

大谷採石地下空間の地震応答と 避難意識の関連性について

土屋 友梨珠¹・程 伝涛²・清水 隆文³

¹ 埼玉県庁 (〒330-9301 埼玉県さいたま市浦和区高砂三丁目 15 番 1 号)

² 学生会員 宇都宮大学 大学院 工学研究科 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)

³ 正会員 宇都宮大学 大学院 地域創生科学研究科 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)

E-mail: tseiki@cc.utsunomiya-u.ac.jp

大谷石の地下採石場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な問題となった。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。本論文では、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して検討した。その結果 2 つの地震動を参考にして、大谷採石地下空間に滞在する人が地震時に安心感を得るための一つの考え方を整理した。

Key Words: Oya tuff, underground quarry, seismic response, evacuation consciousness

1. はじめに

大谷石とは、栃木県宇都宮市の北西方向に位置する大谷町付近に分布している軽石火山礫凝灰岩である。この大谷石は、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。近年では、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(1989)年から 3(1991)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な問題となった。今日では大谷地域への来訪者は増加しつつあるが、さらなる有効利用の促進と、2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震や近年発生すると予測されている首都直下地震から、大谷採石地下空間(図-1)の地震時に対する安全性が注目を集めている。著者らは、大谷採石地下空間の構造的な安定性を検討するとともに、安心して利用していただくためのアプローチを試みている¹⁾²⁾。本研究では、大谷石採石地下空間の地震による揺れ方を現場観測で確認し、数値解析を通して確認し、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処または避難の方法を検討することを目的とする。



図-1 対象とした大谷採石地下空間の内部

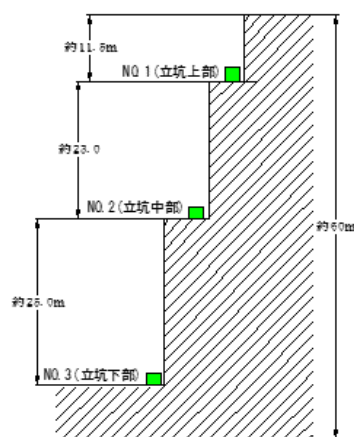


図-2 立坑壁面における地震計の設置場所

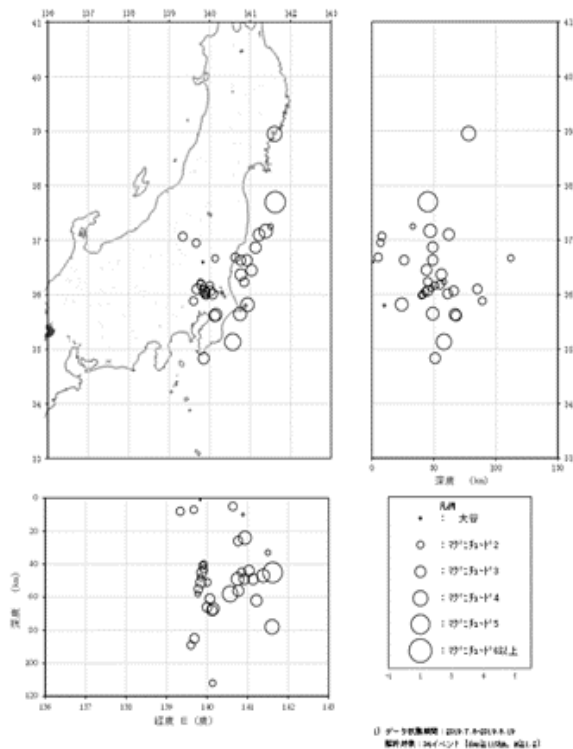
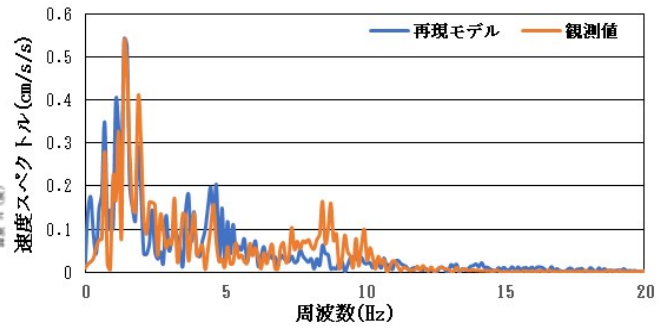
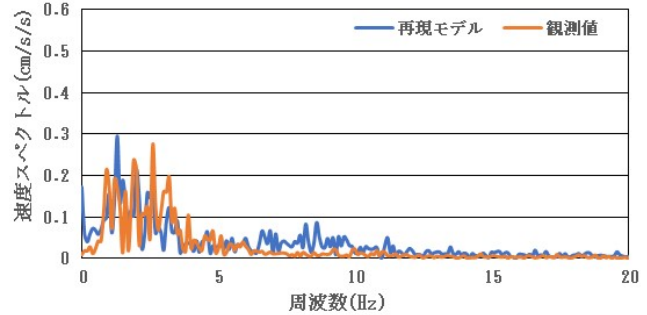


