

(48) 軟岩のクリープ定数に及ぼす載荷時間の影響

基礎地盤コンサルタンツ（株） 正会員 西垣 好彦
同 上 “ ○松村 真一郎

Effect of loading period on creep coefficient of soft rock

Yoshihiko Nishigaki Kiso-Jiban Consultants Co., Ltd.
Shin'ichiro Matsumura “

Abstract

A decision of a suitable loading period for laboratory creep test is very difficult. As a general rule, loading period is decided by considering a term of tests or the number of specimens. For that reason, loading period varies in different test cases, therefore effect of loading period on creep coefficient is hardly discussed.

Nishigaki et al.¹⁾ discussed this problem for soft rock specimens obtained from the Kobe Formation in short and long term creep test. This paper discussed farther based on newly obtained results on various soft rocks. The following conclusions are reached.

- (1) In primary creep stage, the behavior of all rock specimens follows the logarithmic creep law as explained by equation below, which is independent of creep stress or drainage condition.

$$\log(\dot{\epsilon}/\sigma_1) = \log a - b \log t \quad (a, b: \text{const.})$$

where b is nearly equal to 1.0 and a can be estimated by uniaxial strength.

- (2) Retardation coefficient β defined by Voigt model formed by 3-elements is decreasing in inversely proportional with loading time. Accordingly, in primary creep stage, the ratio of long-term creep coefficient can be estimated.

1. はじめに

室内試験で軟岩のクリープ定数を求める際、載荷時間をどの程度にすべきか、どのようなクリープモデルを適用すべきか、実務上議論されることが多い。特にクリープ載荷時間は、工期や試験個数から便宜的に決定されることが多く、通常1日～7日程度であるが、長期クリープ試験として1～3ヶ月実施されるケースも稀にある。また適用するモデルも様々であり、クリープ定数が載荷時間や適用モデルの違いでどのようになるのか検討された例は少ない。筆者らは実務的によく利用されるVoigt型の3要素及び5要素モデルを用いて、神戸層の砂岩・泥岩に対しクリープ定数に及ぼす載荷時間の影響を検討した¹⁾。その結果、クリープ定数が時間に依存することを述べた。本報告はさらにこの点を検討するため、数種の軟岩を用いて、載荷時間及び載荷条件の異なるクリープ試験を実施し、軟岩のクリープ定数について検討を加えた。

2. 試験方法

試験に用いた岩石は表-1に示すように各種の軟岩であり、恒温室にて一軸状態及び三軸応力状態でクリープ試験を実施した。三軸クリープ試験では飽和供試体を用い、所定拘束圧で等方圧密した後、排水または非排水条件（背圧 8 kgf/cm^2 ）で载荷した。今回の試験では一次クリープ域を

表-1 供試体物性値とクリープ载荷条件

岩石名	記号	一軸強度 kgf/cm^2	排水 条件	拘束圧 kgf/cm^2	载荷応力 kgf/cm^2	载荷時間 (日)	b
栃木県凝灰岩	T-1	180	一軸	0	70	3	0.98
岩手県凝灰岩	T-2	64	一軸	0	25	3	0.70
神戸層泥岩 ¹⁾	M-1	12	CU	10	20	30	0.82
神戸層砂岩 ¹⁾	S-1	39	CU	10	83	30	0.88
福島県泥岩	M-2	30	CD	2	6	100	0.91
福岡県まき土	G-1	14	CD	2	6	10	0.90
河津凝灰岩 ²⁾	T-3	379	一軸	0	322	8h	1.05
三城目安山岩 ³⁾	A-1	985	一軸	0	793	2	0.95
稲田花崗岩 ⁴⁾	G-2	1723	一軸	0	1581	14h	0.94

扱うため、クリープ破壊しないように、载荷応力 $\sigma_c (= \sigma_1 - \sigma_3)$ は所定の拘束圧のもとで想定される強度の約6割程度の応力を設定した。なお、これら軟岩のクリープ特性と比較するため、既往文献から硬岩のクリープ試験を参考にしたので、その物性値を表-1に併記した。

3. 試験結果

図-1にクリープ試験結果を示す。図より、一次クリープ域を想定した試験であるが、軸ひずみの増加傾向は、対数時間軸に対し载荷初期から直線的に増加するもの（T-1, M-2）、2直線で近似できるもの（S-1, G-1）、途中から指数的に増加するもの（M-1, T-2）等、岩種によって様々である。特に、M-2のように载荷後100日においても直線的な増加傾向が変わらない場合は、図から容易に長期のクリープひずみが算定できる。

