

大谷採石地下空間の第三者から見た構造安定性に関する研究

宇都宮大学大学院
宇都宮大学
宇都宮大学
宇都宮大学大学院

学生会員
学生会員
非会員
正会員

○高葉 悠
高橋 真太郎
奈良部 明鼓
清木 隆文

1. はじめに

栃木県宇都宮市に産出する大谷石は、主に住宅等の建築用材などに使用されてきた。宇都宮市には、この大谷石の掘削により形成された、広大な地下空間が無数に存在する。これらの地下空間を貴重な空間資源と捉え有効利用することは、大谷町の活性化につながることを期待でき、さまざまな施設利用が検討されている¹⁾。大谷採石地下空間においては、これまで大規模な陥没事故が発生しその危険性が表面化した²⁾が、その後の調査や既往の研究²⁾により、採石地下空間の陥没事故の主な原因は安全性を軽視した採掘方法にあり、全ての採石地下空間が危険ではないということが示された。この陥没事故と無関係であることを確認するために、大谷採石地下空間の有効利用は、その安全性の保障が前提となる。本研究では大谷採石地下空間の安全性を評価する手法を確立することを目的として、採石地下空間の現地調査と、有限差分法による解析ソフトFLAC3D (Itasca 社)を用いて、対象とする採石地下空間の掘削時および地震時を再現した3次元数値解析を行った。現地調査は、採石地下空間の節理の位置、走向を把握し、数値解析に反映させるために行った。また、数値解析がどの程度実際の地下空間の変形を表しているか、解析結果がどの程度の変形であれば構造的に安全といえるのかといったしきい値について検討することを目的として、採石地下空間の壁面の内空変位を測定した。

一般的に、人々は地下に対して暗い、狭いなどの負のイメージを抱いているが、一方で静寂さ、神秘性などの肯定的なイメージも抱いている³⁾。地下空間は観光施設としての利用も検討されており、第三者である施設利用者や事業者が抱く負のイメージを緩和し、肯定的なイメージを活かすことが多様な地下空間の利用に不可欠である。そこで本研究では技術者により安全性が保障された採石地下空間の施設利用を想定して、利用者が採石地下空間を安全だと感じ、快適に利用できるのか検討するための手法を確立することを目的にアンケート調査を行った。これらの現地調査、数値解析、アンケート調査を組み合わせた大谷採石地下空間の安全性評価フローは図-1 のようになる。

2. 現地調査および内空変位の測定

(1) 採石地下空間概要と内空変位測定方法

大谷町で大谷石の採掘を行っている石材会社に協力を依頼し、大谷石の採石箇所において調査を行った。実際に掘削が行われている空洞において、採石の進行に伴って発生する経時変位を確認するために、内空変位の測定を実施した。本研究で対象とした採石地下空間の平面図を図-2 に示す。図-2 中に示した掘削範囲で、床面を掘り下げて採石を行っている。図-2 中の①～⑧は岩盤内の節理とその走向を示し、図-3 に節理の極をステレオ投影したものを示す。点線で示した測線において掘削に伴う壁面の内空変位の経時変化を測定した。

