

大谷採石地下空間の安全性に着目した 空間価値評価の試み

CONSIDERATION TO SPACE VALUE EVALUATION OF OYA UNDERGROUND QUARRY FROM VIEW OF STRUCTURAL SAFETY

斎藤 明秀¹・清木 隆文^{2*}・佐藤 大地³

Akihide SAITO¹, Takafumi SEIKI^{2*}, Daichi SATO³

There are many underground spaces in Oya area, Utsunomiya city, Tochigi Prefecture. Some of them have been expected to utilize as infrastructures and so on. However, it is necessary to evaluate structural safety of them before their decision. Those utilization has been tried for long time, however it has not succeeded because of ambiguous safety of necessary after huge collapse of underground quarries around 1990. In this study the authors asked to reply the questionnaire to entrepreneurs relating with Oya area to understand the underground anxiety of interior in Oya underground spaces with conjoint analysis. And we also carried out the other survey with questionnaire for applying travel cost method to evaluate the value. Finally we carried out numerical analyses for understanding the underground stability based on anxiety factors from the questionnaire.

Key Words : *Oya tuff, underground quarry, safety evaluation, value of underground space, heat stress analyses*

1. はじめに

近年、大深度地下を始め、多くの地下空間が注目されている。一般的に地下空間は、恒温性や恒湿性、遮音性、耐震性など地上部にはない特性を有している空間が多い。栃木県宇都宮市大谷地域には採石によって形成された地下空間跡地が多数存在されている。このほとんどが、放置され荒廃している。再利用されているのは観光用に公開されている大谷資料館などごく一部のものが現状である。このような既存の地下空間を貴重な空間資源として捉えて、その特性を活かした様々な利用が求められる。

既存の地下空間である大谷採石地下空間跡地を有効的に利用するためには、安全性の保証が不可欠である。過去にも利用されてきた例はあるが、安全性を疑問視

し、利用が中止になる場合もあった。そこで、本研究では、大谷地域に関わる事業者を対象に、大谷採石地下空間内部における安全性に不安を感じる要素を知るために、コンジョイント分析を用いたアンケート調査を行った。この調査手法を大谷採石地下空間に適用し、価値評価を行って来た¹⁾が、本研究では、これに安全性の視点を追加する。その結果から、事業者が地下空間に不安要素を感じる程度を把握する調査を行う。地下空間の熱環境変化による熱膨張による構造安定性への影響を検討するため、3次元の数値解析ソフトを用いた熱応力解析を行う。また、大谷資料館に訪れる観光客を対象に、トラベルコスト法を用いたアンケート調査を行い、レクリエーション価値を計測する。

キーワード 大谷石、採石地下空間、安全性評価、価値評価、温度応力解析

¹ 非会員 栃木県庁 栃木土木事務所 Tochigi Civil Engg. Office Tochigi Prefectural Government,

² 正会員 宇都宮大学准教授 大学院工学研究科 Assoc. Prof., Graduate school of Engg. (E-mail: tseiki@cc.utsunomiya-u.ac.jp / pikakukan.ac.jp)

