

(76) 強度破壊点以降での岩石のクリープ特性

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 Rock samples in the Post-Failure Region

Katsunori Fukui, The University of Tokyo

Seisuke Okubo, The University of Tokyo

Yuichi Nishimatsu, The University of Tokyo

Abstract

The creep performance of rock at low stress level has an important significance on the long term stability of rock structures. But it is practically impossible to examine the tertiary creep because failure time is very long at low stress level. It is necessary to develop a method to examine the performance of tertiary creep within a short time.

Uniaxial compression creep test in the post-failure region was conducted using Sanjome-andesite, Akiyoshi-marble and Tako-sandstone with servo-controlled testing machine. It was found that strain rate at an arbitrary time in the tertiary creep is inversely proportional to the time up to final failure, as given by

$$T = A / \dot{\epsilon}.$$

In case of Sanjome-andesite and Akiyoshi-marble, parameter A is not influenced by stress level. In case of Tako-sandstone, parameter A is smallest when stress level is 50%-80%, and biggest when stress level is below 50%.

In comparison with usual test at the same stress, the relationship between the strain rate and the time up to final failure is same. The creep test in the post-failure region is useful to examine the performance of tertiary creep.

1. はじめに

クリープ試験は、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、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なってきた[1-3]。三次クリープは破壊現象と密接な関連を持つと思われ、その解明は地下構造物の破壊の予測、防止に役立つものと考えられる。クリープ応力が小さい場合、一次、二次クリープについては容易に調べられるが、破壊するまでの時間がかかりすぎるので、実験的に三次クリープを測定するのは事実上不可能である。Peng[4]は、サーボ試験機を用いて、強度破壊点以降まで定速度制御によって負荷し、その後クリープ試験を行なっている。このような強度破壊点以降でのクリープ試験は短時間で破壊するので、比較的簡単な実験である。この強度破壊点以降でのクリープ特性と通常の三次クリープ特性との間に、何らかの互換性が存在するならば、強度破壊点

以降のクリープ試験は低応力下での三次クリープ特性を調べる方法として、有効な方法となると思われる。

本研究では、三種類の岩石を用いた強度破壊点以降でのクリープ試験を行ない、通常のクリープ試験の結果と比較・検討した結果について述べる。

2. 実験方法及び試料岩石

実験の概要を模式的に応力-歪線図上に示したのが図1である。まず、載荷速度 $10^{-5} \text{ (s}^{-1}\text{)}$ の応力帰還制御によって強度破壊点以降まで負荷する (OB間)。B点より載荷速度 $10^{-5} \text{ (s}^{-1}\text{)}$ の応力帰還制御によって設定応力まで除荷した後、C点よりクリープ試験を行なう。応力帰還制御は次式に従って負荷させる方法である [5]。

$$\varepsilon - \alpha \cdot \sigma / E = C \cdot t \quad (1)$$

ただし、 ε 、 σ 、 E 、 t はそれぞれ歪、応力、初期ヤング率、時間であり、 C 、 α は載荷速度、応力の負帰還量を決定する定数である。

除荷を行なった理由は、B点からいきなりクリープ試験を行なうと、短い時間で破壊してしまうので、三次クリープ特性が十分調べられないためである。

実験装置として、デジタル制御方式のサーボ試験機を用いた。実験装置の詳細については既報を参照されたい [3]。

試料岩石として、三城目安山岩、秋吉大理石、多胡砂岩を用いた。載荷速度 $10^{-5} \text{ (s}^{-1}\text{)}$ における圧縮強度は、三城目安山岩、秋吉大理石、多胡砂岩でそれぞれ 82.2 (MPa)、57.8 (MPa)、32.5 (MPa) であり、ヤング率は、11.0 (GPa)、27.2 (GPa)、8.13 (GPa) である。

除荷を開始する応力はクリープ応力に対し、三城目安山岩、秋吉大理石、多胡砂岩でそれぞれ約 1.15、1.1、1.1 倍とした。応力帰還制御時の α として三城目安山岩、秋吉大理石、多胡砂岩でそれぞれ 0.35、0.0、0.3 とした。

3. クリープ歪速度とクリープ歪の関係

図2は、クリープ歪速度 $\dot{\varepsilon}$ とクリープ歪 ε_2 の関係を片対数グラフ上で示したものである。ただし、クリープ歪の原点は、強度破壊点以前の同じ応力での歪の値としている (図1のAをクリープ歪の原点とする)。図中の数字は、圧縮強度に対するクリープ応力を表す。三城目安山岩、多胡砂岩の場合、一次、二次クリープは見られず、クリープ試験開始直後から三次クリープとなっている。一方、秋吉大理石の多くはクリープ試験開始直後、二次クリープを示し、その後クリープ歪速度が徐々に加速的になり、三次クリープとなっている。

