

有効利用を考慮した大谷採石地下空間の安全性再評価の試み

(株)横浜コンサルティングセンター 前田和輝
宇都宮大学大学院 正会員 ○清木隆文

1. はじめに

(1) 研究背景

宇都宮市大谷町ではかつて大谷石の採石が盛んであり、現在は採石跡となる広大な地下空洞(以下、大谷採石地下空間)が広がっている。現在宇都宮市では、この地下空間を利用した様々な事業を推進している¹⁾。しかしながら、1989～1992年の大規模陥没²⁾等の影響により、大谷地下空間の再開発に対して不安を持つ事業者も存在し、企業の誘致活動は容易ではない。また、大谷採石地下空間の構造不安定性は不明な点が多い。そこで、対象とした空間に地質・地盤リスクマネジメント³⁾の考え方を導入し、対象空間の危険性を定量的に評価し、共有することが求められる。よって、本研究では地下空間の安全性について、定量的に評価する手法を提案し検証する。そこで、これまでの安全性評価手法を参考に、大谷採石地下空間の新たな評価指標を提案する。大谷採石地下空間では現在、地盤工学的観点から空間が崩落する可能性に対して安全性の評価指標⁴⁾が主に用いられている。この評価指標は、約20年前に提案されたもので、隣接する空洞の影響や残柱が機能を失った後も空洞が安定を保つ可能性について考慮を含めることが期待される。またこれまでの評価指標は、構造の安定性に観点を置いているために、利用者歩行時のスリップや地下水流入による空洞内の冠水等、地下空間利用者が遭遇しうる危険性について考慮されていない。

(2) 研究目的

本研究ではこの点について、数値解析で柱房式の大谷採石地下空間の構造全体を考慮する観点から安定性を検討し、評価指標の改善案を提案することを試みた。また、地下空間を有効利用する利用者の観点からも地下空間の安全性について考察し、評価指標に取り入れることを試みた。そこから得られた知見について本報文中で紹介する。

2. 新たに提案する大谷採石地下空間の評価指標について

(1) 提案指標の概要について

本研究では、5段階の評価段階を設定した。

- I. 「不特定多数の人々が利用可能」として紹介できる空洞
- II. 「ヘルメットの装着・定期的なモニタリング等の安全に配慮すれば一部の関係者が利用可能」として紹介できる空洞
- III. 利用者が危険に遭遇する可能性が高く、立入を制限する必要がある空洞
- IV. 崩落する可能性が高く、基本的に立入を禁止必要がある空洞
- V. 人が立ち入れない、あるいは危険性を把握できない空洞 (上記I～IVに該当しないすべての空洞)

そのうえで、対象空間の安全性の検討を「空洞の構造に対する安全性の検討」と「空洞が利用者にも与える影響に対する安全性の検討」の2段階に分け、空洞の評価を行う。

(2) 空洞の構造に対する安全性の検討

評価方式は最大10点からの減点方式とし、3段階で評価することとした。評価する項目ごとの優先順位から、点数配分に差をつけた。最も評価が良かった空洞のみ、「空洞が利用者にも与える影響に対する安全性の検討」を行う。

(3) 空洞が利用者にも与える影響に対する安全性の検討

本研究では、評価項目ごとに、3段階で評価し、そのうち最も評価が低かったものをこの評価指標全体の最終評価とした。

(4) 評価指標の検討方法

本研究では、評価指標の内容を検討するため、対象とした地下空間の数値解析と現地踏査を行った。

3. 数値解析による安定性の検討

(1) 解析モデル構築の概要について

大谷採石地下空間の安全性を検討するため、2か所の採石地下空間(A空洞、B空洞)の再現モデル(以下、検討モデル)を、地下空洞の解析に適した解析ソフトであるFLAC3Dを用いて作成し、解析を行った。検討したモデルでは、鉛直方向の重力加速度を 9.81m/s^2 とし、まず自重解析を弾性条件で実施した。以後の大谷石の採掘を表現する掘削解析をモルクーロンの破壊基準に準じる完全弾塑性解析を実施した。採用した物性値は大谷石の代表的な値を参考にした(表-1)。