³ 非会員 宇都宮市役所 経済産業部, Economical and Industry Div, Utsunomiya City Hall

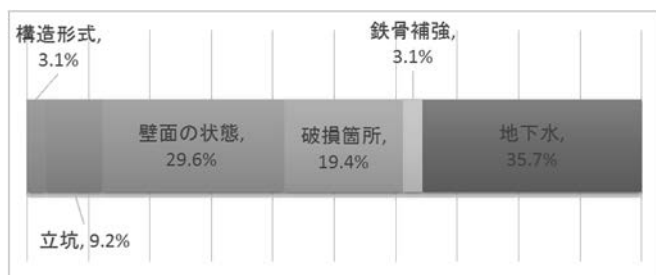


図-1 空間不安要素に対する属性の重要度

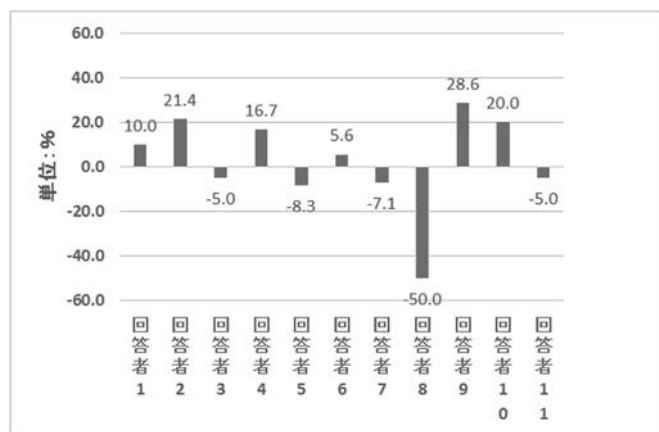


図-2 鉄骨補強ありに対する個人別の重要度

2. 事業者の視点から見た大谷地下空間の不安要素に関するコンジョイント分析

(1) 分析概要の説明

本研究では、大谷に関わりのある事業者が、地下空間のどの要素に安全性の不安を感じるかを知るために、コンジョイント分析を行った。コンジョイント分析とは、主に企業などがマーケティング調査などを行う際にもちいられる手法であり、最適な商品やサービスを多変量解析により決定させる手法である。この手法の特徴は、評価項目の組み合わせによる全体評価のみならず、被験者が各項目をどの程度評価していることも明らかにできることである。

(2) 本研究におけるコンジョイント分析の内容

本研究では、大谷採石地下空間において、安全性に不安を感じるような6つの要素の組み合わせを選定した。採掘形式の違いによる「構造形式」、出入り口部にあたる「立坑の数」、節理等の傷があるかの「壁面の状態」、柱や天井に剥落などがあるかの「破損状況」、H字型の鋼材による補強材があるかの「鉄骨補強」、地下水が漏れだしているかの「地下水」の6つの要素である。各要素に2つの水準を設定し、直交表を用いて8枚のコンジョイント・カードを作成した(表-1)。評価方法は、各要素についての説明を行い、8枚のカードを同時に提示

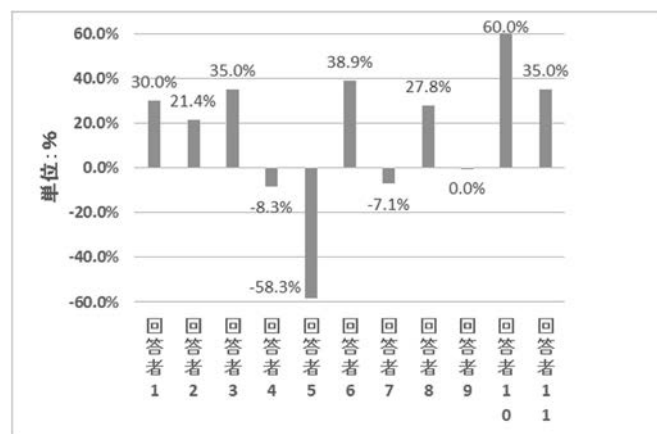


図-3 地下水なしに対する個人別の重要度

表-2 アンケートの回答者の属性

	年代	地下空間経験	業種	内容
回答者1	20代	あり	建設コンサルタント	再生可能エネルギー、プロジェクトマネジメント
回答者2	50代	あり	食品メーカー	醸造品熟成
回答者3	60代	あり	IT	ソフト開発
回答者4	30代	あり	建設コンサルタント	水資源管理、地中熱利用
回答者5	60代	あり	コンサルタント	地中熱利用
回答者6	30代	あり	建設コンサルタント	再生可能エネルギー
回答者7	40代	あり	建設コンサルタント	エネルギーの効率利用探索
回答者8	40代	あり	建設コンサルタント	建設業に関する調査・計画・設計等
回答者9	40代	なし	建設コンサルタント	地質・地盤部門
回答者10	20代	なし	建設コンサルタント	民生活事業
回答者11	20代	あり	建設コンサルタント	調査・解析

し、被験者に5段階で点数付けをしてもらうものとした。なお、地下空間に入ったことのない被験者にも地下空間内部が想像できるように、各要素の説明には、実際の地下空間の写真を用いて説明することや、コンジョイント・カードは3次元モデルで再現したものも示している。また、アンケート回答者の属性を知るために、年代と地下空間に入った経験の有無、事業の業態についての設問を設けてある。

(3) アンケート調査の実施

本研究のアンケートではまず、宇都宮市役所産業政策課の方々のご協力を得て、大谷地域に関わりのある事業者の方に行うアンケートを実施した。配布期間は平成27(2015)年12月中旬から平成28(2016)年1月中旬までとし、電子メールで電子媒体のアンケートを配布した。表-2は、アンケート回答者の属性である。

