

クリープ破壊挙動とその予測について

METHODS TO PREDICT THE TIME OF CREEP FAILURE

伊東 孝* 赤木知之**

Takashi ITO and Tomoyuki AKAGI

The creep characteristic of soft rocks should be evaluated by considering the creep failure. If the creep failure is not likely to occur, creep characteristics can be expressed in terms of creep coefficients and delay time constants. we presented the some ways of estimating creep failure time. At the acceleration creep step, we applied a technique of Saito. Then, it considered about the relation between the prediction time and the prediction precision. At the secondary creep step, we examined about the effectiveness of the way of prediction based on the relation between the minimum strain rate and the creep failure time. Lastly, we examined about the possibility of prediction at the step in the early stages. In this paper, we consider the way of the precision which used these techniques of estimating creep failure time.

Key Words : soft rock, creep failure, failure time, minimum strain rate

1. まえがき

近年は、放射性廃棄物の格納、石油やガス、熱水等の地下貯蔵、あるいは大規模超伝導コイルを利用した電力貯蔵など、半無限空間として岩盤の利用はますます増える傾向にある。これら先端科学技術の受け皿として要求される新しいタイプの岩盤構造物については、力学挙動に対する今までにない高精度の予測および長期間の利用における安定性の確実な評価が要求されるようになってきている。

破壊を考えると、従来から行われていることは数多くのクリープ試験を実施しクリープ破壊に至らない応力レベルを見つけたという手法をとることが多い。しかし、数十年先の破壊を問題にする場合は実験的にその評価を行うことはかなりの困難を伴うのが現状である。数年来多孔質凝灰岩（大谷石）を用いたクリープ試験を実施しており、クリープ破壊を生じない応力レベルの推定方法について研究を行ってきた。その中で、クリープ破壊を生じたデータを数多く収集し、それらのデータから最小ひずみ速度と破壊時間との間に両対数グラフ上で直線関係が存在することを確認した。この関係を適用することにより、クリープ曲線において最小ひずみ速度の時点で破壊時間の予測を行うことが可能となる。加速クリープ段階においては、斎藤の予測法¹⁾を用いて破壊時間の予測をかなり高い精度で行うことができる。さらに、全クリープ過程の近似式を求める手法によれば、他の手法よりも初期の段階で予測することも可能性となる。

本報告では、これらの予測手法とクリープ変形挙動のメカニズムについて考察を行い、より精度の高い破壊予測を行うために、これらの予測手法を如何に用いるべきかということに関して検討を行った結果について述べる。

* 正会員 工博 豊田工業高等専門学校 助教授 環境都市工学科

** 正会員 工博 豊田工業高等専門学校 教授 環境都市工学科

2. 実験概要

本研究では、短いものは数分、長いものでは数週間にわたるクリープ試験を行った。クリープ試験装置を図-1に示す。載荷方式はレバー式(倍率10倍)で、重錘により各試料に設定するクリープ応力を負荷することができる。この試験装置の最大の軸負荷荷重は約50kNである。この装置を室温 $20 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ の恒温室内にセットし実験を行った。本研究で用いた試料は大谷石と通称される第三紀堆積の多孔質凝灰岩である。試験片は直径50mm、高さ100mmの円柱形に整形した。大谷石の物理的および力学的な基本物性値を表-1に示す。今回の実験においては、クリープ試験中のAE発生状況の観測も行った。

図-2にクリープ試験結果を示す。(a)図は時間軸が正規、(b)図は時間軸が対数で表示したものである。(b)図よりわかるように、ほとんどの試験はクリープ破壊に達するまで行っている。(a)図は約1日から4日間のクリープ曲線を表示している。この図から、1次から3次までのクリープ過程が観察される。1次クリープ過程とは、試料に軸圧を加えると瞬間的に圧縮され、それに続いて時間の経過と共にひずみ速度が漸減する過程のことを指す。2次クリープ過程は、一般にひずみ速度が一定の領域のことをいい、3次クリープ過程とは、ひずみ速度が次第に増加し破壊に至る段階のことをいう。

しかしながら、本研究で行った実験結果においては、2次クリープ段階は厳密にはほとんど存在せず、ひずみ速度が最小になるとまもなく増加に転じている。このことは経過時間とひずみ速度の関係を表した図-3からも見る事ができよう。この図より、一つのクリープ試験毎に最小のひずみ速度と破壊時間を求め、それらの関係を図-4に示した。

表-1：大谷石の物理・力学諸量

単位体積重量(湿潤)	1.79	(g/cm^3)
一軸圧縮強度(湿潤)	8.5	(MPa)
引張強度(湿潤)	1	(MPa)
粘着力 c	3.4	(MPa)
内部摩擦角 ϕ	18.4	($^{\circ}$)
弾性係数 E	2.24	(GPa)
ポアソン比 ν	0.2	