三次クリープにおいては、クリープ歪と対数表示したクリープ歪速度の間にほぼ直線関係が見られる。三城目安山岩、秋吉大理石の場合、クリープ応力に関係なく、クリープ歪と対数表示したクリープ歪速度の間に存在する直線の傾きは一定である。一方、多胡砂岩の場合、クリープ応力が 50~80% の時、直線の傾きがもっとも大きく、クリープ応力が 90% の時、直線の傾きは多少小さくなり、50% 以下の場合、かなり直線の傾きは小さくなっている。

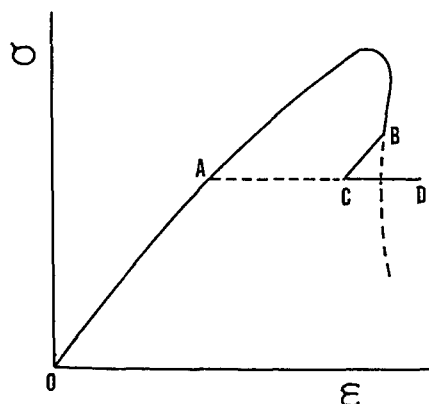


図1 強度破壊点以降でのクリープ試験の概略図

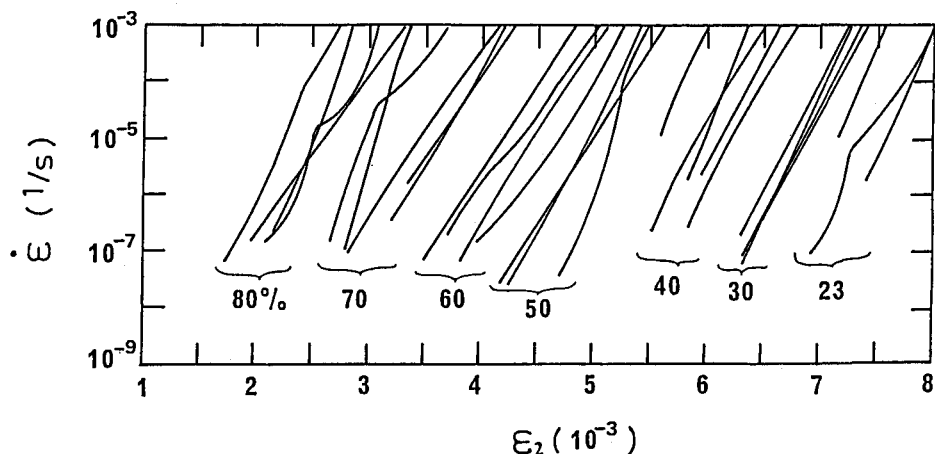


図2 クリープ歪速度とクリープ歪の関係 (三城目安山岩)

4. クリープ歪と残存寿命の関係

図3は、クリープ歪 ε_2 と残存寿命 T の関係を片対数グラフ上に示したものである。図では、対数表示した残存寿命とクリープ歪との間に直線関係が見られ、式の形で書くと次のようになる。

$$\varepsilon_2 = -a \cdot \log(T) + b \quad (2)$$

ただし、 a 、 b は定数である。三城目安山岩、秋吉大理石では、クリープ応力にほとんど関係なく傾き a がほぼ一定である。多胡砂岩の場合は、クリープ応力が50%～80%の時、(2)式の傾き a が最も小さく、90%の時多少大きくなり、50%以下の場合かなり傾きが大きくなっている。(2)式を微分すると、次式が得られる。

$$\log(\dot{\varepsilon}) = -\log(T) + \log(a \cdot \log(e)) \quad (3)$$

ただし、 e は自然対数の底である。残存寿命について、上式を解くと次のようになる。

$$T = a \cdot \log(e) / \dot{\varepsilon} \quad (4)$$

この式は、既報[1-3]で述べた通常のクリープ試験において得られた式と同じである。強度破壊点以降のクリープ試験においても、歪速度と a の値がわかっているならば、残存寿命を推定することができる。通常の岩盤において、応力状態を把握する事は難しい。しかし三城目安山岩、秋吉大理石の場合、今回の実験範囲内では a の値はクリープ応力により変化していないので、このことが実際の岩盤でも成立するとすれば応力状態に関係なく残