(4) 調査結果のコンジョイント分析

図-1に各コンジョイント・カードの得点の平均をコンジョイント分析した結果を示す。さらに、各個人別にコンジョイント分析を行い、表-2の各回答者の所属する業態や地下空間内に入った経験などの属性による検討を行った。図-2、3は「鉄骨補強あり」と「地下水なし」に対する各個人別のコンジョイント分析の結果で

表-1 コンジョイント・カードの項目

No.1		No.2		No.3		No.4	
構造形式	長壁	構造形式	長壁	構造形式	長壁	構造形式	長壁
立坑	1つ	構造形式	1つ	構造形式	2つ以上	構造形式	2つ以上
壁面	目立った汚れなし	壁面	目立った汚れなし	壁面	節理がある	壁面	節理がある
破損	あり	破損	なし	破損	あり	破損	なし
鉄骨補強	なし	鉄骨補強	あり	鉄骨補強	なし	鉄骨補強	あり
地下水	あり	地下水	なし	地下水	なし	地下水	あり

No.5		No.6		No.7		No.8	
構造形式	柱房	構造形式	柱房	構造形式	柱房	構造形式	柱房
立坑	1つ	構造形式	1つ	構造形式	2つ以上	構造形式	2つ以上
壁面	節理がある	壁面	節理がある	壁面	目立った汚れなし	壁面	目立った汚れなし
破損	あり	破損	なし	破損	あり	破損	なし
鉄骨補強	あり	鉄骨補強	なし	鉄骨補強	あり	鉄骨補強	なし
地下水	あり	地下水	なし	地下水	なし	地下水	あり

ある。

(5) コンジョイント分析に関する個別の考察

図-1の結果から、大谷に関わりのある事業関係者は、「地下水がある」ことに最も安全性に対する心理的な不安を感じることがわかる。また、節理があることや、柱の一部が崩壊しているなども強く不安に感じるが、鉄骨による補強などはあまり重要視されていない結果となった。なお、統計的には疑問が残るものの、回答者は大谷地域に関わりのある事業者であることから、その方々の視点からの貴重な意見であるため、事業者視点における安全性の不安要素を知るうえで、興味深い結果である。

図-2の結果から、回答者2のような建設分野とは、無関係な食品メーカーや、回答者9、10のような地下空間内に入った経験のない事業者は、全体に比べ「鉄骨補強がある」の重要度が高い結果となった。これは、地下空間内に入った経験のない事業者や、工学的な知識をあまり持ち合わせていない事業者は、地下空間内の安全性に対して安心を感じたものと考えられる。また、図-3の結果から、回答者4、5、7のようなエネルギー関連に携わる事業者は、全体の結果とは逆に「地下水がある」を重要視している結果となっている。これは、地下水の冷熱を活用する動きがあることから、地下水を一つのエネルギー源として捉えて、地下水があるほうが良いといった結果になったと考えられる。

この結果から、大谷採石地下空間跡において事業者の視点から見た、安全性に対する不安を感じる要素は、図-1から、「地下水」、「壁面の状態」、「破損状況」の順に空間不安要素に対する属性の重要度のウェイトが大きくなっている。また、他の「構造形式」、「立坑の数」、「鉄骨補強」はあまり安全性に対する影響は少ないものと考えられる。影響度が大きかった項目は、大谷採石地下空間跡で何らかの事業を起こす際、注意をすべき点であり、地下水の漏れ出しや、節理などに適切

な対策を行うことが求められる点でもある。なお、この影響度が低い項目についても、この結果はあくまで事業者の視点から見た心理的な不安要素なので、地下空間内の空気の流れや、鉄骨や支保工による補強など、工学的観点からの検討も必要である。

また、個人別に見た重要度では、エネルギー関連に携わっている方では、「地下水がある」という属性のほうに重要度が高くなるといった結果が得られた。また、工学分野とは無関係な食品メーカーや、地下空間内に入った経験がない人には、「鉄骨補強がある」ことが安心に繋がる影響が高いことが伺えた。このことから、地下空間内の恒温性という特性や、冷えた空気や地下水に着目した活用方法に有用性の可能性があると考えられる。また、工学分野を良くご存じない方や、地下空間内に入った経験のない人には、鉄骨補強などの補強材が心理的に安心をもたらす影響が強いということから、不特定多数の方の使用する事業がなされる場合などには、目に見える形の補強材などが存在することが、利用者の心理的な不安要素の排除に繋がるのではないかと考えられる。

