

大谷採石地下空間の長期安定性に関する検討

宇都宮大学	学生会員	○小松直矢
豊田工業高等専門学校	正会員	伊東 孝
宇都宮大学大学院	正会員	清木隆文

1. はじめに

これまでに栃木県宇都宮市大谷町で起きた大規模な陥没事故により、大谷の採石地下空間の危険性が表面化し、採掘後の地下空間の埋め戻しが強く主張されてきた。そのため、これまでに宇都宮市にある大谷採石地下空間での地下構造物の安全性の検討が行われてきた。しかし、採石地下空間の構造を再現したモデルで時間依存性を考慮したクリープ解析や大谷石の特性を考慮した長期安定性の解析が十分行われていない。この地下空間の長期安定性が検討されれば、周辺住民の生活の保障、地下空間の有効な利用も考えられる。そのため、本研究ではFLAC3D (Itasca 社)を用いて、地下空間を再現し、クリープの時間依存性や長期安定性についての解析を進める。

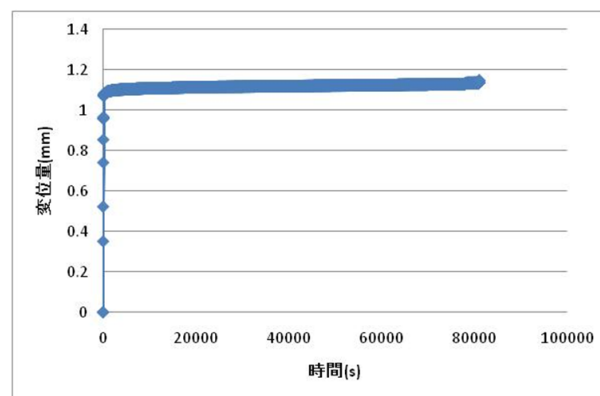


図-1 クリープ曲線

2. FLAC3Dによるクリープ解析

(1) 想定されるクリープ現象について

大谷採石地下空間内を支える柱に長期間にわたり鉛直方向に荷重が作用することで、変形がすすみ、クリープを引き起こすと考えられる。大谷採石地下空間は古いもので少なくとも50年以前から存在している。このため、採石地下空間の健全性を評価するためにも長期安定性を検討する必要がある。

(2) 実験結果によるクリープ曲線

FLAC3Dによりクリープを再現するため、豊田工業高等専門学校で行われた一軸クリープの試験データをもとにして解析を行った。この実験の大谷石供試体寸法は縦、横、高さそれぞれ5cm×5cm×10cmの寸法である。これの供試体上に載荷重として3.0tをかけられた実験結果から得られたクリープ曲線を図-1に示す。このクリープ試験では、約1日間の鉛直変位を約10秒間隔で計測している。

この実験結果には、荷重をかけ瞬間的に変位が進み、一定の変位に収束する一次クリープ(遷移クリープ)や一定の変位が続く二次クリープ(定常クリープ)が見られる。一方で、変位が急激に増加し、破壊に至る三次クリープ(加速クリープ)は現れていない。この実験結果をもとに、本研究では各種材料パラメータを決定する。

(3) バーガ体粘弾性モデルについて

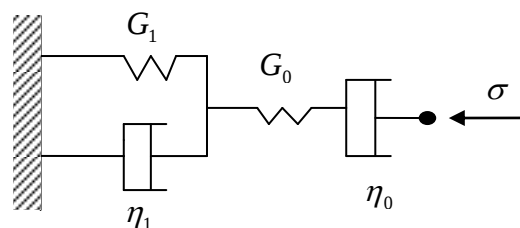


図-2 バーガモデル

線形粘弾性挙動の解析には、バネとダッシュポットを組み合わせた一般化されたフォークトモデルやマクスウェルモデルなどを用いることが多い。しかし、マクスウェルモデルでは応力緩和の挙動を説明する場合に適合し、フォークトモデルはクリープの

地下空間 大谷石 クリープ 長期安定性

連絡先 〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学工学部建設学科建設工学コース

岩盤工学研究室

Tel/Fax 028-689-6218

表現に適合している．本研究ではマクスウェルモデルとフォークトモデルとを組み合わせた4要素モデル(バーガモデル(図-2))の適用を試みる．これにより，応力緩和の挙動，クリープによる岩盤の挙動，残留ひずみについても一般化して明確に表現する²⁾．

