

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

STUDY OF STRUCTURAL STABILITY FOR OYA UNDERGROUND QUARRIES BASED ON ITS EXPECTATION FOR THE ENTRANCE STRUCTURE

星野 天海¹・清木 隆文²

Amami HOSHINO¹, Takafumi SEIKI²

Many underground quarries for Oya tuff are ruined in Oya, Utsunomiya City, Tochigi Prefecture, Japan. And only a few of them are utilized unfortunately. Additionally Number of visitors decreased recently. Effective Attraction is needed to make the visitors increase there. To do that, it is important for us to use the advantage of the undergrounds. This study focuses to spread questionnaire to measure the expectation to entrance structure for the underground. And the authors measure the factor of the structural stability by numerical analysis. Finally we propose a way for evaluation method combing the expectation and the stability.

Key Words :Oya underground quarrey, entrance structure, expectation, structural stability, safety

1. はじめに

栃木県宇都宮市大谷町では採石跡地下空間が多数放置されており，現在，再利用されている地下空間は，ごく一部である．また，観光客数は減少傾向にあり，この現状を改善するため，地下空間を有効利用し，集客効果を図ることが求められている．このために，ポジティブな側面を生かすことが大谷採石地下空間への来客数を増やすための1つの手段だと考えられる¹⁾．よって，本研究ではこの先に「何かありそうな」「行ってみたい」というような地下空間入り口に対する期待感²⁾を既往の研究³⁾を参考にして，アンケート調査により分析する．また基礎的なアプローチとして，単純な地下空間入口形状を6種類示し，それぞれの安全性を力学的に解析することで，各形状の力学的評価と感性的評価の関係を考察することを目的とする．これらの結果に基づいて，感性と力学を総合した地下空間への入り口形状のあり方を検討する．

2. 大谷採石地下空間の入り口構造

大谷石採石地下空間の入り口構造は，横坑あるいは立坑であるが，立坑の方が多い．一方でその断面の形状は，その断面には，矩形がほとんどである(図-1)が，場所によっては，円形(あるいは半円形)，三角形断面が見られ



図-1 大谷石採石場の入口の例(左：矩形断面の横坑，右：矩形断面の立坑)

る．そこで本研究では，入り口構造として，立坑，横坑，断面形状として矩形，円形，三角形断面を検討対象とする．

3. 構造解析による安全性評価

本研究では，まず，地下空間入り口のひずみによる安全性評価をするために，立坑3つ，横坑3つの単純な構

キーワード：大谷石採石地下空間，入口，期待感，構造安定性，安全性

¹(株)ビジュアル(元宇都宮大学学生) Visual Co., Ltd., Post student of Utsunomiya University

²正会員 宇都宮大学准教授 大学院工学研究羽化 Assoc. Prof. Graduate school of Engineering, Utsunomiya University. (E-mail:tseiki@cc.utsunomiya-u.ac.jp)

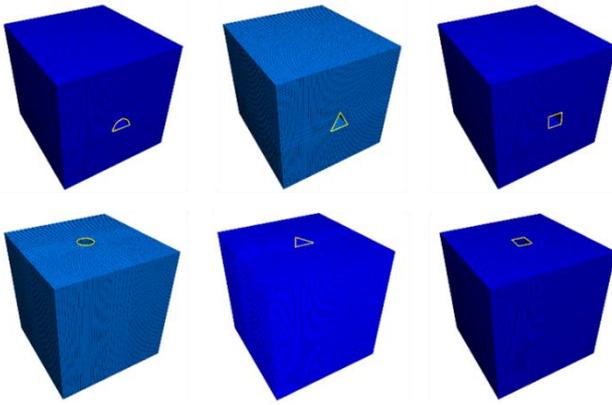


図-2 解析モデル(左：半円型断面，中央：三角形断面，右：四角形断面，上段：横坑，下段：立坑)

表-1 入り口解析に用いた大谷石の物性値

岩盤 (大谷石)		
物性	値	単位
体積弾性係数	1.38×10^9	Pa
せん断弾性係数	0.91×10^9	Pa
粘着力	2.1×10^6	Pa
内部摩擦角	30	°
引張強度	1.08×10^6	Pa
密度	1730	kg/m ³

