

岩石のクリープ破壊予知に関する研究

北海道大学工学部 (正) 石数部 俊郎

北見工業大学 (正) 富長 勇作

1. 緒言

クリープ現象に関しては、金属・コンクリート・岩石等種々の分野で行なわれているが、過去の研究の多くはクリープ曲線の中の定常クリープまでを扱い、クリープ破壊に結びつく3次クリープまでは言及していない。

1974年プロトジヤコフは、実験式ではあるがクリープ曲線の全過程を表わし得る式を発表した¹⁾。プロトジヤコフの式では、4個のパラメーターを含み、プロトジヤコフは3次クリープの変形特性までを考慮することにより4個のパラメーターの値を定めている。

著者等はプロトジヤコフの式に注目し、クリープ曲線を表わし得る一般式からプロトジヤコフの式を誘導し、4個のパラメーターを3次クリープより前の段階で決定する方法を導いた。これにより定常クリープの段階で破壊時が予知できることとなるので、安山岩、砂岩による実験値との比較した結果についても言及する。

2. プロトジヤコフの式の誘導

Fig 1に示したクリープ曲線を表わしうる式として(1)式に示すような無次元項の組合せからなる式を考える。

$$A \left(\frac{t}{t_a} \right)^{\beta} + B \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_1} \right)^{\gamma} = C \quad \text{---- (1)}$$

上式におけるA, B, C, β , γ , t_a は、無次元定数である。

(1)式がFig 1の曲線を表わすためには、 $t \rightarrow t_m$ のとき $\epsilon \rightarrow \infty$ となることが必要である。

$$\therefore A \left(\frac{t_m}{t_a} \right)^{\beta} + B \left(\frac{\infty}{\epsilon_1} \right)^{\gamma} = C \quad \text{---- (2)}$$

(2)式が発散しないためには、 γ が負の数でなければならぬ。ここで $\gamma = -r$ ---- (3) とおくと r は正の数となる。 γ が負のときは(2)式の左辺の第2項は、0となるので定数の間に次式が成立することになる。

$$A \left(\frac{t_m}{t_a} \right)^{\beta} = C \quad \text{----- (4)}$$

(3), (4)式を(1)式に代入することにより次式を得る。

$$A \left(\frac{t}{t_a} \right)^{\beta} + B \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon} \right)^r = A \left(\frac{t_m}{t_a} \right)^{\beta} \quad \text{----- (5)}$$

(5)式の両辺を $A \left(\frac{t_m}{t_a} \right)^{\beta}$ で割ることにより(6)式が得られる。

$$\left(\frac{t}{t_m} \right)^{\beta} + \frac{B}{A} \left(\frac{t_a}{t_m} \right)^{\beta} \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon} \right)^r = 1 \quad \text{----- (6)}$$

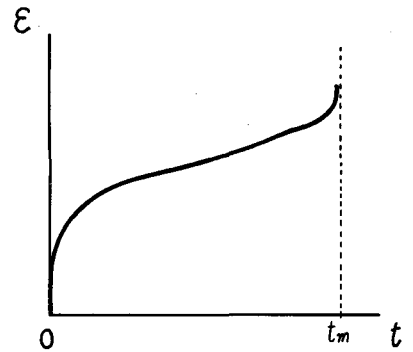


Fig 1 A typical creep curve

Fig 1 のクリープ曲線は原点を通ることになるので(6)式において $t \rightarrow 0$ で、 $\varepsilon \rightarrow 0$ としたときに発散しないことが必要となる。そのためには $\infty - \infty = 1$ のような形にならなければならないので、次の条件がでくる。

$$\delta < 0 \quad \text{かつ} \quad \frac{B}{A} \left(\frac{t_a}{t_m} \right)^\delta = -1 \quad \text{----- (7)}$$

(7) 式の条件を(6)式に入れることにより、プロトジヤコフにより与えられた(8)式を得る。ただし $P = -\delta$ とおき、文字はすべて正の数を表わすようにしてある。

$$\left(\frac{t_m}{t} \right)^P - \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} \right)^n = 1 \quad \text{----- (8)}$$

3. 4個のパラメーター (t_m, ε_1, P, n) の決定法

プロトジヤコフは、クリープ曲線の実験式化という点に重きを置いているため、破壊時 t_m および変曲点の t_n と ε_n および ε/t が最小となる点(3次クリープの領域)からパラメーターを定めている。本研究では、クリープ破壊予知という観点から、クリープ曲線の変曲点の段階まで4個のパラメーターを決定する。以下その方法について述べる。

(8) 式を次のように書き直す。

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \left\{ \left(\frac{t_m}{t} \right)^P - 1 \right\}^{-\frac{1}{n}} \quad \text{----- (9)}$$

