

(13) 岩石の非線形フリース特性について

豊田高専(正) 永木知元

1. まえがき

地盤および岩盤構造物の時間に依存した挙動を論じるとき、“flow”=流動という用語が一般的に使われるが、フリースとは、定荷重下でのflowの結果としてあらわれるたんなる現象を意味する。したがって、その現象の物理的意味を考へ、構成式を確立しようとするときは、材料の基本特性である弾性、粘性、塑性に関する理論が必要となる。たとえば、低応力条件下での線形の遷移クリープは、弾性と粘性のカップリングによる結果であって、線形粘弾性理論による明解な評価が可能となる。また、高応力条件下での非線形クリープは、時間に依存した塑性変形の混在の結果に他ならない。岩石の塑性変形は、それが時間に依存しないものであれば、平衡状態における変形を論ずる一般的な塑性論で扱われるが、それが時間に依存する場合は、変形の過程をも考えなければならず、粘塑性理論としてきわめて高度な研究領域を形成する。そして、普通、岩盤での塑性変形の大半は見掛け上、時間に依存して現われ、実際の岩盤構造物の時間依存挙動の解析とも関連して、その理論の確立は非常に重要な課題となっている。事実、1979年にMontreuxで開催された4th I S R M Cong. では“レオロジカル 挙動”と題するトピックがもうけられ、46編目の論文が提出されている。ところが、我が国においては、研究条件の過酷さからか、この領域での研究例はきわめて少ない。さすがに、永井等¹⁾、平井他²⁾、そして桜井他³⁾の研究にその現状を垣間見ることができ、筆者もすでに市川等⁴⁾とともにReiner-Weissenbergの降伏規準を導入して粘弾・粘塑性体の解析を試みているが、未だそのモデルの特性に不備な点も多く、一層の改良の必要性を痛感している。

そこで、本報告では、種々の応力レベルに対する一連の一軸圧縮クリープ試験結果⁵⁾を整理し、実際の挙動に出来るだけ近い特性を示すモデルを形式化すべく、特に非線形の領域でのクリープ現象の特性を把握することを試みることにする。

2. 実験概要

試験は、神戸市須磨区の珠石場で採取した神戸層凝灰質砂岩を、直径は $\phi 40$ mm、高さ60mmの円柱形に成形し、レバー比1:50のレバー式圧縮クリープ試験機により、恒温恒湿室(20℃, 80%)において自然乾燥状態のまま行われた。試料の一軸圧縮強度(σ_s)は7個平均で73.5 kgf/cm²(72 MPa)。クリープ応力は0.1 ~ 0.72 σ_s の範囲で7種類である。なお、神戸層の性質に関する詳細な報告がある⁶⁾。それによれば、本試験に供された試料は、神戸層の中で最も堅固なものに属するようである。

3. 実験結果と考察

(1)、クリープ曲線と遷延スペクトル

7種類の応力レベルに対して行われたクリープ試験結果を、図-1に軸ひずみ-対数時間関係として、クリープ応力をパラメータに示した。図によれば、クリープひずみおよびフリースの進行度合は、クリープ応力レベルが高い程顕著であり、0.72 σ_s の応力に

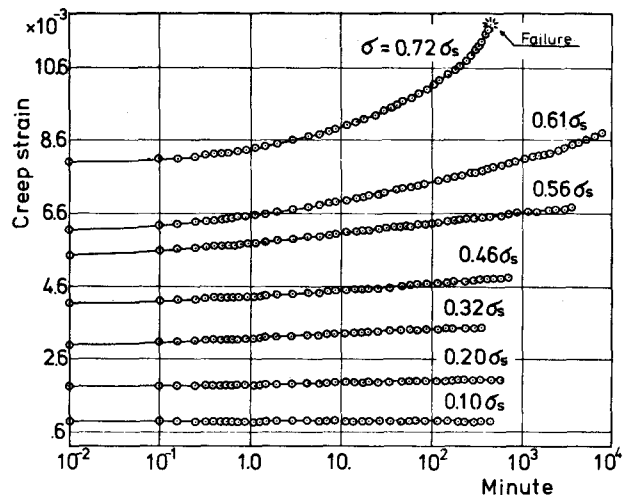


図-1 神戸層凝灰岩のクリープ曲線

対しては、420分でクリープ破壊を起している。クリープ曲線の様相は、高応力のものほど下に湾曲しており、低応力でほぼ直線とみなせる。そして、従来からほとんどのクリープ試験データは、そのような前提に基づいて処理されている。しかし、直線とみなせるかどうかは、図のスケールの取り方によるのであって、厳密には、低応力下での遷移クリープ曲線は対数時間に対してS字型になる⁵⁾。すなわち、直線となるのは限られた時間領域に限定される。いずれにしろ、クリープ曲線の形だけを論じて、その表示式を決定することには無理がある。

