

大谷採石地下空間の地震応答と避難意識について

埼玉県庁

土屋 友梨珠

宇都宮大学大学院 学生会員

程 伝涛

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石は、地質学的に火山屑軽石凝灰岩に分類され防音性、耐火性に優れていることなどから建築用石材に使用される。大谷石の地下採石跡に広大な空間が生まれており、この空間を有効に利用するために、取り組みが行われてきた。しかしながら、平成元年から3年に発生した大規模陥没事故により大谷石採石地下空間自体の安全性と、利用者の不安が大きくなった。さらに、2011年東北地方太平洋沖地震以降大谷採石地下空間の地震時に対する安全性が注目を集めている。このことから本報では、大谷石採石地下空間の地震時の応答を観測および数値解析から確認し、その結果とアンケート調査によって得られたデータをもとに、地下空間で地震が発生した場合の対応について検討することを目的とする。

2. 大谷採石地下空間の地震応答

本報では、大谷採石地下空間を対象として、壁面および残柱の地震応答と3次元有限差分法解析(FLAC3D)によって再現された解析モデルの地震応答を比較し、その再現可能性を検討する。さらに、動的解析による最大せん断ひずみから壁面の危険指数を算出し、地震時の安全性を評価する。また、空間の塑性降伏状態を確認して安定性を考察する。まず大谷採石地下空間の立坑部分3か所、空洞内部の残柱1か所の計4か所に3成分の地震計を設置し、2019年7月8日から8月19日まで47の地震動を観測した。その中の代表的な観測した地震動をモデルに入力し動的解析を行う。まず500m×500m×100mの領域の中に空洞モデルを再現し、立坑とその周辺を2m×2m×2mの細かいメッシュで再現した。このモデルに2019年8月4日19時23分に発生した福島県沖を震源とするM6.4の観測地震動を採石地下空間底面に入力して動的解析を行い、実在空間の壁面の速度スペクトルを比較する。速度スペクトルの比較は壁面の各高さで残柱下部で行い、その結果の例を図-1に示す。これらから、実測した地震動とFLAC3Dを用いて再現した地震動による壁面と残柱の挙動は概ね一致しており、モデルの整合性は高いといえる。また、FLAC3Dによって大谷採石地下空間のせん断ひずみ分布を解析し、最大せん断ひずみ $\epsilon \geq 1.8 \times 10^6$ において、危険指数 M を定めた。壁面の最大せん断ひずみを ϵ_i 、その面積を A_i 、対象とする壁面の表面積を A とする(式(1)参照)。

$$\text{危険指数 } M = \frac{\sum(\text{ひずみ } \epsilon_i \times \text{面積 } A_i)}{\text{壁面の表面積 } A} \quad (1)$$

この値を大谷採石地下空間の壁面に適用し、評価した値を表-1に示す。なお対象とする壁面をA1~E2とし、図-2に示す。なお、寒色系から暖色系になるほど最大せん断ひずみが大きくなる。また、この結果と比較するために、2019年7月25日7時14分に発生した千葉県東方沖を震源とするM5.1の地震動を用いて同様の解析を行った結果を表-1に併記した。なお対象とする壁面はA1~E2と同様の位置でa1~e2とした。本報文における数値解析では、最大せん断ひずみの分布は類似しているが、危険指数 M は入力地震動によって異なる結果となり、この値を一般化するためには、さらに多様な地震動での検討が必要である。

3. 地下空間での避難行動の要素についての検討

前章では地下空間での地震挙動の検討を行った。しかしなが

ら、大谷地下空間は平成元年頃から発生した陥没事故から、実際に利用する人々の安心感を完全に取り戻すことはできていない。加えて、本研究の様な地下空間における地震動の計測事例は未だ少なく情報も入手しにくいという現状があり、ハード(構造安定性)・ソフト(利用法)の両面からの対応が必要である。そこで本研究では、前章の数値解析とは異なるソフト面の視点から、地下空間における地震時の避難について必要な要素を一般人の観点で検討した。調査の方法として、土木工学の知識が比較的浅い宇都宮大学地域デザイン科学部社会基盤デザイン学科の1年生を主とする48名を対象としたアンケートを行った。また、土木技術者24名にも同様のアンケートを実施した(図-3)。質問内容は、大問4つで、「1.地下空間にいるときに地震を経験したことがあるか」、「2.地上と地下では地震時の避難対策が異なるべきだと思うか」、「3.地下空間にいるときに地震が起きたら、地上にいるときよりも強く不安を感じると思うか」、「4.現状の地下空間での地震対策は十分だと思うか」、である。その結果、95.8%が地下空間での地震を経験したことがなく、83.3%が地下空間での地震に強い恐怖感を抱く傾向を示した。さらに、地下空間で地震を経験したことがある人は2.1%であり、75.0%が現状の地震対策が不十分だと感じている。よって、地下空間での地震は、経験の少なさや恐怖感の強さが問題であり、地下空間独自の地震対策の需要が高いことが明白である。さらに、図-4では、避難行動の有効度の認識の結果を示した。質問内容は、11個の質問項目、「1.地震が発生したことを伝えるアナウンス」、「2.地震が発生したことを伝える人の声」、「3.呼びかけをしない」、「4.安心感の呼びかけ」、「5.具体的な行動の呼びかけ」、「6.周囲の環境に対する呼びかけ」、「7.発生した地震に関

