

(15) 岩石のクリープ特性—特に3次クリープ特性について

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

1. はじめに

岩石を一種の粘弾性体とみなし、レオロジーの観点より種々の時間依存性挙動を解明しようとする研究手法が、ようやく定着してきたように思われる。実験的に岩石のレオロジー的性質を調べるため幾つかの方法が提案されているが、そのうちクリープ試験は最も広く行われている試験の一つであり、すでに多くの研究結果が公表されている。しかしながら、これらの多くはいわゆる1次および2次クリープについてのみ取り扱っており、3次クリープについての報告は極めて少ない[1,2]。破壊現象と密接な関連を持ち、学問的にはもちろん応用面でも重要な3次クリープ特性が定性的にすらよく知られていない一因は、おそらく測定の困難さにあろうと推察される。

本報告においては、まず1次クリープより3次クリープまでのクリープ変位を精度よく測定するために、最近開発したシステムについて報告する[3]。続いて、2種類の岩石を使用して行った実験結果について述べるとともに、3次クリープ領域において新に見いだされたクリープ歪速度の増加の規則性について検討する。さらに、クリープ実験で得られた結果を利用して構成方程式を導き、その妥当性を検討することにする。

2. 実験装置

実験装置の概略図を図1に示す。図中(a)は定格圧力20MPaの圧力源で、クリープ試験中0.02MPa以内の精度に圧力を保持する。(b)は停電対策用に設けたアキュムレータであり、停電中6時間での圧力降下は0.02MPa以内である。(d)の載荷装置には、摩擦の極めて少ない油圧ラムが組み込まれている。クリープ試験に際しては、まず(c)のバルブを締めたまま圧力源のポンプを駆動し、アキュムレータ内を設定圧力とする。その後、バルブを開けて載荷装置に油を送る。このようにすると、試験片には0.1sec以内に所定の応力が加わる。

試験片は、常温より300°Cの範囲で温度制御出来るベッセル内に納められており、変位はベッセル本体と蓋の間にはさまれた一対のダブルカンチレバー式変位計により測定される。変位計の出力は動歪計によって増幅された後、12bit A/D変換器をへてマイクロコンピュータ内に記憶される。なお分解能を上げるためあらかじめ、弾性歪の8割程度のオフセットをかけて測定をした。

サンプリング速度は、毎秒1回であるが測定期間が長期にわたるので、すべてのデータを記憶するのは現実的でない。幸いにして、クリープ試験の場合変位は単調に増加してゆくので、A/Dコンバータの出力が指定された値を取った最終時刻を順次記憶することにした。即ち、4096個の記憶場所を予めもうけておき、指定された測定値に対応する場所にその測定時刻を書き込むことを、順次繰り返して行った。また、停電後は自動スタートし計測を続けるようにした。

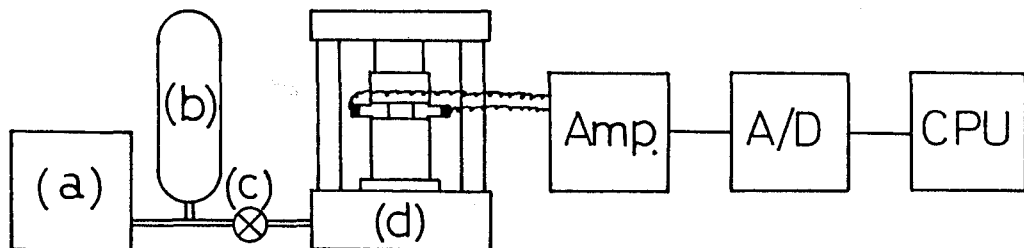


図1 クリープ実験装置の概略図。

3. 実験結果

実験には、三城目安山岩と河津凝灰岩を使用した。10 μ /secの歪速度で10回ずつ定歪速度試験を行った。それぞれの平均一軸圧縮強度は87.3MPaおよび37.2MPa、ヤング率は11.0GPaおよび7.8GPaであった。クリープ試験は、三城目安山岩では平均一軸圧縮強度の77%で6回、87%で11回行い、それぞれの応力での寿命の幾何平均値は243300secと2098secであった。また河津凝灰岩では85%と95%で各7回行い、寿命の幾何平均値はそれぞれ754660secと451secであった。なお試験片寸法は、一貫して直径2.5cm、高さ5.0cmとした。

