体の含水比、含水飽和度と P 波速度

含水状態	含水比 (%)	含水飽和度 (%)	P 波速度 (km/s)
自然乾燥	0.3	1.3	1.8
湿潤	17.2	71.7	2.3

(a)

(b)

図3 湿潤状態における試験装置の概略。(a)、(b)は、それぞれ、全体の概略、径方向変位計設置部の断面の概略を示している。

究では、次のように自然乾燥状態と湿潤状態の 2 種類の供試体を用意した。前者は、整形後、実験室内に 5 日以上置いたものであり、後者は自然乾燥状態の供試体を、蒸留水中に 5 日以上置いたものである。3 つの供試体から得られた両者の含水比、含水飽和度ならびに P 波速度の平均値を表 1 に示す。自然乾燥状態、湿潤状態における含水比は、それぞれ 0.3%、17.2% である。

2・3 試験装置と試験条件

MTS 社製のサーボコントロール式材料試験機を用い、一軸圧縮試験とクリープ試験を、それぞれ、軸変位制御（軸ひずみ速度 $10^{-5}/\text{s}$ 程度）、荷重制御で実施した。クリープ試験において、載荷後、3 日間（約 $2.6 \times 10^5 \text{s}$ ）経過しても破壊しない場合は、試験を中止し、未破壊として扱った。なお、一定応力（クリープ応力）に達するまでに要する時間は 10 ～ 20s である。

図 3 のように供試体の両脇に 2 つの軸方向変位計（東京測器研究所製 CDP-5）を設置し、2 つの出力の平均値から軸ひずみを算出した。また、供試体の中央部に、リング型の径方向変位計（東京測器研究所製 RAW-26）を取り付け、横ひずみを測定した。このとき、すべての供試体において、横ひずみの測定方向が同じとなるように、すなわち、流理面内のある 1 つの方向のひずみを測定するように、径方向変位計を設置した。なお、径方向変位計中の供試体との接触部は、対角の位置に 2 箇所あり、ともに供試体とほぼ同じ曲率を持っている（図 3 (b) 参照）。無負荷状態における接触部間の距離は供試体の直径より 0.5mm 程度小さく、設置時にこの接触部間をやや押し広げて供試体に取り付けている。このため、径方向変位計は安定した状態で設置され、最終的な破断まで横ひずみの測定が行える。ただし、端面拘束の影響により、今回測定した供試体の中央部の横ひずみは、供試体の平均的な横ひずみより大きく、また、この中央部の横ひずみの値を用いて算出した体積ひずみ（図 5）と供試体の真の体積ひずみはやや異なっているこ

図4 載荷-除荷試験における応力-ひずみ線図

図5 一軸圧縮試験で得られた代表的な応力-ひずみ線図

とを断っておく。

蒸留水中に放置していた供試体を実験室内に置くと、含水比は急減し、50hの間で1%以下に低下する(図2参照)。このため、湿潤状態の試験では、含水比を維持するために、蒸留水で満たした厚さ0.1mm程度の薄いビニール袋の中に供試体を入れることにした。図2より、クリープ試験中(最長3日間)の含水比の増加は0.5%以内であると予想され、含水比はほぼ一定に保たれていると見なせる。

湿潤状態の試験ではビニール袋の上から径方向変位計を取り付けた(図3参照)。ビニール袋の上部は開放されており、供試体の体積膨張等による過剰な水圧は発生しないと考えられる。ビニール袋が、ひずみの測定に及ぼす影響を調べるため、自然乾燥状態の供試体を用いて繰り返し載荷-除荷試験を行ってみた。まず、ビニール袋を着けない状態で試験を始め、応力-ひずみ線図の形状の変化が十分に小さくなった15サイクル目にビニール袋を取り付けた。14サイクル目(ビニール袋無)と15サイクル目(ビニール袋有)の応力-ひずみ線図を図4に示す。図中、ひずみは圧縮を正としており、また、比較のため、両サイクルの載荷開始点におけるひずみの値を0として表している。図より、軸ひずみ、横ひずみともに、僅かに15サイクル目の方が大きい、14サイクル目との差は極めて小さく、また、線図の形状もほぼ一致していることがわかる。したがって、ビニール袋がひずみの測定に与える影響は小さいとはいえ、この影響は無視できるものとして扱った。

