

(56) 軟岩の非線形クリープ特性の評価手法について

豊田高専 ○伊東 孝
豊田高専 赤木知之
栃木県工業課 寺田光夫
川崎地質(株) 青砥澄夫

Estimation of non-linear creep properties on soft rocks

Takashi ITO, Toyota College of Technology
Tomoyuki AKAGI, Toyota College of Technology
Mituo TERADA, Tochigi Prefectural Office Industrial section
Sumio AOTO, Kawasaki Geological Engineering Co.,Ltd

Abstract

It is necessary to estimate mechanical properties of soft rock and stability of rock structure. In this study, creep test under uniaxial compressive load were carried out with the aim of estimating the non-linear creep properties. The loading times maintained in these creep tests varied between several minutes to two months. The size of specimens are $5 \times 10\text{cm}$ and $10 \times 20\text{cm}$.

In this paper, we have studied how the variation of mechanical properties influenced by the applied load and size effect.

The obtained results are as follows; 1) The relationship between the minimum strain rate and the creep elapsed time in log-log plotting becomes a straight line. this corresponds to the mean that amount of strain in the steady-state creep region is constant. 2) The size effects of specimens are observed in the relation between stress rate and minimum strain rate, stress rate and elapsed time.

1. まえがき

地下空洞や斜面などの岩盤構造物が長い時間かかって崩壊に至り被害をもたらすような場合、岩石や岩盤の力学特性として強度や変形特性だけではなく、それらの時間依存関係を把握することが必要である。このような場合、将来的に変形が収束する粘弾性的な挙動だけでなく、非線形なクリープ特性が重要になる。

本研究では、軟岩として大谷石を用いた一軸圧縮クリープ試験を実施した。昨年度、直径 5cm、高さ 10cm の試料を用いて試験を行い、数多くのデータを得たことから、今回は直径 10cm、高さ 20cm の試料で同様の試験を行った。この報告では、直径 10cm の試料の試験結果を中心に、直径 5cm のデータとの比較を行いながら、クリープ応力、ひずみ速度および破壊時間などの関係について考察を行い、寸法効果の有無についても検討を行う。

2. 試料および試験方法

試験に用いた岩石試料は栃木県大谷町で採取した大谷石（多孔質凝灰岩）である。本研究で用いた試料の大きさは、直径 5cm、高さ 10cm の円柱形と直径 10cm、高さ 20cm の円柱形の 2 種類ある。ここでは、直径

10cm の試験結果について主に報告する。整形された試料は、大谷町で採取した水の中に試験直前まで保管し、乾燥による強度劣化を防いだ。

クリープ試験に先立ち、直径 5cm の試料を用いた一軸圧縮試験を行った。試験結果を図-1 に示す。本試験で用いた大谷石は細目石と呼ばれるもので、強度的な弱部であるみその部分が小さく比較的少ないものである。試験結果のばらつきは 1 本を除いて比較的少ないものが得られた。この 1 本を除いた結果から得られた一軸圧縮強度、弾性係数およびポアソン比を表-1 に示す。

クリープ試験装置はレバー式（倍率 10）で、10Kg と 50Kg の重錘を幾つか組み合わせて各試料に設定したクリープ応力を負荷する。この試験装置の最大負荷荷重は 5 ton である。この装置を室温 $20 \pm 0.1^{\circ}$ に保った恒温室内に設置し試験を行った。載荷期間は長いもので数カ月要するため、写真-1 に示すようなセル内に大谷町で採取した水を満たし、その中に試料を入れて試験を行った。

載荷した応力は $5 \times 10\text{cm}$ の試料の一軸圧縮強度の平均値 (9.2MPa) を基準値として、これの 65,68,70% とした。

計測は軸ひずみ量を変位計（東京測器研究所製:CDP-5）を用いて 2 カ所で検出し、A/D 変換を行ってパーソナルコンピュータに取り込み、モニタリングしながらデータの収集を行った。

