

1. まえがき

種々の材料のクリープ特性に関する実験的研究が従来から数多く行なわれている。それらの結果を大雑把に整理すると、一般的なクリープ特性のパターンが図-1のように示される。さらに、その特性を機械的挙動の違い、すなわち挙動を特徴づける物理的特性の違いにより分類すると、大きく2種類のクリープ曲線群に分けることができる。

1つは、向題とする期間内に破壊に到らないクリープで、クリープひずみがある値に収束する、いわゆる遷移クリープと呼ばれる挙動を示すものである。この特性は低応力下でのクリープに見られ、その中でも応力レベルの高位により線形のもの(図-1の曲線群I)と非線形のもの(曲線群II)を含む。これらのクリープ曲線は、種々の遅延時間で特徴づけられる機構の重ね合わせとして評価する、いわゆる線形粘弾性理論の範ちゅうで取扱いが可能である(図-2のレオロジーモデル)。たとえば、図-1のIIに分類されるクリープでは、一時的にそのひずみ速度が定常的になるものも含まれ、とにかく向題とする期間内には絶対破壊まで到らないという前提の基に、定常クリープとしての評価は行なわず比較的長い遅延時間を持つ機構を考えることによって、この種の挙動を評価できる<sup>1),2)</sup>。

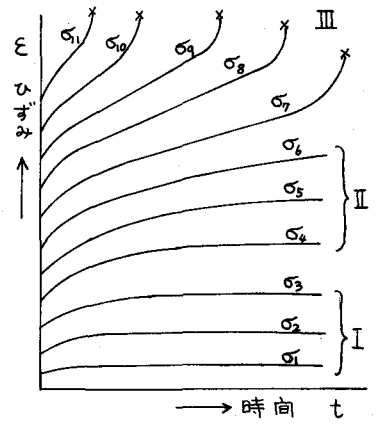


図-1 クリープ曲線の分類

クリープ特性の分類の他の1つは、図-1に示される曲線群IIIに相当するもので、向題とする期間内にクリープ破壊を起すものである。高応力下で発生し、クリープ破壊を起さない低応力下のクリープとの境にある限界の応力値が存在する。このようなクリープ特性の評価には、変形の他に破壊の条件をも考慮する必要があるので、分類Iの低応力下でのクリープのように線形粘弾性理論による取扱いは不可能であり、系統的な評価手法の確立はきわめて困難なものとされている。また、破壊を取扱うため材料の強度が向題とされるが、岩石のような材料では内部に含まれる亀裂等の状態がその強度に大きく影響すると思われるので、クリープ破壊を一般的に取扱うためには確率過程としての処理が必要になる。しかし、ある特定のクリープ過程を向題とする場合は、一連の過程を現象論的に明らかにすることが肝要と思われる。

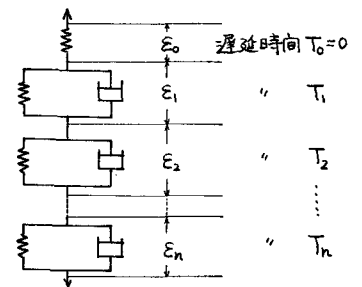


図-2 レオロジーモデル

本報告では、クリープ破壊まで含めた一連のクリープ過程を、材料内部の亀裂の進展と結びつけて評価する一方法について考察する。

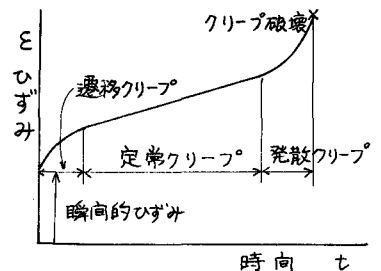


図-3 クリープ破壊を起すクリープ曲線の一般的パターン

2. 定常クリープとクリープ破壊

クリープ破壊を起すか起さないかの限界となる応力値は、材料固有の定数としてきわめて重要なものとなるが、岩石のような材料ではそれ

を決定的に評価することはほとんど不可能と思われる。しかし、クリープ過程の最初の挙動を知って、その将来の過程を予測することはできそうである。すなわち、限界値以上の応力がいま材料に負荷されたと仮定した場合、その材料が将来クリープ破壊に到るか到らないかは確率的な問題と考えず、将来必ずクリープ破壊を起すことを前提としてその過程を法則化することを考えるのである。