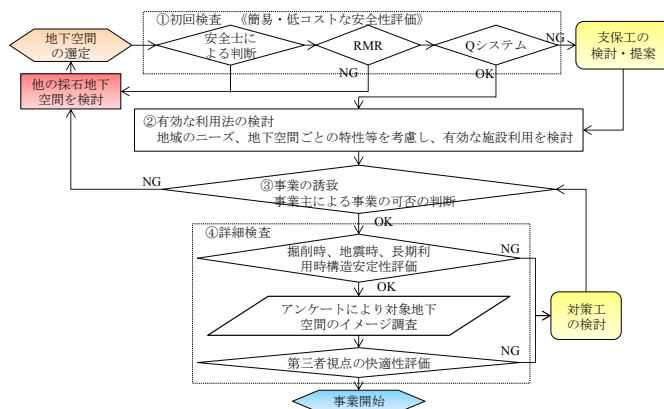


図-1 大谷採石地下空間の安全性評価フロー

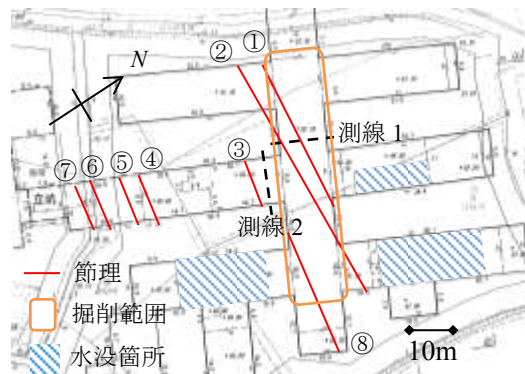


図-2 採石地下空間平面図

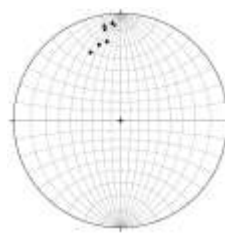


図-3 節理のステレオ投影



図-4 レーザー変位計を固定する治具の設置例

表-1 レーザー変位計(Leica Geosystems 社)の仕様

機器名称	DISTO pro ⁴ a
測定精度	標準±1.5mm/最大±2mm
最小表示単位	1mm
寸法・重量	188mm×70mm×47mm, 440g

その測定は、治具に測定器を図-4 のように据え付けることにより行う。測定器の治具は、ドリルで壁面に穿った穴に埋め込み、壁面との間隙をコーキング材で充填することで固定してある。使用した測定器の仕様を表-1 に示す。また、測定は1週間に1回程度行い、人為的誤差を小さくするために、1箇所の測定につき5～15回実施した測定値を平均して求める距離とした。

キーワード 大谷石、地下空間、耐震性、安全性、採石時

連絡先 〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学大学院 E-mail : mt116429@cc.utsunomiya-u.ac.jp

(2) 壁面内空変位の測定結果

測線 1 と測線 2 の壁面内空変位の測定結果（内向きの変位を正とする）と、複数回測定による標準偏差を図-5 に示す。測線を設置する段階では、掘削範囲直上にある測線 1 の変位が掘削に伴い大きくなり、測線 2 の変位は掘削が進んでも大きくならないと予想していた。測定値を見ると、測線 2 の内空変位は初期値と比較して徐々に大きくなる傾向がみられるが、その値は最大でも 1.0mm であり、地下空間の構造的には微小な変化である。一方、測線 1 の内空変位は測定開始から 30 日が経過するまでは変位が増加し最大で 1.8mm の変位がみられたが、それ以降は変位が減少するような傾向がみられる。これは、経過日数 36～43 日の間に図-2 中の節理②により壁面の剥離が生じたことから、節理の動きが近傍に設定した測線 1 の測定結果に影響を及ぼしたためと考えられる。