(2) 残柱がある採石地下空間のモデル化と解析概要

A空洞は現在も採石が行われている地下空間であり、この空洞を再現した横方向145.3m、縦方向79.3m、土被り40mの空洞を含む検討モデルでは、残柱と呼ばれる空洞を支える柱構造が風化による劣化等に倒壊し、空洞を支保できなくなった場合の検討を行った。まず、地下空間の残柱をすべて除去し、残柱が1本も機能しない場合の検討を行った。この結果は残柱や天盤(空洞の天井部分)、床面にも降伏する状況は見られなかった。このことから、

表-1 大谷石の代表的な物性値

密度	体積弾性係数	せん断弾性係数
1730 kg/m ³	$1.38 \times 10^9 \text{ Pa}$	$0.91 \times 10^9 \text{ Pa}$
粘着力	内部摩擦角	引張強度
$2.10 \times 10^6 \text{ Pa}$	30°	$1.08 \times 10^6 \text{ Pa}$

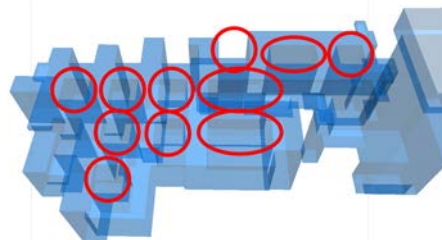


図-1 A空洞の検討モデル(空間を表示、赤丸部が残柱部)

キーワード 大谷石、採石地下空間、安全性、地質・地盤リスクマネジメント、地下空間の有効利用
連絡先 〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東7-1-2 宇都宮大学岩盤工学研究室 TEL: 028-689-7042

A 空洞は残柱がすべて機能を失っても安定を保つ可能性が示唆された。次に、検討モデルの強度定数(粘着力、内部摩擦角、引張強度)を1/2に設定し、残柱を数本ずつ6段階に分け除去する解析を行った。その結果、天盤には5段階目で降伏が確認された。このことから、強度定数を1/2にしたA空洞の検討モデルは、残柱がある程度残っていれば、他の残柱がなくとも天盤を支えるのに支障はない結果となった。そこで、残柱の断面積に着目し、天盤を支えるために必要な残柱の総断面積と1本ごとの断面積を確認する解析を行った。その結果、当条件下では「断面積32m²を下回った残柱は降伏しやすいこと」「合計断面積64m²の残柱は2448m²の天盤を支えられる」となった。

(3) 複数隣接する採石地下空間のモデル化と解析概要

B 空洞は山地形の下に存在し、3つの空洞が上下に連なった多段構造になっている。本研究では、これらの構造を単純化してモデル化し、解析を行った。検討したモデルは東西248m、南北276m、標高100~200mの範囲を対象とし、地表面はDEMモデル⁹⁾を参照し、山地部の地形を再現した。またモデルの下部のみ、境界面からの影響を回避するため、40mの余剰空間を確保した。対象とした地下空間を検討したモデルで自重解析を行った後、「すべての空洞を掘削した解析」「2段目の空洞のみ掘削した解析」「2段目の空洞を一部のみ掘削した解析」を行い、3つの検討モデルを「最大主応力」「最大せん断応力」「変位」の観点から比較した。結果、これらの掘削手順の違いに大きな差は認められなかった。

4. 大谷採石地下空間の現地踏査

(1) A 空洞の現地踏査

本研究では、2021年3月10、11日で行われた実験に合わせてA空洞へ入り、その結果を現地踏査と位置付けた。A空洞は、現在も大谷石を採掘中で、床面は平坦で乾燥しており、また残柱も採石法に従い規則正しく配置されていた。一方で、採石のために掘り下げられた箇所が複数存在しており、有効利用の観点から危険性を感じた。

