

## (23) 岩石の不均質性を考慮した クリープ試験のシミュレーション

東京大学大学院           ○趙     顕  
東京大学工学部   正会員   福井   勝則  
東京大学工学部   正会員   大久保誠介

A Computer Simulation on Creep Test of Rocks in consideration of Inhomogeneous Property

Hyun CHO,           Graduate Student  
Katsunori FUKUI, The University of Tokyo  
Seisuke OKUBO,    The University of Tokyo

### Abstract

Time-dependent behaviour and size effect of rock, which are inevitably included when discussing the long-term stability and designing most of the underground structures, have been studied by many authors. Though it is well known that rock is consist of various constituent minerals which differ in strength and Young's modulus, only a few studies on time-dependency and size effect consider the inhomogeneous property of rock.

In this study, creep behaviour of specimen model are examined by computer simulation. A non-linear constitutive equation proposed by authors is implemented in FEM program and special attention has been paid to inhomogeneity of rock.

According to calculated results, the primary creep region becomes gradually apparent with increase of coefficient of variation of element-strength, although the constitutive equation cannot express primary creep or decrease of strain rate with time. In tertiary creep region, creep strain rate increases in inverse proportion to residual life  $T$ , which is calculated by subtracting elapsed time from life, regardless of coefficient of variation.

### 1. はじめに

岩石は、強度やヤング率の異なる複数の構成物質から成り立っており、この意味でまず不均質性を有する。また、より大きな寸法に目を移すと、岩盤も場所、場所で強度などが異なることがむしろ普通である。この不均質性に起因して、寸法効果が生じるといわれている。既報において、著者らは、不均質性と時間依存性を考慮した数値実験を行ない、強度に関する寸法効果をある程度再現することを試みた<sup>1)</sup>。

さて、岩石は時間依存性を有するといわれている。この時間依存性は、長期の安定性を要する岩盤内構造物の設計の際には、是非とも把握しておかねばならぬ事項である。幸い、このような観点から、かなり多くの実験的研究が行われてきており、試験片規模の岩石の時間依存性挙動については、順調に知見が増えつつある。しかしながら、岩盤の時間依存性挙動については、直接検討する有効な方法が少ないため不明な点が多い。

著者が最終的な目標とするのは、時間依存性挙動に関する寸法効果である。強度と同じように、試験片と岩盤とは相当に異なるものなのかどうか、との間に答えることが、目標である。時間依存性挙動は、様々な荷重条件下で見られるが、今回は一定応力下におかれた時（クリープ）の挙動を数値実験により検討する。

## 2. 計算方法

既報にて用いた構成方程式を今回も使用する<sup>1)</sup>。その基礎式は次の通りである。

$$\Delta \varepsilon^* = \lambda^* \Delta \sigma^* \quad (1)$$

$$d\lambda^*/dt = a(\Delta \sigma^*)^m (\lambda^*)^n \quad (2)$$

$$\Delta \sigma_0 = \sigma_c (1 + \sigma_3/\sigma_c)^{0.5} - \sigma_3 \quad (3)$$

$$n = (\Delta \sigma_0/\sigma_c) n_0 \quad (4)$$

ここに、 $n$ は時間依存性の程度を示すパラメータで、周圧の増加にともない大きくなる。 $m$ は強度破壊点以降の応力-歪み曲線の傾きを決めるパラメータである。また、 $\Delta \sigma_0$ は周圧下での強度（差応力）、 $\sigma_c$ は一軸圧縮強度、 $n_0$ は一軸圧縮応力下での $n$ の値である。今回の計算では、既報にならって $n_0 = 20$ 、 $m = 10$ とした。

所定のクリープ応力まで定歪速度試験を行い、その後、応力を一定に保ったとして、数値実験を行った。この载荷手順は、実際の周圧下でのクリープ試験とほぼ同じである。数値実験に際して、仮定した数値を表1にまとめて示す。