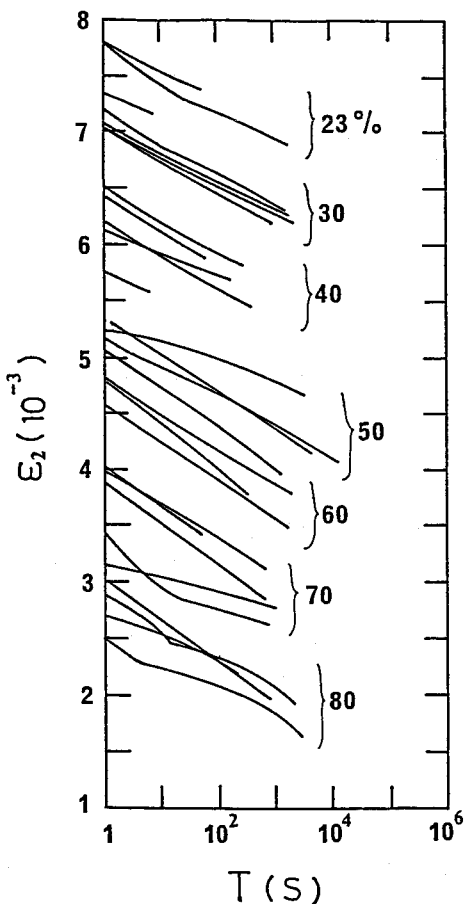


図3 クリープ歪と残存寿命の関係 (三城目安山岩)

存寿命を推定できる。一方、多胡砂岩ではクリープ応力により、 a の値が変化すがせいぜい2倍ほどである。よって、適当な a の値をいれることにより、残存寿命は誤差50%程度で推定できる可能性がある。

5. 除荷開始応力による影響

強度破壊点以降のクリープ試験においては、除荷をしてからクリープ試験を行なった。この場合、除荷を開始した応力がどのようにクリープ試験結果に影響を与えているか調べる必要がある。よって、三城目安山岩を用いて、クリープ応力を一定（圧縮強度の70%）として、除荷開始応力（75%、80%、85%）を変化させて実験を行なった。図4はクリープ歪と残存寿命の関係を片対数グラフ上に示したものである。図では、クリープ歪の増加の割合は除荷開始応力に関係なくほぼ一定である。異なっている点は、除荷開始応力が小さいほど、クリープ試験を開始してからのクリープ寿命が小さくなっていることである。それぞれの条件で4本ずつ実験を行なっているので、クリープ寿命の幾何平均を求めると次のようになる。

除荷開始応力が75%の時・・・ 9 (s)

除荷開始応力が80%の時・・・ 318 (s)

除荷開始応力が85%の時・・・ 606 (s)

図5にクリープ歪速度とクリープ歪の関係を示す。除荷開始応力により、クリープ寿命は異なっているが、いずれの場合もクリープ歪速度とクリープ歪との間に直線関係がほぼ成り立っており、その傾きも同じである。クリープ応力を圧縮強度の50%とした場合についても同様に除荷開始応力の影響を調べたが、今まで述べたことと同じであった。よって、除荷開始応力を変化させても、三次クリープでの特性は変化せず、クリープ寿命のみが変化するといえよう。

6. 通常のクリープ試験結果との比較

図6、7に、強度破壊点以降でのクリープ試験と同じクリープ応力で行なった通常のクリープ試験の結果を対比して示す。図6は、クリープ歪と対数表示した残存寿命の関係である。通常のクリープ試験、強度破壊点以降のクリープ試験とも、クリープ歪と対数表示した残存寿命との間に直線関係があり、その直線の傾きもほぼ同じである。図7は、クリープ歪と対数表示したクリープ歪速度の関係を示したものである。両者ともほぼ同等の結果となっている。このように、強度破壊点以降のクリープ試験と通常のクリープ試験の三次クリープでの挙動はほぼ同等である。

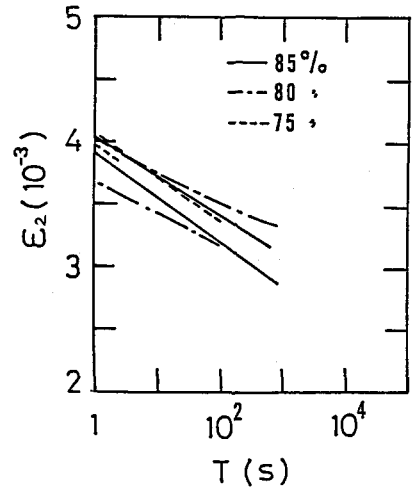


図4 クリープ歪と残存寿命の関係における除荷応力の影響
(三城目安山岩)