(2) 大谷石採取場跡地の現地踏査

本研究では、2021年12月9日に3つの地下空洞を含む大谷石採取場跡地の現地踏査を行った。1つ目の空洞は横坑で、天盤部もアーチ状になっており、構造として安定していた。一方で1m²程度の面を持つ落盤岩塊も確認された。なお、この空洞は検討モデルの参考にしたB空洞の1段目に位置する。2つ目の空洞は、空洞の順路が複雑かつ断面が馬蹄形になっており、地下水の流入及び貯留が至る所に見られ、全域の踏査実施が比較的困難であった。また、天盤が隣接する空洞へ落ち込み、つながっている箇所も見られた。3つ目の空洞は、残柱を除けば見通しの良い大きな空間の様で、落盤等も見られなかった。また、通気性もよく、かつての有効利用の痕跡が見られた。どの空洞も構造は保持されていたが、その安全性は異なり、規則的に採掘がなされている空間程、安定性を高く感じた。これらの地下空洞は一部荒廃が進んでいるものの、地質・地盤リスクの観点から情報を共有することで、空間の利用価値を見出せる可能性があると考えられる。

5. 大谷採石地下空間の安全性評価の試行

(1) 安全性試行のための検討対象について

本研究では、数値解析と現地踏査によって得られた知

見をまとめ、評価指標を検討して作成した。さらに、現地踏査を実施した4か所の空洞に対して提案指標の適用を試みた。

(2) 空洞の構造に対する安全性の検討

数値解析の結果から、「(1) 残柱に対する検討」、「(2) 多段空洞に対する検討」、「(3) 隣接する空洞に対する検討」の内容を考察した。また、現地踏査による知見や既往の研究等から、「(4) 埋め戻した空洞の沈下に対する検討」、「(5) 空洞周辺の岩盤の透水に対する検討」、「(6) 壁面の節理に対する検討」の内容を検討した。

(3) 空洞が利用者にも与える影響に対する安全性の検討

現地踏査による知見や既往の研究等から、「(1) スリッパに対する検討」、「(2) 空洞の冠水・水没に対する検討」、「(3) 天盤の欠け落ちに対する検討」、「(4) 空洞の大きさに対する検討」、「(5) 出入口に対する検討」を評価項目とした。

(4) 安全性評価指標の適用および情報の共有

本研究では、A空洞、B空洞について評価に必要なデータを著者が図面や解析等から集め、実際に評価を行った。他2か所の空洞に関しては、現地踏査によって確認できた事項についてのみ評価を行った。結果は、概ね著者が評価前に感じていた各空洞の安全性と一致した。また、2021年12月24日、2022年1月31日に自治体に本研究で提案した評価指標の一部とその試行状況を説明し、概ね賛同をして頂くとともに、改善意見を頂いた。また、2022年3月15日に大谷の安全管理に携わる企業と情報を共有するとともに改善意見を頂いた。

6. まとめ及び今後の課題

(1) まとめ

本研究では、大谷採石地下空間の安全性をアピールして有効利用を促進するとともに、その安全性に関する情報を共有するために、地質・地盤リスクマネジメントの考え方をを用いて、リスクを関係者で共有するための方策を検討し、またこれまでの大谷採石地下空間の安全性再評価指標を簡略化して、対象とした地下空間の安全性を再評価するために、対象空間の数値解析および現地踏査を行い、これによって得られた知見を元に、新たな評価指標を作成した。また、作成した評価指標についても自治体や関連企業との方針の共有を図った。

(2) 今後の課題

本研究で提案した評価指標を他の構造形式を持つ空洞にも適用し、その結果を活かして行い改善し、一般化することが期待される。

参考文献

- 1)都市魅力創造課 大谷振興室、宇都宮市HP、<https://www.city.utsunomiya.tochigi.jp/shisei/service/shinseisho/sangyoseisaku/index.html> (2022年1月参照)。
- 2)1991年4月 宇都宮市・瓦作地区 大谷石採取場跡地陥没、自然災害の記憶 (web-gis.jp)、https://www.web-gis.jp/GS_Topics/199104Utsunomiya/199104Utsunomiya.htm (2022年1月参照)
- 3)阿南修司、地質・地盤リスクマネジメントのガイドライン、土木技術資料令和3年1月号、pp50-51、2021。
- 4)大谷石採取場跡地評価検討委員会、大谷石採取場跡地安定度評価手法、大谷石採取場跡地安定度評価について、pp.3、2001.10。
- 5)基盤地図情報 ダウンロードサービス、<https://fgd.gsi.go.jp/download/mapGis.php?tab=dem> (2021年12月参照)