構造形式の違いによる大谷採石地下空間の健全性評価について

宇都宮大学	学生会員	○高橋 真太郎
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

1.1研究背景と目的

大谷町では,平成元年2月に東西60m,南北70m, 深さ 30m の大規模な陥没, さらにその1カ月後に は周辺部が再び陥没し被害は東西に 115m, 南北 130m にも及ぶという陥没事故が発生した¹⁾ これ により,大谷の採石地下空間の危険性が主張された が,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 とが判明した. 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.そこで,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,また,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を目的とする。

1.2 大谷採石地下空間の崩壊原因とその現象

地下空洞において,崩落の要因として考えられる のは残柱の崩壊によるものと天盤そのものの落下, また立坑の崩壊によるものの 3 種類だと考えられ る²⁾.一方で地下空洞が浅所にある場合と、深所に ある場合の崩壊に大別され,一般に浅所陥没のほう が深所陥没より被害が大きいとされる.本研究で取 り扱う崩落要因は,主に残柱式と長壁式の地下空間 でそれぞれ起こりうる残柱の崩壊と天盤の崩落に ついて取り扱う.応力が原因で発生する不安定現象 のもっとも簡単な例は、大きな荷重を受けて破壊す る残柱の問題とされている.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転移が発生し, 残柱が次々と崩壊,大規模陥没の発生を起してしま う.また,天盤の崩落の原因としては,粘性土や砂質 土などの土壌で形成される地下空間において周辺 地盤にゆるみが発生し,破壊が地表方向にまで進行 することが一般的な形態とされ、これには空洞幅と 地表下深度の関係が深い³⁾.

2. 数値解析による安全性の検討

2.1 残柱モデル

本研究で再現した残柱モデルは、大谷採石地下空間の採石基準を満たす最も危険側の形状で、 10m×10m×10mの形状を成し、天盤領域、床盤領域が20m×20m×10mから構成される.このモデルは1 ゾーン0.5m×0.5m×0.5mの要素32000個で構成されている.この残柱再現モデルを、その破壊挙動を数値解析で再現し(図-1,図-2)、破壊する上載荷重から鉛直応力を算出し、この値を大谷採石地下空間の健全性評価に応用することを目的とする.なお、今回の解析での物性値は以下の表の値を用いた(表-1).なお、今回用いた大谷地下採石地下空間の採掘基準は表2に示す.このモデルから採掘基準を満たした残柱が崩壊するまでを再現し、その挙動を確認する.

キーワード 地下空間 安定性解析 耐久性

連絡先〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学工学部建設学科建設工学コース岩盤工学研究室 Tel/Fax 028-689-6218

2.2 天盤モデル

本研究で再現した天盤モデルは、大谷採石地下空間の採石基準を満たす最も危険側の形状で、全体の 寸法が90m×30m×29m,掘削部分が30m×10m× 10m で構成される.このモデルは1ゾーン 1m×1mの要素75300個で構成される.この天盤 再現モデルの破壊挙動を数値解析で再現し(図-3), 崩壊する上載荷重から鉛直応力を算出し、この値を 大谷採石地下空間の健全性評価に応用することを 目的とする.なお、今回の解析での物性値と採石基 準は残柱モデルと同様である.このモデルから採掘 基準を満たした単純形の長壁式の地下空間が崩壊 するまでを再現し、その挙動を確認する.



20m



図 - 2 天盤(上面), 床盤(下面)

表 - 1 解析に用いた大谷石の物性値⁴⁾

体積弾性係	せん断弾性係数	粘着力
数	MPa	MPa
MPa		
1.38×10^{3}	9.1×10^{2}	2.1
内部摩擦角	引張強度	密度
0	MPa	kg/m ³
30	1.08	1.77×10^{3}

表-2 採石基準

残柱と残柱のスパン	10m以下	
残柱の大きさ	9m以上	
天盤の厚さ	9m以上	

3. 解析結果および考察 3.1 残柱の解析結果

残柱モデルの上面から上載荷重を与え,降伏に達す る鉛直応力値を観察した.最も変位量が大きかった 残柱上端について,変位量をひずみに換算し考察す る.図-4より残柱の上端において,鉛直応力が約 2MPaに達するとひずみが約1%から急増しており, 残柱が塑性化し力に耐えられなくなったと考察さ れる.ある現場試験の結果では大谷石が破壊するひ ずみは0.5~0.9%⁶であり,今回の結果はある程度の 整合性の得られる結果となった.今回の物性値の大 谷石のみ(密度 1.77g/cm³)で単純な一軸的な土被 り圧を考えると約115mの土被りで残柱が破壊する 可能性があることを示唆する.逆に,採石基準を満た す残柱は重大な被害を引き起こす浅所陥没につな がる可能性は低い.よってこの結果よりひずみが約 1%の際(10mの残柱近傍の天盤の沈下量が約10cm で)危険と定義できると考える.この変位値は残柱のひずみ値が急増する直前の値であり,より小さな 値のほうが安全である.