ところで、クリープ破壊を起す場合のクリープ曲線(図-1のⅢ)の過程を、従来における数多くの実験的事実から整理すると図-3に示されるように分類されることが知られている。すなわち、載荷後わずかな時間の間に生ずる比較的大きなひずみに続いて若干の遷移クリープが見られ、その後ひずみ速度がほぼ一定の定常クリープが比較的長く続き、やがてひずみ速度が急激に増加する加速クリープが起ってクリープ破壊に到る。もちろん、全過程の所要時間は応カレベルが高くなるにしたがって少なくなる。

さて、このような種類の過程が組み合わさったクリープ曲線を一括して評価の対象とすることは、きわめて困難であろう。そこで、図-4に示すように、ひずみ量の小さい遷移クリープひずみを瞬時的ひずみに含め、継続時間の短い加速クリープを無視して加速クリープの始まる時点をクリープ破壊と考え、全過程を定常クリープで代表させて評価する方法を考える。

定常クリープの表示式としては、従来からつぎのような指数関数およびべき関数がよく用いられ、実験結果とも良好に一致することが示されている<sup>3), 4), 5)</sup>。若干の結果を図-5、図-6に引用する。

$$\dot{\epsilon}_s = A \exp(B\sigma) \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}_s = k\sigma^n \quad (2)$$

ここに、 $\dot{\epsilon}_s$  は定常クリープ速度、 $\sigma$  は応力、 $A, B, k, n$  は材料固有の定数である。式(1)は Eyring の速度過程理論をもとにして導かれる<sup>4)</sup>。したがって、粘土のクリープに肉する村山ら<sup>3)</sup>の研究、および、栗原の研究<sup>4)</sup>では、粘土の定常クリープが Eyring 粘性にもとづくものであることを前提としている。さらに、Eyring の速度過程理論から定常クリープ速度とクリープ破壊時間(図-4の  $t_f$ )との間につきのような関係が導びくことができる<sup>4)</sup>。斎藤ら<sup>6)</sup>は式(3)の関係を実験的に明

$$\dot{\epsilon}_s \cdot t_f = \text{constant} \quad (3)$$

らかにした。現在では粘土のクリープ破壊について式(3)の関係が存在することを一般的に認めているようである。

式(2)は金属のクリープについてよく用いられ、一般的に Norton の法則と呼ばれている。現象論的に提案された式である。

桜井によるセメントモルタルのクリープ実験(図-6)では、2時間以内に破壊しない定常クリープは式(1)で説明され、2時間以内にクリープ破壊するものは、まったく確率的過程を示すとしている。2種類の挙動のメカニズムの違いとして、桜井は、前者は Eyring 粘性によるクリープで、後者は試料内部のマイクロクラックに起因するものと説明している。

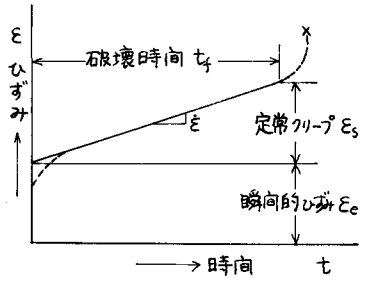


図-4 クリープ破壊を起すクリープ曲線の理想化

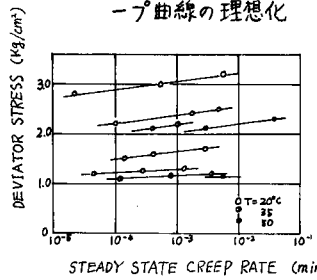


図-5 粘土の定常クリープ速度の応力依存(栗原<sup>4)</sup>)

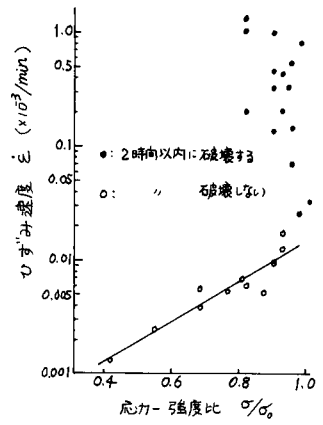


図-6 セメントモルタルの定常クリープ速度の応力依存(桜井による<sup>5)</sup>)

