

温度場を考慮した軟岩のクリープ挙動と数値解析への適用

Evaluation of creep behavior of soft rock under non-isothermal condition and its applicability for numerical analysis

山辺 正* 宮本綾子** 伊藤文雄*** 谷 卓也****

Temperature change induced in the rock mass does not only act as an external force, but affect the constitutive relationships of the rock mass itself. For extra long-term stability predictions, many researches have been carried out into temperature-stress-diffusion coupling phenomena.

This paper deals with a constitutive relationship of a soft sedimentary rock, taking into account the time-dependent characteristics, which is one of the fundamental physical properties of rocks. Mechanical properties of Tage tuff are investigated, using the results of uniaxial creep tests conducted under elevated temperatures.

1. はじめに

岩盤が構造物基礎や放射性廃棄物処分場として利用される場合には、その長期安定性や時間依存性を十分に把握しておく事が重要となる。特に軟岩のように岩石自身の物性が、岩盤の力学挙動に大きく影響する場合には供試体レベルの力学特性を把握する必要性も高い。従来から軟岩のクリープ現象を研究した例は多く、支配要因としての応力レベル・環境温度・時間効果・水の存在に変形は大きく依存することが知られている^{1)~3)}。特に、軟岩を対象とした放射性廃棄物の地層処分にあたっては、深度500m程度であることを前提として広範な検討が実施されている^{4) 5)}。本研究では、軟岩である田下凝灰岩を用いて環境温度を制御した一軸・三軸試験を実施し強度・変形特性を決定した後、クリープ試験から粘弾性体としての特性を決定した。一般に軟岩がクリープ破壊するとき、その変形過程においては急激にひずみの進行する点があり、クリープスペクトルのピークとして表現される。本研究ではピーク時間に対応する離散化モデルにより実験値を評価し、クリープ挙動を予測するとともに、観測データが増えるに従ってパラメータを順次更新する観測的手法を導入することにより変形予測が可能になることを示した。さらに、乾燥供試体を用いても、その変形が高温温度環境においては加速され、低温温度環境では遅延する性質を示した。

上述のような軟岩の時間依存性を考慮した数値解析を実施するにあたって本文では、まず軟岩からなる岩盤が全て同一の粘弾性特性を有するとした粘弾性理論解を用いて、円形トンネルの覆工に作用する応力の時間依存性について検討した。次に、温度分布が一樣でない場を対象とした非定常熱伝導有限要素解析を実施し、得られた温度分布から物性値の非定常な温度依存性を考慮した変形解析について言及した。

2. 温度を変化させたクリープ実験

想定した環境温度下で一軸圧縮試験を実施し一軸圧縮強度を決定した後、その強度との相対的な応力レベルを等しくしたクリープ試験を実施した。具体的には環境温度を -10°C 、 20°C 、 55°C と変化させ供試体内部の温度も環境温度に等しくなると考えられる十分な時間をおいた後、各環境温度下での破壊応力の79%に相当する応力レベルを保持したクリープ試験を実施した。実験に用いた岩石は多少風化の進行した乾燥状態の凝灰岩で、常温下の一軸圧縮強度は27MPaである。この岩石では高温になるほど一軸強度が低下するとともに、図1に示すようにクリープ時のひずみ速度が速くなり破壊時間が短くなった。同図の縦軸は、軸方向ひずみ $\epsilon_1(t)$ 、横軸は経過時間 t (秒)である。岩塩を対象としたクリープ試験においても同様の傾向が観測⁶⁾され、単純な内部構造を有する場合にも時間～ひずみ関係が同様の傾向を示すことは時間依存性を考える上で興味深い。

* 正会員 埼玉大学工学部 ** 学生会員 埼玉大学大学院
*** 正会員 大成建設土木設計部 **** 正会員 大成建設技術研究所

図1の供試体と比較して若干強度の高い新鮮な凝灰岩（常温下の一軸圧縮強度=29MPa）を用い、三軸圧縮応力下でクリープ試験を実施して図2の結果を得た。供試体は乾燥状態で拘束圧力を10MPaとし、環境温度を92℃および20℃とし応力レベルを約94%（93.5%と95.1%）に保持した結果、92℃では約3200秒で破壊したが、20℃の場合には破壊に至るまで約307時間（約110万秒）を要した。図1および図2の結果は、乾燥状態の軟岩においても高温環境では粘性的な挙動が卓越してくることを現しており、本研究に用いた凝灰岩では、10MPa程度の拘束圧力を加えてもその傾向は変わらないことを示している。