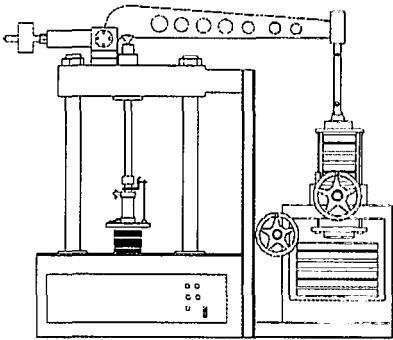
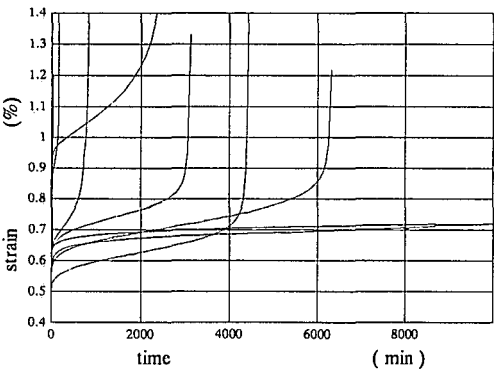
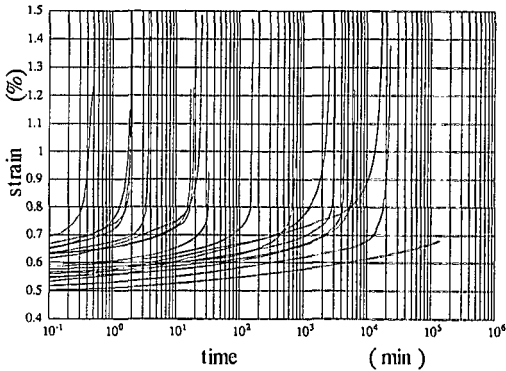


図-1：クリープ試験装置



(a)正規時間軸



(b)対数時間軸

図-2：軸ひずみ-時間関係

3. 最小ひずみ速度による予測

大谷石の試験結果から最小ひずみ速度と破壊時間の関係は明らかに逆比例の関係にあることがわかる。この直線関係は、一般的な岩石の性質として知られている²⁾。また、本実験結果において、両者の関係は次式のようになった。

$$t_f \cdot \dot{\epsilon} = 1.8 \times 10^{-3} \quad (1)$$

$\dot{\epsilon}$: 最小ひずみ速度(/min) t_f : 破壊時間(min)

また、齊藤は土のクリープ試験結果や大規模斜面崩壊実験での測定値を定常ひずみ速度とクリープ破壊時間の関係を図-4中の波線のようにまとめた。その上下の点線は測定値の95%が入る信頼幅を示している。齊藤は、土と材料が異なる場合でも、土の直線と平行した分布になるとしている。大谷石の結果は、土と比較して、生じるひずみが少ないことから土よりも下側に直線が存在することになる。このような関係があらかじめ得られておれば、ひずみ速度を観測することにより、安全側のクリープ破壊時間を予測することができる。

4. 第2次クリープ過程からの予測

一般的に、クリープ曲線は図-2(a)に見られるように1次、2次および3次クリープ過程が存在し、時間軸に関して相似な形状を呈している。プロトジャコノフ³⁾は4個のパラメータ(P 、 n 、 t_m 、 ϵ_1)を含む加速クリープの変形特性までを考慮することができるクリープ曲線の全過程を表す近似式(2)を導いた。

$$\left(\frac{t_f}{t}\right)^P - \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon}\right)^n = 1 \quad (2)$$

ここに、 t : 任意時間、 ϵ : 任意時間のひずみ、 t_f : クリープ破壊時間 (min)