造形状のモデルを対象に解析(図-2, 表-1)を行う。

(2) 解析モデルについて

本研究で用いた解析モデルを図-2 に、解析に用いた物性値を既往の研究をもとにより表-1 に示す。解析モデルは、50m×50m×53m の岩盤領域内の中心に断面積32m²で、奥行き50m(以下32m²×50m)の入口と、その先に10m×10m×2mの地下空間を仮定する(なお、本研究では、この32m²×50mの空間を入口部と呼ぶこととする。奥に設定した10m×10m×2mの地下空間は入口部に含まないものとする)。ただし、地下空間地面を地上から同じ深さとするため、横坑と立坑のそれぞれの地上からの深さを50mと仮定する。また、本来は、これらの物性として扱う弾性係数や密度等は、温度依存性や時間経過に伴う劣化による強度低下などを考慮すべきであるが、本研究では単純化のために考慮せず、一定値とした。なお、重力加速度は $g=9.81 \text{ m/s}^2$ とし、鉛直下向きに作用するとした。本解析では有限差分法による解析ソフトFLAC3D(Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, ITASCA 社製, Ver.5.0)によって地下空間入り口のひずみによる安全性評価を行う。

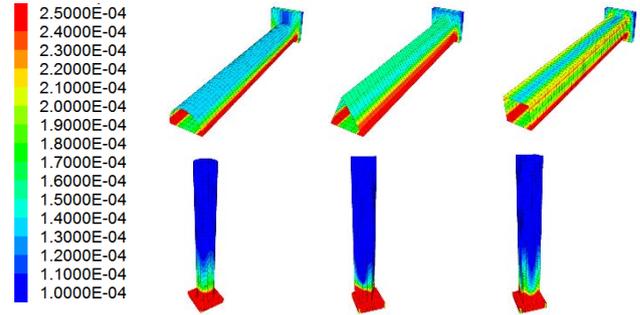


図-3 最大せん断ひずみのコンター(左：半円形断面，中央：三角形断面，右：四角形断面，上段：横坑下段：立坑)

表-2 安全性評価結果

	立坑		
	丸	三角	四角
Md(×10 ⁻⁴)	1.284	1.331	1.304
Ms	7.0	6.6	6.9
	横坑		
	丸	三角	四角
Md(×10 ⁻⁴)	1.866	1.972	1.966
Ms	2.0	1.0	1.1

(3) 構造の安全性評価について

本研究では、安全性の評価は、最大せん断ひずみ分布の広がりに基づき、式(1)を危険指標 M_d として定める。

$$\text{危険指標 } M_d = \frac{\sum(\text{ひずみ}\varepsilon_i \times \text{面積}A_i)}{\text{入口部側面表面積}} \quad (1)$$

ただし、ひずみ ε_i はひずみの大きさによって分けられた各色の値、面積 A_i はその各色部分の面積である。 M_d は、入口部の側面表面積で除して基準化した指標である。この値が小さいほど安全性が高いことを示す。なお、解析範囲は、奥行き10mの入口部であり、その先の地下空間部(10m×10m×2m)は解析に含めないものとする。最終的に本研究では、危険指標 M_d から地下空間入口部の安全性評価値 M_s は、式(1)で得られた危険指標 M_d の最大値に対して安全性の評価値を1、また、危険指標の最小値に対して安全性の評価値を7とし、その間の M_d に対しては M_s の値を比例させて与え、安全性の評価値 M_s を定める。なお、 M_s として数値1~7を与えるのは、快適性の評価値を1~7としたことと合わせるためである。

(3) 解析結果

解析結果を図-2 に示す。横坑は、側面部と底面の接続部の最大せん断ひずみの増分が大きくなる傾向を示す。また立坑と横坑で比較すると、横坑は入口部分(奥行き50m)全域に立坑より大きい土被り圧が作用するので、