3. 試験結果および考察

3・1 一軸圧縮試験

自然乾燥状態および湿潤状態における一軸圧縮試験で得られた代表的な応力-ひずみ線図を図5に示す。図より、湿潤状態では自然乾燥状態に比べ、強度が小さいこと、軸ひずみの増加が大きいことがわかる。両者の横ひずみは、載荷の初期段階でほぼ一致しているが、応力の増加に伴い次第に差が現れ、湿潤状態の横ひずみの方が、より低い応力から非線形性が大きくなっていく。しかし、強度破壊点までの両者の形状は比較的類似している。圧縮強度の約70%付近において、両状態ともに体積ひずみは、収縮か

表2 自然乾燥状態と湿潤状態における一軸圧縮試験の結果

含水状態	供試体番号	圧縮強度 σ_{cr} (MPa)	限界ひずみ(%)			ヤング率E(GPa)	ポアソン比 ν
			軸方向 ϵ_{ax}	横方向 ϵ_{lc}	体積 ϵ_{vc}		
自然乾燥	NT-1	18.9	0.45	-0.25	-0.05	4.6	0.34
	NT-2	17.4	0.55	-0.28	-0.01	3.9	0.29
	NT-3	20.7	0.47	-0.25	-0.03	4.7	0.32
	平均値	19.0	0.49	-0.26	-0.03	4.4	0.32
湿潤	NT-4	16.5	0.70	-0.30	0.10	2.8	0.21
	NT-5	14.3	0.56	-0.20	0.15	2.9	0.18
	NT-6	15.5	0.56	-0.15	0.26	3.2	0.17
	平均値	15.4	0.61	-0.22	0.17	3.0	0.19

図6 クリープ応力とクリープ寿命の関係

ら膨張へと転じ、自然乾燥状態と同様、湿潤状態においてもダイラタンシーが明確に認められる。

両状態における圧縮強度、限界ひずみ、ヤング率、ポアソン比を表2に示す。ここで、限界ひずみとは、強度破壊点におけるひずみを指し、ヤング率とポアソン比は、応力-ひずみ線図が比較的直線となる領域(圧縮強度の20~40%程度)から算出した。自然乾燥状態と湿潤状態における圧縮強度の平均値は、それぞれ、19.0MPa、15.4MPaであり、後者は前者に比べ3.6MPa(約20%)小さい。また、ヤング率は湿潤状態の方が小さく、軸方向の限界ひずみは湿潤状態の方が大きい。しかし、ポアソン比は湿潤状態の方が小さく、平均値を見る限り、横方向の限界ひずみには両者の間で明確な差が認められない。

3・2 一定応力とクリープ寿命の関係

クリープ試験における一定応力(クリープ応力) σ_{cr} と寿命 t_f の関係を図6に示す。図中、○と●は、それぞれ、自然乾燥状態と湿潤状態の結果であり(本稿では特に断らない限り、自然乾燥状態と湿潤状態の結果を、それぞれ、このように表す)、図中の矢印は未破壊のまま試験を中止したことを意味している。クリープ応力までの載荷は、体積ひずみの挙動を見ながら行い、多くの試験では、クリープ応力を体積ひずみが膨張へと向かい始める応力以上のレベルに設定した。このため、中には圧縮強度の平均値 σ_{cm} (表2参照)以上の応力を負荷した試験もある。

