

大谷採石地下空間の構造特性及び 安全情報の共有と活用の試み

前田 和輝¹・清木 隆文²

¹株式会社横浜コンサルティングセンター

(〒222-0026 神奈川県横浜市港北区篠原町 3053-4 エルム新横浜 201)

E-mail: maeda-ka@ycg-net.co.jp

²正会員 宇都宮大学大学院 地域創生科学研究科 社会デザイン科学専攻

(〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)

E-mail: tseiki@cc.utsunomiya-u.ac.jp

栃木県宇都宮市大谷地区ではかつて大谷石の採石が盛んであり、その地下には広大な採石場跡が広がっている。近年はこの採石地下空間を観光資源として利用する動きが強まっている。しかしながら、一方で平成元年に崩落事故が発生したこともあり、この採石地下空間の安全性が心配されている。中には、事業者が該当空間を利用することへの不安感を払拭できず、興業を断念するケースもある。どのようにして該当空間の安全性を事業者に説明すれば、地下空間への安心感を抱いてもらえるかは、大谷採石地下空間が抱える重要な課題である。そこで著者らは、大谷採石地下空間の安全性に関わる地盤リスクの定量的な評価の試みと、その客観性を確保する方法について検討を行う。

Key Words: *Oya underground quarry, safety, geological and ground risk management, structural stability analysis*

1. はじめに

栃木県宇都宮市大谷町で大谷石(おおやいし)を石材として採掘し、その結果採石跡となる広大な地下空洞(以下、大谷採石地下空間)が東西 4 km、南北 5 km の範囲に 200 個所以上広がっている。現在は宇都宮市では、この地下空洞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 年から 1992 年の間に発生した大規模陥没事故²⁾以来、変状発生が続いて居ることから、この地下空間を利用することに対して不安を感じる事業者も存在し、招致活動は難航している。また、大谷の地下空洞はいまだ不可解な事象が多く存在している。そこで、当該空間に地質・地盤リスクマネジメント³⁾の考え方を導入し、当該空間の危険性を定量的に評価し、これを共有することが必要である。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。そのために、旧来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は考慮されていない。

またこれらの指標は、構造の安定性に観点をおいているために、スリップや地下水の冠水等の地下空間の利用者が遭遇しうる危険性については考慮されていない。

本研究ではこの点について、解析ソフトを用いて現在の大谷採石地下空間の構造全体を考慮する観点から検討し、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。

2. 提案評価指標について

本研究では、これまで使われて居た「大谷石採取場跡地安定度評価手法」を参考にして、新たな評価指標の提案を試みた。その背景は、例えばこれまでの評価手法では、それぞれの残柱が上載荷重を支持する前提で安定性

が評価されているおり、残柱が降伏した時点で対象とする採石地下空間の安定性が極端に下がると仮定することで、高い安全性を担保している。一方で、残柱が倒壊した後、周囲の残柱がそれまで支持されていた上載荷重を分担して支持することで採石地下空間がある程度安定性を保つ可能性については検討されて居ない。この他に隣接している採石地下空間群もある事から、相互作用する地圧の状態、また、雨水や地下水の流入により、水没した空洞も多い事から空洞内に貯留した地下水影響等の考慮も望まれる。さらに旧来の評価手法は、構造安定性に特化したものなので、地下空間の有効利用のために必要な検討要素が含まれていない。例えば、「傾斜面・湿った床面での転倒」「地下水の流入」など、採石地下空間内の形状や状態が利用者の行動に危険を及ぼす要素が複数あるので、これらを検討要素に入れ、利用者の不安要素を払拭する事も期待される。当該空間の有効利用のために用いるためには、この評価手法は利用者の視点を含めることが期待される。これらの点から、著者らは「大谷石採取場跡地安定度評価手法」に代わる、現代の技術を取り入れた新たな大谷採石地下空間の構造的安定性を検討する評価指標が必要だと考えた。具体的には、「残柱が機能しなくなり、応力の再分配が行われた場合の空洞の安定性の検討」と「隣接する空洞、および貯留水圧から空洞が受ける影響についての検討」を行い、またその他埋め戻しを行った空洞の沈下等、追加で検討すべきと考えた項目を追加し、検討すべき評価指標とする。また、利用者の視点から見た空洞の安全性についても検討すべきだと考えた。「傾斜面・湿った床面での転倒」「地下水の流入」等の危険性を定量的に評価するための指標が必要と考えた。大谷大谷採石地下空間の構造安定性と有効利用の安心感への観点を組み合わせ、評価段階を以下の5段階とした。