表-3 本研究で使用した形容詞対

	尺度	
a	適当な大きさ	— 不十分な大きさ
b	引きつける	— 引きつけない
c	清潔な	— 汚い
d	刺激的な	— 刺激的でない
e	快適な	— 不快な
f	完全な	— 不完全な
g	管理された	— 管理されない
h	もろい	— がっしりした
i	広がりのある空間	— 限られた空間
j	装飾的な	— こざっぱりとした
k	居心地の良い	— 堅苦しい
l	その気にさせる	— やめさせる
m	おもしろい	— おもしろくない
n	気をそそる	— ぞっとする
o	開放的	— 閉鎖的
p	楽しい	— いらいらさせる
q	安全な	— 危険な
r	安らぎを与える	— 平穏を乱す
s	人気のある	— 人気のない
t	愉快的な	— 不愉快的な
u	爽快にする	— 疲れさせる
v	バランスの取れた	— バランスの取れない
w	広い	— 狭い

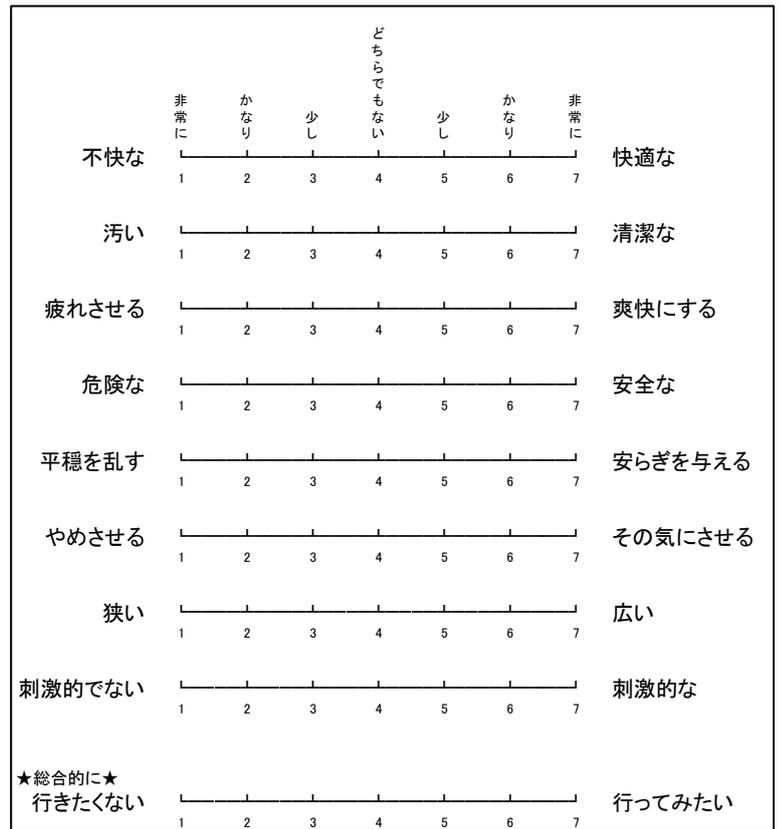


図-5 期待感アンケート回答用紙



図-4 アンケートに用いた写真の原画
(ポストイナ鍾乳洞⁹入口部, スロベニア)

造全体が変形している。表-2 に解析結果から得られた危険指標および、安全性評価値を示す。今回の条件では、横坑は入口部分(奥行き 10 m)全域に立坑より大きい土圧がかかり、全体的に変形するので、立坑の安全性評価値が横坑よりも高い結果となった。

4. アンケート調査による期待感評価

(1) 期待感評価尺度の構成

地下空間への入口部(入口構造の表面)を感性的に評価するための尺度(形容詞)を選ぶためのアンケートを行っ

た。これは、実際に行うアンケートの予備調査である。この調査では、地下空間入口部の画像のサンプルを被験者に見せて、アンケート用紙に示された形容詞(尺度)に基づき、感じたままに回答してもらった。本研究では、表-3 に示す 23 種の形容詞対を用いた。ここに示した形容詞対は、過去に地下街のアンケートに用いられた Kasmer の環境評価尺度³と呼ばれる形容詞対の中から、筆者らが適切と考えて選んだものである。それぞれ、後に示す図-5 のように、「非常に」「かなり」「少し」「どちらでもない」で表現される 7 段階のスケールを与えている。被験者は、画像を見て、心に感じたまま、各形容詞対のスケールに印をつける。アンケートに使用した画像は、図-4 を基準に、色相を変化させたもの 7 種類、コントラストを変化させたもの 7 種類の計 14 枚である。なお、アンケートの被験者は、大学教員、学生から構成される 7 名である。