図-3 観測地震の震源と大きさ



(a) 残柱 Y 方向



(b) 残柱 Z 方向

図-5 速度スペクトル比較の例

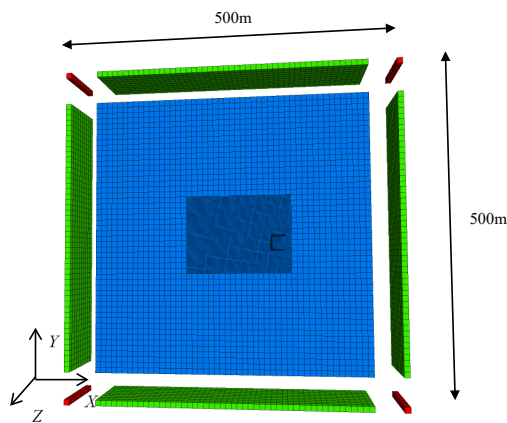


図-4 再現した空洞モデルを含む地盤の俯瞰図

表-1 解析に用いた材料定数

体積弾性係数(Pa)	1.38×10^9
せん断弾性係数(Pa)	0.91×10^9
粘着力(Pa)	2.1×10^6
内部摩擦角(°)	30
引張強度(Pa)	1.08×10^6
密度(kg/m³)	1.73×10^3

2. 大谷採石地下空間の地震応答

(1) 地震動の現場計測

本研究では、地震時の大谷採石地下空間の地震応答を

調べるために、2019年07月03日に大採石地下空間において地震計を取り付け、07月08日から08月19日の間で47波の地震波とその壁面および残柱の挙動を観測した。地震計は深さ約60mの立坑入り口から深さ11.5m、34.5m、59.5mの3箇所の壁面(図-2)と残柱下部の計4箇所に設置した。これは地震動によって大谷採石地下空間の壁面が深度で挙動の相違を確認するためである。観測した地震の震源位置とマグニチュードを図-3に示す。

(2) 大谷採石地下空間の地震応答解析

本研究では、宇都宮市大谷地域にある稼働中の大谷採石地下空間を研究対象とし、実際に観測した地震動壁面の挙動と、3次元有限差分法解析システム(FLAC3D)によって再現されたモデル(図-4)の地震動による挙動を比較し、その整合性を検討する。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。前節で示した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か所に地震計で観測した地震動をモデルに入力し、動的解析を行う。モデル境界面は無限境界として、反射波を防ぎ、レーリー減衰を適用した。最初にFLAC3Dを用いて500m×500m×100mの地盤を表現し、自重解析を行った。その後、大谷石の掘削段階として掘削を行い、空洞モデルを再現した。完全弾塑性は、モールクーロンの破壊規準に従うとした。材料定数は大谷石の代表値を用いた(表-1)。立坑とその周辺は、観測の状況を再現するために、

