

(96) 水環境下における三城目安山岩のクリープ特性

東京大学大学院 学生会員 福井 勝則

東京大学工学部 正会員 大久保誠介

東京大学工学部 正会員 西松 裕一

Creep Behavior of Sanjome-Andesite in Water Circumstance

Katsunori Fukui, The University of Tokyo

Seisuke Okubo, The University of Tokyo

Yuichi Nishimatsu, The University of Tokyo

Abstract

In our previous paper, it was reported that under air-dry condition strain rate at an arbitrary time in the tertiary creep is inversely proportional to the time remained to final failure. This result was obtained by uniaxial compression creep tests on five rock samples and a cement-mortar. If this law is applied to rock mass, the failure of underground constructions may be predicted. In most cases, however, rock mass contains water which may cause unknown effects to the behavior of rock in tertiary creep region.

In this study, therefore uniaxial compression creep tests under water-saturated condition are conducted on Sanjome-andesite. The results are as follows; The primary creep follows the logarithmic creep law. The creep strain rate continuously decreases at first, and takes its minimum then increases. The secondary creep where strain rate is nearly constant is not apparent. A strain rate at arbitrary time in the tertiary creep is inversely proportional to the time up to final failure. The creep strain when strain rate takes its minimum is nearly equal to half of the width of the complete-stress-strain curve cross-sectioned at the creep stress. The creep strain just before final failure (1s before) is nearly equal to the cross-sectional width of complete stress-strain curve. From qualitative view point, the results under water-saturated condition do not show meaningful difference with the results in dry condition.

1. はじめに

クリープ試験は、実験方法が比較的簡単なので、岩石の時間依存性挙動を調べるため古くから行なわれている。著者らも、乾燥した岩石を用いて、一軸圧縮荷重下でのクリープ特性、特に三次クリープ特性について研究を行ってきた^{1)~3)}。その結果、一次クリープ領域においては、ほぼ対数クリープ則が成り立つこと、三次クリープ領域においては、歪速度が破壊までの時間（残存寿命）にほぼ反比例することがわかった。この事が、実際の岩盤構造物について成り立つとすると、破壊の予測が可能となる。しかし、岩盤には水を含んでいるものが多く、また複雑な応力状態であり、著者らの得た知見をそのまま実際の岩盤に適用する

ことは今のところ難しい。

本研究においては、水で飽和させた岩石を用いたクリープ試験を行ない、水の及ぼす影響を調べることにした。

2. 実験方法および実験条件

クリープ実験装置に関しては、既報^{1), 2)}を参照されたい。

試料岩石は、三城目安山岩を用いた。試験片としては、直径25mm、高さ50mmの円柱形に整形したものを用いた。試験片の両端面は、平面研削盤により、平行度±0.02mm以内に仕上げた。水は、市販のイオン交換水を用いた。ただし、空気中では二酸化炭素が水に溶け込むので、順次酸性を増していく。実験条件をできるかぎり一定とするため、pHがほぼ一定となるまで、空気中に水を放置してから実験に使用した。その時のpHは5.7であった。水で飽和した結果、三城目安山岩1cm³当たり0.18gの水が含まれた。三城目安山岩の物性値を表1に示す。クリープ応力を、湿潤状態での圧縮強度(10⁻⁵s⁻¹の定歪速度試験により得られた値)の75、81、87%とし、各応力で5本以上試験を行なった。

表1 三城目安山岩の物性値

	湿潤状態	乾燥状態
圧縮強度 (MPa)	59.6	82.2
ヤング率 (GPa)	9.29	11.0
見掛け比重	—	2.16

3. 実験結果

3.1 一次クリープ領域における経時変化

図1は、載荷後1sでの値を原点としたクリープ歪 ϵ_2 の経時変化を、片対数グラフ上に示したものである。図では、最初クリープ歪が直線的に増加している。これより、一次クリープ領域では、クリープ歪が経過時間の対数に比例し、対数クリープ則の成り立っていることがわかる。乾燥した岩石についても同様に成り立つことがわかっている^{2), 3)}。クリープ歪が直線的に増加した後、急速に傾きを増して最終的な破壊に至っているのも図よりわかる。また、クリープ応力が大きいと、破壊時間が短くなること、一次クリープ領域におけるクリープ歪曲線の傾きがわずかに大きくなることわかる。