ところで、筆者は、定常クリープは試料の種類に関係なく試料内部の亀裂が進展することによってのみ生じると考えている。したがって、図-6の例でも2時間以内に破壊しないデータが定常クリープ式(1)で説明できるとして、果して全過程が定常クリープ過程を示すかどうか疑問である。多分、これらのクリープは2時間以後も破壊に到らず、あるひずみ値に収束するような気がする。もしそうだと仮定すれば、これらのクリープは図-1の曲線群IIに分類される種類のものと考えて良いであろう。

クリープ変形が定常化するということは、ひずみが Constant に増加することである。固体は無限に変形し続けられるものではないから、定常クリープは、やがてある形態の変化を伴う極限に達するはずである。その極限をクリープ破壊とすれば、クリープが定常クリープ過程に入った段階ですでに将来のクリープ破壊を約束する決定的な変化が内部に生じていなければならないと考えられる。そのような立場では、式(3)の存在はきわめて好ましい。しかし、その根拠を Eyring の速度過程論によるとするには、若干の抵抗を感じる。

たとえば、斎藤らは実験的に明らかにした式(3)を基に、斜面崩壊の予知を研究しているが、斜面のクリープ崩壊のメカニズムは、つぎのように説明することができる。すなわち、いままで安定を保っていた斜面が、外力の増加、雨水による土の単重の増加、および掘削などにより土中のせん断応力を増大させたり、あるいは、吸水による粘土の膨張、および向疎水圧の作用などにより土中のせん断強さを減じたりすると、せん断応力がある部分のせん断強さを越え局所的な破壊を起す。斜面が一旦このような状態に陥ると、人為的な対策を施さない限り土中の局所的な破壊はつぎつぎと広がり、やがてある連続した破壊面を形成して斜面全体の崩壊となる。したがって、このような局所的な破壊の進展が定常クリープ、さらにクリープ破壊のメカニズムとして説明できれば、セメントモルタルのクリープ破壊に対する桜井の解釈とも合致し、今後のクリープ実験を行なうにあたって採るべき方向を示唆することができるであろう。

以上のような前提のもとに、定常クリープおよびクリープ破壊に対する若干の考察を つぎに示す。

### 3. 内部亀裂の進展の結果としての定常クリープおよびクリープ破壊

いま、予想される最終的な破壊面の全面積を  $A$  と表わし、破壊が進展していく過程の剥離面積を  $A - A_{net}(t)$  とする。すなわち、 $A_{net}(t)$  は破壊セグに残って外力に抵抗する、いわゆる有効面積を表わすものとする。そうすると、最初 ( $t=0$ ) は  $A_{net}(0) = A$  であり、最後のクリープ破壊では  $A_{net}(t_f) = 0$  と表わすことができる。つぎに、次式で表わされるパラメータ  $\beta$  を導入すると、

$$\beta(t) = \frac{A - A_{net}(t)}{A}$$

上述の破壊過程は

$$\left. \begin{array}{l} t=0 \text{ で } \beta(0) = 0 \\ t=t_f \text{ で } \beta(t_f) = 1 \end{array} \right\}$$

と表わされる。

一オ、外力の大きさを  $P$  とし、 $P$  が時間的に変化しないものとする、相当する平均応力  $\sigma$  はつぎのように書き表わされる。

$$\sigma A = \sigma_{net}(t) \cdot A_{net}(t) = P \quad (6)$$

すなわち、亀裂が進行するに伴ない未破壊面の面積が減少し、外力に釣合う有効応力  $\sigma_{net}(t)$  が増大すると式(6)から解釈される。ということはまた逆に、有効応力が増大するから局所的に弱いところから亀裂が進行すると言える。

