岩石のクリープ特性の一評価方法について

豊田工専　（正）°赤木知之
豊田工専　　　　水谷憲彦

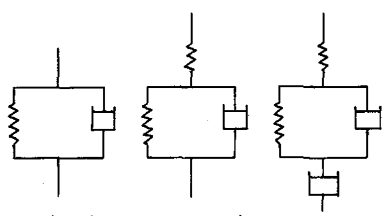
1．まえがき

岩盤および地盤の時間依存変形特性を考慮した解析的研究は，最近，特に盛んなように見受けられるが，その特性の評価を重点的に論じようとした研究は，あまり見られない。汎用的な設計基準においては，単にクリープ係数として処理されているのが現状である。材料のクリープ特性が特に重要なものとして扱われ，クリープ実験が行われた場合でも，その結果を片対数紙上にプロットし，次式による評価が妥当であったとか，折線あるいは

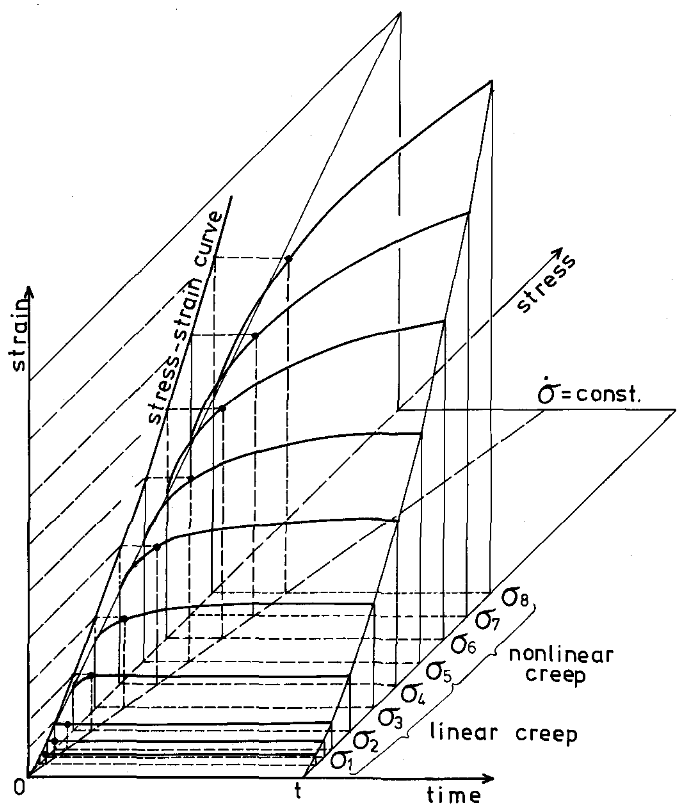
$$\varepsilon(t) = a + b\log(t+1) \tag{1}$$

曲線になって妥当でなかったとかで終らせる場合が多いようである。式(1)は，線形性の成立する範囲でのクリープに広く用いられている表示式であるが，村山[1]は，微視的立場から定数 b の内容を明らかにし，非線形の領域までその適用性を拡張しているし，赤木[2]は，その物理的意味についても触れている。そのような意味では，式(1)は簡明でもありきわめて貴重なクリープ評価式であると言える。しかし，その適用の妥当な場合がきわめて少ない難点がある。一方，図－1に示すようなレオロジーモデルによる評価も，従来から多々行われているが，これらのモデルでは，いわゆる単なるモデルとして現象にあてはめられるだけにすぎない。

より意味の深いクリープ評価を行うためには，やはり，材料の全特性を把握することを最終目的とし，その一部としてのクリープ特性を掴み出す必要があるように思われる。一例として，種々の応力レベルで一軸圧縮クリープ試験を行なうとこうなるであろうと思われる結果を，応力－ひずみ－時間空間に描いてみた(図-2)。離散的に描いてあるが，これから連続的曲面を連想することは易いであろう。模式図であるが，このような曲面を作ることによって応力·ひずみ曲線の深い意味も探ることができることに注意して頂だきたい。この模式図を，実際の材料の特性曲面として作り変えることが，材料の本質的な特性評価につながることになるように思われる。このような曲面