図より、ばらつきが大きいものの、全体的には両状態ともにクリープ応力 σ_{cr} が小さくなるほど寿命 t_f が長くなる傾向が認められ、両者の関係をそれぞれ最小2乗法で近似してみると次式となる。

$$\text{自然乾燥: } \sigma_{cr} = 21.0 - 1.14 \log t_f \quad (1)$$

$$\text{湿潤: } \sigma_{cr} = 17.6 - 1.09 \log t_f \quad (2)$$

式(1)と式(2)の直線の傾きは、ほぼ同じ大きさとなっており、これらの近似直線を見る限り、次のことがいえる。今、あるクリープ寿命に対するクリープ応力の大きさを、その寿命に対するクリープ破断強度と呼ぶことにすると(日本機械学会, 1984)、両者のクリープ破断強度の差はクリープ寿命によらず一定であり、湿潤状態では自然乾燥状態に比べ、3.4MPaほど小さい。また、このクリープ破断強度の差は、両状態における圧縮強度の平均値 σ_{cm} の差3.6MPa(表2参照)と近い値になっている。これらのことは、三城目安山岩に対する大久保ら(1993b)の結果と同様であり、湿

(a)

(b)

図7 クリープ試験で得られたひずみ速度-時間線図の例。(a),(b)は、それぞれ、自然乾燥状態、湿潤状態における線図であり、クリープ応力は、順に、16.1MPa、10.8MPaである。

(a)

(b)

図8 ひずみ速度の最小値とクリープ寿命の関係。(a),(b)は、それぞれ、軸ひずみ速度の最小値、横ひずみ速度の最小値との関係を示したものである。

(a)

(b)

図9 ひずみ速度減少領域におけるひずみ速度-時間線図の傾きとクリープ寿命の関係。(a),(b)の傾きは、それぞれ、軸ひずみ速度、横ひずみ速度について評価したものである。

潤状態における本溶結凝灰岩の平均的なクリープ破断強度やクリープ寿命は、両状態における一軸圧縮強度の差、および自然乾燥状態における σ_{cr} と t_f の関係の2つから推定できる可能性がある。

しかしながら、クリープ寿命 t_f の実測値には大きなばらつきが見られる(図6参照)。例えば、湿潤状態において13.1MPaの応力を負荷した2つの試験の t_f はそれぞれ、590s、142070sであり、2オーダー以上も異なる。したがって、クリープ応力の大きさのみから、クリープ寿命を予測するのは危険であり、変形挙動からの検討が必要と考える。

3.3 クリープ変形とクリープ寿命

3.3.1 1次クリープと2次クリープ クリープ試験で得られたひずみ速度-時間線図の一例を図7に示す。同図(a),(b)は、それぞれ、自然乾燥状態($\sigma_{cr}=16.1\text{MPa}$)、湿潤状態($\sigma_{cr}=10.8\text{MPa}$)での結果であり、図中の○と●は、それぞれ、軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_a$ 、横ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_L$ である。なお、各時間のひずみ速度は、雑音の影響を抑えるため、その時間と前後5点のひずみの値を用い、平滑化処理を行って算出したものである。

図より、湿潤状態においても、自然乾燥状態と同様、 $\dot{\epsilon}_a$ 、 $\dot{\epsilon}_L$ は、時間 t の経過につれ、両対数グラフ上で直線的に減少し、最小値に到った後、増加に転じることがわかる。ひずみ速度が直線的に減少する領域は1次クリープと呼ばれており、この領域では、自然乾燥状態と同様、湿潤状態においてもひずみ速度は、それぞれ、次のべき乗則に従っている。

$$\dot{\epsilon}_a = at^{-m_a} \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon}_L = bt^{-m_L} \quad (4)$$

$\dot{\epsilon}_a$ と $\dot{\epsilon}_L$ の大きさを比較すると、自然乾燥状態では、 $\dot{\epsilon}_L$ の方が大きく、また、その最小値も大きい。一方、湿潤状態では、載荷の初期段階において両者はほぼ等しいが、最小値に近づくにつれ、次第に $\dot{\epsilon}_L$ の方が大きくなっており、自然乾燥状態とは挙動がやや