3. 大谷採石地下空間の 3 次元安定性解析

(1) 安定性解析の手順

数値解析は、地盤モデルを作成後、初期応力を求めた。その後、掘削領域を一度に取り除く掘削解析を行い、地下空間の変位や降伏状態を確認した。また、掘削解析後の地質構造モデルに地震波を与え、掘削解析と同様に降伏状態を確認した。本研究で行った数値解析は、Mohr-Coulomb 弾完全塑性の破壊規準に従うとし、掘削解析は計算が収束するまで行った。対象とした採石地下空間の湧水はわずかであるので、本研究では問題の簡略化のために、地下水を考慮しない全応力解析を実施する。また、解析モデルの境界条件は、境界面を構成する節点の速度をゼロに固定した。これは、FLAC3D は有限差分法による解析ツールであるため、応力ひずみ関係を得るために運動方程式を解き、速度変位（速度の増分）を未知量とするためである。掘削する地盤の設定について測量データ（図-2）をもとに地質構造モデルを設定し、安定性解析の対象とした大谷採石地下空間を再現した形状を図-6 に示す。この地質構造モデルは、340m×330m×68m の領域を持ち、2m×2m×2m のゾーン（立方体要素）953,700 個で構成されている。対象とする採石地下空間で採取された大谷石について、過去に実施された室内試験の結果から物性値を算出し（表-2）、解析領域内のすべてのゾーンに入力した。地表面から深さ 30m までの地盤を等分布荷重として地質構造モデルの上面に載荷することで、ゾーン数を減らし計算時間を短縮した。この地質構造モデルを、大谷採石地下空間断面図にもとづき、大谷石を採取した領域と採取予定の領域のゾーンを取り除く数値解析を行った。数値解析を行う際、天盤沈下量、壁面内空変位、地盤全体の塑性降伏のゾーンを確認し、採石地下空間の掘削時構造安定性について検討した。また、今後現地調査によって位置や走向を把握した節理を解析モデルに反映させ、節理を考慮しない場合の解析結果と比較する。

(2) 採石地下空間の地震応答解析について

本研究で対象とした大谷採石地下空間モデル（図-6）にレベル 2 地震動が直下で発生したと想定して、掘削を再現し地下空間の変形を計算したモデルに地震波を入力した。この結果を Mohr-Coulomb の弾塑性モデルを適用して、採石地下空間の塑性降伏の状態を確認した。レベル 2 地震動の例として、2007 年 7 月 16 日に発生した新潟県中越沖地震で観測された加速度データ（柏崎市：K-net:NIG018 観測）⁴⁾を用いた。また、レベル 2 地震よりさらに強い地震の例として、未曾有の被害を引

表-2 物性値一覧

体積弾性係数 K (MPa)	1380
せん断弾性係数 G (MPa)	910
粘着力 c (MPa)	2.10
内部摩擦角 ϕ (°)	30
引張強度 σ_t (MPa)	1.08
密度 ρ_t (kg/m ³)	1770

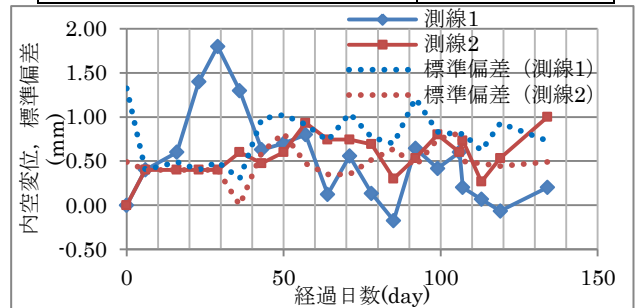


図-5 壁面内空変位測定結果

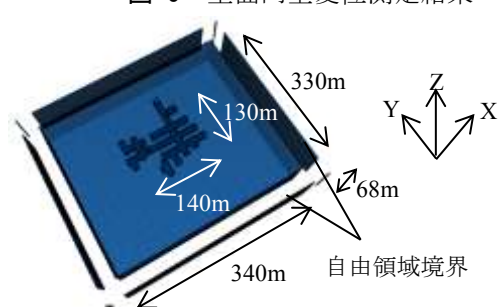


図-6 解析領域の設定と再現した採石地下空間
き起こした 2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震の加速度データ（宮城県牡鹿郡：K-net:MYG011 観測）⁴⁾を地震波として入力した。これらの加速度データは、採石地下空間モデルの底面に、地震データの N-S 成分、E-W 成分、U-D 成分が実際の方角と一致するように、各成分を x 軸方向、 y 軸方向、 z 軸方向に入力した。この数値解析では、モデル領域の底面に加速度を与えるため、境界条件として、無限領域を再現する粘着性のダッシュポットで接続された自由領域境界を適用した。ここに、減衰定数は、レイリーの減衰定数を用いて、RC 造の構造物における⁵⁾ $(\alpha=0.02\sim0.04)$ および FLAC3D のマニュアル⁶⁾ $(\beta=22.8)$ を参考にして、 $\alpha=0.05^5)$ 、 $\beta=22.8^6)$ とした。