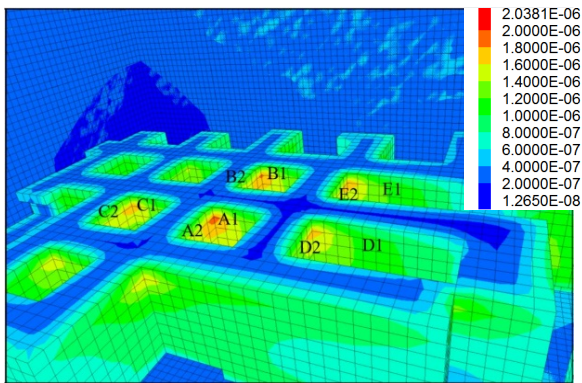


図-6 最大せん断ひずみの分布と壁面ごとの区分(福島県沖の観測地震動の入力結果)

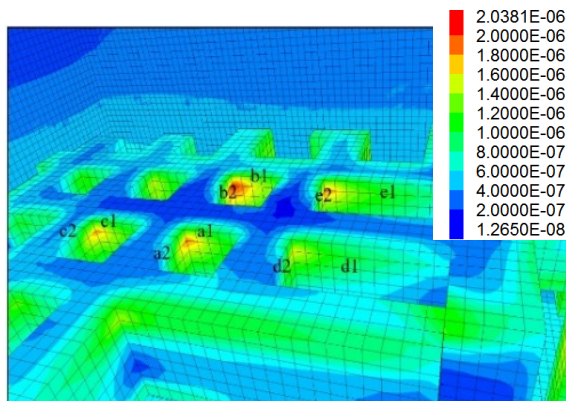


図-7 最大せん断ひずみの分布と壁面ごとの区分(千葉県東方沖の観測地震動の入力結果)

2 m×2 m×2 m 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の採石地下空間底面における観測地震動を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と残柱下部で行い、その結果の例を図-5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、解析モデルで大谷採石地下空間の地震動の説明が整合性は高いといえる。よって、今回再現した地震応答の再現が可能であることが確認された。また、この地震応答を再現したモデルも応力分布も実際の地震波による応力分布と同様にとらえることは妥当であり、これらの結果を用いることは適正である。

(3) 大谷採石地下空間の安全性評価

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¹⁾。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。

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

この値を大谷採石地下空間の壁面に適用し、評価した

表-2 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

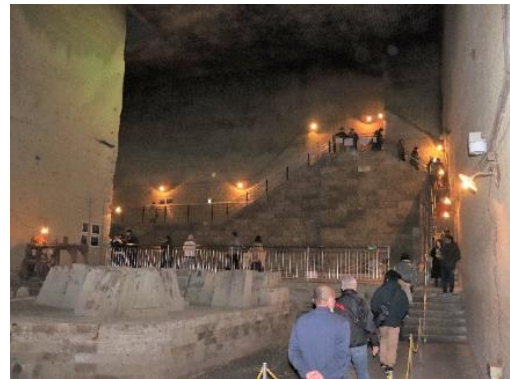


図-8 アンケートに用いた写真の例

値を表-2に示す。なお対象とする壁面をA1～E2とし、図-6に示す。また、この結果と比較するために、2019年07月25日07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-2に記し、最大せん断ひずみの分布を図-7に示す。なお対象とする壁面をa1～e2とした。

また、最大せん断ひずみ分布の広がりに基づき評価するため、式(1)を大谷採石地下空間の壁面の安定性評価の基準として危険指数 M を定める。危険指数は、数値が大きな程危険度が高い事を示す。本解析では、最大せん断ひずみの分布は類似しており、危険指数 M は大小の傾向は類似しているが、定量的には入力地震動によって異なる結果となった。特に個々の値に注目すると、 M 値について福島県沖の地震動についてはA2の壁面が最大となったが、千葉県東方沖の地震動ではb2の壁面が最大となった。したがって、複数の地震動において、最大せん断ひずみの分布は全般的に等しいが、危険指数 M の最大値は地震動によって異なるため、様々な地震動による解析が必要である。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。