(1) 期待感評価アンケートの実施

期待感アンケートは、前節で選んだ 8 種類の尺度(形容詞)と、地下空間入口の総合的な期待感の評価を行うための「行ってみたい—行きたくない」の尺度を加えて行った(図-5)。評価に用いる画像は、図-1 などに示す大谷地区の空洞入口の写真をもとに画像ソフト(Adobe Photoshop)を用いて作成した、図-6 に示す 6 種類の画像であ

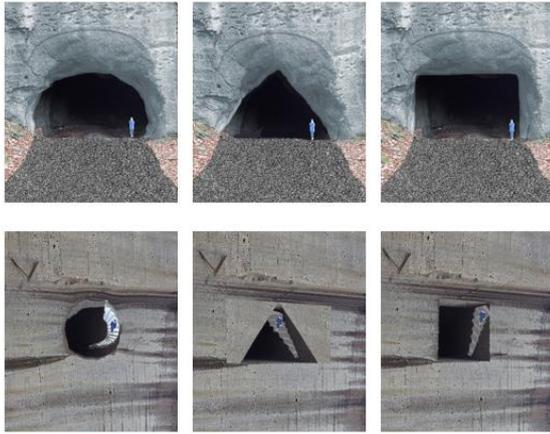


図-6 アンケートに用いた写真の原画
(ポストイナ鍾乳洞⁴⁾入口部, スロベニア)

表-3 本研究で使用した形容詞対

	(min.rate)1 ←→ 7(max.rate)	横坑			立坑		
		丸	三角	四角	丸	三角	四角
X ₁	不快な - 快適な	4.13	3.31	4.40	3.57	3.36	3.51
X ₂	汚い - 清潔な	4.05	3.73	4.32	4.07	3.79	3.89
X ₃	疲れさせる - 爽快にする	4.21	3.41	4.23	3.24	3.11	3.31
X ₄	危険な - 安全な	3.65	2.95	4.57	2.93	2.64	3.24
X ₅	平穩を乱す - 安らぎを与える	4.13	3.25	4.17	3.31	3.09	3.31
X ₆	やめさせる - その気にさせる	4.35	3.63	4.13	3.80	3.47	3.49
X ₇	狭い - 広い	4.91	3.04	5.23	2.71	2.63	3.76
X ₈	刺激的でない - 刺激的な	4.12	4.44	3.63	4.99	4.43	4.16
y	行きたくない - 行ってみたい	4.51	3.64	4.16	4.15	3.41	3.65

る。なお、各空間のイメージがつかみやすいように、人物(身長 165 cm)の写真を埋め込んだ。被験者に画像を見せ、深く考え込まず、感じたままに回答用紙(図-4)に当てはまる尺度に回答してもらう。なお、回答所要時間は7分程とした。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学部1年生を含む75名の被験者に対し、アンケート調査を実施した。

(2) アンケート評価結果

本研究では、得られたアンケート結果から、各尺度上で良いイメージを捉えられる点側を7、悪いイメージで捉えられる点側を1(例えば、「非常に快適な」を7、「非常に不快な」は1とする)とし、被験者の回答の平均値を求めた(表-3)。アンケート結果から得られた期待感(行ってみたいか)に対する値の最大値に対して期待感評価値 M_e を7、また、最小値に対して期待感評価値を1とし、その間の値に対しては M_e の値を比例的に与え、期待感評価値 M_e を定める。なお、回答者の男女比は凡そ3:2である。アンケート作成時は、立坑の方が内部の様子がわからず、探究心をくすぐられ、期待感が高いと予想していた。しかし、結果は、各形状に比較すると、横坑の方が期待感が高い。理由として、横坑は自身の着地点が明確に把握できていることに対し、立坑は足を踏み外すと落ちてしまうかもしれない、といった恐怖や不安感を抱くからではないか、と考えることができる。