(3) 解析結果

i) 掘削時構造安定性解析結果

大谷石岩盤を再現した地質構造モデルに、測量データをもとに採石地下空間を掘削した数値解析を行った。地質構造モデルを切り取り、天盤沈下量、壁面の水平変位（ x 軸・ y 軸方向）のコンターを図-7、図-8、図-9 に示す。なお、図-7 中の黒い曲線は、地質構造モデルの断面を観察する際、ゾーンがわずかに変形しているために表示された線である。対象とした採石地下空間は、変位の最大値が天盤沈下量で約 13mm（ひずみ 0.06%）、壁面の変位で約 1.7mm（ひずみ 0.024%）となった。経験的な岩盤に関する知見⁷⁾によれば、花崗岩などの比較的硬い連続した岩盤が破壊に近づくひずみは 0.1%であるといわれている。大谷石は堆積軟岩の一種であり、連続した大谷石岩盤が破壊に近づくひずみはこの 0.1%よりも大きくなる。大谷石に関する試験結果⁸⁾から、大谷石が破壊に至るひずみは、0.5～0.9%の範囲箇所もみられなかったため、構造的に安定していると

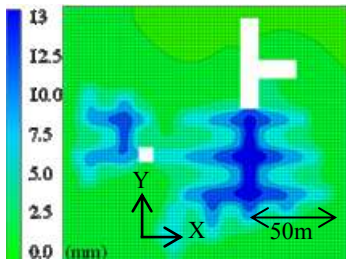


図-7 天盤沈下量コンター

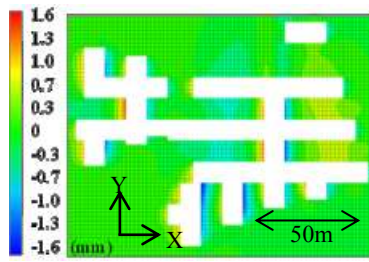


図-8 x軸方向壁面内空変位コンター

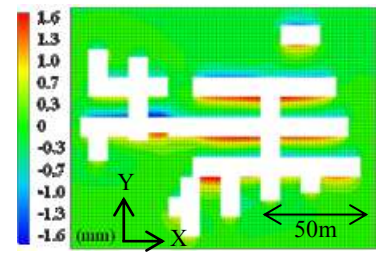


図-9 y軸方向壁面内空変位コンター

判断した。また、内空変位を実測した値と、数値解析後のモデルの測線 1、測線 2 に相当する箇所壁面間の距離を比較すると、測線 1 の実測値が最大で 1.8mm であるのに対し解析値は 2.1mm、測線 2 の実測値が 1.0mm であるのに対し解析値は 2.3mm となった。採石を再現した数値解析では、採取予定の領域のゾーンを一度に取り除き計算を行っており、実際の採石過程を詳細に再現していないため単純な比較はできないが、解析値が実測値に近いオーダーを示した。また、節理を考慮した解析結果は、節理の影響は安定性に問題がない範囲であると予想される。

i) 地震時応答解析結果

レベル 2 地震動を想定した地震動を与えた後の壁面と天盤のひずみを掘削解析後の値と比較すると、ひずみの変化の最大値は 1/10000 % 程度であった。また、壁面と天盤および床面の隅角部において、引張応力によって岩盤が降伏している箇所がわずかにみられた（図-10）。この降伏範囲は表面的であり、壁面の内部までは降伏箇所がみられなかったため、地震動によって壁面や天盤が部分的に欠落する危険性はあるものの、この規模の地震動に対しては対象とした大谷採石地下空間自体が崩壊に至る可能性は低い。一方で、レベル 2 地震動よりさらに強い地震動として東北地方太平洋沖地震の地震加速度を与えた。入力加速度を作用させた後の大谷採石地下空間の壁面と天盤のひずみを掘削解析後のひずみと比較すると、広範囲でひずみ値が大きくなっており、ひずみ値は最大で 0.1% であった。天盤を切り取り採石地下空間内部の降伏範囲を確認すると、壁面や天盤で広い範囲で降伏箇所がみられた（図-11）。地震動を受けた後の採石地下空間が構造的に支持するのか検討するため、地震動を再現した動的解析後、採石地下空間の変位が収束するまで静的な数値解析を行った。その結果、変位は収束し、構造的に大きく崩壊することはなかったが、東北地方太平洋沖地震の地震波を用いた動的解析結果では、大谷石岩盤が破壊に至るひずみ（0.5%）に近いひずみ（0.1%）を示し、この規模の地震が大谷地域において直下で発生した場合、大谷石が降伏することで天盤や壁面が剥落する危険や、採石地下空間群が崩壊する可能性がある。