図－1　レオロジーモデル

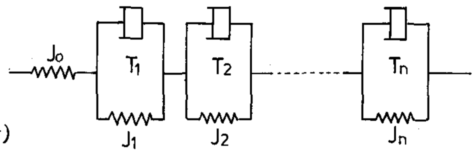


図－2　応力－ひずみ－時間曲面

は，材料によって千変万化の様相を示すであろう。クリープ係数とか，式(1)などの単純な方法では，とても分類すらできない。材料の応力－ひずみ－時間関係の特性を明快に分類できる方法を見出すためには，物理的意味の明確な指標を導入する必要があるように思われる。

我々は，岩石の単軸クリープ実験を種々の応力レベルについて数多く行いつつあるが，それぞれの結果を図－3に示した一般化レオロジーモデルによって評価してみようと思っている。このモデルは，図－1のモデルを一般化したものであるが，このモデルによれば，クリープを材料内部の様々な変形機構の重ね合わせとして評価でき，いわゆる物理的意味を持った定数によりクリープ特性の評価が可能となる。本報告では，クリープ実験曲線からこの一般化モデルの定数を実用的に決定する方法を提案し，砂岩のクリープに実際に適用した例を示す。一見，これらのモデル定数を決めることは，繁雑に思えるかも知れない。しかし，こうして決められた定数を指標とし，多種にわたる岩石等の材料のクリープが整理され，また，応力レベルによるその定数の変化の仕方などを明らかにすれば，最終的にはクリープのメカニズムに対する考察も可能になるのではないかと筆者は考えている。

2.　一般化レオロジーモデルによるクリープ関数



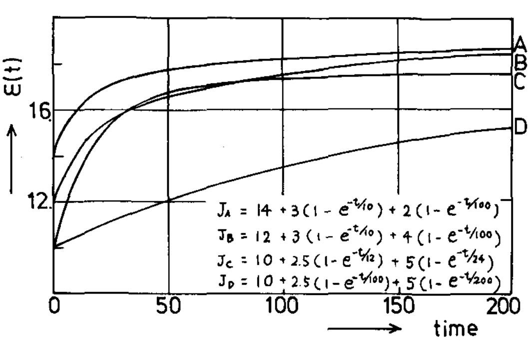
図－3　一般化レオロジーモデル

定荷重を瞬間的に載荷するクリープ実験を考えているから，いま，一般化レオロジーモデルにステップ入力$\sigma(t)=\sigma_0\cdot 1(t)$を与え，そのひずみ応答を調べるとつぎのように表わされる。

$$\varepsilon(t)=J(t)\cdot\sigma_0 \quad , \quad J(t)=J_0+\sum_{i=1}^{n}J_i\left(1-e^{-t/T_i}\right) \qquad (2)$$

$J(t)$はクリープ関数と呼ばれる。土木材料に関する従来からの多くのクリープ実験曲線は，式(2)によって評価することが可能である。たとえば，適当なクリープ関数をいくつか仮定してそのクリープ曲線を図－4に描いてみた。定数のとり方によって様々なクリープ曲線が描けることがわかるであろう。すなわち，モデル定数，J_0，J_i，T_i　($i=1,2,\cdots,n$)を決めることによって，材料のクリープ特性が明らかにされることになる。