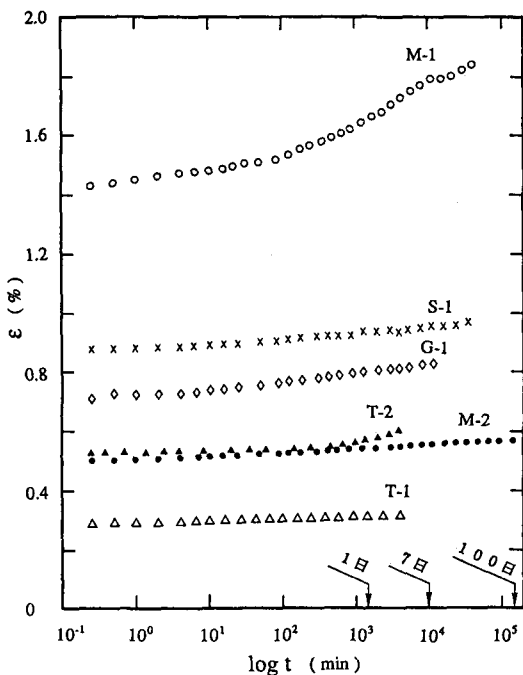


図-1 クリープ試験結果

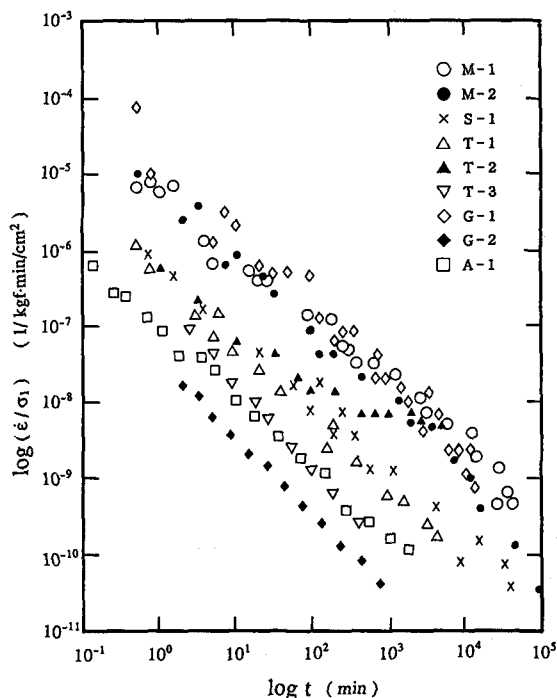


図-2 軸ひずみ速度の経時変化

図-2は、図-1を軸ひずみ速度と時間の関係で再整理したもので、既往文献から硬岩データも併記した。なお軸ひずみ速度は、軸応力 σ_1 (=拘束圧+載荷応力)で正規化し載荷応力の影響を除いた。図より、T-2はひずみ速度が一定値を示す傾向にあり、二次クリープ域に移行した可能性が考えられるが、その他は両者の関係は両対数紙上で直線であり、一次クリープ域が保持されていることがわかる。また、図は岩種、排水条件に関係なく、広い範囲で対数クリープ則が成立していることを意味している。すなわち、 a 、 b を定数として次式が成立する。

$$\log \frac{\dot{\epsilon}}{\sigma_1} = \log a - b \log t \quad (1)$$

勾配 b を図-2から求め表-1に付した。 b は既往研究において、岡本ら⁵⁾が軟岩に対し0.9~1.0を、大久保ら^{2) 3) 4)}が硬岩に対し約1.0を実験的に求めている。今回の結果ではT-2以外で0.82~0.98と狭い範囲にある。T-2は前述したように二次クリープ域に移行した可能性があるため、以下の検討ではこれを除外する。従って、 b は一次クリープ域において、岩種に関係なく、概略1.0と見なしてよいであろう。また、図-2から強度が大きい岩石ほど直線が下位にある傾向が読み取れる。そこで、定数 a と一軸強度の関係をみると図-3のようになり、強度が大きいほど a が小さくなるのがわかる。従って a 、 b は経験的に推定可能である。

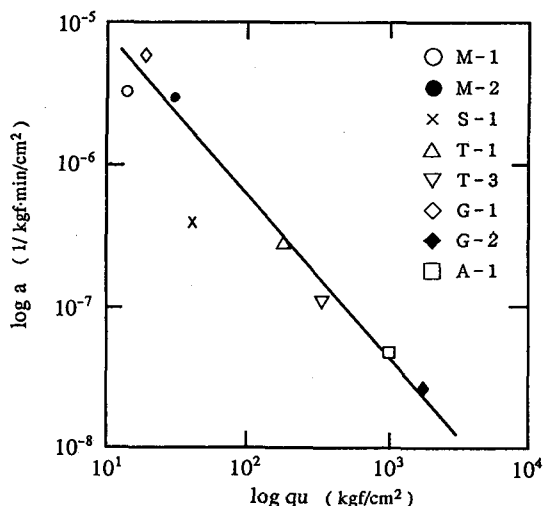


図-3 一軸強度と定数 a の関係

4. クリープ定数と載荷時間の関係

上述したように、クリープひずみ速度と時間の間には対数クリープ則が成立するが、長期変形問題で実務に広く用いられるクリープモデルは、図-4の3要素Voigtモデルが一般的である。モデルではひずみ ϵ とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は式(2)、式(3)で表され、ひずみ速度は指数則に従う。さらに、式(3)を常用対数で表示すれば式(4)となり、式(1)とは異なることがわかる。