4. 第三者影響に関する健全性評価について

本研究では、大谷採石地下空間の安全性評価手法に感性工学的な観点による第三者に対する安全性評価を取り入れ、客観的な基準の構築を目的として、アンケートを実施し、第三者が地下空間に対して抱くイメージを調査した。アンケート調査は、大谷採石地下空間の特徴を簡単に説明した後、6 枚の大谷採石地下空間内部の写真を被験者に見せ、[総合的に快適-不快]の評価を含めた 12 対の形容詞対についてそれぞれ 7 段階で評価する形式で行った。本研究で用いた形容詞対は、地下空間の感性的な評価を試みた既往の研究において、Kasmer の環境評価尺度⁹⁾と呼ばれる形容詞対の中から適切と考えられる 25 種の形容詞対を選択し、それらを

■ 健全 ■ 引張応力により塑性化

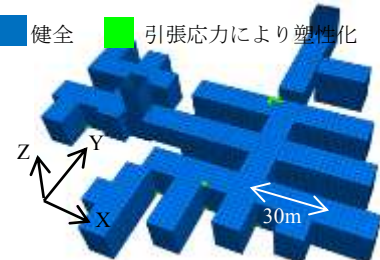


図-10 新潟県中越沖地震の地震波による採石地下空間塑性状態

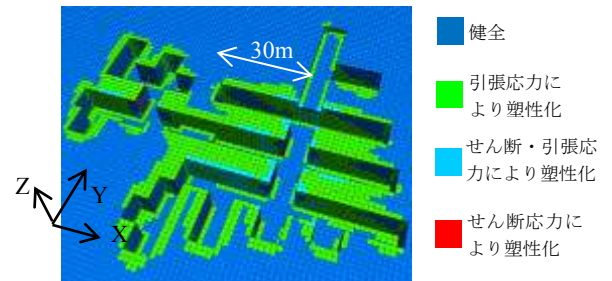


図-11 東北地方太平洋沖地震の地震波による採石地下空間塑性状態

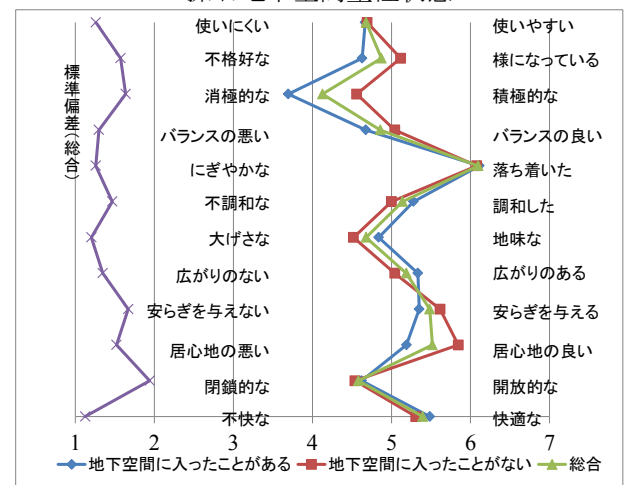


図-12 アンケート結果

用いたアンケート結果を因子分析することで、因子負荷量が高い 8 種の形容詞を選定したものを参考にした。これら 8 種類の形容詞対に、快適性に強く影響を与えると考えられる「安らぎ」「居心地」「開放的-閉鎖的」の 3 種類を加えた。対象は地下空間に過去に入ったことがある 36 名と、地下空間に入った経験がない 29 名の計 65 名から構成される。被験者の回答の平均値を求め、それらを評価値としたものを図-12 に示す。総合的な快適-不快の評価は 5.4 (標準偏差 $\sigma=1.1$) となり、第三者からみた健全性は良好である。「快適性: y」を目的変数として、形容詞対 $x_1 \sim x_{11}$ を説明変数とした線形モデルを用い、重回帰分析を行った結果、以下のようになった。

- ・地下空間経験なし（重相関係数 $R=0.7975$ ）
 $y=0.538x_1+0.403x_6+0.762$ (1)
- ・地下空間経験あり（重相関係数 $R=0.7577$ ）
 $y=0.441x_5+0.275x_3+0.282x_9+0.144$ (2)
- ・総合（重相関係数 $R=0.6752$ ）
 $y=0.250x_9+0.224x_1+0.196x_8+0.174x_6+1.010$ (3)

ここで、「 x_1 :使いやすさ」、「 x_6 :調和」、「 x_5 :落ち着き」、「 x_3 :積極的」、「 x_9 :安らぎ」、「 x_8 :広がり」