(9) 式の両辺に関して自然対数を取ると、 $t \ll t_m$ の範囲では次式が成立する。

$$\ln \varepsilon = \frac{P}{n} \ln t + \ln \varepsilon_1 - \frac{P}{n} \ln t_m \quad \text{----- (10)}$$

ここで

$$a = \frac{P}{n} \quad \text{----- (11)}$$

とおくと、 a は $t \ll t_m$ でのクリープ曲線の両自然対数座標での傾きとして求めることができる。

次に(9)式を t で微分することにより(12), (13)式を得る。

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = a \cdot \frac{\varepsilon_1}{t_m} \left\{ \left(\frac{t}{t_m} \right)^{-P} - 1 \right\}^{-\frac{1}{n}-1} \cdot \left(\frac{t}{t_m} \right)^{-P-1} \quad \text{----- (12)}$$

$$\frac{d^2\varepsilon}{dt^2} = a \cdot \frac{\varepsilon_1}{t_m^2} \left\{ \left(\frac{t}{t_m} \right)^{-P} - 1 \right\}^{-\frac{1}{n}-2} \cdot \left(\frac{t}{t_m} \right)^{-P-2} \cdot \left\{ -\frac{n-P}{n} \left(\frac{t}{t_m} \right)^{-P} + P+1 \right\} \quad \text{---- (13)}$$

クリープ曲線の変曲点での t を t_n と表わすと、変曲点では(13)式が0となることから次式の関係が得られる。

$$t_m = \left(\frac{P+1}{1-\frac{P}{n}} \right)^{\frac{1}{P}} \cdot t_n = \left(\frac{P+1}{1-a} \right)^{\frac{1}{P}} \cdot t_n \quad \text{----- (14)}$$

変曲点でのひずみ ε を ε_n と表わすと、(9), (14)式から次式を導くことができる。

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_n \left\{ \left(\frac{t_m}{t_n} \right)^P - 1 \right\}^{\frac{1}{n}} = \varepsilon_n \left\{ \frac{P+a}{1-a} \right\}^{\frac{1}{n}} \quad \text{----- (15)}$$

変曲点でのクリープ曲線の傾きを $\left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right)_{t_n}$ により表わすと、(12), (14), (15)式から次式の関係が得られる。

$$\left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right)_{t_n} = a \cdot \frac{\varepsilon_n}{t_n} \cdot \frac{P+1}{P+a} \quad \text{----- (16)}$$

(16) 式からパラメータ P は (17) 式で与えられることになる。

$$P = \frac{1 - \left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_{t_n} \cdot \frac{t_n}{\varepsilon_n}}{\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_{t_n} \cdot \frac{t_n}{\varepsilon_n} \cdot \frac{1}{a} - 1} \quad \text{----- (17)}$$

(17) 式から、クリープ曲線において1次クリープの段階で (10), (11) 式から a を求め、定常クリープの段階で変曲点が認められたときその点の時間 t_n , ひずみ ε_n , 傾き $(d\varepsilon/dt)_{t_n}$ からパラメータ P が分かるので, a と P の値からクリープ破壊時 t_m は, (14) 式を用いて与えられることになる。

定常クリープにおいて変曲点を捜すことは非常に困難であるため, 仮の変曲点を与えることにより a , P , t_m を求め, さらに (11), (15) 式から n , ε_1 を決めて, (9) 式から仮の変曲点以降の時間に対するひずみ量を計算し, 測定値と計算値の間に差がでたときには変曲点としてより好ましい点を選びなおして同様の操作をくり返すといふ。

3. 試料および実験方法・結果

試料は輝石安山岩 (北海道置戸町), 細粒砂岩 (三井砂川鉱業所若鍋店) である。試料の形は直径約 3 cm, 長さ約 6 cm の円柱で, 側面は青砥グラインダーを設置した旋盤により仕上げてある。試料の底面に対する直角からのずれは $1/500$ 以下である。両底面は $400^\#$ のカーボランダムにより仕上げてある。整形後試料は3日間室内で自然乾燥させた後デシケータに入れシリカゲルにより2週間乾燥させた後, 試料の軸方向と円周方向にストレーンゲージを貼布した。さらにデシケータ内で2週間以上乾燥させた後実験に供した。実験中は湿分の影響を避けるために試料を市販のビニール被膜によりおらしてある。

試料の物性値を第1表に示した。

第1表 試料の物性値

岩種	輝石安山岩	細粒砂岩
かさ比重	2.56	2.50
空隙率 (%)	6.6	7.5
P波速度 (Km/sec)	4.64	2.83
S波速度 (Km/sec)	2.32	1.99
単軸圧縮強度 σ_c (kg/cm^2)	1796	1106