- 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）
- その上で、当該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「空洞が利用者を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。

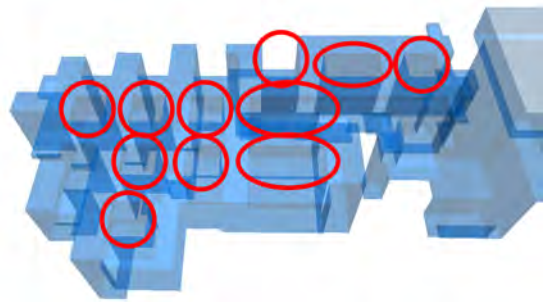


図-1 A 空洞の検討モデル(空洞部分の俯瞰透視図、赤丸の部分が残柱を示す)

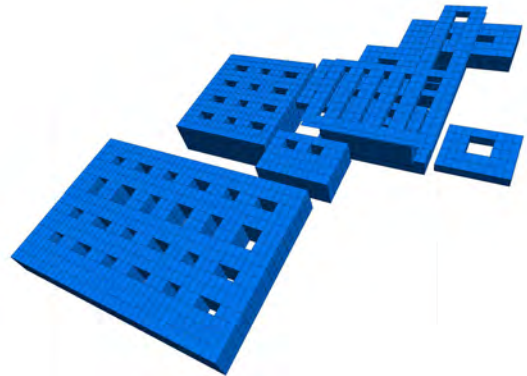


図-2 B 空洞の検討モデル(空洞部分のみを示す)

表-1 解析に採用した大谷石岩盤の物性値⁹⁾

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

(1) 空洞の構造に対する安全性の検討

評価方式は10点を評価点の最高点とした減点方式とし、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。評価点が7点以上の空洞を最も評価が良いものとし、これについてのみ「空洞が利用者を与える影響に対する安全性の検討」を行う。評価点が6点～4点のものを評価III、3点以下のものをIVとした。

(2) 空洞が利用者を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、I～IIIの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。

(3) 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、当該空

間の数値解析と現地踏査を行った。

3. 大谷採石地下空間の安定性解析

大谷採石地下空間の安全性を検討するため、2か所の当該空間（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(Itasca 社, Ver.5.0)を用いて作成し、解析を行った。本研究で検討した解析モデルでは、重力加速度

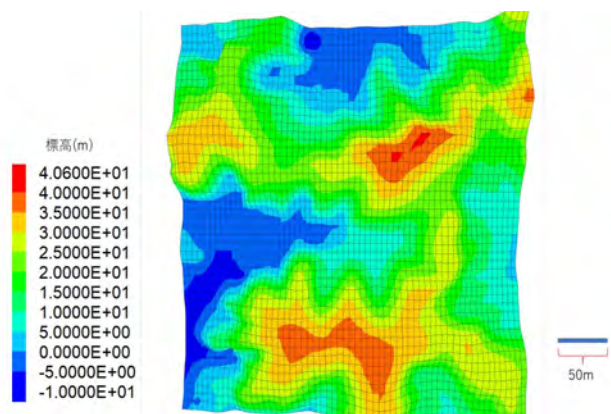


図-3 B 空洞の検討モデルの地表面の標高コンター図
(標高は基準面からの高さを示す)



図-4 A 空洞内部の様子



図-6 B 空洞2つ目の空洞内部の様子



図-5 B 空洞内部の様子



図-7 B 空洞3つ目の空洞内部の様子

9.81m/s²による自重解析を等方性弾性体モデルで行い、以後の掘削を再現する解析をモールクーロンの破壊規準に準じた完全弾塑性解析を行った。解析に採用した物性値は大谷石の代表値⁹⁾をもとにしてに表-1 の様に定めた。

(1) 残柱がある地下空洞のモデル化と解析

図-1 に示した A 空洞は現在も採石が行われている柱房式の採石地下空間であり、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よって空洞を支保しなくなった場合を想定して検討を行った。まず、当該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。その結果は、残柱や天盤（空洞の天井部分）、床面にも降伏を示さない状況となった。このことから、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高い事が示された。続いて、検討モデルの強度定数（粘着力、内部摩擦角、引張強度）をそれぞれ1/2にして、残柱を空洞中央部は空洞崩落のきっかけとなるので1本ずつ倒壊、空洞周辺に行くほど複数本倒壊する数本ずつ6段階に分けて除去する解析を行った。その結果、天盤には5段階目で降伏する状況が確認された。このことから、強度定数を半減させた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ことが分かった。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。結果、当条件下では「断面積 32 m²を下回った残柱は降伏しやすいこと」「合計断面積 64 m²の残柱は 2,448 m²の天盤を支えられる」可能性が明らかになった。