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

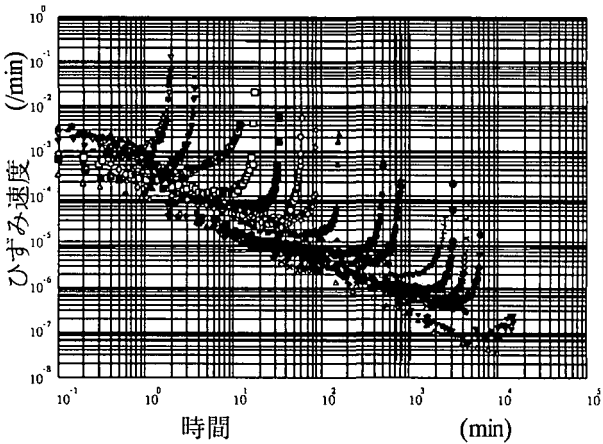


図-3 : ひずみ速度と経過時間の関係

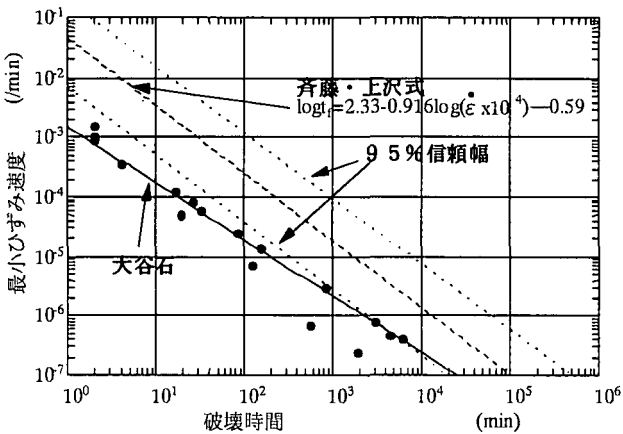


図-4 : 最小ひずみ速度と破壊時間の関係

ここに、 $\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_{t_n}$: クリープ曲線の傾き (ひずみ

速度) , ε_n : 変曲点でのひずみ, t_n : 変曲点での時間 (min)

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

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_n \cdot \left(\frac{P+a}{1-a}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

これらのパラメータは定常クリープ過程に入った段階で決定することができる。実際には最小ひずみ速度が必要となるが、それ以前でも仮定することは可能である。実際に近似曲線を描き、実際のクリープ曲線と比較したものを図-5に示す。

○印と□印の近似曲線は最小ひずみ速度以前でパラメータを求めた結果であり、最小ひずみ速度時点での予測精度が最も高くなっている。この予測方法は、かなり早い段階から、すなわち最小ひずみ速度発現以前から予測可能であるが、破壊時間の誤差は図-5からもわかるように数十パーセント程度存在する。また、クリープ破壊が生じることを前提にしており、変形が収束するかどうかの判断は不可能である。

クリープ変形が進行し、加速クリープ段階にさしかかった場合には、破壊に近いこともあり、より高い精度が要求されるようになる。この場合には斉藤迪孝が実際に斜面の崩壊時期の予測を行うために導いた方法がある⁴⁾。図-6のようにひずみ間隔を一定に選定し、それに対する時間を読み取る事によって破壊時間を容易に求められるようになる。

