

(57) 岩質材料の不連続面量とクリープ特性の相関性

豊田高専 伊東 孝
豊田高専 赤木知之
中部電力(株) 河村精一

Correlation between the quantity of discontinuities and creep properties on rock materials

Takashi ITO, Tomoyuki AKAGI
Seichi KOUMURA

Toyota College of Technology
Chubu Electric Power Co., Inc.

Abstract

It is necessary to estimate the parameters of rock mass for the design of rock structure. These material parameters are usually obtained through tests on intact rocks, which are generally greater than those of rock mass.

In numerical analysis, calculated displacements using the material properties of intact rocks are smaller than measurements. Since the properties of rock mass is generally influenced by discontinuities, reduction factors are used to estimate the mechanical properties from those of intact rocks in practice.

In this paper, we have studied how the variation of mechanical properties influenced by the quantity of discontinuities which are designed in the shape of spherical or plate like rubber inclusions and the location and orientation of discontinuities were random.

1. まえがき

変形が時間に依存してだらだらと進行する現象をクリープという。クリープ現象を数理的に記述する方法には種々あるが、*Boltzmann* の記憶積分に立脚した粘弾性理論がほぼ確立されており、適用の基礎理論とされるのが一般的である。具体的には様々なレオロジーモデルが材料の挙動に応じて適用される。

しかし、これらのモデルは元々線形理論の範疇にあり、非線形な変形成分が顕著な岩質材料に適用するには限界があるとの批判が多かった。それに対し筆者の一人は一般化レオロジーモデルの適用を試み、一般化モデルの要素数が応力に応じて変化することを実験的に確認している¹⁾。すなわち、たとえ線形のモデルであっても応力レベルに応じてそのモデル自身が変化するものとして、非線形特性を評価できるのである。

クリープ変形の非線形成分は、塑性変形が時間に依存するものと理解できよう。岩石の塑性変形は内部の損傷が進展する結果であり、そのメカニズム自身の進行に時間を要するということである。そこで、本研究は、そのような損傷すなわち不連続面の存在によって、岩石のクリープ特性すなわちレオロジーモデルのパラメーターが如何に変わるかを直接実験によって確認しておこうという目的をもって始められた。多種多様の実験を多量にこなす必要性から岩質部をモルタルとし、損傷部として水に溶けず常に軟弱性を保つ練り消しゴムを使用した供試体を作成した。練り消しゴムは直径5mmの球状のものと、それを押しつぶして円板状にしたものを一定の容積率でモルタルに混入し、それぞれを組み合わせて種々の試料を作成し、クリープ実験に供した。その結果について報告する。

2. 実験概要

供試体に混入させる弱部の量を明らかにするために、供試体の基質部分にセメントモルタル、混入させる弱部として直径5mmの球状のものと、直径10mmの円板状の練り消しゴムを用いた。これらの練り消しゴムは供試体中に均質に分布するように、また、円板状のゴムの方向はランダムとなるように配置した。供試体の形状は直径が50mm、高さ100mmの円柱形とした。

普通ポルトランドセメントおよび豊浦標準砂を用い、重量配合比をセメント：砂＝1：2、水セメント比 $W/C=0.63$ とした。

供試体の種類は、球状および円板状の練り消しゴムの量が供試体1本当たりそれぞれ0, 5, 10, 20 cm^3 の4種類とした。これらの量は供試体の体積に対する容積率で表すとそれぞれ0, 2.5, 5, 10%となる。

クリープ試験は、除荷による回復ひずみを求めるために、載荷状態で10日間行った後、除荷した状態で4日間回復ひずみの測定を行った。実験は室温および湿度が一定に保たれた恒温室内で行われ、載荷装置はMTS社製のサーボコントロール試験装置を用いた。

3. クリープ試験結果

クリープ試験により得られたクリープ曲線を、球状の不連続部を含む供試体について、不連続部の容積率が0%および10%のものを図1、図2に示す。円板状の不連続部を含む供試体のクリープ曲線は、クリープ荷重が $50\text{kgf}/\text{cm}^2$ の結果について図3に示す。