ところで、このように考えると、亀裂の進展する速度と増大する応力  $\sigma_{net}$  との間には、何らかの関係が存在す

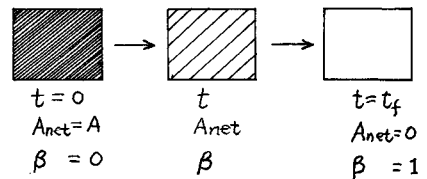


図-7 定常クリープにおける有効面積の減少

るように考えられる。その関係は、当然、実験的な、あるいは、理論的な根拠をもって決められなければならないが、いま、つぎのようなべき関数で近似できるものとする。

$$\frac{d\beta}{dt} = f(\sigma_{net}) = K \sigma_{net}^N \quad (7)$$

一方、式(6)より  $\sigma_{net} = (A/A_{net})\sigma$  であり、式(4)より  $A/A_{net} = 1/(1-\beta)$  なる関係が得られるから、これらより式が導かれる。

$$\sigma_{net}(t) = \frac{\sigma}{1-\beta(t)} \quad (8)$$

式(8)を式(7)に代入して、

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{K}{(1-\beta)^N} \sigma^N \quad (9)$$

変数分離して、0から $t_f$ まで積分すると

$$K \int_0^{t_f} \sigma^N dt = \int_0^1 (1-\beta)^N d\beta \quad (10)$$

$\sigma$ は $t=0$ における負荷応力であり、 $\sigma = P/A$ と全過程を通じて変化しないと考えているから、積分の結果として式が得られる。

$$t_f = \frac{1}{(1+N)K\sigma^N} \quad (11)$$

さて、我々はここで式(2)に示した定常クリープの表示式が式(11)の分母とまったく同等であることを気づく。したがって、もし式(11)の $K\sigma^N$ が何らかの形で定常クリープ速度と関係づけられるものとするれば、式(11)の関係から式(3)の関係の成立を明言して良いと思われる。定数 $K$ 、 $N$ と $n$ などとの関係は、今後、このような観測に基づいた実験的研究をすすめることによって明らかにできるものと考えている。なお、式(11)の関係式は、鋼についてRobinson<sup>7)</sup>が導いたものと一致する。

#### 4. あとがき

定常クリープ現象は材料内部の亀裂が進展することによってのみ起るものと考え、亀裂の進展速度にある仮定を導入することによって、実験的に確かめられているクリープ破壊時間と定常クリープ速度との関係式(3)を誘導することを考えてみた。未だはっきりしない部分もあるが、今後、実験的な確認を進めることによって、クリープ破壊も含めたクリープ過程の評価法の進歩が促されることを期待したい。

#### 参考文献

- 1). 赤木知三: レオロジーモデルの取扱い方法に関する若干の考察, 土木学会論文報告集, No. 257, 1977, pp.127-130
- 2). 赤木知三: レオロジーモデル定数の一決定法, 土と基礎, Vol. 25, 1977, 3, pp. 47~52
- 3). 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
- 4). 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, No. 202, 1972, 6, pp. 59~71
- 5). 桜井春輔: セメントモルタルのクリープ変形と破壊に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No. 217, 1973
- 6). 斎藤・上沢: 土のクリープ破壊に関する実験的研究, 鉄道技研報告 128号, 1960, pp. 1~9
- 7). Robinson, E. L., Effect of temperature variation on the long-time rupture strength of steels, Trans. ASME 74 (1952), pp. 777~780

# Some Considerations about Creep Rupture of Soils and Rocks

by Tomoyuki Akagi

Toyota Technical College

## Abstract

This paper reports that an experimental result on the creep rupture is induced in some considerations.

Usually, the creep curves of rock materials are classified into two groups. The one group is that do not rupture in the expected times, the other group is that cause a creep rupture in the expected times. The latter creep curve indicates three phases formerly creep rupture. These processes of creep are replaced by the stationary creep in this paper. The stationary creep leads to rupture because the materials can not continue deforming permanently.

Author considers that the stationary creep is caused by the propagation of microcracks in rocks. The expansion of microcrack field is related to effective stress that is defined as  $P/A_{net}$ . Where,  $P$  is external force and  $A_{net}$  is net area of unrupturing joint.

We assume that the rate of propagation of microcrack is proportional to a power of effective stress. If external force does not alter during creep process, next expression is obtained.

$$t_f \cdot \dot{\epsilon}_s = \text{Constant}$$

where,  $t_f$  is the time taking to rupture,  $\dot{\epsilon}_s$  is rate of stationary creep. Justification of this equation is admitted in experiment.