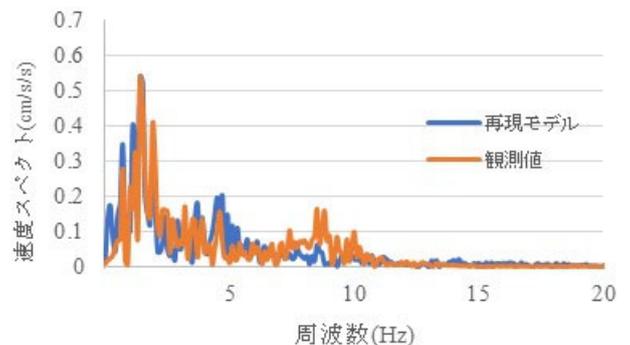


図-1 観測値と解析値との速度スペクトル比較の例(残柱の水平方向成分)

表-1 採石地下空間の危険指数による安全性評価

場所	M	場所	M	場所	M	場所	M
A1	0.164	a1	0.155	C2	0.054	c2	0.041
A2	0.232	a2	0.199	D1	0.002	d1	0.002
B1	0.114	b1	0.133	D2	0.035	d2	0.029
B2	0.230	b2	0.227	E1	0.027	e1	0.020
C1	0.043	c1	0.039	E2	0.071	e2	0.066

キーワード 大谷石採石地下空間, 有効利用, 安全, 安心, 地震応答, 避難意識

連絡先 〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学大学院地域創生科学研究科 TEL028-689-6216

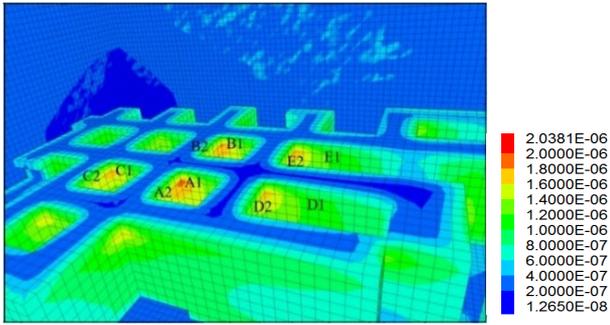


図-2 大谷採石地下空間の最大せん断ひずみの分布と壁面ごとの危険指数検討区分

する情報提供」,「8.被害状況の伝達」,「9.地下空間の安全性のアピール」,「10.具体的な避難の仕方の指示」,「11.避難経路を示す標識」,である。なお、以上の質問項目は分散分析をした結果、P 値有効水準 1%の条件を満たし、避難行動の有効度の認識の平均値に優位さがある。よって、各項目の平均値を比較することに意義がある。これらの質問項目から、4, 5, 6, 9, 10, 11 が特に全体の有効度が高い。これらは地震時の避難行動に必要な不可欠な要素であり、安全性の確保には必須である。一方で、地下空間訪問経験の有無による差を見ると、質問項目 1, 2, 7, 8, 9.において顕著な差がみられた(図-5)。これらの項目を比較すると、地震時の避難行動の必要不可欠な度合いは低下しているが、全項目に共通して人々の不安要素を和らげる効果があると期待できる(図-4)。したがって、地下空間への訪問経験がない、すなわち地下空間への知識や経験が浅い人ほど地震時に不安を感じる傾向が高く、それを緩和するような避難行動の需要が高いと考えられる。また、同アンケートを土木技術者 24 名に実施した。両者の平均値の相違を図-6 に示す。特に大きな差が見られるのは、質問項目 5, 6.である。この二つは、「具体的な行動」と「周囲の環境に対する注意」である。これら2つの項目に差が出た理由は、土木技術者に比べて一般人は地震や地下空間に対する知識が浅く、かつ未経験の地震に対して自身の身の安全を求める傾向が高いと推測される。

4. 地震応答とアンケート調査に基づいた地下空間における避難のあり方についての検討

前章までで検討した地震応答解析による危険指数 M から、地震発生時の想定される行動について図-7 のフローチャートを元に考察する。各判断基準として a)~f)に示す。

- a)震度 3 以下の場合。 b)震度 4 以上の場合。
- c)目視で地下空間内の破損および破損の可能性がある箇所を確認できる場合。
- d)危険指数 $M \geq 0.100$ の付近にいた場合、壁面からできるだけ距離をとり、待機する。
- e) $M < 0.100$ の付近にいた場合、その場で待機する。
- f)危険指数 $M \geq 0.100$ の付近および同じ空洞内に $M \geq 0.100$ 壁面が存在した場合、 $M < 0.100$ となる場所に移動する。