3. クリープ試験結果

クリープ試験結果を図-2(a),(b) に示す。(a) 図は時間軸を普通目盛で示し、(b) 図は時間軸を対数目盛で示してある。応力比が 70% の試料は 26 時間と 80 時間で破壊し、68% の試料では 93 時間で破壊している。65% の応力比になると急激に破壊時間が伸び、それぞれ 1192

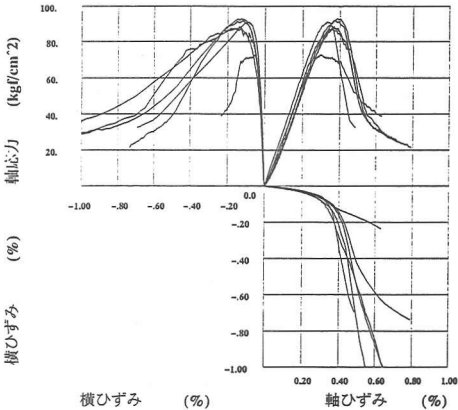


図-1:一軸圧縮試験結果
表-1:大谷石の材料定数

弾性係数(MPa)	ポアソン比	一軸圧縮強度(MPa)
3056.	0.19	9.2

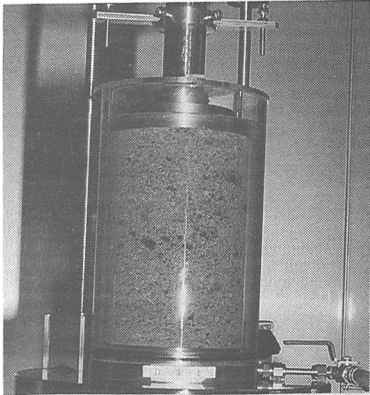
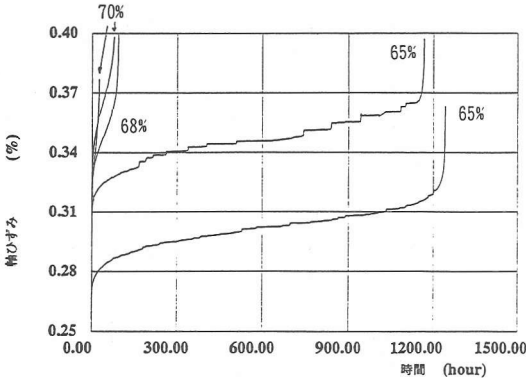
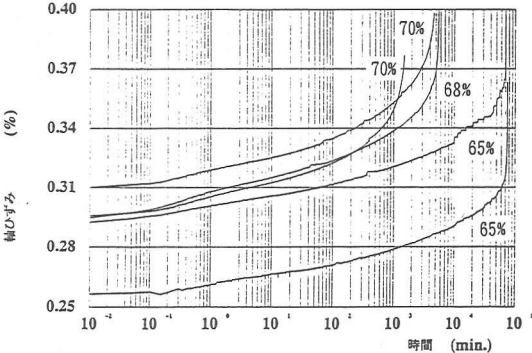


写真-1:クリープ試験状況



(a) 普通時間軸



(b) 対数時間軸

図-2:一軸クリープ試験結果（時間－変位関係図）

時間と1243時間で破壊に至っている。これらの図より、ひずみ速度が徐々に減少してゆく遷移クリープ過程、ひずみ速度がほぼ一定値を示す定常クリープ過程およびひずみ速度が急激に増加する加速クリープ過程が読みとれる。特に、全クリープ過程において定常クリープ過程の占める時間的割合が非常に大きいことがわかる。この傾向は、先に行った直径5cm、高さ10cmの試料を用いた試験結果でも見られる¹⁾。ひずみ速度の時間的変化を横軸に経過時間、縦軸にひずみ速度をとってプロットしたものが図-3である。どの応力比においても、ほぼ同じ傾きでひずみ速度は減少してゆき、最小値に達した後、急激に増加傾向に転じている。最小ひずみ速度は応力比が減少するにしたがってより小さい値を示し、また、最小ひずみ速度に達するまでの経過時間が長くなることがわかる。同じ応力比にもかかわらず、クリープ曲線やひずみ速度の時間変化が異なっているのは、試料の一軸圧縮強度がばらついていることに起因するものと考えられる。