ところで，このモデル定数の物理的意味について考えてみよう。モデルは，1個のバネとn個のフォークト要素が直列に連結されたものである。いま，定応力σ_0が瞬間的に作用した場合，式(2)において$t=0$とおけば明らかなように，その瞬間的応答はJ_0のみに依存し，そのときの応答ひずみεより定数J_0は$J_0=\varepsilon(0)/\sigma_0$として定められる。$J_0$は厳密な意味での材料の弾性定数(コンプライアンス)に相当する。やがて，時間の経過とともに各フォークト要素の変形が進行する。J_i　($i=1,2,\cdots,n$)はそれぞれの要素の絶対的変形量を決める定数であり，T_i　($i=1,2,\cdots,n$)は遅延時間と呼ばれ，それぞれの要素の変形を遅延させる時間的尺度を決める定数である。全変形量はこれらの総和となって現われるが，それぞれの要素の遅延機構はその要素の遅延時間T_iに相当する経過時間の付近で卓越する。一般化レオロジーモデルに対するこのような解釈は，実際の材料内部のクリープ変形機構と対応づけることができる。たとえば，岩石の変形は，原子，分子，結晶，鉱物および岩石塊それぞれの粒界，あるいは，気泡，含有水の移動，さらにはマイクロクラックの拡大など，それぞれの領域での変形特性が重なり合って現われるものであろう。このような様々な粒界は種々の変形遅延要因を作り出し，その要因が1個1個のフォークト要素に対応すると考えられる。したがって，この変形を遅延させる機構を，その種類(nの値)と特性(J_i，T_i)として分類できれば，モデル定数は物理的意味をもって決定されたと言えるであろう。



図－4　クリープ関数の例とそのクリープ曲線

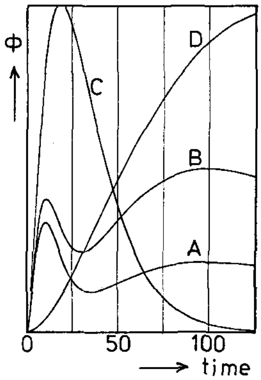
3．遅延スペクトルによるモデル定数の決定

このように物理的意味づけがなされたモデル定数を，クリープ実験曲線から実際にどのように決めるか，その具体的方法について考えてみよう。上記の一般化レオロジーモデルに対する概念は，遅延機構が離散的に存在するという仮定に立脚するが，厳密には，その大小は別として連続的に存在すると考える。結果として，クリープ関数はつぎのように書き表わされる。

$$J(t)=\int_0^\infty \Phi(\tau)(1-e^{-t/\tau})\,d(\ln\tau) \qquad (3)$$

ここに，$\Phi(t)$は遅延スペクトルと呼ばれる。式(3)を反転すると$\Phi(t)$を与える漸近式が得られ，そのもっとも粗い近似式はつぎのように表わされる。

$$\Phi(t)=t\frac{dJ(t)}{dt}=\frac{dJ(t)}{d(\ln t)} \qquad (4)$$



図－5　遅延スペクトル

遅延スペクトルとは，τ_iの遅延時間に対する分布関数であると解釈できるから，任意のクリープ関数に対して式(4)の計算を行い，その結果を時間軸に対してプロットすると，材料の中に密接して存在する機構のうち，卓越する機構のτ_iのところで山をなすはずである。例として，図－4に示したクリープ曲線の遅延スペクトルを式(4)によって計算してみた。その結果を図－5に示すが，与えた遅延時間のところでピークを示しているのがわかる。また，近接した遅延時間の場合は，1つの山に重なってしまっている。これは式(4)が近似式であることによるが，実際問題としては，このように密接した遅延機構は1つの機構に代表させて考えて十分である。

結局，実験クリープ曲線を数値微分し，式(4)より近似遅延スペクトルを求め，識別できる山の数をフォークト要素の数とし，山のピークの位置を示す時間からτ_iが決められることになる。それぞれの機構のJ_iの値は，$(1-e^{-t/\tau_i})$を各時刻について計算し，その時刻の実験ひずみ値に最小2乗法を適用して決められる。なお，この方法の詳しい手順については，著者がすでに報告している[2)]。このようなモデル定数の決定法は，最初から所定の要素数のモデルを決めてそれに実験値を強引にあてはめる方法と違って，実際の材料挙動に応じてモデルが定められるので，その定数の物理的意味，あるいは，機構の詳しい内容に対する考察はきわめて有効なものとなろう。