図2に载荷後1秒での値を原点とした、クリープ歪の経時変化の例を片対数グラフ上に示した。図より分るようにクリープ歪は、はじめ直線的に上昇してゆき、やがて少しずつ傾きを増し、最終的な破壊に至っている。三城目安山岩と河津凝灰岩とを比較すると、河津凝灰岩の方が直線部分の傾きが小さいことが分る。図3には、歪速度の経時変化の例を示す。両対数グラフ上で歪速度曲線は、はじめ -40° から -45° の傾きを持つが、次第に水平に近付きその後急激に増加する。これらの傾向は従来の実験結果と一致している[4]。但し、既報における測定ではアナログ式記録計を使用したので、図中のB点付近迄しかデータが取りきれなかった。今回の測定ではB点以降も測定出来たが、横軸に経過時間の対数を取ったグラフでは、歪速度が急激に増加してゆくいわゆる3次クリープの部分のみてゆくには不便である。

そこで、図4では、破壊迄の時間 $T = (\text{寿命}) - t$ の対数を横軸に取ってクリープ歪速度の変化を示した。図より分るように、 T の小さい領域すなわち破壊間近では、よい直線関係が両対数グラフ上で認められ、その勾配は -45° 前後である。即ち、 C を比例常数として次の実験式が近似的に成り立つ。

$$d\varepsilon/dt = C / \{ (\text{寿命}) - t \} \quad (1)$$

このような関係が3次クリープ領域で成り立つとすれば、測定の途中で破壊時間の予測が可能と思われる。実際、図4に示した三城目安山岩のデータを使用して、破壊迄の時間を予測してみると図5に示すようになった。なお、観測は破壊の2000sec前に開始されたとし、それ以降任意の時間 T 迄の $d\varepsilon/dt$ のデータを使用して、次式で与えられる残差の平方和が最小となるように予想寿命を定めた。