異なる。図示していないが、これらの特徴は、若干の例外を除き、他のひずみ速度-時間線図においても見られている。

ひずみ速度-時間線図におけるひずみ速度の最小値と直線領域の傾き(式(3)と式(4)中の m_a 、 m_L)に着目し、これらとクリープ寿命 t_f の関係を示したものが図8と図9である。

図8(a),(b)は、それぞれ、軸ひずみ速度の最小値 $\dot{\epsilon}_{amin}$ 、横ひずみ速度の最小値 $\dot{\epsilon}_{Lmin}$ と t_f の関係であり、図中の数字はクリープ応力(単位はMPa)を表している。図より、 $\dot{\epsilon}_{amin}$ 、 $\dot{\epsilon}_{Lmin}$ が小さいほど、クリープ寿命は長く、両対数グラフ上では両者の間にそれぞれ負の直線関係が認められることがわかる。また、含水状態が異なっても、ほぼ同一の直線上に位置しているのが注目される。両状態の結果をまとめて、 $\dot{\epsilon}_{amin}$ 、 $\dot{\epsilon}_{Lmin}$ と t_f の関係を近似すると、それぞれ次式となる。

$$\log \dot{\epsilon}_{amin} = -1.34 - 0.98 \log t_f \quad (5)$$

$$\log \dot{\epsilon}_{Lmin} = -1.51 - 0.93 \log t_f \quad (6)$$

式(5)と式(6)より、近似直線の傾きはともに-1に近い値となることがわかり、 $\dot{\epsilon}_{amin}$ 、 $\dot{\epsilon}_{Lmin}$ と t_f の関係は来待砂岩に対して得られている $\dot{\epsilon}_{amin}$ とそれに到るまでの経過時間 t の関係(山下ら、1997)と類似している。

図8に示した結果の中には、クリープ応力が等しいが寿命が著しく異なるもの(例えば、湿潤状態における $\sigma_{cr}=13.1\text{MPa}$)や、圧縮強度の平均値以上の応力を負荷したもの(例えば、湿潤状態における $\sigma_{cr}=17.7\text{MPa}$)も含まれている。これらは、供試体の組織構造の微妙な違いによるものと思われるが、注目すべきは、このような場合にも、ひずみ速度の最小値とクリープ寿命の間には式(5)、式(6)の関係が成り立っていることである。

図9(a),(b)は、それぞれ、軸ひずみ速度-時間線図の傾き m_a 、横ひずみ速度-時間線図の傾き m_L とクリープ寿命 t_f の関係である。なお、 m_a 、 m_L の値はともに、ひずみ速度-時間線図中の直線

図 10 横ひずみ速度の最小値と余寿命の関係。ここでいう余寿命とは、横ひずみ速度が最小となった時刻から破断までに要する時間のことである。

的な領域（経過時間 10s ～クリープ寿命の 1/5 程度の範囲であり、例えば、図 7 では 10s ～ 10⁴s 程度）において、最小 2 乗法を用いて算出したものである。今回のようなクリープ試験では、クリープ応力に達するまでの载荷の影響がクリープ変形の初期段階に現われてしまう可能性がある。したがって、図 9 に示した m_a , m_L の値は、この影響を受けている可能性もあり、あくまで、今回の载荷条件や算出条件で得られたものであることを断っておく。

ばらつきが大きいものの、全体的には m_a , m_L が大きいほど t_f は長くなる傾向が見られ、また、含水状態の違いによる差異が明確には見られない。両状態をまとめて近似すると、それぞれ次式となる。

$$m_a = -0.09 + 0.16 \log t_f \quad (7)$$

$$m_L = -0.07 + 0.14 \log t_f \quad (8)$$

以上より、クリープ変形とクリープ寿命は密接に関係し、含水状態が異なっても、ひずみ速度の最小値およびひずみ速度の変化とクリープ寿命の関係は、それぞれ、ほぼ同じになることがわかった。したがって、これらの関係を用いると、供試体の含水状態によらず、クリープ寿命の予測が可能になる。以下では、ひずみ速度の挙動からクリープ寿命を予測する方法と、その利点や欠点、ならびに適用限界等について考えてみる。