そこで、クリープの経過をより詳細に解析するために線形粘弾性理論において使われる遅延スペクトル解析を全実験結果に適用してみる。まず、クリープひずみ速度を全過程について求める。その結果を図-2に示す。さらに遅延スペクトルを求めて対数時間に対して示したのが図-3である。近似遅延スペクトル式を図中に示したが、いま、応力で除して正規化しないで、次式のように表わしてみよう。

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\Phi}{t} \quad (1)$$

結果から明らかなように、 $\Phi = \Phi(t, \sigma)$ である。

ただし、もし $\Phi = \Phi(\sigma)$

であれば、式(1)は積分して

$$\varepsilon(t) = C + \Phi \log t \quad (2)$$

となる。すなわち、クリープ曲線が対数時間に対して直線となるのは、遅延スペクトルが時間に対して一定となる場合に限り得ることがわかる。同様に、式(1)は

$$\log \dot{\varepsilon} = \log \Phi - \log t \quad (3)$$

と表わされるが、これは図-2に相当し、 Φ が時間に関係しない場合のみ直線を表わす。

以上の考察と図-1とを見比べれば明らかなよ

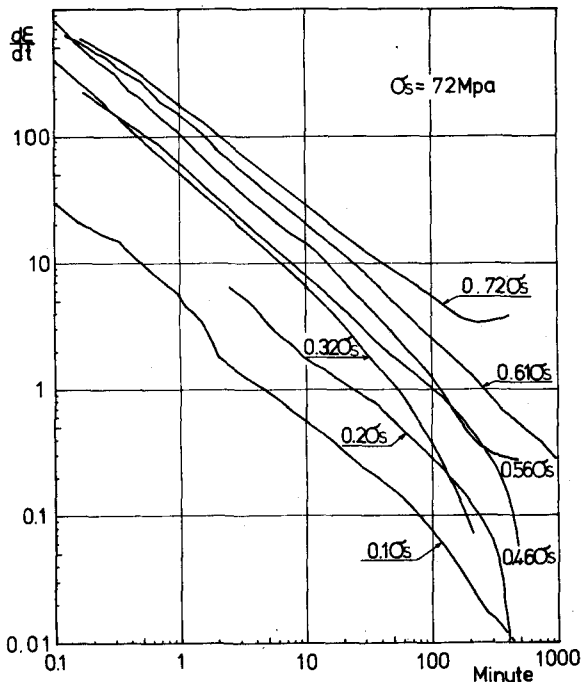


図-2 クリープひずみ速度の経時変化

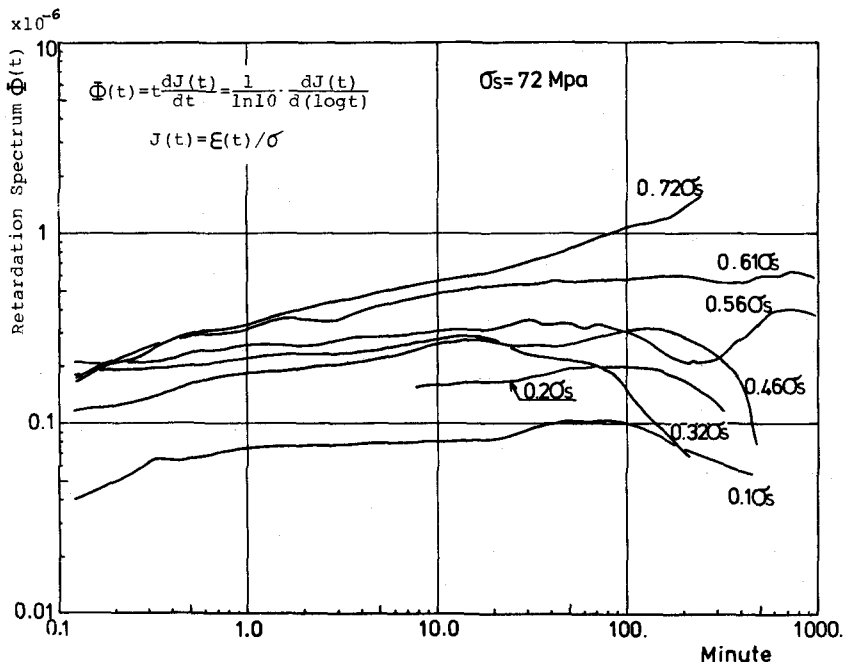


図-3 神戸層凝灰岩の遅延スペクトル

うに、クリープの時間経過の様子は、図-3の遅延スペクトルによってきわめて微細に、そして、増幅して観察できる。スペクトルの形が平らなのは、先述のようにクリープが(2)式で表わされる場合に相当し、これはクリープ変形が永久に続くことを意味する。右下りの場合は、クリープが有限時間内に収束する場合である。右エリの形は定常クリープおよび加速クリープを表わしている。ただし、これらの結果だけからクリープ特性の応力依存性を定量的に論ずることは困難である。