表1. 計算において仮定した数値

|           |                         |
|-----------|-------------------------|
| 要素数       | 16, 48, 252, 1008, 3920 |
| 変動係数CV    | 0.1, 0.2, 0.3, 0.4      |
| クリープ応力(%) | 60, 70, 80, 90          |

一般的には、コンプライアンス（ヤング率）、ポアソン比も各要素ごとに異なると思われるが、今回は簡単のため強度のみばらつくとした。すなわち、平均値が1で変動係数CVの正規乱数を要素数だけ用意し、正規乱数に比例した強度を各要素に割り当てた。乱数系列が異なると計算結果が若干異なるので、念のため同一条件で、乱数系列を3通り変えて計算を行った。なお、簡単のため、供試体の端面の摩擦力はないものと仮定した。

## 3. 応力レベルと変動係数による影響

クリープ寿命 $t_F$ に対する応力レベル $(\sigma_1 - \sigma_3)/\Delta \sigma_0$ の影響を、まず調べた。その結果を図1に示す。この図は、変動係数CVが0.2で、要素数252要素のときの計算結果である。図より、クリープ応力が小さいほど、また周圧が大きいくほど寿命が長くなることがわかる。この計算結果は、従来の実験結果と定性的に一致する。なお、別の条件下でも計算を行ったが、定性的な傾向は図1と同じであった。

今回使用した構成方程式は、一次クリープを表現しえないものである。すなわち、 $m$ が正值の場合、クリープ歪み速度は次第に増加するのみで、歪み速度が経過時間に伴い減少することはない。変動係数が0.0（均質体）であれば、有限要素法による計算結果でも一次クリープは現れない。しかしながら、岩石の不均質性が増す（変動係数が大きくなる）と一次クリープが現れる。その例を図2（a）に示す。

図2の（a）は、経過時間 $t$ に伴うクリープ歪み速度の変化を示したものである。なお、要素数は252、クリー

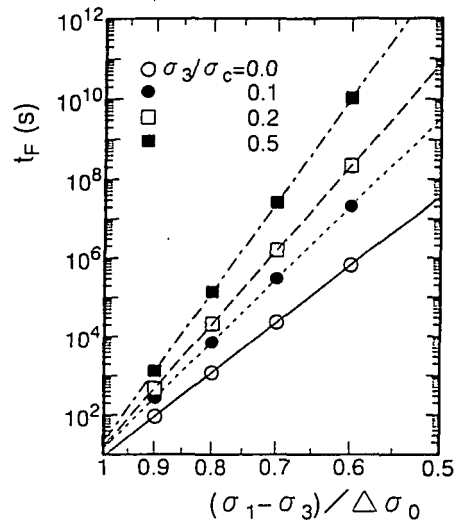


図1. クリープ寿命と応力レベルの関係（CV=0.2，要素数252）。各寿命は、10回の計算結果の幾何平均値である。

プ応力レベルは70%である。この図から分かるように、小さな変動係数  $CV = 0.1$  でも、試験開始後しばらくの間、歪み速度が経過時間と共に減少する。しかしながら、歪み速度の減少の割合は小さい。他方、変動係数  $CV$  が0.3と0.4では、最初の部分の歪み速度-経過時間曲線の傾きは-1に近く、一次クリープが対数クリープ則にほぼ従うことがわかる。多くの岩石の一次クリープが対数クリープ則に従うことは、よく知られている<sup>2, 3)</sup>。

応力が一定であるにもかかわらず、一次クリープにおいて歪み速度が減少することはなかなか説明が難しい。一つの説明の仕方は、最初クラック先端が鋭くクラックは進展し易いが、やがてプロセスゾーンがクラック先端に生ずると進展しにくくなるためとするものである。また、圧縮応力下では、クラックは次第に最大