クリープ試験では, 所定の応力レベル (σ_c) に達するまでの応力速度は約 $7 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{sec}$ で行ない, ひずみの測定は応力の増加量約 70 kg/cm^2 毎荷重を止めないで測定した。所定の応力レベルに到達した後は, 10秒毎にひずみ量の測定を行ない, ひずみ量の変化が小さくなった場合には2分毎に測定し, 3次クリープの破壊直前では再び10秒毎にひずみの測定を行なった。

ひずみの測定は共和電業 K.K. および早坂理工 K.K. の御好意により借用した携帯型デジタルひずみ測定装置および自動77点切換器を用いた。時間は月差10秒以内のデジタル型ストップウォッチを用いた。

Fig. 2 と 3 に測定値 (○印) と計算結果 (—線) を示す。測定において3次クリープがより明確に表われるように図中の縦軸

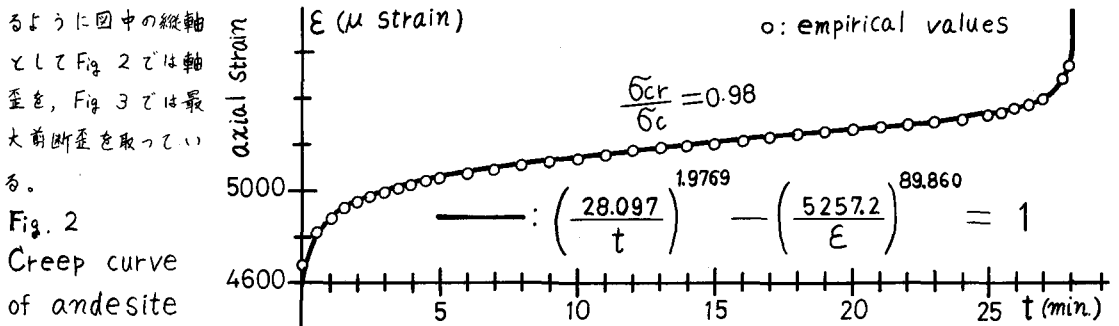
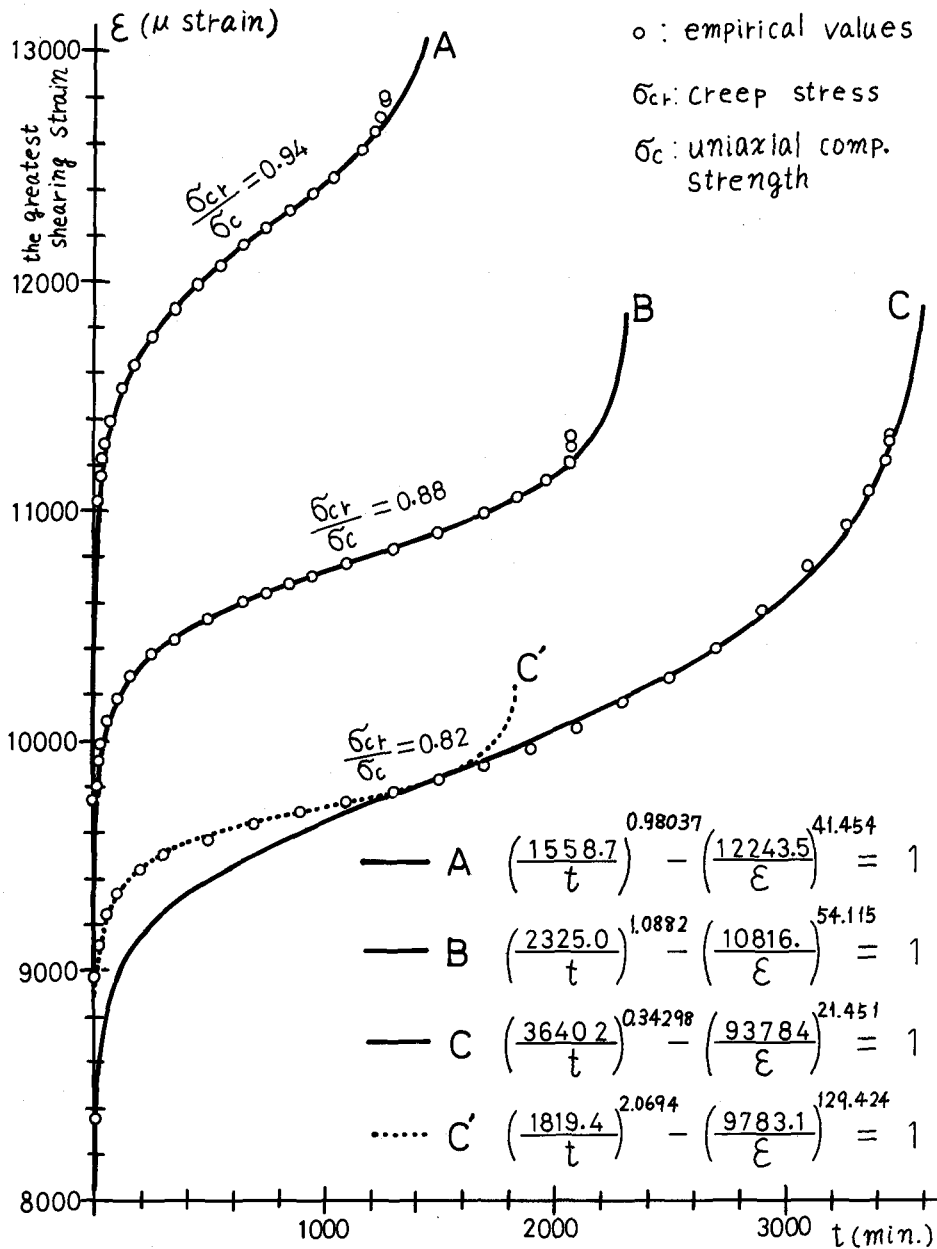