5. 総合評価

感性的評価結果として期待感評価値を用い、また、力学解析結果から求めた安全性評価値を用いて、総合的に地下空間入口形状の評価を行うために、本研究では、次に示す評価式(2)を与える。

$$M = \alpha_s M_s + \alpha_e M_e \quad (2)$$

ここに、 α_s および α_e ($\alpha_s + \alpha_e = 1$)は、それぞれ、力学的安全性評価、および、期待感評価に対する重みであり、これらは対象構造物の用途や目的などによって決定されるものである。たとえば、その構造物がシェルターや避難施設など安全性だけに特化したものであれば、 α_s に1を、 α_e に0を代入し求める。

図-7(a)に前節のアンケート結果から得られた期待感評価値 M_e (表-3の「行ってみたい-行きたくない」の定量値)、および、第2章で解析に基づいて得られた安全性評価値 M_s をプロットする。同図には、期待感評価と安全性評価の重みを同じとした場合($\alpha_s = \alpha_e = 0.5$)の総合評価式(2)を実線で図示している。この図から、感性、および、力学によって総合評価した地下空間入口形状の順位を M の値の大小によって示すことができる(表-4.8)。立坑丸型が総合的に最も良い形で、横行三角型が最も順位が低い。同様に、期待感評価の重みを大きくした場合($\alpha_s = 0.3$, $\alpha_e = 0.7$)の総合評価式(2)と M_e と M_s の関係を図-7(b)に、安全性評価の重みを大きくした場合($\alpha_s = 0.7$, $\alpha_e = 0.3$)の総合評価式(2)と M_e と M_s の関係を図-7(c)に示す。図-8に期待感評価と安全性評価の組み合わせに対する、地下空間入口形状の総合評価結果(順位)を示す。重み α_s 、および、 α_e の値が変化すると、各坑の順位が著しく変動すると予想していたが、結果は、 α_e (期待感評価値の重み)がおおよそ0.5以上でない限り、順位の変動は見られなかった。各構造の順序があまり変わらない理由は、安全性評価において立坑と横坑の評価値の差の開きが大きいことが挙げられる。また、この差が大きいことにより、立坑間、および、横坑間の各形状の安全性評価値に差があまりつかなかった。この総合評価の具体的な利用方法について、例えば、対象とする地下空間がアドベンチャー施設など観光客向けの集客効果を測るような空間としたいとき、 α_s に0.3を α_e に0.7を代入し評価する。結果は、各坑の丸型が比較的高い評価値となり、この条件では最も適している形状であると評価される。一方で、シェルターのような安全性だけを求めているような場合は、 α_s に1を、 α_e に0を代入指標化する。結果は、今回の条件では立坑が安全性に優れ、その中でも丸型が最も適している形状であると評価できる。このように、総合評価を行うことで、目的や用途に応じた地下空間入口形状を提案することが可能になる。

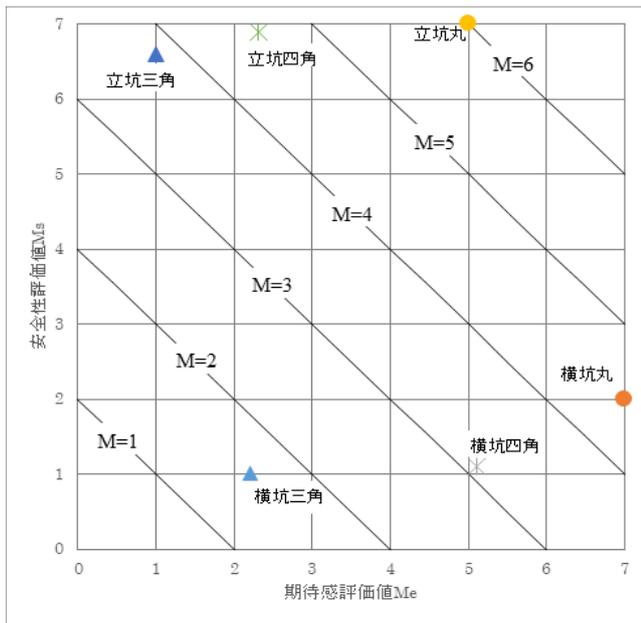


図-7 (a) 総合評価(期待感評価と安全性評価の重みが等しい場合($\alpha_s = \alpha_e = 0.5$ の場合))