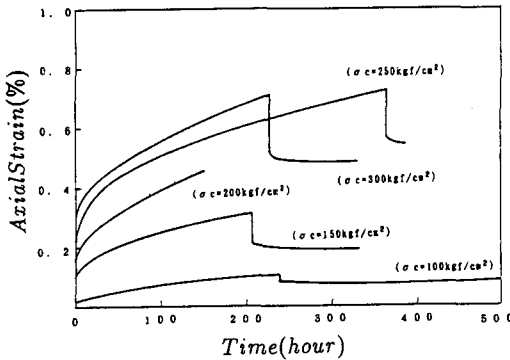


図1：クリープ曲線（容積率0%）

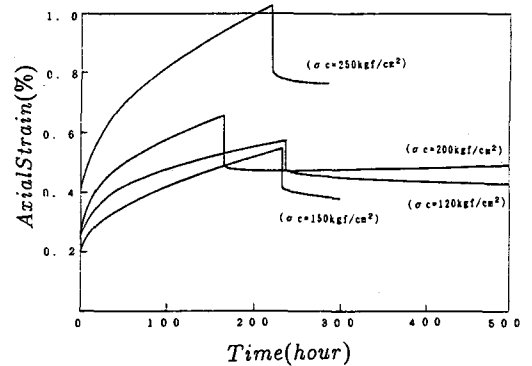


図2：クリープ曲線（容積率10%）

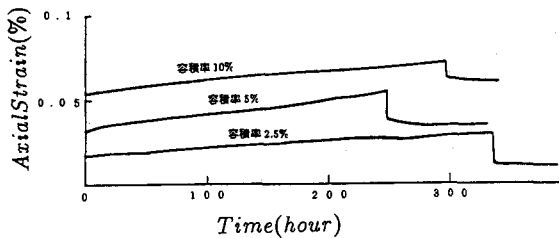


図3：クリープ曲線（ $\sigma_c = 50\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、円板状）

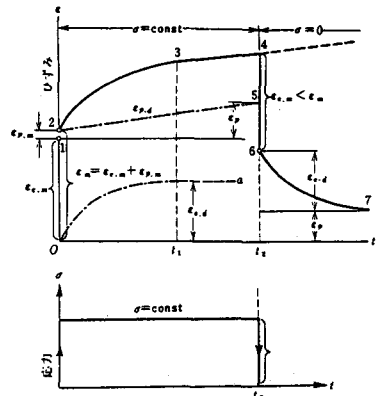


図4：クリープ曲線におけるひずみ成分

4. レオロジーモデル

本研究で行ったクリープ試験では、所定の期間クリープ载荷した後、完全に除荷した状態で放置し、変形の回復量も計測した。ひずみ～時間関係の模式図を図4に示す²⁾。この図より、瞬間弾性ひずみとして除荷後の瞬間的回復ひずみ(4～6)、瞬間塑性ひずみとして载荷後の瞬間ひずみから瞬間弾性ひずみを差し引いたひずみ(1～2)、遅延弾性ひずみとして除荷後の遅延可逆ひずみ(6～7)、粘塑性ひずみとして全塑性変形から瞬間塑性ひずみを差し引いたひずみ(2～5)として4つのひずみ成分を算出することができる。

これらのひずみを考慮したレオロジーモデルを仮定し³⁾、クリープ試験結果の整理を行った。このモデルに対するクリープ式を以下に示す。

$$\epsilon = \sigma_0 \left\{ J_0 + J_1 (1 - e^{-t/T_1}) + \frac{t}{\eta_2} H(\sigma - \kappa_2) \right\}$$

上式において、右辺第1項は瞬間弾性ひずみと瞬間塑性ひずみとを合わせた瞬間ひずみ、第2項は遅延弾性ひずみ、第3項は粘塑性ひずみを表している。

クリープ式におけるクリープ定数 J_0, J_1, η_2 は図4に基づいて算出したそれぞれのひずみ量とクリープ応力および载荷時間から求めることができ、それらを図5、図6、図7に示す。

