

大谷採石地下空間の特殊環境下における構造安定性に関する検討

宇都宮大学 学生会員 ○熊谷 尚紀
 宇都宮大学大学院 学生会員 多田 海成
 宇都宮大学大学院 正会員 清木 隆文

1. はじめに

大谷石は宇都宮市の大谷町付近に、淡い緑色の凝灰岩として所々に露出している¹⁾。大谷石はその趣ある岩質や色調から住宅用石材などに多く利用されるため、大谷町には所々に大谷石を採石する採石地下空間が存在する。これらの地下空間は大谷町で起きた大規模な陥没事故により危険性が表面化し、埋め戻しが主張されてきた。しかし、地下空間の陥没の主な原因は、十分に安全な採掘方法ではなかったことであると示されたため、大谷採石地下空間を対象に安定性を評価する研究が進められてきた²⁾。

2. 研究目的

今回の研究では、実際の大谷採石地下空間の不安定性に影響を及ぼすものを確立することを目的とし、天盤や底盤が傾斜している場合の検討、飽和状態の大谷石層を掘削した場合の検討を行った。解析には有限差分法による3次元解析ソフトFLAC3D(Itasca社製)を用いて地下空間を再現し、その掘削時のひずみや応力を求めて検討を行う。

3. 地盤が傾斜している場合の検討

3.1. 解析モデル

今回の解析は水平地盤と傾斜地盤について解析を行い、傾斜地盤が具体的にどのような構造的な特徴を持つか水平地盤と比較することで検討を行う。この簡易モデルでは140m×140m×20mの空間を再現した。どちらも残柱の太さは10m、残柱間隔は20mとなるように配置した。実際の大谷石はもともと10°前後の傾斜で分布していると考えられているので、傾斜角を約10°とし、天盤を均等に50m与え解析を行い、解析モデルの最下部に境界条件を設ける。これは実際の大谷石資料館の広さを参考にしている。また、今回の解析で用いた大谷石の物性値を表-1に示す。これは過去に行われた室内試験³⁾の結果をもとにした。

表-1 解析に用いた物性値

体積弾性係数(MPa)	1.38×10^3
せん断弾性係数(MPa)	0.91×10^3
粘着力(MPa)	2.1
内部摩擦角(°)	30
引張強度(MPa)	1.08
密度(kg/m ³)	1.77×10^3

3.2. 解析結果

今回解析を行った結果、水平方向のひずみと鉛直方向のひずみは中央の残柱に最大ひずみが作用するという同様の傾向のひずみ分布を示したため、特にひずみの大きい鉛直方向のひずみ分布を見る。引張ひずみを正とすると、水平地盤と傾斜地盤の鉛直方向のひずみは図-1、図-2のようになった。

水平地盤、傾斜地盤の中央の残柱における最大ひずみは、それぞれ0.236%、0.254%となった。このことは水平方向のひずみでも見られることから、どちらのモデルも空間の中央にずれ込むような挙動を示すと考えられる。

なお、塑性領域や降伏領域は確認できず、また破壊に至るとされているひずみは、過去の試験結果⁴⁾から約0.5%~0.9%とされているので、今回解析に用いたモデルで破壊に至る箇所はないと考えられる。

傾斜地盤に注目すると、空洞中央の柱残柱の傾斜面上側に最大ひずみが作用している。また、水平地盤においても傾斜地盤においても「ダテ」と呼ばれる天盤や底盤と柱との接合部分の隅角部にひずみがかかっている。このことから傾斜地盤は長期的に見ると最大ひずみが作用している残柱の部分や「ダテ」の部分から安定性を損なう可能性がある。

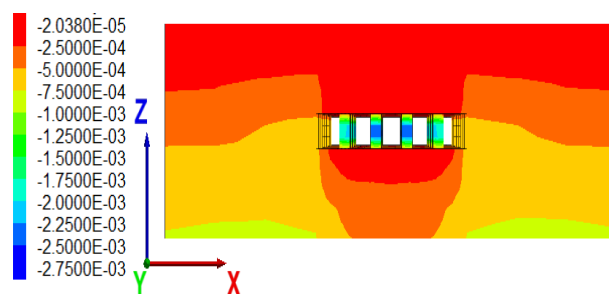


図-1 水平地盤の鉛直ひずみ

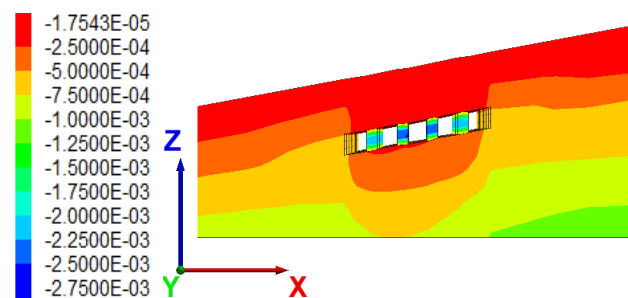


図-2 傾斜地盤の鉛直ひずみ

4. 飽和した大谷石層を掘削した場合の検討

4.1. 解析モデル

今回解析に用いたモデルは $30\text{m} \times 30\text{m} \times 20\text{m}$ の 18,000 個のゾーンを持ち、全て飽和した大谷石層の解析領域となっている。そして、 $10\text{m} \times 30\text{m} \times 10\text{m}$ の掘削を行った。掘削後、掘削箇所に地下水が溜まったと想定し、地下水位を掘削した底の部分まで急激に低下するように設定を行い間隙水圧が定常状態になるまで解析を行った。その解析の流れの中での変位や応力などについて観測地点（図-3）を設けて観測を行った。また、解析に用いた物性値（表-2）は、過去に行われた試験結果⁵⁾から、透水係数や空隙率などを解析モデルに与えた。