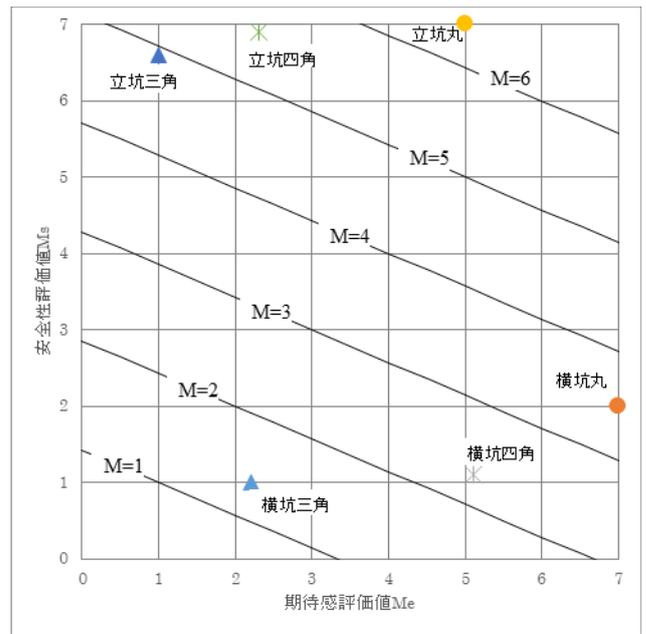


図-7(c) 総合評価(安全性評価の重みが大きい場合($\alpha_s = 0.7$, $\alpha_e = 0.3$ の場合))

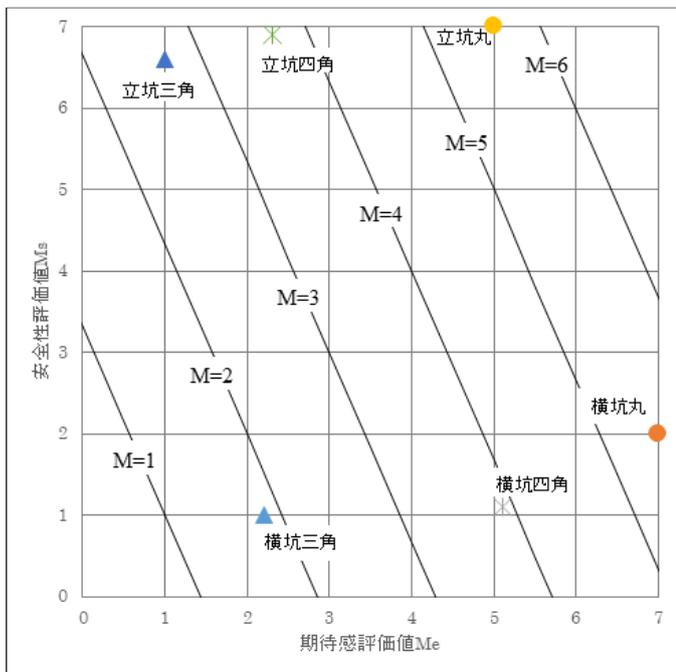


図-7(b) 総合評価(期待感評価の重みが大きい場合($\alpha_s = 0.3$, $\alpha_e = 0.7$ の場合))