J_0, J_1 は、不連続部の容積率に比例して増加しており、また η_2 は減少傾向を示している。このことは、これらの定数が関与しているそれぞれのひずみ成分が容積率の増加に正比例して増えていることを示している。円板状の不連続部を含む場合も、図中に黒丸で示したがほぼ同様の傾向を示している。

以上の考察から、不連続部の容積率が増加するに伴い各ひずみ成分は増加することがわかったが、それらの全ひずみ量に対する割合がどのようにになっているかを図8で見ることができる。この図より、容積率の増加に伴い、粘塑性および瞬間塑性ひずみの割合が増加しており、容積率が10%では両

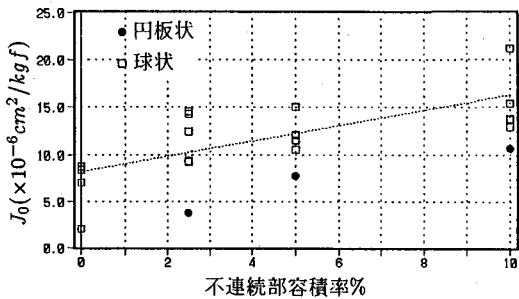


図5： J_0 と容積率の関係

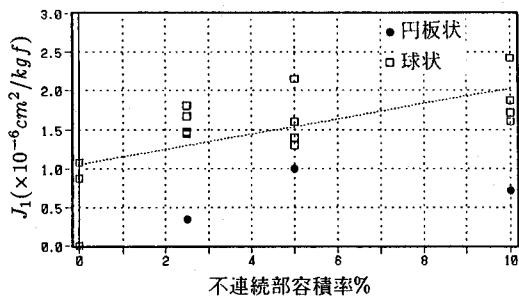


図6： J_1 と容積率の関係

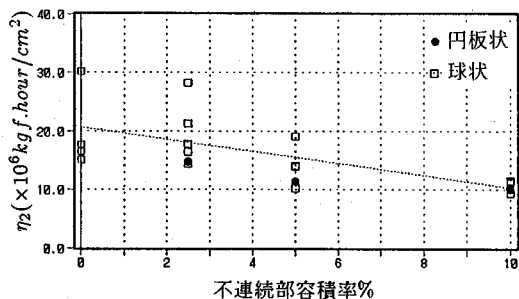


図7： η_2 と容積率の関係

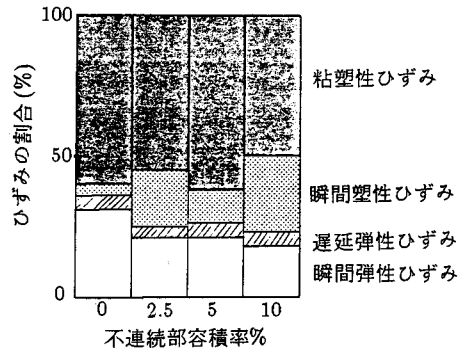


図8：各容積率におけるひずみ成分の割合

者を合わせると 80% 近くになっていることがわかる。一方、遅延弾性ひずみの割合は 5% にも達しておらず、また不連続部の容積率に関係なくほぼ一定の割合を示している。

ここで仮定したレオロジーモデルは Voigt モデルが無数に連なった一般化 Voigt モデルを基に、瞬間ひずみ、遅延弾性ひずみ、粘塑性ひずみを表現できる 3 つのモデルを連ねて決定したものである。その結果先に述べたように、粘塑性ひずみが卓越していることがわかった。

先のレオロジーモデルでは粘塑性ひずみをダッシュポット η_2 のみで表した。したがって、クリープ変形速度が一定の定常クリープしか評価できない。しかし、時間に依存するこの粘塑性ひずみには、定常クリープひずみの他にひずみ速度が徐々に減少し時間の経過に伴って収束するようなひずみ量が存在することがわかった。

そこで、図 9 に示す新たなモデルを考える。このモデルでは、遅延弾性ひずみを独立して表現することをやめて、 J_1 の項はひずみ速度が減少する粘塑性ひずみ成分と遅延弾性ひずみ成分を合わせたひずみ量を表すものとする。すなわち、 J_1 の要素は非線形成分を評価できるものと考え、 η_2 はひずみ速度が一定である粘塑性ひずみ成分を表し、 J_0 は先のモデルと同じ瞬間ひずみを表す。