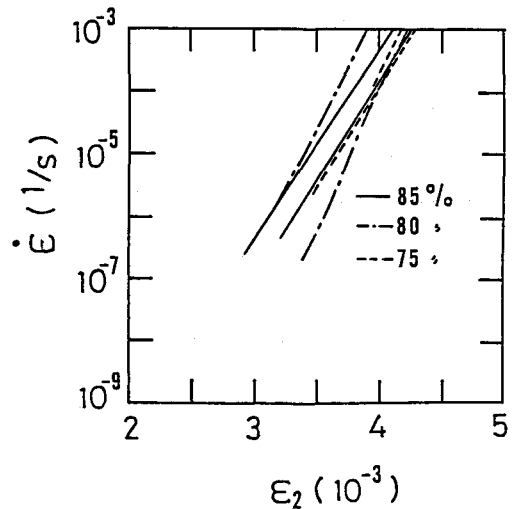


図5 クリープ歪速度とクリープ歪の関係における除荷応力の影響
(三城目安山岩)

図1に示したように、強度破壊点以降のクリープ試験と強度破壊点以前から行なった通常のクリープ試験とは、応力履歴が異なる。しかし、応力-歪線図上での位置が同じであれば、その時点でのクリープ歪速度、残存寿命は同じである。図6、7に示した通常のクリープ試験の破壊寿命は 10^7 s以下である。すなわち、今回行なった破壊寿命が 10^7 s以下の比較的高い応力状態での岩石のクリープ試験に関しては、あまり応力履歴に影響されず、その時点の応力、歪によりクリープ歪速度あるいは残存寿命が決定される事がわかった。

通常のクリープ試験の場合、破壊するまでにかなりの時間を要するので三次クリープを調べる事は非常に難しい。強度破壊点以降でのクリープ試験の場合、除荷開始応力を変化させる事により、破壊寿命を変化させることができ、比較的行ないやすい実験である。よって、岩石の三次クリープ特性を調べる方法として、強度破壊点以降のクリープ試験は非常に有効である。

7. まとめ

本研究では、三種類の岩石を用いて、強度破壊点以降のクリープ試験を行なった。その試験結果は通常のクリープ試験における三次クリープ特性とほぼ同じである事がわかった。よって、岩石の三次クリープ特性を調べる方法として、強度破壊点以降のクリープ試験は非常に有効である事がわかった。

今後の課題として、より低応力下で通常のクリープ試験を行ない、今回得られた結果が成り立つかどうかを調べる必要があると思われる。

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：資源・素材学会誌，105[No7]，p.521～526(1986)
- 4) Peng, S.S: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 10, p. 235～246(1973)
- 5) 大久保誠介、西松裕一：日本鉱業会誌，100[1161]，p.1052～1056(1984)

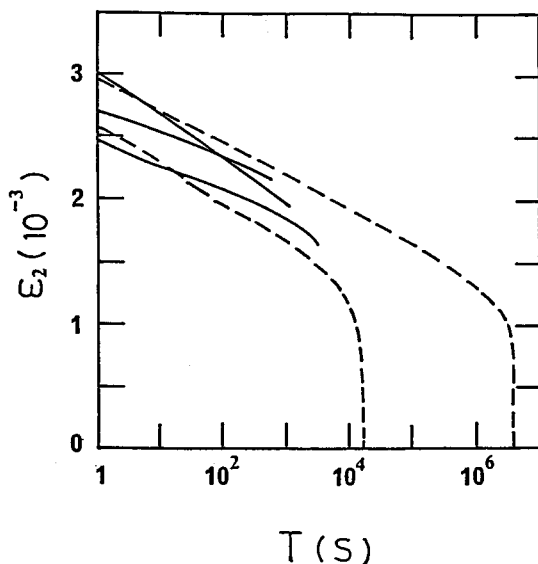


図6 クリープ歪と残存寿命の関係(三城目安山岩)
実線は強度破壊点以降でのクリープ試験結果を、
破線は通常のクリープ試験結果を表わす

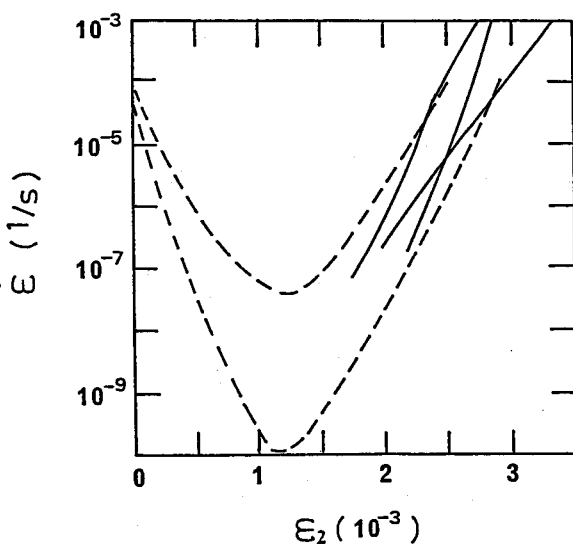


図7 クリープ歪速度とクリープ歪の関係
(三城目安山岩)

実線は強度破壊点以降でのクリープ試験結果を、
破線は通常のクリープ試験結果を表わす