Fig. 2
Creep curve
of andesite



○ : empirical values
 σ_{cr} : creep stress
 σ_c : uniaxial comp. strength

第2表に実験に
 かける破壊時と
 計算による破壊
 予告時を示した
 。表から実際の
 破壊は、予告時
 の手前で発生し
 ていることが分
 かる。これは岩
 石のクリープ試
 験ではクリープ
 破壊(延性破壊
)と同時に脆性
 破壊の危険性も
 大きいと考
 えられる。

4 結 言

クリープ曲線
 を表わすための
 プロットヤコ
 ブの式を導き、
 破壊時を予告す
 る方法について
 述べた。

実験結果が少
 数のため現段階
 では定性的な判
 断しかできない
 が、今後実験を
 積み重ねること
 により、4個の
 パラメータと岩

Fig. 3 Creep curves of sandstone

石の物性との関連および破壊予告時の統計的取扱
 等について研究を進めるつもりである。

参 考 文 献

- 1) M.M. PROTODIAKONOV : Generalized equations of rheological curves for rocks, Proc. 3rd ISRM Cong., Denver, 1974

第 2 表 実際の破壊時と破壊予告時

岩 種	σ_{cr}/σ_c	実際の破壊時 t_f	破壊予告時 t_m	$t_m - t_f$
安山岩	0.98	27.9 分	28.1 分	0.2 分
砂 岩	0.94	1267.9	1558.7	290.8
砂 岩	0.88	2073.5	2325.0	251.5
砂 岩	0.82	3460.4	3640.2	179.8

Estimation of Destruction Time of Rock under Creep Test

By Toshiro ISOBE and Yuusaku TOMINAGA

A method for precognition of destruction time of rock under creep test is proposed. In this study the empirical equation (1) which was given by M. M. PROTODIAKONOV in 1974 is used.

$$\left(\frac{t_m}{t}\right)^P - \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon}\right)^n = 1 \quad \text{----- (1)}$$

t : time, ϵ : strain
 t_m, P, ϵ_1, n : parameter

Destruction time of Rock under creep test is decided if the point of inflection is found on the creep curve and by using equations (2), (3) and (4) as follows.

$$a = \frac{P}{n} = \frac{\ln \epsilon}{\ln t} \quad \text{----- (2) when } t \ll t_m$$

$$P = \frac{1 - \left(\frac{d\epsilon}{dt}\right)_{t_n} \cdot \frac{t_n}{\epsilon_n}}{\left(\frac{d\epsilon}{dt}\right)_{t_n} \cdot \frac{t_n}{\epsilon_n} \cdot \frac{1}{a} - 1} \quad \text{----- (3)}$$

$$t_m = \left(\frac{P+1}{1-a}\right)^{\frac{1}{P}} \cdot t_n \quad \text{----- (4)}$$

t_n : time of the inflection point

ϵ_n : strain of the inflection point

$\left(\frac{d\epsilon}{dt}\right)_{t_n}$: tangent of the inflection point

The relation between actual destruction time and estimate time is summarized in the table A.

Table A

rock type	$\bar{\sigma}_{cr}/\bar{\sigma}_c$	actual destruction time (min.)	estimate time t_m (min.)
andesite	0.98	27.9	28.1
sandstone	0.94	1267.9	1558.7
sandstone	0.88	2073.5	2325.0
sandstone	0.82	3460.4	3640.2

$\bar{\sigma}_{cr}$: creep stress

$\bar{\sigma}_c$: uniaxial compression strength