4.2. 解析結果

今回の解析で間隙水圧は掘削箇所に地下水が溜まった状態と排水時を想定した。また、間隙水圧の定常状態においては掘削壁面周辺の間隙水圧は 0MPa となった。

対象とした地下空間の安定性について評価するために、掘削壁面の観測点 1, 2 において水平方向の変位、空洞底面の観測点 3, 4 において鉛直方向の変位に注目した。

観測点 1, 2 に注目すると、掘削箇所に地下水が溜まった状態における水平方向の変位は空洞外向きに最大で 2.6mm となった。これは地下空間が外向きに押される挙動を示している。これは岩体を堪水した地下水が押すことに起因すると考えられる。地下空間内の排水が終了し、大谷石の岩体内の間隙水圧が低下し、壁面を押す力が開放されることで、変位が 1.7mm と掘削前の変位程度の大きさに戻る傾向が示された。観測点 3, 4 に注目すると、水平方向の変位はほとんど確認できなかった。しかし、地下水堪水時に鉛直方向の変位は最大で沈下方向に 4.5mm となった。これは地下水の重量が掘削部の底面部に作用することによって生じた。排水後は観測点 1, 2 と同様に地下水が無くなり、変位が地下空間内向きに 2.4mm と掘削前程度の変位に戻る様子が確認された。また、解析全般で、塑性領域や降伏領域は現れなかったため、今回程度の地下水の堪水状態では、想定した地下空間の構造は安定していると考えられる。

5. まとめおよび今後の課題

傾斜地盤と水平地盤の地下空間の安定性を比較すると、天盤を均等に分布させた場合でも傾斜地盤のほうが最大ひずみは大きくなることや、最大ひずみが作用する箇所に違いがあることがわかった。また、ダテと呼ばれる天盤や底盤と残柱との接合部分の隅角部に大きなひずみがかかっていることもわかる。したがって、長期的に検討すれば、それらの部分から構造安定性が損なわれることが考えられる。

飽和した大谷石層を掘削した場合、堪水した地下水を急激に排水しても、地下空間壁面変位は大きく変わらない傾向があることが示された。

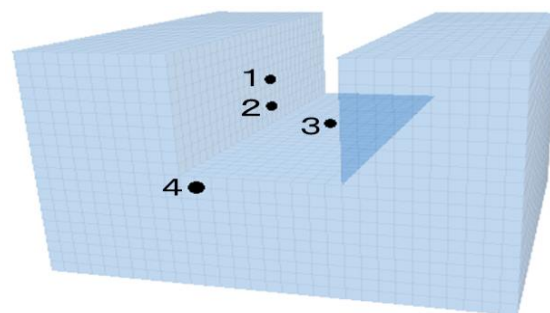


図-3 簡易モデルと観測点

表-2 解析に用いた物性値

体積弾性係数(MPa)	1.38×10^3
せん断弾性係数(MPa)	0.91×10^3
大谷石の乾燥密度 (kg/m^3)	1340
水の密度 (kg/m^3)	1000
空隙率(%)	42.7
透水係数(m/s)	4.17×10^{-11}
飽和体積弾性係数 (MPa)	1.45×10^4

今後の課題として、今回は排水の速度が地下空間の変位に与える影響についても検討を行う必要がある。また、今回の研究や既往の研究の結果から第三者でも大谷採石地下空間の安定性が評価できるような点検表の作成する必要がある。

参考文献

- 1) 大谷資料館：<http://www.oya909.co.jp/>, 2014/12/5
- 2) 江守 太一郎, 清木 隆文：
現場調査による採石地下空間の構造安定性に関する考察，地下シンポジウム論文・報告集，土木学会[査読付論文]，pp.79-88, 2005,1
- 3) 清水建設株式会社：丸彦製菓地下工場構造安定性に関する検討書，1989.7.
- 4) 関根 一郎, 日景 秀治, 西牧 均：
岩石の低温特性に関する基礎的研究，土木学会年次学術講演会講演概要集 第3部，第38巻，pp67-68, 1983.
- 5) 稲田 善紀, 木下 尚樹, 関 正造, 松尾 暁, 成行 惇, 越智 健三：低温の影響を受けた空洞周辺岩盤の熱的挙動に関する一二の知見：土木学会論文集，547号III - 36, pp211-220, 1996.