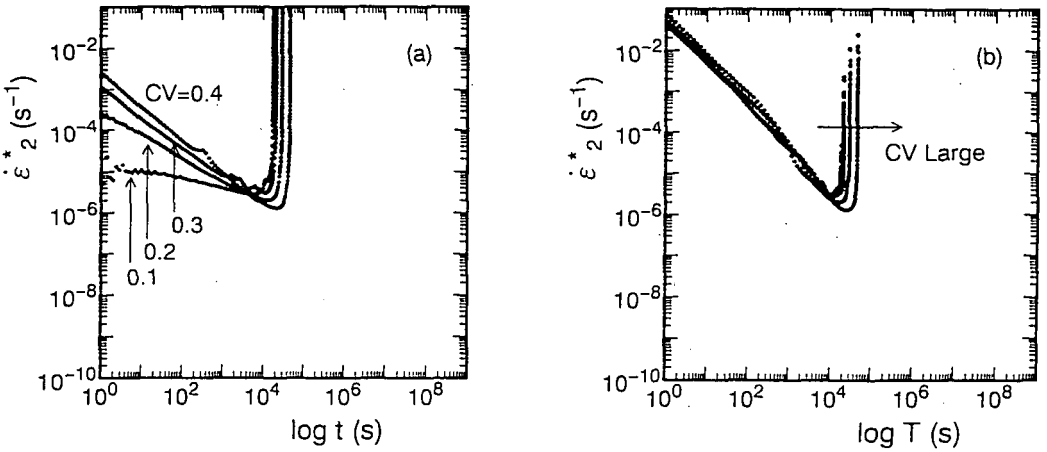


図2. 変動係数  $CV$  の影響 (応力レベル70%, 要素数252)。

(a) クリープ歪み速度と経過時間  $t$  の関係

(b) クリープ歪み速度と残存寿命  $T$  の関係

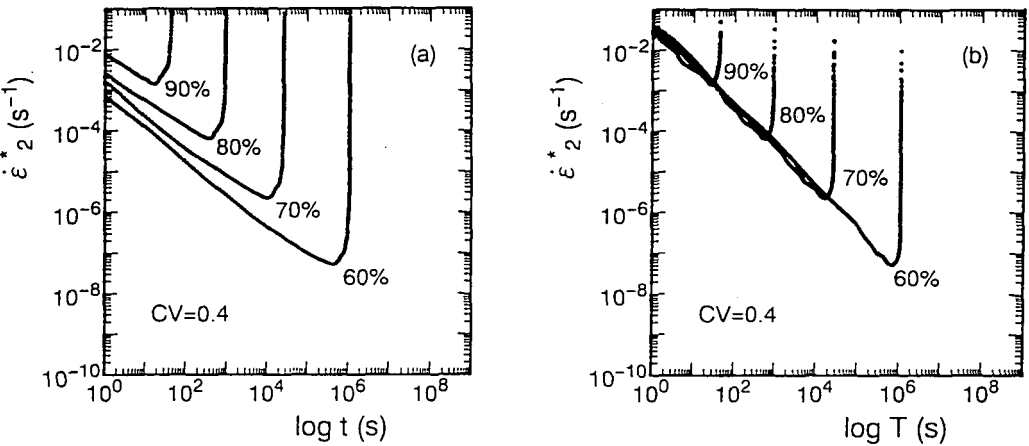


図3. 応力レベルの影響 ( $CV = 0.4$ , 要素数252)。

(a) クリープ歪み速度と経過時間  $t$  の関係

(b) クリープ歪み速度と残存寿命  $T$  の関係

主応力方向に傾いていき、その結果クラック先端での応力拡大係数が低下するためとの説もある。さらに、岩石は不均質であり、強度の弱い部分が最初急速に壊れ、強い部分が残るためとの説もある。本研究の計算結果は、どちらかといえば、最後の説を指示するものであるが、その他の説を否定するものではない。