式 (7)、式 (8) のようにひずみ速度—時間線図の傾きの値を用いる方法には、クリープ試験を開始してから比較的早い段階で寿命予測ができるという利点がある。例えば、図 7 のように 10⁴s のオーダーで破壊に到る場合、傾きの値は、10²s 以内のひずみ速度の変化からも評価でき、クリープ寿命の 1/100 以内の時間経過後に、寿命のおおまかな推定が可能となる。ただし、先に述べたように、傾きの値にはクリープ応力までの载荷の影響が現われている可能性もあり、式 (7)、(8) による寿命予測の適用は、今回の試験方法に限られるであろう。また、推定値と実測値の間には 1 オーダ以上の差が見られる場合もあり（図 9 参照）、推定値はあくまでも目安として留めるべきである。さらに、この方法では、クリープ変形の開始時刻を正確に知る必要がある。西松ら (1992) が指摘しているように、岩盤内空洞や鉱柱の変形には、掘削や採掘等の影響も現われ、クリープ変形が始まった時間を特定するのは困難な場合が多い。このため、岩盤の寿命予測への応用は難しく、その適用は、室内試験などに限定されるであろう。例えば、クリープ寿命が長く、それを実測するのが困難なときなどはこの方法が使える可能性がある。ただし、これには、次のような問題がある。Cruden (1974) は、ここでいう m_a や m_L が 1 以上になると、クリープ変形はある一定値に収束するため、最終的な破壊が起こり得ないことを指摘し、long term strength の存在を支持している。しかしながら、筆者の知る限りでは、岩石において long term strength の存在は検証されておらず、 m_a や m_L が 1 以上になり得るかにつ

図 11 クリープ試験で得られたひずみ—残存寿命線図の例。(a)、(b) は、それぞれ、軸ひずみ、横ひずみの線図である。ここでいう残存寿命とはクリープ寿命と経過時間の差のことである。

いては不明である。したがって、式 (7) や式 (8) の外挿は、少なくとも、 m_a や m_L が 1 までの範囲に限定されると考えるべきであろう。式 (8) より、 $m_L = 1$ となる t_f は 4.4×10^6 s (約 50 日) と見積もられ、この程度の範囲までの寿命予測には使える可能性がある。

式 (5)、式 (6) を用い、ひずみ速度の最小値からクリープ寿命を予測する方法では、必ずひずみ速度の最小値を得る必要があるため、傾きの値を用いる方法に比べ時間を要する。しかし、予測の精度は良く、推定誤差は 1 オーダ以下である。特に、 t_f が 10⁴s 以上での横ひずみ速度による予測値は実測値と極めてよく一致しており（図 8 参照）、長期的な寿命の予測には軸ひずみより横ひずみに注目した方が有利と考えられる。ただし、この方法でもクリープ変形が始まった時刻を知る必要がある。そこで、ひずみ速度の大きさが最小となった時刻から破壊に到るまでの時間を余寿命 t_r と定義し、この t_r と横ひずみ速度の最小値 $\dot{\epsilon}_{Lmin}$ の関係について調べてみた（図 10 参照）。この場合も、クリープ寿命 t_f と同様に、含水状態の違いによらず次式で表される同一の直線で近似できる。

$$\log \dot{\epsilon}_{Lmin} = -1.43 - 1.02 \log t_r \quad (9)$$

ひずみ速度の最小値が得られると、式 (9) より、そのときから最終破壊に到るまでの時間が予測でき、クリープ変形が始まった時間を知る必要はない。ただし、ひずみの計測開始時点に、すでにひずみ速度が増加しており、いわゆる 3 次クリープが始まっているときには、本方法は適用できず、3 次クリープ領域での変形挙動と寿命の関係について検討する必要がある。