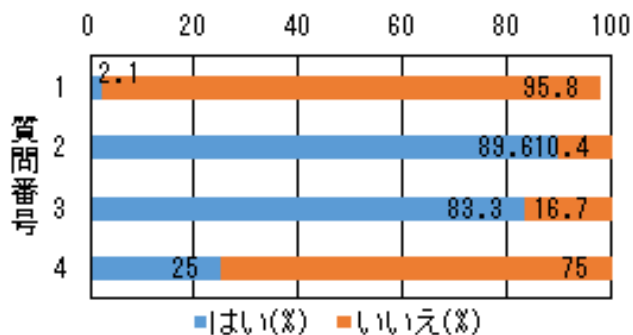


図-9 地下空間での地震に対する意識

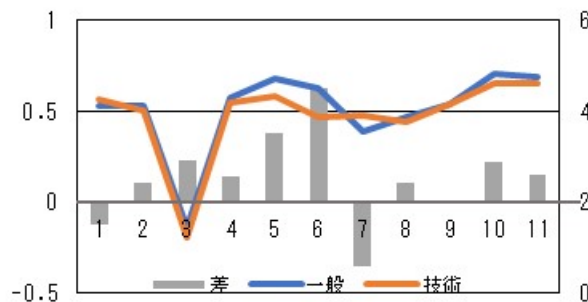


図-12 一般人と土木技術者の避難行動の認識の相違

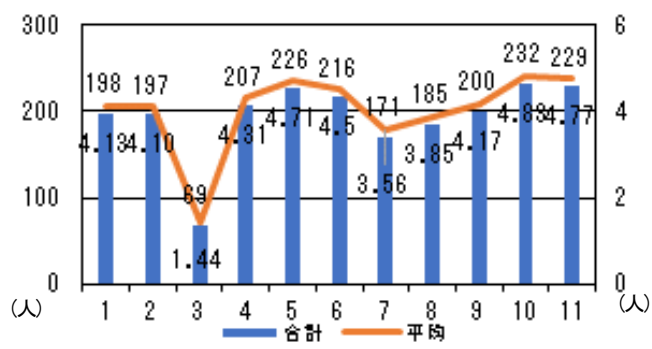


図-10 学生の避難行動の有効度

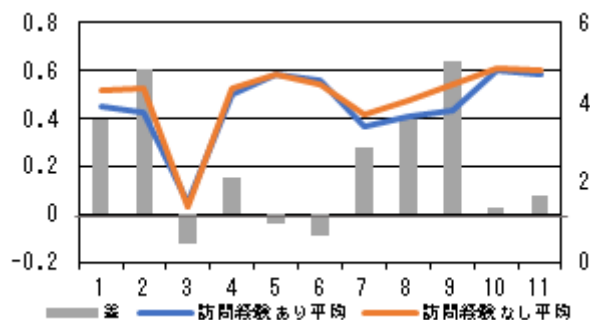


図-11 地下空間訪問経験の有無による差

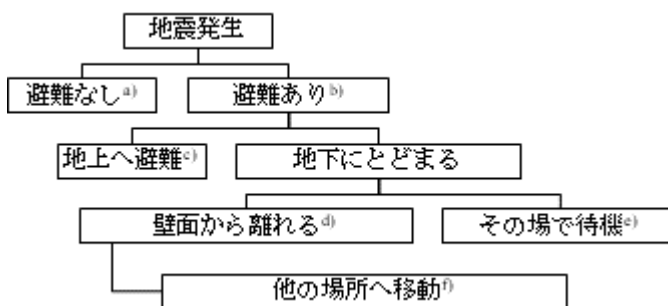


図-13 地震発生時の行動シナリオフローチャート

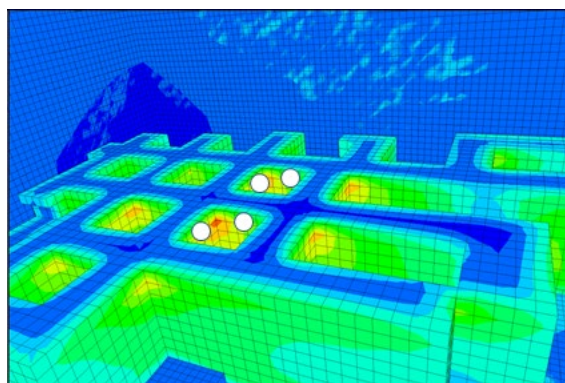


図-14 危険度指数 $M \geq 0.100$ の箇所(図中の白い点の部分)