図2(b)は、横軸を残存寿命 $T$ として、歪み速度の変化を示した。図より、三次クリープでは残存寿命とクリープ歪み速度が反比例することが分かる。この結果は、最近のクリープ実験結果<sup>3)</sup>と一致する。計算結果において、三次クリープ領域での歪み速度-残存寿命曲線の傾きは、変動係数にほとんどよらないことがわかる。実験結果でも、比較的均質と考えられる花こう岩から、不均質性の高い大谷石まで、三次クリープ領域では、ほぼ同様の挙動を示す。今後の課題であるが、均質であるか、不均質であるかによって、三次クリープ特性が変わらないとしたら、岩盤内構造物の破壊の予知はかなり簡易になると考える。

図3に、クリープ応力の大きさの影響を調べるため、4つのクリープ応力レベル60、70、80、90%のときのクリープ曲線を示す。ただし、変動係数はいずれの応力レベルでも0.4とした。図3(a)より、応力レベルが小さくなると、最小歪み速度は減少し、寿命は長くなることがわかる。しかしながら、一次クリープ領域での傾きはクリープ応力レベルによってさして変化しない。この計算結果も、定性的にこれまでの実験結果と一致している<sup>2, 3)</sup>。図3(b)に、歪み速度と残存寿命の関係を示したが、これより、応力レベルによらず三次クリープ領域の傾きはほぼ-1となることがわかる。以上で述べた傾向は、最近のクリープ実験結果<sup>3)</sup>とよく一致している。

図4に、図2と同じデータを用いて最小クリープ歪み速度のときの歪みを応力-歪み曲線上に示す。図中の黒丸は上から $CV=0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ のときのクリープ歪みを表す。変動係数が大きくなるほど最小クリープ歪み速度のときのクリープ歪みは増加することがわかる。最近のクリープ実験結果<sup>3)</sup>では最小クリープ歪み速度のときのクリープ歪みは強度破壊点以前、以降の応力-歪み曲線の間にあることがわかっており、定性的に一致している。

#### 4. 要素数(寸法)による影響

図5には、試験片モデルの大きさ(要素数の多寡)のみを変えたときのクリープ曲線を示す。計算条件は、変動係数0.4、クリープ応力 $0.5\Delta\sigma_0$ である。図より、要素数252以上のクリープ曲線及びクリー

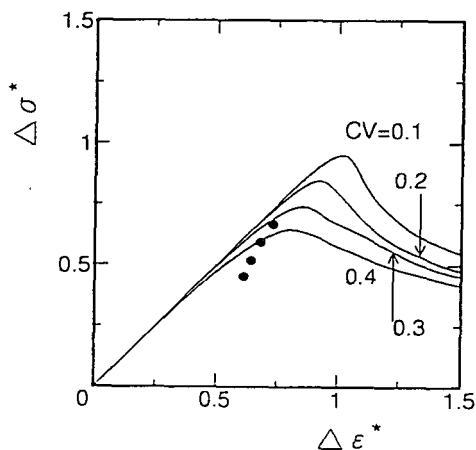


図4. 応力-歪み曲線上でのクリープ歪み速度が最小となる位置(要素数252, 応力レベル70%)。黒丸は上から $CV=0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ である。