3. トラベルコスト法を用いた大谷地域のレクリエーション価値の変動評価

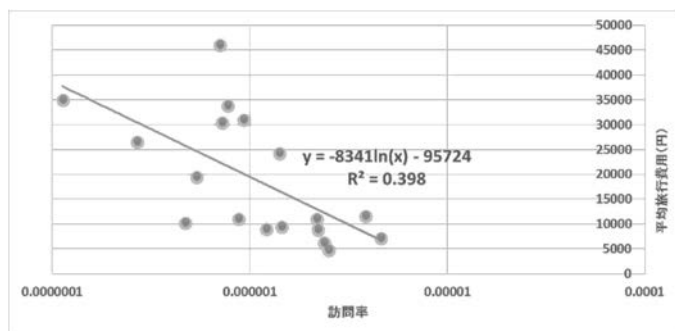
大谷資料館に訪れる観光客の旅行費用をもとに、大谷地域の環境価値をトラベルコスト法(Travel Cost Method: TCM)^{2),3)}を用いて、2015年時点と1年前の2014年の価値評価の比較を行った。

(1) 概要

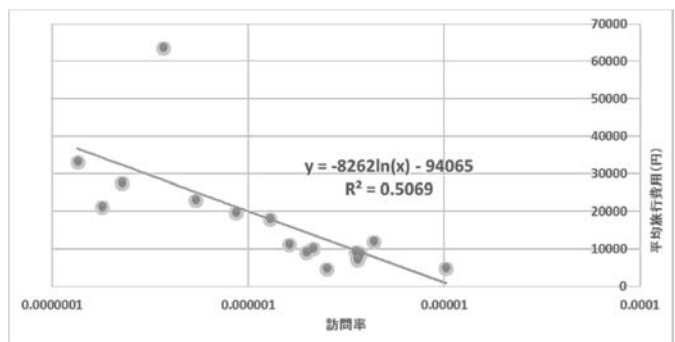
本研究では、旅行費用と訪問率などからレクリエーションの需要関数を推定し、これから消費者余剰測度を用いて貨幣換算する。旅行費用は、出身都道府県の県庁所在地の市役所あるいは主要駅を出発地として、回答していただいた移動手段で往復費用を算出した。今回の調査方法では、ゾーン・トラベルコスト法(ZTCM)³⁾を用いて、各都道府県の平均旅行費用と、県内人口と訪問人数による訪問率をグラフにまとめ、対数近似曲線から、レクリエーション価値の推定を行った。

(2) アンケート調査の実施

本研究のアンケートは、栃木県宇都宮市大谷地域にある大谷資料館の協力を得て、大谷資料館を訪れた観光客を対象に実施した。今回のアンケートの配布期間は2014年度、平成26(2014)年12月19日(土)午前9時



(a) 2014 年度



(b) 2015 年度

図-4 訪問率と平均旅行費用の関係

から午後 2 時まで、総配布枚数 201 枚となっている。2014 年と同様のアンケートの配布期間は 2015 年度、平成 27 年 12 月 27 日(土)の午前 10 時から午後 4 時まで、総配布枚数は 200 枚である。昨年と同様の条件でアンケート調査を実施した。

(3) アンケート調査の結果

往復旅行費用が約 10 万円かかる地域などは、外れ値として、グラフから除外した。この結果を図-4 に示す。機会費用を考慮しない大谷地域のレクリエーション価値は 2014 年度(図-4(a))が 8,341 円、2015 年度(図-4(b))は 8,262 円となった。

(4) 考察

トラベルコスト法を用いたアンケート調査によって、大谷地域を代表する観光施設のレクリエーション価値は昨年に比べてあまり変化がない。大谷地域に訪れる人の多くは、日光・鬼怒川地域など栃木県内の他の地域に訪れることも多く、そのような機会費用をどのように考慮するか検討を重ねる必要がある。しかし、今後、大谷資料館あるいは大谷地域において新たな地下空間の利用が行われた際の観光地としてのレクリエーション価値の変動を知る一つの指標として参考になると考える。また、昨年も今回も年末の土曜日と観光客が多く