図-4に破壊時間と最小ひずみ速度を両対数グラフにプロットしたものを示す。図中の黒丸は5×10cmの大きさの試料のデータであり、白丸は10×20cmの試料の結果である。このように最小ひずみ速度と破壊時間の関係は両対数グラフ上でほぼ傾きが-45度の直線となる。図中にこれらのデータを最小二乗近似した直線を示してある。この直線の式は以下のものである。

$$t_f \cdot \dot{\epsilon}_{\min} = \epsilon_c = \text{Const.} \quad (1)$$

ここで、 t_f はクリープ破壊時間 (min)、 $\dot{\epsilon}_{\min}$ は最小ひずみ速度 (%/min) である。この大谷石の結果では、試料の大きさの違いによる影響はほとんどなく、

$$\epsilon_c = 0.0004 \quad (2)$$

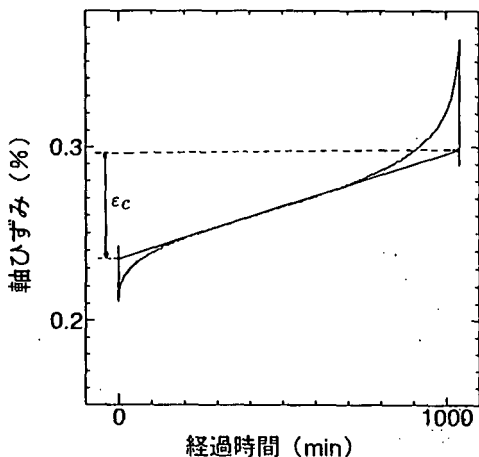


図-5: ひずみの算出

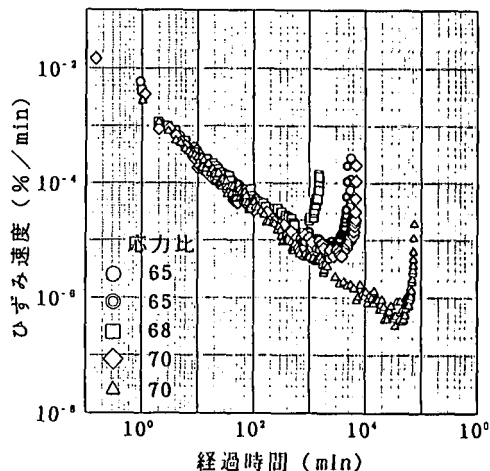


図-3: ひずみ速度-時間関係

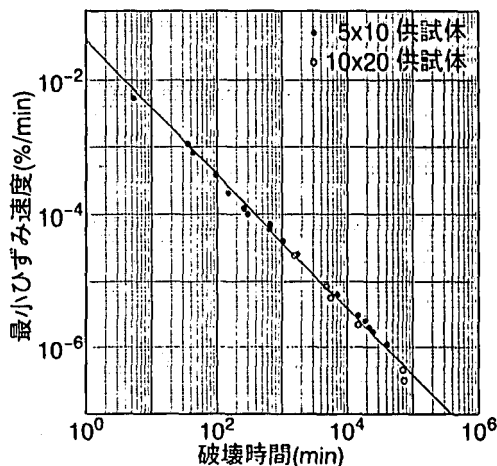


図-4: 最小ひずみ速度-破壊時間関係

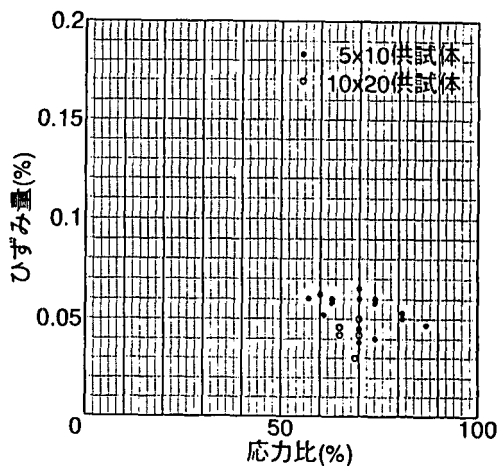


図-6: 応力比-ひずみ関係

という値が得られた。栗原²⁾によると、大阪粘土では0.0228、川崎粘土では0.0160、利根川シルトでは0.0135という値が報告されている。このことは図-6においても見られる。この図は図-5に示すように普通時間軸で描かれたクリープ曲線を用いて、その大半を占める定常クリープ領域の直線部分を载荷時からクリープ破壊時間まで延長しそれに対応するひずみ量を算出して応力比に対してプロットしたものである。先と同様、黒丸が5×10cm、白丸が10×20cmの試料の結果である。直径が10cmの試料のひずみ量が小さくなる傾向がみられるが、全ひずみ量がほぼ0.4%であることを考慮すると、応力比に対してほぼ0.02%の範囲内に収まっており、一定値を示すと言っても妥当であろうと思われる。