(2) フリープひずみの応力依存性

クリープひずみの応力に対する線形、非線形性の限界を知るために図-4を求めた。図の縦軸は、クリープひずみをクリープ応力で除して正規化した値を、同じく正規化した $0.2\sigma_s$ のクリープひずみで除した値である。すなわち、 $0.2\sigma_s$ までは線形であるという前提のもとに、それ以上のクリープ応力に対するひずみの非線形性の時間的経過がこの図から見取れる。特筆すべきことは、高応力でのクリープひずみの非線形性の度合いが、経時的に増大していることであろう。もし、非線形ひずみとは

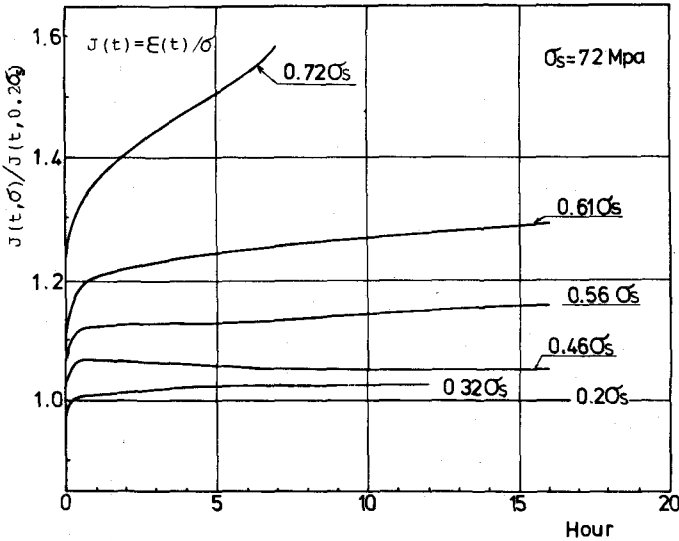


図-4 フリープ曲線の非線形度

材料の部分的降伏による塑性ひずみの発生によるものであるとすれば、この図は降伏が経時的に遅延して起っていることを示しているものと考えることができる。 $0.46\sigma_s$ 以下では、非線形度が時間的にほとんど変化しておらず、またその値も1.0に近いので、ほぼ線形の領域に属しているものと考えて良いであろう。そのことは、等時応力-ひずみ曲線として整理するとさらに良くわかる。 $t=0, 30, 420$ 分 に対する関係曲線を示したのが図-5である。いずれの経過時刻に対しても、 $0.46\sigma_s$ まではクリープひずみが応力に対して線形と見なせるであろう。そして関係の非線形性

性は、経過時間が大きい程顕著になる。このことは、通常の載荷試験におけるひずみ速度あるいは載荷速度依存性と関連する。

さて、以上の結果より、データ数が少ないので大體把な解釈しかできないが、 $0.46\sigma_s$ までは線形クリープで、それらに対しては線形粘弾性理論の適用が可能で、一般化レオロジーモデルによってその構成化が可能である⁵⁾ことがわかる。そして、それ以上の応力に対