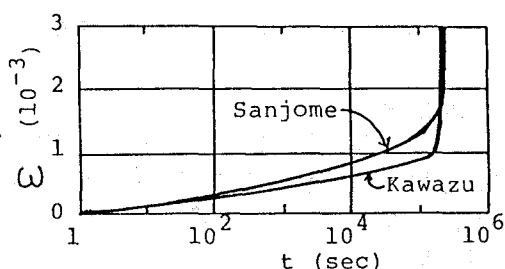


図2 クリープ歪の経時変化の例。三城目安山岩77%，河津凝灰岩85%の応力レベルで各一例。図3から図6は、同じデータを再整理したものである。

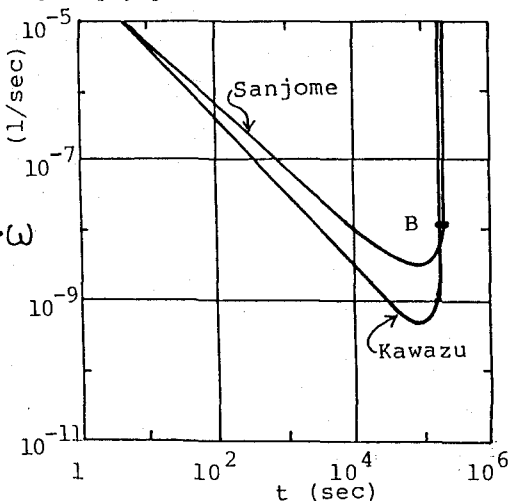


図3 クリープ歪速度の経時変化の例。

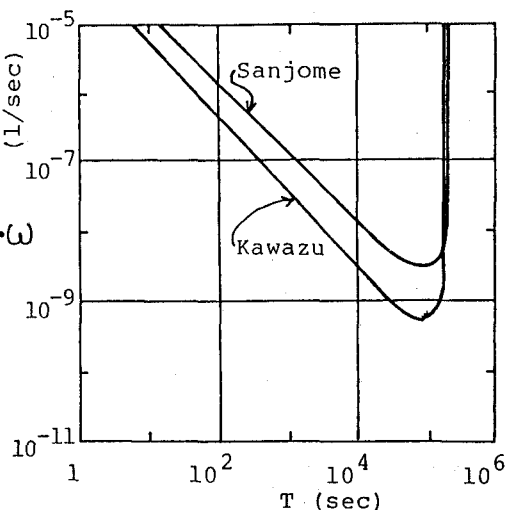


図4 破壊迄の時間 T を横軸に取ったクリープ歪速度の経時変化の例。

$$err = C / (d\varepsilon / dt) + t - (\text{予想寿命}) \quad (2)$$

4. 構成方程式

ここではクリープ実験の結果を再検討しながら、試料岩石の構成方程式を導くことにする。基本モデルとしては、特性が次のように表される非線形Maxwellモデルを採用する[5]。

$$d\varepsilon / dt = (d\sigma / dt) / E + f(\varepsilon_2) g(\sigma) \quad (3)$$

但し、 ε_2 ：非弾性歪 ($=\varepsilon - \sigma / E$)

E ：ヤング率、 $g(\sigma) = \sigma^n$ である。

さて、クリープでは応力 σ が一定であるので右辺第一項は零となり、 $d\varepsilon_2 / dt (= d\varepsilon / dt)$ と ε_2 との関係より、すぐに $f(\varepsilon_2)$ が求められる。実際に、実験結果を整理してみると図6が得られる。図より分るように、 $d\varepsilon_2 / dt$ 従って $f(\varepsilon_2)$ は、 ε_2 の増加とともに初め極めて急激に減少し、やがて最小値を取った後、急激に増加することが分る。安山岩と凝灰岩とで比較してみると最低値を取る時の ε_2 が安山岩が1000 μ 程度、凝灰岩が700 μ 程度と安山岩の方がやや大きいこと、また最低値を取った後の立ち上りは凝灰岩の方が急であることが目につく。なお、各岩石について一例ずつしか示さなかったが、同様の傾向は実験結果全般を通じて見うけられた。

図6に示した曲線は、次式で近似出来、各々の岩石についてのパラメータを求めると表1のようになる。

$$f(\varepsilon_2) = C1 * \varepsilon_2^{-m} + C2 + C3 * \varepsilon_2^l$$

上式において、右辺第一項、第三項は、それぞれ1次、3次クリープにおいて支配的となる。従って1次クリープ領域では、

$$f(\varepsilon_2) = C1 * \varepsilon_2^{-m}$$

3次クリープ領域では

$$f(\varepsilon_2) = C3 * \varepsilon_2^l$$

として(3)式を解いてみると次のようになる。

$$(1次) \quad \log(d\varepsilon_2 / dt) = \text{const.} - \{m / (m+1)\} \log(t)$$

$$(3次) \quad \log(d\varepsilon_2 / dt) = \text{const.} - \{l / (l-1)\} \log(T)$$

これより、 m あるいは l が大きければ、図3と図4に示したように、 t あるいは T の小さい間、歪速度と t あるいは T との関係は両対数グラフ上で約 -45° の傾きを持つことが了解出来る。