凝灰岩を対象とした図1の経過時間～軸ひずみ関係のうち、例えば-10℃と+55℃との実験結果をBurgersモデルで近似すると、図3と図4を得る。ともに粘弾性領域までの近似を示しているが、図4に示す-10℃の場合には17時間を越えても3次クリープには至らなかった。軸ひずみ $\epsilon_1(t)$ の時間変化を求めるにあたっては、次の式(1)で与えられる関係を適用した。

$$\epsilon_1(t) = \frac{2\sigma_1}{9K} + \frac{\sigma_1}{3G_2} + \frac{\sigma_1}{3G_1} - \frac{\sigma_1}{3G_1} e^{-(G_1 t / \eta_1)} + \frac{\sigma_1}{3\eta_2} t \quad \dots (1)$$

ここで K は体積弾性係数であり時間に依存しないと仮定し、目標の応力レベル σ_1 に至るまでに計測されるヤング率とポアソン比から決定した。 G_2 はせん断弾性係数、 G_1 は遅延弾性係数、 η_1 は遅延弾性速度、 η_2 は粘性流体速度と呼ばれており、これらのパラメータは環境温度にも依存して変化している。このようにパラメータを決定することは一軸圧縮応力下での非線形粘弾性挙動をカーブフィットさせたに過ぎず、拘束圧力が作用している時の挙動を表現してはいない。また、破壊に至る3次クリープの表現を得ることはできない。しかし、一軸圧縮応力下においても平均応力は軸応力の1/3だけ増加する事、図1と図2から一軸・三軸応力下で傾向の似た挙動となる事、この挙動は三軸応力下で温度を変化させた岩塩のクリープ試験⁶⁾でも同様の傾向を示す事などを考慮すれば、式(1)に含まれるパラメータを用いて岩盤挙動を表現することに多少の意味はあろう。

3. 円形トンネル周辺の応力

岩盤内に円形断面を有するトンネルを掘削した時の粘弾性挙動を調べるため、前節の粘弾性パラメータのうち-10℃の実験結果で表される物性値を有する均質な岩盤を考え、初期応力を10MPaとして内径5.06mの水平トンネルを、応力開放率100%で掘削することを考える。この水平トンネルの諸元

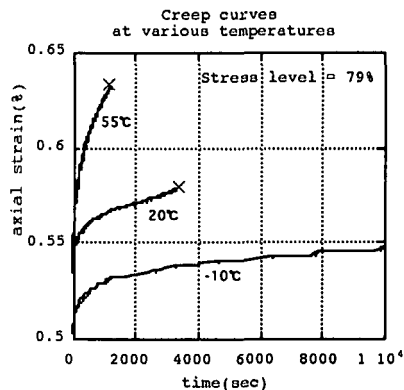


図1 一軸圧縮応力下でのクリープ挙動に与える環境温度の影響。

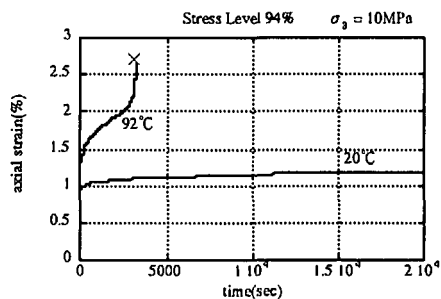


図2 三軸圧縮応力下でのクリープ挙動に与える環境温度の影響。

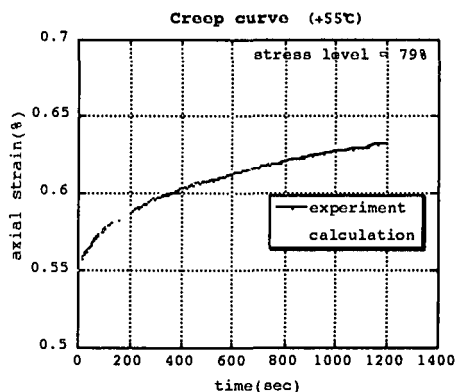


図3 +55℃における軸方向ひずみと時間の関係をBurgers体として近似した結果

は、処分孔を縦置きとする円形坑道を参考にして図5に示すように覆工がコンクリートセグメントと裏込モルタル（吹き付けコンクリート）から成り、それぞれの弾性係数を32,000MPaと4,000MPaとし、ポアソン比は両者とも0.2とし覆工の一軸圧縮強度を40MPaと仮定した⁴⁾。

