

堆積岩のクリープとひずみ軟化を評価する数理モデルの提案

株式会社大林組 技術研究所 正会員 ○藤岡 大輔
 株式会社大林組 技術研究所 正会員 中岡 健一
 株式会社大林組 技術研究所 正会員 畑 浩二
 長崎大学大学院 工学研究科 フェロー会員 蔣 宇静

1. はじめに

膨張性地山と呼ばれる地山強度比の低い堆積岩系の地山では、壁面あるいは切羽が時間とともに内空側に押し出してくることがあり、トンネル掘削においてはしばしば工期遅延といったトラブルをもたらすため、変形挙動の時間依存性を評価する方法が求められている。岩石の特徴的な力学的性質として、一定の応力の下で変形が徐々に増えるクリープと、定ひずみ速度の載荷試験の下で、応力がピークまで大きくなり、その後、残留強度まで小さくなるひずみ軟化が挙げられる。

本研究では、クリープ現象とひずみ軟化現象を両立させ、岩石の時間依存挙動を評価することができる新しい数理モデル「 s 値モデル」を開発し、その適用性の検討を行った。

2. s 値モデルの概要

s 値モデルでは、クリープの進行を無次元パラメータ s で表している。このパラメータ s は、数多くの微小な破壊と停留を交互に繰り返すことによって増えていくと仮定している。一回の停留時間を、応力の関数 $f(p)$ とし、 s が単位量1大きくなる間の停留回数を、 s 値の関数 $g(s)$ とすると、 s 値の増加速度は停留時間と停留回数に反比例する式(1)で表される。このモデルは、微小破壊(粒子結合の切断あるいは微小亀裂の伸展など)のたびに s 値が増えることを仮定しており、 $f(p)$ は一回の微小破壊に要する時間、 $g(s)$ はクリープの進行度に依存した微小破壊が生じる頻度を表しており、式(2)で表される。 b_n および a_v は材料定数である。停留時間 $f(p)$ は応力に依存し、式(3)で表される。 h はモール・クーロンの破壊基準式を参考にした。

上述したモデルを有限要素あるいは有限差分コードに組み込む方法として、一つの荷重ステップ内で進む時間 dt の間におけるリラクゼーションを計算し、クリープを表現する。応力の緩和を計算するために、こ

では図-1 に示すように、バネとダンパが直列したモデルを考える。バネ力は、式(1)に示す各要素の p に等しいとし、ダンパの動きを、クリープの進行を表わすパラメータ s とする。

リラクゼーション計算過程では、図-1 に示したモデルの両端は変位せず、各荷重ステップ内部に設けた時間ステップの繰り返しの伴い、ダンパが変位してバネ力、すなわち応力の偏差成分 p が低下していくことを仮定する。 s の増加に伴う応力の低下量について、岩石の応力が高ければ一回の微小破壊による粒子同士のズレあるいは微小亀裂の伸展長は大きくなると考えられる。また、粒子結界面あるいは微小亀裂面に対する垂直応力が大きければ微小なズレや亀裂の伸展は小さくなると考えられる。そして、ひずみエネルギーは応力の二乗に比例し、摩擦エネルギーは垂直応力に比例することから、 s の増加に伴う応力の低下量は、バネ力 p の二乗に比例し、静水圧 σ_m に反比例するものとした。

$$\dot{s} = \frac{1}{g(s)f(p)} \quad (1)$$

ここに、

$$p = \sqrt{2J_2}, \quad J_2 = \frac{1}{2}s_{ij}s_{ij}, \quad s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma_m, \quad \sigma_m = \frac{1}{3}\sigma_{ii}$$

$$g(s) = \exp\left\{-\left(\frac{s-a_v}{\sqrt{2}b_n}\right)^2\right\} \quad (2)$$

$$f(p) = \exp\{q(h-p)\} \quad (3)$$

ここに、 $h = c + \sigma_m \tan \phi$

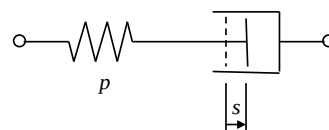


図-1 s 値モデルを組み込むためのバネとダンパ

キーワード：クリープ、ひずみ軟化、数理解析、有限差分法、膨張性地山

連絡先：〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 大林組技術研究所 Tel : 042-495-1025

3. 三軸圧縮試験のシミュレーション

s 値モデルによる応力修正方法を有限差分法のコードに組み込み、公表されている三軸圧縮応力下で行われた要素試験¹⁾を対象にして行った解析の例を示す。対象とした試験は、同じ材料を使って一定荷重载荷によるクリープ試験と一定ひずみ速度の载荷試験を行い、典型的なクリープ特性と、応力-ひずみ関係が得られているものである。この試験では、载荷試験によるピーク強度の90%、80%、70%などの荷重を用いてクリープ試験が行われている。