次に、表1に示された値を用いて、一軸圧縮試験にお

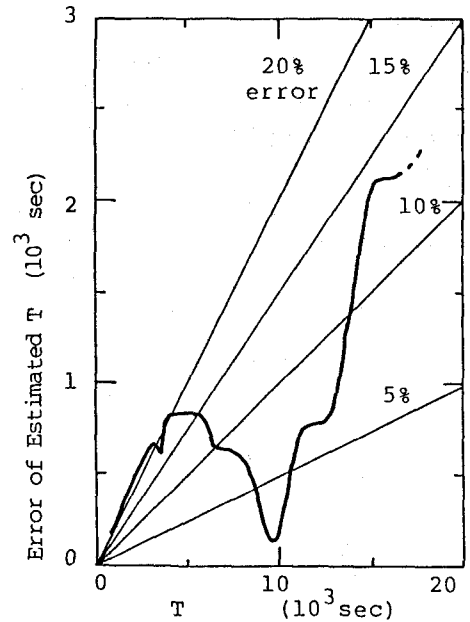


図5 破壊迄の時間の予測の例。図2の三城目安山岩のデータを使用。

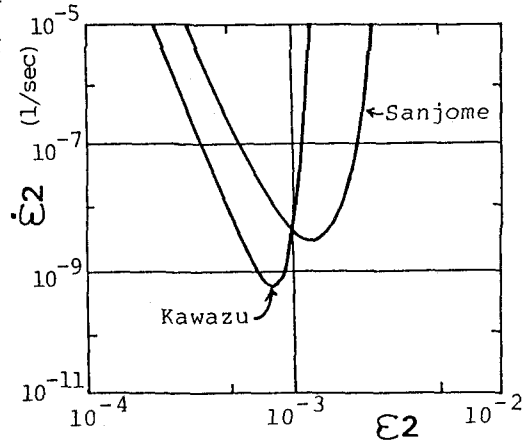


図6 クリープ歪速度とクリープ歪との関係。

表1 構成方程式中のパラメータ

	Sanjome	Kawazu
C1	2	2000
C2	10	3×10^5
C3	0.002	2×10^6
m	10	10
l	15	20
n	35	60
unit of ε	10^{-3}	10^{-3}
unit of σ	100MPa	50MPa

る応力-歪線図が再現出来るかどうかを検討してみよう。なお、表1中のパラメータ n は、歪速度を変えて定歪速度試験を行い、歪速度の増加にともなう一軸圧縮強度の増加具合より求めた。両岩石とも、所謂クラス2に属しており、定歪速度試験では強度破壊点以降の応力-歪線図を得ることが出来ない。そこで、最近開発した応力速度をnegative feedback信号とした実験[6]を行い、得られた結果を図7に示した。同様の制御方式を仮定し、表1に示した値を(3)式に代入してシミュレーションを行った結果を図8に示す。実験結果と計算結果は、ほぼ一致していると言って差支えないだろう。

5. まとめ

今回の実験は、従来測定が困難なため、殆ど信頼すべき実験結果のなかった3次クリープ特性の測定に重点を置いた。其の結果、3次クリープ領域でのクリープ歪の増加は比較的簡単な法則に従っていることがみだされた。一言で言えば”残された寿命は、その時点での歪速度(老化速度)にほぼ反比例する”となる。この事が実際の岩盤の挙動にも当てはまるとすれば、坑道、トンネル、地下構造物の破壊の予知とか地震予知に役立つものと思われる[7]。

また、クリープ実験の結果より構成方程式を導いた。この構成方程式はクラス2に分類される岩石の応力-歪線図をかなり良く再現することが分った。この構成方程式はもちろん、3次クリープ領域での歪速度増加の規則性を再現することも出来る。

今後の課題としては、3次クリープ領域での規則性と今回提出した構成方程式が、他の岩石についても、成り立つかどうかの検討がまず挙げられよう。さらに、これらが実際の岩盤の挙動に当てはまるかどうかの検討が重要であろう。