一方で、アンケート調査より、(4)安心感の呼びかけ(5)頭を守る等の行動(6)周囲の環境に対する注意(10)具体的な避難の指示(11)避難経路を示す標識の 5 つの項目について「多数の人が有効だと感じており、優先して取るべき行動」とした。

5. まとめ

本報文では、地下空間の地震応答と避難行動の意識調査から、大谷採石地下空間の地震時の安全性を検討するために、実在地下空間における地震動の観測と再現および解析、地震時の避難行動に必要な要素を抽出するアンケート調査を行った。大谷採石地下空間において地震が発生した場合は、危険指数 M によって区別されたフローチャートと、アンケート調査によって有効と評価された 5 つの事項について行動すべきである。今後はさらに多様な地震動によって危険指数を算出し試行することで、より危険指数の汎用性が高め、一般化することが期待される。さらに、今回のアンケート対象や内容をより広い視野から多様な状況を想定した具体的な避難行動の要素の検討が期待される。実際に地下採石場内で地震を体験した方のヒアリングから、

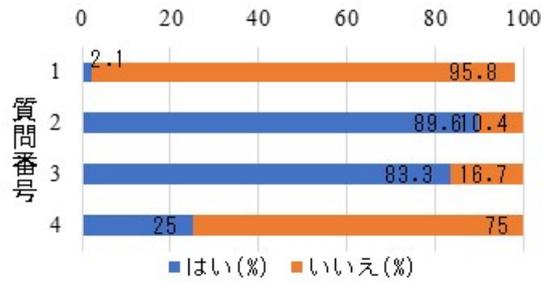


図-3 地下空間での地震に対する意識

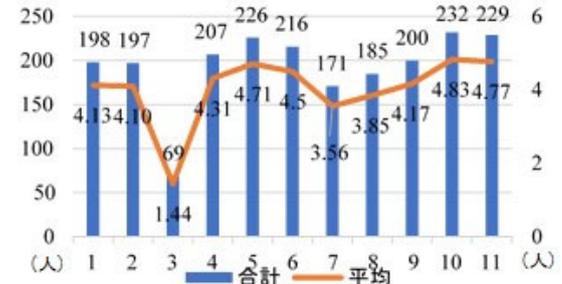


図-4 学生の避難行動の有効度

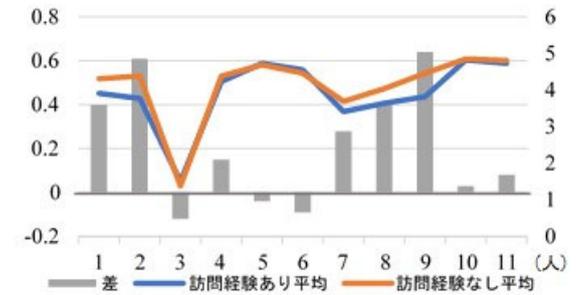


図-5 地下空間訪問経験の有無による差

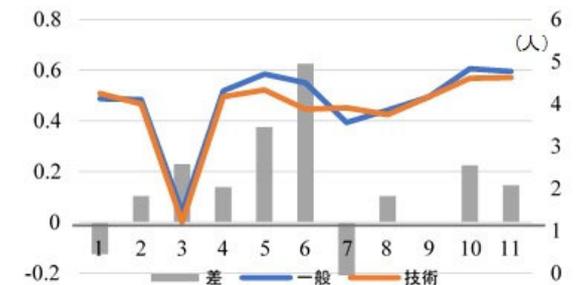


図-6 一般人と土木技術者の避難行動の認識の相違

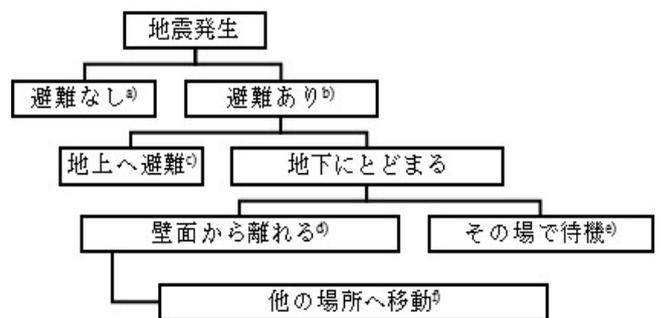


図-7 地震発生時の避難に関するシナリオフロー

地震動の音が大きな不安要素にもなるので、加えて検討をすすめる。

参考文献

星野 天海, 清木 隆文(2018): 大谷採石地下空間入口への期待感に基づいた構造安全性に関する検討, 地下空間シンポジウム論文・報告集, 第 24 巻, 土木学会, CD-ROM, 2019.1.