3. 地下空間での避難行動の要素についての検討

前章では大谷採石地下空間における地震応答について検討を行い、危険度判定を行った。この結果は、大谷採石地下空間の構造的な安全性を評価するためには有用である。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十分に取り戻すことはできていない。これに加えて、本研究の様な地下空間での地震については、未だ事例が少なく情報も入手しにくいという現状があり、ハード・ソフト両面において対応が必要である。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(以下、一般人)を対象としたアンケートを行った。アンケートで示した地下空間を例示する(図-8)。また、土木工学の技術者及び研究者24名(以下、土木技術者)にも同様のアンケートを実施した(図-9, 図-10)。この質問内容は、4つで、1.以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-10 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、地下空間への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-11)。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-10)。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、同じアンケートを土木技術者 24 名を対象に実施した。両者の平均値の相違を図-12 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。これら二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. 動的解析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動的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-13 のフローチャートを元に考察をしていく。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の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(図-14)、壁面から

表-3 大谷採石地下空間の地震発生時に取るべき避難行動案

番号	内容	ランク
(1)	「地震が発生しました。落ち着いて行動してください」等のアナウンスによる呼びかけ	b
(2)	「地震が発生しました。落ち着いて行動してください」等の人の声による呼びかけ	b
(3)	アナウンス等はない	c
(4)	「地震が収まりました。状況を確認しています。落ち着いてください」等の安心感の呼びかけ	a
(5)	「地震が収まりました。周りの安全を確認し、避難誘導の指示に従ってください」等の具体的な行動の呼びかけ	a
(6)	「付近の倒れやすいものなどには近づかないでください」等の周囲の環境に対する注意	a
(7)	「只今発生した地震は、〇〇を震源とした震度 6 弱、マグニチュード 5.5 です」等の発生した地震に関する情報提供	c
(8)	「地上では一時的な停電が起こっています」等の被害の状況を伝える	b
(9)	「この地下空間は地震に対して崩壊などの危険はありません」等の安全性のアピール	b
(10)	「これから〇〇を通して避難を開始します」等の具体的な避難の仕方の指示	a
(11)	避難経路を示す矢印等の標識の設置	a

- a：多数の人が有効だと感じており、優先して取るべき行動（アンケート調査の平均 4.3 以上）
- b：比較的有効だと感じる人が多く、余裕がある場合にとるべき行動（アンケート調査の平均 3.9 以上 4.3 未満）
- c：有効度は低いため、避難行動に必要とはいえない行動（アンケート調査の平均 3.9 未満）

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 $M \geq 0.100$ の壁面が存在した場合、 $M < 0.100$ となっている場所へ移動する。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。この結果を受けて、アンケート調査によってどのような避難行動が有効なのかを検討した。この結果をもとに、大谷採石地下空間の地震発生時に取るべき避難行動を以下の基準をもとにランク分けした。これらのうち、a に該当する要素について、構造空間的な視点から検討をする(表-3)。

- (4)「地震が収まりました。状況を確認しています。落ち着いてください」等の安心感の呼びかけ、(5)「地震が収まりました。周りの安全を確認し、避難誘導の指示に従ってください」等の具体的な行動の呼びかけ、(6)「付近の倒れやすいものなどには近づかないでください」等の周囲の環境に対する注意
- (10)「これから〇〇を通して避難を開始します」等の具体的な避難の仕方の指示、これら 4 つの要素は、避難者への呼びかけである。地震発生時に大切なのは、避難者がパニックを起こさず、落ち着いて行動することであ

