

残柱の破壊機構に着目した大谷採石地下空間の健全性評価

宇都宮大学 学生会員 ○大坪 孝太郎

宇都宮大学大学院 学生会員 高葉 悠

宇都宮大学大学院 正会員 清木 隆文

1. はじめに

栃木県宇都宮市大谷地域では、過去に大規模な陥没事故が発生した。これにより、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。しかし、事故後の調査の結果や既往の研究により、採石地下空間が陥没した主な原因は安全性を軽視した採掘方法にあるという事実が示され、全ての採石地下空間が危険なわけではなく、結果として陥没する可能性が高い空間が陥没したに過ぎないということがわかった。つまり、陥没する可能性を効率よく判断できて、空間の安全性が保証されれば周辺住民の生活の保障、地下空間の有効な利用法をも検討することができる。大谷町では、現在でも少ないながらも大谷石の採石を進めている箇所があり、その安全性を評価することが求められている。本研究では有限差分法による解析ソフト FLAC3D (Itasca 社製) を用いて、栃木県宇都宮市にある大谷石採石地下空間を対象に、地下空間の幾何学的な構造を 3 次元的に再現し、残柱の破壊機構に着目し、地下空間の健全性を評価することを目的とする。また、この結果をもとに、大谷採石地下空間の健全性評価手法を提案し、地下空間の有効利用に繋げる事も本研究の目的とする。

2. FLAC3D による残柱の破壊機構の再現

2.1 残柱の破壊による地下空間の陥没

地下空洞において、応力が原因で発生する不安定現象のもっとも単純な例は、大きな荷重を受けて破壊する残柱の問題とされている¹⁾。残柱において応力集中がもっとも大きい場所は残柱断面の四つの隅角部であり、この隅角部から残柱の破壊が始まり残柱の中心部に伝わることで残柱全体の崩壊に繋がる。そして、一本の残柱が崩壊してしまうと周囲の残柱

に荷重分担の変化が発生し、残柱が次々と崩壊、大規模陥没の発生を招く。よって、残柱の破壊機構を把握し、残柱の崩壊を未然に防ぐことが求められる。本研究では、その破壊挙動を FLAC3D において再現し、上端から上載荷重を与え、大谷採石地下空間の残柱が破壊する応力値を示すことを試みる。この応力値を大谷採石地下空間の健全性評価基準にする。作成したモデルを図-1 に示す。

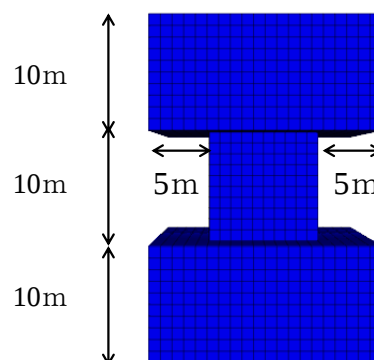


図-1 残柱再現モデル

このモデルの天端部分の設定の考え方は、図-2 に示すような各残柱が応力を分担する天端面積がもとになっている²⁾。これは残柱が隣の残柱との間の距離を二等分して区切られる天端の面積分の土被りを負担するという考え方である。また、昭和 31 年に大谷石材安全協議会が定めた採掘基準²⁾では、残柱と残柱のスパン、残柱の大きさ、天盤の厚み、採掘手法の制限等、取り決めがなされている(表-1)。本研究では、上記の内容から、解析モデル作成において残柱までのスパン、残柱の大きさ、残柱の高さ、天盤の厚さを各 10m とした。この形状は、採掘基準の安全解析側を採用し、最も基準内で危険性のある残柱から決定した。残柱の高さに関しては、大谷地区の地下空間の残柱の高さの平均値を採用した。

キーワード 健全性 大谷石 採石地下空間

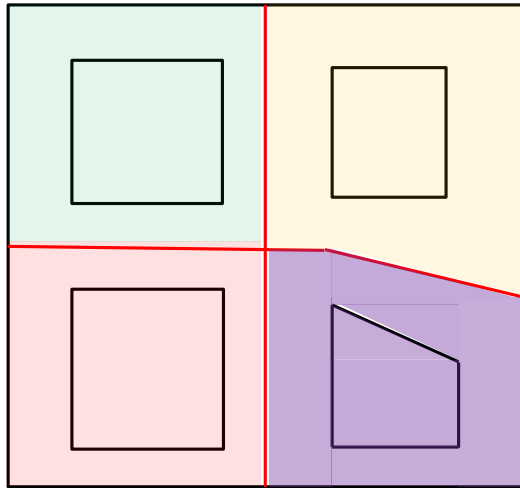


図-2 残柱受け持ち面積の概念図

表-1 大谷地区採石地下空間の採石基準

	細目	荒目
残柱と残柱のスパン	6間(10m)以上	
残柱の大きさ	5間(9m)以上	4間(7m)以上
天盤の厚さ	最低50尺(15m)	最低30尺(9m)