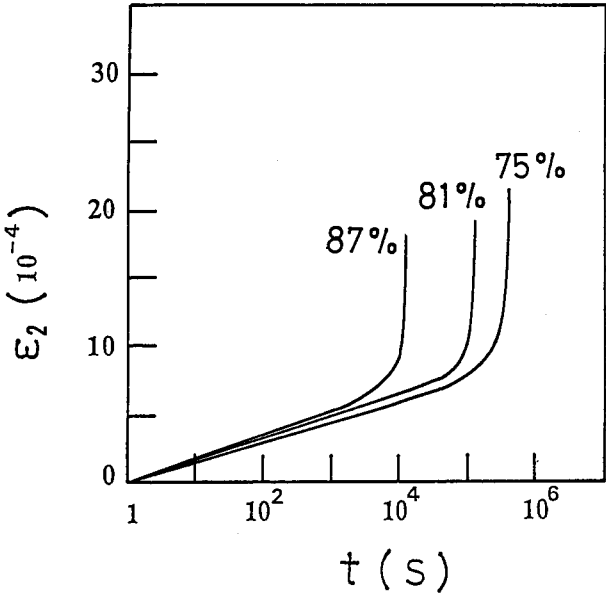


図1 クリープ歪の経時変化

図2に、クリープ歪速度の経時変化を両対

数グラフに示す。図では、はじめ-1の傾きでクリープ歪速度が減少するが、次第に水平に近付き、その後急速に増加している。クリープ歪速度は、絶えず変化しており、クリープ歪速度がほぼ一定となる二次クリープは明瞭には現われていない。

3.2 三次クリープ領域における経時変化

図1、2のように経過時間の対数を横軸に取ったのでは、三次クリープ領域の変化を議論していくのが難しいので、残存寿命 $T^2)$ を用いた。残存寿命は、破壊に要した時間 t_f から試験開始時よりの経過時間 t を引いたもので、破壊までの残存時間を表わす。

$$T = t_F - t \quad (1)$$

残存寿命の対数を横軸に取り、図1、2と同じ実験結果を表わしたのが図3、4である。

図3では、残存寿命が小さくなった時、すなわち破壊間近では、クリープ歪 ϵ_2 と

$\log(T)$ との間に直線関係が見られる。

$$\epsilon_2 = a \cdot \log(T) + b_1 \quad (2)$$

この結果は、乾燥した岩石についても成り立つことがわかっている^{2), 3)}。よって、水の存在の有無に拘わらず、(2)式は成り立つことになる。図3ではクリープ応力が変化しても、直線の傾き a はほとんど変化していない。 T の単位を秒とすると、 a は

$1.8 \cdot 10^{-4}$ である。一方、乾燥した場合の a は、 $2.4 \cdot 10^{-4}$ と多少大きな値となっている。すなわち、残存寿命が同じであれば、三次クリープ領域におけるクリープ歪速度は乾燥している方が大きい。また、水の有無によらず、クリープ応力が小さくなると、残存寿命が同じ時のクリープ歪が大きくなっている。

図4より、クリープ応力の大小に拘わらず、残存寿命の小さい領域すなわち破壊間近では、残存寿命とクリープ歪速度との間には、両対数グラフ上でほぼ直線関係が見られる。この事は、(2)式を時間で微分する事によっても得られる。

$$\log(\dot{\epsilon}_2) = -\log(T) + b_2 \quad (3)$$

ただし、

$$b_2 = \log\{a \cdot \log(e)\}$$

である。ここで e は自然対数の底である。この事は、乾燥した三城目安山岩についても成り立つことがわかっている^{2), 3)}。よって、含水の有無に拘わらず、一軸圧縮荷重下のクリープ試験において、三城目安山岩が破壊していく場合、残存寿命と歪との間には、(2)式あるいは(3)式で示される関係の成り立つことがわかった。

