堆積岩のクリープとひずみ軟化を評価する数理モデルによるトンネル掘削解析

株式会社大林組 技術研究所 正会員 〇中岡 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 蒋 宇静

1. はじめに

著者らは、膨張性地山におけるトンネル周辺岩盤の変位を予測するために、クリープとひずみ軟化現象を評価するモデルを提案した¹⁾.ただし、この報告では一要素モデルによる要素試験の解析にとどまっていた.ここでは、仮想したトンネルの掘削解析にこのモデルを適用し、本数理モデルが多次元問題においても安定した解析ができるか否か、ひずみ軟化とクリープが合わさった挙動を評価できるか否かについて確認した.

2. 数理モデルの概要

このモデルは、クリープの原因を微小な亀裂の伸長であると考え、以下のような仮定をおいた.

・微小な亀裂の先端は硬い部分に遭遇すると伸長が停留し、ある短い時間が経過したのち破壊(破過)する.
・各亀裂には固い部分が一つ対応しており,亀裂先端と固い部分の距離はある平均値を中心に分散している.
・各亀裂の伸長速度は同じで、ある亀裂が停留すると、周辺の力学的な関係を持つ全ての亀裂が停留する.
ここでは微小な亀裂の伸長量をパラメータ s(s 値)で表す.載荷直後は硬い部分との遭遇頻度(停留密度)が少ないため s は速く大きくなり,次第に停留密度が高くなって遅くなり,最後に停留密度が減少して加速する.
s 値の増加速度は停留時間 F(p)と停留密度 G(s)に反比例する式(1)で表される.停留時間として井上らの研究
²⁾を参考に、せん断応力を表す p を用いた式(2)を、また、停留密度として式(3)の確率密度関数を適用した.

$$\dot{s} = \frac{\alpha}{G(s)F(p)} \quad \cdots (1) \qquad F(p) = \exp\{q(h-p)\}, \quad p = \sqrt{2J_2} \quad \cdots (2) \qquad G(s) = \exp\{-\left(\frac{s-a_v}{\sqrt{2}b_n}\right)\} \quad \cdots (3)$$

ここに*α*, *q*, *a_v*, *b_n*は材料定数であり, *a_v*は載荷直後における微小亀裂の先端と固い部分までの平均的な距離, *b_n*は分散を表している. *h*は材料の強度で,ここでは図-1 に示すように,静水圧軸と Lade が用いた三角形状の降伏曲面上の点 Q の距離とした.また,本モデルを有限差分法(FDM)に応力を修正するルーチンとして組み込むために,図-2 に示すようなリラクゼーションモデルを導入した.リラクゼーションの計算過程で

は、式(1)によって計算された ds からせん断力 pの低下量 dp を求め、dp から Lode 角が変化しない条件で d σ_{ij} を計算した.また、破過によって解放されるエネルギー はせん断力の 2 乗に、消費されるエネルギーは静水圧 σ_n に比例すると考え、pの低 下量は式(4)のようにおいた.

3. トンネル掘削解析

ここでは小土被りの無支保のトンネルを対象に掘削解析を行った. 解析モデルは 厚みを持っており,面外方向の変位を固定することで平面ひずみ状態とした.トン ネル高さは 5.8m, 天端の土被りは 9.2m とし,側方のモデル化範囲はトンネル幅の 10 倍,底盤から下方は 19.2m までで、半モデルとした.また,**表-1** にクリープパ ラメータを示し¹⁾,ダイレタンシー角は 0°とした.解析ステップは,まず,静水 圧状態の初期応力を仮定し,自重を作用させた収束計算により,不釣り合い力を十 分小さくした後、トンネルを掘削し、時間の進行を開始した.先ず、トンネル掘削 解析に使う材料特性を確認するため、単調載荷試験とクリープ試験の解析を行った. 図-3 に載荷速度は 1%/min とした単調載荷試験の結果を示す.拘束圧 σ_{c} =40kPa と



図-1 強度hとせん断力p



キーワード クリープ,ひずみ軟化,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 TEL042-495-9603 120kPa に対するピーク軸差強度の関係にモール・クーロンの破壊基準を適用して粘着力 c と内部摩擦角 ϕ を換算すると、c=220kPa、 $\phi=41^{\circ}$ となる。 $\sigma_c=80$ kPa のピークが $\sigma_c=40$ kPa と 120 kPa の中間よりもやや上方となっているのは、使用した降伏曲面が静水圧に対して上に凸であるためである。図-4 に軸差力を 400kPa としたクリープ試験の解析結果を示す。前述と同じ理由により、 $\sigma_c=80$ kPa のクリープ破壊時間が $\sigma_c=40$ kPa と 120 kPa の中間よりもやや右側となっている。図-5 にトンネル掘削からの各経過時間における最大せん断ひずみの分布(弾性成分を含む)、および、天端と地表面の沈下量(クリープ成分のみ)を示す。図から、掘削後 50 日まで

は帯状のせん断ひずみの局所化は見られない.54 日後ではせん断ひずみ の高い領域は明らかに帯状の形状(せん断帯)をなしており,59 日までは 徐々にトンネル周辺で拡大した.そして,59 日以降の2 日間で急速にせ ん断帯が地表まで伸長した.図では,ひずみの分布形状を確認しやすいよ うに,59 日以降のコンタースケールを変えている。天端と地表面沈下量 についても59 日以降の2 日間で急激に大きくなっている.図-6 に天端と 地表面の沈下速度を示す.沈下量にクリープ試験に見られるような一次~ 三次クリープに近い動きが見られた後,崩落に至った.

4. まとめ

本報告ではクリープとひずみ軟化を評価する数理モデルをトン ネル掘削問題に適用した.その結果,掘削から50日まではせん断 帯の伸長が見られず変位はゆっくりと進み,その後,10日以内で せん断帯が急速に伸長し,崩落に至る時間的な効果を計算するこ とが出来た.以上から本モデルは,トンネル周辺岩盤のクリープ とひずみ軟化が合わさった挙動の評価に適用できると考える.今 後は解析的調査の他に,模型試験による検証等を行う予定である.

参考文献

- 藤岡大輔,中岡健一,畑浩二,蒋宇静: 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,土木学会第 67 回年次講演会,Ⅲ -077, pp. 153-154, 2012.
- 2) 井上純哉,飛内英明,浅羽俊之: 軟岩の時間依存型構成則と変形の 局所化に関する一考察,応用力学論文集 Vol. 6. Pp. 397-405, 2003.



図-5 最大せん断ひずみの分布(%)、および、天端と地表面沈下量

表-1 クリーノハフメータ		
	単位	数値
ヤング率	MPa	900
ポアソン比	-	0.3
α	1/min	1000
a_v (平均)	-	300
b_n (分散)	-	40
k	-	0.006
q	1/MPa	21



図-3 単調載荷試験の解析結果



-214

-428-