3・3・2 3 次クリープ 3 次クリープ領域における変形挙動を詳しく見るために、残存寿命とクリープひずみの関係について調べてみた。ここで、残存寿命 T とは、クリープ寿命 t_f と経過時間 t の差 ($T = t_f - t$) のことである（大久保ら、1986）。

自然乾燥状態と湿潤状態における代表的な例を図 11 に示す。図 (a)、(b) は、それぞれ、軸ひずみと横ひずみの結果である。いずれの線図も右端がクリープ試験の開始点であり、図中、左に向かって破壊に近づくことを意味している。図より、自然乾燥状態と湿

表 3 式 (10) と式 (11) 中の B_a , B_L の値

含水状態	B_a ($\times 10^4$)	B_L ($\times 10^4$)
自然乾燥	2.9 ± 0.3	12.0 ± 4.2
湿潤	3.9 ± 1.6	14.5 ± 3.1

潤状態のいずれにおいても、軸ひずみ線図と横ひずみ線図はともに、初期段階で上に凸となるが、次第に傾きが小さくなっていき、3 次クリープ領域ではほぼ直線となることがわかる。したがって、3 次クリープ領域における軸ひずみ ε_a と横ひずみ ε_L は、自然乾燥状態に加え、湿潤状態においても、それぞれ、次式で近似できる。

$$\varepsilon_a = C_a - B_a \log T \quad (10)$$

$$\varepsilon_L = C_L + B_L \log T \quad (11)$$

B_a , C_a , B_L , C_L : 定数

直線領域から求めた式 (10) と式 (11) 中の定数 B_a , B_L の値を表 3 に示す。平均値と比較すると、 B_a , B_L ともに、湿潤状態の方がやや大きい。しかし、ばらつきの範囲を考慮すると、両状態の間で明確な差異があるとは言え難く、今回の結果を見る限り、 B_a , B_L の値は、含水状態に鈍感な量であると考えられる。

大久保ら (1986)、福井ら (1989) は、3 次クリープに到った岩石の軸ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_a$ と残存寿命 T の関係が次式で表せることを明らかにし、軸ひずみの挙動から残存寿命を推定する方法を提案している。

$$T = D_a / \dot{\varepsilon}_a \quad (12)$$

式 (12) は、式 (10) を時間 t で微分し、 $D_a = B_a \log(e)$ とおくことによっても得られるため (福井ら, 1989)、本溶結凝灰岩に対しても、式 (12) が成立する。

同様に、式 (11) を時間 t で微分し、 $D_L = -B_L / \ln 10$ とおくと、残存寿命 T と横ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_L$ の関係は次のようになる。

$$T = D_L / \dot{\varepsilon}_L \quad (13)$$

式 (13) より、残存寿命と横ひずみ速度の関係は、軸ひずみ速度の場合と類似することがわかり、3 次クリープが始まった後の残存寿命は、軸ひずみに加え、横ひずみの挙動からも予測できる。

式 (12)、式 (13) より、3 次クリープ領域における横ひずみ速度と軸ひずみ速度の比は次のように評価できる。

$$\dot{\varepsilon}_L / \dot{\varepsilon}_a = B_L / B_a \quad (14)$$

B_L / B_a の大きさは 2 ~ 4 程度であり (表 3 参照)、式 (14) より、3 次クリープ領域における横ひずみ速度は、軸ひずみ速度の 2 ~ 4 倍程度であることがわかる。したがって、測定装置の精度にもよるが、軸ひずみより横ひずみの方が速度の変化がわかりやすく、残存寿命の推定には横ひずみを測定の方が有利と思われる。