(2) 隣接する複数の地下空洞のモデル化と解析

図-2 に示した B 空洞は山の下に存在し、3つの空洞が重なり合った多段の構造になっている。本研究では、これらの構造を単純化してモデル化の後、解析を行った。検討したモデルは東西 248m、南北 276m、標高 100~200 m の範囲を対象とし、地表面は DEM データ⁹を参照し、山地部の地形を図-3 のように再現した。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。当該の検討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日で行った現場実験の実施に合わせてA空洞へ入り、空洞内を観察した。この結果を現地踏査と位置付けた。内部の様子を図-4 に示す。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有効利用の難しさを感じた。

(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つ目の空洞は比較的直線的で、天盤部もアーチ状になっており、掘削後 70 年以上経過しているが、構造として安定していた。床面は平坦で乾燥していた。しかし、1 m²程度の面積を持つ岩塊の落盤も確認できた。なお、この空洞は検討モデルの参考にした B 空洞の1段目に当たる。内部の様子は図-5 に示す。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、踏査の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、つながっている個所

も見られた。内部の様子は図-6 に示す。3つ目の空洞は、残柱があるので、これ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。内部の様子は図-7 に示す。どの空洞も構造自体はある程度安定に残存していたが、その安全性は異なり、整然とした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ものと考察された。

5. 大谷採石地下空間の安全性評価の試行

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、作成した。フローチャートを図-8 に示す。さらに、本研究では現地踏査を実施した4か所の空洞に対して実際に適用を試みた。

(1) 空洞の構造に対する安全性の検討

A 空洞の検討モデルにおける数値解析の結果から、「(1) 残柱に対する検討」の内容を、断面積に焦点を当てて検討した。また、B 空洞の検討モデルにおける数値解析の結果から、「(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。さらに、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。

(2) 空洞が利用者に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) スリップに対する検討」、「(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、その内容を法律や条例を元に検討を進めた。「(2) 空洞の冠水・水没に対する検討」については、「①急速(数時間~数日程度)に水位が上昇する場合」と「②時間をかけて(数か月~数年程度)空間が水没していく場合に分けて検討を行った。

(3) 安全性評価指標の適用及び共有

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らが空洞に関する図面や解析等から集めて、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。その結果、現在も使用されている空洞である A 空洞は事業者のみ利用可能とした評価IIとなった。他の空洞につ