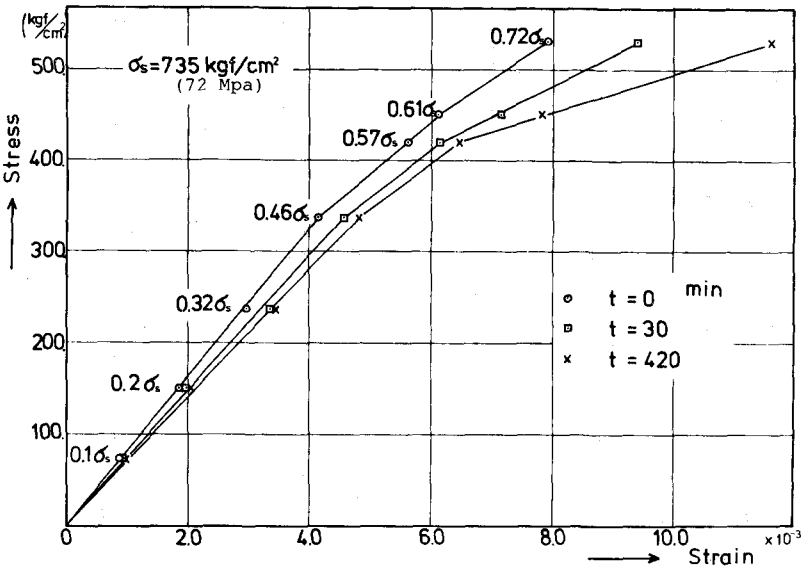


図-5 等経過時刻でのフリープひずみ-応力関係曲線

しては、塑性ひずみの混入する割合が徐々に増加する。したがって、線形クリープから非線形クリープへの移行を判断する降伏規準をここに導入するとなると、厳密には降伏は応力的にも経時的にも逐次起っていると考えられるので、降伏の定義そのものに非常な困難を伴う。そのためにはさらに新しい知見を必要としよう。

(3) フリーポアソン比

フリーポアソン比の間、ポアソン比がどのように変化するかを調べたのが図-6である。結果によれば、 $0.46\sigma_s$ までの低応力下でのクリープではほぼ一定、 $0.57\sigma_s$ ではわずかな増加傾向を示し、 $0.61\sigma_s$ ではその経時的増加はきわめて顕著である。線形粘弾性理論によれば、ポアソン比 $\nu(t)$ はラプラス変換形でクリープ関数のせん断成分 $G(t)$ および体積成分 $K(t)$ と次の関係にある。

$$\bar{\nu}(s) = \frac{3\bar{K}(s) - 2\bar{G}(s)}{s\{6\bar{K}(s) + 2\bar{G}(s)\}} \quad (4)$$

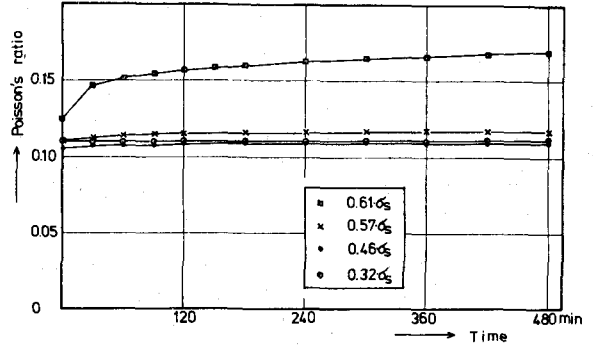


図-6 ポアソン比の経時変化

式(4)において、ポアソン比が時間的に一定であるということは、 $G(t)$ も $K(t)$ も同じ関数形となり、体積変形もクリープすること意味する。一方、 $\nu(t)$ が $0.61\sigma_s$ の場合のように指数関数的に増加するということは、どちらかの関数が一定という条件が得られ、たとえば、 $K(t) = \text{Const.}$ すなわち塑性変形の卓越の結果であるという判定がなされよう。したがって、この結果から降伏応力は $0.6\sigma_s$ 程度と判断することも可能である。

(4) 除荷試験

実際の構造解析に用いるモデルを形式化するためには、載荷過程のみならず、除荷過程をも考慮しうるものでなければならない。今回はその過程を詳細に検討する余裕はないので、最終的な結果である全回復ひずみと残留ひずみの応力依存性について図-7にまとめた。結果によれば、回復ひずみは降伏領域に到るまで線形的であり、これは降伏域でも粘弾性的変形が継続することを示している。一方残留ひずみは低応力下でもわずかながら見られ、降伏域で急激に増加している。