3・4 クリープ損傷の観察

クリープ試験で生じる損傷の定性的な特徴を捉えるため、自然乾燥状態と湿潤状態においた供試体を用いてクリープ試験を行い、それぞれ、破断の直前と 2 次クリープ段階の 2 つの段階で除

図 12 薄片観察のため実施したクリープ試験における横ひずみ-時間線図。図中の○印は除荷した点を示している。

荷した (図 12 参照)。除荷後の供試体を 1 週間以上自然乾燥させてから、ブルーレジンを注入し、固結させた。その後、供試体の中央部の载荷軸を含む平面から薄片 (8mm × 8mm) を製作し、光学顕微鏡で観察した。以下、自然乾燥状態において 2 次クリープ段階と破断直前で除荷した供試体から製作した薄片を、それぞれ D-1、D-2 と呼ぶことにし、湿潤状態において同様な 2 つの段階で除荷した供試体から製作した薄片を、それぞれ、W-1、W-2 と呼ぶことにする。

破断直前の供試体から製作した D-2 と W-2 には、ともに、次のような特徴が認められた。基質中において微小な孔隙が载荷軸方向に配列している (図 13 参照)。数個程度ではあるが、これらの中には、比較的連続性が高く、クラックと見なせるものも存在する (図 14 参照)。2・1 で述べたように、未载荷状態の供試体から製作した薄片中で観察された孔隙は、もっぱら、軽石中の発泡孔隙と岩片や鉱物片の周囲に分布する粒間孔隙であり、载荷軸方向に配列する孔隙は認められなかった。したがって、上記の D-2 と W-2 で見られた孔隙は、クリープ試験で形成されたものと判断できる。

一方、2 次クリープ段階で除荷した供試体から製作した D-1 と W-1 には、上記の D-2 や W-2 で見られた孔隙の配列やクラックは確認できず、今回の観察に限れば、未载荷状態の岩石から製作した薄片 (図 1 参照) と明確な違いは認められなかった。

なお、D-2 と W-2 では、クラック長にやや差異が見られ、前者は 0.2 ~ 1.5mm であるのに対し、後者は 0.5 ~ 3mm であった。図 12 に示した横ひずみの挙動を見る限り、後者の供試体の方がより破断に近い状態にあると予想され、このクラック長の差は、損

図 13 载荷軸方向に並ぶ基質中の微小孔隙 (自然乾燥状態・破断直前)

図 14 载荷軸方向に並ぶ基質中の微小孔隙とクラック (湿潤状態・破断直前)

傷の発達段階の違いによるものと考えられる。今回の観察では、上記のクラック長以外は、自然乾燥状態と湿潤状態の間で明確な相違は認められなかった。

以上より、自然乾燥状態、含水状態ともに、2 次クリープ以降から破断直前までの間に、主に基質部分において孔隙やクラックが発生し、これらの孔隙やクラックは破断直前にほぼ載荷軸方向を向いていることが明らかとなった。基質部分において、まず、粒子間の結合のゆるみにより微小孔隙が発生し、その後、ゆるみが十分に発達した部分で微小孔隙が互いに連結し、クラックが形成されたものと解釈できる。

今回の観察では、2 次クリープ領域までの組織構造の変化を明らかにすることはできなかった。砂岩では、2 次クリープ前半までに微小な孔隙が減少することが報告されているが（山下，1997），今後は、孔隙等に注目した定量的な評価や、よりミクロな視点から検討を加える予定である。

4. ま と め

溶結凝灰岩を対象に、自然乾燥状態（含水比約 0.3%）と湿潤状態（含水比約 17%）にある供試体を用いて一軸圧縮試験ならびにクリープ試験を実施し、軸ひずみと横ひずみの測定を行った。そして、含水比の違いが強度・変形特性に与える影響について検討した上、ひずみの挙動に着目したクリープ寿命の推定方法に関する考察を行うとともに、クリープ試験で発達する損傷の定性的な特徴について調べた。主な知見は以下のようである。