表-3 解析に用いた物性値

物性値	大谷石	空気	水
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)	1440.0	1.166	998.2
熱伝導率 (W/(kg·K))	1.074	0.0257	0.602
比熱 (J/(kg·K))	1508.3	1006	4182
線膨張係数 (1/K)	8.5×10^{-6}	1.00×10^{-3}	0.2×10^{-3}
透水系数 (m/s)	4.17×10^{-11}	—	—
空隙率 (%)	40	—	—

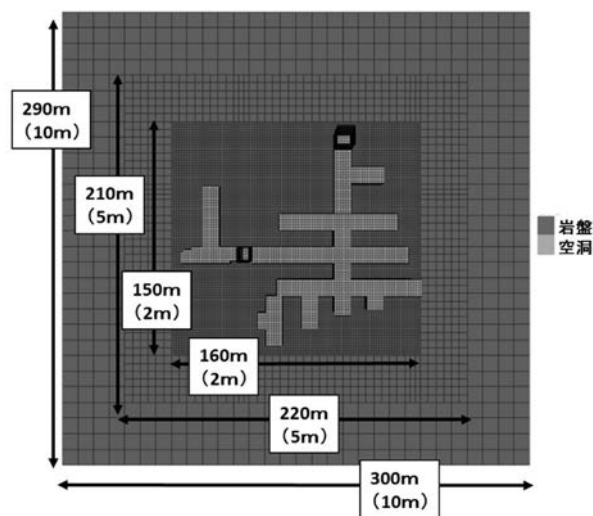


図-5 解析領域の平面図

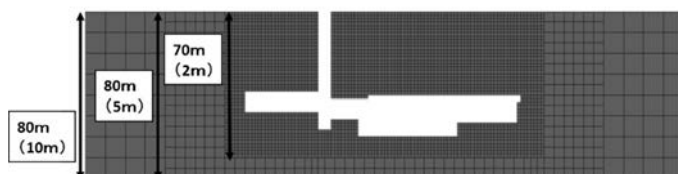


図-6 解析領域の断面図(立面図)