なお、重回帰分析を行うにあたって、説明変数の選び方はステップワイズ法¹⁰⁾を用い、F 値=2 を基準として変数を選択した。他の尺度については目的変数「 y :快適性」への影響が小さいため、モデルに取り込まれなかった。説明変数の t 値については、いずれも 2 を超えているため、選択した尺度は説明変数として適している。既往の研究における重回帰分析の結果では、「バランス」「広がり」「調和」「使いやすさ」が快適性に影響を与えていることを踏まえ被験者全体の結果を見ると、「バランス」を除いた形容詞対に加え、影響があると予想して追加した「安らぎ」が説明変数に選ばれており、調査前に想定していた傾向がみられたと考えられる。また、地下空間に入った経験の有無によって、「 y :快適性」に影響を与える説明変数が異なることがわかった。アンケートの実施にあたり、被験者が実際に採石地下空間に入った後に評価させる事が望ましかったが、アンケートを実施する日程の都合上写真を見せることで代替したため、重回帰分析の結果、異なる尺度が説明変数として選択されたと思われる。したがって、地下空間に入った経験がある回答に着目すると、「落ち着き」、「積極性」、「安らぎ」が空間の快適性に比較的高い影響を与えていると解釈される。

5. まとめと今後の課題

(1) 大谷採石地下空間の内空変位の測定

測線 2 の変位は徐々に大きくなる傾向を示したが、変位は最大で 1.0mm であり構造的には微小な変位である。一方、測線 1 の変位は一度 2mm 近くなり、その後減少する傾向を示した。これは近傍の節理の動きが影響していると考えられ、今後、地下空間内に変位の測定箇所を増やし、測線 1 の計測が精度よく行われているか、またどの程度の変形であれば地下空間の安全性に問題がないといえるのかは今後の課題となる。

(2) 大谷採石地下空間の掘削時構造安定性

本研究で対象とした採石地下空間は、採石予定のゾーンを一度に取り除いた数値解析を行った結果、天盤と壁面のひずみは大谷石が破壊に至るひずみ⁸⁾の約 1/10 以下となり、構造的に安定している。また、変位の解析値は実測値と近いオーダーを示したが、測線 1 の内空変位が実測値のように実際に増減しているのか検討する必要がある。本研究で用いた地質構造モデルは、モデル全体に健全な大谷石岩盤の物性値を入力したため、節理と呼ばれる岩盤中の亀裂が反映されていない。本研究で対象としたものとは異なる採石地下空間について、節理が解析結果に与える影響を検討した結果、節理を地質構造モデルに反映した場合でも壁面の内空変位の増加は 1mm 未満となり、節理の影響は小さいことが示されたが、今後、測線 1 の変位実測値に影響を与えていると考えられる節理の位置と走向を地質構造モデルに反映させて数値解析を行い、対象とした地下空間において節理がどの程度解析結果に影響を与えるのか検討する。また、本研究では大谷石岩盤の原位置における三軸圧縮試験結果⁸⁾を参考に、ひず