ひずみ速度一定の粘塑性ひずみ成分はクリープ曲線の最終的な傾きより求め、ひずみ速度が減少する粘塑性ひずみ成分は遅延弾性ひずみも含めて、時間とともに生じたひずみよりひずみ速度一定の粘塑性ひずみ成分を差し引いた量として求まる。このようにして求めた J_1, η_2 を図 10、図 11 に示す。図 6、図 7 と同様の傾向を示しているが、 J_1, η_2 の値はそれぞれ 6 倍、2 倍となっており、不連続部の容積率に対するそれぞれの変化の回帰曲線の式を容積率を N_r とし以下に示しておく。

$$J_0 = 8.19 \times 10^{-6} + 0.82 \times 10^{-6} N_r$$

$$J_1 = 7.70 \times 10^{-6} + 0.49 \times 10^{-6} N_r$$

$$\eta_2 = 4.18 \times 10^7 - 0.22 \times 10^7 N_r$$

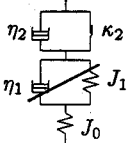


図 9：レオロジーモデル

また、円板状の不連続部を含む場合は、粘塑性ひずみおよび遅延弾性ひずみとも非常に少なくなっている。

図 12、図 13、図 14 にクリープ応力に対する各モデル定数の変化を示す。不連続部が存在しない場合、 J_0, J_1 はクリープ応力に対して増加し、また η_2 は減少する傾向が見られる。しかし、不連続部が存在するとばらつきが激しくなり J_1 における容積率が 10% の場合だけが不連続部を含まない場合と同様な傾向を示しているのみで、その他はそのような傾向は見られない。実際には一定の傾向が存在するものと予測したが、損傷部を人工的に入れているためその状態のわずかの違いの方が応答に大きく影響するものと思われる。

図 15、図 16 に回帰式から得られたクリープ定数を用いて、容積率が 0%, 10% の場合についてクリープ曲線をプロットしたものを実験結果と併せて示す。ここで、遅延時間 T_1 は、不連続部の容積率に関係なくほぼ 20 ~ 70 程度の範囲内でばらついた値を示しているため³⁾、それらの平均値の 30 時間を用いた。

