V—11　土木材料のクリープ特性を評価する一方法

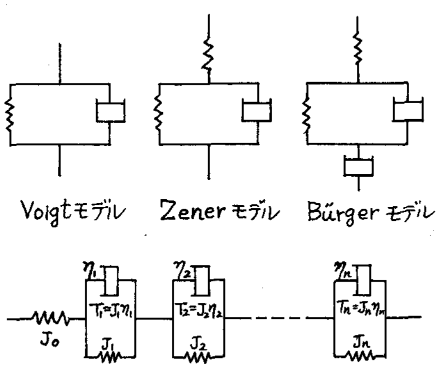
豊田高専　(正)　赤木知之

1. まえがき

コンクリートのクリープ特性は、その配合，生成条件，および，環境(温度，湿度)，載荷材令などの様々な条件によって多様に変化することは良く知られている。それらの変化の様子は，クリープひずみ値の違いとして端的に知ることができるが，クリープ特性として評価するためには，何らかの指標を導入する必要がある。クリープ係数は，目的とするある時間での変形量を直接知るに便利であるが，途中経過を把握するには難があり，また，特性の一面だけをとらえているにすぎない。次式は

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

線形性の成立する範囲でのクリープに対し，米国開拓局で採用されているクリープ表示式であるが，現象を簡明に図示でき，定数a，bも簡単に求まるので，日本でも頻繁に用いられており，主流をなしている表示式と言える。しかし，実際に式(1)を適用してみるとわかるが，式(1)の評価が妥当でない場合が多い。すなわち，片対数紙上で直線とならず，折線になったり，ときには曲線になることすらある。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，多々行なわれている。当初は，これらのモデルも，いわゆる単なるモデルとして現象にあてはめられていただけであるが，のち，M.A. Biot によりこれらのモデルが一般化され，クリープ現象を材料内部の変形機構の重ね合わせとして評価する，いわゆる一般化レオロジーモデルの物理的意味が明らかにされた。一般化モデルによると，クリープ現象を単なるモデルで説明するだけに留まらず，その評価によって決定される定数の物理的意味を明確にすることができる。本報告は、クリープ実験曲線から一般化レオロジーモデルの定数を，慣用的に決定する方法を提案するものである。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が指標として一般的に採用され，多種にわたるコンクリートのクリープに適用され整理されるならば，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。



一般化レオロジーモデル

図－1

2. 一般化レオロジーモデルによるクリープ関数

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。

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

$J(t)$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。すなわち，材料のクリープ特性は，モデル定数，J_0，J_i，T_i（$i=1,2,\cdots\cdots,n$）を決めることによって明らかになることがわかる。

つぎに，これら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モデル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T_iに相当する経過時間のところで卓越する。一般化レオロジーモデルに対するこのような解釈の仕方は，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。すなわち，材料の変形は，原子，分子，結晶，鉱物，および，骨材(岩石塊)それぞれの粒界，あるいは，気泡，含有水が移動するマイクロクラックの拡大などの，それぞれの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）とそれぞれの特性（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ることになる。

3．遅延スペクトルによるモデル定数の決定

上記の概念は，遅延機構が離散的に存在するという仮定に立脚するが，普通は，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。

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

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。

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

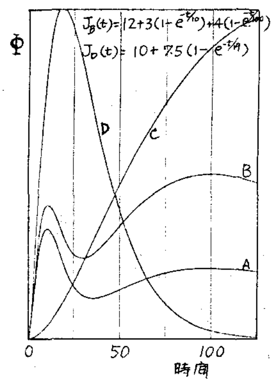


図-2　遅延スペクトル(例)

遅延スペクトルとは，J_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)の計算を行ない，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T_iのところで山をなすはずである。図-2に若干の例を示す。

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をT_iと決め，$(1-e^{-t/T_i})$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J_iが決まることになる。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，機構のメカニズムに対する考察はきわめて有効なものとなろう。