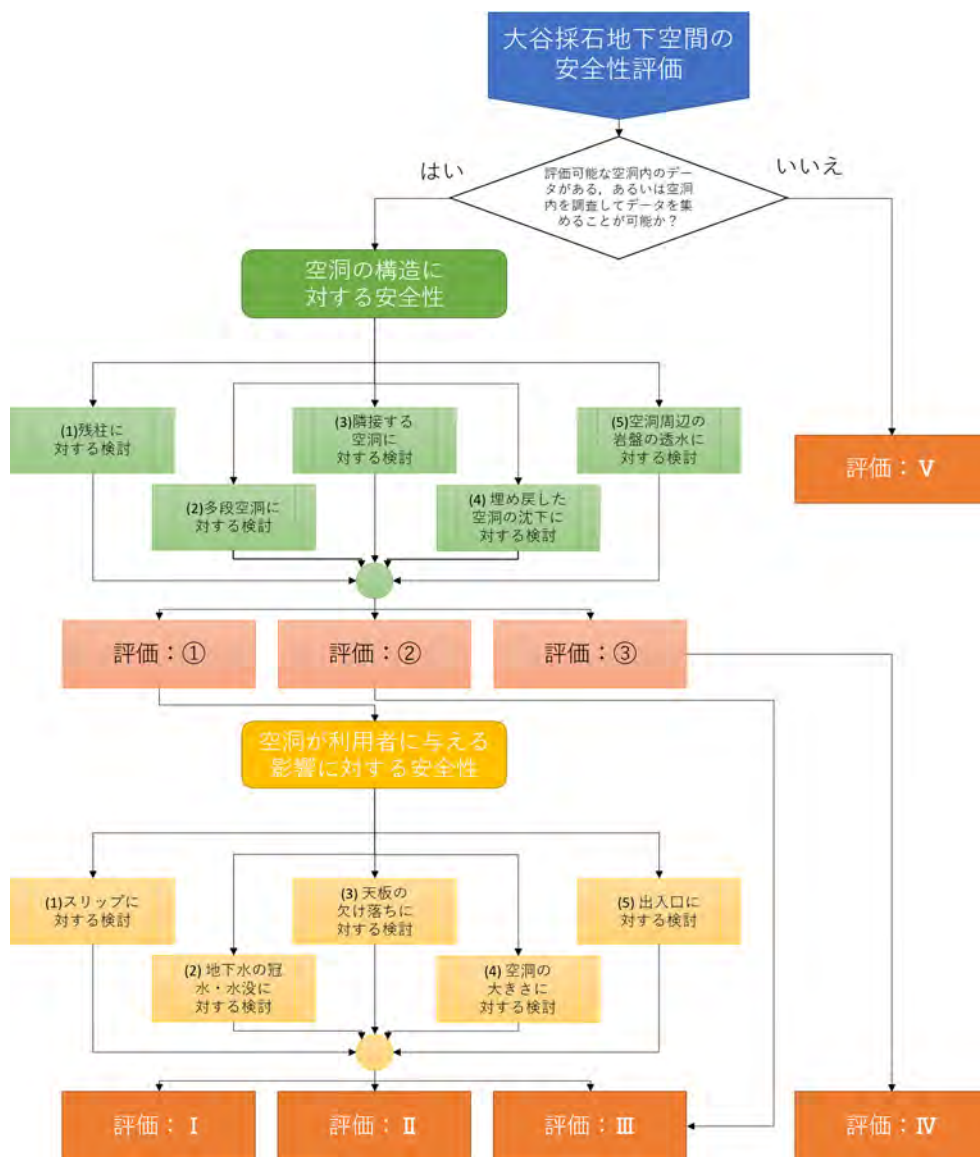


図-8 評価指標のフローチャート

いても、概ね著者が感じていた安全性に近い結果が得られた。また、2021年12月24日、2022年1月31日に宇都宮市に本研究で提案した評価指標の一部とその試行に状況を説明し、概ね賛同をして頂くとともに、改善点などについて意見を頂いた。

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、また旧来の大谷採石地下空間の安全性再評価指標を簡略化して、当該空間の安全性を再評価を試みた。

そのために当該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、実際に試行して作成した評価指標の妥当性を確認した。また、作成した評価指標についても自治体と方針の共有を図った。

(2) 今後の課題

今回評価した空洞以外についてもデータを集め、評価指標を適用し、その結果のフィードバックを行って、より客観的な評価指標へ改善していくことが課題である。特に、多段空洞・隣接する空洞の影響についてや、「空洞の構造に対する安全性の検討」における評価の優先順位等については、更なる考察をすすめる。

謝辞：本研究を実施するにあたり、大谷資料館、宇都宮市役所 経済部、川崎地質株式会社宇都宮営業所、飛鳥建設株式会社 首都圏土木支店 宇都宮営業所の諸氏に

貴重なお意見を頂きました。また、本研究は宇都宮市大谷特性活用補助金及び中電技術コンサルタント(株)からの寄附金の一部によって実施した。記して御礼申し上げます。

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, https://www.web-gis.jp/GS_Topics/170710Ooyakuzure/170710Ooyakuzure.html (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) 程 伝涛, 現場計測に基づいた地震動推定と大谷採石地下空間の耐震性能評価に関する研究, 令和2年宇都宮大学大学院博士前期課程学位論文, 2020.3.
- 6) 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)

SAFETY INFORMATION SHEARING OF STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF OYA UNDERGROUND QUARRY AND ITS UTILIZATION

Kazuki MAEDA and Takafumi SEIKI

The quarry industry was once thriving in the Oya town area, Utsunomiya City, Tochigi Prefecture, Japan and a ruin of vast quarry site had spreaded undergrounds. In recent years, there has been an increasing movement to use them as a tourism resource. However, on the other hand, the safety of this underground quarries have been questioned due to the collapse accident that occurred in 1989. In some cases, the business operators cannot dispel the anxiety about using the space, and they abandon the business. How to explain the safety of the space to business operators and reassure business operators is an important issue for the Ooya quarry underground space. Therefore, the authors will try to quantitatively evaluate the ground risk related to the safety of the Oya underground quarry and survey the method of ensuring its objectivity.