図5のように剛性の高い覆工が岩盤に密着して施工される場合には、岩盤が弾性変形した後に覆工の施工が行われるとして、覆工と岩盤の接触面に発生する圧力 $p_0(t)$ は次式で表される。

$$p_0(t) = p_0(1 + Ce^{t/T} + De^{t^2}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 p_0 は岩盤内の初期応力、その他のパラメータは式(1)に含まれる物性値に依存している。式(2)を導出する過程の詳細と物性値との対応については参考文献⁷⁾に譲るが、式(2)は弾性体の厳密解に対応の原理を適用して粘弾性体としての解を求めた結果である。この解を図5の円形トンネル周辺の岩盤領域に適用し、岩盤の物性値が図4で得られた値とすれば覆工に作用する応力の時間変化として図6を得る。時間変化に伴い覆工コンクリートの円周方向応力が設計基準強度を越えている。これは円形トンネルを取り巻く岩盤が、全て図4のように近似できる粘弾性的性質を有するとして円孔周辺応力の時間変化を計算した結果であり、過大な変形を見積もる結果となっている。また、設計基準強度を超過する時間も40時間前後であり、図4の実験範囲を越えている。従って、より現実的で詳細な数値解析を実施する必要がある。これについては第5節において議論する。

4. クリープスペクトルと観測的方法による表現

図1の実験に使用した乾燥状態の田下凝灰岩を用いて、応力レベル75~95%の一軸圧縮クリープ試験を常温下で行った。実験時の軸方向および横方向ひずみから得たクリープひずみを移動平均し、クリープスペクトルを計算した。具体的には、赤木の方法⁸⁾に従い一定応力 σ_0 のもとでのひずみの時間変化をクリープコンプライアンス $J(t)$ を用いて $\epsilon(t) = J(t)\sigma_0$ とし、この $J(t)$ を次式で表した。

$$J(t) = J_0 + \sum_{i=1}^{n-1} J_i(1 - e^{-t/T_i}) + \eta_n \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで J_i は各要素のコンプライアンス、 T_i は遅延時間、 η_n は粘塑性コンプライアンスであり、本研究では粘塑性コンプライアンスを0として2次クリープまでの挙動をモデル化した。

$\Phi(t)$ は遅延スペクトルでその第一近似⁹⁾として $\Phi(t) = t \frac{dJ(t)}{dt}$ を用い、平滑化した時間~クリープひずみ曲線の傾きにクリー

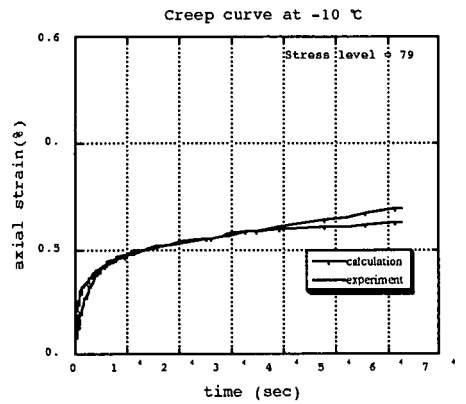


図4 -10℃における軸方向ひずみと時間の関係をBurgers体として近似した結果

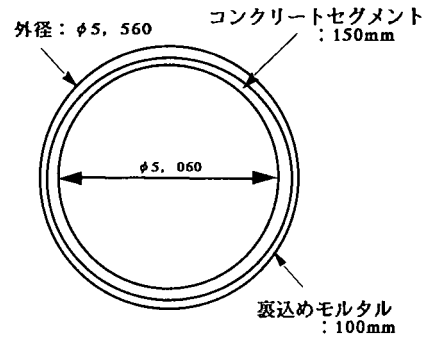


図5 円形トンネルの諸元

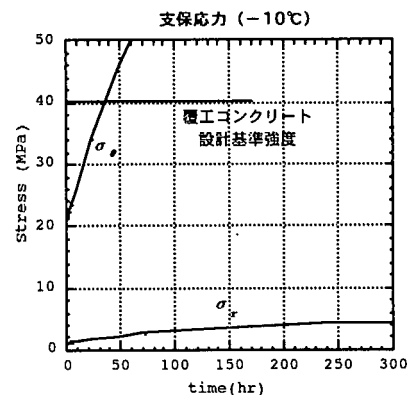


図6 図4を円形トンネルに適用した結果

ブ開始からの経過時間をかけて求めた。スペクトルに現れるピークを遅延時間と見なすことにより構成則を決定できる。このようなひずみの時間変化を問題にする場合には、実験条件としての一定応力 σ_0 を安定的に制御することが重要であり、本研究において荷重は空気圧を油圧に変換し実験中の応力の変動は、ほとんどのケースでクリープ応力の $\pm 0.2\%$ 以内であった。