図-4 残柱上端の応力ーひずみ関係図

3.2 天盤の解析結果

天盤モデルの上面から上載荷重を与え変位量の 観察を行った.最も変位量が大きかった天盤中央部 について,空洞の天端と底面の距離の変化を変位量 として,空洞高さで除してひずみに換算し考察する. 図-5より天盤中央部において,鉛直応力が約 17MPaに達するとひずみが約10%付近で,漸増状態 に近い形となっている.ただしここにおいて,残柱の 結果の考察において大谷石が破壊するひずみは 0.5 ~0.9%⁵⁾という表記とは異なる値を示しているが, これは大谷石に一軸圧縮試験のように大谷石その ものが力を受け持つというよりも, 想定した地下空 間内の変位が大きくなることが予想されるモデル であるため大谷石そのものの強度を解析するのと はまた意味の違った解析であると考えられる.ひず みが線形的に漸増し始める約 17MPa 付近では一部 において塑性領域が広がり,地下空間がすでに危険 な状態にあることを示しており、これ以降、塑性化の進行が速くなる傾向が観察された.残柱式の構造 と比較するとかなり大きな値まで力を受け持つこ とができるが,長壁式空洞の塑性化が始まる応力を 把握することが課題ある.この空洞構造は,長壁式 空洞の一部であるので,一般的な地下空洞長と崩壊 する荷重との関係を確認できるように検討するこ とが挙げられる.

まとめ及び今後の課題

4.1まとめ

本研究では,残柱と天盤の強度に着目し,三次元 解析によって残柱上端と天盤中央部の応力状態を 抽出し, 天盤と残柱の単位構造が支えることが可能 な土被りに換算した.残柱においては、採石基準を 危険側で満たすもの1本あたりが約 2MPa の荷重 まで耐えることができる.また,天盤においては約 17MPaの荷重まで耐えることができる.今回の結果としては残柱モデルよりも天盤モデルの方が構造 的に安定である傾向を示している.

4.2 今後の課題

本研究では正方形断面の残柱が崩壊に至るまで の挙動を確認することを目標として一本の残柱に 注目したが周囲の残柱に及ぼす影響まで確認され ていない.なお,採石地下空間の残柱は正方形断面に 限らず,不規則な異形断面の場合も多数あるので, 断面形状が残柱強度に及ぼす影響も検討が必要で ある.天盤においても残柱においても実施の採石地 下空間には、節理が存在するので、この節理が個々 の構造に及ぼす影響も検討する必要がある.本研究 で示した値を管理値とするためには, さらなる検討 が必要である.また,長壁式の地下空間では、空間の 単位構造を実際の空間と関連づける必要がある.ま た,空洞長と崩落の可能性の関連を求めることが急 務である.



天盤中央部の応力ーひずみ関係図 図-5

参考文献

- 1)大谷陥没事故対策委員会,1989
- 2)江崎哲郎,渡辺康祐,鹿田光一,藤原盛光:GIS を用 いた地下空間に起因する地表陥没発生危険性と その評価手法に関する研究,地下空間シンポジウ ム論文・報告集,第5巻,土木学会,pp.113-114,2000
- 3)充填技術センター : 新版 空洞充填調査施工マニ
- ュアル,pp6-7,2010 4) 大坪 孝太郎,高葉 悠,清木 隆文,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, 土木学会第 39 回関東支部技術研究発表会講演概
- 要集, 2ps, CD-ROM, I-38, 2012. 5)伊藤 糾次, 早稲田大学理工学研究所受託研究報 告書, 第2号, 早稲田大学理工学研究所, 1973, pp. 12-37.
- 6)高葉 悠,清木 隆文,大坪孝太郎(2012):大谷石 採石地下空間の構造再現と掘削時および地震時 安定性の検討、地下空間シンポジウム論文・報告 集, 第17卷, 土木学会 「一般投稿論文]