2.2 解析結果

残柱の中央高さの中心部の鉛直応力 σ_{zz} -鉛直ひずみ ε_{zz} 関係を図-3に示す。

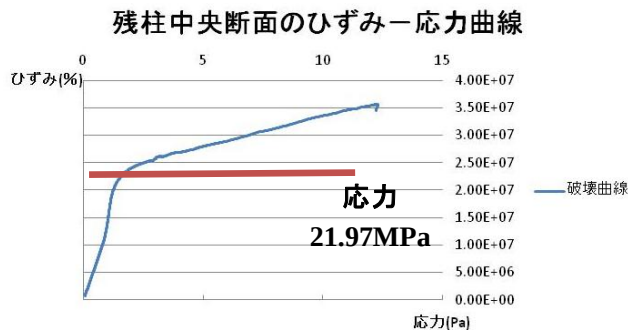


図-3 中央断面における破壊曲線

残柱の下端の四隅が、鉛直応力 σ_{zz} が10MPaに達すると塑性化し、その後、応力が20MPaに達すると中央断面が降伏した。また、図-3に示すように、残柱の中央断面は約20MPaの鉛直応力が作用すると降伏する。

よってこの解析から、大谷採石地下空間の残柱は10MPaの応力を受けると応力が集中する四隅から破壊を起こす可能性があり、残柱全体が破壊を起こす原因が中央断面の破壊による影響が大きいことを考

慮すると、中央断面に20MPa以上の鉛直応力が作用する状態にあるとき、残柱全体が破壊する危険性があると判断できる。

3. 理論式から算出する応力分布

大きな荷重を受けて破壊する残柱の問題に対して、ビニアウスキ(Bieniawski)は領域理論に基づいた柱荷重(柱に作用する応力)のための方程式(式(1))を提案している²⁾。また、鈴木³⁾により、式(1)を大谷石採石地下空間に適用する方程式(式(2))が提案された³⁾。本研究では、残柱に作用する応力を求め、式(1)から算出した応力分布と、FLAC3Dでの解析結果と比較して考察を行う。

ビニアウスキの領域理論に基づいた柱荷重のための方程式は、式(1)

$$S_p = 1.1H \left(\frac{w+B}{w} \right)^2 \quad (1)$$

S_p : 柱に作用する応力, H : 表面下の深さ,
 w : 柱の幅, B : 天盤の長さ

に示すようになる。また、大谷石採石地下空間に適用する方程式(式(2))は、

$$S = \gamma_1 H_1 \left(\frac{\text{天盤の面積}}{\text{柱の面積}} \right) + \gamma_2 H_2 \left(\frac{\text{天盤の面積}}{\text{柱の面積}} \right) \quad (2)$$

S_p : 柱に作用する応力[kN/m²]

γ_1 : 土被り(関東ローム)の単位体積重量[kN/m³]

γ_2 : 大谷石の単位体積重量[kN/m³]

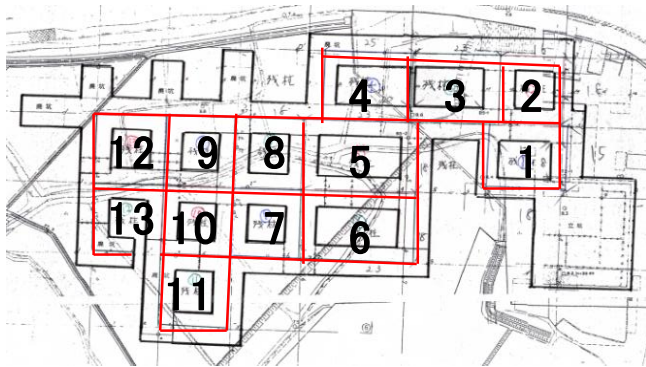
$H_1 \cdot H_2$: 天盤までの土被り、大谷石のそれぞれの高さ[m]

となる。天盤の長さに関して、3節で示したように、残柱が隣の残柱との間の距離を二等分して区切られる天盤の面積分の土被りを負担するという考え方に基づいて算出する。

なお、本研究では、関東ロームの単位体積重量⁴⁾は14.0kN/m³、大谷石の単位体積重量⁵⁾は17.0kN/m³とした。

対象地下空間の負担面積の区切りと式(2)に基づいて算出した各残柱の応力値(以下、理論値)を図-4と表

－2に示す。



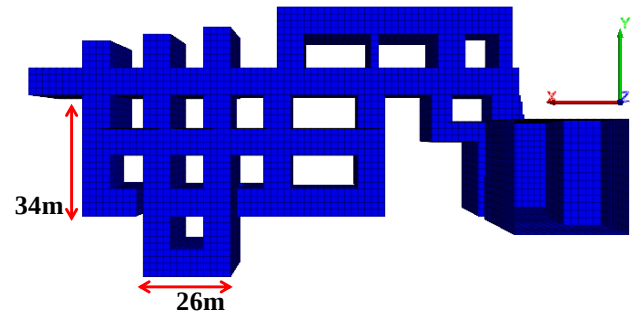
図－4 対象地下空間と残柱概要図
(図中の赤線枠は各残柱が受け持つ天盤領域の境界を示す。)