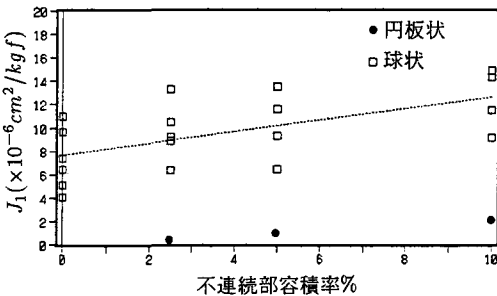


図 10： J_1 と容積率の関係

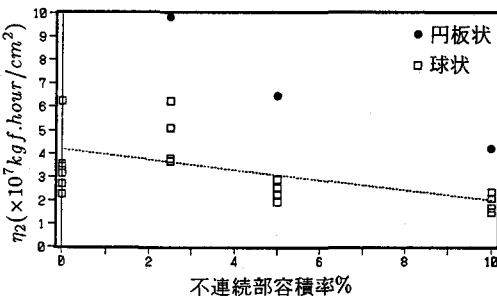


図 11： η_2 と容積率の関係

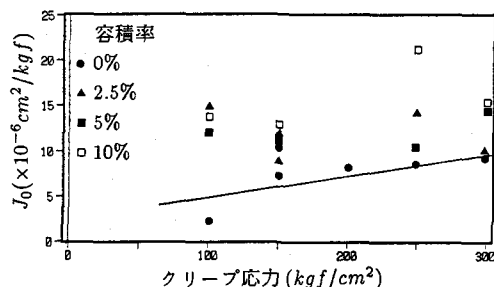


図 12 : J_0 とクリープ応力の関係

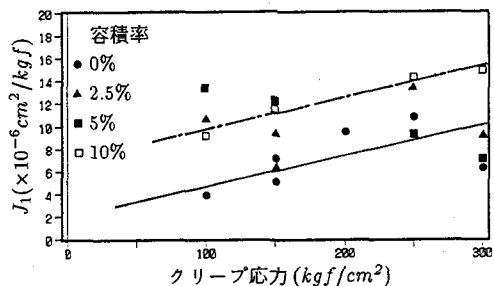


図 13 : J_1 とクリープ応力の関係

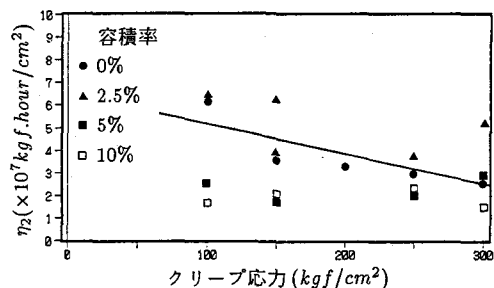


図 14 : η_2 とクリープ応力の関係

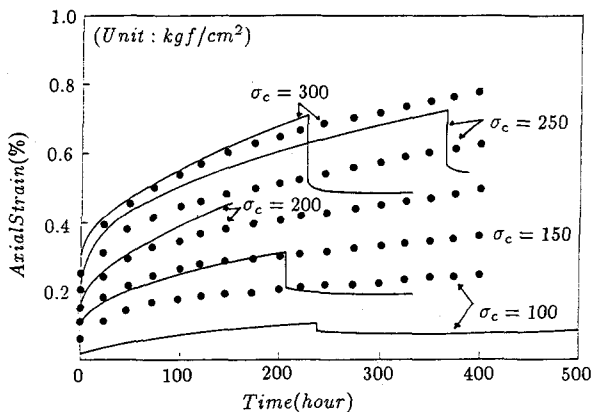


図 15 : レオロジーモデルによるクリープ曲線 (容積率 0%)

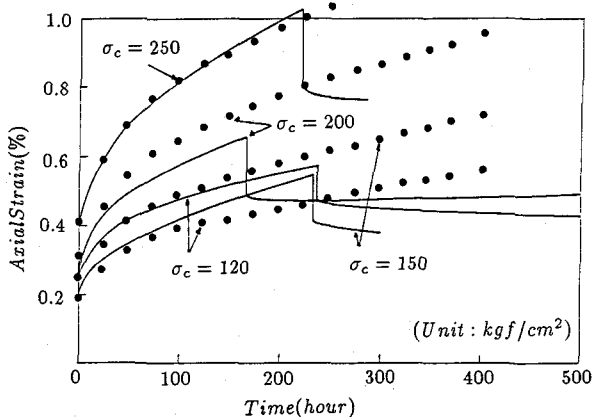


図 16 : レオロジーモデルによるクリープ曲線 (容積率 10%)

5. まとめ

遅延弾性ひずみを表現できるレオロジーモデルを用いて、実験結果の考察を行ったが、遅延弾性ひずみに比較して粘塑性ひずみ量が数倍も大きいと、粘塑性ひずみの時間に対する変化をより実験結果に即して表現できるようにモデルの修正を行った。その結果、円板状の不連続部を含む場合は粘塑性ひずみ量が球状に対してかなり少ないことがわかった。このことは、円板状の場合、瞬間塑性ひずみが多くを占め、時間が経過しても塑性ひずみはさほど増加しないということになる。円板状の場合、不連続面としての表面積が球状の場合より大きいことから、微小き裂の進展が容易になり比較的短時間に発生してしまうためであろうと考えられる。

また、クリープ応力に対するクリープ定数の変化は不連続部が存在しない場合、 J_0 , J_1 は増加し、 η_2 は減少する傾向が見られたが、不連続部が存在するとクリープ応力に対する相関は見られなかった。

参考文献

- 1) 赤木知之：岩石のクリープ特性と一般化レオロジーモデルの適用、材料、第 30 巻、第 336 号、1981
- 2) 大草重康：新しい土質力学 I、森北出版、1973
- 3) 伊東、赤木、河村：岩質材料の不連続面量と力学特性の相関性に関する研究、第 8 回岩の力学国内シンポジウム、pp109-114、1990