著者らは、三城目安山岩以外にも、河津凝灰岩、多胡砂岩、稲田花崗岩、セメントモルタル、秋吉大理石の乾燥した試料片を用いて、クリープ試験を行なってきた^{2), 3)}。その

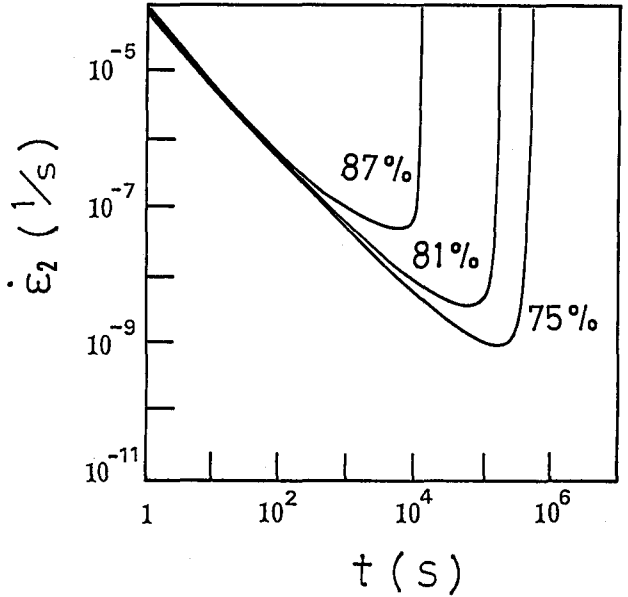


図2 クリープ歪速度の経時変化

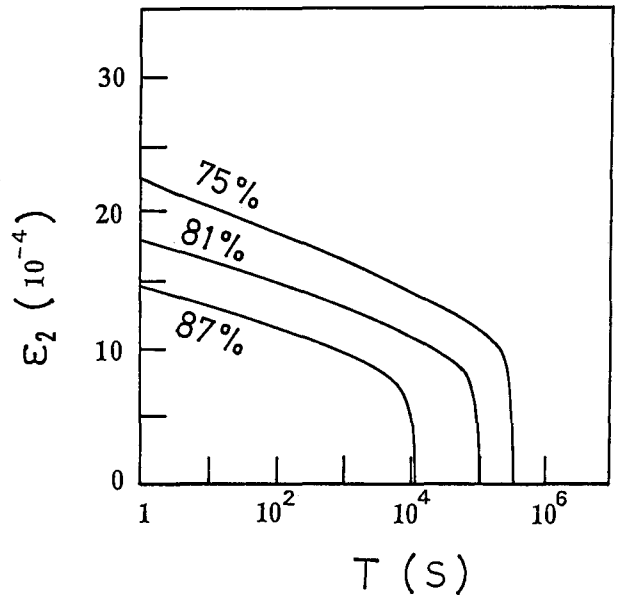


図3 クリープ歪と残存寿命の関係

結果、(2)式あるいは(3)式が成り立っている事がわかった。(3)式を残存寿命について解くと以下になる。

$$T = a \cdot \log(e) / \dot{\epsilon}_2 \dots (4)$$

実際の岩盤の計測においては、歪の絶対量を測定する事は困難であるが、歪速度なら比較的容易に測定することができるので、(4)式は有効な式であると思われる。

乾燥状態で求めた各試料のaの値を表2³⁾に示す。表より、aの値が岩石の種類により異なる事がわかる。また、今回の実験より、水の有無によってもaの値が変化する事がわかった。実際の岩盤は、多種多様の岩石が混在しており、含水状態も複雑であり、aの値を正確に推定する事は難しいと思われる。三次クリープ領域において、歪速度が同じ場合、残存寿命は、aの値に依存する。表2の中で、aの値が最大である三城目安山岩、最小である秋吉大理石、中間的な多胡砂岩において、クリープ歪速度が $10^{-8} (s^{-1})$ の場合、残存寿命は、それぞれ $1.0 \cdot 10^4 s$ 、 $1.7 \cdot 10^3 s$ 、 $4.3 \cdot 10^3 s$ となる。aを仮りに 10^{-4} とすると、三城目安山岩、秋吉大理石で残存寿命をそれぞれ0.43倍、2.5倍に推定する事になる。したがって、aの値が正確に推定できなくても、aの値が今回得られた範囲程度であれば、この程度の誤差で残存寿命が推定できる。