5. 結論

岩石のフリーポアソン比は、線形粘弾性的領域、非線形性が応力にのみ依存する領域として非線形性が応力のみならず経時的にも変化する領域に分けられる。その他得られた知見の詳細は次頁の英文要旨にまとめて示す。

参 考 文 献

- 1) 赤井、足立、西：堆積軟岩（多孔隙凝灰岩）の時間依存性と構成式、土木学会論文集、No. 282、1979
- 2) 平井、佐武、柳沢：軟岩の時間依存性の応力-ひずみ関係、第14回岩盤力学シンポジウム、1982
- 3) 桜井、土居、西野：軟岩のクリープ、第13回工質工学研究発表会講演集、pp. 1113~1116、1977
- 4) 市川、黒田、赤木、川本：A Nonlinear Rheological Analysis of Deeply Located Tunnels, Int. J. Num. Anal. Meth.
- 5) 赤木：岩石のフリーポア特性と一般化オロジ-モデルの適用、材料、No. 336、1981 [in Germanics (投稿中)]
- 6) 吉田、安江、吉中：神戸層の性質について、第1回岩の力学固めシンポジウム、pp. 156~169、1984

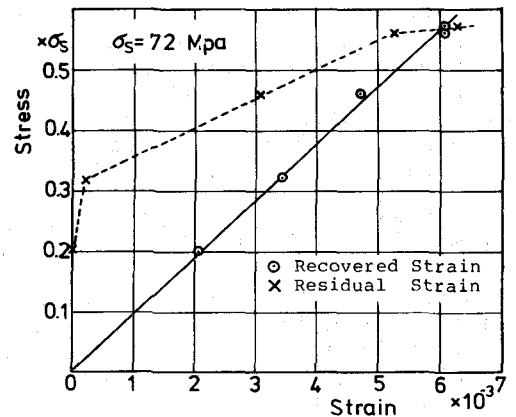


図-7 回復ひずみと残留ひずみ

(図中、残留ひずみのひずみスケールは $1/10$)

(13) Nonlinear Creep Properties of Rock

Tomoyuki Akagi
Toyota National Technical College
Eisei-cho 2-1, Toyota, Aichi, Japan

A series of uniaxial compressive creep tests under seven stress levels have been performed on cylindrical specimens of Kobe layer sandy tuffs in a room of constant temperature and moisture (19°C, 20°C, 80–85%). The magnitude of creep stresses are as follows; $0.1\sigma_s$, $0.2\sigma_s$, $0.32\sigma_s$, $0.46\sigma_s$, $0.56\sigma_s$, $0.61\sigma_s$, $0.72\sigma_s$, where σ_s is unconfined compressive strength and 72 Mpa. Axial and hoop strains were measured by polyester strain gauges using an auto-digital-strainmeter and auto-timer.

The test results obtained as seven creep curves in Figure 1 were rearranged in other kind of figures which are the creep strain rate-time relations in Figure 2, the retardation spectra in Figure 3, the time dependency of nonlinear strain in Figure 4, the stress-strain curves at any times after loading in Figure 5, the time variation of Poisson's ratio in Figure 6, the stress dependency of recoverable strain and residual strain in Figure 7.

Throughout these results, the following conclusions are summarized.

1) The retardation spectra take three types of figure depending on the creep stress level,

(1) an increasing type with time for high stress levels over $0.72\sigma_s$,

(2) a flat type for middle stress levels of $0.56 \sim 0.61\sigma_s$,

(3) a decreasing type for low stress levels below $0.46\sigma_s$.

It is suggested that an increasing type of spectrum appears for stationary creep, a flat type of spectrum corresponds to logarithmic creep which its process continues till infinite time, a decreasing type of spectrum means linear transient creep.

2) The creep stress and creep strain are linear relations up to a stress level of $0.46\sigma_s$ at any lapse of time.

3) These stress-strain relations for high stress levels over $0.56\sigma_s$ are nonlinear, and the degree of nonlinearity becomes remarkable with the lapse of time.

4) Although Poisson's ratio is independent of time up to $0.5\sigma_s$, it is remarkably increase with time under high stress levels over $0.61\sigma_s$.

In the results, the creep behavior of sandy tuff is classified to three regions depending on the creep stress levels,

(1) a linear creep region under low stress below $0.46\sigma_s$,

(2) a nonlinear creep region for the stress but which stable for the lapse of time,

(3) a nonlinear creep region which the nonlinearity is variable with the lapse of time in spite of the stress is constant.