なお、この研究の一部は、昭和59年度文部省科学研究費、一般研究Bによって行われた。

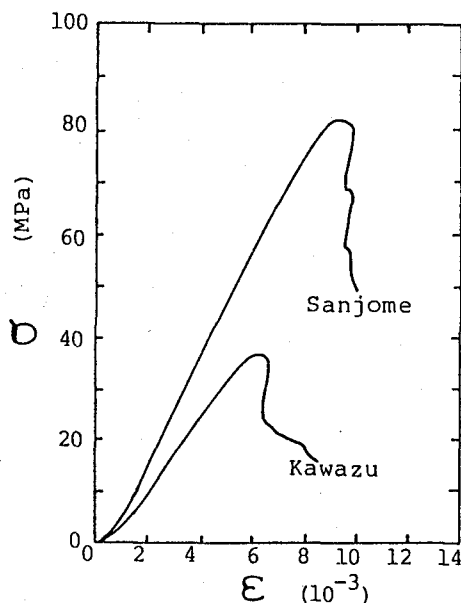


図7 応力-歪線図の実験例。

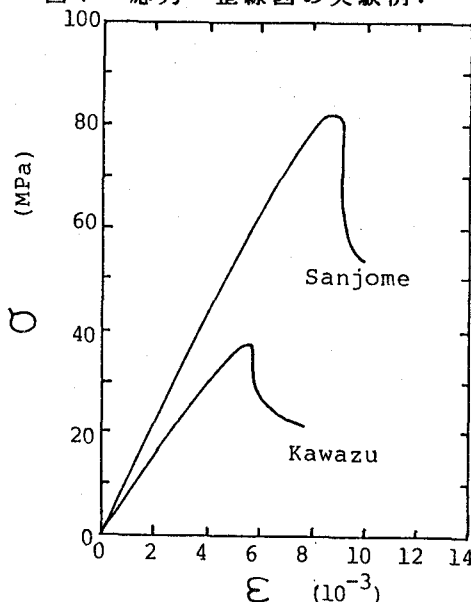


図8 応力-歪線図の計算結果。

参考文献

- [1]Kranz, R.L. & Scholz, C.H., JGR, 82(30), p.4893(1977)
- [2]磯部, 富永, Hardy, 平松: 日本鉱業会春季大会講演要旨集, p.29(1981)
- [3]大久保, 西松: 日本鉱業会春期大会講演要旨集, p.45(1984)
- [4]山口 勉, 大久保, 西松, 小泉: 日鉱誌, 99(1150), p.1029(1983)
- [5]山口 勉, 大久保, 西松: 日鉱誌, 100(1158), p.631(1984)
- [6]大久保, 西松: 日鉱誌, 100(1161), (1984)
- [7]斉藤: 土と基礎, 29-5(280), p.77(1981)

(15) Time Dependent Behaviour of Rock especially focused
on Tertiary Creep

The University of Tokyo

Seisuke OKUBO

Yuichi NISHIMATSU

This paper presents selected laboratory creep data from experiments conducted on samples of Sanjome andesite and Kawazu tuff. The experiments were designed mainly to determine strain-time behaviour patterns in tertiary creep of these samples under uniaxial compression.

The creep behaviour of the samples can be divided into three stages. During the first stage starting immediately after loading, creep rate is continuously decreasing with time and logarithmic law fits for most part of this period. In the successive stage, creep rate remains in very limited region. Then creep rate is increasing monotonously toward the failure. These stages may be called as the primary, secondary and tertiary creep, respectively. Though creep behaviour of rock has been a subject of interest, only little consideration has been given to tertiary creep.

Special attention has been given in this study to measure the strain-time characteristics of samples in tertiary creep. Tertiary creep is signified by a continuous increase of strain rate. In this study, very interesting feature of this strain rate increase was found;

"The strain rate at a certain time in tertiary creep is inversely proportional to the time to go to final failure."

This relatively simple experimental law can be used to estimate a failure time of gateway, tunnel and underground structures. And, hopefully it can be applied to preliminary estimation of earthquake.

The constitutive equations of sample rocks has been proposed based on the experimental results of creep. The model consists of two units in series; i.e. a linear spring and a nonlinear dashpot. The characteristics of dashpot can be directly obtained by the strain-time behaviour in creep because strain of linear spring remains constant in creep. The obtained constitutive equations were used to reproduce stress-strain curves in uniaxial compression test. The simulation was carried out numerically by a computer. The calculated results were compared with the experimentally obtained stress-strain curves, and it is found that the calculated ones coincide with the experimental. It should be emphasized that the proposed constitutive equation can be applied to not only pre-failure region but also post-failure region.