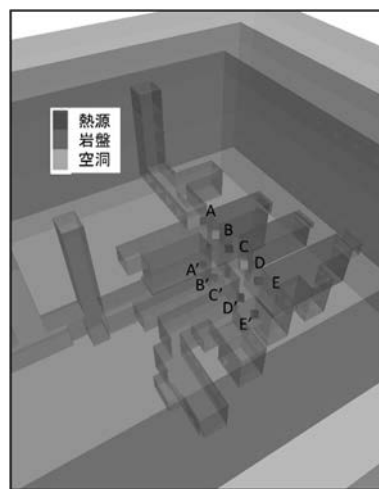


図-7 熱源と測定点の位置

見込まれる期間に調査したが、季節による違いを把握するために、異なる季節に調査をするかな どの必要性

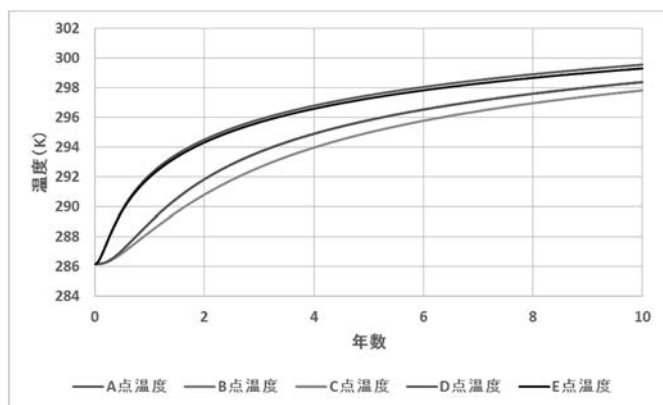


図-8 測定点 A～E における温度

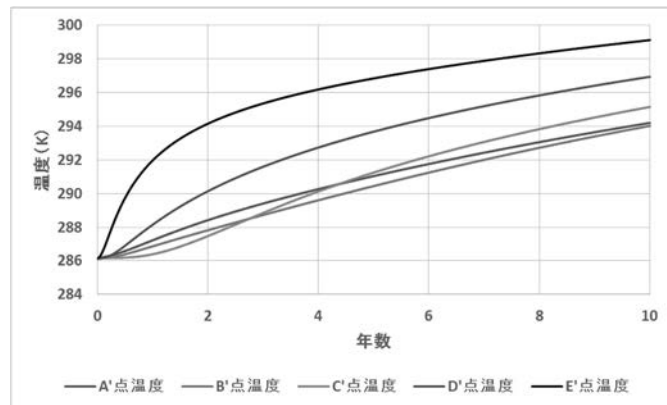


図-10 測定点 A'～E'における温度

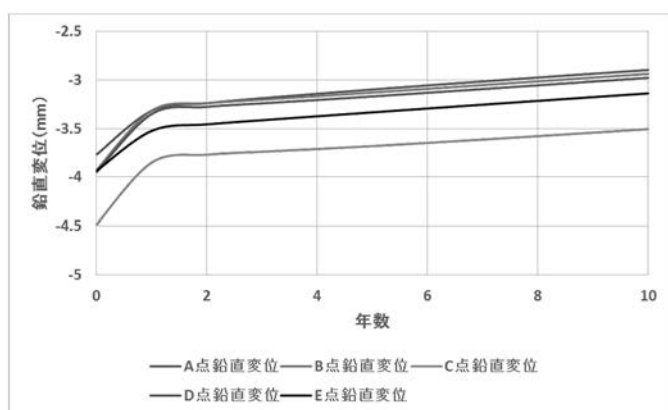


図-9 測定点 A～E における鉛直変位

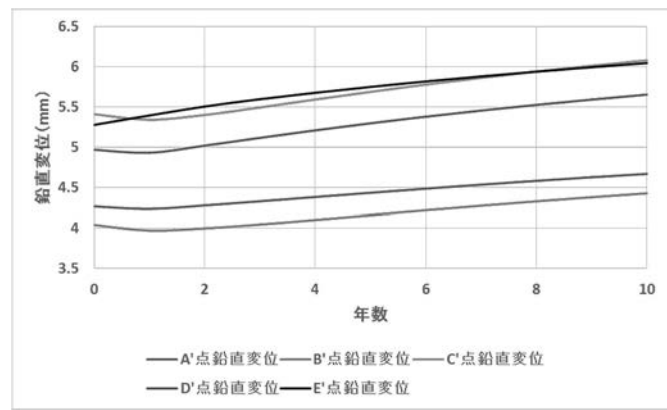


図-11 測定点 A'～E'における鉛直変位

はある。

4. 施設稼働を考慮した地下空間の熱応力解析

(1) 解析対象および解析条件

解析は有限差分法を用いた FLAC3D (Itasca 社) を使用する。解析対象は現在も採掘が行われている大谷採石地下空間の採掘申請箇所も含めた地下空間で、これを単純化したモデルとする。図-5, 6 に再現した地下空間の平面図と断面図および解析領域の寸法を示す。解析条件は、地下空間の一部の温度が上昇したと仮定し、設備稼働によって 10 年間熱が伝導するものとする。本論文では地下空間の一部が 45℃ となったときの結果を示す。また、解析に用いた物性値を表-3 に示す。

(2) 解析結果

図-7 に熱源の位置と温度と鉛直変位の計測点の位置を示す。空洞の天盤部と底面部にある測定点における、温度と鉛直変位の経年変化を図-8～11 に示す。

(3) 考察

図-8～11 の結果から、各測定点において初期温度

13℃から約 15℃程度の温度上昇が確認される。温度上昇に伴い、各計測点で鉛直変位が隆起する方向、すなわち鉛直上向きに変動していることが確認される。このことから、大谷採石地下空間において、温度上昇による鉛直変位の変化が確認されるが、その変動量は大谷採石地下空間が塑性に至るとされる鉛直変位や、初期変位に比べ微小なものであるため、約 13℃程度の温度変化では、安全性に対する影響はほとんど見られないと考えられる。

5. まとめおよび今後の課題

(1) まとめ

本研究では、まず事業者の視点から見た大谷採石地下空間の安全性に対する構造の不安要素をコンジョイント分析によるアンケート調査で測った。全体の集計結果としては、「地下水がある」ということに対して安全性に対する不安が強いといった結果を得た。また、個人別によるコンジョイント分析と、回答者の属性を照らし合わせることで、業態の違いや、地下空間の経験の有無による重要度を計測した。この結果、エネルギー分野に関わりのある方は、「地下水がある」ということを