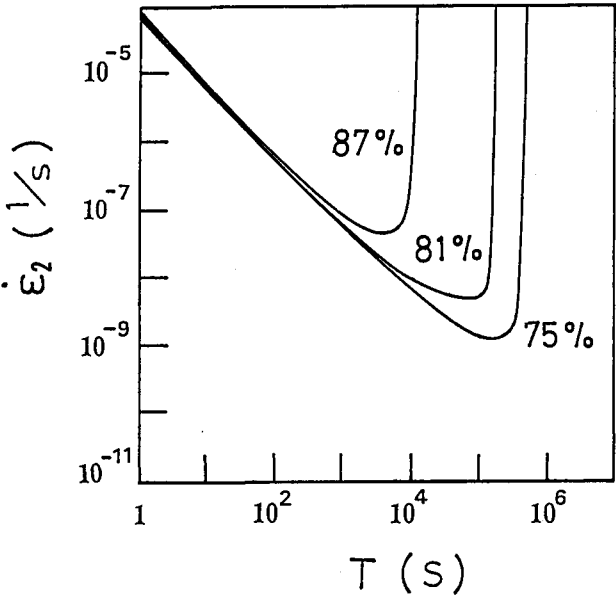


図4 クリープ歪速度と残存寿命の関係

表2 三次クリープ領域における経時変化を表わすパラメータa

	三城目安山岩	セメントモルタル	多胡砂岩	稲田花崗岩	河津凝灰岩	秋吉大理石
aの値(10 ⁻⁴)	2.4	0.6	1.0	1.4	1.3	0.4

3.3 クリープ歪とクリープ歪速度の関係

図5にクリープ歪とクリープ歪速度の関係を片対数グラフ上に示す。図では、はじめクリープ歪が増加するに従い、クリープ歪速度が減少してゆき、クリープ歪が 10^{-3} 程度のところで最小となり、その後徐々にクリープ歪速度は増加している。最小クリープ歪速度となった時のクリープ歪の位置を軸として、ほぼ対称となっているのもわかる。これらの事も乾燥した場合と同様である³⁾。ここで、一軸圧縮試験における完全応力-歪線図と、クリープ試験におけるクリープ歪の関係を検討するために、クリープ歪速度が最小となる時の応力と歪の位置を図6の応力-歪線図上に小三角形で示す。ただし、応力-歪線図は載荷速度 $10^{-5} (s^{-1})$ の応力帰還制御により得たものである。図より、強度破壊点以前・以降の応力-歪線図のほぼ中間で、クリープ歪速度が最小となっているのがわかる。ここで、強度破壊点からの除荷曲線を、破線で図6に示した。図では、この除荷曲線が最小クリープ歪速度となった位置をほぼ通っている。

破壊直前、すなわち破壊の1 s 前における応力と歪の位置を小四角形で図6に示した。図では、ほぼ強度破壊点以降の応力-歪線図上に存在している。

図には、乾燥した三城目安山岩についての結果³⁾も示している。この場合においても、水で飽和した場合と同様の傾向が見られた。

4. まとめ

本研究では、水環境下において、三城目安山岩を用いたクリープ試験を行なった。その結果は、乾燥した試料を用いた時と、定性的に同じであり、まとめると以下になった。

- 1) 一次クリープ領域においては、対数クリープ則が成り立つ。
- 2) 三次クリープ領域においては、歪速度と残存寿命との間に反比例の関係が成り立つ。
- 3) クリープ試験において最小歪速度となった時の応力と歪の位置は、強度破壊点からの除荷曲線上に存在した。また、クリープ試験における破壊1 s 前の応力と歪は、強度破壊点以降の応力-歪曲線上にほぼ位置した。