表－2 各残柱に作用する応力値(式(2))

	柱に作用する応力S(MPa)
残柱No.1	1.83
残柱No.2	1.87
残柱No.3	1.50
残柱No.4	1.46
残柱No.5	1.35
残柱No.6	1.35
残柱No.7	2.11
残柱No.8	2.11
残柱No.9	2.11
残柱No.10	2.11
残柱No.11	2.11
残柱No.12	2.05
残柱No.13	2.11

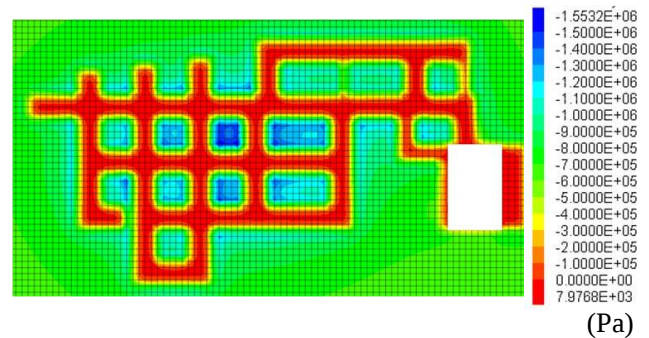
4. FLAC3D により算出される応力分布

図－4 に示した採石地下空間の平面図をもとに、FLAC3D によって三次元的に構造を表現したものを対象に、地下空間の天端の標高で切り出した水平面で、鉛直応力値(以下、解析値)の水平面分布を可視化することによって、理論式の計算値との比較を行う(図－5)。



図－5 作成モデルの平面図

この地下空間は全長、東西 160 m、南北 80 m の地下空間となっている。この採石地下空間を掘削した後の残柱に作用する応力を確認した(図－6)。



図－6 FLAC3D で算出した鉛直応力分布
(天端の標高で切った水平面における表示)

図中の空白部分は、上部に立坑が存在するために生じたものである。理論値と解析値とを比較すると、その差は僅かで、解析値の方が、小さい傾向を示し、最大値は 1.55MPa である。また、採石地下空間の残柱の隅角に応力が集中している状況が見られる。地下空間の健全性評価を行うと、残柱に作用する応力の最大値が 1.55MPa となり、この値は残柱が破壊に至る応力値 20MPa(2.2 節参照)より非常に小さな値となった。この結果は、本研究で対象とした採石地下空間が、残柱に作用する応力によって陥没を起こす可能性は低く、この視点からすると、健全な空間であることを示す。

4. まとめ

本研究では、残柱の破壊機構に着目し、栃木県宇都宮市大谷地域にある大谷石を採石後にできる採石

地下空間の健全性を評価することを目的として、残柱の解析モデルによる破壊挙動の確認、採石地下空間の応力分布による健全性評価を試みた。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 残柱は下端の四隅に 10MPa の鉛直応力が作用すると降伏するのに対し、中央断面の破壊曲線が一軸圧縮強度 20MPa を示していることから、応力が集中する残柱の下面の四隅から破壊が始まり、最終的に中央断面まで伝播することが確認された。
- 2) 実際の採石地下空間の残柱の中央断面の降伏が、直接的な破壊に繋がることから、一本の残柱中央部に 20MPa の鉛直応力が作用すると採石地下空間の残柱は崩壊し、この残柱が支えている採石地下空間が陥没に至る危険性がある。
- 3) 採石地下空間の残柱に作用する応力分布を Bieniawski による理論値と数値解析の値との比較を試みた結果、二つの手順から得られる数値に大きな差異はなく、残柱が危険と判断される応力値に比べて作用する応力値は非常に小さく、解析対象となった採石地下空間は健全であると判断された。また、FLAC3D により、残柱に作用する応力を可視化してみたところ、地下空間の隅角部に応力が集中することが確認された。

5. 今後の課題

本研究で取り扱った地下空間は現存している空間である。崩壊した空間と崩壊しない空間との違いを比較する必要がある。

また、採石地下空間には、節理が所々に存在するので、節理に伴う強度低下を検討する必要がある。

【参考文献】

- 1) E. フック・E. T. ブラウン：岩盤地下空間の設計と施工。
- 2) 東京通商産業局：大谷地域における大谷石採石技術指針，pp.33-60， 1982。
- 3) 鈴木知洋：岩盤分類に基づく大谷採石地下空間の構造健全性に関する研究。平成 20 年度宇都宮大学卒業論文 2008
- 4) 日本港湾協会：港湾構造物設計基準 単位体積重量。
- 5) 青木 久・佐々木 智也・松倉 公憲：大谷石

からなる風化岩盤の表面の強度に関する非破壊測定法，筑波大学陸域研究センター報告，No.6, 33-38, 2005。