スペクトルのピーク時間を遅延時間とするフォークト要素の和として2次クリープまでの挙動をモデル化した。ピークが現れる度に粘弾性定数を更新することにより、順次、変形予測を試みた。応力レベル85%で行った実験を例について検討した。この方法では時間の経過とともに、現れたピークを追加しながらその時間までのひずみの値から、クリープコンプライアンスJの値を順次更新した。ピークの決定方法は前述の通りであり、この供試体においては図7の↓で示した6点のピークを用いた。破壊にもっとも近い第6番目のピーク時間は3675秒であったが、その時間までのデータに基づいてクリープコンプライアンスを計算した結果、図8に示すように実験値と4080秒付近までほぼ一致することが判った。

3次クリープの開始点を決定するためにクリープひずみ速度が最小となる点を求める方法や、破壊までの変形挙動を含めたクリープ挙動全体を表現するための構成則を決定する方法などもあり一概に優劣を付けがたい。現位置岩盤への適用を念頭に、この観測的手法について今後とも検討を続ける予定である。

5. 数値解析への適用性

第3節で検討したように、円形坑道周辺の温度分布を一様とした理論解を適用した場合には覆工に過大な応力が発生することとなった。ここでは、より現実的な境界条件を与えた非定常熱伝導有限要素解析を実施し、得られた温度分布から物性値の非定常な温度依存性を考慮した弾塑性解析について検討する。図9は、高さ5mの正方形断面を有する処分坑道の周辺を模擬した断面を表しており、左鉛直部分が中心線となっている。参考文献に従い解析領域を軸対称とし、中間貯蔵50年後のガラス固化体を処分深度500mに埋設して発熱源とし、地表温度は15℃で地温勾配を3℃/100mに設定した。密度と熱物性値はオーバーバック・緩衝材・埋め戻し材・岩盤を対象として、これも参考文献通りとした。この条件下で非定常な温度分布を求めた結果を図10に示す。上位3本の曲線は、発熱源中心付近を表し第4本目は発熱源中心から水平線上で岩盤と処分孔が接する地点、第5本目は発熱源直上の

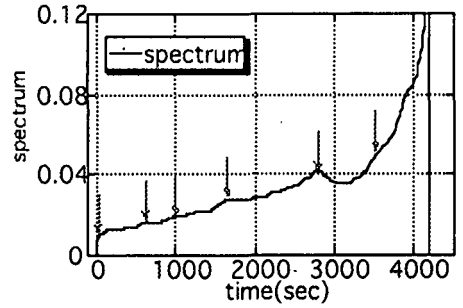


図7 観測的方法に用いたスペクトルのピーク位置 (応力レベル85%)

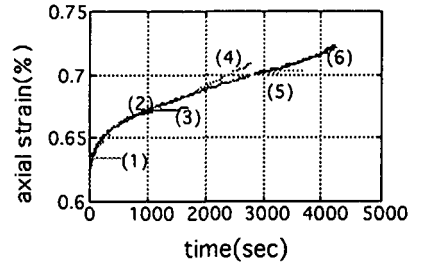


図8 観測的方法による変形予測の更新状況 (1)-(6)

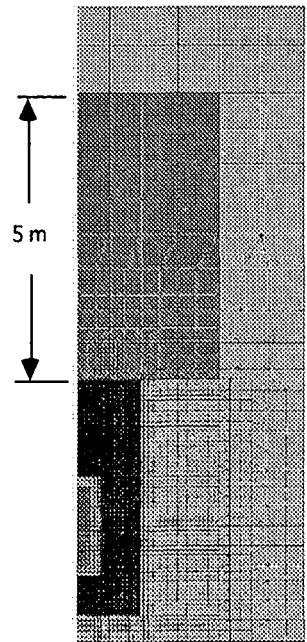


図9 処分孔周辺の要素分割

処分坑道に接する地点を表している。最上位を除くと全てが100℃以下の温度で推移している。この温度変化に従った強度定数を適用した弾塑性有限要素解析を実施した。第2節で検討した環境温度を変化させた三軸試験結果を参考に、温度30度での強度定数（粘着力=3MPa, 摩擦角=31度）を95度まで摩擦角は一定のまま粘着力を70%まで線形に低下させ、温度30度での変形係数（ $E=1200\text{MPa}$, ポアソン比=0.3）を95度では変形係数（ $E=840\text{MPa}$, ポアソン比=0.45）まで線形に変化させた。なお、掘削解析にあたっては坑道を掘削直後に埋め戻した。