(4) クリープ解析を実地するための材料パラメータの設定について

バーガ体を用いるために表-1に示すパラメータと以下の四つのパラメータが必要となる．

G_1 : Kelvinの要素のせん断弾性係数

η_1 : Kelvinの要素の粘性係数

G_0 : Maxwellのせん断弾性係数

η_0 : Maxwellの粘性係数

ここに，せん断弾性係数 G はバネ，粘性係数 η はダッシュポットの材料パラメータとなっている(図-2)．これらのパラメータを決定する方法として，まずクリープ曲線を平滑化し差分表示する．この平滑化したデータをもとに，変位スペクトルを求めて図に整理する(図-3)³⁾．このグラフに現れるピーク値を読み取ると遅延時間 τ が求まり， $\tau_1 = 49s$ ， $\tau_2 = 129s$ となる．この遅延時間をもとに， G_1 ， η_1 ， G_2 ， η_2 を順次決定する．実験値をもとに決定した各パラメータを表-1に示す．

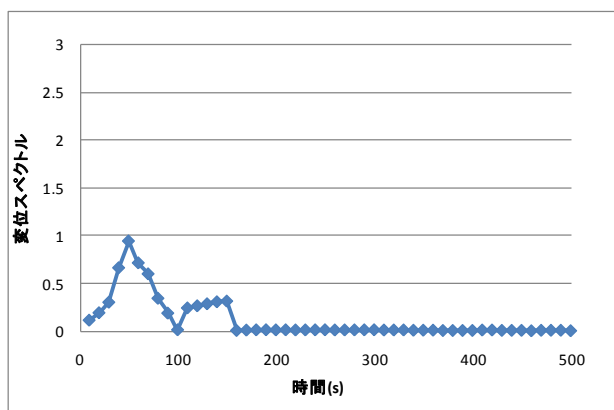


図-3 変位スペクトル図

表-1 大谷石の物性値

体積弾性係数	$6.91 \times 10^6 \text{MPa}$
せん断弾性係数	$4.76 \times 10^2 \text{MPa}$
せん断弾性係数	$6.92 \times 10 \text{MPa}$
粘性係数 η_0	$8.13 \times 10^4 \text{MPa}$
粘性係数 η_1	$1.52 \times 10^4 \text{MPa}$
粘着力	2.9MPa
内部摩擦角	29.6°
引張強度	1.6MPa

(5) FLAC3Dによるクリープ試験の再現

今回の解析には有限差分法による解析ツールFLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) 3D (Itasca 社製)のクリープ解析モジュールを用いた．解析モデルは，実験時の供試体寸法と同様に，縦，横，高さそれぞれ5cm×5cm×10cmとし，1ゾーンを2cm×2cm×2cmとする(図-4)．

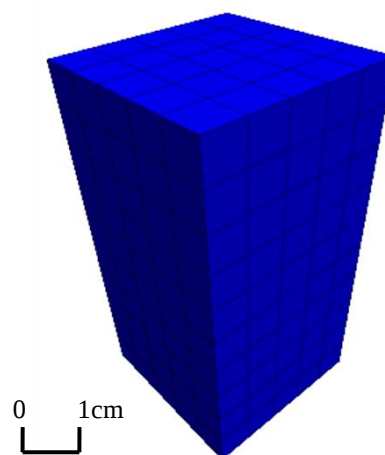


図-4 大谷石の解析モデル

この図-4のモデルに，実験と同様に上載荷重として3.0tの荷重をかけ，1日間の解析を行う．解析結果から得られたクリープ曲線を図-5に示す．

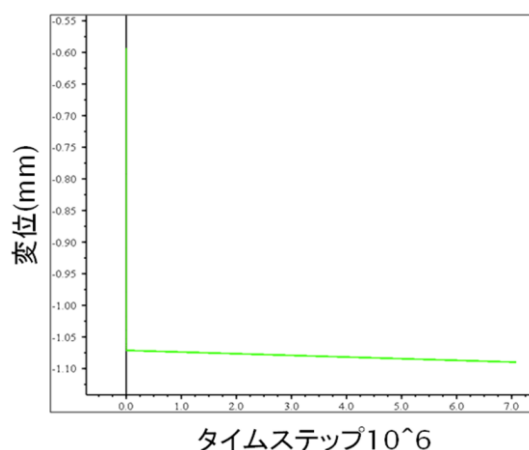


図-5 FLAC3Dによるクリープ曲線

この結果、1日間の解析で初期の弾性変形が1.07 mmとなり、24時間後にはクリープ変形が起こり、1.089 mmとなった。一方、実験結果のグラフ(図-1)では、初期変形は1.065mm、その後のクリープ変形で1.1mmとなっている。この結果から数値解析は実験結果と同様の傾向を示すことが確認された。なお、図-5中の横軸に見られるタイムステップという単位は、解析に用いた時間増分をもとにした単位であり、解析終了時、1日間に相当する。今回は1日間の解析において、タイムステップを $1 \times 10^{-10} \sim 1 \times 10^{-4}$ に設定し、小さい値で細かく解析を行っている。