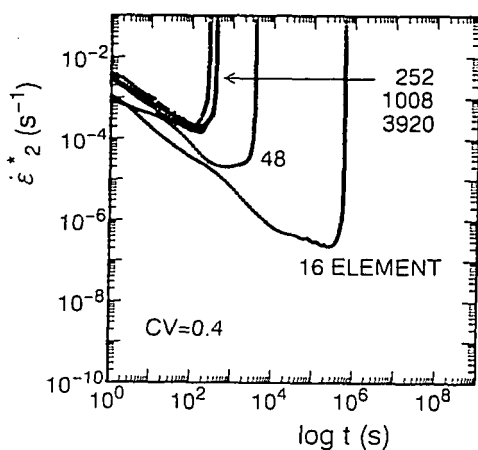


図5. 種々の要素数でのクリープ歪み曲線( $CV=0.4$ , クリープ応力一定)。

ブ寿命はほぼ同じであることがわかる。一方、要素数48, 1.6と要素数が小さくなるに従い、クリープ寿命は長くなり、クリープ曲線は相似形のまま右下に移動する。一方、クリープ応力レベルを同じにした数値計算結果では、寸法を変化させてもクリープ寿命はたいして変化しないこともわかった。定ひずみ速度試験では要素数が100程度までは要素数が大きくなると強度が低下し、要素数が100以上では強度はほとんど変わらないことを既報<sup>1)</sup>で示した。よって、図5のような結果は、寸法を変化させた場合の強度変化の影響である。

図6に、変動係数0.2の場合の圧縮強度試験とクリープ試験における $n$ 値をまとめて示した。図中の黒塗り記号は圧縮強度の載荷速度依存性より求めた $n$ 値であり、白抜き記号は寿命のクリープ応力依存性より求めた $n$ 値である。図より、 $n$ 値はわずかであるが、要素数の増大に伴い増加することがわかる。しかしながら、白抜き記号と黒塗り記号の間に差はあまり認められない。すなわち、クリープ試験における寿命とクリープ応力との関係を決定する $n$ 値と、圧縮強度の載荷速度依存性を決定する $n$ 値はほぼ同じ値となっている。これは、 $n$ の値自体は寸法により若干変化するが、今回実施した不均質性を考慮したシミュレーションにおいて、クリープ試験でも圧縮試験でも、(1)～(4)式の構成方程式自体の性質をほぼ保存していることを表している。

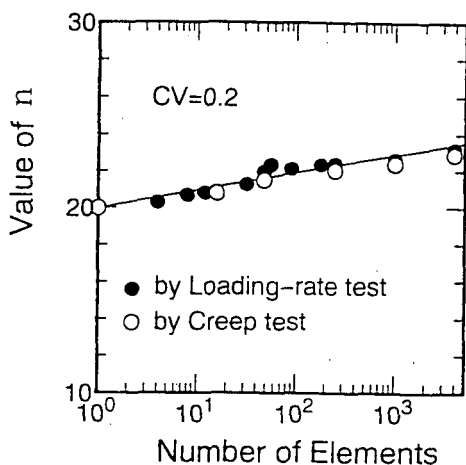


図6. 要素数の増加に伴う $n$ 値の変化。  
黒塗りは載荷速度試験に、白抜きはクリープ試験によるものである。

## 5. まとめ

本研究では、岩石の不均質性を考慮しつつクリープ試験のシミュレーションを行った。その結果、今回使用した構成方程式では表現し得ない一次クリープが、不均質性を考慮することにより表現することができた。最近の著者らの引張試験に関する研究<sup>4, 5)</sup>で、引張試験でも一次クリープが存在していること、凹凸した破断面の形成が生じること、残留強度領域に近いものが現れることなどが明らかとなっている。このような引張試験結果も岩石の不均質性を考慮することにより、説明がつく可能性がある。今回の圧縮試験に関する結果も一次クリープの原因の1つとして、岩石の不均質性が重要な役割をはたしており、不均質性は引張、圧縮に拘らず岩石の力学的性質を決定する重要な要因であると考え、今後は、岩石の不均質性を現実に近い形で捉え、検討していきたい。

## 参考文献

- 1) 趙顕, 大久保誠介: 資源・素材, 110, p.109-114(1994)
- 2) Parsons, R. C. & Hedley, D. G. F.: Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 3, p.325-335(1966)
- 3) 福井勝則, 大久保誠介, 西松裕一: 資源・素材, 105, p.521-526(1989)
- 4) 福井勝則, 金豊年, 大久保誠介: 第9回岩の力学国内シンポジウム, p.271-276(1994)
- 5) 秋哲淵, 大久保誠介, 福井勝則: 資源・素材春季大会講演要旨集, p.107-108(1994)