ところで，本報告ではクリープ全過程に現われる全ての機構を一度に決めることをせず，遅延時間τ_iの小さい機構から順番に決めて行く簡便な方法を考えてみることとする。ある経過時刻におけるクリープひずみ値に各機構が如何に寄与するかを考えた場合，その時刻に対しきわめて小さい遅延時間を持つフォークト要素はバネに退化し，大きい遅延時間を持つ要素はダッシュポットに退化することがわかる。したがって，クリープ過程を段階別の時間領域に分けて，それぞれの領域でのクリープ挙動を評価すると，それは図－1のBürgerモデルによるクリープ関数によって表示できる。たとえば，τ_2の時間領域では，τ_1の機構はバネに退化し，τ_3より大きい遅延時間の機構はダッシュポットに退化するので

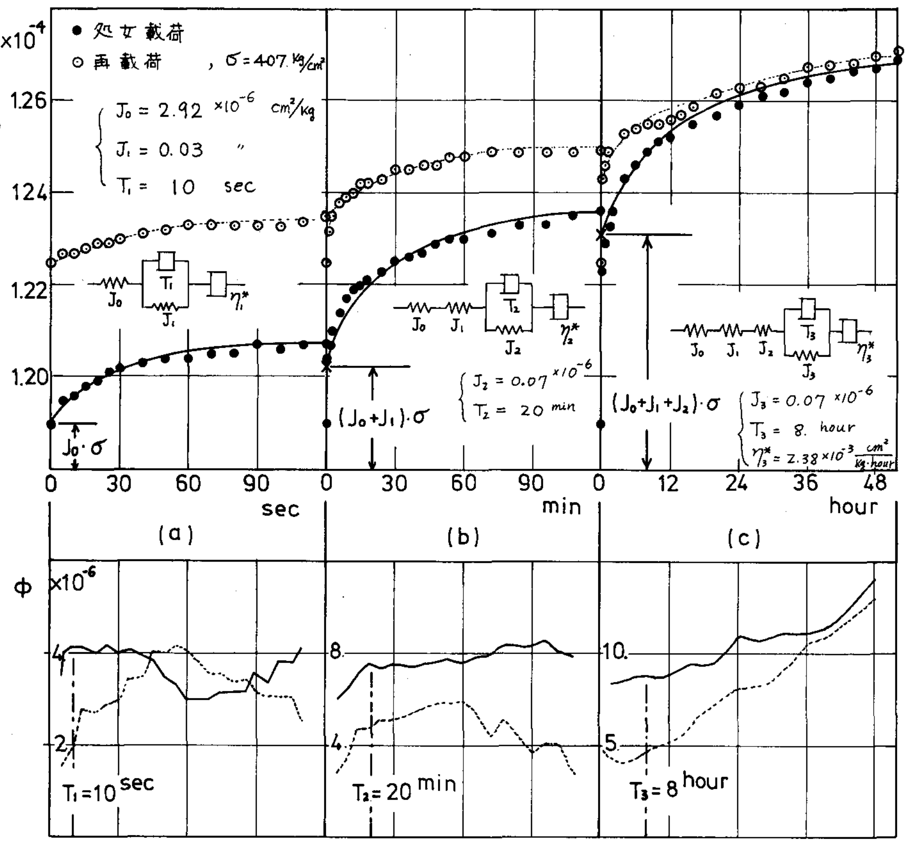
$$J(t)=(J_0+J_1)+J_2(1-e^{-t/\tau_2})+\frac{t}{\eta^*} \qquad (5)$$