次式より破壊時間を求めることができる。

$$t_f = \frac{t_2^2 - t_1 \cdot t_2}{2t_2 - (t_1 + t_3)} \quad (6)$$

この手法は他の手法と比較して、かなり高い予測精度

を得ることができる。上式を用いてクリープ破壊時間 t_f を求め、これを予測破壊時間とし、実際のクリープ

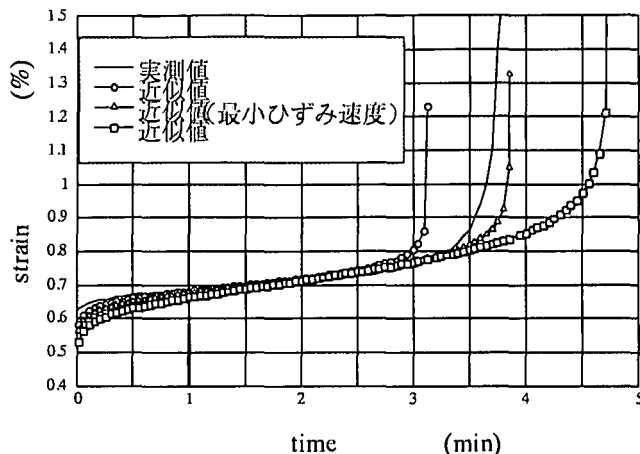


図-5 : 実測クリープ曲線と近似曲線

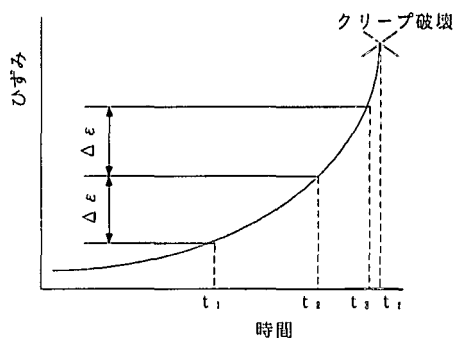


図-6 : 破壊時間の図式解法

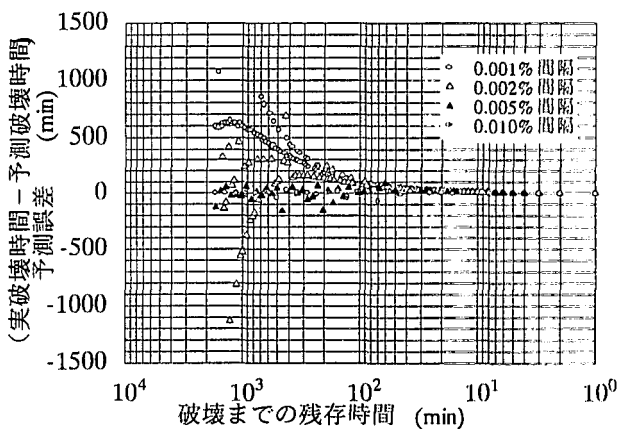
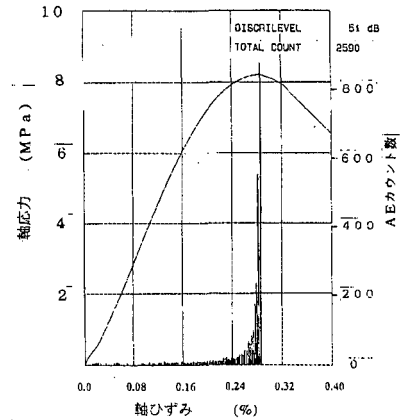


図-7 : 斉藤の方法の予測誤差

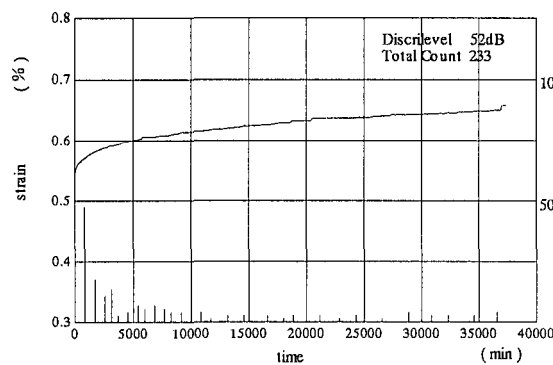
破壊時間との差（予測誤差）とクリープ破壊までの残存時間の関係を図－7に示す。

5. クリープ変形過程における AE 発生状況

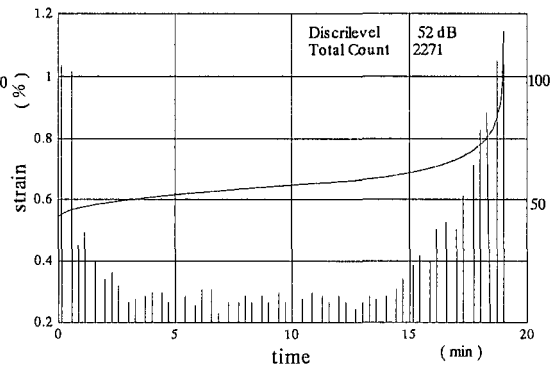
クリープ破壊時間の予測には、応力を受けている岩石の変形過程を知ることが重要になってくる。すなわち、すでに最小ひずみ速度が発現しているかどうか、あるいは最小ひずみ速度が存在しないのかどうかである。存在しなければ、変形は徐々に収束し破壊には至らない。その判定の一つの手段として、AE の発生状況を観測する方法がある。図－8は大谷石の一軸圧縮試験における応力－ひずみ曲線と試験中に発生した AE のカウント数をプロットしたものである。破壊寸前に多くの AE が発生していることがわかる。クリープ変形している岩石は、内部で微小な破壊が進行していると考えられており、その発生状況を AE として捉えることでクリープ変形の状態を間接的に観察し、破壊予測に役立てることができると考えられる。クリープ試験中における AE の発生状況を図－9、10に示す。図－9は最小ひずみ速度が発現せず、変形が収束した試験結果であり、図－10は破壊にまで至った結果である。載荷直後は、どちらも多くの AE が発生しているが、これは瞬間的に載荷されることによって、瞬間ひずみが発生することによるものであろう。その後、どちらも AE の発生数は減少するが、破壊に至る場合は、加速クリープ段階に入る頃から、急激に発生数が増加していることがわかる。また、変形が収束する場合は、1 次クリープ段階が過ぎるとほとんど発生しなくなることがわかる。先に述べた手法と AE の発生状況を組み合わせて、より精度の高い予測を行うことができよう。



図－8：一軸圧縮試験における AE 発生状況



図－9：変形が収束する場合の AE 発生状況



図－10：破壊に至る場合の AE 発生状況

参考文献

- 1) 齊藤迪孝・上沢 弘：土のクリープ破壊に関する実験的研究、鉄道技術研究報告、No.128 (1960)
- 2) 赤井浩一・足立紀尚・西好一：堆積軟岩の時間依存特性と構成式、土木学会論文集,第 2 8 2 号 (1979)
- 3) Toshiro Isobe and Yuusaku Tominaga : A new equation about creep deformation on weak rock,International symposium on weak rock,(1981)
- 4) 齊藤迪孝：斜面崩壊予測について、土と基礎 17-2(1969)