表-1 に試験条件を、表-2 に計算に用いたパラメータを示す。

表-1 試験条件

拘束圧 σ_c (载荷, クリープ)	MPa	0.6
载荷速度(载荷)	%/min	0.1

表-2 計算に用いたパラメータ

E (ヤング率)	MPa	900
ν (ポアソン比)	-	0.3
α (1 とした)	1/min	1
a_v (平均)	-	300
b_n (分散, $a_v/5$ とした)	-	60
K (クリープモデルのバネ値)	-	0.006
c (クリープ粘着力)	MPa	0.18
ϕ (クリープ摩擦角)	°	47
q (停留時間の感度係数)	1/MPa	21
c_r (残留状態の粘着力)	MPa	0
ϕ_r (残留状態の摩擦角)	°	51

図-2に、载荷試験 (ひずみ速度0.1%/min, 拘束圧0.6MPa) の比較を示す。図中の载荷試験のプロットは文献の図を読み取って行った。参考のために、試験に用いられたひずみ速度とは異なるひずみ速度による計算結果も併せて示している。パラメータを適切に設定することにより、ピーク軸差応力とひずみ軟化を含む応力-変位関係を計算できることが分かる。図-3に、载荷試験で得られたピーク軸差応力の20~90%を荷重としたクリープ試験と計算結果の比較を示す。それぞれの図には s 値が250, 300, 350となる点を示した。図-3から、徐々にひずみ速度が遅くなってゆき、遅いひずみ速度が続いたのちに、最後にひずみ速度が急激に速くなって破壊に至るといふ、特徴的なクリープのひずみ速度カーブが得られていることが分かる。またクリープ破壊時間も試験結果と相似的であることが分かる。

図-2の応力-ひずみ曲線は、载荷直後は弾性的で、ピークに近づくと勾配が小さくなり、ひずみ硬化と呼ばれる傾向が見られる。この範囲は、 s の進行により、停留密度 $g(s)$ が最大になる手前までの過程である。ピーク

付近は、 $g(s)$ が最大に近い状態で、図-3のひずみ速度が遅くなっている時間と対応している。ピークを越えると $g(s)$ が減少して停留時間 $f(p)$ が長くなり、式(1)より応力が小さくなるひずみ軟化現象が表現される。このように、式(1)は、ひずみ速度が一定の条件であればひずみ硬化とひずみ軟化を表わし、荷重が一定の条件であれば、クリープを表わすことができる。

4. まとめ

本研究では、岩石の時間依存挙動を評価するため、クリープの進行を表すパラメータ s を導入した「 s 値モデル」を提案し、クリープ現象およびひずみ軟化現象の特徴的な変形挙動を評価することができた。

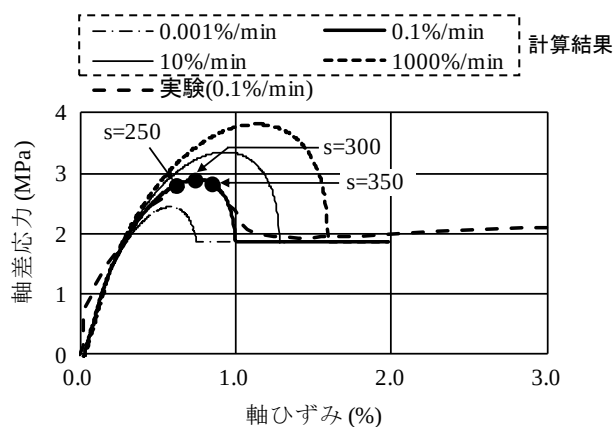


図-2 载荷試験による応力-ひずみ関係の比較, 拘束圧 $\sigma_c=0.6$ MPa

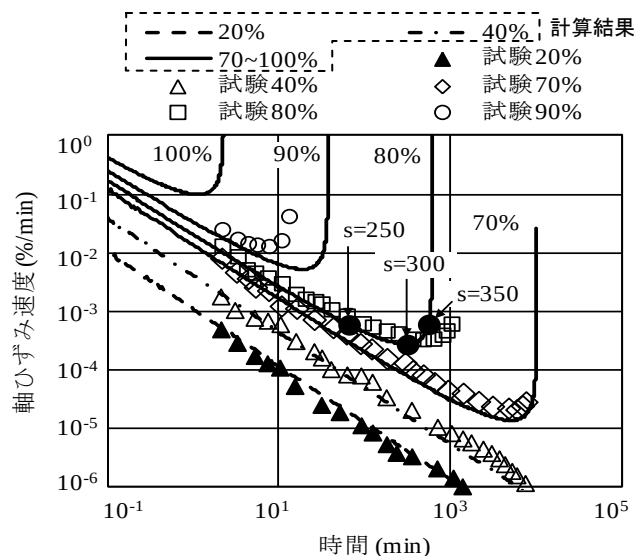


図-3 クリープ試験によるひずみ速度-時間関係の比較, 拘束圧 $\sigma_c=0.6$ MPa

参考文献

- 1) 西好一: 地盤材料の弾-塑性挙動と構造物基礎の設計への応用に関する研究, 電力中央研究所報告 304, pp.91-105, 1982.