3. 大谷採石地下空間のクリープ解析について

(1) FLAC3Dによる地下空間のクリープ解析

縦、横、深さをそれぞれ180m、180m、60mの要素体に地表面から深さ20mの地点までの要素体にこの地点の未固結地盤の代表値として関東ロームの物性値(表-2)、その他の要素体は大谷石の物性値とした。境界条件として、境界面を構成する節点の変位速度を固定し、解析を行った。1ゾーンを $1.5\text{m} \times 1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ の寸法に設定する。

表-2 関東ロームの物性値

体積弾性係数	$6.91 \times 10^2 \text{MPa}$
せん断弾性係数	$4.76 \times 10^2 \text{MPa}$
粘着力	$1.5 \times 10^{-2} \text{MPa}$
内部摩擦角	40°
引張強度	$1.6 \times 10^{-2} \text{MPa}$

(2) 大谷採石地下空間のモデル

図-6に示した図は、実在する採石地下空間をFLAC3Dによってモデル化したものであり、空洞部

分だけを抜き出したものである。この採石地下空間の残柱および縦坑、横坑を含めたクリープ解析を行い、クリープ挙動を確認する。そして、採石後数十年の採石地下空間内の変位を推定し、地下空間の長期安定性を検討する。ここに、長期安定性の検討方法として、実験で破壊に至った大谷石のデータと解析結果を比較することにより検討する。

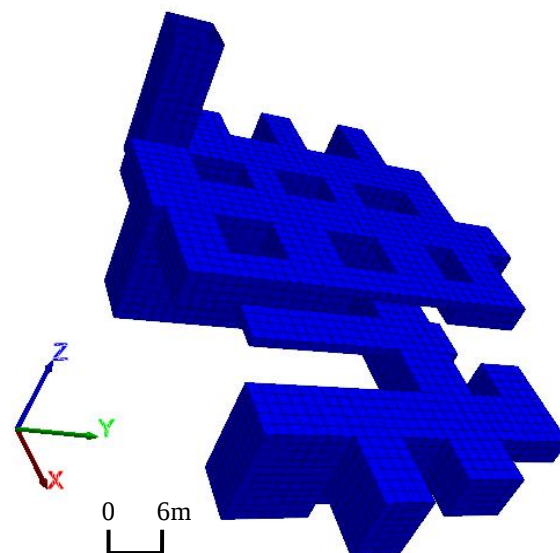


図-6 大谷採石地下空間の3次元モデル⁴⁾

4. まとめおよび今後の課題

(1) まとめ

- ・実験データの分析により、大谷石の材料パラメータを決定することができた。また、導き出したパラメータを用いたFLAC3Dの解析結果においても実験結果と同様な挙動のクリープ曲線を再現することができた。この結果から、求めた材料パラメータは実験結果からうまく求められたと判断される。
- ・今回は大谷町に実際に存在する採石地下空間でのクリープ解析を行い、地下空間のクリープ挙動を確認した。この結果からこの空間に、クリープ変形が発生する可能性を確認した。

(2) 今後の課題

- ・現在、採石を行っている採石地下空間の長期挙動を確認し、解析結果と比較する。
- ・長期安定性の検討として、FLAC3Dにより数十年の解析を行い、クリープ変位が実験結果の三次クリープを引き起こすひずみと比較して、大谷採石地下空間の構造が長期的に安定であるか判断する。

参考文献

- 1) 土質工学会編：堆積軟岩の工学的性質とその応用

pp143-187,1987.

- 2) 山本三三三：物体の変形学, pp150-177, 材料学会, 1968.
- 3) O.C. ジェンキエヴィッチ, K. モーガン：有限要素と近似, pp23-27, 1984
- 4) 樋口大樹, 清木隆文：大谷採石地下空間の健全性評価方法の検討. 土木学会第 37 回関東支部技術研究発表会公演概要集. 2ps. CD-ROM. Ⅲ-13, 2010.