

大谷採石地下空間における安全情報の定量化と共有の試み

宇都宮大学 学生会員 ○前田 和輝 宇都宮大学 正会員 清木 隆文

1. はじめに

宇都宮市大谷町ではかつて採石業が盛んであり、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、1989～1992年の陥没事故²⁾等から地下空間に対し不安を持つ事業者も存在し、誘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。

2. 研究目的

大谷採石地下空間の地質・地盤の特性を適正に捉え、定量的に評価し情報共有を行うことは、防災や安全性の確保の面において重要と筆者は考える。そこで、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、これまで公式に用いられて来た安全性評価手法を参考にして、大谷採石地下空間の新たな評価指標を提案する。またこの指標を試行して地盤リスクを共有する問題点を把握する。

大谷採石地下空間では現在、20年前に検証された地盤工学的観点から見た空間が崩落する可能性に対しての安全性の評価指標が主に用いられている。この評価指標を、解析ソフトを用いて現代の技術水準の観点から更新し、その改善案を提案することを試みる。

またこれらの指標は、構造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。そこで、本研究では利用者が地下空間から受ける影響に対しての安全性の評価指標についても考察し、提案を行う。

3. 地質・地盤リスクマネジメントについて

2015年、JR博多駅前付近の福岡市交通局七隈線の延伸工事現場において、駅前の道路が陥没するという事故が発生した。この事故を受けて設置された研究委員会は、事故原因が「地下の不規則で複雑な地質構造」「実状と異なる地質評価に伴う設計」に問題があったと結論付けた³⁾。

以降、わが国では、地質・地盤リスクマネジメントの必要性が叫ばれている。これは、「地質の持つ不均一性を適性にとらえ、設計・施工に反映し、調査等によって得られた情報・知見を関係者間で共有する」という考え方であり、前述した事故の答申において得られた知見を反映したものである⁴⁾。

大谷採石地下空間は、その構造や岩盤の性質に不明な点が多い。当該空間を利用して事業を行う関係者には、事業の持続可能で安全な継続を行っていく上で、地質・地盤リスクマネジメントの考えを理解し、関係者間での情報を共有することが必要だと筆者は考えている。

4. 安全性評価手法に関する検討

(1) 既往の評価手法について

既往の評価指標の概要をこの節で紹介する。2001年、「大谷石採取場跡地安定度評価手法⁵⁾」に基づいて、大谷採石地下空間の崩壊に対する安全性の検証が行われた。これは、当該空間の崩落原因を「残柱の倒壊」と「天

盤の欠け落ち」に区分し、発生する可能性を地盤工学的な観点から計算に基づいて評価したものである。

この評価手法は現在、宇都宮市が当該空間の安全性の把握において最も大きな役割を占めている。また事業を展開する希望の方々に対しては、宇都宮市が「水質調査の結果を提示する」「個別に追加調査を請け負う」等の対応を行っている。しかしながら、「大谷石採取場跡地安定度評価手法」は20年前の技術水準で検討されている。例えば当該の評価手法では、それぞれの残柱が上載荷重を支持する前提で計算が行われている。しかしながら、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倒壊を防ぐ可能性について、十分に考慮されているとはいえない。この他、隣接している空間から受ける応力・貯留した地下水が隣接する壁面に与える水圧等の影響についても検証がなされていない。さらに、地下空間の有効利用のために必要な要素が評価されていない点も問題となる。当該空間には、「傾斜面・湿った床面での転倒」「地下水の流入」など、利用者の行動に危険を及ぼす要素が複数存在する。これらの地下空間において利用者が遭遇しうる危険発生の可能性に対し、客観的评价がなされているとは言えないのが現状である。当該空間の有効利用のために用いるには、利用者の視点を欠いている。

(2) 数値解析に基づいた安全評価指標の設定

本研究では、大谷採石地下空間をモデル化して安定性を確認し、その結果を用いて既存の評価指標との関連を確認し、数値解析の結果を応用する改善案を提案する。

(3) 解析概要

本研究では、差分法をベースとした解析ソフト(FLAC3D)を用いて解析を行う。解析ソフト内では大谷採石地下空間をモデル化して再現し、このモデルに重力加速度として鉛直方向下方に 9.81m/s^2 を加え、自重を算出する。自重解析は等方性弾性モデルで行い、大谷採石地下空間の安定性を検討する際には、モールドクロンの破壊基準に従う完全弾塑性で再現する。境界条件として、解析モデル外面のグリッドポイント(格子点)の速度を0に固定する。初期応力を解析後、空間を掘削して再度自重解析を行う。なお、本解析に用いた大谷石岩盤の物性値を表-1示す。

本研究では、特に「①隣接する空洞が与える影響」、「②残柱倒壊が周囲に与える影響」に関して検討を行う。

表-1 解析に用いた大谷石岩盤の物性値

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
$1.05 \times 10^6 \text{ Pa}$	30°	$1.08 \times 10^6 \text{ Pa}$