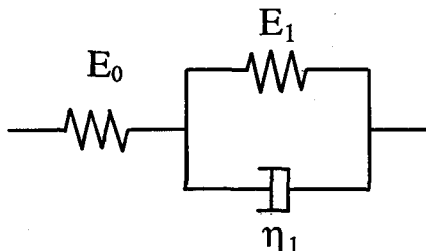


図-4 3要素Voigtモデル

すなわち、式(4)はせん断ひずみ速度と時間の関係が片対数紙上で直線関係になることを示し、直線の切片から η_1 、勾配から β が求められる。いずれにせよ、3要素モデルはクリープひずみ速度と時間の関係に指数則が成立するという前提がある。

$$\epsilon = \left\{ \frac{1}{2E_0} + \frac{1}{2E_1} (1 - e^{-\beta t}) \right\} \sigma \quad (2)$$

$$\frac{\dot{\epsilon}}{\sigma} = \frac{1}{2\eta_1} e^{-\beta t} \quad (3)$$

$$\log \frac{\dot{\epsilon}}{\sigma} = \log \frac{1}{2\eta_1} - \log e^{-\beta t} \quad (4)$$

E_0 : 瞬間弾性係数 (kgf/cm²) β : 遅延係数 (= E_1/η_1)
 E_1 : 弾性係数 (kgf/cm²) η_1 : 粘弾性係数 (kgf·min/cm²)

図-5は、載荷日数30日のM-1に対し、軸ひずみ速度と時間の関係を片対数表示したものである。両者の関係はばらつきがあるが、載荷後半でわずかに直線関係が見られるものの、明らかに全載荷範囲で式(4)が成立していないことがわかる。また、このデータを直線近似するとき、30日の全データに対しては図の一点鎖線で近似するが、7日までで試験を終了した場合は、 $t=7$ 日近辺のデータに対して二点鎖線で近似することになる。従って、近似する時間区間によってクリープ定数が異なることになる。

その例として、神戸層砂岩・泥岩のデータ(60供試体; 図条件)で求めたクリープ定数 G_1 と η_1 を図-6に示した¹⁾。ここに、 G_1 はせん断弾性係数であり、ポアソン比 ν を仮定して E_1 から求めている。データは載荷時間2時間の短期クリープから30日の長期クリープまでであるが、図のように、載荷時間が異なるとクリープ定数も異なった値となる。以上の事実は、言い換えればクリープ挙動が対数クリープ則に従っているにもかかわらず、指数則が成立すると仮定したことにより生じる問題であり、指数則で求めた定数は時間によって変化することになる。

実務上、長期のクリープ変形を推定する場合、Voigtモデルを用いるのが一般的である。その場合、載荷時間ができるだけ長いクリープ試験に基づきクリープ定数を求めることが理想的である。しかし、長期試験は温度管理やひずみ測定等、技術的に困難ことが多い。そこで、限られた載荷時間で求めたクリープ定数から、長期のクリープ定数が推定できれば都合がよい。

図-5の近似直線の勾配は遅延係数 β に相当するが、これが載荷時間に対しどのように変わるかを見るため、図-2の各データに対し、近似する時間スパンを種々変えて β を求めた。図-7はその結果を示し、時間範囲の