み 0.5~0.9%を安全性評価の基準としたが、今後、崩壊した採石地下空間について数値解析を行い、安定性評価のしきい値についてさらに検討する。

(3) 大谷採石地下空間の地震時安定性

レベル 2 地震動を想定し新潟県中越沖地震のデータを用いて数値解析を行った結果、壁面や天盤が部分的に欠落する危険性はあるものの、空間自体が崩壊に至る可能性は低い。一方、レベル 2 地震動よりもさらに大きな地震動を想定して、東北地方太平洋沖地震のデータを用いた解析結果から、この規模の地震が大谷地域の直下で発生した場合採石地下空間群が崩壊に至る可能性があることが示された。しかし、地下空間が地表面の構造物と比較して地震波による影響が小さい¹¹⁾ことの考慮や、地震時解析後の静的な数値解析における採石地下空間の進行と崩壊に至る過程の確認、実際に崩壊したケースの解析上における再現などを行い、地震時の安定性評価の基準についてはさらに検討する必要がある。また、対象とした大谷採石地下空間の減衰定数、固有周期についても、常時微動などを観測し、スペクトル解析などから推定する必要がある。推定したこれらの地盤定数を考慮し、採石地下空間が最も不利な振動をする地震波を与えた場合の安定性について検討することは今後の課題である。

(4) 第三者視点による客観的な健全性評価

本研究では、採石地下空間を施設利用する際、利用者や事業者が採石地下空間を安全だと感じ、快適に利用できるのかといった、客観的な安全性評価基準を大谷採石地下空間の安全性評価手法に取り入れることを目的として、アンケート調査を実施した。その結果、第三者から見た健全性は良好であり、採石地下空間の快適性には「落ち着き」、「積極性」「安らぎ」の尺度が比較的高く影響していることがわかった。今後、客観的な安全性評価の基準について、検討する。

参考文献

- 1) 井上 達也, 早坂 晃, 阿部 友哉, 清木 隆文, 熱負荷推定に基づいた大谷採石地下空間の長期的な利用に関する検討, 地下シンポジウム論文・報告集, 第 17 巻, 土木学会, pp.211-216, 2012.
- 2) 樋口 大樹, 清木 隆文, 大谷石採石地下空間における健全性評価方法の検討, 土木学会第 37 回関東支部技術研究発表会講演概要集, CD-ROM, III-13, 2010.
- 3) 今泉 暁音, 近江 桃, 向井 かおり, 清水 則一, 色と形が地下空間イメージに与える影響に関する考察, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第 17 巻, 土木学会, pp.51-56, 2012
- 4) 防災科学技術研究所強震ネットワーク K-NET : <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>, (2012 年 11 月確認)
- 5) 山崎 靖典, 実在超高層建物の固有周期と減衰定数の設計値と実測値に関する研究
- 6) Itasca 社, FLAC3D Version4.0 Dynamic Analysis
- 7) 日比野 敏, 技術者に必要な岩盤の知識, 鹿島出版会, 2007, pp.102-103.
- 8) 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.
- 9) 土木学会地下空間研究小委員会(編集者, 日比野敏): 地下空間とデザイン(地下空間と人間 4), pp.62-64, 1995.
- 10) 栗原 伸一, 入門 統計学—検定から多変量解析・実験計画まで—, 2011
- 11) 立川 剛, 八尾 誠, 栗原 一三, 宿里 勝信, 中野 真司, 地下構造物の耐震性評価に関する一考察, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第 36 号, pp 249-252, 1998