（1）湿潤状態では、自然乾燥状態に比べ、クリープ寿命は短くなり、クリープ破断強度は低下するが、後者の低下の大きさは、両状態における一軸圧縮強度の差とほぼ同じとなる。したがって、湿潤状態における平均的なクリープ破断強度やクリープ寿命は、両状態における一軸圧縮強度の差および自然乾燥状態におけるクリープ応力とクリープ寿命の関係の 2 つから推定できる。

（2）湿潤状態におけるクリープ変形は、自然乾燥状態と類似し、軸方向、横方向ともに、ひずみ速度が減少した後、増加に転じ、ひずみ速度が最小となる点が現われる。また、減少領域におけるひずみ速度と経過時間の関係は両対数グラフ上で直線的とな

る。この直線の傾きが大きく、ひずみ速度の最小値が小さいものほど、クリープ寿命は長くなる傾向が見られるが、これらの関係は、含水状態が異なっても同一の式で近似できる。近似式よりクリープ寿命の予測が可能となるが、予測の精度に関しては、横ひずみ速度の最小値を用いる方法が最も良い。

（3）ひずみ速度が最小値となった時刻から破断に至るまでの時間（余寿命）も、クリープ寿命と同様に、ひずみ速度の最小値が小さいものほど短くなり、自然乾燥状態と湿潤状態における両者の関係は、両対数グラフ上で同一の直線で近似できる。したがって、ひずみ速度の最小値とひずみ速度が最小となった時刻の 2 つが得られれば、クリープ変形の開始時刻が未知の場合でも、破断時刻の予測が可能となる。

（4）自然乾燥状態、湿潤状態ともに、3 次クリープ段階における横ひずみと残存寿命の関係が、軸ひずみの場合と同様に、残存寿命を対数としたグラフ上で直線となる。このことは、残存寿命とひずみ速度の大きさが反比例することを意味し、軸ひずみ速度に加え、横ひずみ速度の大きさからも残存寿命の予測が可能となる。

（5）自然乾燥状態、湿潤状態ともに、クリープ破断の直前では、基質中に、載荷軸方向に並ぶ微細な孔隙や載荷軸方向を向くクラックの発生が見られ、3 次クリープ段階におけるクリープ損傷は、主に基質部において載荷軸方向に発達する。

引 用 文 献

- Colback, P.S. and Wiid, B.L.(1965): Proc.3rd Can.Rock Mech. Symp., Toronto, p.65-83
 Cruden, D.M.(1974): Int.J.Rock Mech. Min.Sci. & Geomech. Abstr., Vol.11, p.67-73
 藤井義明・木山 保・大森瑞穂・石島洋二(1997): 資源と素材, Vol.113, No.3, p.162-168
 福井勝則・大久保誠介・西松裕一(1989): 資源と素材, Vol.105, No.7, p.521-526
 日本機械学会(1984): 機械工学便覧 A4 材料力学, p.130-132
 西松裕一・大久保誠介(1992): 資源と素材, Vol.108, No.2, p.141-145
 大久保誠介・西松裕一(1986): 日本鉱業会誌, Vol.102, No.1181, p.395-400
 大久保誠介・金豊年・秋山政雄(1993 a): 資源と素材, Vol.109, No.11, p.865-869
 大久保誠介・秋哲淵(1993 b): 資源と素材, Vol.109, No.11, p.917-922
 佐々木寿朗(1980): 北海道大学博士学位論文
 佐々木崇将・児玉淳一・後藤龍彦(1997): 北海道応用地学合同研究会論文集, No.8, p.87-92
 Vutukuri, V.S., Lama, R.D. and Saluja, S.S. (増田秀夫, 田中荘一訳) (1989): 岩の力学的性質 I, 古今書院, p.43-49
 山下 秀・杉本文男・山内 優・森 聡・デンベレルナムスライ(1997): 資源と素材, Vol.113, No.11, p.817-824