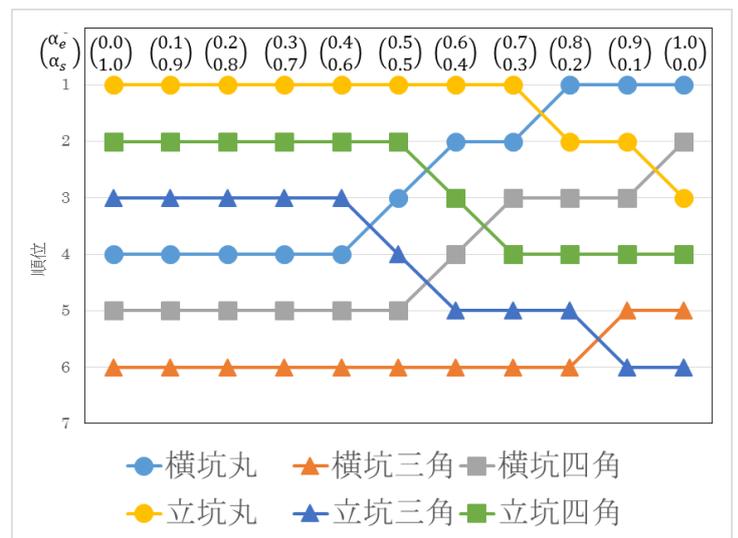


図-8 総合評価結果

6. まとめ及び今後の課題

(1) まとめ

本研究では、感性と力学を総合して地下空間入口形状のあり方を検討するという考えに基づき、安全性評価と期待感評価を総合する1つの評価方法を示した。

安全性評価においては、最大せん断ひずみの広がり具合に基づき、評価する指標を与えた。その結果、今回の条件では立坑丸型が最も安全性が高い(表-2)。

期待感評価においては、形容詞対による尺度を用いて

アンケートを行い、地下空間入口形状への期待感について分析した。その結果、期待感の高い形状は丸型、四角型、三角型の順である(表-3)。

総合評価では、安全性評価値と期待感評価値を総合評価する評価式を示した。今回の条件では、期待感の重みが大きくなるにつれ、横坑の順位が上がっていくという事、順位が著しく変わる中で横坑三角型は常に評価が低い事がわかり、感性と力学による評価結果を個々に論じるのではなく、総合して議論することが可能となることを示した。

(2) 今後の課題

本研究では、地下空間入口部のデザインの方法を新し

く構築して、その適用の可能性を検討することに主眼をおいたため、研究としては基礎的な段階にあり、今後さらに検討すべき課題がある。

本研究では、期待感評価と安全性評価に用いた架空の地下空間入口部について、期待感評価では入口構造の表面に着目しアンケート調査を行い分析したが、安全性評価では境界条件の影響を小さくするために入口の奥行きを伸ばしたことによりモデル全域の評価となってしまう、期待感評価と安全性評価で入口部の着眼点が少々異なっている。そこで対象とする地下空間入口をどのように設定するのか検討することは今後の課題である。

また、期待感評価におけるアンケート被験者は学生が中心であったが、年齢層、職種、性別、地域、国籍などの差異が、評価結果にどの程度影響を及ぼすかについても調査、検討することは重要である。また、アンケート回答項目を7段階評価にしたため、3や4、5など中間評価値にチェックを入れる人が多かった。そのため、形状ごとの差が出にくかった。質問は答えにくいものであったのか、7段階評価は適切なものであったか、見直す必要がある。

また、安全性評価においても、本研究では、入口部表面に生じるせん断ひずみを用いた⁹⁾が、単純に安全率で

評価する方法とどちらが有効であるのか、また、より複雑な形状を持つ入口に対しての取り扱いについても検討することが必要である。

参考文献

- 1) 宇都宮市経済部 都市魅力創造課 大谷振興室主任 佐藤大地：大谷石採取場跡地内の冷熱エネルギーを軸とした取組について～事業と雇用の創出による地域振興～、第4回地域プロジェクト推進会議、2017。
- 2) 今泉暁音：感性と力学を融合した地下空間形状のデザイン手法に関する基礎的研究、平成22年度 山口大学大学院理工学研究科 博士論文、2010。
- 3) 松本直司・近久博志・加藤毅・勝崎香奈：地下空間における期待感～空間拡大時の期待感位置とその強さ～、土木学会論文集 No.777/VI-65,pp139-147,土木学会, 2004.12。
- 4) ポストイナ鍾乳洞：https://www.postojnska-jama.eu/en/?setLocale=en_US, (2018年9月 確認)。
- 5) 櫻井春輔, 川嶋幾夫, 大谷達彦, 松村真一郎：トンネルの安定性評価のための限界せん断ひずみ, 土木学会論文集No.493, III-27, pp.185-188, 1994。