今後の課題として、他の岩石についても、今回の結果が成り立つかどうか調べる必要がある。また、(2)式あるいは(3)式の関係を実際の岩盤に適用していくため、今後三軸圧縮応力下でのクリープ試験を行なう必要がある。

参考文献

- 1) 大久保誠介、西松裕一：第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、p.66～70(1985)
- 2) 大久保誠介、西松裕一：日本鉱業会誌、102[1181]、p.395～400(1986)
- 3) 福井勝則、大久保誠介、西松裕一：一軸圧縮荷重下での岩石のクリープ特性、日本鉱業会誌投稿中
- 4) 大久保誠介、西松裕一：日本鉱業会誌、100[1161]、p.1052～1056(1984)

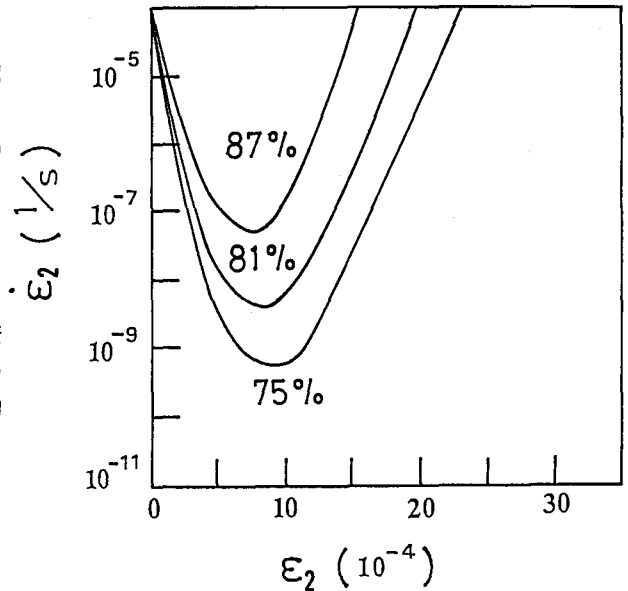


図5 クリープ歪速度とクリープ歪の関係

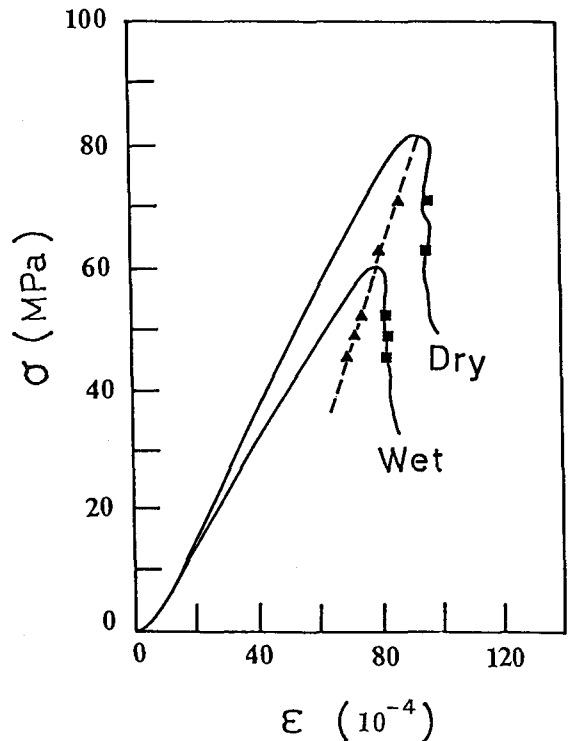


図6 応力-歪線図、小三角形は最小クリープ歪速度の位置、小四角形は破壊1 s 前の位置を表わす。破線は強度破壊点からの除荷曲線を表わす。