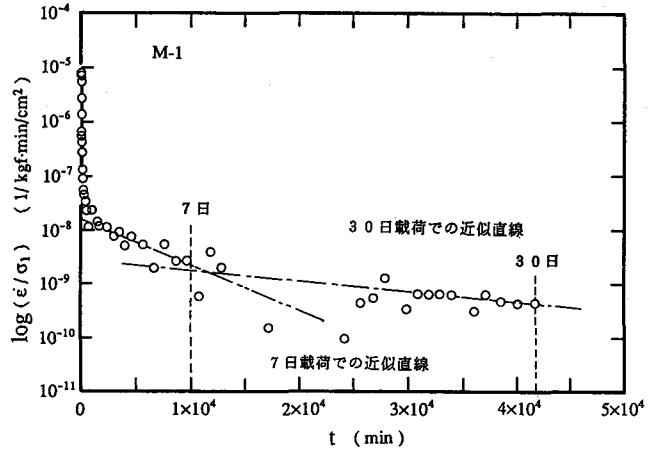


図-5 直線近似区間の違いによるクリープ定数の変化

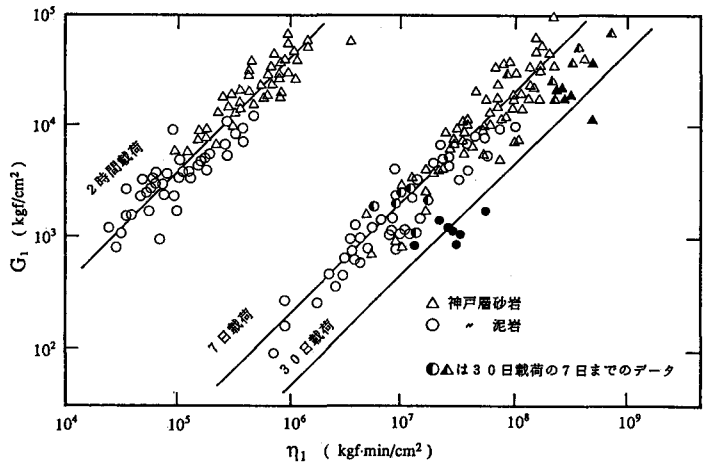


図-6 神戸層砂岩・泥岩のクリープ定数

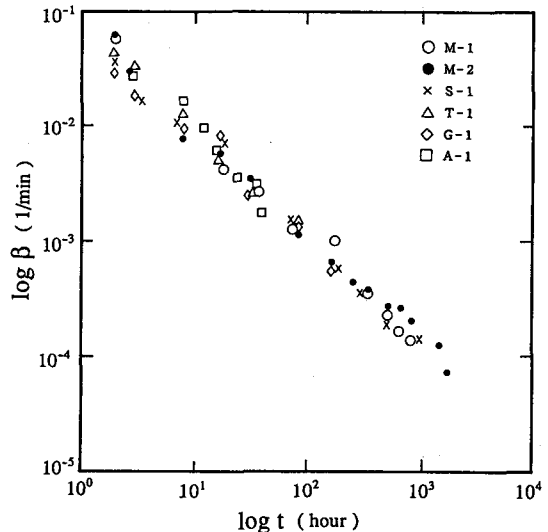


図-7 遅延係数の載荷時間の関係

最大値を載荷時間としてプロットしたものである。図のように多少のばらつきはあるものの、 β と載荷時間は、軟岩から硬岩まで岩種に関係なく両対数紙上で逆比例の関係にあり、

$$\beta t = \text{const.} \quad (5)$$

の実験式が成立する。式(5)は、載荷時間から遅延係数が一意的に決まり、長期の遅延係数が推定できることを意味している。ただし、この結果は一次クリープが長期にわたり認められることを前提としており、降伏値を越える載荷応力が作用する場合は適用できないことに注意する必要がある。

5. まとめ

岩種、応力条件、排水条件、載荷時間が種々に異なる軟岩のクリープ試験を実施し、クリープ定数と載荷時間の関係を調べた。得られた結果は次のとおりである。

- (1) 軸ひずみ速度と載荷時間の関係は、一般的に言われているように、一次クリープ域では岩種、応力条件、排水条件に関係なく、下式で示される対数クリープ則が経験的に成立する。また、両対数紙上での近似直線の勾配 b は、岩種に関係なく約1.0である。また今回の結果によると、定数 a は一軸強度から概略であるが推定できる。

$$\log(\dot{\epsilon}/\sigma_1) = \log a - b \log t$$

- (2) 上記の関係から、3要素モデルでの遅延係数はクリープ試験の載荷時間によって異なった値となる。しかし、遅延係数は岩種に関係なく載荷時間と逆比例の関係にあるようである。従って一次クリープ域の範囲においては、長期の遅延係数の推定が可能である。

参考文献

- 1) 西垣, 松村 (1991) : 軟岩のクリープ定数と載荷時間の関係について, 日本応用地質学会平成3年度研究発表会, pp. 37-40.
- 2) 大久保, 西松 (1985) : 岩石のクリープ特性—特に3次クリープ特性について, 第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 66-69.
- 3) 山口, 大久保, 西松, 小泉 (1983) : 三城目安山岩の一軸圧縮荷重下, および周圧下におけるクリープ実験, 日鉱誌99 (1150), pp. 1029-1034.
- 4) 福井, 大久保, 西松 (1989) : 一軸圧縮荷重下での岩石のクリープ特性, 資源・素材学会誌 105 No. 7, pp. 521-526.
- 5) 岡本, 西, 松井 (1983) : 泥岩の力学特性に関する研究 (その2) クリープ特性, 電中研研究報告382012