図-7に応力比と最小ひずみ速度との関係を示す。図中の直線は片対数グラフ上で大小それぞれの試料の結果を最小二乗近似したものである。直径が5cmの試料の結果では、応力比に対するばらつきがかなり大きくなっている。これは先にも述べたが、試料の大谷石に含まれるみその量やその位置がそれぞれ異なるため、一軸圧縮強度がばらついているためであると考えられる。それに比較して、直径が10cmの試料の結果では、まだ本数が少ないが直径が5cmに比較してかなりばらつきが小さくなっているのがわかる。このことは、試料が大きくなることでみその量やその分布状況による影響がより平均化されたためではないかと考えられる。

金属材料分野で応用クリープ力学の基礎式として広く用いられているものにNortonの式がある³⁾。これは、単に定常クリープ速度が応力に対して非線形に増加することのみを表したものである。Nortonの式を以下に示す。

$$\dot{\epsilon} = k\sigma^n \quad (3)$$

ここで、 k 、 n は材料パラメータである。この式が成立するための必要十分条件は、 $\log \sigma$ と $\log \dot{\epsilon}$ の間に線形関係が存在することである。本研究で行った実験データを上記の関係で整理したものを図-8に示す。図中の直線はNortonの式にデータを最小二乗近似したものであり、次式に示すような値になっている。

$$\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-24} \sigma^{20} \quad (5 \times 10 \text{ 供試体}) \quad (4)$$

$$\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-32} \sigma^{32} \quad (10 \times 20 \text{ 供試体}) \quad (5)$$

金属材料においては、このようにして得られた結果よりクリープ限度を求めている。クリープ限度とは、長時間後にこの最小ひずみ速度が0になるための最大の応力のことであり、一般に12年後にひずみが12%に達する最小ひずみ速度とされている⁴⁾。これは、最小ひずみ速度が $1 \times 10^{-7} (\%/min)$ に相当する。