る。よって、これらを的確に伝え、避難者を安全な箇所
に誘導するために、地下空間全体に音声が届くような音
響設備等が必要である。「(11) 避難経路を示す矢印等
の標識の設置」については、地震対策として予め標識を
設置することが必要であり、空間内の安全性を検討した
うえで実施する。

5. まとめ

本研究では、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。

数値解析では、大谷採石地下空間にて観測した地
震動による速度スペクトルと、FLAC3Dによって再現
した地下空間モデルの速度スペクトルは概ね一致し、
本解析の整合性は高い事を確認した。この解析結果
から計算した最大せん断ひずみと壁面の面積から危
険指数 M を算出し、大谷採石地下空間の空洞部分に
ついての安定性を評価した。

アンケート調査では、一般人 48 名と土木技術者 24
名に同様の質問をした。その結果、一般人の場合は
自分の身を守るなどの避難行動の基礎を重視する傾
向が強く、地下空間やその地震に対して経験や知識
の少なさを反映したものと考えられる。一方、土木
技術者の場合は地震に関する情報などが有効だとす
る傾向があり、一般人よりも地震に対する対応を広
い視野で考えていると考える。また、地下訪問経験
の有無で比較すると、訪問経験のない人の方が安全
面に加え安心感を重視する傾向にあり、地下空間に

おける地震に対して不安感をより抱いていることが
明確になった。

最後に、これまでの数値解析、アンケート調査か
ら実際に大谷採石地下空間で地震が発生した場合の
取るべき避難行動について考察した。ハード面から
は大谷採石地下空間の危険指数を用いて、今回想定
した地震動では、 $M \geq 0.100$ の箇所とその周辺ではよ
り危険指数が小さい箇所へ移動することを推奨し、
空洞内の安全な箇所を示した。また、アンケート調
査より得られた結果を検討し、呼びかけ等での安心
感、頭を守るなどの身を守る具体的な行動、機材な
ど周囲の環境に対する注意および経路の選択等の具
体的な避難の行動の 4 つの必要要素を提案した。

今後は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
広い視野から検討することで、多種多様な非日常の状況
を想定した具体的な避難行動の要素の検討可能となる。
これに加えて、実際に避難訓練やシミュレーションなど
を通して実証し、参加者からのフィードバックを得るこ
と等から本研究成果の裏付けをとる必要がある。

謝辞：本研究は、2019年度宇都宮市大谷特性活用補助金
及び中電技術コンサルタント(株)からの助成の一部によ
って行われた。記して謝意を申し上げます。

参考文献

- 1) 星野 天海, 清木 隆文, 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.
- 2) Huy Thanh BUI, Tumelo DINTWE, 清木 隆文, 大谷採石地下空
間における残柱の安全性と安心感との関連について, 地下空
間シンポジウム論文・報告集, 第 25 巻, 土木学会 [一般投
稿論文], CD-ROM, 2020.1.

RELATION BETWEEN SEISMIC RESPONSE OF OYA UNDERGROUND QUARREY AND EVACUATION CONCIIOUSNESS

Yurimi TSUCHIYA, Chuantao CHENG and Takafumi SEIKI

After excavation for stone maerial of Oya tuff, huge dimension of underground space will appear. For several decades, those underground spaces have been trid to use public purpose. Howver, beginning of 1990, huge corppus occued and those utilizing activtvtvy had been stopped since then. Additionally as 2011 Greast Esat Japan Earth-quake had made people worry to stay in the underground spaces at seismic state, people has started to forcus on the safety evaluation in seismic stability by field measurement and numerical analysis. The authors tried to understand the seismic stability of Oya underground quarry by field monitoring of seismice wave and numerical analysis of its space. The authors employ the danger index to represent the state of maximam shear strain and its area. And based on the questionnaire to the university students and civil engineering and researchers, the authors considered evacuation conciausness in the sesimica state. Finally, with conbining the results of seismic response and questionnaire, this study treats the process for reassurance in the underground quarrey at the seismic state.