5. 新たな安全性評価手法の構築と試行

本研究では、自重解析を行った後、大谷採石地下空間を掘削した際の応力の分布と地下空間構造の降伏可能性を確認する。その後、代表例として2つの影響について特に検討をすすめる。

a) 隣接する空洞が与える影響について

解析モデルで表現した当該空間の壁面に作用する応力分布・降伏について確認する。その後粘着力や引張強度などの代入する物性値を変更し、高めの安全率を確保できるか疑似的に確認する。解析の結果から、壁面が受ける影響を検討し、評価指標の更新を試みる。

b) 残柱倒壊が周囲に与える影響について

解析モデル(図-1, 2参照)で表現した当該空間から残柱を除去し、その場合の応力分布・降伏について確認する。解析の結果から、残柱倒壊の周囲に与える影響を検討し、改善案の提示を試みる。

5. 安全性評価手法の構築

(1) 現地調査に基づいた地盤リスクの確認

著者らは、2021年12月9日に3つの地下空洞を含む大谷採石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、天板もアーチ状になっており、構造として安定していた。しかし、1m²程度の落盤も確認できた。

2つ目の空洞は、空洞の順路が複雑かつ断面が馬蹄形となっていて、地下水の流入・貯留がいたる所に見られ、比較的踏査が困難であった。天板が隣接する空洞へ落ち、つながっている個所も見られた。

3つ目の空洞は、残柱を除けば見通しのいい大きな空間のようになっていて、落盤等も見られなかった。通気性もよく、かつての利用の痕跡が見られた。

どの地下空洞も構造自体は残存していたが、その安全性はまちまちであり、合理的な採掘方法がなされている空間程、安定しているように感じられた。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。

(2) 採石地下空間の安定性解析

本研究では、得られた解析結果から、壁面・残柱の安全率について検討を行い、新たな空洞の評価手法を作成する。特に本研究では「隣接する空洞が与える影響」、「残柱倒壊が周囲に与える影響」などを検討することで、当該空間の有効利用につなげる。

(3) 安全性評価指標の更新

本研究では、前述した構造的な観点から見た安全性とは別に、湿った傾斜面でのスリップや貯留した地下水の冠水等についても検討を行う。

a) スリップ

本研究では、不特定多数の人々が利用する場合を考慮し、道路構造令第25条⁷⁾などを参考にして、合成勾配が11.5%以下になる場合は評価を下げることを検討し、対象とする地下空間を人が利用する場合は、階段設置の義務化について考慮する。

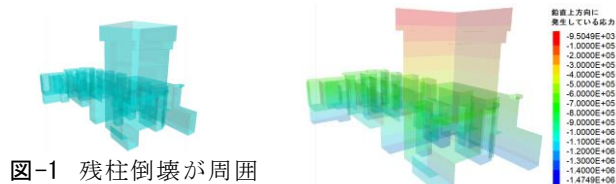


図-1 残柱倒壊が周囲に与える影響を検証する解析モデル

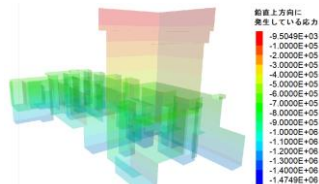


図-2 自重解析後の解析モデル

b) 地下水の冠水

本研究では、貯留した地下水位が急激に上昇し、空洞の利用者が避難を要する場合を想定し、水位が冠水に至るまでの時間を利用者が出入口まで避難するのにかかる時間で除算したものを(1)式の様に安全率 F_s として検討をすすめる。

$$F_s = \frac{t_W}{t_E} = \frac{L_M - L_C}{v_L} \frac{v_W}{l} \quad (1)$$

F_s : 安全率

t_W : 貯留水位が冠水に至るまでの時間 (分)

t_E : 利用者が出入口まで避難するのにかかる時間 (分)

L_M : 貯留水があふれ出す水位 (m)

L_C : 現在の貯留水位 (m)

v_W : 利用者の移動速度 (60m/分)

v_L : 過去最大の水位上昇速度 (m/分, 水位のモニタリングデータから抽出)

l : 出入口までの距離 (m)

(4) 安全性評価指標の指標と有効利用

本研究では、大谷採石地下空間を有効利用する観点から本研究で構築した安全性評価指標をもとに、当該空間全体の安全性の再評価を試み、興業する事業者へその安全性をアピールする手順を検討する。また、事業を継続している関係者間で、この評価指標を始めとした当該空間の定量的情報を共有することで、その安全性の点検の参考にすることを試みる。

6. まとめ及び今後の課題

(1) まとめ

大谷採石地下空間の既往の評価指標を更新するため、該当空間を現状の技術の枠組みを用いて定量的に評価する手法について考察した。

利用者視点の地下空洞の安全性の評価指標は、既往の研究例が少なく、今回は空洞内の斜面勾配と地下水位に注目して評価手法の提案を進める。

(2) 今後の課題

モデルの作成と解析を行い、この結果を評価指標に反映し、その後専門家の方々から意見をいただき、更なる改善に努めたい。

参考文献

- 1) 都市魅力創造課 大谷振興室|宇都宮市 ホームページ, <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/199104_Utsunomiya/199104Utsunomiya.htm (2022年1月参照)
- 3) 福岡市地下鉄七隈線延伸工事現場における道路陥没事故の原因究明について 報告書, <https://www.pwri.go.jp/jpn/kentou-iinkai/kentou-iinkai.html> (2021年7月参照)
- 4) 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|阿南修司
- 5) 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平成13年10月4日.
- 6) 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, 宇都宮大学大学院修士論文, 工学研究科 地球環境デザイン学専攻, 2020.
- 7) 道路構造令 25 条, |e-GOV 法令検索, <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=345CO0000000320> (2021年12月参照).