と表わされる。そこで，この領域でのクリープ曲線の終端での勾配からη^*を求め，遅延スペクトルよりτ_2を決め，そしてJ_2が決定される。同様の手順でより大きい機構が順々に求められるが，どこまで決めるか，あるいは，最終的な表示式をどうするかは，研究の目的によって判断すればよい。測定がクリープ過程の途中で打切られた場合は，決定されたクリープ関数にη^*が残るが，その場合のη^*には物理的意味は無く，あくまでもダミー定数であることを認識しておかなければならない。また，これでは最初からBürgerモデルで評価するのと同じことではないかという異論もあるかも知れないが，最初からBürgerモデルを考えるのと，結果としてBürgerモデルになるのとでは，大違いであることも強調しておきたい。

4．実験結果の一例

供試体とした砂岩は，名古屋の石屋で購入した砥石で，産地は不明。一軸圧縮強度は8個平均で1893 kg/cm²，単重2.5 g/cm³，真比重2.65，含水比0.56 %，寸法ϕ 5 cm × 10 cm である。試験装置はレバー比1:200 のレバー式圧縮クリープ試験機（最大荷重20 ton）。載荷応力407 kg/cm² に対する52時間までの結果を図－6に示す。また，図には52時間載荷後除荷し，ひずみ回復後再載荷した結果も示した。時間領域は秒，分，時間に区分してある。先述した手順に従って決定したモデル定数とそのクリープ曲線も同図に示す。

以上の結果から得られる知見を整理すると，少なくとも次の2つの事が特に取上げられそうである。1つは，それぞれの時間領域に分けてモデル定数を決めることにより，実際の応用に必要となる時間の領域のクリープ曲線（C図）において仮定すべき初期ひずみ値を$(J_0+J_1+J_2)\cdot\sigma_0$として客観的に決めることが可能となることである。さらに1つは，処女載荷のクリープ曲線と再載荷のそれとを比較すると，明らかに硬化現象が見受けられるが，いま，再載荷の初期ひずみ値と（C）図の初期ひずみ値とを比較すると，ほぼ同じ値であることに気付く。このことから硬化現象にある解釈を与えることができる。すなわち，載荷により時間とともにひずみが増加することによって，遅延機構が実際にバネに退化し，それが非可逆的に進行するから硬化現象が起こるのではないだろうか。もちろん，もっと多くのデータを示し，様々の角度からそれらを整理してみないと，説得力のある議論はできない。ただ，強調したいのは，クリープ実験結果を本報告で提案するような方法で整理すると，材料の変形特性あるいはそのメカニズムに対する様々な考察が可能になるのではないかということである。今後，さらに実験を繰り返し，岩石の種類，載荷条件などを変えることによって定数がどのように変化するかを調べ，まとまり次第，次の機会に報告したい。なお，本実験は，文部省科学研究費の補助を得て行っていることを付記する。



図－6　砂岩のクリープ曲線と遅延スペクトル，および，その解析結果

参　考　文　献

1）．村山，柴田：粘土のレオロジー的特性について，土木学会論文報告集，No. 40，1956，pp. 1〜31

2）．赤木：レオロジーモデル定数の一決定法，土と基礎，vol. 25，No. 229，1977，pp. 47〜52

On a Method of Evaluation of Rock Creep Property

by Tomoyuki Akagi
Yoshihiko Mizutani
Toyota Technical College

Abstract

It is convenient that use the rheological models to analyze the time dependent behaviour of rock-ground. But we must recognize that the analytical results depend on the model constants. Therefore, studying the method of evaluation of the model constants is important.

Many rheological models have proposed from ancient times. Maxwell, Voigt, Zener and Burger used Original models to interpret the behaviour fo viscoelastic materials. These models represent the restricted behaviour of viscoelastic materials, but can not represent the general property of the materials.

The generalized rheological model is convenient to explain with physical significance the creep property. This paper propose a method of evaluation of creep property based on the generalized rheological model. In the result, the creep property of rock is interpreted by the indexes J_0, J_i, T_i $(i=1,2,\cdots,n)$ and number n. J_0 means instantaneous response. T_i is retardation time of i-th creep mechanism and J_i is its intensity. n is number of creep mechanism.