好ましく思うという全体集計結果とは逆の結果になることが示された。空洞内部の冷えた空気や地下水のみを取り出して利用する場合は、流入する地下水や空気の量や、温度に重点を置くことが求められると考える。地下空間に入ったことのない方や、建設分野とは関わりのない分野の方は、「鉄骨補強がある」ことに対する重要度が高くなる傾向があり、一般の方や、不特定多数の人の利用などにおいて、補強材があることで地下空間に対する不安要素が軽減される可能性が示された。

その結果、補強材や節理、熱エネルギーや地下水の影響など多くの検討しなければならないことが見えてきた。大谷地域に関わりのある事業者が地中熱などエネルギー分野に携わっていることに加え、安全性という観点から、熱環境変化がどの程度地下空間に影響を及ぼすかを知るために数値解析を行った。解析条件は、地下空間の一部の温度が 10 年間 45℃になると仮定して、岩盤の温度上昇による熱膨張で、空洞の天盤部や底面部の鉛直変位がどの程度変化するかを確認した。その結果、空洞の天盤部も底面部も熱膨張により、鉛直上向きに変位が上昇する変化が見られ、天盤部は沈降量の減少、底面部は隆起量が増大するという結果になった。しかし、空洞の初期温度 13℃から 15℃前後の温度変化では、塑性に至るとされる変位量や、初期の変位量に対して大きな影響がないほど軽微な変位の変化であり、データセンターの利用や、貯蔵施設としての利用などの温度変化では、構造安定性に大きな影響がないことが確認された。

また、大谷資料館のレクリエーション価値の年次変化を知るために、トラベルコスト法を用いたアンケート調査を行い、2014 年度と 2015 年度の結果を比較した。その結果、レクリエーション価値に大きな変化がなく、2014 年から引き続き、大谷資料館における地下空間の観光資源としての価値が示された。また、今回得られたレクリエーション価値は、今後の大谷資料館あるいは大谷地域で観光分野における新たな試みなどが行われた際の、価値変化の一つの指標となるものと考えられる。今後も様々な手法や観点から大谷採石地下空間の利用方法を模索していくことや、実験データに基づき、より正確な安全性の検討を行っていくことで、大谷採石地下空間を 1 つの空間資源と捉えた利用方法に活用され、大谷地域の活性化に繋がると考える。

(2) 今後の課題

コンジョイントアンケートについては、回答者数を増やすことや、直接ヒアリングをすることで、より詳細に不安要素への影響を知る必要がある。また、地下空間内を利用する場合、事業者や利用者の視点から感性的に安全性を検討することは求められるが、近隣の住民がどのようなことに不安を感じているか、あるいは、どのような利用や対策をすることで、安全性に対する不安を軽減できるかを検討することも重要である。そのことにより、大谷採石地下空間跡での事業化を目指した際、影響のある項目への対策が、費用対効果に見合うものかどうかの指標になると考える。

トラベルコストによる価値評価については、今回年末の休日という期日に実施したので、今後は季節の影響や週末と平日の影響を考慮した実施など、年間を通しての価値評価を行う必要がある。

熱応力解析では、地下空間内の熱特性に着目し、構造安定性への影響を検討した。しかし、アンケートの結果にもあった、節理や地下水、補強材など熱環境以外の要因も数値解析による検討していくことが求められる。また、経年劣化や風化など時間依存の強度特性や温度変化による物性値の変化を解析に組み込むことで、より現実に近い条件を再現することも必要である。また、現地調査による計測を行うことで、実際のデータと、数値解析のデータの比較検討を行い、現地で計測を行っていない地下空間に対して数値解析で検討できるようにすることが必要である。

参考文献

- 1) 高橋 智信：事業化を目指した大谷採石地下空間の価値評価に関する研究(平成 26 年度 宇都宮大学工学部建設学科建設工学コース卒業論文), 2015.
- 2) 栗山 浩一：環境の価値と評価手法, 北海道大学図書刊行会, 1998.
- 3) 藤本 聡, 佐藤 浩, 濱田 俊一：国土技術政策総合研究所 プロジェクト研究報告, pp.157-232, URL: <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/kpr/prn0001.htm>, (2016 年 09 月参照).