図11は上述の条件で弾塑性解析した結果のうち、0.1年後における処分坑道周辺の弾塑性領域を示している。図11(a)は岩盤に温度依存性を考慮しない場合であり、図11(b)は上記の温度依存性を考慮した場合である。(b)の場合、隅角部のみならず塑性領域が広く存在することが判る。強度・変形特性をさらに検討することが望まれる。

6. まとめと今後の展望

環境温度・拘束圧力・応力レベルを変化させたクリープ実験から、岩盤をBurgersモデルで近似し円形坑道周辺の覆工に作用する応力について検討した。また、クリープスペクトルにおいてピークの存在を確認するとともに、粘弾性定数を随時更新していくことによって、計算に用いた遅延時間よりも先のひずみを予測する手法について検討した。また、環境温度を高くすることでクリープ破壊までの時間が短くなることを観測した。本研究では、2次クリープまでを中心に検討したが、3次クリープの開始点以降の変形挙動を表現するためには、式(3)の粘塑性ポテンシャル η_p についても別途考慮する必要がある。さらに処分坑道を念頭に非定常熱伝導有限要素解析を実施し、得られた温度分布から物性値の非定常温度依存性を考慮した弾塑性解析を実施した。

参考文献

- 1) N.D.Cristescu & U.Hunsche : Time Effects in Rock Mechanics, WILEY, 1998.
- 2) 吉中龍之進 : 岩石・岩盤の長期変形および長期強度の評価について, システム総研, pp.89-115, 1999.
- 3) 大久保誠介他 : 気乾状態と湿潤状態での・・・の一軸圧縮クリープ, 材料, Vol.43, No.490, pp.819-825, 1994.
- 4) 地層処分研究開発第2次取りまとめ, 核燃料サイクル開発機構, 1999.
- 5) 土木学会第55回年次講演会共通セッション, CS113~203, 2000.
- 6) G. Vouille et al. : Experimental determination of the rheological behavior, Penn. State Univ., 1981.
- 7) Gnirrk, P.F. & Johnson, R.E. : The deformation behavior of a circular mine shaft situated in a viscoelastic medium under hydrostatic stress, Univ. of Missouri, 1964.
- 8) 赤木知之 : レオロジーモデル定数の一決定法, 土と基礎, Vol.25, No.3, pp.47-52, 1977.
- 9) 山本三三三 : 物体の変形学, 誠文堂新光社, 1970.

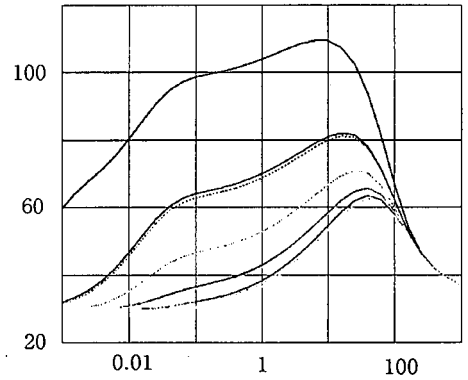


図10 非定常な温度変化
(縦軸・温度℃, 横軸経過年)

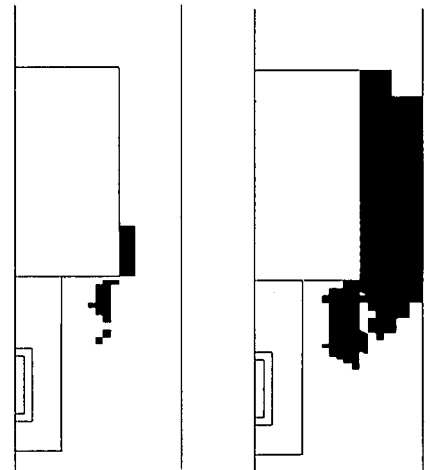


図11 0.1年後の塑性領域

(a) 温度依存性なし (b) 温度依存性有り