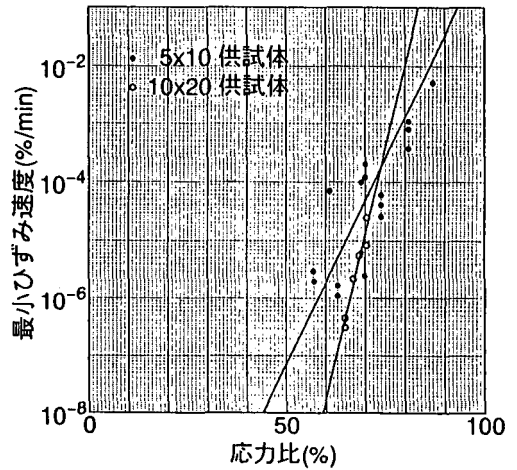


図-7: 応力比-最小ひずみ速度関係

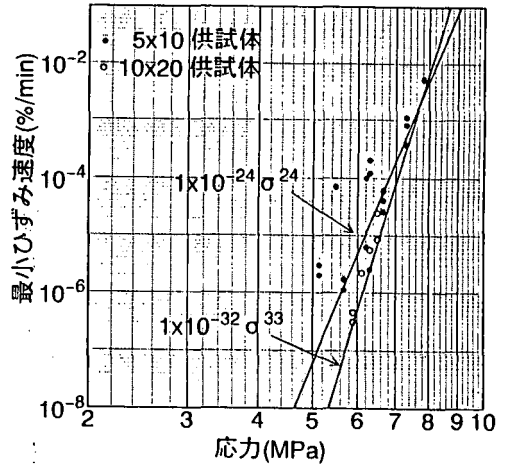


図-8: Norton 則による近似

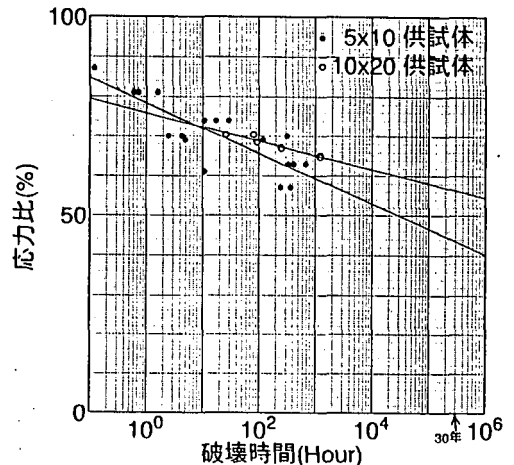


図-9: 破壊時間と応力比関係

今回の試験結果をこれに当てはめて考えると、直径が 5cm の試料で 5.1MPa(応力比 55%)、直径が 10cm の試料で 5.7MPa(応力比 62%) 程度となる。ただし、軟岩のクリープ限界に関する研究はなされておらず、この値の理由づけをすることはできない。

最後に、破壊時間と応力比の関係を図-9 に示す。この図においても、直径が 5cm の試料の結果に比べて、直径が 10cm の試料の結果はばらつきが少なくなっている。図中の直線はそれぞれの大きさの試料の試験結果を最小二乗近似したものである。この直線が 30 年後にまで延長できると仮定すると、30 年後に破壊に至る応力レベルは直径 5cm の試験結果で応力比 44%、直径 10cm の試験結果では応力比 56%となる。

4. まとめ

大谷石の長期安定性を評価するために、一軸圧縮クリープ試験を行ってクリープ応力と破壊時間およびひずみ速度の関係について考察を行った。その結果、次のことが明らかになった。

- (1) 両対数グラフ上に最小ひずみ速度と破壊時間をプロットするとほぼ傾きが-45 度の直線関係がありその定数は 0.0004 となった。また、試料の大きさの違いによる変化は見られない。
- (2) 定常クリープ過程で生じるひずみ量は応力レベルに依らずほぼ 0.04 ～ 0.06%の間で一定値を示す。また、試料の大きさの違いによる顕著な変化は見られない。
- (3) Norton 則にしたがってデータを整理すると、将来破壊に至らない応力すなわちクリープ限界が直径 5cm の試料で応力比 55%、直径が 10cm の試料では 62%という値が得られた。
- (4) 応力比と破壊時間の関係から、30 年後に破壊に至る応力レベルとして直径 5cm の試料で 44%、直径 10cm の試料で 55%という値が得られた。
- (5) 応力比に関して、そのばらつきは試料のサイズが大きいほど少なくなることがわかった。

最後に本研究を行うにあたり、クリープ試験を担当してくれた信州大学の横田博昭君、中部地建の中田洋史君、豊田高専 5 年生の平岩剛君、鈴木桂吾君に謝意を表します。

参考文献

- 1) 伊東孝、赤木知之：軟岩の非線形クリープ特性とその評価方法に関する研究、第 15 回西日本岩盤工学会シンポジウム、pp.80-83、1994.
- 2) 栗原則夫：粘土のクリープ破壊に関する実験的研究、土木学会論文報告集第 202 号、1972.
- 3) F.H.Norton : Creep of steel at high temperatures, McGraw-Hill, New York, 1929.
- 4) F.K.G. オドクヴィスト、J. ハルト、村上澄男訳：クリープ強さの理論、培風館、1967.